



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**CAMPINA GRANDE
PARAÍBA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA

DISSERTAÇÃO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

**AVALIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS ABERTOS
EM DECLIVE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO ALGÉBRICA**

JOÃO AUDIFAX CÉZAR DE ALBUQUERQUE FILHO

Campina Grande – Paraíba
Novembro de 1991

**AVALIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS ABERTOS
EM DECLIVE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO ALGÉBRICA**

JOÃO AUDIFAX CÉZAR DE ALBUQUERQUE FILHO

Engenheiro Civil

**Dissertação apresentada ao curso de Pós -
Graduação em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para a
obtenção do título de Mestre em Irrigação
e Drenagem.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM
ORIENTADOR: PROFESSOR Dr. FRANCISCO DE SOUZA**

CAMPINA GRANDE – PB

Novembro - 1991

FICHA CATALOGRÁFICA

Biblioteca da Universidade Federal da Paraíba - Campus II - Campina Grande

- A345a Albuquerque Filho, João Audifax César de.
Avaliação de irrigação por sulcos abertos em declive através de simulação algébrica / João Audifax César de Albuquerque Filho. – Campina Grande: UFPB, 1991.
104 p: il.
Inclui Bibliografia.
Dissertação (Mestrado) – UFPB / DEAg
1. Irrigação por sulco, 2. Modelo matemático, 3. Avaliação de irrigação.

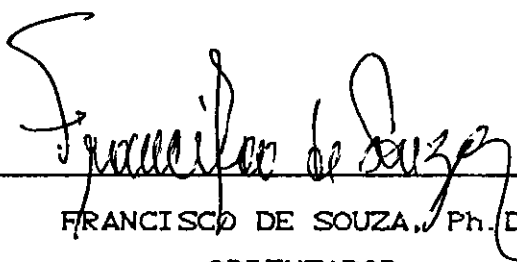
CDU: 631.674.1

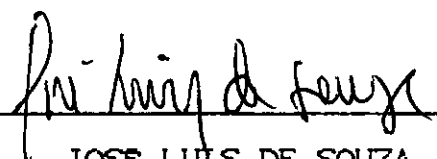
AVALIAÇÃO DE IRRIGAÇÃO POR SULCOS ABERTOS
EM DECLIVE ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO ALGÉBRICA

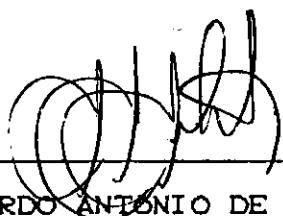
POR

JOÃO AUDIFAX CÉZAR DE ALBUQUERQUE FILHO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 08 . 11 . 1991


FRANCISCO DE SOUZA, Ph.D.
ORIENTADOR


JOSE LUIS DE SOUZA, Dr.
EXAMINADOR INTERNO


ABELARDO ANTONIO DE ASSUNÇÃO MONTENEGRO, M. S.
EXAMINADOR EXTERNO

A memória de meu pai **AUDIFAX** e a minha mãe **DORA**, pelo exemplo de trabalho que norteou os meus passos e pela dedicação em benefício do progresso intelectual e moral de seus filhos.

À minha esposa **IÊDA** e aos filhos **NETO**, **AMANDA** e **LUANNA**, pela compreensão.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

O AUTOR AGRADECE:

Ao Senhor **Jesus Cristo**; Nosso Glorioso Pai Celestial; por sua fé; saúde; confiança; disposição; e perseverança.

A seu irmão, Engenheiro Civil, Dr. Frederico Sérgio Vieira Cezar de Albuquerque; um verdadeiro amigo e companheiro; pelo apoio em todas as etapas do curso e deste trabalho, que viabilizou a realização do mesmo.

A Universidade Federal da Paraíba, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o Curso de Pós-Graduação.

Ao Conselho Nacional e Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro que possibilitou a realização do Curso de Pós-Graduação.

Ao Prof. Dr. José Dantas Neto, da (UFPB), por sua amizade; confiança; incentivo; sua valiosa orientação inicial ao trabalho, e empréstimo de material bibliográfico.

Ao Prof. Dr. Francisco de Souza da (UFC), como orientador deste trabalho, por sua valiosa colaboração e sugestões, as quais tornaram possível a realização do mesmo.

Ao Prof. Dr. Abelardo Antonio de Assunção Montenegro da (UFRPE), seu colega e amigo, por sua valiosa contribuição ao trabalho e suas correções; na qualidade de examinador externo.

Ao Prof. Dr. José Luiz de Sousa da (UFPB), pelas valiosas correções, e sugestões deste manuscrito; na qualidade de examinador interno.

Aos professores Dr. Hans Raj Gheyi e Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra, na qualidade de Coordenadores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, por sua dedicação e zelo junto aos mestrandos.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) através do Departamento de Tecnologia Rural (DTR), e aos Colegas da Área de Recursos Hídricos, pela oportunidade concedida para concluir este trabalho.

A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PRPPG) da (UFRPE), na pessoa do Pró-Reitor, Dr. Emídio Cantídio de Oliveira Filho, pelo apoio financeiro que viabilizou a conclusão desta Dissertação.

Ao Prof. Dr. Carlos Vieira de Azevedo; na qualidade de Coordenador atual do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola; pelo apoio, compreensão e paciência, durante a preparação e entrega deste exemplar corrigido e atualizado.

Ao Colega e Amigo da (UFPB), Engenheiro Agrícola, Roberto Vieira Pordeus pela colaboração na formatação final deste manuscrito.

A todos os Professores do Curso; por sua dedicação.

A todos os Colegas de Curso; pelo apoio, amizade, e companheirismo.

Enfim, a todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para o êxito deste trabalho.

DADOS BIOGRÁFICOS DO AUTOR

João Audifax Cezar de Albuquerque Filho, nasceu na cidade de Recife-PE, aos vinte e nove dias do mês de Janeiro do ano de 1955, filho de João Audifax Cezar de Albuquerque e Maria Auxiliadora Vieira Cezar.

Concluiu a sua formação básica na cidade de origem, sendo o primeiro grau no Colégio Estadual de Olinda, e o segundo grau concluído no Colégio de São Bento na cidade de Olinda-PE.

Obteve o título de Engenheiro Civil na Universidade Católica de Pernambuco na cidade de Recife-PE, no período de 1975 a 1981.

Ingressou no mestrado em Engenharia Agrícola no ano de 1988, na área de concentração Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal da Paraíba – Campus II, Campina Grande – PB.

SUMÁRIO

| | Páginas. |
|---|-----------|
| LISTA DE FIGURAS | x |
| LISTA DE TABELAS | xii |
| RESUMO | xvi |
| ABSTRACT | xvii |
| 1.0 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2.0 REVISÃO DE LITERATURA | 3 |
| 2.1 - Fase de avanço | 7 |
| 2.1.1 - Fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial do solo | 23 |
| 2.2 Fase de recessão | 29 |
| 2.3 Eficiência e uniformidade de irrigação | 35 |
| 2.3.1 Eficiência de aplicação de água | 37 |
| 2.3.2 Eficiência de armazenamento | 42 |
| 2.3.3 Uniformidade de distribuição da água | 44 |
| 2.3.4 Perda por percolação profunda | 46 |
| 2.3.5 Perda por escoamento superficial | 50 |
| 3.0 MATERIAL E MÉTODOS | 53 |
| 3.1 Fase de avanço | 54 |
| 3.1.1 Fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial | 55 |
| 3.1.1.1 Fatores de Forma Estimados | 55 |
| 3.1.1.2 Cálculo dos fatores de forma, segundo (SOUZA, 1981) | 56 |
| 3.1.1.3 Cálculo dos fatores de forma segundo (FOK & BISHOP, 1965) | 57 |
| 3.1.1.4 Cálculo dos fatores de forma, conforme a média ponderada dos pontos isolados calibrados da curva experimental | 57 |
| 3.1.2 Área da seção transversal do fluxo | 60 |
| 3.1.3 Área infiltrada acumulada | 61 |
| 3.2 Fase de recessão | 62 |
| 3.2.1 Curva de recessão – Hipótese I | 63 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2.2 Tempo de recessão superior ao tempo de aplicação - Hipótese II | 64 |
| 3.2.3 Tempo de recessão igual ao tempo de aplicação - Hipótese III | 65 |
| 3.3 Perfil de distribuição espacial da água na irrigação por sulcos | 65 |
| 3.3.1 Tempo de oportunidade de infiltração | 66 |
| 3.3.2 Volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco | 66 |
| 3.3.3 Lâminas infiltradas ao longo da parcela | 67 |
| 3.4 Simulação do escoamento superficial | 68 |
| 3.4.1 Cálculo do escoamento superficial, conforme Hipótese I | 68 |
| 3.4.1.1 Cálculo do escoamento superficial ocorrido antes da recessão | 68 |
| 3.4.1.2 Cálculo do escoamento superficial ocorrido durante a recessão | 69 |
| 3.4.2 Escoamento superficial, conforme Hipótese II | 71 |
| 3.4.3 Escoamento superficial, conforme Hipótese III | 72 |
| 3.5 Cálculo do volume de escoamento superficial com os dados experimentais | 73 |
| 3.6 Eficiência e uniformidade de irrigação | 74 |
| 3.6.1 Parâmetros de eficiência e uniformidade, considerando-se o perfil de distribuição como uma curva | 76 |
| 3.6.2 Parâmetros de eficiência e uniformidade, considerando-se o perfil de distribuição linear | 77 |
| 3.6.2.1 Cálculo do volume percolado | 78 |
| 3.6.2.2 Cálculo do volume útil | 79 |
| 3.6.2.3 Cálculo dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação | 80 |
| 3.6.2.4 – Cálculo do volume infiltrado | 81 |
| 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 83 |
| 4.1 Efeito dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial sobre o avanço | 84 |
| 4.2 Efeito da recessão sobre o perfil de infiltração na irrigação por sulcos | 95 |

| | |
|---|-----|
| 4.3 Efeito da recessão sobre o volume de escoamento superficial e sobre os parâmetros de eficiência | 102 |
| 5.0 CONCLUSÕES | 110 |
| 6.0 RECOMENDAÇÕES | 112 |
| 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 113 |
| ANEXO A: NOTAÇÕES | 118 |
| ANEXO B: TABELAS | 121 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página. |
|---|---------|
| Figura 2.1 - Diagrama esquemático mostrando as fases da irrigação superficial (Após SOUZA, 1983) | 4 |
| Figura 2.2 – Definição esquemática do método de Hall para determinação do avanço da água sobre faixas. | 11 |
| Figura 2.3 – Esquema mostrando a lâmina infiltrada e a lâmina superficial durante a fase de avanço na irrigação por sulcos (Após LEVIEN, 1985) | 18 |
| Figura 2.4 – Elementos geométrico transversal parabólico de um sulco de irrigação (Após LEVIEN, 1985). | 19 |
| Figura 2.5 – Monograma de Kiefer para obter o valor de “F” como uma função de “b” e “a” (Após FOK & BISHOP, 1965) | 27 |
| Figura 2.6 – Volume superficial esquemático: fase de depleção (Após LEVIEN, 1985) | 34 |
| Figura 2.7 – Volume superficial esquemático: fase de recessão (Após LEVIEN, 1985) | 35 |
| Figura 2.8 – Percentagem de perda por percolação profunda, abaixo da zona radicular, função de valores de (a) e (R) (Após BISHOP, 1961) | 48 |
| Figura 4.1 – Curvas de avanço ajustadas, simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, com fatores de forma variados comparados com dados de campo ajustados (Dados de RAMSEY). | 93 |
| Figura 4.2 - Curvas de avanço ajustadas, simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, com fatores de forma variados, comparados com dados de campo ajustados (Dados de HORTICULTURES) | 93 |
| Figura 4.3 – Curvas de avanço ajustados, simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, com fatores de forma variados, comparados com dados de campo ajustados (Dados de STIEBEN). | 94 |
| Figura 4.4 – Curvas de avanços ajustadas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, com fatores de forma variados, comparados com dados de campo ajustados (Dados de BENSON). | 94 |

- Figura 4.5 – Curvas de recessão R_1 R_2 e R_3 , simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, comparados com dados de campo ajustados (Dados de RAMSEY). 98
- Figura 4.6 – Curvas de recessão R_1 R_2 R_3 , simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, comparados com dados de campo ajustados (Dados de HORTICULTURE). 98
- Figura 4.7 – Curvas de recessão R_1 R_2 R_3 , simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, comparados com dados de campo ajustados (Dados de STIEBEN). 99
- Figura 4.8 – Curvas de recessão R_1 R_2 R_3 simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, comparados com dados de campo ajustados (Dados de BENSON). 99
- Figura 4.9 – Lâmina de irrigação requerida e perfis de infiltração simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com os três casos de recessão, comparados com os dados de campo ajustados (Dados de RAMSEY) 100
- Figura 4.10– Lâmina de irrigação requeridas perfis de infiltração simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, com os três casos de recessão, comparadas com dados de campo ajustados (Dados de HORTICULTURE) 100
- Figura 4.11 – Lâmina de irrigação requerida e perfis de infiltração simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, com os três casos de recessão, comparados com dados de campo ajustados (Dados de STIEBEN) 101
- Figura 4.12 – Lâmina de irrigação requerida e perfis de infiltração simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com os três casos de recessão, comparados com dados de campo ajustados (Dados de BENSON) 101

LISTA DE TABELAS

| | Página |
|--|--------|
| Tabela 01 – Dados de campo utilizados na análise da irrigação por sulcos | 84 |
| Tabela 02 – Comparação dos valores dos perfis de forma superficial (r_s) e subsuperficial (r_u) estimados e os encontrados com a expressão de Souza; Fok & Bishop e a média ponderada. | 85 |
| Tabela 03 – Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de RAMSEY, calibrados com a equação (3.18) | 87 |
| Tabela 04 – Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de HORTICULTURE, calibrados com a equação (3.18) | 87 |
| Tabela 05 - Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de STIEBEN, calibrados com a equação (3.18) | 88 |
| Tabela 06 – Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de BENSON, calibrados com a equação (3.18) | 88 |
| Tabela 07 – Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o método dos Mínimos Quadrados que estima os dados de Ramsey da Tabela B-09 | 90 |
| Tabela 08 - Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o método dos Mínimos Quadrados que estima os dados de Horticulture da Tabela B-10 | 90 |
| Tabela 09 - Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o método dos Mínimos Quadrados que estima os dados de Stieben da Tabela B-11 | 91 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 10 - Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o método dos Mínimos quadrados que estima os dados de Benson da Tabela B-12 | 91 |
| Tabela 11 - Desvio médio das estimativas das curvas de avanço, simuladas com fatores de forma variados, em relação as de campo ajustadas, com os exemplos estudados especificados | 92 |
| Tabela 12 - Desvio médio das curvas de recessão e dos perfis infiltrados correspondentes, simulados pelo modelo algébrica de LEVIEN, considerando-se os três casos de recessão, em relação aos dados de campo estimados, com os exemplos estudados especificados. | 97 |
| Tabela 13 - Comparação dos volumes infiltrados V_z (m^3) dos volumes de Runoff V_{ro} (m^3), simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com os volumes V_{zp} (m^3) e V_{rop} (m^3) estimados do perfil linear infiltrado, considerando-se os três casos de recessão com os exemplos especificados | 105 |
| Tabela 14 - Volume infiltrado V_{zr} (m^3) e de Runoff V_{ror} (m^3) estimados com dados observados, com os exemplos especificados, considerando-se o perfil de distribuição espacial da água infiltrada. | 105 |
| Tabela 15 - Comparação dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação, considerando-se os três casos de recessão com os exemplos especificados. | 108 |
| Tabela 16 - Parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação estimados com dados observados dos exemplos especificados. | 109 |
| Tab.B-01 - Distância de avanços simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores variados, através de dados observados de RAMSEY. | 121 |
| Tab.B-02 - Distância de avanço simulado pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, através de dados observados de HORTICULTURE. | 122 |

| | |
|--|-----|
| Tab.B-03 - Distâncias de avanço simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, através de dados observados de STIEBEM. | 123 |
| Tab.B-04 - Distância de avanços simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, através de dados observados de BENSON. | 124 |
| Tab.B-05 - Dados de avanço e recessão de RAMSEY. | 125 |
| Tab.B-06 - Dados de avanço e recessão de HORTICULTURE | 125 |
| Tab.B-07 - Dados de avanço e recessão de STIEBEN FARM. | 126 |
| Tab.B-08 - Dados de avanço e recessão de BENSON FARM. | 127 |
| Tab.B-09 - Comparação dos tempos de avanços simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de formas variados e os de campo com dados de RAMSEY, estimados pelo método de Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes. | 128 |
| Tab.B-10 - Comparação dos tempos de avanço simulados pelo modelo algébricos de LEVIEN com fatores de forma variados e os de campo com dados de HORTICULTURE, estimados pelo método dos Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes. | 128 |
| Tab.B-11 - Comparação dos tempos de avanços simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados e os de campos com dados de STIEBEN, estimados pelo método dos Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes. | 129 |
| Tab.B-12 - Comparação dos tempos de avanços simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados e os de campo com dados de BENSON FARM, estimados pelo método de Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes. | 130 |
| Tab.B-13 - Avanço e recessão com fatores de forma (r_{y5} r_{z5}), simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (R_c) de RAMSEY. | 131 |

| | |
|---|-----|
| Tab.B-14 - Avanço e recessão com fatores de forma (r_{y5} r_z^5) simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (Rc) de HORTICULTURE. | 132 |
| Tab.B-15 - Avanço e recessão com fatores de forma (r_{y5} r_z^5), simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (Rc) de STIEBEN. | 133 |
| Tab.B-16 - Avanço e recessão com fatores de forma (r_y^5 r_z^5) simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (Rc) de BENSON. | 134 |
| Tab.B-17 - Lâminas infiltradas simulada pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Zc) de RAMSEY. | 135 |
| Tab.B-18 - Lâminas infiltradas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Zc) de HORTICULTURE. | 136 |
| Tab.B-19 - Lâminas infiltradas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Zc) de STIEBEN. | 137 |
| Tab.B-20 - Lâminas infiltradas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Zc) de BENSON. | 138 |
| Tab.B-21 - Volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de RAMSEY. | 139 |
| Tab.B-22 - Volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de HORTICULTURE. | 139 |
| Tab.B-23 - Volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de STIEBEN. | 140 |
| Tab.B-24 - Volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de BENSON. | 141 |

RESUMO

Aplica-se no presente trabalho modelo matemático proposto por LEVIEN & SOUZA (1987), utilizando metodologia computacional, especificamente desenvolvida para análise de performance dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive. Avalia-se a influência dos fatores de forma sobre o avanço e o efeito da curva de recessão no desempenho do processo completo da irrigação por sulcos, através da comparação dos resultados simulados com aqueles obtidos experimentalmente por RAMSEY (1976) e pelo Departamento de Agricultura e Engenharia Química do Estado do Colorado (1979). Os resultados demonstram a viabilidade da calibração dos fatores de forma obtidos através de expressão baseada em balanço de volume, bem como a aplicabilidade de fatores de forma recomendados pela literatura e os representados pela média ponderada na simulação da fase de avanço. No prognóstico da fase de recessão, verifica-se um melhor desempenho na aplicabilidade do modelo em sulcos curtos (menores que 200 metros); no entanto, para análise de sulcos longos (maiores que 200 metros), propõe-se o uso da recessão instantânea.

ABSTRACT

This research deals with a mathematical model developed by LEVIEN & SOUZA (1987) using computational tools especially applied for performance analysis of opened furrow irrigation systems with uniform slope. The shape factors influence on advance phase and recession curve effect on global evaluation of furrow irrigation have been discussed through a comparison of simulated results to experimental data from RAMSEY (1976) and Agricultural and Chemical Engineering Department of Colorado State (1979). The results have shown the feasibility of shape factors fitting from analytical expression based on volume balance analysis, besides the applicability of the shape factors recommended by the literature and those obtained from weighed average in the advance phase simulation. In prediction of the recession phase, a better performance can be met for short furrows (smaller than 200 meters); however, for long furrows analysis (larger than 200 meters), an instantaneous recession condition must be considered in order to have an adequate simulation.

1.0 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, vários modelos matemáticos foram desenvolvidos para analisar e representar a hidrodinâmica da irrigação superficial. Esses modelos, com diferentes graus de complexidade e precisão requerem parâmetros representativos para processamento, tais como as características de infiltração, a geometria da seção transversal de escoamento, o coeficiente de rugosidade hidráulica da superfície, a vazão a ser derivada, o comprimento e declive da parcela, o tempo de aplicação de água e o incremento de tempo desejado no processamento.

O fluxo de água superficial pode ser caracterizado como não permanente e espacialmente variado, apresentando gradual decréscimo da vazão, devido à infiltração. Tendo em vista a complexidade da formulação matemática para representação de escoamentos não permanentes em superfície livre, as soluções das equações envolvidas requerem tratamento numérico aproximado através de modelos computacionais. Com esse enfoque, podemos destacar os modelos hidrodinâmico e zero-inércia.

Vários pesquisadores apresentaram soluções simplificadas para resolver as equações que governam o fluxo superficial. As hipóteses básicas assumidas são: o tipo de função representada pela superfície da água durante a fase de avanço é a mesma para todos os incrementos de tempo, e a lâmina de irrigação é a lâmina normal na cabeceira da parcela, determinada por uma equação de resistência para fluxo uniforme. Estas hipóteses fornecem os meios necessários para computar o volume de água superficial.

No cálculo do volume subsuperficial, são apresentadas na literatura soluções distintas, baseadas em métodos numéricos, considerando a equação de infiltração do tipo KOSTIAKOV; no entanto, a forma mais simples para o cálculo dos volumes superficial e subsuperficial, necessário aos modelos algébricos, considera as áreas médias constantes

durante a fase de avanço. Estas áreas médias são substituídas pelas áreas no ponto de derivação da água, multiplicadas por fatores de forma adequados.

Os modelos algébricos apresentam a vantagem de envolver soluções simplificadas, as quais são tão mais próximas dos modelos complexos quanto mais representativos forem os valores atribuídos a fatores de forma dos perfis de escoamento superficial e subsuperficial, ao perímetro molhado, e uma boa representação da recessão.

A fase de recessão é dependente do volume de água armazenado na superfície do solo e da taxa de avanço da água na parcela. No caso de sulcos de reduzida seção de escoamento, e dependendo da magnitude do gradiente de declive da superfície e da taxa de infiltração do solo, esta fase poderá se manifestar rapidamente e, desse modo, sua contribuição para o volume infiltrado será negligenciável.

Especificamente, os objetivos deste estudo são: aplicar o modelo simplificado de LEVIEN, com hipóteses adicionais para a recessão; desenvolver um programa computacional para maior rapidez e precisão dos resultados; analisar o efeito de fatores de forma sobre a curva de avanço e a influência da recessão sobre a performance dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive, em regime de vazão constante.

2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A irrigação por sulcos é um dos métodos de irrigação mais antigo, no qual a superfície do solo é usada para conduzir a água aplicada. Tradicionalmente, o projeto e operação dos sistemas de irrigação por sulcos são realizados sobre experiências básicas do passado e nos exemplos de projetos bem sucedidos. A imensa variabilidade de parâmetros, tais como infiltração do solo, rugosidade superficial do solo, capacidade de retenção de água no solo, declividade da parcela e a geometria do sulco, são obtidos em ensaios de campo dispendiosos, cansativos e vagarosos. Para ajudar nos projetos de irrigação por sulcos, foram desenvolvidos os modelos matemáticos nas últimas duas décadas, baseados na simples conservação da massa para os complexos modelos hidrodinâmicos. A seleção dos modelos para projeto ou manejo deve ser realizada com base e fundamento da teoria; disponibilidade e precisão dos dados de campo para predição das fases de avanço e recessão (HOLZAPFEL et. al. 1984).

SOUZA (1983) afirma que a irrigação superficial desenvolve-se em intervalo de tempo finito necessário para a água percorrer do início até o final da parcela. Na realidade, uma irrigação superficial completa considerando-se o evento desde o instante da adução até o desaparecimento total da água no sulco ou faixa é composta de várias fases.

SOUZA (1984) afirma que, na irrigação por sulcos, uma vazão geralmente constante é continuamente aduzida a pequenos canais (sulcos ou corrugações), cujo tamanho e forma variam de acordo com a cultura. Do mesmo modo que na irrigação por inundação, a irrigação por sulcos consiste basicamente em quatro fases: avanço, armazenamento, depleção e recessão. A fase de avanço caracteriza-se pelo movimento da

água na superfície do solo, no sentido do declive, e termina quando a água atinge o final do sulco. Neste momento, se o sulco não for fechado ao final, começa a perda d'água por escoamento superficial (Runoff). Se a adução de água é continuada, o sulco se mantém coberto por uma lâmina d'água em toda a extensão, iniciando-se a fase de armazenamento. No momento em que a adução cessa inicia-se a fase de depleção; a lâmina d'água na cabeceira do sulco começa a decrescer até o seu desaparecimento total, o que marca o início da fase de recessão. Esta termina quando toda a água desaparece da superfície do solo. Na maioria das vezes, a fase de recessão é muito pequena, com a água desaparecendo quase que instantaneamente. Durante todas essas fases do processo de irrigação por sulcos, a água infiltra-se horizontalmente através das paredes laterais, bem como verticalmente através do fundo do sulco. A lâmina d'água, por sua vez, varia com a distância ao longo do sulco e com o tempo e, conseqüentemente, a infiltração da água no solo é também uma função do tempo e da lâmina de água.

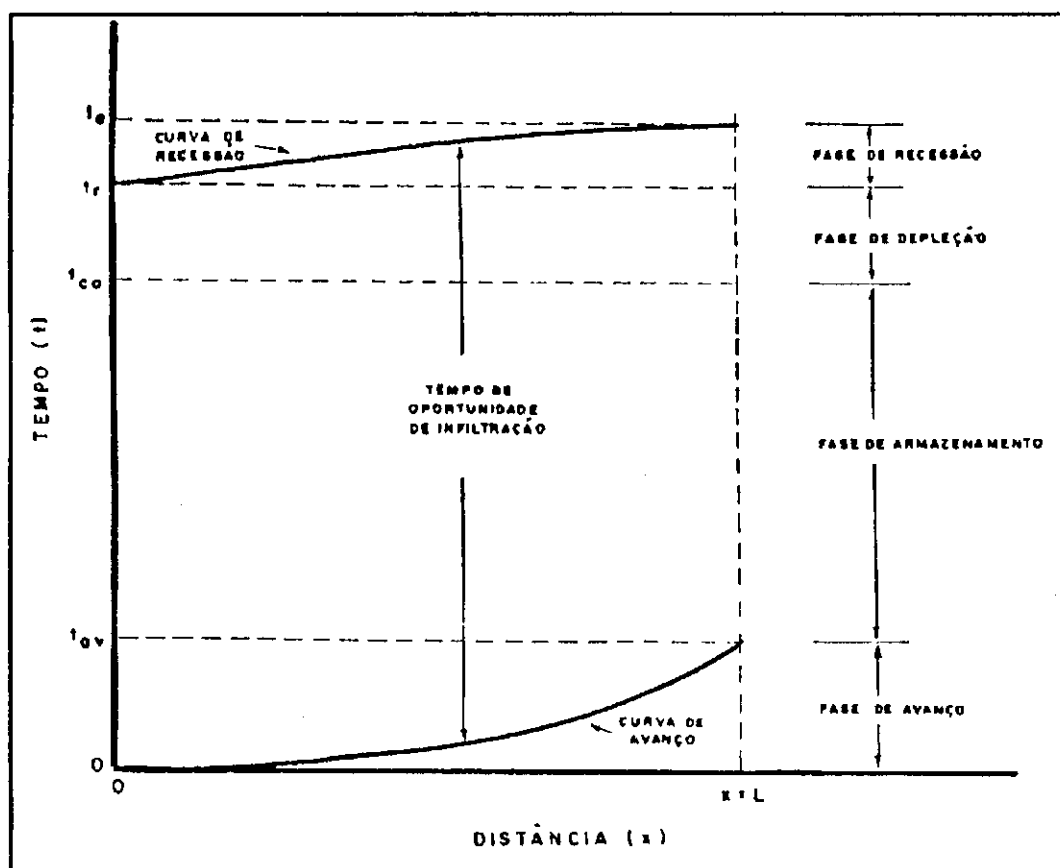


Figura 2.1 – Diagrama esquemático mostrando as fases da irrigação superficial (Após SOUZA, 1983).

Segundo REZENDE & SCALOPPI (1985), as características da infiltração da água no solo constituem um dos principais parâmetros requeridos no dimensionamento, operação, manejo e avaliação de sistemas de irrigação superficial.

Em um trabalho resumindo três anos de avaliações de sistemas de irrigação por sulcos de infiltração no Colorado, (LEY & CLYMA, 1981), citados por (REZENDE & SCALOPPI, 1985), concluíram que os fazendeiros parecem não estar conscientes dos efeitos da redução da razão de infiltração na quantidade de água armazenada na zona radicular.

SCALOPPI (1986) afirma que uma das principais características dos sistemas de irrigação por superfície é que o dimensionamento requer parâmetros determinados em condições muito próximas daquelas observadas no desenvolvimento normal das irrigações. Além disso, os níveis de uniformidade e eficiência de irrigação não podem ser estabelecidos a priori. Na verdade, estes valores resultam de uma avaliação do desempenho da irrigação.

Diversos modelos matemáticos, processados em computadores digitais, estão atualmente disponíveis para proceder ao dimensionamento de sistemas de irrigação por superfície. Estes modelos, com diferentes graus de complexidade e precisão requerem alguns parâmetros representativos para processamento, como a equação de infiltração, a geometria da seção transversal de escoamento superficial, a vazão a ser derivada, o comprimento da parcela, o tempo de aplicação de água, o coeficiente de rugosidade hidráulica superficial e o intervalo de tempo desejado no processamento. Como resultado, o programa determina o avanço e o recesso de água na superfície, a quantidade de água infiltrada no comprimento da parcela considerada e uma completa avaliação da irrigação (SCALOPPI, 1986).

O conhecimento das curvas de avanço, recessão, e da equação característica de infiltração do solo é essencial para avaliar a performance de um sistema de irrigação superficial no que tange à determinação de parâmetros que expressam a qualidade da irrigação, notadamente as eficiências de aplicação (E_a), de armazenamento (E_s), de distribuição (E_d) e os índices de percolação (I_p) e de runoff (I_m) (SOUZA, 1983).

De acordo com SAKKAS & STRELKOFF (1974), todos os métodos que utilizam os princípios da mecânica dos fluidos para solucionar a fase de avanço na

irrigação superficial situam-se em duas principais categorias: a do balanço de volume e a dos métodos hidrodinâmicos. O método do balanço de volume é baseado no princípio da conservação da massa, junto com certas hipóteses relativas à lâmina média do fluxo superficial da água. O método hidrodinâmico é baseado na equação da continuidade e da conservação do momento, conhecidas como as equações de SAINT-VENANT, que relaciona a velocidade e a lâmina de fluxo em um canal aberto.

LEVIEN & SOUZA (1987) afirmam que muitos estudos desenvolvendo e aplicando modelos matemáticos para a irrigação superficial foram conduzidos por (BASSET, 1973; DAVIS, 1960; FOK & BISHOP, 1965; KARMELI et al., 1978; SOUZA, 1981; STRELKOFF, 1977; WILKE, 1986, WILKE & SMERDON, 1965). Estes modelos variam desde os complexos hidrodinâmicos e modelo zero-inércia, baseados em solução numérica das equações diferenciais parciais da massa e do momento em fluxos de canais abertos (BASSET, 1973; SOUZA, 1981; WILKE 1986), até os modelos simplificados baseados em solução algébrica da equação da conservação da massa, sob a hipótese da lâmina de fluxo normal (DAVIS, 1960; FOK & BISHOP, 1965; KARMELI et al., 1978; STRELKOFF, 1977; WILKE & SMERDON, 1965). Os modelos algébricos são primariamente aplicados para a fase de avanço em irrigação por faixas (FOK & BISHOP, 1965; WILKE & SMERDON, 1965) ou na irrigação por sulcos (BASSET, 1973; DAVIS 1960). STRELKOFF (1977) apresenta um modelo simplificado completo, que simula todas as fases na irrigação por faixas, com a computação do escoamento superficial e da curva de recessão. KARMELI et al. (1978), na tentativa de desenvolver um modelo simplificado para sulcos, assume que o tempo de recessão é relativamente curto e, portanto, que o cálculo da curva de recessão deve ser ignorado. WU (1972) apresenta solução simples para recessão em faixas ou sulcos com drenagem livre, porém, é necessário, a priori, a medida da recessão. Esses não se caracterizam como modelos algébricos completos, descritos na literatura, que integralmente simulam um evento da irrigação por sulco. Muitos modelos não consideram a fase de recessão, e o modelo de WU requer medição no campo para cada caso. O modelo de STRELKOFF deve ser aplicado apenas para irrigação por faixas, enquanto que o modelo sugerido por KARMELI et al. (1978) não computa a recessão.

Dentro da aplicação dos modelos matemáticos, pouco tem sido estudado o de irrigação por sulco, sendo maior a sua aplicação ao fenômeno de irrigação por faixa, pois o mesmo apresenta menor complexidade em sua hidráulica (LEVIEN, 1985).

A aplicação de modelos matemáticos, baseados na hidráulica da irrigação superficial, permite uma análise relativamente rápida e econômica dos parâmetros necessários à elaboração de projetos, bem como o manejo eficiente de sistemas de irrigação por sulcos e faixas (SOUZA, 1983).

SCALOPPI (1984) afirma que os modelos matemáticos permitem avaliar a qualidade da irrigação em função de um dado conjunto de variáveis hidráulicas. O desempenho desses modelos depende da representatividade dos parâmetros de entrada, especialmente daqueles relativos às características de infiltração.

LEVIEN (1985) desenvolve um modelo algébrico, que simula o processo completo da irrigação por sulcos. Ele utiliza o princípio da conservação da massa com a hipótese básica de que a lâmina de irrigação é a lâmina de fluxo uniforme (lâmina normal). Seu modelo pode ser usado para analisar e prever o desempenho de um sistema de irrigação por sulco em declive com drenagem livre. O desempenho do modelo é avaliado pelas comparações dos resultados com aqueles obtidos pela aplicação de um modelo matemático mais complexo – modelo hidrodinâmico não linear de SOUZA (1981) – e com dados de campo. Tais resultados demonstram a viabilidade da aplicação do modelo, bem como a validade das hipóteses físicas assumidas para o seu desenvolvimento.

2.1 – Fase de avanço

Segundo OLITTA (1984), existem na literatura diferentes enfoques e teorias para determinar o avanço da água em um sulco de irrigação. A previsão do avanço da água é uma determinação em que um grande número de fatores pode influenciar. Por este motivo, a determinação da curva do avanço deve ser feita através de medição no próprio local. O procedimento para realização deste teste no campo é bastante simples, consistindo basicamente em se anotar o tempo acumulado em minutos requerido para a lâmina de água no sulco atingir distâncias sucessivas, marcadas com estacas a intervalos predeterminados (5, 10 ou 20 metros).

BERNARDO (1986) afirma que a velocidade de avanço d'água nos sulcos de irrigação é função dos seguintes fatores: vazão aplicada no sulco, capacidade de infiltração do solo, declividade do sulco, rugosidade e comprimento do sulco. Por este

motivo, a determinação, no campo, do avanço d'água no sulco deve ser feita na própria área de irrigação e em sulcos com condições similares aos sulcos de irrigação. Normalmente, o avanço d'água nos sulcos é representado por meio de curvas de avanço, ou por equações. Para a determinação da curva de avanço, aplica-se a vazão predeterminada no sulco e anota-se o tempo gasto pela frente de avanço para atingir as diferentes estacas. Existem vários tipos de equações usadas para descrever a velocidade de avanço d'água no sulco, sendo três os tipos mais usados:

Equação Potencial:

$$T = a \cdot L^b \quad (2.1)$$

Em que: T = tempo de avanço;

L = distância de avanço;

a e b = coeficientes.

Equação Exponencial:

$$T = a \cdot (e^{bL} - 1) \quad (2.2)$$

Equação Quadrática:

$$T = a \cdot L + b \cdot L^2 \quad (2.3)$$

HOLZAPFEL et al. (1984) afirmam que a fase de avanço envolve um fluxo variável não uniforme sobre um leito poroso. O comportamento deste fluxo é governado pela Lei da Conservação da Massa e do Momento ou Energia. Os modelos matemáticos usados para obtenção das taxas de avanço em irrigação por sulcos são desenvolvidos sobre os métodos de Balanço de Volume e o Hidrodinâmico.

O método hidrodinâmico é baseado na equação da conservação da massa e energia, que relaciona a lâmina de fluxo e a velocidade no sulco. Estas equações

diferenciais parciais não lineares, que governam o fluxo transiente gradualmente variado da água no sulco, são comumente conhecidas como Equações de SAINT-VENANT:

$$\frac{A \cdot dv}{dx} + \frac{B \cdot v \cdot dy}{dx} + \frac{B \cdot dy}{dx} + I = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{dv}{g \cdot dt} + \frac{v \cdot dv}{g \cdot dx} + \frac{dy}{dx} = S_0 - S_f + \frac{v \cdot I}{g \cdot A} \quad (2.5)$$

Onde: A = área da seção transversal de fluxo;

B = largura do topo do fluxo;

g = aceleração de gravidade;

I = infiltração

x = distância;

y = lâmina de fluxo;

S_0 = declive do canal;

S_f = declive da água;

v = velocidade;

t = tempo.

SOUZA (1981) desenvolve um modelo hidrodinâmico completo para irrigação por sulco, baseado nas equações (2.4) e (2.5). Ele usa um sistema implícito em Diferenças Finitas para obter as soluções aproximadas da forma integral das equações não lineares, que são resolvidas simultaneamente pela técnica de “double-sweep” (dupla-varredura). Expressa-se a geometria do sulco por uma lei de potência que relaciona a largura do topo da água no sulco com a lâmina de água.

STRELKOFF & KATOPODES (1977) propuseram um modelo denominado de zero inércia, considerando a inércia nula, constituindo-se em um método hidrodinâmico simplificado para irrigação por faixas. Este método negligencia o termo inercial da equação (2.5), resultando em:

$$\frac{dy}{dx} = S_o - S_f \quad (2.6)$$

SOUZA (1981) também apresenta um modelo zero-inércia para sulcos baseado nas equações (2.4) e (2.6).

ELLIOTT et al. (1982) usam o modelo zero-inércia para prever o avanço da água em irrigação por sulcos, descrevendo a forma do sulco com a lei de potência, que relaciona a área da seção transversal do fluxo com a lâmina de água.

CHEN (1970), citado por HOLZAPFEL et al. (1984), apresenta um modelo de onda-cinemática, que é, em essencial, um método de balanço de volume. O modelo assume um fluxo uniforme sobre a superfície do solo e negligencia o gradiente de pressão na equação (2.6); e a equação (2.5) pode ser expressa como:

$$S_o = S_f \quad (2.7)$$

Segundo BISHOP et al. (1967), o avanço da lâmina de água na superfície de escoamento é de difícil predição e requer o conhecimento dos princípios da hidráulica por superfície. Os ensaios de campo são freqüentemente realizados para observar a influência das culturas, rugosidade do solo, magnitude do fluxo, a taxa de infiltração acumulada e as taxas de avanço. Os resultados de cada simulação, ou dos ensaios de campo, podem ser plotados para obtenção das curvas de avanço. Muitos pesquisadores têm usado a equação da continuidade, ou do balanço de volume, para simular as taxas de avanço de água nos sulcos ou faixas.

HALL (1956) propôs um diferente método para solucionar a equação da conservação da massa. Ao invés de considerar a lâmina d'água uniforme, ele sugere que a lâmina no início da parcela é a lâmina de fluxo normal (Figura 2.2) e que o tipo de função representada pela superfície da água é a mesma para todos os instantes de tempo. Ele aplica o princípio da conservação da massa para cada incremento de distância de avanço,

considerando os incrementos de tempo constantes. Para o cálculo dos incrementos de volumes infiltrados, entre duas sucessivas curvas do perfil ele assume, também, uma variação linear para todos os incrementos de avanço, excetuando-se o último.

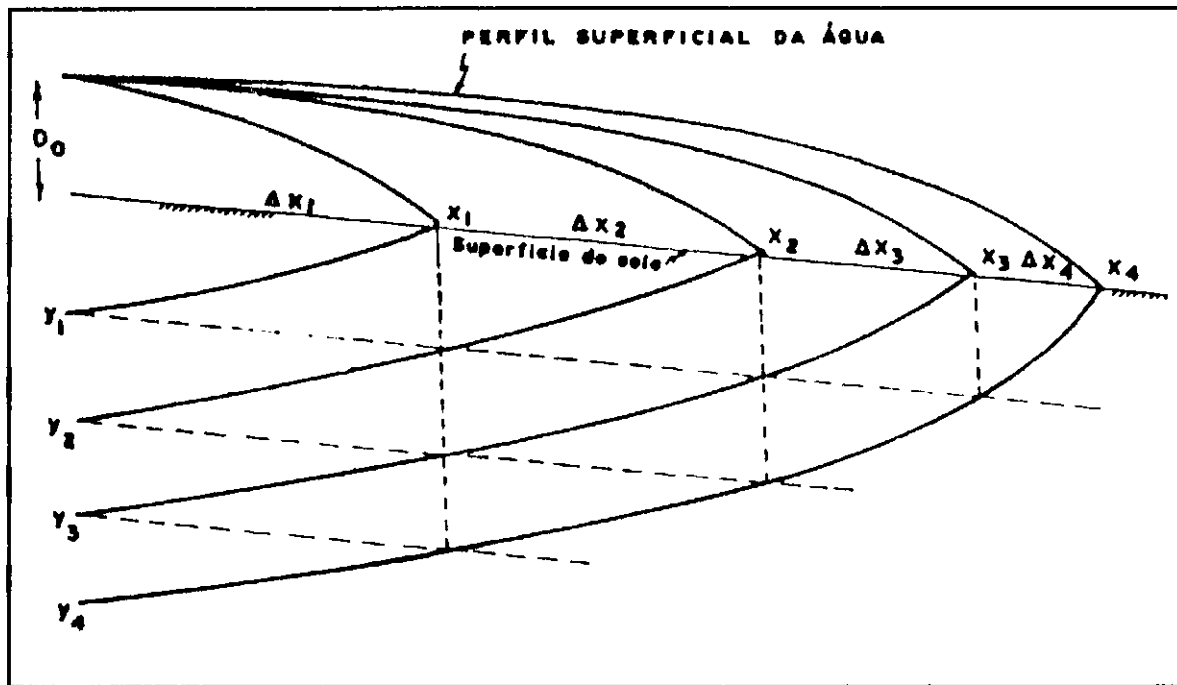


Figura 2.2 – Definição esquemática do método de Hall para determinação do avanço da água sobre faixas.

HALL (1956) também assume que o fator de forma C_1 do volume armazenado na superfície, para o volume descrito pelo retângulo circunscrito por $D_0 \cdot X$, é independente do tempo, e uma lâmina média adicional de água, ou “fator puddle”, “ e ”, é causado pelas irregularidades da superfície das faixas estreitas. O avanço da água durante o primeiro incremento de tempo é computado pela equação:

$$\Delta x_1 = \frac{Q \Delta t}{W \cdot (C_1 \cdot D_0 + e + Ky_1)} \quad (2.8)$$

Para $i \geq 2$, as distâncias de avanço são computadas a seguir:

$$\Delta x_i = \frac{\Delta x_i - (\bar{\Delta}y_i \cdot \Delta x_1 + \bar{\Delta}y_{i-1} \cdot \Delta x_2 + \dots + \bar{\Delta}y_2 \cdot \Delta x_{i-1})}{(C_1 \cdot D_o + e + K \cdot y_1)} \quad (2.9)$$

Onde os incrementos de lâmina infiltrada média para um incremento de avanço Δx_i , durante o incremento de tempo Δt_i , são iguais a:

$$\bar{\Delta}y_i = (y_i - y_{i-2})/2 \quad ; \quad i \geq 2 \quad (2.10)$$

Sendo: w = largura da faixa;

D_0 = lâmina de água na cabeceira da faixa;

e = fator de correção da lâmina;

X_i = distância até a extremidade do perfil no tempo t_i ;

C_i = fator de forma do perfil superficial;

K = fator de forma do perfil subsuperficial.

LEWIS & MILNE (1938) aplicam o princípio da conservação da massa para prever as distâncias de avanço da água em faixas através de soluções analíticas na forma diferencial:

$$q \cdot t = C_1 \cdot D_o \cdot x + \int_0^t y(t-t_s) x'(t_s) dt_s \quad (2.11)$$

Onde: t_s = o valor de t em que $x(t) = S$;

$y(t - t_s)$ = a infiltração acumulada no ponto $x = S$, no tempo t ;

$x'(t_s)$ = o valor de dx/dt , em $t = t_s$;

t = tempo total de água aplicada.

PHILIP & MACNTIRE (1953), citados por SOUZA (1981), mostram que um dos exemplos usados por LEWIS & MILNE (1938), apresenta incorreções. SOUZA (1981) ressalta que aqueles autores foram os primeiros a propor uma equação para a taxa de avanço considerando a taxa de infiltração variável, enquanto os outros autores consideravam a taxa de infiltração constante durante a irrigação.

PHILIP & FARRELL (1964) usam transformadas de Laplace e apresentam uma derivação detalhada da solução geral para as equações de avanço e infiltração de LEWIS & MILNE (1938). Soluções particulares são apresentadas para as seguintes formas da função de infiltração acumulada:

$$Y = C[1 - EXP(-rt)]$$

$$Y = at + C[1 - EXP(rt)]$$

$$Y = at^b;$$

$$Y = at + C \bullet t^{1/2}$$

DAVIS (1960) considera que, dentre todos os métodos e equações propostas para avaliar o avanço do fluxo de água em faixas ou sulcos, o método de (HALL, 1956) satisfaz a todos os requisitos com uma solução simples e precisa. Também a derivação de suas equações baseadas na conservação da massa pode ser considerada matematicamente corretas.

Este mesmo autor usa as equações de (HALL, 1956), com algumas modificações, para descrever a taxa de avanço para irrigação por sulco.

DAVIS (1960) assume a equação de infiltração da forma $y = a \cdot t^n$ e que a geometria do sulco é parabólica ou do tipo "V"; o volume de água no armazenamento superficial é expresso como uma função de " d_0^2 "; sendo " d_0 " a lâmina na cabeceira do sulco. Também se admite que a função de infiltração é caracterizada pela técnica do cilindro, ou sulco infiltrômetro; ou pelo método "Inflow-Outflow", para um longo comprimento de sulco. Desse modo, a função de infiltração é modificada por um fator "F", para permitir o uso da equação para todas as condições de forma do sulco, espaçamento e lâmina d'água.

O resultado final das equações, incluindo estas modificações, é:

$$X_i = \frac{Q \cdot (\Delta t) - \frac{F \cdot a(\Delta t)^n}{2} [g_i \cdot \Delta x_1 - g_{i-1} \cdot \Delta x_2 + \dots + g_2 \Delta x_{i-1}]}{F \cdot a(\Delta t)^n \cdot K + C \cdot d_o^2 + e} \quad (2.12)$$

$$\text{Sendo: } g_i = i^n - (i-2) \quad ; \quad \text{para } i \geq 2 \quad (2.13)$$

Onde: e = “Fator Puddle” que varia entre 0,001 a 0,003 $f t^3/ft$;

F = fator de infiltração;

K = fator de forma para o volume infiltrado no solo;

C = fator de forma para o volume na superfície do solo;

d_o = lâmina de água uniforme na cabeceira.

Segundo WALKER & SKOGERBOE (1987), o “fator puddle” considera o armazenamento morto na superfície do solo. Daqui por diante, a água representada pelo “fator puddle” será adicionada à $\tau_y \cdot A_o$, ou seja, ao cálculo do volume armazenado na superfície.

Estes mesmos autores apresentam a expressão final do modelo de Hall (1956), que embora desenvolvida para o avanço em faixas, pode ser generalizada para o caso de sulcos, na forma do seguinte somatório:

$$\Delta x_i = \frac{Q_o \cdot \Delta t}{\tau_y \cdot A_o + \tau_z \cdot Z_1} - \sum_{k=1}^{i-1} \left[\frac{Z_{i-k+1} - Z_{i-k-1}}{2(\tau_y \cdot A_o + \tau_z \cdot Z_1)} \Delta x_k \right] \quad (2.14)$$

Onde: Q_o = vazão de entrada;

Δt = intervalo de tempo;

Δ_o = área da seção transversal de fluxo na cabeceira definida pela lâmina normal;

τ_y = fator de forma para o volume superficial;

τ_z = fator de forma para o volume subsuperficial;

ΔX_i = incremento de distância de avanço;

Z_i = lâmina infiltrada acumulada.

FOK & BISHOP (1965) afirmam que o avanço da água em irrigação superficial representa um importante papel na aplicação da água no solo e na distribuição da água infiltrada na zona de raízes. Os autores desenvolvem uma expressão que relaciona o comprimento coberto pelo avanço da água com o tempo de aplicação, taxa do fluxo, largura, lâmina normal e constantes empíricas. Sua equação do avanço produz bons resultados quando comparados com os dados de campo. No caso da irrigação por sulcos, ainda deve ser considerado o efeito da forma e paredes do canal. Considerando que a relação entre Q_0 e D_0 é apresentada na forma de $Q = C' \cdot D_0^p$, em que C' e p , são constantes a serem determinadas empiricamente. Deste modo, a equação para um sistema de irrigação por sulcos pode ser apresentada como:

$$L = \frac{Q \cdot t}{\frac{U \cdot D_0^{m'}}{1+b} + \frac{W \cdot F \cdot K \cdot t^{n+1}}{(n+1)(n+2)}} \quad (2.15)$$

Esta expressão foi desenvolvida pela técnica do balanço de volume, baseada nas seguintes expressões:

$$L = a \cdot t_a^b \quad (\text{Função de avanço}) \quad (2.16)$$

$$I = K \cdot t_i^n \quad (\text{Função de infiltração}) \quad (2.17)$$

Onde: L = comprimento coberto pela frente de água;

t_a = tempo de avanço;

a e b = constantes empíricas;

I = taxa de infiltração;

t_i = tempo de infiltração;

k e n = constantes empíricas;

Q = vazão constante;

D_0 = lâmina normal na cabeceira da parcela.

Sendo U e m' coeficientes da área da seção transversal em termos da altura da lâmina de água D_0 e W um parâmetro que pode ser o perímetro molhado, a largura da superfície da água no sulco ou o espaçamento dos sulcos, dependendo do processo utilizado na determinação da equação de infiltração. O expoente m' é igual a 2, exceto quando a seção transversal é de forma parabólica ou irregular. Neste caso, o relacionamento entre a área da seção transversal e a lâmina normal D_0 , pode ser determinada graficamente.

Para SCALOPPI (1986), o avanço da água na superfície de escoamento em sulcos ou faixas é difícil de ser previsto. Esta dificuldade é atribuída à natureza do fluxo superficial, caracterizado como não permanente e espacialmente variado, reduzindo-se com a distância devido à infiltração. Por isso, as soluções das equações determinantes do fluxo superficial são aproximadas, através de procedimentos numéricos processados em computadores. Alguns métodos simplificados, nem sempre precisos, baseiam-se na solução da equação do balanço volumétrico:

$$q \cdot t = X \cdot (\bar{A}_y + \bar{A}_z) \quad (2.18)$$

Onde: q = vazão derivada a parcela;

t = tempo decorrido desde o início do processo;

X = distância de avanço correspondente;

\bar{A}_y e \bar{A}_z = áreas médias das seções transversais de escoamento superficial e infiltrada, respectivamente.

A maior dificuldade deste cálculo reside na estimativa destas áreas médias que podem ser aproximadas por aquelas determinadas no início da parcela (A_{y0} e A_{z0} , respectivamente), multiplicadas por fatores de forma adequados (r_y e r_z , respectivamente) (SCALOPPI, 1986).

Segundo KARMELI et al. (1978), citado por PORDEUS (1990), o avanço pode ser determinado desde que se conheça os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial através da seguinte equação:

$$q \cdot t = r_y \cdot y_m \cdot x + r_z \cdot z_m \cdot x \quad (2.19)$$

$$\text{onde: } \bar{Y} = r_y \cdot y_m ; \text{ e } \bar{Z} = r_z \cdot z_m$$

Y_m e Z_m = lâmina máxima na superfície do solo e lâmina máxima infiltrada, respectivamente;

r_y e r_z = fatores de forma superficial e subsuperficial, isto é, a relação de área do perfil superficial e subsuperficial para a área dos respectivos retângulos circunscritos.

Segundo SOUZA (1981), a fase de avanço pode ser expressa pela equação do balanço de volume para sulcos da seguinte forma:

$$Q \cdot t = \nabla_y + \nabla_z \quad (2.20)$$

Onde Q é a taxa de fluxo no sulco, t é o tempo, e o produto Q. t é o volume aplicado no sulco, que deve ser igual, para todos os tempos: ao volume total (∇_y) sobre a superfície, adicionado ao volume (∇_z) que será infiltrado no solo.

Com respeito ao volume superficial ∇_y (Figura 2.3), seja qual for a forma do perfil superficial da água, pode-se assumir que a área da seção transversal média na superfície do fluxo \bar{A}_y permanece constante.

Desse modo, \bar{A}_y , pode ser definido como:

$$\bar{A}_y = \frac{1}{x_a} \cdot \int_0^{x_a} A_y \cdot dx \quad (2.21)$$

Onde: X_a = distância para a qual a água avançou durante o intervalo de tempo t .

O volume superficial será:

$$V_y = \int_0^{X_a} A_y \cdot dx = \overline{A}_y \cdot X_a \quad (2.21 a)$$

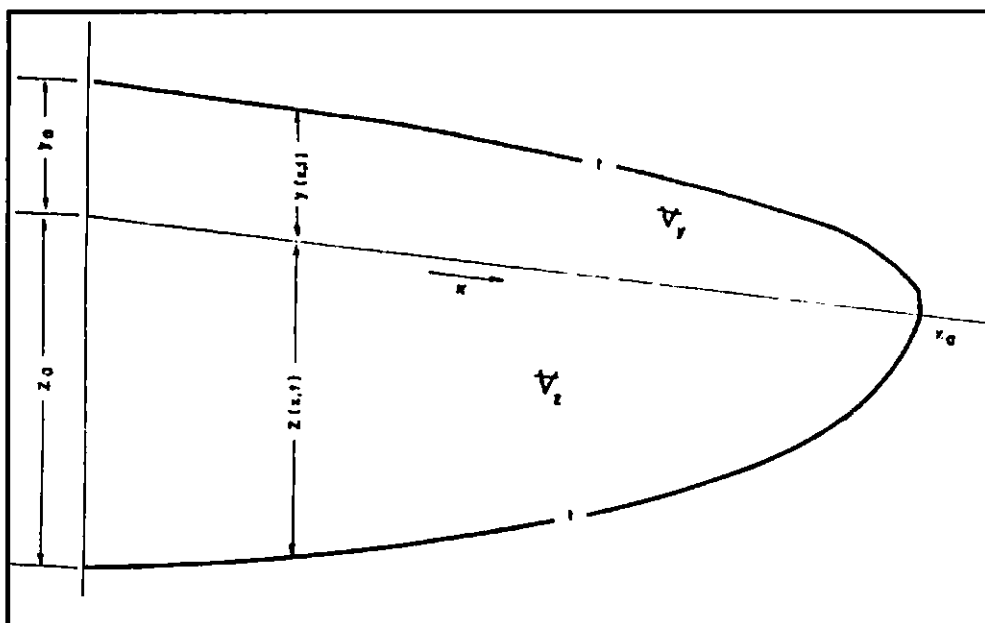


Figura 2.3 - Esquema mostrando a lâmina infiltrada e a lâmina superficial durante a fase de avanço na irrigação por sulcos (Após LEVIEN, 1985).

Como \overline{A}_y é constante, pode-se fazer a hipótese de que a lâmina d'água na entrada do sulco y_0 corresponde à lâmina normal de fluxo uniforme Y_n para a vazão aplicada Q , isto é:

$$Y_0 = Y_n(Q) \quad (2.22)$$

Conseqüentemente, a área da seção transversal de fluxo na entrada do sulco A_0 (Figura 2.4) é uma constante e função de Y_n , ou seja:

$$A_0 = A(Y_n) \quad (2.23)$$

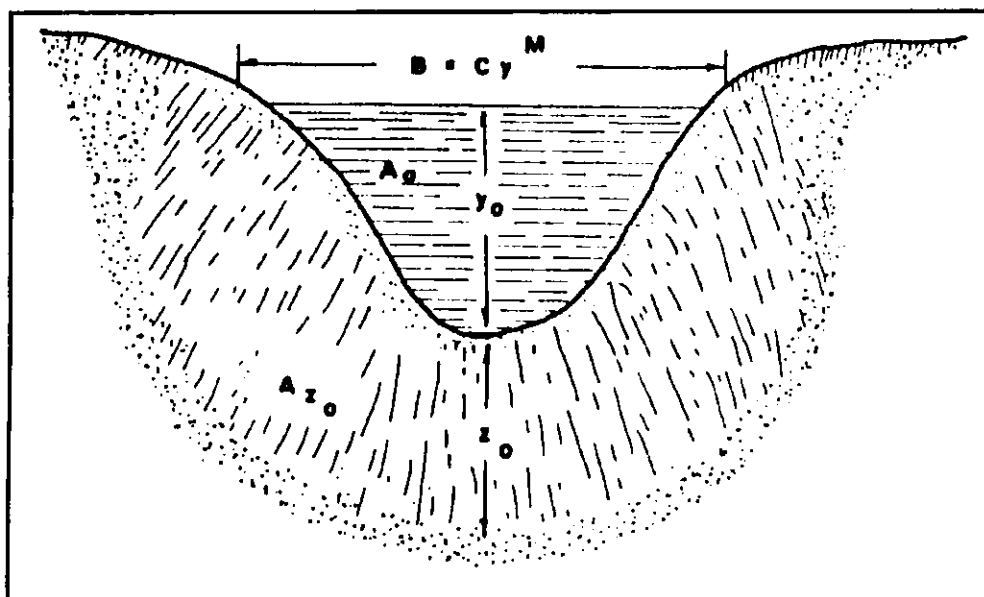


Figura 2.4 – Elementos geométricos da seção transversal parabólica de um sulco de irrigação (Após LEVIEN, 1985).

Portanto, \bar{A}_y pode ser representado pelo seguinte produto:

$$\bar{A}_y = A_o \cdot r_y \Rightarrow \forall_y = A_o \cdot r_y \cdot X_a \quad (2.24)$$

Onde: r_y = fator que expressa a forma do perfil superficial, isto é, a relação entre o volume superficial \forall_y e o volume $A_o \cdot X_a$.

O volume infiltrado \forall_z (Figura 2.3) pode ser descrito como sendo a integral da área infiltrado A_z ao longo do sulco:

$$\forall_z = \int_a^{x_a} A_z(y, t) \cdot dx \quad (2.25)$$

A exemplo do que foi feito para o perfil superficial, pode-se expressar o volume infiltrado em termos da área média infiltrada A_z , isto é:

$$V_z = \bar{A}_z \cdot X_a = A_{zo} \cdot r_z \cdot X_a \quad (2.26)$$

Onde: A_{zo} = volume infiltrado na cabeceira do sulco por unidade de comprimento (Figura 2.4).

r_z = fator que expressa a forma do perfil subsuperficial.

Substituindo as equações (2.24) e (2.26) na equação (2.20), tem-se uma nova expressão para o balanço de volume em um sulco:

$$Q \cdot t = A_o \cdot r_y \cdot X_a + A_{zo} \cdot r_z \cdot X_a \quad (2.27)$$

A equação (2.27) pode ser reescrita para expressar o avanço X_a em função dos demais parâmetros:

$$X_a = \frac{Q \cdot t}{A_o \cdot r_y + A_{zo} \cdot r_z} \quad (2.28)$$

Para um sulco de forma parabólica (Figura 2.4), a área da seção transversal A_o é dada pela expressão:

$$A_o = \frac{B \cdot Y}{M + 1} \quad (2.29)$$

Em que: $B = C \cdot y^M$ (2.30)

Onde: B = largura da superfície livre da água;

C e M = constantes empíricas.

Por sua vez, a área infiltrada acumulada pode ser calculada pela seguinte equação (SOUZA, 1981):

$$A_z(y,t) = P_m(y) \cdot Z(\tau) \quad (2.31)$$

Na equação (2.31), quando a lâmina d'água y for muito pequena em relação a B , o perímetro molhado P_m pode ser aproximado por B , isto é:

$$P_m \cong B = C \cdot y^M \quad (2.32)$$

Substituindo a equação (2.32) na equação (2.31), pode-se determinar as áreas infiltradas acumuladas na cabeceira da parcela em função da lâmina normal, será:

$$A_{zo} = B(y_n) \cdot Z(\tau) \quad (2.33)$$

Onde: $Z(\tau)$ é o volume infiltrado por unidade de área, computado pela equação de KOSTIAKOV:

$$Z(\tau) = K \cdot \tau^a \quad (2.34)$$

em que: τ = tempo de oportunidade de infiltração;

K e a = coeficiente e expoente empíricos para um dado solo e um determinado nível de umidade.

FOK et al. (1971) afirmam que na equação desenvolvida por (FOK & BISHOP, 1965) para o avanço, a taxa de infiltração não se aproxima de uma constante, devido à utilização da expressão da taxa de infiltração ser recomendada para pequenos tempos de infiltração. Os autores desenvolveram equação do avanço da água, assumindo outra função de infiltração que se aproxime de uma constante para tempos elevados. A função proposta é a seguinte:

$$I = K \cdot t_i^n + C \quad (2.35)$$

Em que: K e n = coeficiente e expoente empíricos, respectivamente;

C = taxa de infiltração constante para os períodos de tempo de infiltração mais longos.

Baseados na equação (2.35) e na equação do avanço empírica:

$$X = a \cdot t_a^b \quad (2.36)$$

Resulta na seguinte expressão derivada do balanço de volume, como segue:

$$L = \frac{Q \cdot t}{W \left[\frac{D_o}{1+b} + \frac{K \cdot F \cdot t^{n+1}}{(n+1)(n+2)} + \frac{C \cdot t}{b+1} \right]} \quad (2.37)$$

Onde: W e L = largura e comprimento coberto pela água;

F = fator de correção de KIEFER para a lâmina média de água infiltrada no solo;

D_o = lâmina normal de água na cabeceira do sulco ou faixa;

a e b = coeficiente e expoente empíricos da função do avanço na equação (2.36);

t_a = tempo de avanço;

X = comprimento do avanço da água.

WALKER & HUMPHERYS (1983) usam o modelo de onda cinemática para prever o avanço em irrigação por sulcos. A geometria do sulco é descrita por uma função potencial que relaciona a seção hidráulica com a área da seção transversal de fluxo:

$$A^2 \cdot R^{4/3} = C \cdot A^d \quad (2.38)$$

Sendo: A = área da seção transversal de fluxo;

R = raio hidráulico do fluxo;

C e d = constantes empíricas.

O modelo é uma solução da equação da continuidade:

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta X} + \frac{\delta Z}{\delta \tau} = 0 \quad (2.39)$$

E a equação do movimento é substituída pela equação de resistência para fluxo uniforme, na qual $S_0 = S_f$.

SAKKAS & STRELKOFF (1974) apresentam outro método do enfoque hidrodinâmico para a fase de avanço. As equações são derivadas das equações de SAINT-VENANT pela integração numérica, usando a fórmula de EULER e a regra do trapézio numa predição sistemática.

SINGH & CHAUHAN (1973) aplicam a equação geral da continuidade na forma proposta por (LEWIS & MILNE, 1938), com a solução das equações através de transformadas de Laplace, para avaliar as características de infiltração do solo, assumindo que o avanço pode ser descrito por uma função de potência do tipo, $X = \alpha \cdot t^b$.

KRUSE et al. (1965) afirmam que a eficiência de aplicação e distribuição da água para irrigação por sulcos ou faixas é altamente dependente da taxa de avanço da água nestes canais. A taxa de avanço é governada pela taxa de infiltração do solo, a resistência oferecida pelo canal para o fluxo de água e pela taxa de descarga no canal. O conhecimento destes fatores é essencial para o projeto de sistemas de irrigação eficiente.

AZEVEDO et al. (1990) informam que considerável atenção tem-se dado para a fase de avanço da água nos sulcos, devido a sua importância nos tempos de oportunidade entre os dois extremos da área irrigada. O objetivo é sempre completar a fase de avanço no menor tempo possível. Para tanto, grandes vazões tem sido recomendadas para essa fase, desde que se reutilize a água de escoamento superficial ou se reduza a vazão na fase de pós-avanço, o que muitas vezes não é uma solução prática.

2.1.1 – Fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial

HALL (1956) usa os mesmos princípios físicos e as mesmas suposições daquelas usadas por (LEWIS & MILNE 1938). Sugere que a forma da extremidade do perfil subsuperficial é de grau entre $\frac{1}{2} < j < 1$, e com um eixo coincidente com a superfície

do solo. Também sugere que o perfil superficial seja aproximado por outra parábola similarmente orientada (HART et al., 1968).

O método de HALL (1956) foi simplificado pela suposição que o tipo de função representada pela superfície da água é a mesma para todos os instantes de tempo. A razão entre volume armazenado na superfície e o volume do paralelepípedo circunscrito é uma constante C , que deverá ser maior que $\frac{1}{2}$ e menor que 1 ($\frac{1}{2} < C < 1$). Na equação da superfície da água, assumindo-se uma parábola cúbica com vértice no eixo x , o valor da constante C , será 0,75. Se a parábola é do segundo grau, o valor da razão constante será 0,667. A razão constante C é o fator de forma para a parábola formada pelo perfil da superfície da água. Do mesmo modo, considera-se um fator de forma para a ponta da parábola do perfil subsuperficial K , compreendido entre $\frac{1}{2} < K < 1$. Como exemplo, no seu artigo utiliza $K = C = 0,75$, onde a performance da curva de avanço simulada acompanha praticamente os pontos experimentais.

DAVIS (1960) indica que o valor do fator de forma do perfil superficial não depende somente da forma da superfície da água, mas também da forma do sulco. Por exemplo, assumindo-se para a equação da superfície da água uma parábola cúbica com vértice no eixo x do ponto em questão, o valor de C é 0,75, para a forma do sulco retangular 0,375, para a forma de sulco triangular, 0,321, para a forma do sulco semicircular. Este mesmo autor assume para o fator de forma do volume subsuperficial o valor unitário e demonstra que o erro decorrente é insignificante, tendendo a subestimar o cálculo da taxa de avanço.

SOUZA (1981) informa que o problema do avanço, de acordo com as equações de balanço de volume, reduz-se à determinação dos fatores de forma r_y e r_z com o tempo e das lâminas máxima superficial e infiltrada y_0 e z_0 .

LEVIEN (1985), analisando seu modelo algébrico, usa valores estimados para os fatores de forma do perfil superficial e subsuperficial, respectivamente, iguais a 0,75 e 0,80.

Segundo HART et al. (1968), o problema do avanço é atribuído a variação no tempo dos fatores de forma e das lâminas máximas do armazenamento superficial e subsuperficial. As funções τ_y e y_m , para fluxo d'água sobre uma superfície impermeável, dependem somente das forças de pressão, gravitacional e resistência, além da aceleração

resultante. No caso da superfície permeável τ_y e y_m são funções também da infiltração. As funções τ_z e z_m são dependentes da taxa de infiltração $Z(\tau)$ e o perfil de água superficial, isto é, a extensão e taxa da superfície molhada. Conforme os mesmos autores, é evidente que as equações que descrevem o fluxo na zona superficial e subsuperficial são associadas e, no enfoque rigoroso, elas devem ser resolvidas simultaneamente.

Segundo SOUZA (1983), no balanço de volume, a equação da energia é ignorada e, conseqüentemente, é substituída por uma hipótese que é a seguinte: o produto $r_y \cdot y_0$ é constante e igual a \bar{y} . Desse modo, o problema do avanço está centrado na avaliação de r_z (SOUZA, 1981).

SCALOPPI (1986) afirma que os valores de r_y e r_z são empíricos, sendo estimados para cada condição. Um valor entre 0,7 e 0,8 é geralmente observado para r_y . Por sua vez, r_z pode ser aproximado pela equação:

$$r_z = \frac{1}{\alpha + 1} \quad (2.40)$$

Onde: α = expoente da equação de infiltração acumulada tipo KOSTIAKOV;

$$Z = K \cdot \tau^\alpha \quad (2.41)$$

Sendo: Z = lâmina infiltrada;
 τ = tempo de infiltração;
 K e α = constantes empíricas.

Quanto mais representativos forem os valores atribuídos aos fatores de forma r_y e r_z , mais precisos deverão ser as estimativas da distância de avanço em função do tempo (SCALOPPI, 1986).

FOK & BISHOP (1965) usam o método "inflow-outflow", baseado no princípio da continuidade, para desenvolver a função de avanço que estima a taxa de avanço em faixas e sulcos. Para aproximar a lâmina média de água infiltrada durante a irrigação, utilizam o fator de correção (F) de KIEFER (Figura 2.5) e assumem uma função

empírica potencial para representar o avanço da água. No cálculo da lâmina média armazenada na superfície do solo, assumem que o perfil superficial da água é representado por uma equação empírica que expressa a lâmina de água na superfície do solo, como uma função da lâmina normal na cabeceira da parcela, do tempo de aplicação de água e do tempo de avanço, derivado da função de avanço empírica. As expressões finais para a determinação dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial são as seguintes:

$$r_y = \frac{1}{1 + b} \quad (2.42)$$

$$r_z = \frac{F}{a+1} = b \left[\frac{1}{b} - \frac{a}{1+b} + \frac{a(a-1)}{(2+b)2!} - \frac{a(a-1)(a-2)}{(3+b)3!} + \dots \right] \quad (2.43)$$

Onde : b = expoente da função de avanço $X = a \cdot t^b$;

F = fator de correção de KIEFER;

a = expoente da função de infiltração do tipo KOSTIAKOV, $Z = K \cdot \tau^a$;

r_y e r_z = fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, respectivamente.

Os autores também assumem um monômio potencial empírico para a determinação do expoente b da função do avanço da seguinte forma:

$$b = e^{-0,6a} \quad (2.44)$$

Sendo: a = expoente da função de infiltração do tipo KOSTIAKOV;

e = base do logaritmo natural.

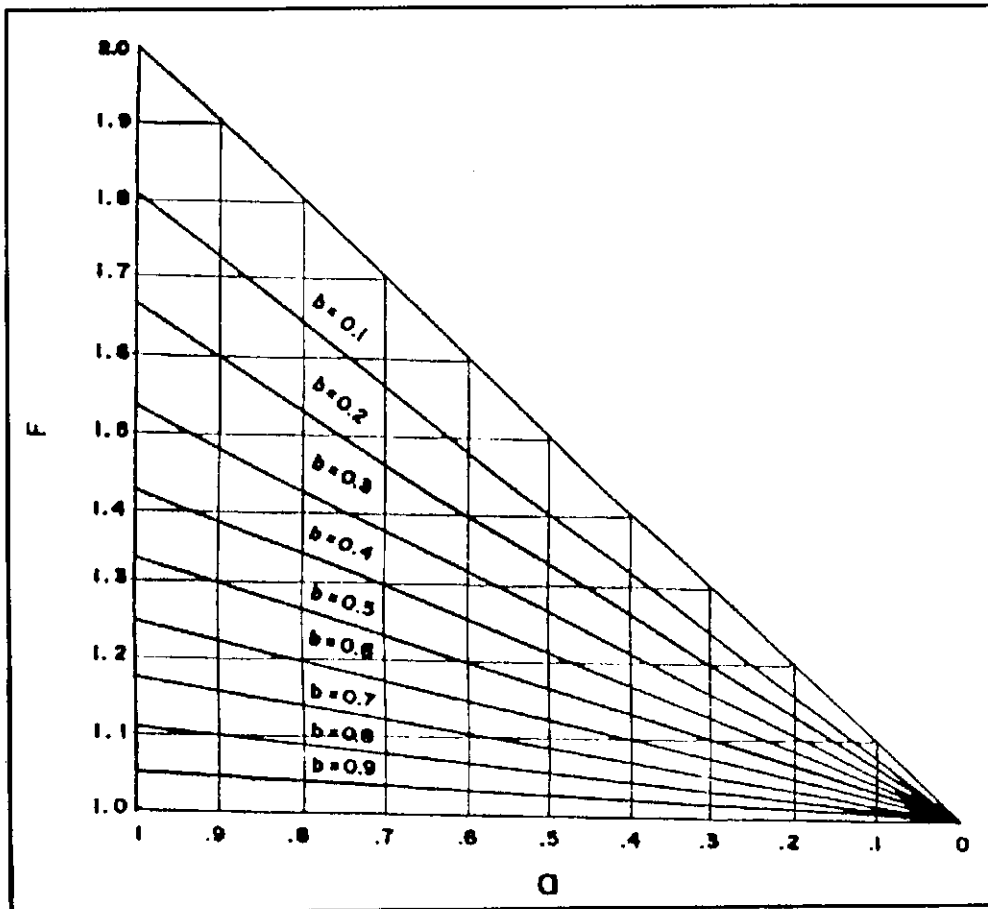


Figura 2.5 – Monograma de Kiefer para obter o valor de “F” como uma função de “b” e “a” (Após FOK & BISHOP, 1965).

HART et al. (1968) afirmam ser mais conveniente para o cálculo de r_z , através da equação (2.43), o uso de uma expressão equivalente:

$$r_z = \frac{\Gamma(1+b)\Gamma(1+a)}{\Gamma(1+a+b)} \quad (2.45)$$

Sendo: Γ = Função Gama.

Estes mesmos autores, partindo da equação (2.45) e através de um procedimento mais consistente, relacionam o expoente da função do avanço da seguinte forma:

$$b = 1 - a \quad (2.46)$$

Substituindo a equação (2.46) na equação (2.45), resulta na seguinte expressão para o cálculo do fator de forma do perfil subsuperficial:

$$r_z = \frac{(1 - a) \cdot a \cdot \pi}{\text{scn} \quad a \cdot \pi} \quad (2.47)$$

SOUZA (1981) desenvolve em seu modelo hidrodinâmico as expressões seguintes para o cálculo dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, considerando a célula situada na extremidade da frente de avanço, ou seja, para a ponta dos perfis:

$$r_y = \frac{1}{\beta(M+1)+1} \quad (2.48)$$

$$r_z = \frac{1}{\beta \cdot M + a + 1} \quad (2.48 \text{ a})$$

Em que: β = expoente do perfil $y = 3/7$

M = expoente da equação da geometria do sulco;

α = expoente da equação de infiltração de KOSTIAKOV, $Z = K \cdot \tau^\alpha$

WILKE & SMERDON (1965), citado por WALKER & SKOGERBOE (1987), determinam os primeiros quatrocentos termos da série convergente, expressa por (PHILIP & FARREL, 1964), através de transformadas de Laplace. Utilizando procedimento gráfico, determinam o fator de forma subsuperficial pela declividade das curvas correlacionadas com o expoente da equação de infiltração de KOSTIAKOV, resultando a seguinte expressão:

$$r_z = \frac{0,618 - 0,142 \ln(\alpha)}{\ln(\alpha)} \quad (2.49)$$

2.2 – Fase de Recessão

A condição de fluxo durante a fase de recessão é a mesma do fluxo de avanço durante uma irrigação, a qual é instável, não uniforme e espacialmente variado. Pode ser expressa por um conjunto de equações diferenciais parciais, dentre elas, a equação da continuidade e a equação do movimento (WU, 1972).

SCALOPPI (1986) afirma que, em sulco com reduzida seção de escoamento e moderado gradiente de declive, a fase de recessão é rápida o suficiente para ser considerada desprezível. À medida que aumenta a seção de escoamento e diminuem o gradiente de declive e a razão de infiltração, o recesso é mais demorado. Em qualquer condição, sempre terá um valor mais significativo em faixas que em sulcos. Hidraulicamente, é a fase mais complexa do processo de irrigação e, portanto, mais difícil de ser prevista nos tratamentos teóricos. Sua contribuição para a quantidade total de água infiltrada não parece ser significativa. Para simplificar sua representação, pode ser aproximada por uma reta, procedimento que quase sempre não acarreta sérios inconvenientes nos cálculos das lâminas infiltradas ao longo do comprimento da parcela, ao final do processo de irrigação.

Segundo OLITTA (1984), na irrigação por sulco, quando a entrada de água é desligada, o volume de água existente na superfície do solo é muito pequeno, ocorrendo a curva da recessão de difícil determinação, e que na prática considera-se uma curva horizontal, como se toda a água desaparecesse por igual ao longo do comprimento do sulco.

BERNARDO (1986) afirma que a curva de recessão para sulco pode ser considerada, sem muitos erros, como uma linha horizontal, traçada a partir do tempo em que cortou a vazão aplicada ao sulco. Somente nos sulcos com declividade superior a 0,5% e bem uniformes é que existem curvas próprias de recessão.

WU & LIANG (1970) afirmam que durante o tempo de recessão o armazenamento superficial é parcialmente conduzido para fora do sulco, conhecido como “runoff”, e parcialmente contribui para a infiltração ao longo do sulco. A exata quantificação do “runoff” e da infiltração causada pelo armazenamento superficial e o tempo de recessão não podem ser facilmente determinados. Entretanto, no final da

irrigação, para um dado comprimento de sulco, a quantidade total do armazenamento superficial é pequena se comparada com o total infiltrado e com o “runoff”, devendo ser assumido desprezível nas análises da eficiência de irrigação, como estudado por (WILLARDSON & BISHOP, 1967 e FOK & BISHOP, 1969, citados por WU & LIANG, 1970).

WU (1972) usa um modelo linear que relaciona a descarga e a lâmina de fluxo no canal para desenvolver uma relação matemática expressando o fluxo de recessão em sulcos ou faixas, considerando que este fluxo é importante na avaliação da eficiência de irrigação. As análises são baseadas na equação geral da continuidade para bacias hidrográficas.

A recessão é a fase da irrigação marcada pelo desaparecimento da água na superfície do solo. O tempo no qual a água desaparece da superfície do solo, após o tempo de corte da água, é de difícil predição (KARMELI et al., 1978, citado por LEVIEN, 1985).

Em geral, as mesmas equações que governam o fluxo durante o avanço são usadas para descrever a fase de recessão. Os modelos, Hidrodinâmico (SOUZA, 1981), zero-inércia (SOUZA, 1981; OWEIS, 1983) e o enfoque do balanço de volume (ESSAFI, 1983) foram usados para predizer as fases de recessão e avanço em irrigação por sulco. BASSET & FITZSIMMONS (1976); KATOPODES & STRELKOFF (1977), SHATANAWI (1980) desenvolveram modelos que definem as fases de recessão e avanço em irrigação por faixas. STRELKOFF (1977) apresenta uma solução para a fase de recessão em faixas que pode ser estendida para sulcos usando fatores geométricos apropriados (HOLZAPFEL et al., 1984).

Segundo MERRIAM & KELLER (1978), citado por LEVIEN (1985), na irrigação por sulcos a curva de recessão, que relaciona o tempo e a locação da estação onde a água desaparece da superfície do solo, é usualmente uma linha reta horizontal, a não ser que os dados de campo indiquem um significativo afastamento, o que em última análise está de acordo com a hipótese do (SCS-USDA, 1980).

FOK (1964); KARMELI et. al. (1978), citado por PORDEUS (1990), propõem uma função de recessão da seguinte forma:

$$X_r = g(t - t_r)^h \quad (2.50)$$

Onde: X_r = distância de recessão da água, medida a partir da cabeceira da faixa em declive;

t = tempo no qual a recessão atinge X_r ;

t_r = tempo no qual a recessão começa;

g e h = constantes empíricas; são específicas para uma série de condições e podem ser obtidas através de estudos de campo.

KARMELI et al. (1978), citado por LEVIEN (1985), afirmam que poucos modelos empíricos tem sido sugeridos para estimar a recessão e que é difícil prever exatamente, a taxa de armazenamento superficial em relação à água total infiltrada, sendo ambas em muitos casos negligenciáveis em sua contribuição para a água infiltrada.

A recessão é um fator essencial para determinação do tempo de oportunidade em qualquer seção do sulco, como também para avaliar de modo mais preciso e adequado às eficiências de irrigação (WU, 1972).

MERRIAM et al. (1973) afirmam que, se a água está presente no sulco por um tempo apreciável após o corte da adução, o tempo de recessão deve ser levado em consideração, uma vez que representa um tempo extra para a infiltração.

LEVIEN (1985), no desenvolvimento do seu modelo algébrico para irrigação por sulcos abertos com drenagem livre, considera a fase de recessão em duas etapas: início da recessão no tempo t_r , caracterizado pelo desaparecimento da lâmina na cabeceira da parcela e a recessão ao longo do sulco, estabelecida de forma seqüencial até o desaparecimento total da água no final do sulco.

A exemplo de STRELKOFF (1977), LEVIEN (1985), ao determinar a recessão, baseia-se no seu modelo para irrigação por faixas e estabelece, por hipótese, que no tempo de corte da água (t_{co}) o perfil da superfície da água é aproximado pelo plano ABCD, mostrado na figura (2.6). A lâmina d'água na cabeceira do sulco (y_0) é a lâmina normal no tempo t_{co} para a vazão Q_0 . A vazão de escoamento superficial no final do sulco (Q_1) é igual à Q_0 menos o valor da vazão infiltrada no sulco Q_{inf} . Isto permite o estabelecimento de algumas hipóteses para facilidade dos cálculos na fase de depleção:

- 1 – A lâmina Y_1 , no final do sulco, é constante e normal para a vazão de escoamento superficial Q_1 , no tempo t_r , marcando o fim da fase de depleção e o início da recessão;
- 2 – A taxa de escoamento superficial somada a taxa de infiltração é igual à Q_0 , ou seja:

$$Q_1 + Q_{inf} = Q_0 \quad (2.51)$$

- 3 – Os perfis superficiais em t_r e em t_{co} são planos (CDE e ABCD), como representados na figura (2.6).

Na cabeceira do sulco, a lâmina y_0 decresce à medida que o volume de água superficial diminui para suprir a infiltração e o escoamento superficial.

Essas hipóteses estabelecem os meios necessários para o referido autor estimar o tempo t_r , no qual a lâmina na cabeceira do sulco desaparece e começa a recessão. O intervalo de tempo compreendido entre o tempo de corte da água t_{co} e o tempo de recessão t_r é o tempo necessário para remover o volume ABCDE na figura (2.6).

O autor determina esse volume ABCDE da figura (2.6) pela integral da área da seção transversal A_y , função da lâmina y , no intervalo de (O - L), assumindo que y varia linear e inversamente com a distância x . Também considera que, no tempo de depleção, o volume removido é igual ao volume a ser drenado e infiltrado, o que resulta na seguinte equação para o início da recessão:

$$t_r = t_{co} + \frac{A_0}{M+2} \cdot \frac{L}{Q_0} \quad (2.52)$$

Em que: t_{co} = tempo de aplicação d'água;

A_0 = área da seção transversal na cabeceira do sulco;

M = expoente empírico da equação que representa a forma do sulco;

L = comprimento do sulco;

Q_0 = vazão de entrada derivada ao sulco.

LEVIEN (1985) assume, por hipótese, que a taxa de variação da lâmina com a distância é uniforme no início da fase de recessão, ou seja:

$$S_y = \frac{y_1(t_r)}{L} = \frac{1}{L} \cdot y_n(Q_o) \quad (2.53)$$

e que S_y permanece constante durante a fase de recessão (figura 2.7). A exemplo de (STRELKOFF, 1977), o referido autor assume a condição física mais importante para a validade das hipóteses relativas a superfície d'água: o declive do fundo do sulco S_o é suficientemente grande, de modo que a superfície da água, assumida, nunca se aproxime da horizontal, isto é:

$$S_o - S_y > 0 \quad (2.54)$$

Calculando a taxa de variação do volume armazenado na superfície com o tempo, e que permanece sobre o solo (volume ABCD da figura 2.7), em termos da taxa de infiltração média sobre a porção inundada do sulco, o autor desenvolve a expressão seguinte, para a fase de recessão:

$$t = t_r + \frac{S_y}{(M+1) \cdot \bar{I} \cdot G^{3/2}} \left\{ \left[\beta(G^{3/2} \cdot L)^{1/3} - 3ATN(G^{3/2} \cdot L)^{1/3} \right] - \left[3(G^{3/2} \cdot \ell)^{1/3} - 3ATN(G^{3/2} \cdot \ell)^{1/3} \right] \right\} \quad (2.55)$$

Em que: t_r = tempo do início da recessão, determinado pela expressão (2.52);

S_y = declividade da superfície d'água;

M = expoente da equação da geometria do sulco;

\bar{I} = taxa de infiltração média ao longo do sulco;

G = constante;

L = comprimento do sulco;

ℓ = porção inundada do sulco.

Na determinação da taxa de infiltração média, o autor assume a média aritmética das taxas no início e no final do sulco, ou seja:

$$\bar{I} = \frac{I(t_r) + I(t_r - t_{av})}{2} \quad (2.56)$$

e

$$G = \frac{C_u \cdot S_o^{1/2} \cdot S_y^{5/3}}{(M+1)^{5/3} \cdot n \cdot \bar{I}} \quad (2.57)$$

Sendo: t_{av} = tempo de avanço;
 C_u = coeficiente de unidades;
 n = coeficiente de rugosidade de Manning.

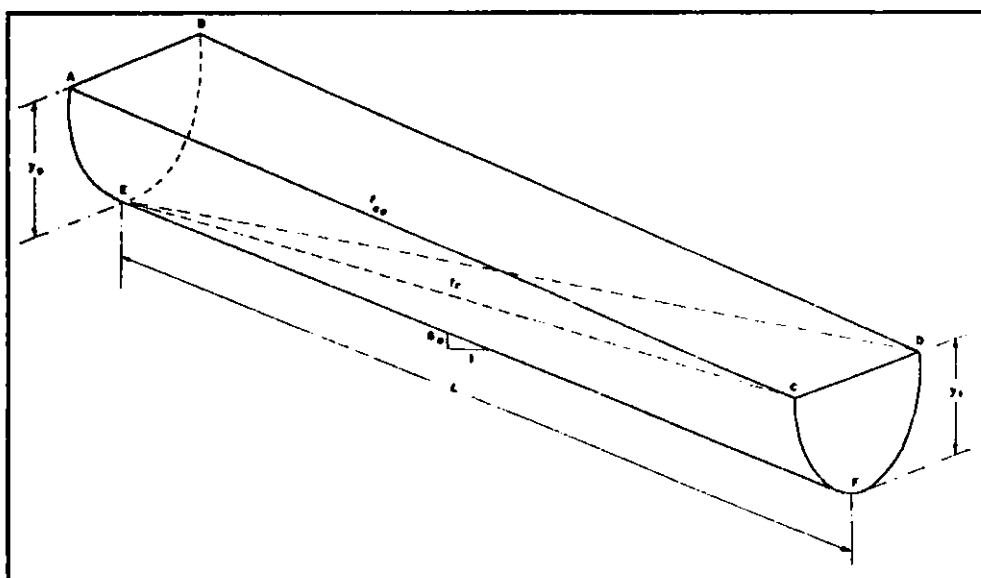


Figura 2.6 – Volume superficial esquemático: fase de depleção (Após LEVIEN, 1985).

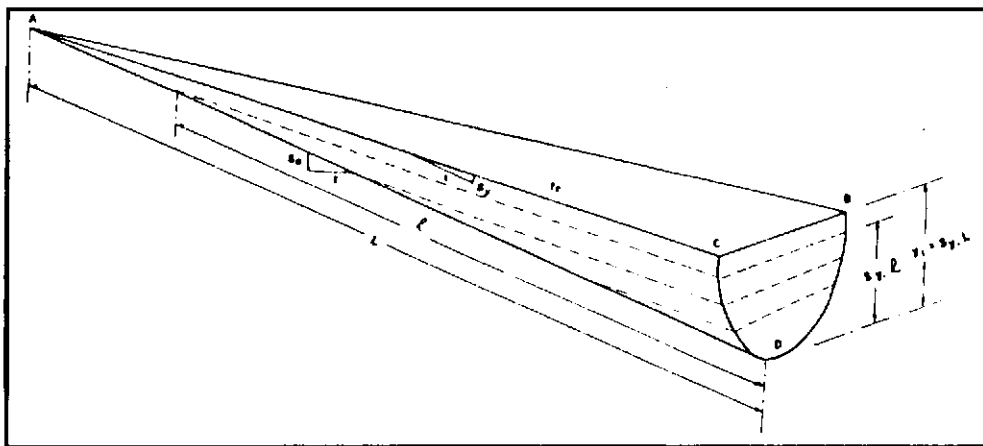


Figura 2.7 – Volume superficial esquemático: fase de recessão (Após LEVIEN, 1985).

2.3 – Eficiência e Uniformidade de Irrigação

Apesar da técnica de irrigação por sulcos ser conhecida há bastante tempo, a eficiência com que a mesma é realizada varia substancialmente. Além da eficiência de aplicação, tem-se que levar em consideração a eficiência de distribuição da água no solo, pois em certas ocasiões, mesmo com elevada eficiência de aplicação obtém-se baixa eficiência de distribuição, o que pode afetar grandemente a produção e a produtividade das culturas irrigadas (AUGUSTO et al., 1985).

O uso inadequado e o desconhecimento das potencialidades dos sistemas por superfície têm resultado em reduzida eficiência deles. Por esta razão, eles têm recebido a imerecida reputação de sistemas de reduzida eficiência (MERRIAM, 1976, citado por SCALOPPI, 1986). Entretanto, quando adequadamente dimensionados e operados, podem apresentar um desempenho comparável a qualquer outro sistema de irrigação conforme demonstram os resultados obtidos por (MUSICK et al., 1973) e (SCHNEIDER et al., 1976, citado por SCALOPPI, 1986).

A irrigação por sulcos, um dos sistemas de irrigação por superfície bastante utilizado no Brasil, normalmente apresenta baixa eficiência de aplicação nos perímetros irrigados, quer seja por manejo inadequado, quer seja devido a problemas intrínsecos do método, tais como, tempo de oportunidade para a infiltração da água ao longo dos sulcos, e a variabilidade espacial e temporal nas características de infiltração da água no solo (AZEVEDO et al., 1990).

HART et al. (1979), citado por SOUZA (1983), mostram que três parâmetros de eficiência e um de uniformidade de distribuição são suficientes para descrever adequadamente a performance de um sistema de irrigação, assumindo-se que: a extração de água da zona de raízes é uniforme; as características de infiltração do solo podem ser descritas por uma relação matemática entre lâminas infiltradas e tempo de oportunidade; e que o objetivo de uma irrigação é umedecer completamente a zona de raízes.

SOUZA (1983) informa que, conceitualmente, a adequabilidade de uma irrigação depende da água armazenada na zona de raízes, da água que percola abaixo da zona de raízes, do escoamento superficial, da uniformidade de distribuição da água aplicada e do déficit de água na zona de raízes após a irrigação.

Segundo SCALOPPI (1984), a eficiência de determinado processo de irrigação é uma medida das perdas que ocorrem na execução do mesmo e que parece haver uma relação direta entre os níveis de eficiência e os custos, de maneira que a obtenção de altos níveis de eficiência nem sempre constitui a melhor alternativa econômica.

No caso específico da irrigação, a eficiência é composta de várias eficiências distintas, relacionadas com a condução de água, aplicação, distribuição, etc, todas contribuindo para uma eficiência total do sistema. Por isso, (JENSEN, 1967) sugere que todas as vezes que se mencione eficiência a mesma deve ser definida apropriadamente.

GUROVICH (1979); MEDEIROS (1987), citado por SILVA (1987), consideram que apenas a eficiência de aplicação é insuficiente para avaliar o resultado de uma irrigação; no entanto, propõem o conceito de eficiência do uso de água, para analisar o uso de água em nível de parcela, o qual é resultado do produto da eficiência de aplicação por outras duas eficiências: a de armazenamento e a de distribuição.

De acordo com MERRIAM & KELLER (1978), citado por AUGUSTO et al., (1985), uma completa avaliação fornece informações necessárias para a identificação dos problemas existentes, tornando possível fazer mudanças para corrigi-los, bem como fazer comparações econômicas de procedimentos e métodos, e, ainda, fornecer dados de sistemas sob condições similares. Esses dados dizem respeito às perdas por percolação profunda (Z_p), escoamento superficial (Y_{ro}), eficiência de aplicação (E_a), de armazenamento (E_s) e de distribuição (E_d); comprimento dos sulcos (L), vazão ótima a ser

aplicada (Q), forma e espaçamento dos sulcos e a necessidade ou não de reutilização das perdas por escoamento superficial.

No Nordeste do Brasil, em que a importância da irrigação por sulcos (ocupando cerca de 70% da área irrigada), em termos gerais, pouco se tem estudado sobre a eficiência e uniformidade de distribuição da água por este método. Com isto, na falta de informação científica, os técnicos são obrigados a lançar mão de certos coeficientes e parâmetros empíricos necessários ao dimensionamento dos sistemas de irrigação, que na maioria das vezes são totalmente adversos a localidade em estudo. Portanto, é plenamente justificável a realização de pesquisas que visem estudar estes importantes aspectos da irrigação por sulco (AUGUSTO et al., 1985).

SOUZA (1984) afirma que a elaboração de projetos e a operação de sistemas de irrigação por sulcos com alta eficiência podem ser extremamente facilitados no momento em que as variáveis que governam o fenômeno e suas relações sejam conhecidas desde um ponto de vista científico.

RODRIGUEZ (1989), citado por PORDEUS (1990), baseado na teoria atualmente publicada na literatura sobre a elaboração e avaliação de projetos de irrigação superficial, o modelo algébrico apresenta as vantagens de sua simplicidade de aplicação comparada aos modelos mais avançados, e, quanto mais representativos forem os valores atribuídos aos fatores de forma r_y e r_z , ao perímetro molhado e uma boa representação da recessão, este modelo aproxima-se aos mais complexos como o hidrodinâmico e zero-inércia.

2.3.1 – Eficiência de aplicação de água

O conceito de eficiência de aplicação de água surgiu da necessidade de fixar a atenção em medir a eficiência com que a água aplicada era armazenada na zona radicular do terreno, de maneira que pudesse ser utilizada pelas plantas. Desse modo, (ISRAELSEN & HANSEN, 1965) definem eficiência de aplicação de água pela expressão seguinte:

$$E_a = 100 \cdot \frac{W_s}{W_f} \quad (2.58)$$

Onde: E_a = eficiência da água aplicada;

W_s = água armazenada na zona radicular durante a irrigação;

W_f = água de irrigação derivada ao campo.

Segundo ISRAELSEN & HANSEN (1965), a eficiência de aplicação oscila entre valores muito baixos até valores próximos a 100% ; e que, na prática normal da irrigação por gravidade, este valor pode estar próximo de 60%.

As perdas mais comuns da água de irrigação, no transcurso de sua aplicação, podem ser:

R_f = perdas por escoamento superficial;

D_f = percolação profunda abaixo da zona radicular.

Desprezando as perdas por evaporação durante o período de aplicação e imediatamente depois, o referido autor apresenta outra forma de computar a (E_a):

$$W_f = W_s + R_f + D_f \quad (2.59)$$

$$E_a = 100 \cdot \frac{W_f - (R_f + D_f)}{W_f} \quad (2.60)$$

SOUZA (1983) define a eficiência de aplicação como a relação entre o volume (ou lâmina) d'água armazenada na zona de raízes e o volume (ou lâmina) aplicado, ou seja:

$$E_a = \frac{V_u}{V_o} \cdot 100 \quad (2.61)$$

Em que: V_u = volume útil as culturas;

V_o = volume aplicado.

O referido autor afirma que o termo (E_a) representa a porcentagem total da água aplicada na irrigação que pode ser considerada útil as culturas e que é um indicador da água aplicada em excesso durante a irrigação, sem dar idéia da adequação quanto ao

abastecimento da zona das raízes. Além do mais, a (E_a) é inadequada para descrever sozinho a qualidade de uma irrigação, uma vez que ela não indica a distribuição real da água; a quantidade da água que percola, o volume de déficit após a irrigação, nem o volume de “runoff”.

BERNARDO (1986) afirma que a eficiência de aplicação é a estimativa da porcentagem do total de água aplicada na irrigação que é considerada útil às culturas. O valor mínimo aceitável da (E_a) num projeto é de 66%. O ideal é que o valor deste parâmetro esteja acima de 70%, sendo calculado pela seguinte equação:

$$E_a = \frac{L_f}{L_m} \cdot 100 \quad (2.62)$$

$$e \quad L_m = \frac{q \cdot T_i}{C \cdot L} \quad (2.63)$$

Em que: L_f = lâmina infiltrada no final do sulco que deve ser igual a lâmina retida na zona radicular;
 q = vazão aplicada por sulco;
 L_m = lâmina média aplicada por sulco;
 T_i = tempo de aplicação de água no início do sulco;
 C = comprimento do sulco;
 L = largura da faixa umedecida por sulco, para sulcos próximos, esta largura é o espaçamento entre sulcos.

WALKER & SKOGERBOE (1987) apresentam um relacionamento entre a aplicação de água requerida e a distribuição de umidade atual para três regimes típicos de irrigação, na avaliação da irrigação por sulcos. No primeiro caso, a adução da água é cessada brevemente após o término da fase de avanço e, a aplicação de água não satisfaz em alguns pontos a quantidade requerida, denominada “sub-irrigação” ou “irrigação deficiente”. No segundo caso, a área mínima irrigada recebe exatamente a quantidade requerida de água, denominada de “completa irrigação”. No terceiro caso, e o mais frequente, a lâmina aplicada excede a lâmina requerida em todos os pontos ao longo do

sulco; denominada de “irrigação com excesso”. Desse modo, os autores expressam a eficiência de aplicação de água, baseado nos três regimes de irrigação, ou seja:

No segundo e terceiro regime, a expressão é a seguinte:

$$E_a = \frac{Z_{req} \cdot L}{Q_o \cdot T_{co}} \cdot 100 \quad (2.64)$$

Em que: Z_{req} = lâmina requerida de aplicação, para o sulco representa um volume infiltrado por unidade de largura que normalmente é igual ao espaçamento do sulco;

L = comprimento do sulco;

Q_o = vazão derivada ao sulco;

T_{co} = tempo de corte da água.

Para o primeiro regime, no caso de irrigação deficiente, a expressão de (E_a) é a seguinte:

$$E_a = \frac{Z_{req} \cdot X_d + V_{zi}}{Q_o \cdot T_{co}} \cdot 100 \quad (2.65)$$

Sendo: X_d = fração do comprimento do sulco que recebe a quantidade de água requerida;

V_{zi} = volume infiltrado na área irrigada inadequadamente.

$$V_z = V_{za} + V_{zi} \quad (2.66)$$

Em que: V_z = volume total infiltrado;

V_{za} = volume infiltrado na área irrigada adequadamente.

O volume total infiltrado pode ser determinado pela integração do perfil de distribuição de água infiltrada usando a regra do trapézio:

$$V_z = \frac{L}{2 \cdot n} (Z_0 + 2Z_1 + 2Z_2 + \dots + Z_n) \quad (2.67)$$

Em que: L = comprimento do sulco;

Z_i = volume infiltrado acumulado por unidade de comprimento de sulco no i -ésimo ponto;

n = número de incrementos usados para subdividir o sulco.

WILLARDSON & BISHOP (1967) afirmam que a eficácia do fornecimento de água de uma irrigação pode ser aumentada melhorando a eficiência de aplicação de água. Em irrigação por superfície, a eficiência de aplicação de água é influenciada, principalmente, pela quantidade de água aplicada; a característica de infiltração do solo, e a taxa de avanço da água sobre a superfície do solo.

Os autores analisam a importância relativa das perdas por "runoff" e percolação profunda, considerando as análises apresentadas por (BISHOP, 1961). Desse modo, desenvolvem um procedimento para estimar as perdas por "runoff" e a eficiência de aplicação, sendo representada por:

$$E_a = 100 \left[1 - \left(\frac{t_r}{t_r + t_1} \right) \left(\frac{q_r}{q_f} \right) - \left(\frac{(R+1)^{n+1} - R^{n+1}}{(R+1)^{n+1} + R^{n+1}} \right) \right] \quad (2.68)$$

Em que: q_r = vazão de runoff;

q_f = vazão de entrada no sulco;

t_r = tempo que ocorrerá o runoff, assumido igual ao tempo requerido para abastecer a zona radicular no final do sulco;

t_1 = tempo requerido para a água alcançar o final do sulco ("tempo de avanço");

R = relação adimensional entre t_r e t_1 ;

n = expoente da função de infiltração instantânea.

As eficiências de aplicação de água obtidas no campo são freqüentemente inferiores a 60%. Entretanto, baixas eficiências de aplicação podem ser atribuídas, principalmente, a sobre-irrigação, ou seja, aplicação continuada de água após o reabastecimento de água da zona radicular. Quando a água é aplicada depois de ter sido

preenchida a zona radicular, qualquer quantidade adicional será perdida por percolação profunda e por “runoff”; nestas condições, a eficiência de aplicação decresce rapidamente (WILLARDSON & BISHOP, 1967).

Trabalhando em parcelas com 0,2% de declividade, (FISCHBACH & SOMERHALDER, 1971) obtiveram eficiências de irrigação de 64,8%, sem reutilização de “runoff”; e 91,9% com utilização de “runoff”.

SOMERHALDER (1958) analisa as eficiências de aplicação de água em irrigação por aspersão e por sulcos, e determina valores de 84% e 72%, respectivamente.

NOGUEIRA (1976), analisa a eficiência de aplicação de água na irrigação por sulcos nos Perímetros Irrigados: Engenheiro Arcoverde, São Gonçalo e Sumé, localizados no Estado da Paraíba, e conclui que as eficiências médias nos referidos perímetros foram de 40,25%, 51,10% e 54,96%, respectivamente.

PINTO (1980), utiliza vazão contínua de 0,44ℓ/s em sulcos com declividade igual a 0,47%, obtendo uma eficiência de aplicação igual a 56%.

AUGUSTO et al. (1985) avaliam a eficiência de aplicação e distribuição de água na irrigação por sulcos em declive no perímetro irrigado de Morada Nova – CE, e, utilizam vazões de 0,753; 0,764; 1,30 / 0,77; 1,37 / 0,75; 1,337 e 1,330 ℓ/s, para uma declividade do sulco de 0,64% e determinam às eficiências de aplicação iguais a 27,74; 27,34; 22,41; 21,49; 15,62 e 15,70% respectivamente.

2.3.2 – Eficiência de Armazenamento

Baseado na aplicação insuficiente de água, observada em várias áreas irrigadas, (HANSEN, 1953, citado por HANSEN, 1960) propôs um novo conceito denominado de eficiência de armazenamento de água para auxiliar na avaliação deste problema. Este conceito orienta como a necessidade de água é armazenada na zona radicular durante a irrigação:

$$E_s = 100 \cdot \frac{W_s}{W_n} \quad (2.69)$$

Em que: E_s = eficiência de armazenamento de água;
 W_s = água armazenada na zona radicular durante a irrigação;
 W_n = água necessária na zona radicular antes da irrigação.

Várias pesquisas têm revelado que valores mais elevados da eficiência de armazenamento de água implica em maior produção e um maior retorno financeiro, e que, freqüentemente, uma alta eficiência de aplicação indica que a eficiência de armazenamento deve ser um índice importante para melhor avaliar a prática de irrigação (HANSEN, 1960).

Conforme SOUZA (1983), a eficiência de armazenamento expressa a relação entre o volume (ou lâmina) d'água armazenada na zona das raízes e o volume (ou lâmina) real necessário para abastecer esta zona.

Portanto:

$$E_s = \frac{V_u}{V_{req.}} \cdot 100 \quad (2.70)$$

Ao contrário da eficiência de aplicação, a eficiência de armazenamento dá uma idéia do reabastecimento da zona das raízes. ISRAELSEN et al. (1980), citado por SOUZA (1983), afirmam que há casos que um aumento de (E_s) serviu para triplicar a produção em regiões onde a lâmina aplicada era insuficiente para reabastecer a zona das raízes.

De acordo com WALKER & SKOGERBOE (1987), para os regimes de “completa irrigação” e “sobre-irrigação”, ou irrigação com excesso, a eficiência de armazenamento de água é igual a 100%. No caso de “sub-irrigação”, ou irrigação insuficiente, a eficiência de armazenamento é calculada pela seguinte expressão:

$$E_r = \frac{Z_{req} \cdot X_d + V_{zi}}{Z_{req} \cdot L} \cdot 100 \quad (2.71)$$

O numerador da equação (2.71) representa o volume útil e o denominador, o volume requerido na zona radicular.

ISRAELSEN & HANSEN (1965) afirmam que a eficiência de armazenamento da água é importante, sempre que durante a irrigação não se armazene a água suficiente na zona radicular. Isto pode ocorrer devido à escassez, o alto custo da água e o tempo excessivo que é necessário para assegurar uma infiltração adequada. A existência de um problema de salinidade pode fazer necessário que a eficiência de armazenamento seja elevada para que os sais da superfície do terreno sejam lavados. Em muitos casos, um alto rendimento de aplicação de água indica que o rendimento de armazenamento de água possa ser um índice mais representativo de uma prática de irrigação melhor.

2.3.3 – Uniformidade de distribuição da água

Conforme HANSEN (1960), outra característica importante na irrigação é a uniformidade de distribuição da água por toda a zona radicular. Na maioria dos casos, a resposta dos cultivos corresponde a uma melhor uniformidade de distribuição de água.

A fórmula que expressa o grau de uniformidade de distribuição, proposta por (HANSEN, 1960), é a seguinte:

$$E_d = 100 \cdot [1 - (y/d)] \quad (2.72)$$

Em que: E_d = eficiência de distribuição da água;

y = desvio numérico médio da lâmina de água armazenada, do valor da lâmina média armazenada durante a irrigação;

d = lâmina média armazenada durante a irrigação.

É interessante observar que a equação (2.72) é idêntica ao Coeficiente de Uniformidade (C_u) definido por (CHRISTIANSEN, 1942), citado por (HANSEN, 1960):

$$C_u = 100 \left[1 - \frac{\sum x}{M \cdot n} \right] \quad (2.73)$$

Onde: x = desvio das observações individuais do valor da média M ;

n = número de observações.

Segundo SOUZA (1983), o parâmetro mais comumente usado para expressar a uniformidade de distribuição da água é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), dado pela seguinte expressão:

$$CUC = E_d = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|}{n \cdot \bar{Z}} \right] \cdot 100 \quad (2.74)$$

Em que: Z_i = lâmina infiltrada em um ponto (i) qualquer;

\bar{Z} = lâmina média infiltrada;

n = número total de pontos.

KARMELI et al. (1978), citado por SOUZA (1983), afirmam que diferentes distribuições da água no solo podem dar origem a diferentes valores de (CUC).

Conforme MERRIAM et al. (1973), a uniformidade de distribuição dá uma indicação da uniformidade da infiltração através do campo. A expressão seguinte é útil como um indicador da magnitude dos problemas da distribuição. Um baixo valor indica que a perda por percolação foi excessiva, e um alto valor indica que a aplicação de água em toda a área irrigada foi adequada. Se a excessiva perda por percolação é controlada, a área, gravemente sub-irrigada, recebe a lâmina mínima infiltrada.

$$DU = \frac{\text{Lâmina Mínima Infiltrada}}{\text{Lâmina Média Infiltrada}} \quad (2.75)$$

Sob condições corretas de manejo da irrigação por sulco, ou seja, quando o tempo de oportunidade de infiltração no final do sulco for suficiente para infiltrar naquela extremidade a lâmina de irrigação, o valor da eficiência de distribuição, normalmente será maior do que 70%, exceto nos solos muito permeáveis (BERNARDO, 1986). Ela pode ser estimada pela seguinte equação:

$$E_d = \frac{L_f}{(L_i + L_f)/2} 100 \quad (2.76)$$

Em que: E_d = eficiência de distribuição;
 L_f = lâmina infiltrada no final do sulco;
 L_i = lâmina infiltrada no início do sulco.

SOUZA (1983) afirma que a expressão (2.76) assume que a distribuição real da água infiltrada é uma linha reta. Ela tem a vantagem de requerer apenas dois pontos, no início e no final do sulco, sem necessidade de determinar as curvas de avanço e recessão, servindo de base para comparação entre diferentes sistemas de irrigação.

2.3.4 – Perda por Percolação Profunda

As perdas de água por percolação estão intimamente relacionadas com o processo de infiltração da água no solo. Perdas excessivas por percolação podem elevar muito o consumo de água, lixiviar os nutrientes do solo, diminuindo, assim, sua fertilidade, elevar o lençol freático e, conseqüentemente, causar problemas de salinização na área de irrigação (AZEVEDO et al., 1990).

CRIDDLE et al. (1956) apresentam uma análise matemática da perda por percolação profunda, correspondente a um comprimento de sulco, proporcional ao tempo de avanço igual a $(1/4)$, do tempo necessário para aplicar a lâmina requerida no final do sulco. Eles assumem que as lâminas de água, infiltradas no solo em iguais incrementos de tempo $(T/4)$, é uniforme. Para os solos de textura média, freqüentemente, a taxa de infiltração da água no solo decresce inversamente proporcional com a raiz quadrada do tempo decorrido. Desse modo, a porcentagem da água infiltrada que será perdida por percolação, em relação à lâmina média infiltrada, considerando o perfil linear, terá uma magnitude em torno de 5%.

Os referidos autores usam o seguinte tipo de equação para descrever a infiltração: $D = K \cdot T^n$.

Em que: D = infiltração acumulada,
 K = parâmetro empírico, que é função da umidade inicial do solo (AZEVEDO, 1975);
 n = expoente empírico.

BISHOP (1961) apresenta uma análise matemática para o cálculo da porcentagem da perda por percolação profunda para qualquer comprimento de sulco e para todo o tipo de solo. Ele generaliza o método apresentado por (CRIDDLE et al., 1956), introduzindo uma relação adimensional (R) entre o tempo requerido para abastecer a zona de raízes e o tempo necessário para a água alcançar a extremidade final da parcela. Como os tempos de oportunidade para o início e o final do sulco são: $(R+1).T_1$ e $R.T_1$; respectivamente, a porcentagem da perda por percolação profunda em relação ao total infiltrado ao longo do sulco será determinada considerando-se a forma triangular do perfil infiltrado abaixo da zona das raízes, pela seguinte equação:

$$P = \frac{(R+1)^{n+1} - R^{n+1}}{(R+1)^{n+1} + R^{n+1}} \cdot 100 \quad (2.77)$$

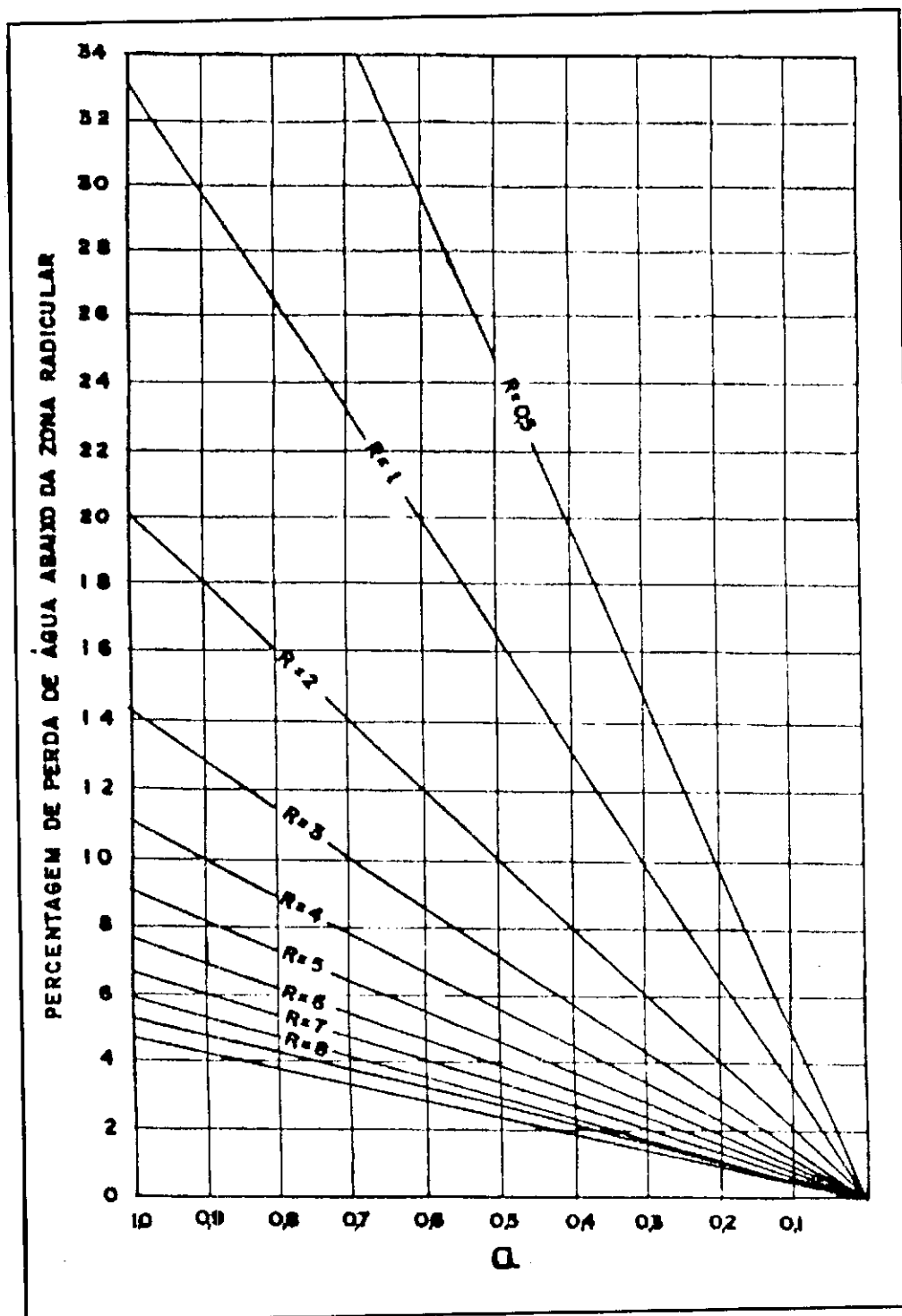


FIGURA 2.8 – Percentagem de perda por percolação profunda, abaixo da zona radicular, função de valores de (α) e (R) (Após BISHOP, 1961).

O referido autor assume também que existe uma relação linear para o valor de P na equação (2.77), entre $n = 0$ e $n = -1$, para um dado valor de R , o que resulta na

seguinte expressão, que permite estimar o valor de P para qualquer tipo de solo e comprimento de sulco, ou pela Figura (2.8):

$$P = \frac{1+n}{2R+1} \cdot 100 \quad (2.78)$$

Sendo: P = perda por percolação profunda;
 R = relação adimensional entre T_r e T_1 ;
 T_r = tempo requerido para preencher a zona de raízes;
 T_1 = tempo de avanço;
 n = expoente empírico da função de infiltração instantânea, ou seja,
 $(0 > n > -1)$.

BERNARDO (1986) apresenta um método mais preciso que o de (BISHOP, 1961), para determinação da percentagem de percolação, com a mesma simplicidade de cálculo, e que consiste em se dividir o tempo de avanço T_a e o tempo exigido para aplicação da lâmina de irrigação T_r em quatro intervalos cada um, tornando-se uma variação linear dentro de cada intervalo, o que será bem mais preciso do que tornar uma variação linear única em todo o tempo de avanço ou no tempo exigido para aplicação da lâmina de irrigação. Entretanto, esse método requer conhecimento "in loco" da curva de avanço de água no sulco. A percentagem de água perdida por percolação, em relação ao volume retido na zona radicular, será:

$$P_p = \frac{(1,75L_1 + 1,25L_2 + 0,75L_3 + 0,25L_4) \cdot n \cdot 100}{2R \cdot L} \quad (2.79)$$

A equação (2.79) é aproximada e baseada na suposição de que P_p varia linearmente com n.

O referido autor informa que para cálculos mais precisos deve-se determinar P_p em função de V_p e V_u , através da seguinte expressão, principalmente para pequenos valores de R:

$$P_p = \frac{V_p}{V_u} \cdot 100 \quad (2.80)$$

Em que: V_p = volume total de água percolada;
 V_u = volume retido de água na zona radicular.

WALKER & SKOGERBOE (1987) apresentam as seguintes expressões para o cálculo da taxa de percolação profunda, em função dos três regimes típicos de irrigação:

Para os regimes de “completa-irrigação” e “sobre-irrigação”, a expressão é a seguinte:

$$DPR = \frac{V_z - Z_{req} \cdot L}{Q_o \cdot T_{co}} \cdot 100 \quad (2.81)$$

Para o regime de “sub-irrigação” ou irrigação insuficiente, a expressão é a seguinte:

$$DPR = \frac{V_{za} - Z_{req} \cdot X_d}{Q_o \cdot T_{co}} \cdot 100 \quad (2.82)$$

SOUZA (1983) indica que o índice de percolação profunda expressa a relação entre o volume (ou lâmina) d’água perdida por percolação profunda e o volume (ou lâmina) aplicado, isto é:

$$D_p = \frac{V_p}{V_o} \cdot 100 \quad (2.83)$$

2.3.5 – Perda por Escoamento Superficial

A perda de água por escoamento superficial é de difícil controle durante a irrigação, particularmente quando se trata de sulcos em declive. Pode ser, porém, parcialmente controlada, reduzindo-se a vazão de entrada quando a água alcança a parte

inferior da área. Entretanto, esse tipo de técnica requer mais mão-de-obra, tornando-se pouco prático. O controle das perdas de água por “runoff” e percolação, enquanto se repõe a água no solo na zona radicular, constitui um dos maiores desafios atuais para o bom manejo de um sistema de irrigação por sulcos. Esse controle torna-se ainda mais difícil quando se trata de solos de textura leve ou bastante estruturados, como alguns latossolos (AZEVEDO et al., 1990).

WILLARDSON & BISHOP (1967) assumem que o fluxo de “runoff” é uma percentagem constante do fluxo de entrada no sulco, durante o período de “runoff”, e que o tempo de irrigação ($t_r + t_1$) é suficiente para preencher completamente de água a zona radicular na extremidade final da área:

$$P_r = 100 \left(\frac{t_r}{t_r + t_1} \right) \left(\frac{q_r}{q_f} \right) \quad (2.84)$$

Em que: t_r = tempo de “runoff” que é igual ao tempo requerido;

T_1 = tempo de avanço;

q_r = fluxo de “runoff”;

q_f = fluxo de entrada no sulco.

WALKER & SKOGERBOE (1987) apresentam uma expressão para o cálculo da taxa de “runoff” que é função da eficiência de aplicação e da taxa de percolação profunda para os respectivos regimes típicos de irrigação:

$$TWR = 100 - E_a - DPR \quad (2.85)$$

Em que: TWR = taxa de “runoff”;

E_a = eficiência de aplicação;

DPR = taxa de percolação profunda.

SOUZA (1983) indica que a taxa de “runoff” é uma relação entre o volume (ou lâmina) d’água perdida por “runoff” e o volume (ou lâmina) aplicado. Portanto:

$$R_o = \frac{V_{ro}}{V_o} \cdot 100 \quad (2.86)$$

Sendo: V_{ro} = volume de “runoff”;

V_o = volume aplicado.

Conforme SOUZA (1983), para se determinar todos os parâmetros que expressam a qualidade da irrigação, é necessário conhecer os volumes (ou lâminas) que são: V_u , V_d , V_p , V_{ro} , V_{req} , V_{inf} , aplicando-se o balanço de volume e desprezando-se as perdas por evaporação durante a irrigação, tem-se:

$$V_o = V_{inf} + V_{ro} \quad (2.87)$$

onde: $V_{inf} = V_p + V_u \quad (2.88)$

ou seja: $V_o = V_u + V_p + V_{ro} \quad (2.89)$

SOUZA (1983) afirma que a medição de parâmetros hidrológicos é muito mais fácil do que a de parâmetros no subsolo. Desse modo, os volumes que podem ser medidos com mais acuracidade na irrigação superficial são o volume aplicado V_o e o volume de “runoff” V_{ro} . Em contraste, apesar dos métodos padronizados para determinação da infiltração, esse parâmetro é de difícil mensuração, devido à variabilidade espacial e da variação da infiltração entre irrigações. O volume requerido na zona de raízes V_{req} é determinado a partir das informações físicas do solo, como CC, PM, d_a , profundidade de raízes e o grau de estresse que as culturas toleram. Os parâmetros que expressam a qualidade da irrigação podem ser computados diretamente no campo ou através de modelos matemáticos da irrigação superficial.

3.0 -MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a metodologia utilizada no presente trabalho para analisar os seguintes aspectos:

- 1) a influência dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial sobre o avanço;
- 2) a influência da recessão, sobre a distribuição do perfil de infiltração, sobre o volume de escoamento superficial e conseqüentemente, sobre os parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação.

Na fase de avanço, utiliza-se a equação do balanço de volume para sulcos, apresentada por (SOUZA, 1981). Nesta etapa, considera-se para os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, valores estimados, e calculados de acordo com as equações apresentadas por (SOUZA, 1981); por (FOK & BISHOP, 1965), e a média ponderada de fatores de forma calibrados.

No estudo da fase de recessão, considera-se três hipóteses, a serem analisadas do seguinte modo:

- 1) a recessão é uma curva, que decorre de forma seqüencial ao longo de toda a parcela, de acordo com a expressão algébrica desenvolvida por (LEVIEN,1985);

- 2) a recessão ocorre instantaneamente, logo após o desaparecimento da água na cabeceira da parcela, conforme expressão algébrica desenvolvida por (LEVIEN, 1985);
- 3) a recessão ocorre imediatamente após a suspensão da aplicação de água.

O estabelecimento das fases de avanço e recessão, através de simulação algébrica, utilizando-se o modelo algébrico de (LEVIEN, 1985), em conjunto com os parâmetros experimentais, obtém-se as condições necessárias e suficientes, para analisar a performance dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive. Desse modo, o estudo tem a abrangência, ao considerar o volume de escoamento superficial, estimado pelo modelo de (LEVIEN, 1985), na determinação dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação, sob a hipótese de que o perfil de infiltração é linear.

3.1 – Fase de Avanço

Segundo SOUZA (1981), a equação básica do balanço de volume é expressa do seguinte modo:

$$Q \cdot t = \nabla_y + \nabla_z \quad (3.1)$$

em que:

$Q \cdot t$ = Volume aplicado, durante o tempo t ;

∇_y = Volume armazenado na superfície do solo no tempo t ;

∇_z = Volume infiltrado no tempo t .

Conforme este mesmo autor, com relação a ∇_y , qualquer que seja a forma do perfil superficial da água, assume-se que a área média da seção transversal (\overline{A}_y) permanece constante. Desse modo, ela pode ser representada pelo produto da área da seção transversal na cabeceira da parcela, multiplicada pelo fator de forma (r_y).

De modo que:

$$\nabla_y = A_o \cdot r_y \cdot x_a \quad (3.2)$$

A exemplo de SOUZA (1981); o volume infiltrado pode ser expressado em termos da área média infiltrada (\bar{A}_z).

De modo que:

$$V_z = A_{zo} \cdot r_z \cdot x_a \quad (3.3)$$

em que:

A_o = Área da seção transversal do fluxo na entrada do sulco;

A_{zo} = Volume infiltrado na cabeceira do sulco por unidade de comprimento;

r_y e r_z = fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial;

x_a = distância para a qual a água avançou durante o intervalo de tempo t.

Substituindo as equações (3.2) e (3.3) em (3.1), e desenvolvendo, SOUZA obteve uma nova expressão que estima o avanço (x_a) em função dos demais parâmetros:

$$X_a = \frac{Q \cdot t}{A_o \cdot r_y + A_{zo} \cdot r_z} \quad (3.4)$$

Assumindo-se os intervalos de tempo constantes (Δt), obtêm-se as distâncias em função dos tempos de avanço correspondentes.

Demonstra-se, nos itens seguintes, como os diversos parâmetros da equação (3.4) são determinados.

3.1.1 – Fatores de Forma dos Perfis Superficial e Subsuperficial

3.1.1.1 - Fatores de Forma Estimados

Os valores de r_y e r_z são empíricos, ou estimados para cada condição. Na literatura encontram-se valores entre 0,70 e 0,80, atribuídos a r_y e r_z .

Neste trabalho estima-se dois valores para os fatores de forma, r_y e r_z .

$$r_{y1} = 0,70 \quad (3.5)$$

$$r_{z1} = 0,75 \quad (3.6)$$

$$r_{y2} = 0,75 \quad (3.7)$$

$$r_{z2} = 0,80 \quad (3.8)$$

Com estes valores, analisa-se o efeito das variações dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, sobre a curva de avanço da água nos sulcos.

3.1.1.2 - Cálculo dos Fatores de Forma, Segundo (SOUZA, 1981)

SOUZA(1981), desenvolve no modelo hidrodinâmico, através de cálculo numérico, duas expressões para os fatores de forma r_y e r_z ; consideradas para célula situada na extremidade da frente de avanço da água nos sulcos.

$$r_{y3} = \frac{1}{\beta(M+1)+1} \quad (3.9)$$

$$r_{z3} = \frac{1}{\beta \cdot M + \alpha + 1} \quad (3.10)$$

em que:

β = constante = 3/7;

M = expoente da equação da geometria do sulco;

α = expoente da equação de infiltração (KOSTIAKOV).

Neste trabalho, estes fatores de forma, são considerados para toda a extensão da frente de avanço.

3.1.1.3 - Cálculo dos Fatores de Forma Segundo (FOK & BISHOP, 1965)

FOK & BISHOP (1965) utilizam em sua técnica de balanço de volume, para estimar a taxa de avanço em faixas e sulcos, as seguintes equações para os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial:

$$r_{y^4} = \frac{1}{1+b} \quad (3.11)$$

No cálculo do fator de forma, r_{z^4} , utiliza-se expressão equivalente, que é atualmente mais conhecida, conforme HART et al. (1968):

$$r_{z^4} = \frac{\Gamma(1+b) \Gamma(1+a)}{\Gamma(1+a+b)} \quad (3.12)$$

em que:

b = expoente empírico da função de avanço, determinado pela expressão (FOK & BISHOP, 1965):

$$b = e^{-0,6 \cdot a} \quad (3.13)$$

em que:

a = expoente da equação de infiltração de KOSTIAKOV;

Γ = função gama.

3.1.1.4 - Cálculo dos fatores de forma, conforme a média ponderada dos pontos isolados calibrados da curva experimental

No cálculo dos fatores de forma, calibrados da curva de avanço experimental, utiliza-se expressão que é derivada da equação do Balanço de Volume, apresentada por (SOUZA, 1981):

$$x_a = \frac{Q_o \cdot t}{A_o \cdot r_y + A_{zo} \cdot r_z} \quad (3.14)$$

De acordo com SOUZA (1983), o fenômeno completo da irrigação por sulcos não é nada menos que um caso especial de fluxo espacialmente variado e não permanente sobre um meio poroso.

Neste caso, as parábolas que envolvem os armazenamentos de água superficial e subsuperficial são de graus diferentes; devido às características hidráulicas bem distintas para os dois tipos de escoamento no decorrer das irrigações; no entanto, é provável que a relação entre os fatores de forma dos perfis subsuperficial e o superficial não resulte em valor unitário, podendo ser expressa do seguinte modo:

$$\frac{r_z}{r_y} = 1 + \alpha \quad ; \quad \text{e } \alpha > 0 \quad (3.15)$$

em que: α = é o percentual de aumento do fator de forma r_z em relação a r_y .

Admite-se que, devido as elevadas taxas de infiltração no início da irrigação, ou seja, observadas para a fase de avanço, o valor de α deve ser maior que zero.

Neste trabalho, assume-se por hipótese, para facilitar o cálculo, que o valor de α é igual a zero, o que significa dizer que na análise algébrica a seguir os valores dos fatores de forma r_y e r_z são iguais a r_i , isto é:

$$r_y = r_z = r_i \quad (3.16)$$

Substituindo a expressão (3.16) em (3.14) e colocando-se o fator de forma r_i em evidência, a equação (3.14) assume a seguinte forma:

$$X_{ai} = \frac{Q_o \cdot t_{ai}}{r_i \cdot (A_o + A_{zoi})} \quad (3.17)$$

Explicitando-se o valor de r_i , obtem-se a expressão do seguinte modo:

$$r_i = \frac{Q_o \cdot t_{ai}}{X_{ai} \cdot (A_o + A_{zoi})} \quad (3.18)$$

em que:

r_i = fator de forma que ajusta o modelo em cada ponto i da curva de avanço experimental;
 X_{ai} e t_{ai} = distância e tempo de avanço em cada ponto i da curva de avanço observada.

Após a determinação de todos os fatores de forma r_i , utiliza-se a média ponderada dos r_i calculados em relação aos tempos de avanço t_{ai} observados, considerando-se que este é um valor representativo, obtendo-se:

$$r_{y5} = r_{z5} = \bar{r}_i = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ai} \cdot r_i}{\sum_{i=1}^n t_{ai}} \quad (3.19)$$

No presente trabalho, os valores dos fatores de forma obtidos com a expressão (3.19) são utilizados para avaliar sua influência sobre o avanço da água nos sulcos.

Para maior precisão na análise da performance das curvas de avanço simuladas em relação às curvas com dados observados, emprega-se o método dos mínimos quadrados para estimar os tempos de avanço de todas as curvas simuladas e as de campo. Isto é possível com o uso do monômio potencial dos tempos de avanço estimados em função das distâncias observadas:

$$T = \alpha \cdot X^\beta \quad (3.20)$$

em que:

T = tempo de avanço estimado;

X = distância observada em campo;

α e β = constantes empíricas.

A partir dos tempos de avanço estimados para todas as curvas estudadas em relação às mesmas distâncias observadas em campo, pode-se utilizar equação estatística que determina o desvio padrão médio para avaliar o comportamento das curvas simuladas em relação às observadas. A expressão usada é a seguinte:

$$\tau = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \hat{y}_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (3.21)$$

em que:

\hat{y}_i = Ordenadas nos pontos i para as curvas de avanço simuladas;

\hat{y}_i = Ordenadas nos pontos i para as curvas de avanço observadas em campo;

n = Número de pontos de coordenadas das curvas de avanço;

τ = Desvio médio das curvas simuladas em relação às de campo.

Para análise dos efeitos dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial sobre a curva de avanço, apresenta-se gráficos e tabelas de resultados no capítulo 4.

3.1.2 - Área da seção transversal de fluxo

De acordo com (SOUZA, 1981), para um sulco de forma parabólica (figura 2.4), a área da seção transversal A_o é dada pela expressão:

$$A_o = \frac{B \cdot y_n}{M + 1} \quad (3.22)$$

em que:

$$B = C \cdot y_n^M \quad (3.23)$$

onde:

B = largura da superfície livre da água;
 C e M = constantes empíricas;
 y_n = lâmina normal na cabeceira do sulco.

A lâmina normal y_n , que para um dado sulco é função da vazão (Q), ou seja, $y_o = y_n(Q_o)$, é dada pela seguinte expressão baseada na equação de Manning, apresentada por (LEVIEN, 1985).

$$Y_n(Q_o) = \left[\frac{Q_o \cdot n}{C_u \cdot S_o^{1/2}} \cdot \frac{(M+1)^{5/3}}{C} \right]^{\frac{3}{(3M+5)}} \quad (3.24)$$

em que:

Q_o = vazão;

n = coeficiente de Manning;

S_o = declividade do fundo do sulco;

C_u = coeficiente dependente do sistema de unidades usado: $C_u = 1,0 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, no sistema métrico e $C_u = 1,486 \text{ ft}^{1/2}/\text{sec}$, no sistema inglês.

3.1.3 – Área infiltrada acumulada

A área infiltrada acumulada pode ser calculada pela expressão seguinte apresentada por (SOUZA, 1981):

$$A_{zo} = P_m \cdot Z(\tau) \quad (3.25)$$

onde:

P_m = perímetro molhado, definido na equação (3.27);

$Z(\tau)$ = lâmina infiltrada acumulada expressa pela equação de KOSTIAKOV;

$$Z(\tau) = K \cdot \tau^a \quad (3.26)$$

em que:

k e α = constantes empíricas para um dado solo e um determinado nível de umidade;

τ = tempo de oportunidade de infiltração (o tempo que a água esteve em contato com o solo).

Na equação (3.25), quando a lâmina d'água (y) for muito pequena em relação a B , o perímetro molhado pode ser aproximado por B , para facilitar os cálculos, ou seja:

$$P_m \cong B = C \cdot y_n^M \quad (3.27)$$

3.2 – Fase de Recessão

A fase de recessão ocorre após o encerramento da aplicação de água aos sulcos. Hidraulicamente, é a fase mais complexa e, portanto, a mais difícil de ser prevista nos tratamentos matemáticos. A observação da passagem da frente recessiva, através das estações de medição ao longo dos sulcos em função do tempo, define a curva de recessão.

Em sulcos, o volume de água na superfície do solo após o término da adução de água é menor que em faixas. Por isso, na maioria das vezes, esta fase é considerada negligível na sua contribuição aos volumes infiltrados; no entanto, quando os sulcos comportam um maior volume de água e diminuem o gradiente de declive, e a taxa de infiltração do solo, o recesso é mais demorado.

LEVIEN & SOUZA (1987) desenvolvem uma expressão que determina a recessão na cabeceira do sulco, ou seja, o início da curva. Em seguida, desenvolvem outra equação, baseada na primeira, que determina uma curva recessiva que vai progressivamente aumentando até o final da parcela.

Nos itens seguintes, demonstra-se as três hipóteses utilizadas para o cálculo da recessão.

3.2.1 – Curva de recessão – Hipótese I

A seguinte equação foi desenvolvida por (LEVIEN & SOUZA, 1987) para determinação da curva de recessão. Os autores estabelecem que a variação da lâmina com a distância é uniforme e a taxa de infiltração média ao longo do sulco é a média aritmética das taxas de infiltração do início e do final do sulco.

$$t = t_r + \frac{S_y}{(M+1) \cdot \bar{I} \cdot G^{3/2}} - \left\{ \left[3 \cdot (G^{3/2} \cdot L)^{1/3} - 3 \cdot ATN(G^{3/2} \cdot L)^{1/3} \right] - \left[3 \cdot (G^{3/2} \cdot \ell)^{1/3} - 3 \cdot ATN(G^{3/2} \cdot \ell)^{1/3} \right] \right\} \quad (3.28)$$

De acordo com os autores, esta expressão permite que o cálculo da curva de recessão seja estabelecido em termos do comprimento inundado do sulco (ℓ), com os demais termos constantes.

em que:

t = tempo no qual a água desaparece no ponto X_r ;

L = comprimento do sulco;

t_r = tempo de início da recessão;

S_y = declividade da superfície da água;

\bar{I} = taxa de infiltração média no sulco;

$$\bar{I} = \frac{I(t_r) + I(t_r - t_{av})}{2} \quad (3.29)$$

ℓ = porção inundada do sulco;

G = constante:

$$G = \frac{C_u \cdot S_o^{1/2} \cdot S_y^{5/3}}{(M+1)^{5/3} \cdot n \cdot \bar{I}} \quad (3.30)$$

A equação (3.28) é utilizada para o cálculo da curva de recessão - Hipótese I do presente trabalho.

3.2.2 – Tempo de recessão superior ao tempo de aplicação – Hipótese II

Na cabeceira do sulco, a lâmina (y_0) decresce à medida que o volume de água superficial decresce para suprir a infiltração e o escoamento superficial. Baseando-se nestas hipóteses, (LEVIEN & SOUZA, 1987) estabelecem os meios necessários para estimar o tempo t_r , no qual a lâmina na cabeceira do sulco reduz-se a zero e começa a recessão.

Considerando a duração entre o tempo de corte da água (t_{co}) e o tempo de recessão (t_r), os autores admitem que este seria o tempo necessário para remover o volume ABCDE da figura (2.6).

Sendo:

$$V = \frac{A_o \cdot L}{(M + 2)} \quad (3.31)$$

LEVIEN & SOUZA (1987) consideram, também, que o volume (V) é igual ao volume a ser drenado e infiltrado entre o tempo de corte (t_{co}) e o tempo t_r do seguinte modo:

$$V = Q_o (t_r - t_{co}) \quad (3.32)$$

Substituindo a equação (3.31) em (3.32), obtem-se a expressão seguinte, que determina o início da curva de recessão no tempo t_r :

$$t_r = t_{co} + \frac{A_o}{(M + 2)} \cdot \frac{L}{Q_o} \quad (3.33)$$

A expressão (3.33) é usada para determinar a curva de recessão - Hipótese II, considerando-se que $t = t_r$, ou seja, uma curva constante e paralela ao eixo das abscissas.

3.2.3 – Tempo de recessão igual ao tempo de aplicação - hipótese III

Considera-se que o tempo de recessão (t_r) é igual ao tempo de aplicação da água (t_{co}), o que significa que a curva de recessão é constante e paralela ao eixo das abscissas.

$$t = t_r = t_{co} \quad (3.34)$$

A performance das curvas de recessão simuladas com as três hipóteses são analisadas determinando-se os desvios médios das curvas simuladas em relação às curvas observadas em campo, através da expressão (3.21).

Para o cálculo dos desvios médios, é necessário estimar as ordenadas das curvas de recessão de campo em função das mesmas distâncias das curvas simuladas. Para isso, decidiu-se usar a interpolação linear nas estimativas das novas ordenadas dos pontos experimentais, devido a dificuldade de se ajustar uma expressão algébrica que represente satisfatoriamente bem as distintas formas das curvas de recessão, apresentadas nas figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

3.3 – Perfil de Distribuição Espacial da Água na Irrigação por Sulco

O perfil de infiltração na irrigação por sulco é diretamente relacionado com a performance das curvas de avanço e recessão. A diferença entre as ordenadas de cada ponto destas curvas define os intervalos de tempo para a infiltração.

No caso de sulcos, a infiltração é aqui estudada em duas dimensões, ou seja, a vertical e a lateral. SOUZA (1981) apresenta expressão que determina as áreas infiltradas em função do perímetro molhado dos sulcos e das lâminas infiltradas, calculadas com a equação de KOSTIAKOV.

No presente trabalho, considera-se que o perímetro molhado é igual ao valor da largura da superfície livre da água, que é função da lâmina normal, e que a faixa lateral infiltrada é igual ao espaçamento dos sulcos.

3.3.1 – Tempo de oportunidade de infiltração

O tempo em que a água permanece em contato com o solo é o intervalo de tempo compreendido entre as curvas de recessão e avanço. Utiliza-se a seguinte expressão:

$$\tau_i = t_i - t_{ai} \quad (3.35)$$

em que:

τ_i = Tempo de oportunidade de infiltração em um ponto i qualquer;

t_i = Tempo no qual a água desaparece no ponto i ;

t_{ai} = Tempo no qual a água avança no ponto i .

3.3.2 – Volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco

No cálculo das áreas infiltradas ao longo do sulco, utiliza-se a seguinte expressão apresentada por (SOUZA, 1981):

$$A_z(y, t) = P_m(y) \cdot z(\tau) \quad (3.36)$$

$$\text{Assumindo-se,} \quad P_m(y) = B(y_n) \quad (3.37)$$

em que:

$B(y_n)$ = Largura da superfície livre da água, função da lâmina normal;

$Z(\tau)$ = volume infiltrado por unidade de área; computado pela equação de KOSTIAKOV:

$$Z(\tau) = K \cdot \tau^\alpha \quad (3.38)$$

Na equação (3.38); τ = tempo de infiltração; k = lâmina de infiltração no tempo unitário; α = expoente adimensional.

3.3.3 – Lâminas infiltradas ao longo da parcela

No cálculo das lâminas infiltradas ao longo da parcela, considera-se o caso bidimensional, ou seja, a lâmina infiltrada no sentido vertical e a faixa lateral infiltrada, aqui assumida igual ao espaçamento dos sulcos. Por sua vez, as áreas infiltradas após a irrigação são estimadas pela seguinte expressão:

$$A_{zi} = Z_i \cdot E \quad (3.39)$$

Substituindo as equações (3.36), (3.37) e (3.38) na equação (3.39), obtém-se:

$$Z_i = \frac{B(y_n)}{E} \cdot k \cdot \tau^a \quad (3.40)$$

em que:

Z_i = Lâmina infiltrada no ponto i ao longo da parcela;

E = Espaçamento dos sulcos;

τ = Tempo de infiltração para cada caso de recessão estudado.

O lugar geométrico das lâminas infiltradas (Z_i) ao longo da parcela representa o perfil de distribuição espacial da água na irrigação por sulcos.

No presente trabalho, a metodologia que determina o perfil de distribuição é utilizada para as curvas simuladas e as observadas em campo.

Para analisar a performance dos perfis infiltrados simulados em relação aos perfis computados com dados de campo, emprega-se a expressão (3.21), analogamente, ao procedimento supracitado para as curvas de recessão no item 3.2.

O efeito da recessão sobre o perfil de distribuição é analisado com base nos resultados dos desvios médios, calculados para as curvas de recessão, para os perfis infiltrados, e com base na observação dos gráficos dessas curvas, apresentados no próximo capítulo (Resultados e Discussão).

3.4 – Simulação do Escoamento Superficial

A determinação do escoamento superficial na irrigação por sulcos é de fundamental importância, pois, ele influencia consideravelmente o desempenho dos sistemas superficiais, principalmente em faixas e sulcos abertos em declive em regime de vazão constante.

No presente trabalho, o cálculo do escoamento superficial tem como objetivo estudar a metodologia desenvolvida por (LEVIEN & SOUZA, 1987) com as hipóteses adicionais para a curva de recessão e, além disso, utilizar os valores simulados obtidos, na análise dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação.

Nos itens seguintes, demonstra-se as expressões usadas para o cálculo do volume de Runoff, com as três hipóteses da curva de recessão.

3.4.1 – Cálculo do escoamento superficial, conforme Hipótese I

No método apresentado por (LEVIEN & SOUZA, 1987), o cálculo do escoamento superficial é dividido em duas etapas. Primeiro, o volume de água que escoou entre os tempos t_{av} e t_r , e, em seguida, é calculado o escoamento superficial que ocorre após t_r .

3.4.1.1 - Cálculo do escoamento superficial ocorrido antes da recessão

No tempo t_r , a superfície da água assume a forma de uma cunha de lâmina igual a zero na cabeceira e uma lâmina $Y_1 = S_y \cdot L$ no final do sulco (Figura 2.7). Isto fornece um volume superficial (V_y) (volume ABCD da figura 2.7) no tempo t_r igual a:

$$V_y(t_r) = \frac{C}{(M+1)(M+2)} \cdot S_y^{M+1} \cdot L^{M+2} \quad (3.41)$$

Estabelecendo-se que t_r é substancialmente maior que t_{av} , o volume subsuperficial (V_z) pode ser aproximado pela seguinte expressão no tempo t_r :

$$V_z(t_r) = \frac{Z(t_r) + Z(t_r - t_{av})}{2} \cdot B(y_n) \cdot L \quad (3.42)$$

Desse modo, o volume de escoamento superficial no tempo t_r pode ser obtido pela equação:

$$V_{ro}(t_r) = V_o - V_y(t_r) - V_z(t_r) \quad (3.43)$$

Onde o primeiro termo do lado direito é o volume total aplicado ao sulco durante a irrigação:

$$V_o = Q_o \cdot t_{co} \quad (3.44)$$

Usando as equações (3.41), (3.42) e (3.44) e substituindo na equação (3.43); ela pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_{ro}(t_r) = Q_o t_{co} - \frac{C}{(M+1)(M+2)} S_y^{M+1} L^{M+2} - \frac{Z(t_r) + Z(t_r - t_{av})}{2} B(y_n) L \quad (3.45)$$

A qual permite calcular o volume perdido por escoamento superficial antes da recessão.

3.4.1.2 - Cálculo do escoamento superficial ocorrido durante a recessão

No desenvolvimento da expressão que determina o volume total de escoamento superficial ao final da irrigação, (LEVIEN & SOUZA, 1987) estabelecem as seguintes hipóteses:

- a taxa de Runoff somada a taxa de infiltração é igual a Q_0 , isto é:

$$Q_1 + Q_{inf} = Q_o \quad (3.46)$$

- a lâmina Y_1 no final do sulco é constante e normal para a vazão de runoff (Q_1) no tempo t_r , marcando o início da recessão, ou seja:

$$Y_1 = y_n(Q_1) \quad (3.47)$$

- a largura média de infiltração é assumida como sendo:

$$B(y_1) = C \cdot y_1^M \quad (3.48)$$

- na taxa de escoamento no final do sulco Q_1 , a hipótese de que a lâmina no final $y_1(t) = S_y \cdot \ell(t)$, variável com o tempo, é a lâmina normal.

Utilizando-se a equação de Manning, em que $P_m = B(y_1)$, obtém-se:

$$Q_1 = \frac{C}{(M+1)^{5/3}} \cdot \frac{C_u}{n} \cdot S_o^{1/2} \cdot (S_y \cdot \ell)^{M+5/3} \quad (3.49)$$

- a taxa de aumento do volume de escoamento superficial (∇_{ro}) durante a recessão é:

$$\frac{d\nabla_{ro}}{dt} = Q_1 = \frac{C}{(M+1)^{5/3}} \cdot \frac{C_u}{n} \cdot S_o^{1/2} \cdot (S_y \cdot \ell)^{M+5/3} \quad (3.50)$$

- assumindo que $(S_y \cdot \ell)^M \cong (S_y \cdot L)^M$, constante e igual a y_1^M .

Em função da variável adimensional $\zeta = G^{3/2} \cdot \ell$ e da constante G (Eq. 3.30), a equação (3.50) pode ser reescrita como segue:

$$\frac{d\nabla_{ro}}{dt} = \frac{B(y_1) \cdot \bar{I}}{G^{3/2}} \cdot \zeta^{5/3} \quad (3.51)$$

Substituindo a variável t pela variável ζ , a equação diferencial pode ser facilmente integrável, resultando na seguinte expressão final:

$$\begin{aligned} \nabla_{ro}(t_e) = \nabla_{ro}(t_r) + \frac{B(y_1) \cdot S_y}{(M+1) \cdot G^3} \left\{ \frac{1}{2} (G^{3/2} \cdot L)^2 - \frac{3}{4} (G^{3/2} \cdot L)^{4/3} \right. \\ \left. + \frac{3}{2} (G^{3/2} \cdot L)^{2/3} - \frac{3}{2} \ell_n \left[1 + (G^{3/2} \cdot L)^{2/3} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.52)$$

A expressão (3.52) fornece o volume total de escoamento superficial no tempo t_e , ou seja, ao final da irrigação; onde $\nabla_{ro}(t_r)$ (Eq. 3.45) é o volume de Runoff, ocorrido antes da recessão.

3.4.2 – Escoamento superficial, conforme Hipótese II

No cálculo do escoamento superficial, que é influenciado pela curva de recessão R_2 , assume-se as seguintes hipóteses:

- 1 – o volume superficial (∇_y) (Volume ABCD da figura 2.7), no tempo t_r , desaparece instantaneamente da superfície do solo. De outro modo, pode-se considerá-lo desprezível na equação (3.43);
- 2 – o volume subsuperficial $\nabla_z(t_r)$, no tempo t_r , pode ser aproximado pela expressão (3.42), o que significa dizer que o perfil infiltrado é considerado uma linha reta que passa pelos pontos de lâminas extremas.

Estas hipóteses permitem que no cálculo do volume de runoff com a curva de recessão R_2 , através do balanço de volume, pode ser utilizada a expressão seguinte:

$$\nabla_{ro}(t_r) = \nabla_o - \nabla_z(t_r) \quad (3.53)$$

Onde, ∇_o é o volume total de água aplicado ao sulco, sendo determinado com a equação (3.44).

3.4.3 – escoamento superficial, conforme Hipótese III

No cálculo do Runoff, que é influenciado pela curva de recessão R_3 , assume-se as mesmas hipóteses do item anterior, e são válidas para o tempo de corte t_{co} , isto é:

- 1 – o volume superficial \forall_y (volume ABCDEF da Figura 2.6), no tempo t_{co} , desaparece da superfície do solo, ao longo do sulco, instantaneamente. Considera-se que no instante t_{co} este volume é desprezível, ou seja:

$$\forall_y(t_{co}) = 0, \text{ na equação (3.57)}$$

- 2 – o volume subsuperficial $\forall_z(t_{co})$, no tempo t_{co} , pode ser aproximado pela expressão seguinte, na qual, o perfil infiltrado é uma linha reta que passa pelos pontos extremos $Z(t_{co})$ e $Z(t_{co} - t_{av})$, ou seja:

$$\forall_z(t_{co}) = \frac{Z(t_{co}) + Z(t_{co} - t_{av})}{2} \cdot B(y_n) \cdot L \quad (3.54)$$

em que:

$Z(t_{co})$ = lâmina infiltrada na cabeceira do sulco, no tempo t_{co} determinada pela equação de KOSTIAKOV:

$$Z(t_{co}) = K \cdot (t_{co})^a \quad (3.55)$$

$Z(t_{co} - t_{av})$ = lâmina infiltrada no final do sulco, no tempo $(t_{co} - t_{av})$, determinada pela equação de KOSTIAKOV:

$$Z(t_{co} - t_{av}) = K \cdot (t_{co} - t_{av})^a \quad (3.56)$$

$B(y_n)$ = considerado como a largura média de infiltração, determinado pela equação (3.23);

L = comprimento do sulco.

Estas hipóteses permitem que no cálculo do volume de Runoff com a curva de recessão R_3 seja aplicada a expressão do balanço de volume da seguinte forma:

$$\nabla_{ro}(t_{co}) = \nabla_o - \nabla_y(t_{co}) - \nabla_z(t_{co}) \quad (3.57)$$

Substituindo as equações (3.44) e (3.54), a equação (3.57) pode ser reescrita da seguinte forma final:

$$\nabla_{ro}(t_{co}) = Q_o \cdot t_{co} - \frac{Z(t_{co}) + Z(t_{co} - t_{av})}{2} \cdot B(y_n) \cdot L \quad (3.58)$$

Esta expressão determina o volume de escoamento superficial que é afetado pela curva de recessão R_3 .

3.5 – Cálculo do volume de escoamento superficial com os dados experimentais

De acordo com (SOUZA, 1983), o volume de escoamento superficial pode ser determinado aplicando-se o princípio de balanço de volume e desprezando-se as perdas por evaporação durante a irrigação, tem-se:

$$\nabla_o = \nabla_z + \nabla_{ro} \quad (3.59)$$

em que:

∇_o = volume total de água aplicado, sendo determinado pela expressão (3.44);

∇_{ro} = volume de Runoff;

∇_z = volume total infiltrado.

O volume total infiltrado pode ser determinado pela integração gráfica do perfil de distribuição de umidade pela regra do trapézio, através da seguinte expressão proposta por (WALKER & SKOGERBOE, 1987):

$$\nabla_z = \frac{L}{2 \cdot n} (A_{z0} + 2A_{z1} + 2A_{z2} + \dots + A_{zn}) \quad (3.60)$$

em que:

L = comprimento do sulco;

A_{zi} = área infiltrada acumulada nos pontos i ;

n = número de incrementos usados para subdividir o sulco.

O valor de A_{zi} , área infiltrada acumulada, pode ser determinado com as equações (3.36) e (3.37); as lâminas infiltradas com a equação (3.38) e os tempos de infiltração com a equação (3.35).

Finalmente, o valor de V_{ro} , volume de Runoff, é calculado pela diferença entre o volume aplicado (V_o) e o volume infiltrado (V_z), isto é:

$$V_{ro} = V_o - V_z \quad (3.61)$$

O volume de Runoff, estimado com as equações (3.61) e (3.60), é bem mais preciso devido à utilização de todas as lâminas infiltradas no cálculo do volume infiltrado V_z .

Pretende-se obter maior acuracidade para o volume de Runoff, utilizando-se os dados experimentais; no entanto, salienta-se que devido a não existência do valor experimental do perímetro molhado (P_m), ele é estimado aqui pelo valor de $B(y_n)$, de acordo com o estabelecido por (LEVIEN & SOUZA, 1987).

Este método permite uma avaliação mais precisa dos parâmetros usados na análise do desempenho dos sistemas de irrigação por sulcos e, é aqui assumido como um valor padrão quando comparado com os resultados dos parâmetros simulados com as três hipóteses da recessão, em que se considera o perfil de distribuição de forma linear.

3.6 – Eficiência e Uniformidade de Irrigação

De acordo com (SOUZA, 1983), há um consenso na literatura de que não existe um parâmetro único que seja suficiente para avaliar a performance de um sistema de irrigação. Desse modo, além do aspecto da eficiência, qualquer sistema de irrigação deve objetivar a aplicação de quantidades d'água pré-estabelecidas, da maneira mais uniforme possível, sobre a área irrigada. Assim, esses dois parâmetros – uniformidade e eficiência –

expressam a qualidade de uma irrigação, isto é, juntos eles podem servir para avaliar a performance de um sistema.

Os sistemas de irrigação por sulcos são dimensionados e avaliados através do conhecimento prévio do valor da lâmina ou volume de água real necessário ao reabastecimento da zona de raízes.

Não se dispõe do valor da lâmina requerida, na qual os sistemas de irrigação, dos exemplos estudados, foram concebidos; no entanto, este parâmetro é aqui indicado para avaliar o desempenho dos sistemas conforme a recomendação de (CRIDDLE et al., 1956), ou seja, após o tempo de aplicação de água, deve-se repor a lâmina requerida no final do sulco.

De acordo com esta recomendação e de posse dos resultados das lâminas infiltradas ao longo da parcela dos sistemas de irrigação estudados, determinadas com os dados experimentais, elege-se as lâminas infiltradas no final da parcela para representarem as lâminas requeridas na análise do desempenho da qualidade da irrigação.

Com os valores das lâminas requeridas aqui consideradas, pretende-se avaliar os sistemas de irrigação estudados com dados simulados e com dados experimentais.

A seguir, demonstra-se a metodologia usada para avaliação do desempenho dos sistemas de irrigação estudados com dados simulados e com dados experimentais.

É importante salientar que se pretende avaliar os sistemas estudados através das considerações seguintes:

- com os dados simulados nos três casos da curva de recessão, o perfil é linear e os parâmetros determinados seguem este critério;
- com os dados experimentais, o perfil é uma curva de distribuição de umidade e os parâmetros analisados no desempenho da irrigação seguem este critério.

Isto possibilita maior precisão na análise da irrigação com dados experimentais e é aqui considerada como valor padrão; no entanto, na análise com os

dados simulados, considera-se o perfil linear devido ao fato de não haver necessidade de maior precisão dos resultados, visto que se utiliza como principal parâmetro envolvido na análise da irrigação o volume infiltrado, que é simulado com as três hipóteses da curva de recessão.

3.6.1 – Parâmetros de eficiência e uniformidade, considerando-se o perfil de distribuição como uma curva.

Neste caso, utiliza-se os perfis infiltrados computados com dados experimentais.

As expressões seguintes são apresentadas por (WALKER & SKOGERBOE, 1987) e estão agrupadas para o caso de completa irrigação, ou seja, a lâmina requerida é aplicada no final do sulco:

➤ E_a = eficiência de aplicação:

$$E_a = \frac{A_{zreq} \cdot L}{Q_o \cdot T_{co}} \cdot 100 \quad (3.62)$$

em que:

A_{zreq} = área infiltrada requerida;

$$A_{zreq} = Z_{req} \cdot E \quad (3.63)$$

Sendo:

Z_{req} = lâmina infiltrada requerida;

E = espaçamento dos sulcos, aqui considerado como faixa de infiltração lateral requerida.

➤ DPR = taxa de percolação profunda:

$$DPR = \frac{V_z - A_{zreq} \cdot L}{Q_o \cdot t_{co}} \cdot 100 \quad (3.64)$$

Onde: V_z = volume infiltrado computado com a equação (3.60).

- TWR = taxa de escoamento superficial:

$$TWR = 100 - E_a - DPR \quad (3.65)$$

- E_s = eficiência de armazenamento:

$$E_s = 100\% \quad (3.66)$$

- Uniformidade de distribuição:

Utiliza-se a equação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), apresentada por (SOUZA, 1983):

$$CUC = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - \bar{Z}|}{n \cdot \bar{Z}} \right] \cdot 100 \quad (3.67)$$

em que:

Z_i = lâmina infiltrada em um ponto i qualquer;

\bar{Z} = lâmina média infiltrada;

n = número total de pontos.

3.6.2 – Parâmetros de eficiência e uniformidade, considerando-se o perfil de distribuição linear

Os perfis infiltrados simulados podem assumir diversas posições em relação ao perfil que representa a lâmina requerida. Neste caso, pode-se destacar quatro opções possíveis de ocorrerem, como seguem:

- opção (a): $Z_{req} = Z_f$

- opção (b): $Z_{req} < Z_f$
- opção (c): $Z_{req} = Z_o$, ou $Z_{req} > Z_o$
- opção (d): $Z_o > Z_{req} > Z_f$

em que:

Z_f = lâmina infiltrada no final do sulco;

Z_o = lâmina infiltrada na cabeceira do sulco;

Z_{req} = lâmina requerida.

3.6.2.1 – Cálculo do volume percolado

O volume percolado em cada opção é determinado conforme a figura geométrica da posição dos perfis infiltrados em relação aos perfis que representam as lâminas requeridas.

Opção (a): $Z_{req} = Z_f$

$$\forall_{pa} = (Z_o - Z_{req}) \frac{L}{2} \cdot E \quad (3.68)$$

Opção (b): $Z_{req} < Z_f$

$$\forall_{pb} = (Z_o + Z_f - 2 \cdot Z_{req}) \frac{L}{2} \cdot E; \quad (3.69)$$

Opção (c): $Z_{req} = Z_o$, ou $Z_{req} > Z_o$

$$\forall_{pc} = 0 \quad (3.70)$$

Opção (d): $Z_o > Z_{req} > Z_f$

Na opção d, o perfil infiltrado intercepta o perfil que representa a lâmina requerida no ponto de distância x_{req} . Este ponto pode ser determinado pela equação que

representa a reta do perfil infiltrado e que passa pelo ponto x_{req} , ou seja, a reta pode ser representada pela seguinte expressão:

$$Z_i = Z_o + \left(\frac{Z_f - Z_o}{L} \right) x_i \quad (3.71)$$

No ponto $x_i = x_{req} \Rightarrow Z_i = Z_{req}$

Substituindo na equação (3.71) e explicitando x_{req} , obtem-se:

$$X_{req} = (Z_{req} - Z_o) \cdot \left(\frac{L}{Z_f - Z_o} \right) \quad (3.72)$$

Desse modo, o volume percolado pode ser expresso pela equação seguinte:

$$V_{pd} = (z_o - z_{req}) \cdot \left(\frac{x_{req}}{2} \right) \cdot E \quad (3.73)$$

3.6.2.2 – Cálculo do volume útil

O volume útil pode ser generalizado pela seguinte expressão:

$$\nabla_u = \nabla_z - \nabla_p \quad (3.74)$$

Onde, o volume infiltrado (∇_z) pode ser representado em função dos três casos de recessão, a seguir:

$$R_1 \rightarrow \nabla_z = \nabla_o - \nabla_{ro}(t_e) \quad (3.75)$$

em que:

∇_o = volume aplicado, calculado pela equação (3.44);

$\nabla_{ro}(t_e)$ = volume de Runoff, calculado pela equação (3.52)

$R_2 \rightarrow \nabla_z$ é calculado pela equação (3.42);

$R_3 \rightarrow \nabla_z$ é calculado pela equação (3.54).

Por sua vez, o volume percolado (∇_p) na equação (3.74) pode ser representado por uma das opções estudadas no item (3.6.2.1), ou seja, dependendo da magnitude da lâmina requerida, ele pode assumir valores correspondentes aos calculados com as equações (3.68), (3.69), (3.70) ou (3.73).

3.6.2.3 – Cálculo dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação

Os parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação podem ser generalizados pelas expressões seguintes apresentadas por (SOUZA, 1983).

- Eficiência de aplicação, E_a :

$$E_a = \frac{\nabla_u}{\nabla_o} \cdot 100 \quad (3.76)$$

- Eficiência de armazenamento, E_s :

$$E_s = \frac{\nabla_u}{\nabla_{req}} \cdot 100 \quad (3.77)$$

- Índice de Runoff, R_o :

$$R_o = \frac{\nabla_{ro}}{\nabla_o} \cdot 100 \quad (3.78)$$

- Índice de percolação profunda, D_p :

$$D_p = \frac{\nabla_p}{\nabla_o} \cdot 100 \quad (3.79)$$

- Uniformidade de distribuição, DU; expressão apresentada por (MERRIAM et al., 1973):

$$DU = \frac{\text{Lamina mínima infiltrada}}{\text{Lamina média infiltrada}} \cdot 100 \quad (3.80)$$

ou pela expressão similar:

$$U_d = \frac{Z_f}{\frac{Z_o + Z_f}{2}} \cdot 100 \quad (3.81)$$

Nas expressões apresentadas, para o cálculo da eficiência e uniformidade, o volume útil (∇_u) e o volume de Runoff (∇_{ro}) são representados para cada hipótese da curva de recessão.

No caso do volume percolado (∇_p); é representado para cada hipótese da curva de recessão e pelas quatro opções para posição da lâmina requerida.

O volume requerido (∇_{req}) é calculado pela equação seguinte:

$$\nabla_{req} = Z_{req} \cdot E \cdot L \quad (3.82)$$

3.6.2.4 - Cálculo do volume infiltrado

Neste caso, o volume infiltrado é calculado pela forma geométrica do perfil infiltrado, que é considerado uma reta que une os pontos extremos.

O volume formado pelo trapézio é o seguinte:

$$\nabla_{zp} = \left(\frac{Z_o + Z_f}{2} \right) \cdot L \cdot B(y_n) \quad (3.83)$$

em que:

Z_o = lâmina infiltrada na cabeceira da parcela;

Z_f = lâmina infiltrada no final do sulco;

L = comprimento do sulco;

$B(Y_n)$ = largura média de infiltração, determinada pela equação (3.23).

As lâminas infiltradas nos pontos extremos Z_o e Z_f são consideradas para cada hipótese da curva de recessão, obtendo-se os volumes infiltrados correspondentes na equação (3.83).

Através de balanço de volume, determina-se os volumes de Runoff para cada valor de V_{zp} correspondente, ou seja:

$$V_{rop} = V_o - V_{zp} \quad (3.84)$$

Para a curva de recessão R_2 , as equações (3.83) e (3.84), que é função dos tempos de oportunidade, são idênticas as equações (3.42) e (3.53) e, para a curva de recessão R_3 , as equações (3.83) e (3.84) são idênticas às equações (3.54) e (3.58).

As equações (3.83) e (3.84) são aqui usadas para comparar os resultados dos volumes V_z e V_{ro} , determinados pelo modelo com as três hipóteses da recessão.

4.0 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o efeito dos fatores de forma dos perfis superficial (r_{y1} , r_{y2} , r_{y3} , r_{y4} , r_{y5}), subsuperficial (r_{z1} , r_{z2} , r_{z3} , r_{z4} , r_{z5}) e da curva de recessão sobre a performance de sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive, utilizou-se dados de campo obtidos em experimentos realizados por RAMSEY (1976) e pelo Departamento de Agricultura e Engenharia Química da Universidade do Estado do Colorado (1979) em três diferentes localidades (HORTICULTURE, STIEBEN e BENSON). Esses dados são utilizados, pela precisão com que foram obtidos e por representarem condições extremas em relação aos vários parâmetros. A Tabela 01 apresenta dados de vazão (Q_o), declividade (S_o), tempo de aplicação de água (t_{co}), comprimento do sulco (L), espaçamento do sulco (E), rugosidade hidráulica de Manning (n), parâmetros de infiltração (k e a) e as constantes empíricas da equação da geometria do sulco (C e M) nos exemplos estudados.

Alguns dos parâmetros para a análise nos exemplos 1 e 2 são estimados por SOUZA (1981) a partir das informações de campo. Os parâmetros estimados são as constantes empíricas “C” e “M” da equação da geometria do sulco; o coeficiente de Manning “n” e as constantes empíricas “k” e “a” da equação de infiltração de KOSTIAKOV. No exemplo 3, alguns dados são estimados por PORDEUS (1990) com as informações de campo. Os parâmetros estimados são as constantes “k” e “a” da equação de infiltração de KOSTIAKOV, os quais são processados por metodologia estabelecida por CRIDDLE *et al.* (1956). Outros parâmetros são computados por LEVIEN (1985), como as constantes “C” e “M”, da equação da geometria do sulco, e o coeficiente de rugosidade de Manning “n”. No exemplo 4, são estimados por PORDEUS (1990), através das informações de campo, as constantes “C” e “M” da equação da geometria do sulco e as constantes “k” e “a” da equação de infiltração de KOSTIAKOV, determinadas pelo

método de CRIDDLE *et al.* (1956). Para o coeficiente de rugosidade de Manning (n), é utilizado o valor 0,25 baseado em tabela fornecida pelo S.C.S – USDA para cultura de milho apresentados na Tabela 01.

Tabela 01. Dados de campo utilizados na análise da irrigação por sulcos.

| Parâmetros de entrada | Exemplos (dados) | | | |
|-----------------------|------------------|--------------|--------------|------------|
| | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 |
| | Ramsey | Horticulture | Stieben | Benson |
| $Q_o(m^3.s^{-1})$ | 0,00133 | 0,00081 | 0,000576 | 0,00161 |
| $S_o(m.m^{-1})$ | 0,001032 | 0,0036 | 0,0098 | 0,0045 |
| $t_{co}(s)$ | 12.480 | 12.120 | 41.760 | 41.880 |
| L(m) | 100 | 175 | 350 | 625 |
| E(m) | 1,00 | 1,12 | 0,60 | 1,00 |
| n | 0,022 | 0,020 | 0,15 | 0,25 |
| $k(m.s^{-a})$ | 0,0012415 | 0,0008079 | 0,0000020192 | 0,00064369 |
| a | 0,50 | 0,55 | 0,8767 | 0,44 |
| $C(m^{1-M})$ | 1,0915 | 0,61 | 1,9087 | 1,307 |
| M | 0,4539 | 0,22 | 0,5445 | 0,4498 |

4.1 – Efeito dos Fatores de Forma dos Perfis Superficial e Subsuperficial Sobre o Avanço

Para estudar a influência dos fatores de forma sobre a curva de avanço, são utilizados valores estimados e calculados apresentados na Tabela 02. Os fatores de forma estimados são constantes para os quatro exemplos analisados ($r_{y1} = 0,70$; $r_{z1} = 0,75$; $r_{y2} = 0,75$ e $r_{z2} = 0,80$).

Os fatores de forma calculados r_{y3} e r_{z3} (equações 3.9 e 3.10 propostas por SOUZA, 1981) apresentam valores inferiores aos estimados. Neste caso, r_{y3} variou entre 0,60 a 0,66, enquanto que r_{z3} variou entre 0,47 e 0,61.

Os fatores de forma calculados com as equações 3.11, 3.12 e 3.13, r_{y4} e r_{z4} (propostas por FOK & BISHOP, 1965) apresentam valores inferiores aos estimados para o perfil superficial r_{y4} , os quais variaram entre 0,57 e 0,63. Os fatores de forma do perfil subsuperficial r_{z4} apresentam valores muito próximos a 0,70, ou seja, numa variação de 0,66 a 0,74.

Observa-se que os valores dos fatores de forma r_{y5} e r_{z5} , calibrados com a equação 3.18 e representados pela média ponderada em relação aos tempos de avanço correspondentes, tiveram uma variação para r_{y5} e r_{z5} entre 0,71 a 0,81. Verifica-se, então, que os valores dos fatores de forma (r_{y1} , r_{z1} e r_{y2} , r_{z2}), estimados e recomendados pela literatura, encontram-se dentro da mesma faixa de variação dos r_{y5} , r_{z5} .

Tabela 02. Comparação dos valores dos fatores de forma superficial (r_y) e subsuperficial (r_z) estimados e os encontrados com a expressão de Souza; Fok & Bishop e a média ponderada.

| Exemplos | Estimados | | | | (SOUZA, 1981) | | (FOK-BISHOP, 1965) | | (Média ponderada) | |
|--------------|-----------|----------|----------|----------|---------------|----------|--------------------|----------|-------------------|----------|
| | r_{y1} | r_{z1} | r_{y2} | r_{z2} | r_{y3} | r_{z3} | r_{y4} | r_{z4} | r_{y5} | r_{z5} |
| Ramsey | 0,70 | 0,75 | 0,75 | 0,80 | 0,62 | 0,59 | 0,57 | 0,72 | 0,72 | 0,72 |
| Horticulture | 0,70 | 0,75 | 0,75 | 0,80 | 0,66 | 0,61 | 0,58 | 0,71 | 0,78 | 0,78 |
| Stieben | 0,70 | 0,75 | 0,75 | 0,80 | 0,60 | 0,47 | 0,63 | 0,66 | 0,81 | 0,81 |
| Benson | 0,70 | 0,75 | 0,75 | 0,80 | 0,62 | 0,61 | 0,57 | 0,74 | 0,71 | 0,71 |

As tabelas 03, 04, 05 e 06 mostram os resultados dos fatores de forma r_i calibrados com a equação 3.18, correspondentes aos tempos e distâncias de avanço observados com os exemplos estudados. Observa-se a variação de 0,71 a 0,80 para os r_i calculados, resultando no coeficiente de variação $CV = 4,5\%$ computados com os dados observados de RAMSEY.

Com os dados observados de HORTICULTURE, os r_i calculados, variam entre 0,73 a 1,03, resultando no valor do coeficiente de variação $CV = 12\%$. Para os dados de STIEBEN, observa-se a variação dos r_i , calculados, entre 0,71 a 0,85 com o coeficiente de variação $CV = 6\%$. Nos dados de BENSON, os r_i calculados variam entre 0,68 a 0,88, com o coeficiente de variação $CV = 7,7\%$.

Por definição, fator de forma é a relação entre o volume de água (ou área média) compreendido entre as parábolas que delimitam os armazenamentos de água superficial ou subsuperficial e os compreendidos entre os retângulos circunscritos nas distâncias correspondentes.

Nos dados de HORTICULTURE, tabela 04, observa-se que no ponto da curva de avanço (25,00; 4,70) o r_i calculado é de 1,03. Neste caso, para a distância considerada, seria provável que os armazenamentos de água dos perfis superficial e subsuperficial se aproximassem da forma retangular; no entanto, quando os r_i calculados se aproximam de 0,5, os perfis apresentam uma forma próxima da triangular.

É importante salientar que as equações 3.9 e 3.10, propostas por (SOUZA, 1981) para calcular os fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial, foram desenvolvidas para célula situada na extremidade da frente de avanço de um modelo hidrodinâmico cuja solução matemática é baseada em método numérico para intervalos de tempo muito pequenos. No caso presente, essas equações são utilizadas para todo o perfil do avanço em um tempo relativamente grande.

Convém ressaltar que, comparando-se os valores dos fatores de forma estudados; os r_{y3} e r_{y4} ; r_{z3} e r_{z4} são os menores. Isto implica em distâncias de avanço maiores para o mesmo tempo, devido ao princípio do balanço de volume; como consequência, os tempos de avanço serão menores para as mesmas distâncias consideradas.

As performances das curvas de avanço simuladas estão intimamente relacionadas aos valores numéricos dos fatores de forma. Na expressão 3.4, de balanço de volume, as áreas médias do armazenamento de água superficial e subsuperficial são substituídas pelas áreas na cabeceira da parcela multiplicadas por fatores de forma adequados. Por sua vez, as expressões 2.29 e 2.33 do modelo, que permitem estimar as áreas na cabeceira da parcela, são concebidas assumindo-se que o perímetro molhado é substituído pela largura da superfície livre da água. É provável que esta hipótese subestime o valor dessas áreas e, como consequência, para as estimativas dos volumes, deveria ser recomendado usar valores estimados para os fatores de forma superiores aos calculados através de expressões algébricas.

Tabela 03. Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de RAMSEY, calibrados com a equação (3.18).

| Distância (m) | Avanço (min) | Fator de forma (r_i) |
|--------------------------|-------------------------|--|
| 0,00 | 0,00 | - |
| 9,09 | 1,05 | 0,793 |
| 18,18 | 2,35 | 0,796 |
| 27,27 | 3,60 | 0,757 |
| 36,36 | 5,00 | 0,741 |
| 45,45 | 6,50 | 0,730 |
| 54,54 | 8,05 | 0,719 |
| 63,64 | 9,65 | 0,708 |
| 72,73 | 11,55 | 0,709 |
| 81,82 | 13,60 | 0,712 |
| 90,91 | 15,65 | 0,711 |
| 100,00 | 17,95 | 0,714 |

Tabela 04. Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de HORTI-CULTURE, calibrados com a equação (3.18).

| Distância (m) | Avanço (min) | Fator de forma (r_i) |
|--------------------------|-------------------------|--|
| 0,00 | 0,00 | - |
| 25,00 | 4,70 | 1,034 |
| 50,00 | 10,20 | 0,878 |
| 75,00 | 17,30 | 0,819 |
| 100,00 | 26,20 | 0,790 |
| 125,00 | 38,00 | 0,785 |
| 150,00 | 50,40 | 0,767 |
| 175,00 | 61,50 | 0,734 |

Tabela 05. Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de STIEBEN, calibrados com a equação (3.18).

| Distância (m) | Avanço (min) | Fator de forma (r_i) |
|--------------------------|-------------------------|--|
| 0,00 | 0,00 | - |
| 25,00 | 5,00 | 0,718 |
| 50,00 | 10,00 | 0,712 |
| 75,00 | 16,00 | 0,752 |
| 100,00 | 21,00 | 0,734 |
| 125,00 | 27,00 | 0,748 |
| 150,00 | 33,00 | 0,756 |
| 175,00 | 40,00 | 0,777 |
| 200,00 | 48,00 | 0,807 |
| 225,00 | 55,00 | 0,815 |
| 250,00 | 61,00 | 0,807 |
| 275,00 | 70,00 | 0,833 |
| 300,00 | 77,00 | 0,832 |
| 325,00 | 85,00 | 0,840 |
| 350,00 | 94,00 | 0,854 |

Tabela 06. Fatores de forma (r_i) correspondentes aos dados observados de BENSON, calibrados com a equação (3.18)

| Distância (m) | Avanço (min) | Fator de forma (r_i) |
|--------------------------|-------------------------|--|
| 0,00 | 0,00 | - |
| 25,00 | 9,00 | 0,884 |
| 50,00 | 18,30 | 0,860 |
| 75,00 | 27,60 | 0,837 |
| 100,00 | 36,30 | 0,807 |
| 125,00 | 45,00 | 0,784 |
| 150,00 | 53,30 | 0,761 |
| 175,00 | 62,60 | 0,753 |
| 200,00 | 73,50 | 0,760 |
| 225,00 | 83,20 | 0,753 |
| 250,00 | 93,30 | 0,750 |
| 275,00 | 103,70 | 0,747 |

| | | |
|--------|--------|-------|
| 300,00 | 115,00 | 0,749 |
| 325,00 | 125,40 | 0,746 |
| 350,00 | 135,30 | 0,739 |
| 375,00 | 144,00 | 0,728 |
| 400,00 | 153,30 | 0,720 |
| 425,00 | 162,00 | 0,710 |
| 450,00 | 171,10 | 0,703 |
| 475,00 | 179,30 | 0,693 |
| 500,00 | 188,80 | 0,688 |
| 525,00 | 199,20 | 0,685 |
| 550,00 | 208,50 | 0,680 |
| 575,00 | 218,40 | 0,676 |
| 600,00 | 229,30 | 0,675 |
| 625,00 | 243,50 | 0,681 |

As tabelas B-01, B-02, B-03 e B-04 (anexo B) apresentam as distâncias de avanço simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN (1985) com fatores de forma variados; e as tabelas B-05, B-06, B-07 e B-08, mostram os dados de avanço (distância versus tempo) observados em campo com os exemplos estudados. Observa-se nessas tabelas o efeito dos fatores de forma na variação das distâncias com os respectivos tempos de avanço, e a discrepância nos pares de valores (distância versus tempo) quando comparados com os dados de campo dos exemplos estudados. Esses resultados mostram a influencia dos fatores de forma dos perfis superficial e subsuperficial considerados.

Para facilitar a análise de performance das curvas de avanço simuladas em relação às obtidas em campo, emprega-se o Método dos Mínimos Quadrados aplicado aos logaritmos nos dados de tempo de avanço em função das distâncias para todas as curvas, simuladas e observadas, obtendo-se um monômio potencial, empírico, da forma $T = \alpha \cdot X^\beta$. O coeficiente (α), o expoente (β) e o coeficiente de correlação (r) são vistos nas tabelas 07, 08, 09 e 10. Observa-se nessas tabelas, valores elevados para os coeficientes de correlação em todas as curvas ajustadas.

Tabela 07. Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o Método dos Mínimos Quadrados que estima os dados de RAMSEY da tabela B-09.

| Curvas de avanço | Coeficientes | | |
|-----------------------|--------------|-----------|--------|
| | (α) | (β) | (r) |
| (Campo) | 0,07623 | 1,1734 | 0,9993 |
| (r_{y1} r_{z1}) | 0,05280 | 1,2646 | 0,9995 |
| (r_{y2} r_{z2}) | 0,05699 | 1,2672 | 0,9994 |
| (r_{y3} r_{z3}) | 0,04823 | 1,2295 | 0,9996 |
| (r_{y4} r_{z4}) | 0,04126 | 1,2847 | 0,9995 |
| (r_{y5} r_{z5}) | 0,05514 | 1,2520 | 0,9995 |

Tabela 08. Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o Método dos Mínimos Quadrados que estima os dados de HORTICULTURE da tabela B-10.

| Curvas de avanço | Coeficientes | | |
|-----------------------|--------------|-----------|--------|
| | (α) | (β) | (r) |
| (Campo) | 0,05702 | 1,3431 | 0,9973 |
| (r_{y1} r_{z1}) | 0,01410 | 1,6170 | 0,9989 |
| (r_{y2} r_{z2}) | 0,01484 | 1,6303 | 0,9988 |
| (r_{y3} r_{z3}) | 0,01536 | 1,5380 | 0,9991 |
| (r_{y4} r_{z4}) | 0,01091 | 1,6396 | 0,9990 |
| (r_{y5} r_{z5}) | 0,01626 | 1,6066 | 0,9988 |

Tabela 09. Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o Método dos Mínimos Quadrados que estima os dados de STIEBEN da tabela B-11.

| Curvas de avanço | Coeficientes | | |
|-----------------------|--------------|-------------|---------|
| | (α) | (β) | (r) |
| (Campo) | 0,1266 | 1,1204 | 0,9991 |
| (r_{y1} r_{z1}) | 0,1652 | 1,0443 | 0,9999 |
| (r_{y2} r_{z2}) | 0,1763 | 1,0459 | 0,9999 |
| (r_{y3} r_{z3}) | 0,1499 | 1,0286 | 0,9999 |
| (r_{y4} r_{z4}) | 0,1511 | 1,0396 | 0,9999 |
| (r_{y5} r_{z5}) | 0,1919 | 1,0448 | 0,9999 |

Tabela 10. Valores do coeficiente (α), do expoente (β) e da correlação (r) da equação de avanço (3.20), obtida de acordo com o Método dos Mínimos Quadrados que estima os dados de BENSON da tabela B-12.

| Curvas de avanço | Coeficientes | | |
|-----------------------|--------------|-------------|---------|
| | (α) | (β) | (r) |
| (Campo) | 0,3267 | 1,0247 | 0,9998 |
| (r_{y1} r_{z1}) | 0,1730 | 1,1326 | 0,9998 |
| (r_{y2} r_{z2}) | 0,1852 | 1,1343 | 0,9998 |
| (r_{y3} r_{z3}) | 0,1583 | 1,1177 | 0,9998 |
| (r_{y4} r_{z4}) | 0,1343 | 1,1478 | 0,9998 |
| (r_{y5} r_{z5}) | 0,1806 | 1,1242 | 0,9998 |

De posse dos monômios potenciais estabelecidos através de regressão linear, determina-se às estimativas dos tempos de avanço ajustados em função das distâncias observadas em campo para todas as curvas de avanço simuladas e medidas em campo, apresentadas nas tabelas B-09, B-10, B-11 e B-12 (anexo B).

As estimativas dos tempos de avanço em função das distâncias observadas, nos experimentos estudados, para todas as curvas simuladas e as observadas em campo, permitiram o emprego da expressão 3.21 na determinação dos desvios médios das ordenadas (tempo) das curvas de avanço simuladas em relação às curvas medidas em campo; apresentados na tabela 11.

Os resultados das tabelas B-09; B-10; B-11 e B-12 (anexo B), permitiram plotar as curvas de avanço simuladas; as observadas em campo, ajustadas através de

regressão linear e, permitiram também, apresentar as figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. A visualização dessas figuras e os valores dos desvios médios, apresentados na tabela 11, possibilitam melhor compreensão na avaliação da performance das curvas de avanço simuladas em função da variação dos fatores de forma estudados.

Observando-se os resultados da tabela 11, conclui-se que os fatores de forma r_{y5} , r_{z5} e os fatores de forma estimados r_{y1} , r_{z1} , r_{y2} e r_{z2} proporcionam melhor performance das curvas de avanço simuladas; no entanto, os fatores de forma r_{y3} , r_{z3} , e r_{y4} , r_{z4} , favorecem maiores desvios médios das curvas de avanço simuladas em relação às curvas medidas em campo.

Tabela 11. Desvio médio das estimativas das curvas de avanço, simuladas com fatores de forma variados, em relação às de campo ajustadas, com os exemplos estudados especificados.

| Exemplos | Desvio médio | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| Ramsey | 0,41 | 1,28 | 1,92 | 1,24 | 0,30 |
| Horticulture | 2,61 | 3,96 | 10,15 | 6,11 | 3,08 |
| Stieben | 7,78 | 4,41 | 15,34 | 12,67 | 1,28 |
| Benson | 6,20 | 16,56 | 20,46 | 18,28 | 5,23 |

Com os dados de RAMSEY, obteve-se a melhor performance da curva de avanço simulada com os fatores de forma r_{y5} e r_{z5} . Neste caso, o menor desvio médio é da ordem de 0,30, correspondente ao menor coeficiente de variação $CV = 4,5\%$ para os fatores de forma calibrados com estes dados. O maior desvio médio é da ordem de 20,46 com os dados de BENSON para a curva de avanço simulada com os fatores de forma r_{y3} e r_{z3} .

O maior coeficiente de variação $CV = 12\%$, para os fatores de forma r_i calibrados com a expressão 3.18, com os dados observados de HORTICULTURE, resulta no desvio médio em torno de 3,08 para a curva de avanço simulada com os fatores de forma r_{y5} e r_{z5} . Neste caso, verifica-se o menor desvio médio, em torno de 2,61, para a curva de avanço simulada com os fatores de forma r_{y1} e r_{z1} .

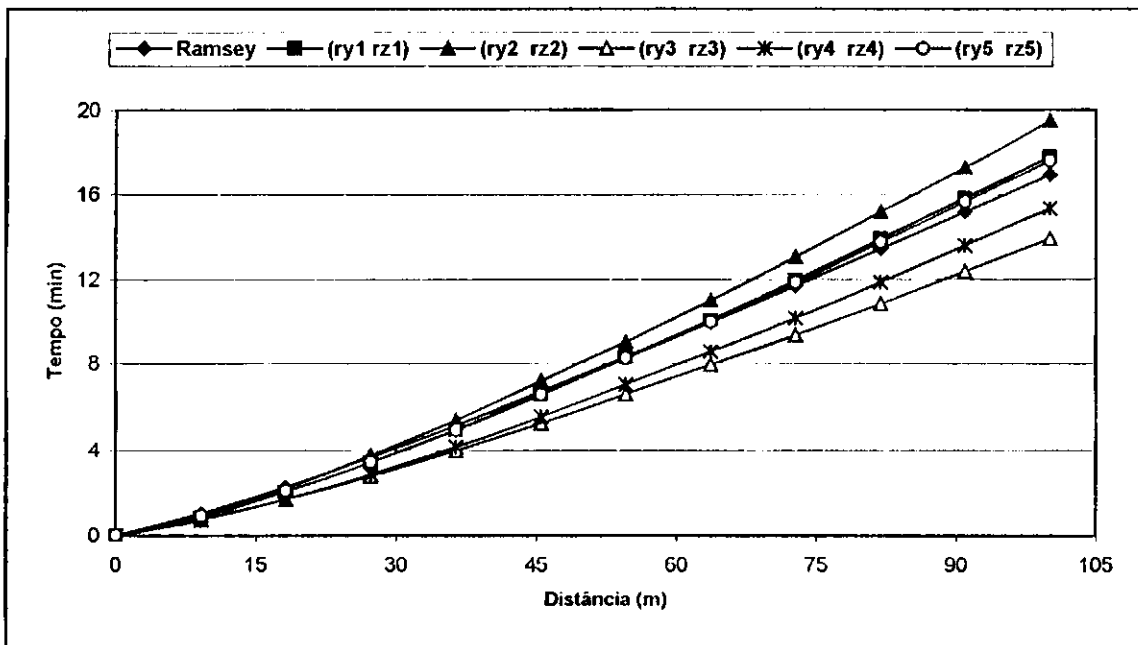


Figura 4.1. Curvas de avanço ajustadas, simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, comparados com dados de campo ajustados (Dados de RAMSEY).

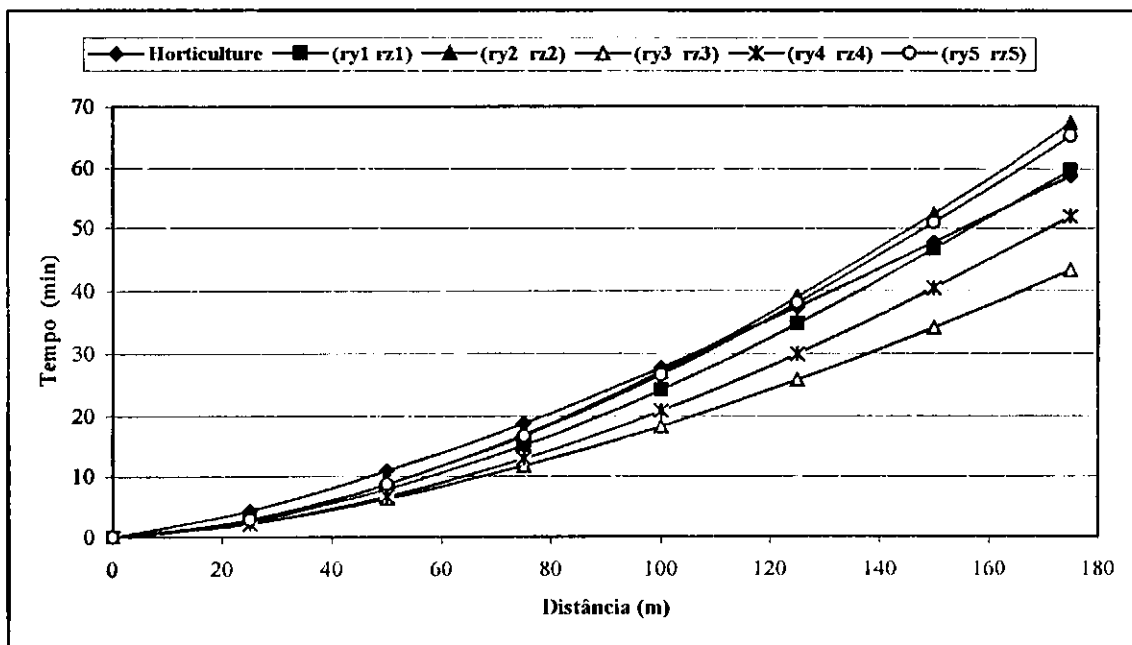


Figura 4.2. Curvas de avanço ajustadas, simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, comparados com dados de campo ajustados (Dados de HORTICULTURE)

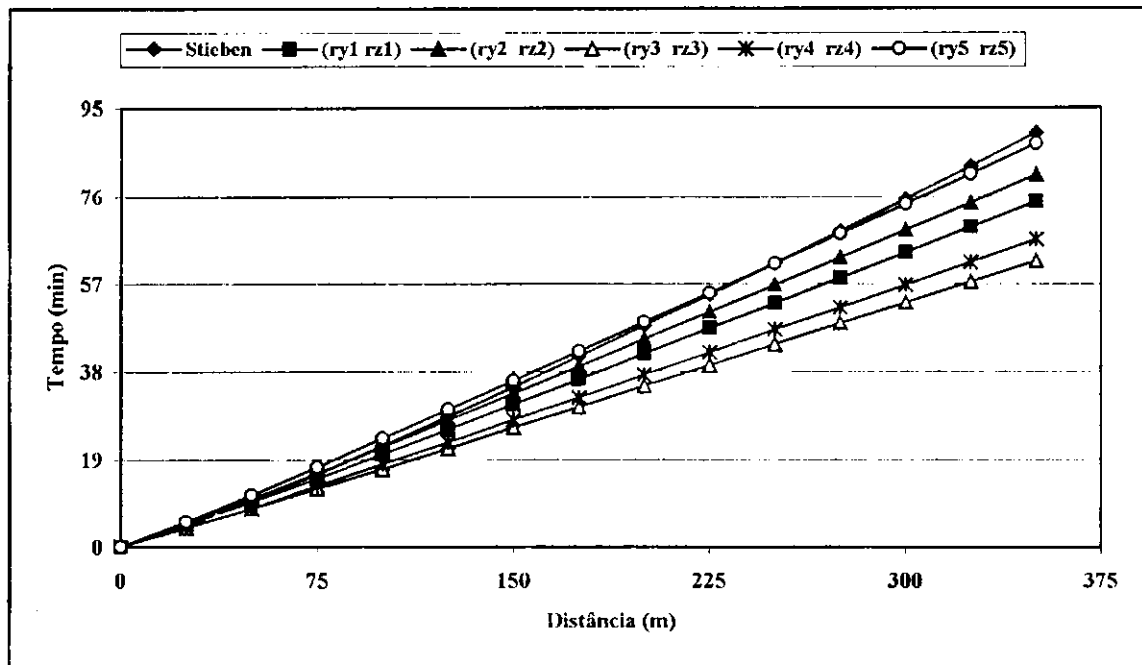


Figura 4.3. Curvas de avanço ajustadas, simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, comparados com dados de campo ajustados (Dados de STIEBEN).

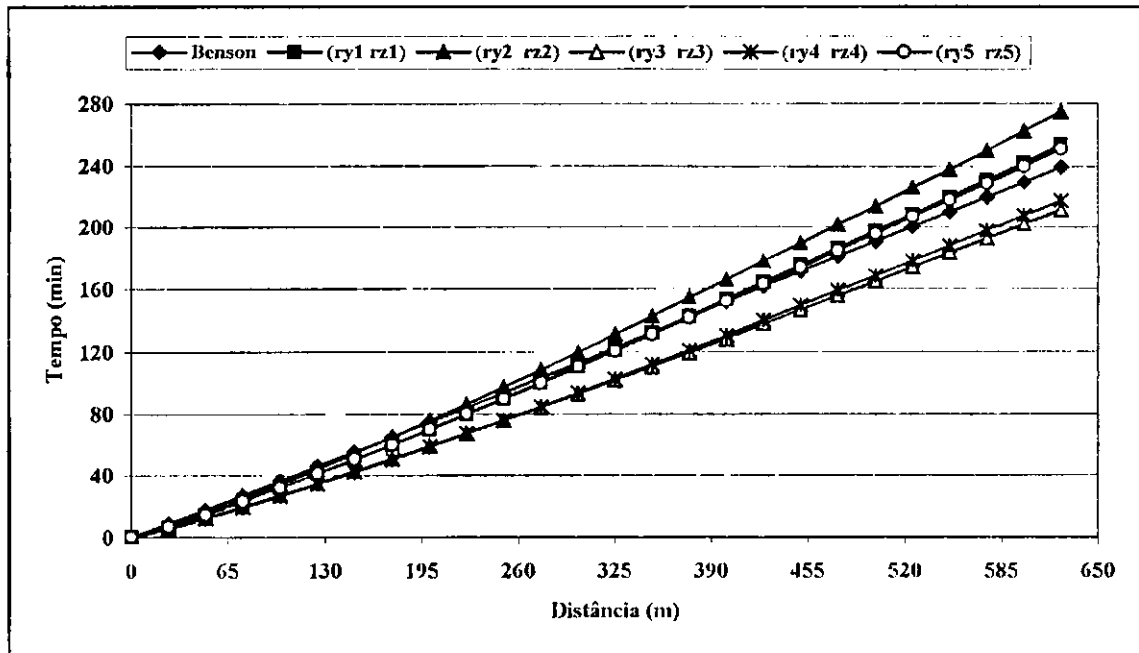


Figura 4.4. Curvas de avanço ajustadas, simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, comparados com dados de campo ajustados (Dados de BENSON)

4.2 - Efeito da Recessão Sobre o Perfil de Infiltração na Irrigação por Sulcos

No estudo da influência da recessão sobre o perfil de distribuição de água no solo, são utilizados três hipóteses aqui tratadas do seguinte modo: R_1 , a recessão é uma curva de acordo com a equação 3.28, apresentada por LEVIEN (1985); R_2 , é a recessão na cabeceira do sulco dada pela equação 3.33, apresentada por LEVIEN (1985), ou seja, uma curva instantânea no tempo de recessão (t_r) e paralela ao eixo das abscissas; R_3 , é a recessão instantânea no tempo de aplicação de água, onde $t_r = t_{co}$, ou seja, uma curva paralela ao eixo das abscissas.

As tabelas B-13, B-14, B-15 e B-16 (anexo B) apresentam os resultados dos tempos de recessão simulados pelo modelo de LEVIEN (1985) com as três hipóteses assumidas R_1 , R_2 e R_3 . A fase de avanço é representada por curvas simuladas com os fatores de forma r_{y5} e r_{z5} , por apresentarem bom desempenho nesta fase do processo. Esses resultados são usados na análise de performance dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive, estudados.

Para avaliar a performance das curvas de recessão simuladas em relação as de campo estudadas, apresenta-se os resultados, dos tempos de recessão estimados com as três hipóteses R_1 , R_2 e R_3 assumidas, nas tabelas B-13, B-14, B-15 e B-16 (anexo B); e as curvas de recessão observadas em campo com os exemplos especificados, apresentadas nas tabelas B-05, B-06, B-07 e B-08 (anexo B). Observa-se nessas tabelas que os pares de valores (distância versus tempo de recessão) são muito discrepantes.

Para facilitar a avaliação no desempenho das curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 em relação aos resultados de campo, dos exemplos considerados, estima-se os tempos de recessão com os dados de campo estudados, correspondentes as mesmas distâncias de avanço simuladas com os fatores de forma r_{y5} e r_{z5} , através de interpolação linear, considerando-se dois pares de pontos da curva experimental, situados nas vizinhanças de cada valor a ser estimado. Essa metodologia, aqui assumida, se deve ao fato de se verificar trajetórias indefinidas nas curvas de recessão, tanto observadas como simuladas; e, pela dificuldade de se ajustar modelos específicos a essas curvas; no entanto, essa decisão possibilita estimar pontos de ordenadas coincidentes nas curvas de recessão experimental

com as simuladas, e possibilita a adoção de critério comparativo, mais consistente, no desempenho das curvas simuladas pelo modelo.

As tabelas B-13, B-14, B-15 e B-16 (anexo B), apresentam, também, os resultados dos tempos de recessão experimental, estimados através de interpolação linear, com os exemplos especificados. Essas tabelas permitiram plotar os gráficos das figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente.

As lâminas infiltradas simuladas são denominadas de Z_1 , Z_2 e Z_3 , e correspondem as curvas de recessão simuladas R_1 , R_2 e R_3 . Nas tabelas B-17, B-18, B-19 e B-20 (Anexo B), encontram-se os resultados das lâminas infiltradas simuladas pelo modelo de LEVIEN (1985), e as lâminas ajustadas com dados de campo; determinadas pela expressão 3.40, assumindo-se que a fase de avanço é representada pelas curvas simuladas com os fatores de forma r_{y5} e r_{z5} . Essas tabelas permitiram plotar os gráficos apresentados nas figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente.

As tabelas B-21, B-22, B-23 e B-24 (Anexo B), apresentam as lâminas infiltradas estimadas com dados observados dos quatro exemplos estudados; e, também, foram obtidas com a utilização da equação 3.40 do modelo de LEVIEN (1985).

Os resultados das curvas de recessão simuladas R_1 , R_2 e R_3 ; das curvas observadas em campo ajustadas; os resultados dos perfis de infiltração simulados Z_1 , Z_2 e Z_3 ; e dos perfis de infiltração estimados com os dados observados dos quatro exemplos estudados; permitiram a utilização da expressão 3.21 que determina o cálculo dos desvios médios dos dados simulados em relação aos dados de campo.

Esse estudo possibilitou a análise mais representativa da performance das curvas de recessão e dos perfis de infiltração obtidos, correspondentes, como também facilitou a avaliação da influência da recessão sobre o perfil de infiltração na irrigação por sulcos.

A tabela 12 mostra os resultados dos desvios médios das curvas de recessão e dos perfis infiltrados correspondentes, considerando-se o efeito dos três casos de recessão R_1 , R_2 e R_3 sobre os perfis de infiltração.

Observa-se na Tabela 12, o menor desvio médio, em torno de 1,87, obtido com os dados de HORTICULTURE para a curva de recessão R_1 . Este efeito é muito significativo para o perfil infiltrado Z_1 com desvio médio de 0,19. Isto significa que tanto a

curva de recessão simulada R_1 quanto o perfil infiltrado Z_1 , correspondente, são as curvas simuladas que mais se aproximam das curvas obtidas com dados observados de HORTICULTURE.

Em contraste, as curvas simuladas que mais se afastam das curvas obtidas com os dados de campo são a recessão R_1 e o perfil infiltrado Z_1 com os dados de BENSON. Neste caso, observa-se que os desvios médios são, respectivamente: 231, 48 e 4, 79.

A melhor performance é verificada para a curva de recessão R_1 , com os dados observados de RAMSEY e HORTICULTURE; para os dados de STIEBEN, a curva de recessão R_2 ; e, para os dados de BENSON, a melhor performance é da curva de recessão R_3 .

Observa-se na tabela 12, que todos os resultados dos desvios médios dos perfis infiltrados Z_1 , Z_2 e Z_3 , com os exemplos estudados, são proporcionalmente correspondentes aos efeitos das três hipóteses da curva de recessão R_1 , R_2 e R_3 .

Tabela 12 – Desvio médio das curvas de recessão e dos perfis infiltrados correspondentes, simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, considerando-se os três casos de recessão, em relação aos dados de campo estimados, com os exemplos estudados especificados.

| Exemplos | Desvio médio | | | | | |
|--------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | R_1 | R_2 | R_3 | Z_1 | Z_2 | Z_3 |
| Ramsey | 10,71 | 18,98 | 23,44 | 0,97 | 1,74 | 2,15 |
| Horticulture | 1,87 | 9,60 | 15,86 | 0,19 | 1,09 | 1,67 |
| Stieben | 91,36 | 18,34 | 24,30 | 1,51 | 0,29 | 0,39 |
| Benson | 231,48 | 60,97 | 33,88 | 4,79 | 1,32 | 0,93 |

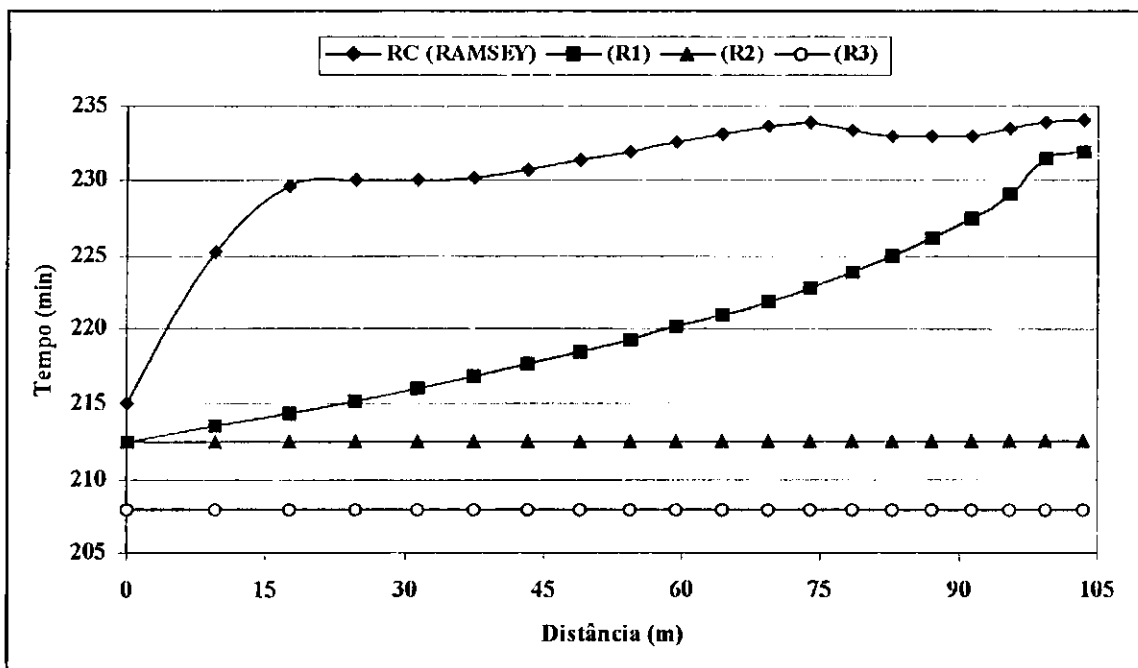


Figura 4.5. Curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 , simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN comparadas com dados de campo ajustados (Dados de RAMSEY).

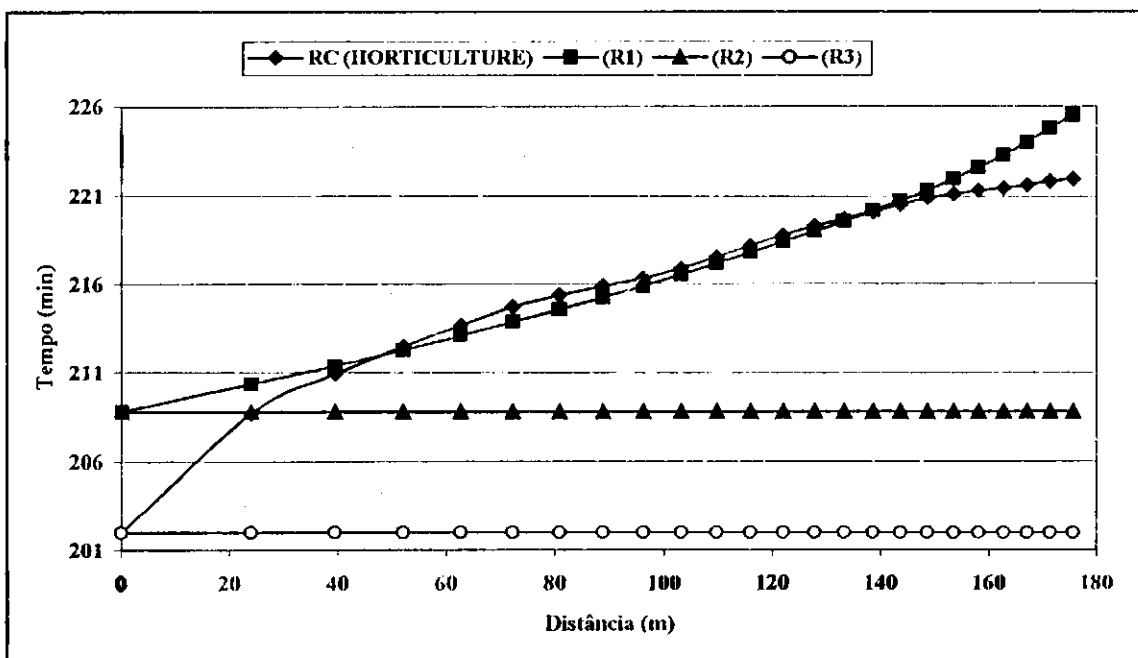


Figura 4.6. Curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 , simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN comparadas com dados de campo ajustados (Dados de HORTICULTURE).

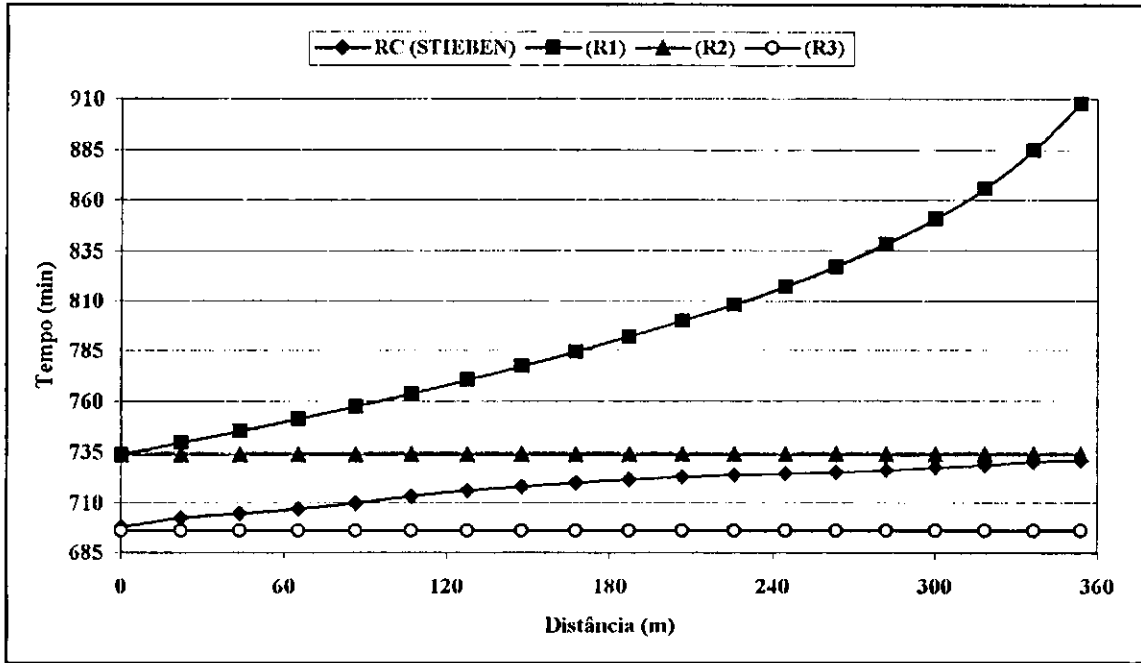


Figura 4.7. Curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 , simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN comparadas com dados de campo ajustados (Dados de STIEBEN).

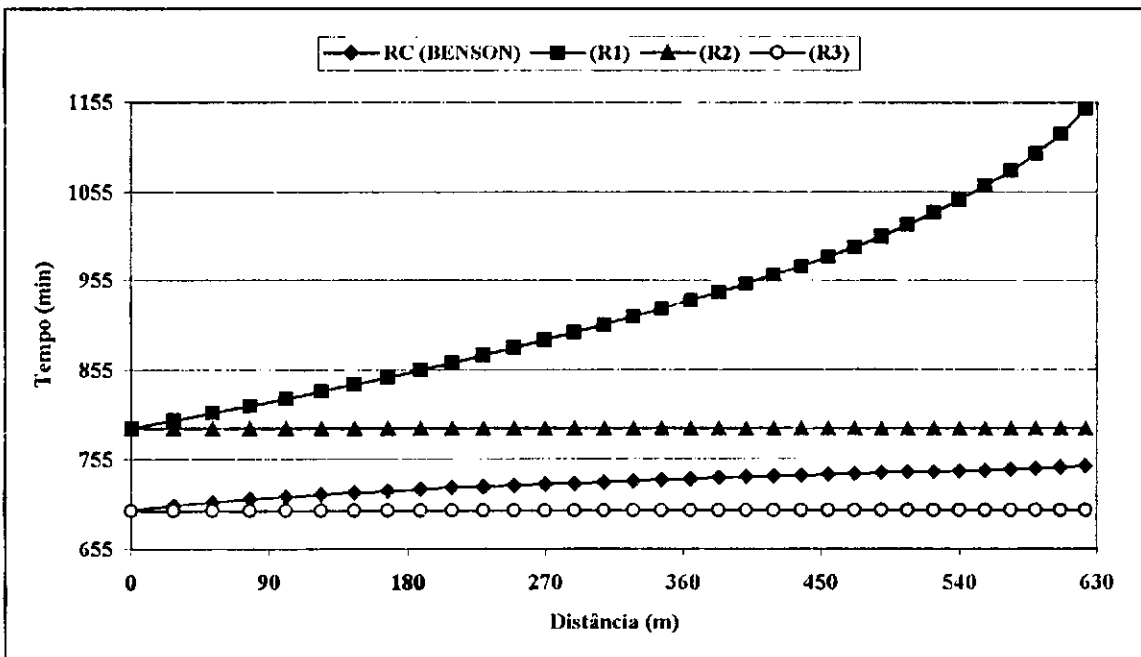


Figura 4.8. Curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 , simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN comparadas com dados de campo ajustados (Dados de BENSON).

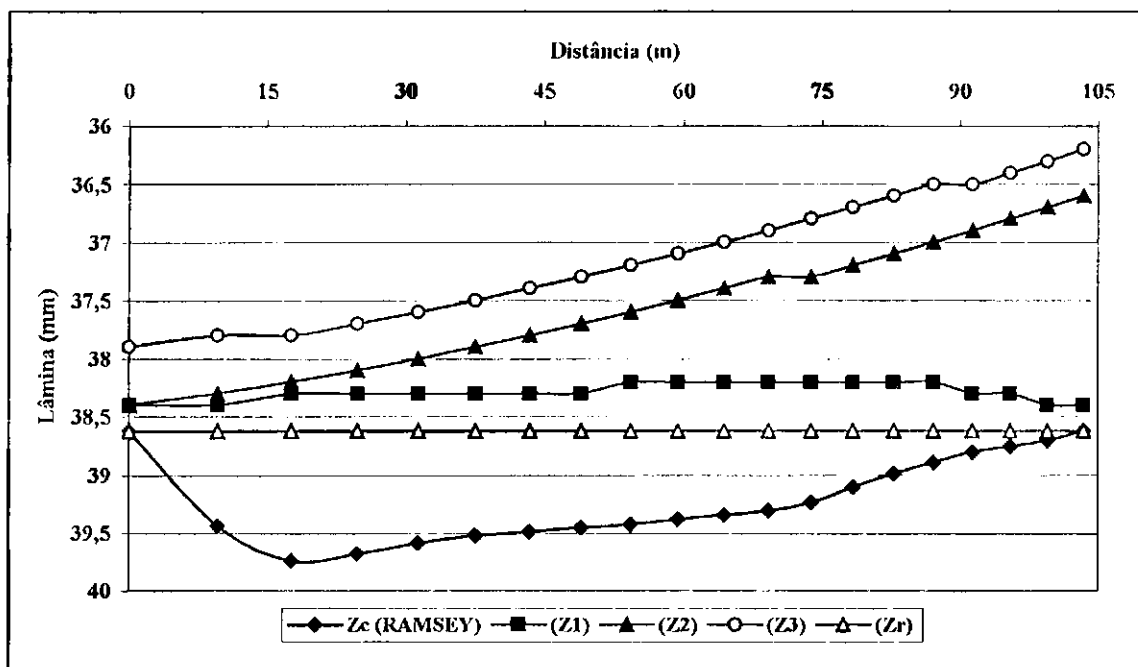


Figura 4.9. Lâmina de irrigação requerida e perfis de infiltração simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com os três casos de recessão, comparados com dados de campo ajustados (Dados de RAMSEY).

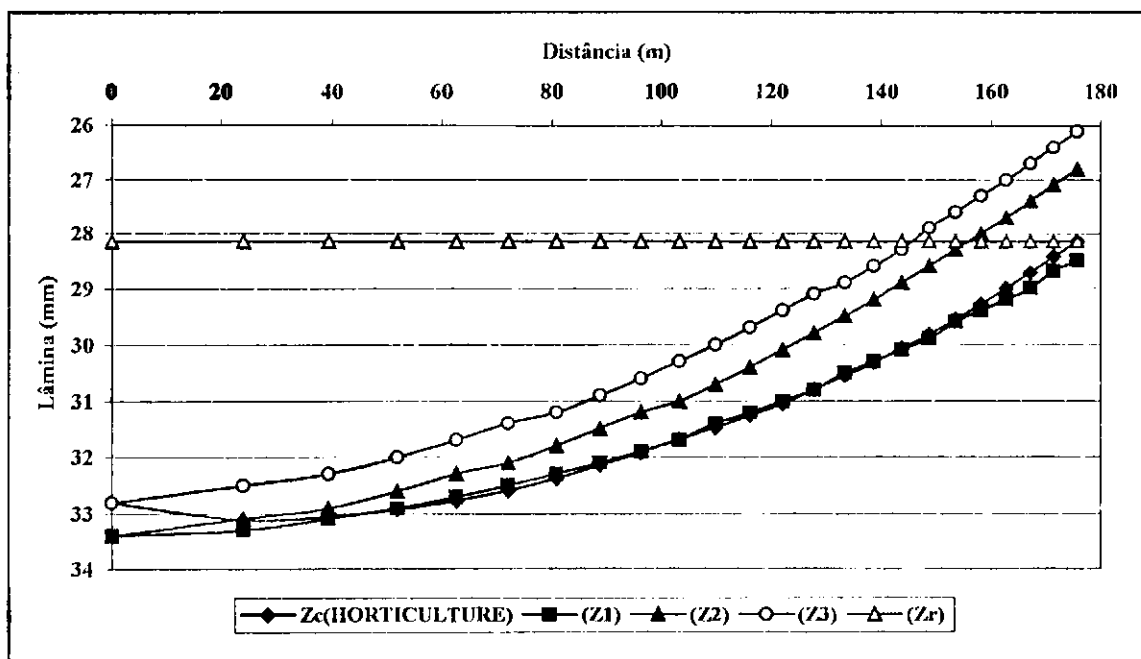


Figura 4.10. Lâmina de irrigação requerida e perfis de infiltração simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com os três casos de recessão, comparados com dados de campo ajustados (Dados de HORTICULTURE).

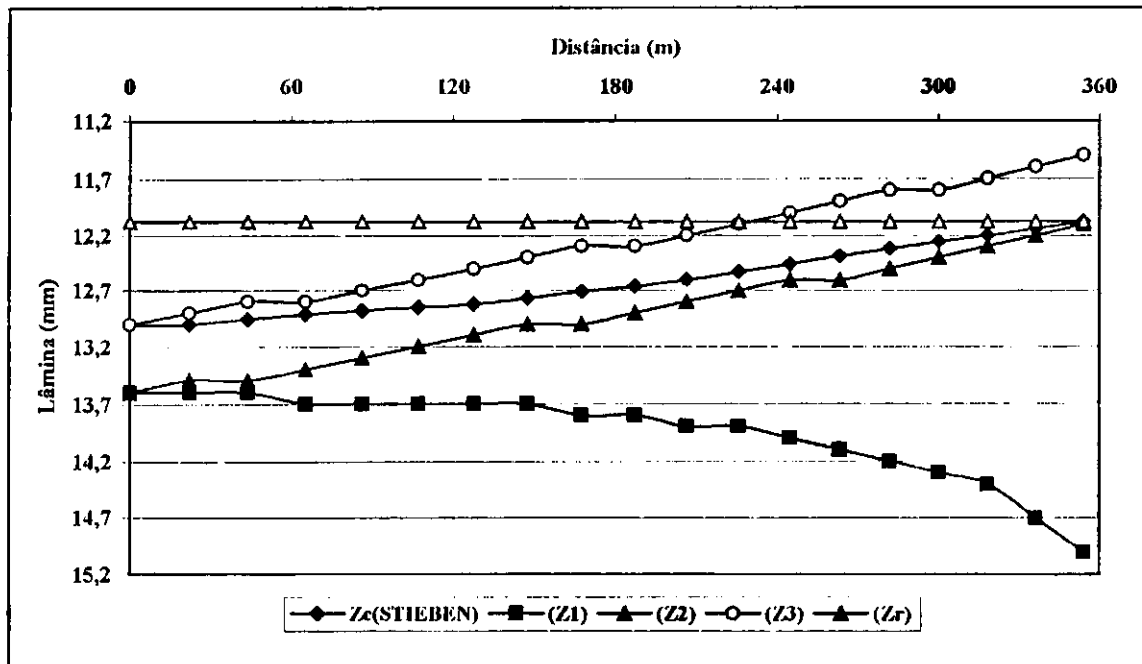


Figura 4.11. Lâmina de irrigação requerida e perfis de infiltração simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com os três casos de recessão, comparados com dados de campo ajustados (Dados de STIEBEN).

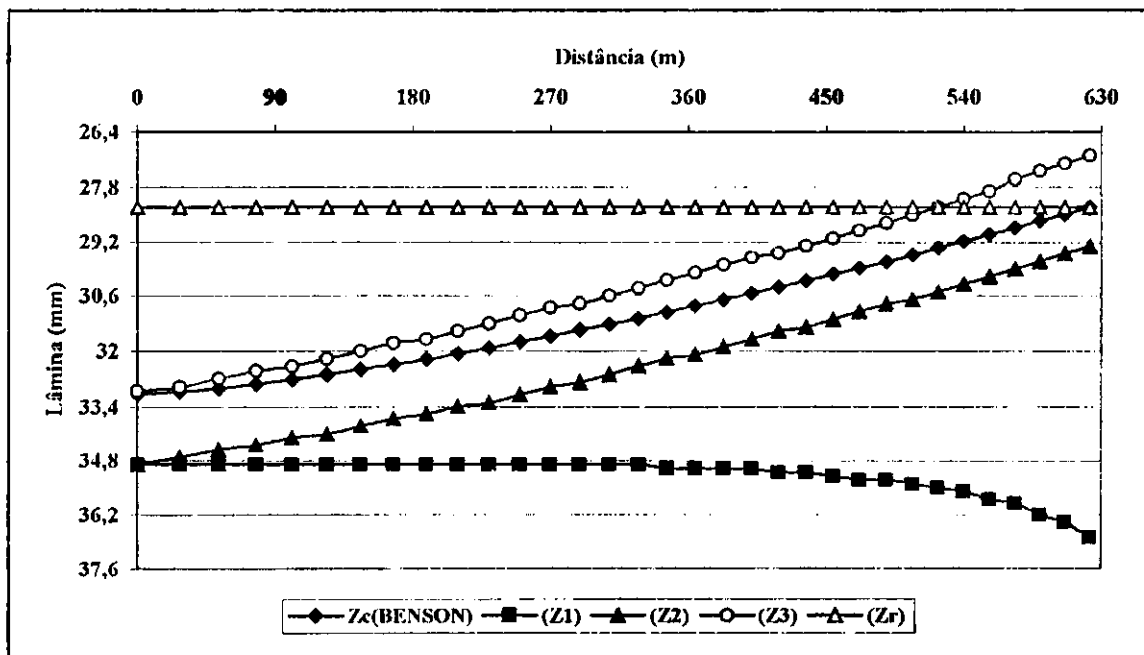


Figura 4.12. Lâmina de irrigação requerida e perfis de infiltração simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com os três casos de recessão, comparados com dados de campo ajustados (Dados de BENSON).

4.3 – Efeito da Recessão sobre o Volume de Escoamento Superficial e sobre os Parâmetros de Eficiência.

Nesta abordagem, pretende-se estudar uma das potencialidades do modelo algébrico de LEVIEN (1985), que simula o volume de escoamento superficial, através da expressão 3.52, considerando-se que o perfil de infiltração é linear determinado com a curva de recessão R_1 . No caso das curvas de recessão R_2 e R_3 , no cálculo do escoamento superficial, assume-se duas hipóteses: o perfil de infiltração é linear no tempo de corte da água, onde $t_r = t_{co}$ para a recessão R_3 , e no tempo de recessão t_r para a recessão R_2 ; os volumes armazenados na superfície do solo são desprezíveis para facilitar os cálculos. Na determinação dos volumes de escoamento superficial com as curvas de recessão R_2 e R_3 , utilizam-se as expressões 3.53 e 3.58, respectivamente, obtidas sob a hipótese que o perfil infiltrado é linear.

Do exposto acima, o objetivo dessa etapa de estudos, é utilizar dados estimados pelo modelo e, analisar a performance dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive através de simulação algébrica; no entanto, para determinação dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação, considera-se os resultados dos volumes de escoamento superficial, simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN (1985) com as três hipóteses de recessão R_1 , R_2 e R_3 .

Na tabela 13 apresenta-se o resultado dos volumes de escoamento superficial, V_{ro} (m^3) simulados pelo modelo de LEVIEN (1985) com os três casos de recessão R_1 , R_2 e R_3 . O volume infiltrado V_z (m^3) é determinado através de balanço de volume, considerando-se o volume de Runoff V_{ro} (m^3), e o volume aplicado V_o (m^3), estimados com a expressão 3.59.

O volume infiltrado V_{zp} (m^3) é determinado assumindo-se o perfil infiltrado linear. Neste caso, apenas as lâminas infiltradas na cabeceira, e no final da parcela são suficientes para a sua determinação com uso da expressão 3.83. Por sua vez, o volume de Runoff V_{rop} (m^3) é computado através de balanço de volume com os resultados do volume infiltrado V_{zp} (m^3) e do volume de água aplicado V_o (m^3).

Na determinação do volume infiltrado V_z (m^3) com os dados observados dos exemplos estudados, considera-se a forma espacial do perfil infiltrado. Para maior precisão

dos resultados utiliza-se a expressão 3.60, que calcula o volume de água aplicado no solo através de integração gráfica, usando-se o Método dos Trapézios; e o volume de Runoff $V_{ror}(m^3)$, determinado através de balanço de volume; no entanto, seus valores numéricos são, aqui, assumidos como valor padrão, e podem ser observados na tabela 14.

De outro modo, com relação à determinação do volume infiltrado $V_z(m^3)$ com os exemplos estudados, obteve-se os resultados dos volumes infiltrados por unidade de comprimento de sulco, em cada estação de medição, apresentados nas Tabelas B-21, B-22, B-23 e B-24 (anexo B). Neste caso, utiliza-se a expressão 3.36 de (SOUZA, 1981) com a hipótese de o perímetro molhado ser igual à largura da superfície livre de água, ou seja, $P_m = B(y_n)$.

O efeito da recessão sobre o volume de escoamento superficial pode ser observado na tabela 13. Nota-se que os volumes de Runoff simulados pelo modelo com as curvas de recessão R_2 e R_3 estão bem próximos, ou até mesmo maiores do que os calculados com a curva de recessão R_1 . Isto se deve ao fato de não ter sido considerado os volumes armazenados na superfície do solo nos instantes $t = t_r$, para a curva de recessão R_2 , e $t_{co} = t_r$, para a recessão R_3 . Neste caso, na determinação do volume de escoamento superficial, através de balanço de volume; a parcela $V_s(m^3)$ (volume armazenado na superfície) é adicionado ao volume de Runoff $V_{ro}(m^3)$. Por isso, considera-se como prioridade os volumes infiltrados $V_z(m^3)$, $V_{zp}(m^3)$ e $V_{zr}(m^3)$ e os volumes de Runoff $V_{ro}(m^3)$, $V_{rop}(m^3)$ e $V_{ror}(m^3)$, determinados com as curvas de recessão R_1 , e as curvas obtidas no campo.

Outro fato que deve ser considerado sobre a simulação do volume de Runoff com a expressão 3.52, do modelo algébrico de LEVIEN (1985), é que ha necessidade de ser testada com outros dados, representando condições extremas de outras situações reais.

Comparando-se os volumes de escoamento superficial $V_{ro}(m^3)$ obtidos com a curva de recessão R_1 , na tabela 13, com os valores da tabela 14, observa-se o seguinte: os valores de RAMSEY do V_{ro} e V_z são $12,87 m^3$ e $3,73 m^3$, respectivamente; no entanto, o V_{ro} é superestimado em cerca de 2% e V_z é subestimado em torno de 5%. Os valores de HORTICULTURE do V_{ro} e V_z são $3,84 m^3$ e $5,98 m^3$, respectivamente. O V_{ro} é superestimado em cerca de 6% e V_z é subestimado em torno de 4%. Com os resultados de STIEBEN, V_{ro} e V_z são $21,49 m^3$ e $2,56 m^3$, respectivamente. O V_{ro} é superestimado em

torno de 0,5% e ∇_z é subestimado em cerca de 4%. Nos resultados de BENSON, ∇_{ro} e ∇_z são 47,52 m³ e 19,91 m³, respectivamente. O ∇_{ro} é subestimado em torno de 1% e ∇_z é superestimado em cerca de 2%.

Verifica-se nos resultados com os dados de RAMSEY e HORTICULTURE, que o ∇_{ro} simulado com a curva de recessão R_1 é superestimado e o ∇_z é subestimado. Com os resultados de STIEBEN e BENSON, o ∇_{ro} é subestimado e o ∇_z é superestimado, quando comparados com os resultados obtidos com os dados de campo, apresentados na tabela 14.

Na tabela 13, os volumes infiltrados ∇_{zp} (m³), no perfil considerado linear com os três casos de recessão R_1 , R_2 e R_3 apresentam resultados menores do que os computados com os dados observados ∇_{zr} (m³) de RAMSEY e de HORTICULTURE. Na tabela 14, este fato é verificado quando as lâminas infiltradas são menores do que as lâminas computadas com os dados observados. Além disso, a consideração que o perfil é linear, subestima o cálculo do volume infiltrado ∇_z principalmente quando todas as lâminas infiltradas são maiores do que as lâminas representadas pelo perfil linear que liga os pontos extremos.

No caso com os dados de STIEBEN e os de BENSON, observa-se que o volume infiltrado ∇_{zp} (m³) do perfil é maior do que o volume computado com os dados de campo ∇_{zr} (m³) para as curvas de recessão R_1 e R_2 . Verifica-se que as lâminas infiltradas simuladas com estes dados são maiores do que as lâminas computadas com os dados de campo.

A influência marcante das curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 sobre o volume infiltrado ∇_z (m³) do modelo e, conseqüentemente, sobre o volume de Runoff ∇_{ro} (m³) é observada comparando-se os resultados da tabela 13 com os dados da tabela 14. Verifica-se que os volumes de Runoff ∇_{ro} (m³) do modelo estão bem representados pelas curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 , que obtiveram a melhor performance, correspondentes aos exemplos estudados.

Com os dados de RAMSEY e os de HORTICULTURE, a melhor representatividade do ∇_{ro} (m³) é observada com a curva de recessão R_1 . Para o dados de STIEBEN, é a curva de recessão R_2 e, nos dados de BENSON, a curva de recessão R_3 .

Tabela 13. Comparação dos volumes infiltrados $V_z(m^3)$, dos volumes de Runoff $V_{ro}(m^3)$, simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com os volumes $V_{zp}(m^3)$ e $V_{rop}(m^3)$ estimados do perfil linear infiltrado, considerando-se os três casos de recessão com os exemplos especificados.

| Exemplos | Hipóteses Recessão | Volume infiltrado (m^3) | | Volume de runoff (m^3) | |
|--------------|-----------------------|-----------------------------|----------|----------------------------|-----------|
| | | Modelo | Perfil | Modelo | Balanço |
| | | V_z | V_{zp} | V_{ro} | V_{rop} |
| Ramsey | R ₁ | 3,73 | 3,84 | 12,87 | 12,76 |
| | R ₂ | 3,75 | 3,75 | 12,85 | 12,85 |
| | R ₃ | 3,71 | 3,71 | 12,89 | 12,89 |
| Horticulture | R ₁ | 5,98 | 6,06 | 3,84 | 3,76 |
| | R ₂ | 5,89 | 5,89 | 3,93 | 3,93 |
| | R ₃ | 5,76 | 5,76 | 4,06 | 4,06 |
| Stieben | R ₁ | 2,56 | 3,00 | 21,49 | 21,05 |
| | R ₂ | 2,70 | 2,70 | 21,35 | 21,35 |
| | R ₃ | 2,57 | 2,57 | 21,48 | 21,48 |
| Benson | R ₁ | 19,91 | 22,39 | 47,52 | 45,04 |
| | R ₂ | 20,06 | 20,06 | 47,37 | 47,37 |
| | R ₃ | 18,76 | 18,76 | 48,66 | 48,66 |

Tabela 14. Volume infiltrado $V_{zr}(m^3)$ e de Runoff $V_{ror}(m^3)$ estimados com dados observados, com os exemplos especificados, considerando-se o perfil de distribuição espacial da água infiltrada.

| Exemplos | Volume infiltrado (m^3) | Volume de runoff(m^3) |
|--------------|-----------------------------|---------------------------|
| | V_{zr} | V_{ror} |
| Ramsey | 3,93 | 12,67 |
| Horticulture | 6,20 | 3,62 |
| Stieben | 2,66 | 21,39 |
| Benson | 19,43 | 48,00 |

A influência da recessão sobre os parâmetros de eficiência e uniformidade é analisada com a determinação desses parâmetros através do modelo algébrico de LEVIEN (1985). Neste caso, utiliza-se os resultados dos volumes de escoamento superficial simulados com os três casos de recessão R_1 , R_2 e R_3 , na avaliação dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive.

Visto que todos os parâmetros simulados pelo modelo são estimados, assume-se que o perfil de infiltração é linear na determinação da eficiência e uniformidade de irrigação, com os dados simulados.

Salienta-se a prioridade em determinar os volumes de percolação profunda V_p e, em seguida, o volume útil às culturas. Essa decisão é considerada, no sentido de evitar que os resultados do volume percolado sejam negativos, com o uso da expressão $V_p = V_z - V_{req}$. Isto é provável de ocorrer todas as vezes que o modelo subestima os resultados do volume infiltrado V_z , a ponto de ser menor que o volume requerido às culturas, no caso de uso da expressão acima, que não está incluída na metodologia.

Este problema é contornado utilizando-se a expressão $V_u = V_z - V_p$ na determinação do volume útil para as culturas, assumindo-se inicialmente que a forma do perfil infiltrado é linear no cálculo do volume percolado V_p , nas quatro opções consideradas para a posição da lâmina requerida. Isto viabiliza a análise dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive com qualquer valor da lâmina requerida.

Assume-se na análise de performance dos sistemas de irrigação por sulcos através de simulação algébrica, que as lâminas requeridas são iguais as infiltradas no final da parcela, determinadas com os dados observados para cada exemplo estudado. Os valores das lâminas requeridas assumidas para os três casos de recessão R_1 , R_2 e R_3 são as seguintes:

- Ramsey: $Z_{req} = 38,62$ mm
- Horticulture: $Z_{req} = 28,15$ mm
- Stieben: $Z_{req} = 12,08$ mm
- Benson: $Z_{req} = 28,31$ mm

As figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, apresentam os perfis de infiltração representados pelos valores das lâminas infiltradas requeridas, assumidos iguais às lâminas infiltradas no final do sulco, determinadas com os dados de campo.

Os resultados dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação, simulados pelo modelo com os três casos de recessão R_1 , R_2 e R_3 , são mostrados na tabela 15. Observa-se que os valores de uniformidade de distribuição, determinados com a curva de recessão R_1 , são maiores que 100% para os dados de RAMSEY, STIEBEN e BENSON. Neste caso, o uso da expressão 3.80 (MERRIAM et al., 1973) não deveria ser escolhido, visto que a lâmina infiltrada, no final da parcela, é maior que a lâmina média infiltrada.

Atribui-se, também, aos resultados maiores que 100% da uniformidade de distribuição, computada com a expressão 3.80; a influência direta do comportamento da curva de recessão R_1 , especificamente nos dados de RAMSEY, STIEBEN e BENSON. Verifica-se que as curvas de recessão R_1 , simuladas pelo modelo com a expressão 3.28, proporcionam tempos de oportunidade, no final da parcela, maiores do que os tempos da cabeceira do sulco. Como consequência, este efeito se reflete nos perfis de infiltração.

Considerando-se esse aspecto, assume-se que a U_d , uniformidade de distribuição, seja calculada através da expressão 3.67 do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC); por ser mais representativa. Conforme (SOUZA, 1983), o CUC é o parâmetro mais comumente usado para expressar a uniformidade de distribuição (U_d).

O efeito da recessão é mais marcante com os dados de STIEBEN e os de BENSON. Nota-se na tabela 15, que os valores da eficiência de aplicação (E_a) são muito próximos dos resultados com os dados de RAMSEY e os de HORTICULTURE, para as três curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 . A influência mais significativa é verificada com a curva de recessão R_1 , para os dados de STIEBEN e os de BENSON.

A tabela 16 apresenta os resultados dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação, estimados considerando-se a forma espacial do perfil de infiltração, computados com os dados observados dos exemplos estudados. Os resultados da uniformidade de distribuição, neste caso, são determinados com o uso da expressão 3.67 do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC).

Comparando-se os resultados das tabelas 15 e 16, verifica-se que as curvas de recessão R_2 devem representar melhores os valores dos parâmetros de avaliação dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive com os exemplos estudados.

É importante observar que os resultados na tabela 15 da eficiência de armazenamento e, conseqüentemente, os da percentagem de déficit com a curva de recessão R_1 , nos exemplos de STIEBEN e BENSON, são menos representativos quando comparados com a performance dos perfis de infiltração nas figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12. Isto se deve aos valores dos volumes simulados de infiltração serem os mais subestimados; da ordem de 15% e 11%, respectivamente, quando comparados com os volumes (V_{zp}) computados do perfil linear na tabela 13. Por outro lado, com os dados de RAMSEY e os de HORTICULTURE, a diferença é da ordem de 3% e 1%, respectivamente. Essa observação comprova que os parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação estão intimamente relacionados com os volumes infiltrados, que por sua vez, são afetados pela performance das curvas de recessão R_1 , R_2 e R_3 , aqui consideradas.

Tabela 15. Comparação dos parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação, considerando-se os três casos de recessão com os exemplos especificados.

| Exemplos | Curvas de Recessão | E_a (%) | E_s (%) | U_d (%) | R_o (%) | D_p (%) | P_d (%) |
|--------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Ramsey | R_1 | 22,47 | 96,37 | 100,04 | 77,53 | 0,00 | 3,63 |
| | R_2 | 22,58 | 96,84 | 97,66 | 77,42 | 0,00 | 3,16 |
| | R_3 | 22,32 | 95,74 | 97,61 | 77,68 | 0,00 | 4,26 |
| Horticulture | R_1 | 56,79 | 98,64 | 92,09 | 39,07 | 4,14 | 1,36 |
| | R_2 | 56,91 | 98,85 | 89,01 | 40,02 | 3,07 | 1,15 |
| | R_3 | 56,39 | 97,95 | 88,56 | 41,35 | 2,26 | 2,05 |
| Stieben | R_1 | 8,66 | 82,49 | 104,74 | 89,36 | 1,98 | 17,51 |
| | R_2 | 10,50 | 100,00 | 94,27 | 88,76 | 0,74 | 0,00 |
| | R_3 | 10,42 | 99,25 | 93,94 | 89,30 | 0,27 | 0,75 |
| Benson | R_1 | 22,83 | 86,12 | 102,69 | 70,47 | 6,70 | 13,88 |
| | R_2 | 26,51 | 100,00 | 91,39 | 70,25 | 3,24 | 0,00 |
| | R_3 | 26,32 | 99,27 | 89,98 | 72,17 | 1,51 | 0,73 |

Tabela 16. Parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação estimados com dados observados dos exemplos especificados.

| Exemplos | E_a (%) | E_s (%) | U_d (%) | R_o (%) | D_p (%) | P_d (%) |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Ramsey | 23,31 | 100,00 | 99,24 | 76,33 | 0,36 | 0,00 |
| Horticulture | 57,55 | 100,00 | 96,01 | 36,87 | 5,58 | 0,00 |
| Stieben | 10,46 | 100,00 | 97,73 | 88,99 | 0,55 | 0,00 |
| Benson | 26,48 | 100,00 | 95,96 | 71,20 | 2,31 | 0,00 |

5.0 – CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados do presente trabalho, conclui-se o seguinte:

- 5.1– A viabilidade de aplicação da expressão (3.18), que calibra os fatores de forma (r_i), na indicação da faixa de variação mais adequada. Neste caso, a média ponderada com relação aos tempos de avanço, com os dados observados, proporciona valores bem representativos.
- 5.2– O bom desempenho do modelo algébrico, com fatores de forma dos perfis, superficial e subsuperficial, compreendidos na faixa de variação; 0,70 a 0,81 na performance das curvas de avanço simuladas.
- 5.3– Nos sulcos menores que 200m, a trajetória da curva de recessão simulada com a hipótese 1, através da expressão (3.28), se aproxima com mais precisão dos pontos experimentais.
- 5.4– Nos sulcos longos, (maiores que 200m), a curva de recessão experimental é bem representada por curvas constantes e paralelas ao eixo das abscissas, conforme as hipóteses 2 e 3.
- 5.5– A análise criteriosa dos sistemas de irrigação por sulcos abertos em declive, utilizando-se modelos matemáticos, como o de LEVIEN (1985), com hipóteses adicionais estudadas para a curva de recessão, é diretamente relacionada com a representatividade das fases típicas do processo de irrigação, e com a precisão dos parâmetros experimentais envolvidos.
- 5.6– A utilização da expressão (3.81), que é concebida sob hipótese que o perfil infiltrado é linear, deve ser descartada na estimativa da uniformidade de distribuição, quando

existe a influência da curva de recessão R_1 , do modelo de LEVIEN (1985), visto que há possibilidade da lâmina infiltrada no final do sulco ser maior que a lâmina média.

6.0 – RECOMENDAÇÕES

- 6.1– Deve-se continuar estudando o efeito dos fatores de forma sobre o avanço da água em sulcos representados pela média ponderada dos (r_i) calculados com a expressão (3.18).
- 6.2– Estudar as curvas de recessão com as mesmas hipóteses 1, 2 e 3 em sulcos de mesmo comprimento, mas com declividade variável.
- 6.3– Poderia ser estudado em LEVIEN (1985) outra hipótese para a curva de recessão. É possível derivar da expressão (57) do seu modelo, uma equação linear, com o propósito de minimizar o efeito demasiadamente crescente na extremidade final da curva simulada observada, principalmente, em sulcos longos.
- 6.4– Estudar os parâmetros de eficiência e uniformidade de irrigação, considerando-se a forma espacial do perfil de distribuição determinados com as três hipóteses da curva de recessão com o modelo de LEVIEN.
- 6.5– Modificar o modelo LEVIEN, com perímetro molhado obtido por integração numérica (WALKER).
- 6.6– Testar o modelo de LEVIEN, com dados locais gerados em projetos de pesquisa.
- 6.7– Continuar estudos para estabelecer uma metodologia de dimensionamento de sulcos, baseados no modelo de LEVIEN.
- 6.8– Adaptar o modelo de LEVIEN para sulcos em nível fechados ao final, e com “CUTBACK” a exemplo do SCS – USDA.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUGUSTO, S. G.; SOUZA, F. & COSTA, J.O. *Eficiência e uniformidade de distribuição de água na irrigação por sulcos em declive*. Revista Engenharia Agrícola da Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, Botucatu, vol.9. 48p. 1985.
- AZEVEDO, H. M. *Características da infiltração em sulcos abertos e fechados*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 56p. 1975.
- AZEVEDO, M. A. S. B.; SOARES, A. A. ; COUTO, L. & BERNARDO, S. *Características de avanço e infiltração de água em sulcos para os escoamentos contínuos e intermitentes*. Item – Irrigação e Tecnologia Moderna – Ed. n. 40: 26-31. 1990.
- BERNARDO, S. *Manual de Irrigação*. Imprensa Universitária -- UFV. Viçosa. 2. Ed. 488p. 1986.
- BISHOP, A. A. *Relation of intake rate to length of run in surface irrigation*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE. 87 (IR1): 23-29. 1961.
- BISHOP, A. A.; JENSEN, M.E. & HALL, W.A. *Surface irrigation systems*. In: HAGAN, R. M; HAISE, H. R. & EDMINISTER, T. W. (Ed.). Irrigation of Agricultural Lands. Am. Soc. Agron. Madison, Wisc. 865-84 (Monograph, 11). 1967.
- CRIDDLE, W. D; DAVIS, S.; PAIR, C. H. & SHOCKLEY, D. G. *Methods for evaluating irrigation systems*. *Agricultural Handbook*. Was. SCS – USDA. N. 82. 24p. 1956.

- DAVIS, J. R. *Estimating rate of advance for irrigation furrows*. Proceedings of the ARS-SCS workshop on hydraulics of surface irrigation. Denver. Colorado. p.67-86. 1960.
- ELLIOTT, R. L.; WALKER, W.R & SKOGERBOE, G. *Zero inertia modeling of furrow advance*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE. 108(IR3): 179-195. 1982.
- FISCHBACH, P. E. & SOMERHALDER, B. R. *Efficiencies of an automated surface irrigation system with and without a runoff re-use system*. Transactions of the ASAE, St. Joseph. 14(4): 717-719. 1971.
- FOK, Y. S. & BISHOP. A. A. *Analysis of water advance in surface irrigation*. Journal of the irrigation and drainage division. ASCE, 91(IR1): 99-116. 1965.
- FOK, Y.S.; BISHOP, A.A. & SHIH, C.C. *The effect of intake equations on the development of the water advance equations for surface irrigation*. Transactions of the ASAE. 14(4): 801-805. 1971.
- HALL, W.A. *Estimating irrigation border flow*. Agricultural Engineering. 37(4): 263-65. 1956.
- HANSEN, V.E. *New concepts in irrigation efficiency*. Transactions of the ASAE. 3(4): 55-57. 1960.
- HART, W.E; BASSET, D.L. & STRELKOFF,T. *Surface irrigation hydraulics-kinematics*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, 94(IR4): 419-440. 1968.
- HOLZAPFEL, E. A.; MARIÑO, M. A. & MORALES, J. C. *Comparison and selection of furrow irrigation models*. Agricultural Water Management. 9: 105-125. 1984.
- ISRAELSEN, O. W. & HANSEN, V. E. *Principios y aplicaciones del riego*. Barcelona, Reverté, 2. Ed. 396p. 1965.

- JENSEN, M.E. *Evaluating irrigation efficiency*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE, 93 (IR1): 83-98. 1967.
- KRUSE, E. G.; HUNTLEY, C. W. & ROBINSON, A. R. *Flow resistance in simulated irrigation borders and furrows*. Agricultural Research Service – USDA. Conservation Research Report n.3. Colorado. 56p. 1965.
- LEVIEN, S. L. A. *Desenvolvimento de um modelo matemático simplificado da irrigação por sulcos abertos em declive*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 91p. 1985.
- LEVIEN, S. L. A. & SOUZA, F. *Algebraic computation of flow in furrow irrigation*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 113(3): 367-377. 1987.
- LEWIS, M. R. & MILNE, W. E. *Analysis of border irrigation*. Agricultural Engineering. 19: 267-268. 1938.
- MERRIAM, J. L.; KELLER, J. & ALFARO, J. *Irrigation system evaluation and improvement*. Utah State University, Logan, Utah. 164p. 1973.
- NOGUEIRA, F. C. *Determinação da eficiência de aplicação de água em sulcos nos perímetros irrigados do Estado da Paraíba*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 79p. 1976.
- OLITTA, A. F. L. *Os métodos de irrigação*. São Paulo, Nobel, 267p. 1984.
- PHILIP, J. R. & FARRELL, D. A. *General solution of the infiltration – advance problem in irrigation hydraulics*. Journal of Geophysical Research. 69(4): 621-631. 1964.
- PINTO, D. S. *Efeito da vazão e da declividade sobre as perdas de água e sobre a eficiência de aplicação na irrigação por sulco*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 73p. 1980.

- PORDEUS, R. V. *Estudo de parâmetros para avaliação de irrigação por sulcos abertos em declive utilizando um modelo algébrico*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 151p. 1990.
- RAMSEY, M. K. – *Intake characteristics and flow resistance in irrigation furrows*. Master Master Dissertation of Science. University of Arizona, Tucson, USA. 141p. 1976.
- REZENDE, F. C. & SCALOPPI, E. J. *Avaliação de métodos para determinação das características de infiltração em sulcos*. *Pesq. Agrop. Bras.* 20(2): 227-33. 1985.
- SAKKAS, J. G. & STRELKOFF, T. *Hydrodynamics of surface irrigation – advance phase*. *Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE*, 100(IR1): 31-48. 1974.
- SCALOPPI, E. J. *A method for evaluating infiltration parameters in surface irrigation*. In: *Congress on Irrigation and Drainage 12*. Fort Collins, Colorado. Proceedings ... New Delhi, India, International Commission on Irrigation and Drainage. p.369-78. 1984.
- SCALOPPI, E. J. *Eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão*. In: *Irrigação e Tecnologia Moderna*. ABID, n.16, Brasília. 1984.
- SCALOPPI, E. J. *Sistemas de irrigação por superfície*. *Informe Agropecuário*. Belo Horizonte, 139(12): 12-26. 1986.
- SINGH, P. & CHAUHAN, H. S. *Determination of water intake rate from rate of advance*. *Transactions of the ASAE*. 16 (6): 1081-4. 1973.
- SILVA, M. A. *Caracterização de um sistema de irrigação com sulcos fechados num regosol*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. 93p. 1987.
- SOMERHALDER, B. R. *Comparing efficiencies in irrigation water application*. *Agricultural Engineering*. St. Joseph, 39(3): 156-159. 1958.

- SOUZA, F. de. *Nonlinear hydrodynamic model of furrow irrigation*. Dissertation of Doctor of Philosophy. University of California, Davis, USA. 172p. 1981.
- SOUZA, F. de. *Hidráulica da irrigação por superfície*. Apostila, Fortaleza. 54p. 1983.
- SOUZA, F. de. *Modelo matemático da irrigação por sulcos*. Pesquisa Agropecuária Brasileira. Brasília. 19(9): 1135-1143. 1984.
- STRELKOFF, T. & KATOPODES, N. *Border irrigation hydraulics with zero inertia*. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 103(IR3): 325-342. 1977.
- STRELKOFF, T. & SOUZA, F. *Modeling effect of depth on furrow infiltration*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 110(4): 375-387. 1984.
- WALKER, W. R. & HUMPHERYS, A. *Kinematic-wave furrow irrigation model*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 109(4): 377-392. 1983.
- WALKER, W. R. & SKOGERBOE, G. V. *Surface Irrigation. Theory and practice*, – the volume balance model, chapter 16, Utah State University. Prentice – Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey. 386p. 1987.
- WILLARDSON, L. S. & BISHOP, A. A. *Analysis of surface irrigation application efficiency*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE. 93 (IR2): 21-36. 1967.
- WU, I. P. *Recession flow in surface irrigation*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASCE. 98(IR1): 77-90. 1972.
- WU, I. P. & LIANG, T. *Optimal design of furrow length of surface irrigation*. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 96 (IR3): 319-332. 1970.

**ANEXO A:
NOTAÇÕES**

**PARÂMETROS USADOS NO DESENVOLVIMENTO DO MODELO
(APÓS LEVIEN, 1985)**

- α = Expoente da equação de infiltração de Kostiakov;
- A_o = Área da seção transversal de fluxo na entrada do sulco;
- \bar{A}_y = Área média de seção transversal do sulco;
- $A(y_n)$ = Área da seção transversal de fluxo, função de y_n
- A_z = Volume infiltrado por unidade de comprimento do sulco;
- \bar{A}_z = Área média infiltrada;
- A_{z_o} = Área infiltrada acumulada;
- A_{z_r} = Área infiltrada requerida;
- B = Largura da superfície livre da água no sulco;
- $B(y_o)$ = Largura da superfície livre da água, função de y_o ;
- $B(y_1)$ = Largura da superfície livre da água, função de y_1 ;
- C = Coeficiente da equação da largura da superfície livre da água do sulco;
- C_u = Coeficiente dependente do sistema de unidades usado;
- E = Espaçamento entre sulcos;
- E_a = Eficiência de aplicação da água;
- E_s = Eficiência de armazenamento;
- G = Constante;
- \bar{I} = Taxa de infiltração média do sulco;
- $I(t_r)$ = Taxa de infiltração, função de t_r ;
- $I(t_r - t_{av})$ = Taxa de infiltração, função de $(t_r - t_{av})$
- $I(\tau)$ = Taxa de infiltração, função de τ ;
- α = Expoente da equação de infiltração de Kostiakov;
- ℓ = Porção inundada do sulco;
- L = Comprimento do sulco;
- M = Expoente da equação da superfície livre da água;
- n = Coeficiente de manning;

- P_m = Perímetro molhado;
 Q = Vazão;
 Q_o = Vazão de entrada do sulco;
 Q_{inf} = Vazão infiltrada do sulco;
 Q_i = Vazão no final do sulco;
 $Q_i(t_r)$ = Vazão no final do sulco, função de t_r ;
 r_y = Fator de forma do perfil superficial;
 r_z = Fator de forma do perfil subsuperficial;
 S_o = Declividade do sulco;
 S_y = Declividade da superfície da água;
 t_{av} = Tempo de avanço da água no sulco;
 t_{co} = Tempo de aplicação de água no sulco;
 t_e = Tempo no qual a irrigação termina;
 t_r = Tempo no qual a recessão começa;
 V = Volume;
 V_o = Volume aplicado ao sulco;
 V_{ro} = Volume escoado superficialmente;
 V_u = Volume útil;
 V_z = Volume infiltrado no solo;
 V_y = Volume armazenado na superfície do solo;
 $V_{ro}(t)$ = Volume de escoamento superficial no tempo t ;
 $V_{ro}(t_r)$ = Volume de escoamento superficial em t_r ;
 $V_{ro}(t_e)$ = Volume total de escoamento superficial no tempo t_e ;
 $V_y(t_r)$ = Volume superficial no tempo t_r ;
 $V_z(t_r)$ = Volume infiltrado no tempo t_r ;
 X_o = Distância de avanço da água durante o intervalo de tempo t ;
 Y_o = Lâmina d'água na cabeceira do sulco;
 Y_i = Lâmina d'água no final do sulco;
 $Y_i(t_r)$ = Lâmina d'água no final do sulco, função de t_r ;
 $Y_n(\partial)$ = Lâmina normal, função de ∂ ;
 $Y_n(\partial_1)$ = Lâmina normal, função de ∂_1 ;

- Z_r = Lâmina infiltrada requerida;
- $Z(t)$ = Lâmina infiltrada acumulada, função de t ;
- $Z(t_r)$ = Lâmina infiltrada acumulada, função de t_r ;
- $Z(t_r - t_{av})$ = Lâmina infiltrada acumulada, função de $(t_r - t_{av})$;
- ζ = Variável adimensional;
- τ = Tempo de infiltração

ANEXO B

TABELAS

Tabela B-01 – Distâncias de avanço simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, através de dados observados de RAMSEY.

| AVANÇO (min) | DISTÂNCIAS SIMULADAS (m) | | | | |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1,00 | 9,71 | 9,07 | 11,32 | 11,43 | 9,61 |
| 2,00 | 17,66 | 16,51 | 20,75 | 20,56 | 17,56 |
| 3,00 | 24,77 | 23,16 | 29,24 | 28,61 | 24,70 |
| 4,00 | 31,32 | 29,28 | 37,11 | 35,97 | 31,30 |
| 5,00 | 37,44 | 35,01 | 44,49 | 42,81 | 37,48 |
| 6,00 | 43,22 | 40,42 | 51,48 | 49,23 | 43,34 |
| 7,00 | 48,72 | 45,56 | 58,16 | 55,32 | 48,92 |
| 8,00 | 53,98 | 50,49 | 64,56 | 61,13 | 54,26 |
| 9,00 | 59,04 | 55,22 | 70,73 | 66,70 | 59,41 |
| 10,00 | 63,92 | 59,79 | 76,68 | 72,05 | 64,37 |
| 11,00 | 68,64 | 64,21 | 82,45 | 77,22 | 69,18 |
| 12,00 | 73,21 | 68,49 | 88,06 | 82,22 | 73,85 |
| 13,00 | 77,65 | 72,65 | 93,51 | 87,07 | 78,38 |
| 14,00 | 81,98 | 76,70 | 98,82 | 91,78 | 82,80 |
| 15,00 | 86,20 | 80,65 | 104,00 | 96,37 | 87,11 |
| 16,00 | 90,31 | 84,50 | | 100,84 | 91,32 |
| 17,00 | 94,34 | 88,27 | | | 95,44 |
| 18,00 | 98,27 | 91,96 | | | 99,47 |
| 19,00 | 102,13 | 95,57 | | | 103,43 |
| 20,00 | | 99,11 | | | |

Tabela B-02 – Distâncias de avanço simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, através de dados observados de HORTICULTURE.

| AVANÇO (min) | DISTÂNCIAS SIMULADAS (m) | | | | |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | (r _{y1} r _{z1}) | (r _{y2} r _{z2}) | (r _{y3} r _{z3}) | (r _{y4} r _{z4}) | (r _{y5} r _{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3,00 | 25,78 | 24,11 | 29,40 | 29,12 | 23,93 |
| 6,00 | 42,17 | 39,46 | 48,75 | 47,04 | 39,40 |
| 9,00 | 55,31 | 51,76 | 64,45 | 61,26 | 51,78 |
| 12,00 | 66,57 | 62,32 | 77,99 | 73,40 | 62,59 |
| 15,00 | 76,57 | 71,69 | 90,07 | 84,13 | 72,13 |
| 18,00 | 85,64 | 80,19 | 101,05 | 93,84 | 80,79 |
| 21,00 | 93,99 | 88,01 | 111,19 | 102,76 | 88,78 |
| 24,00 | 101,77 | 95,30 | 120,64 | 111,05 | 96,21 |
| 27,00 | 109,06 | 102,13 | 129,53 | 118,83 | 103,20 |
| 30,00 | 115,95 | 108,59 | 137,93 | 126,16 | 109,80 |
| 33,00 | 122,49 | 114,72 | 145,92 | 133,12 | 116,07 |
| 36,00 | 128,74 | 120,57 | 153,55 | 139,76 | 122,06 |
| 39,00 | 134,71 | 126,17 | 160,86 | 146,11 | 127,79 |
| 42,00 | 140,45 | 131,56 | 167,88 | 152,21 | 133,30 |
| 45,00 | 145,98 | 136,74 | 174,65 | 158,07 | 138,60 |
| 48,00 | 151,32 | 141,74 | | 163,74 | 143,73 |
| 51,00 | 156,48 | 146,58 | | 169,22 | 148,69 |
| 54,00 | 161,49 | 151,27 | | 174,52 | 153,49 |
| 57,00 | 166,35 | 155,83 | | | 158,16 |
| 60,00 | 171,07 | 160,25 | | | 162,70 |
| 63,00 | 175,67 | 164,57 | | | 167,12 |
| 66,00 | | 168,77 | | | 171,42 |
| 69,00 | | 172,87 | | | 175,63 |
| 72,00 | | 176,88 | | | |

Tabela B-03 – Distâncias de avanço simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, através de dados observados de STIEBEN.

| AVANÇO (min) | DISTÂNCIAS SIMULADAS (m) | | | | |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5,00 | 25,62 | 23,91 | 29,90 | 28,47 | 22,10 |
| 10,00 | 50,76 | 47,38 | 59,37 | 56,42 | 43,82 |
| 15,00 | 75,46 | 70,44 | 88,48 | 83,90 | 65,18 |
| 20,00 | 99,77 | 93,14 | 117,24 | 110,95 | 86,23 |
| 25,00 | 123,71 | 115,49 | 145,67 | 137,60 | 106,97 |
| 30,00 | 147,30 | 137,51 | 173,79 | 163,86 | 127,43 |
| 35,00 | 170,55 | 159,22 | 201,61 | 189,75 | 147,61 |
| 40,00 | 193,47 | 180,62 | 229,13 | 215,28 | 167,53 |
| 45,00 | 216,08 | 201,74 | 256,38 | 240,48 | 187,19 |
| 50,00 | 238,39 | 222,58 | 283,35 | 265,35 | 206,61 |
| 55,00 | 260,41 | 243,14 | 310,06 | 289,90 | 225,79 |
| 60,00 | 282,14 | 263,44 | 336,51 | 314,14 | 244,74 |
| 65,00 | 303,61 | 283,49 | 362,70 | 338,09 | 263,47 |
| 70,00 | 324,81 | 303,29 | | 361,74 | 281,98 |
| 75,00 | 345,75 | 322,86 | | | 300,27 |
| 80,00 | 366,44 | 342,19 | | | 318,36 |
| 85,00 | | 361,29 | | | 336,25 |
| 90,00 | | | | | 353,95 |

Tabela B-04 – Distâncias de avanço simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados, através de dados observados de BENSON.

| AVANÇO (min) | DISTÂNCIAS SIMULADAS (m) | | | | |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 8,00 | 28,00 | 26,15 | 32,07 | 33,50 | 27,72 |
| 16,00 | 53,60 | 50,06 | 61,57 | 63,63 | 53,20 |
| 24,00 | 77,92 | 72,78 | 89,67 | 92,01 | 77,47 |
| 32,00 | 101,31 | 94,64 | 116,76 | 119,14 | 100,87 |
| 40,00 | 123,96 | 115,81 | 143,05 | 145,28 | 123,56 |
| 48,00 | 146,00 | 136,41 | 168,66 | 170,62 | 145,67 |
| 56,00 | 167,51 | 156,52 | 193,69 | 195,26 | 167,27 |
| 64,00 | 188,55 | 176,19 | 218,21 | 219,30 | 188,43 |
| 72,00 | 209,18 | 195,48 | 242,27 | 242,80 | 209,19 |
| 80,00 | 229,44 | 214,42 | 265,92 | 265,81 | 229,60 |
| 88,00 | 249,36 | 233,04 | 289,19 | 288,39 | 249,67 |
| 96,00 | 268,96 | 251,36 | 312,11 | 310,57 | 269,45 |
| 104,00 | 288,27 | 269,42 | 334,71 | 332,38 | 288,94 |
| 112,00 | 307,31 | 287,23 | 357,00 | 353,84 | 308,17 |
| 120,00 | 326,10 | 304,80 | 379,02 | 374,99 | 327,16 |
| 128,00 | 344,66 | 322,15 | 400,77 | 395,83 | 345,92 |
| 136,00 | 362,98 | 339,29 | 422,27 | 416,40 | 364,46 |
| 144,00 | 381,10 | 356,23 | 443,53 | 436,69 | 382,80 |
| 160,00 | 416,75 | 389,57 | 485,39 | 476,55 | 418,90 |
| 168,00 | 434,29 | 405,98 | 506,01 | 496,14 | 436,68 |
| 176,00 | 451,66 | 422,23 | 526,44 | 515,51 | 454,30 |
| 184,00 | 468,87 | 438,32 | 546,68 | 534,67 | 471,75 |
| 192,00 | 485,92 | 454,27 | 566,74 | 553,64 | 489,05 |
| 200,00 | 502,81 | 470,07 | 586,63 | 572,42 | 506,20 |
| 208,00 | 519,56 | 485,74 | 606,36 | 591,02 | 523,20 |
| 216,00 | 536,17 | 501,27 | 625,92 | 609,44 | 540,07 |
| 224,00 | 552,64 | 516,68 | | 627,70 | 556,81 |
| 232,00 | 568,98 | 531,96 | | | 573,41 |
| 240,00 | 585,19 | 547,13 | | | 589,90 |
| 248,00 | 601,29 | 562,18 | | | 606,26 |
| 256,00 | 617,26 | 577,13 | | | 622,51 |
| 264,00 | 633,12 | 591,96 | | | |
| 272,00 | | 606,69 | | | |
| 280,00 | | 621,32 | | | |

Tabela B-05 – Dados de avanço e recessão de RAMSEY.

| DISTÂNCIA (m) | AVANÇO (min) | RECESSÃO (min) |
|---------------|--------------|----------------|
| 0,00 | 0,00 | 215,0 |
| 9,09 | 1,05 | 225,0 |
| 18,18 | 2,35 | 230,0 |
| 27,27 | 3,60 | 230,0 |
| 36,36 | 5,00 | 230,0 |
| 45,45 | 6,50 | 231,0 |
| 54,54 | 8,05 | 232,0 |
| 63,64 | 9,65 | 233,0 |
| 72,73 | 11,55 | 234,0 |
| 81,82 | 13,60 | 233,0 |
| 90,91 | 15,65 | 233,0 |
| 100,00 | 17,95 | 234,0 |

Tabela B-06 – Dados de avanço e recessão de HORTICULTURE.

| DISTÂNCIA (m) | AVANÇO (min) | RECESSÃO (min) |
|---------------|--------------|----------------|
| 0,0 | 0,0 | 202,0 |
| 25,0 | 4,7 | 209,0 |
| 50,0 | 10,2 | 212,3 |
| 75,0 | 17,3 | 215,0 |
| 100,0 | 26,2 | 216,5 |
| 125,0 | 38,0 | 219,0 |
| 150,0 | 50,4 | 221,0 |
| 175,0 | 61,5 | 222,0 |

Tabela B-07 – Dados de avanço e recessão de STIEBEN FARM.

| DISTÂNCIA (m) | AVANÇO (min) | RECESSÃO (min) |
|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 0,0 | 0,0 | 698,0 |
| 25,0 | 5,0 | 703,0 |
| 50,0 | 10,0 | 705,0 |
| 75,0 | 16,0 | 708,0 |
| 100,0 | 21,0 | 712,0 |
| 125,0 | 27,0 | 716,0 |
| 150,0 | 33,0 | 718,0 |
| 175,0 | 40,0 | 720,5 |
| 200,0 | 48,0 | 722,5 |
| 225,0 | 55,0 | 723,5 |
| 250,0 | 61,0 | 724,5 |
| 275,0 | 70,0 | 725,5 |
| 300,0 | 77,0 | 727,0 |
| 325,0 | 85,0 | 729,0 |
| 350,0 | 94,0 | 731,0 |

Tabela B-08 – Dados de avanço e recessão de BENSON FARM.

| DISTÂNCIA (m) | AVANÇO (min) | RECESSÃO (min) |
|---------------|--------------|----------------|
| 0,0 | 0,0 | 698,6 |
| 25,0 | 9,0 | 0,0 |
| 50,0 | 18,3 | 707,0 |
| 75,0 | 27,6 | 0,0 |
| 100,0 | 36,3 | 713,0 |
| 125,0 | 45,0 | 0,0 |
| 150,0 | 53,3 | 717,8 |
| 175,0 | 62,6 | 0,0 |
| 200,0 | 73,5 | 722,5 |
| 225,0 | 83,2 | 0,0 |
| 250,0 | 93,3 | 725,5 |
| 275,0 | 103,7 | 0,0 |
| 300,0 | 115,0 | 728,5 |
| 325,0 | 125,4 | 0,0 |
| 350,0 | 135,3 | 732,0 |
| 375,0 | 144,0 | 0,0 |
| 400,0 | 153,3 | 734,5 |
| 425,0 | 162,0 | 0,0 |
| 450,0 | 171,1 | 737,0 |
| 475,0 | 179,3 | 0,0 |
| 500,0 | 188,8 | 739,9 |
| 525,0 | 199,2 | 0,0 |
| 550,0 | 208,5 | 741,3 |
| 575,0 | 218,4 | 0,0 |
| 600,0 | 229,3 | 744,5 |
| 625,0 | 243,5 | 746,6 |

Tabela B-09 – Comparação dos tempos de avanço simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados e os de campo com dados de RAMSEY, estimados pelo método dos Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes.

| DISTÂNCIA (m) | ESTIMATIVAS DOS TEMPOS DE AVANÇO (min) | | | | | |
|---------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (campo) | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 9,09 | 1,02 | 0,86 | 0,93 | 0,73 | 0,70 | 0,87 |
| 18,18 | 2,29 | 2,07 | 2,25 | 1,71 | 1,71 | 2,08 |
| 27,27 | 3,69 | 3,45 | 3,76 | 2,81 | 2,88 | 2,08 |
| 36,36 | 5,17 | 4,97 | 5,41 | 4,00 | 4,17 | 4,96 |
| 45,45 | 6,72 | 6,59 | 7,18 | 5,26 | 5,56 | 6,56 |
| 54,54 | 8,32 | 8,30 | 9,05 | 6,59 | 7,03 | 8,24 |
| 63,64 | 9,97 | 10,08 | 11,00 | 7,96 | 8,57 | 9,99 |
| 72,73 | 11,66 | 11,94 | 13,03 | 9,38 | 10,17 | 11,81 |
| 81,82 | 13,39 | 13,86 | 15,13 | 10,84 | 11,83 | 13,69 |
| 90,91 | 15,15 | 15,83 | 17,29 | 12,34 | 13,54 | 15,62 |
| 100,00 | 16,94 | 17,86 | 19,51 | 13,88 | 15,31 | 17,60 |

Tabela B-10 – Comparação dos tempos de avanço simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados e os de campo com dados de HORTICULTURE, estimados pelo método dos Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes.

| DISTÂNCIA (m) | ESTIMATIVAS DOS TEMPOS DE AVANÇO (min) | | | | | |
|---------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (campo) | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 25,00 | 4,30 | 2,57 | 2,82 | 2,17 | 2,14 | 2,86 |
| 50,00 | 10,91 | 7,88 | 8,74 | 6,30 | 6,66 | 8,72 |
| 75,00 | 18,81 | 15,17 | 16,92 | 11,75 | 12,95 | 16,74 |
| 100,00 | 27,69 | 24,16 | 27,05 | 18,29 | 20,75 | 26,57 |
| 125,00 | 37,36 | 34,66 | 38,91 | 25,78 | 29,91 | 38,02 |
| 150,00 | 47,73 | 46,54 | 52,38 | 34,13 | 40,34 | 50,96 |
| 175,00 | 58,71 | 59,72 | 67,35 | 43,26 | 51,94 | 65,29 |

Tabela B-11 – Comparação dos tempos de avanço simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados e os de campo com dados de STIEBEN, estimados pelo método dos Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes.

| DISTÂNCIA (m) | ESTIMATIVAS DOS TEMPOS DE AVANÇO (min) | | | | | |
|------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (campo) | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 25,00 | 4,66 | 4,76 | 5,11 | 4,11 | 4,29 | 5,54 |
| 50,00 | 10,14 | 9,82 | 10,55 | 8,38 | 8,32 | 11,44 |
| 75,00 | 15,97 | 15,00 | 16,12 | 12,72 | 13,44 | 17,47 |
| 100,00 | 22,04 | 20,26 | 21,78 | 17,10 | 18,13 | 23,59 |
| 125,00 | 28,30 | 25,58 | 27,50 | 21,51 | 22,86 | 29,79 |
| 150,00 | 34,71 | 30,94 | 33,28 | 25,95 | 27,63 | 36,04 |
| 175,00 | 41,25 | 36,35 | 39,10 | 30,41 | 32,43 | 42,33 |
| 200,00 | 47,91 | 41,79 | 44,97 | 34,89 | 37,26 | 48,67 |
| 225,00 | 54,67 | 47,26 | 50,86 | 39,38 | 42,12 | 55,05 |
| 250,00 | 61,52 | 52,75 | 56,79 | 43,89 | 46,99 | 61,45 |
| 275,00 | 68,45 | 58,27 | 62,74 | 48,41 | 51,89 | 67,88 |
| 300,00 | 75,46 | 63,82 | 68,72 | 52,94 | 56,80 | 74,35 |
| 325,00 | 82,54 | 69,38 | 74,72 | 57,48 | 61,73 | 80,83 |
| 350,00 | 89,69 | 74,96 | 80,74 | 62,03 | 66,68 | 87,34 |

Tabela B-12 – Comparação dos tempos de avanço simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN com fatores de forma variados e os de campo com dados de BENSON FARM, estimados pelo método dos Mínimos Quadrados, nas estações de medição correspondentes.

| DISTÂNCIA (m) | ESTIMATIVAS DOS TEMPOS DE AVANÇO (min) | | | | | |
|---------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | (campo) | (r_{y1} r_{z1}) | (r_{y2} r_{z2}) | (r_{y3} r_{z3}) | (r_{y4} r_{z4}) | (r_{y5} r_{z5}) |
| 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 25,00 | 8,84 | 6,63 | 7,14 | 5,78 | 5,40 | 6,74 |
| 50,00 | 17,99 | 14,53 | 15,66 | 12,54 | 11,97 | 14,68 |
| 75,00 | 27,26 | 23,00 | 24,81 | 19,74 | 19,07 | 23,16 |
| 100,00 | 36,60 | 31,85 | 34,38 | 27,22 | 26,53 | 32,01 |
| 125,00 | 46,01 | 41,01 | 44,28 | 34,93 | 34,27 | 41,14 |
| 150,00 | 55,46 | 50,42 | 54,46 | 42,83 | 42,25 | 50,49 |
| 175,00 | 64,95 | 60,04 | 64,86 | 50,88 | 50,43 | 60,05 |
| 200,00 | 74,47 | 69,84 | 75,47 | 59,07 | 58,78 | 69,77 |
| 225,00 | 84,02 | 79,80 | 86,25 | 67,38 | 67,29 | 79,65 |
| 250,00 | 93,60 | 89,92 | 97,20 | 75,80 | 75,94 | 89,67 |
| 275,00 | 103,20 | 100,17 | 108,30 | 84,33 | 84,72 | 99,81 |
| 300,00 | 112,83 | 110,54 | 119,54 | 92,94 | 93,62 | 110,07 |
| 325,00 | 122,47 | 121,03 | 130,90 | 101,64 | 102,63 | 120,43 |
| 350,00 | 132,13 | 131,63 | 142,37 | 110,41 | 111,74 | 130,90 |
| 375,00 | 141,81 | 142,33 | 153,96 | 119,27 | 120,95 | 141,45 |
| 400,00 | 151,51 | 153,12 | 165,66 | 128,19 | 130,25 | 152,10 |
| 425,00 | 161,22 | 164,00 | 177,45 | 137,18 | 139,63 | 162,83 |
| 450,00 | 170,94 | 174,97 | 189,34 | 146,22 | 149,10 | 173,63 |
| 475,00 | 180,68 | 186,02 | 201,31 | 155,33 | 158,65 | 184,51 |
| 500,00 | 190,43 | 197,14 | 213,37 | 164,50 | 168,27 | 195,47 |
| 525,00 | 200,19 | 208,35 | 225,51 | 173,72 | 177,96 | 206,49 |
| 550,00 | 209,96 | 219,62 | 237,73 | 182,99 | 187,72 | 217,58 |
| 575,00 | 219,75 | 230,96 | 250,03 | 192,31 | 197,55 | 228,72 |
| 600,00 | 229,54 | 242,36 | 262,39 | 201,68 | 207,44 | 239,93 |
| 625,00 | 239,35 | 253,83 | 274,83 | 211,10 | 217,39 | 251,20 |

Tabela B-13 – Avanço e recessão com fatores de forma (r_{y5} r_{z5}), simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (R_C) de RAMSEY.

| DISTÂNCIA (m) | TEMPO DE RECESSÃO (min) | | | |
|---------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | (R_C) | (R_1) | (R_2) | (R_3) |
| 0,00 | 215,00 | 212,56 | 212,56 | 208,00 |
| 9,61 | 225,28 | 213,55 | 212,56 | 208,00 |
| 17,56 | 229,66 | 214,42 | 212,56 | 208,00 |
| 24,70 | 230,00 | 215,24 | 212,56 | 208,00 |
| 31,30 | 230,00 | 216,04 | 212,56 | 208,00 |
| 37,48 | 230,12 | 216,84 | 212,56 | 208,00 |
| 43,34 | 230,76 | 217,63 | 212,56 | 208,00 |
| 48,92 | 231,38 | 218,44 | 212,56 | 208,00 |
| 54,26 | 231,97 | 219,25 | 212,56 | 208,00 |
| 59,41 | 232,53 | 220,09 | 212,56 | 208,00 |
| 64,37 | 233,08 | 220,96 | 212,56 | 208,00 |
| 69,18 | 233,61 | 221,86 | 212,56 | 208,00 |
| 73,85 | 233,88 | 222,81 | 212,56 | 208,00 |
| 78,38 | 233,38 | 223,83 | 212,56 | 208,00 |
| 82,80 | 233,00 | 224,92 | 212,56 | 208,00 |
| 87,11 | 233,00 | 226,13 | 212,56 | 208,00 |
| 91,32 | 233,04 | 227,51 | 212,56 | 208,00 |
| 95,44 | 233,50 | 229,17 | 212,56 | 208,00 |
| 99,47 | 233,94 | 231,47 | 212,56 | 208,00 |
| 103,43 | 234,00 | 231,91 | 212,56 | 208,00 |

Tabela B-14 – Avanço de recessão com fatores de forma (r_{y5} r_{z5}), simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (R_C) de HORTICULTURE.

| DISTÂNCIA (m) | TEMPO DE RECESSÃO (min) | | | |
|---------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | (R_C) | (R_1) | (R_2) | (R_3) |
| 0,00 | 202,00 | 208,81 | 208,81 | 202,00 |
| 23,93 | 208,70 | 210,35 | 208,81 | 202,00 |
| 39,40 | 210,90 | 211,41 | 208,81 | 202,00 |
| 51,87 | 212,50 | 212,30 | 208,81 | 202,00 |
| 62,59 | 213,66 | 213,10 | 208,81 | 202,00 |
| 72,13 | 214,69 | 213,84 | 208,81 | 202,00 |
| 80,79 | 215,35 | 214,54 | 208,81 | 202,00 |
| 88,78 | 215,83 | 215,21 | 208,81 | 202,00 |
| 96,21 | 216,27 | 215,86 | 208,81 | 202,00 |
| 103,20 | 216,82 | 216,49 | 208,81 | 202,00 |
| 109,80 | 217,48 | 217,11 | 208,81 | 202,00 |
| 116,07 | 218,11 | 217,71 | 208,81 | 202,00 |
| 122,06 | 218,71 | 218,32 | 208,81 | 202,00 |
| 127,79 | 219,22 | 218,92 | 208,81 | 202,00 |
| 133,30 | 219,66 | 219,52 | 208,81 | 202,00 |
| 138,60 | 220,09 | 220,13 | 208,81 | 202,00 |
| 143,73 | 220,50 | 220,74 | 208,81 | 202,00 |
| 148,69 | 220,90 | 221,36 | 208,81 | 202,00 |
| 153,49 | 221,14 | 222,00 | 208,81 | 202,00 |
| 158,16 | 221,33 | 222,65 | 208,81 | 202,00 |
| 162,70 | 221,50 | 223,33 | 208,81 | 202,00 |
| 167,12 | 221,68 | 224,04 | 208,81 | 202,00 |
| 171,42 | 221,86 | 224,79 | 208,81 | 202,00 |
| 175,63 | 222,00 | 225,51 | 208,81 | 202,00 |

Tabela B-15 – Avanço e recessão com fatores de forma (r_{y5} r_{z5}), simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (R_C) de STIEBEN.

| DISTÂNCIA (m) | TEMPO DE RECESSÃO (min) | | | |
|---------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | (R_C) | (R_1) | (R_2) | (R_3) |
| 0,00 | 698,00 | 733,91 | 733,91 | 696,00 |
| 22,10 | 702,42 | 739,56 | 733,91 | 696,00 |
| 43,82 | 704,50 | 745,34 | 733,91 | 696,00 |
| 65,18 | 706,82 | 751,27 | 733,91 | 696,00 |
| 86,23 | 709,80 | 757,38 | 733,91 | 696,00 |
| 106,97 | 713,11 | 763,69 | 733,91 | 696,00 |
| 127,43 | 716,20 | 770,24 | 733,91 | 696,00 |
| 147,61 | 717,81 | 777,05 | 733,91 | 696,00 |
| 167,53 | 719,75 | 784,17 | 733,91 | 696,00 |
| 187,19 | 721,47 | 791,66 | 733,91 | 696,00 |
| 206,61 | 722,76 | 799,59 | 733,91 | 696,00 |
| 225,79 | 723,53 | 808,03 | 733,91 | 696,00 |
| 244,74 | 724,29 | 817,12 | 733,91 | 696,00 |
| 263,47 | 725,04 | 827,03 | 733,91 | 696,00 |
| 281,98 | 725,92 | 838,02 | 733,91 | 696,00 |
| 300,27 | 727,02 | 850,53 | 733,91 | 696,00 |
| 318,36 | 728,47 | 865,36 | 733,91 | 696,00 |
| 336,25 | 730,00 | 884,49 | 733,91 | 696,00 |
| 353,95 | 731,00 | 907,74 | 733,91 | 696,00 |

Tabela B-16 – Avanço e recessão com fatores de forma (r_{y5} r_{z5}), simulados pelo modelo algébrico de LEVIEN, com dados ajustados (R_c) de BENSON.

| DISTÂNCIA (m) | TEMPO DE RECESSÃO (min) | | | |
|---------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | (R_c) | (R_1) | (R_2) | (R_3) |
| 0,00 | 698,60 | 789,05 | 789,05 | 698,00 |
| 27,72 | 703,26 | 797,83 | 789,05 | 698,00 |
| 53,20 | 707,38 | 806,12 | 789,05 | 698,00 |
| 77,47 | 710,30 | 814,21 | 789,05 | 698,00 |
| 100,87 | 713,08 | 822,21 | 789,05 | 698,00 |
| 123,56 | 715,26 | 830,17 | 789,05 | 698,00 |
| 145,67 | 717,38 | 838,13 | 789,05 | 698,00 |
| 167,27 | 719,42 | 846,10 | 789,05 | 698,00 |
| 188,43 | 721,41 | 854,13 | 789,05 | 698,00 |
| 209,19 | 723,05 | 862,22 | 789,05 | 698,00 |
| 229,60 | 724,28 | 870,39 | 789,05 | 698,00 |
| 249,67 | 725,48 | 878,67 | 789,05 | 698,00 |
| 269,45 | 726,67 | 887,07 | 789,05 | 698,00 |
| 288,94 | 727,84 | 895,60 | 789,05 | 698,00 |
| 308,17 | 729,07 | 904,30 | 789,05 | 698,00 |
| 327,16 | 730,40 | 913,16 | 789,05 | 698,00 |
| 345,92 | 731,71 | 922,23 | 789,05 | 698,00 |
| 364,46 | 732,72 | 931,52 | 789,05 | 698,00 |
| 382,80 | 733,64 | 941,06 | 789,05 | 698,00 |
| 400,94 | 734,55 | 950,88 | 789,05 | 698,00 |
| 418,90 | 735,44 | 961,02 | 789,05 | 698,00 |
| 436,68 | 736,33 | 971,52 | 789,05 | 698,00 |
| 454,30 | 737,25 | 982,43 | 789,05 | 698,00 |
| 471,75 | 738,26 | 993,80 | 789,05 | 698,00 |
| 489,05 | 739,26 | 1.005,72 | 789,05 | 698,00 |
| 506,20 | 740,07 | 1.018,28 | 789,05 | 698,00 |
| 523,20 | 740,55 | 1.031,60 | 789,05 | 698,00 |
| 540,07 | 741,02 | 1.045,85 | 789,05 | 698,00 |
| 556,81 | 741,73 | 1.061,27 | 789,05 | 698,00 |
| 573,41 | 742,80 | 1.078,20 | 789,05 | 698,00 |
| 589,90 | 743,85 | 1.097,21 | 789,05 | 698,00 |
| 606,26 | 745,02 | 1.119,43 | 789,05 | 698,00 |
| 622,51 | 746,40 | 1.147,90 | 789,05 | 698,00 |

Tabela B-17 – Lâminas infiltradas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Z_c) de RAMSEY.

| DISTÂNCIA | LÂMINA INFILTRADA (mm) | | | | |
|-----------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | (m) | (Z_c) | (Z_1) | (Z_2) | (Z_3) |
| 0,00 | 38,62 | 38,40 | 38,40 | 38,40 | 37,90 |
| 9,61 | 39,44 | 38,40 | 38,40 | 38,30 | 37,80 |
| 17,56 | 39,74 | 38,30 | 38,30 | 38,20 | 37,80 |
| 24,70 | 39,68 | 38,30 | 38,30 | 38,10 | 37,70 |
| 31,30 | 39,59 | 38,30 | 38,30 | 38,00 | 37,60 |
| 37,48 | 39,52 | 38,30 | 38,30 | 37,90 | 37,50 |
| 43,34 | 39,49 | 38,30 | 38,30 | 37,80 | 37,40 |
| 48,92 | 39,45 | 38,30 | 38,30 | 37,70 | 37,30 |
| 54,26 | 39,42 | 38,20 | 38,20 | 37,60 | 37,20 |
| 59,41 | 39,38 | 38,20 | 38,20 | 37,50 | 37,10 |
| 64,37 | 39,34 | 38,20 | 38,20 | 37,40 | 37,00 |
| 69,18 | 39,30 | 38,20 | 38,20 | 37,30 | 36,90 |
| 73,85 | 39,23 | 38,20 | 38,20 | 37,30 | 36,80 |
| 78,38 | 39,10 | 38,20 | 38,20 | 37,20 | 36,70 |
| 82,80 | 38,98 | 38,20 | 38,20 | 37,10 | 36,60 |
| 87,11 | 38,89 | 38,20 | 38,20 | 37,00 | 36,50 |
| 91,32 | 38,80 | 38,30 | 38,30 | 36,90 | 36,50 |
| 95,44 | 38,75 | 38,30 | 38,30 | 36,80 | 36,40 |
| 99,47 | 38,70 | 38,40 | 38,40 | 36,70 | 36,30 |
| 103,43 | 38,62 | 38,40 | 38,40 | 36,60 | 36,20 |

Tabela B-18 – Lâminas infiltradas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Z_C) de HORTICULTURE.

| DISTÂNCIA (m) | LÂMINA INFILTRADA (mm) | | | |
|------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | (Z_C) | (Z_1) | (Z_2) | (Z_3) |
| 0,00 | 32,80 | 33,40 | 33,40 | 32,80 |
| 23,93 | 33,12 | 33,30 | 33,10 | 32,50 |
| 39,40 | 33,05 | 33,10 | 32,90 | 32,30 |
| 51,87 | 32,93 | 32,90 | 32,60 | 32,00 |
| 62,59 | 32,77 | 32,70 | 32,30 | 31,70 |
| 72,13 | 32,59 | 32,50 | 32,10 | 31,40 |
| 80,79 | 32,38 | 32,30 | 31,80 | 31,20 |
| 88,78 | 32,15 | 32,10 | 31,50 | 30,90 |
| 96,21 | 31,92 | 31,90 | 31,20 | 30,60 |
| 103,20 | 31,69 | 31,70 | 31,00 | 30,30 |
| 109,80 | 31,48 | 31,40 | 30,70 | 30,00 |
| 116,07 | 31,26 | 31,20 | 30,40 | 29,70 |
| 122,06 | 31,04 | 31,00 | 30,10 | 29,40 |
| 127,79 | 30,80 | 30,80 | 29,80 | 29,10 |
| 133,30 | 30,56 | 30,50 | 29,50 | 28,90 |
| 138,60 | 30,32 | 30,30 | 29,20 | 28,60 |
| 143,73 | 30,07 | 30,10 | 28,90 | 28,30 |
| 148,69 | 29,82 | 29,90 | 28,60 | 27,90 |
| 153,49 | 29,55 | 29,60 | 28,30 | 27,60 |
| 158,16 | 29,28 | 29,40 | 28,00 | 27,30 |
| 162,70 | 29,00 | 29,20 | 27,70 | 27,00 |
| 167,12 | 28,72 | 29,00 | 27,40 | 26,70 |
| 171,42 | 28,44 | 28,70 | 27,10 | 26,40 |
| 175,63 | 28,15 | 28,50 | 26,80 | 26,10 |

Tabela B-19 – Lâminas infiltradas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Z_C) de STIEBEN.

| DISTÂNCIA (m) | LÂMINA INFILTRADA (mm) | | | |
|------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | (Z_C) | (Z_1) | (Z_2) | (Z_3) |
| 0,00 | 13,01 | 13,60 | 13,60 | 13,00 |
| 22,10 | 13,00 | 13,60 | 13,50 | 12,90 |
| 43,82 | 12,96 | 13,60 | 13,50 | 12,80 |
| 65,18 | 12,91 | 13,70 | 13,40 | 12,80 |
| 86,23 | 12,88 | 13,70 | 13,30 | 12,70 |
| 106,97 | 12,85 | 13,70 | 13,20 | 12,60 |
| 127,43 | 12,82 | 13,70 | 13,10 | 12,50 |
| 147,61 | 12,77 | 13,70 | 13,00 | 12,40 |
| 167,53 | 12,71 | 13,80 | 13,00 | 12,30 |
| 187,19 | 12,66 | 13,80 | 12,90 | 12,30 |
| 206,61 | 12,60 | 13,90 | 12,80 | 12,20 |
| 225,79 | 12,53 | 13,90 | 12,70 | 12,10 |
| 244,74 | 12,46 | 14,00 | 12,60 | 12,00 |
| 263,47 | 12,39 | 14,10 | 12,60 | 11,90 |
| 281,98 | 12,32 | 14,20 | 12,50 | 11,80 |
| 300,27 | 12,26 | 14,30 | 12,40 | 11,80 |
| 318,36 | 12,20 | 14,40 | 12,30 | 11,70 |
| 336,25 | 12,14 | 14,70 | 12,20 | 11,60 |
| 353,95 | 12,08 | 15,00 | 12,10 | 11,50 |

Tabela B-20 – Lâminas infiltradas simuladas pelo modelo algébrico de LEVIEN, correspondentes ao efeito dos três casos de recessão, com dados ajustados (Z_c) de BENSON.

| DISTÂNCIA (m) | LÂMINA INFILTRADA (mm) | | | |
|------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | (Z_c) | (Z_1) | (Z_2) | (Z_3) |
| 0,00 | 33,08 | 34,90 | 34,90 | 33,00 |
| 27,72 | 33,01 | 34,90 | 34,70 | 32,90 |
| 53,20 | 32,93 | 34,90 | 34,50 | 32,70 |
| 77,47 | 32,82 | 34,90 | 34,40 | 32,50 |
| 100,87 | 32,71 | 34,90 | 34,20 | 32,40 |
| 123,56 | 32,58 | 34,90 | 34,10 | 32,20 |
| 145,67 | 32,46 | 34,90 | 33,90 | 32,00 |
| 167,27 | 32,34 | 34,90 | 33,70 | 31,80 |
| 188,43 | 32,21 | 34,90 | 33,60 | 31,70 |
| 209,19 | 32,07 | 34,90 | 33,40 | 31,50 |
| 229,60 | 31,92 | 34,90 | 33,30 | 31,30 |
| 249,67 | 31,77 | 34,90 | 33,10 | 31,10 |
| 269,45 | 31,62 | 34,90 | 32,90 | 30,90 |
| 288,94 | 31,47 | 34,90 | 32,80 | 30,80 |
| 308,17 | 31,32 | 34,90 | 32,60 | 30,60 |
| 327,16 | 31,17 | 34,90 | 32,40 | 30,40 |
| 345,92 | 31,02 | 35,00 | 32,20 | 30,20 |
| 364,46 | 30,86 | 35,00 | 32,10 | 30,00 |
| 382,80 | 30,70 | 35,00 | 31,90 | 29,80 |
| 400,94 | 30,54 | 35,00 | 31,70 | 29,60 |
| 418,90 | 30,37 | 35,10 | 31,50 | 29,50 |
| 436,68 | 30,21 | 35,10 | 31,40 | 29,30 |
| 454,30 | 30,04 | 35,20 | 31,20 | 29,10 |
| 471,75 | 29,88 | 35,30 | 31,00 | 28,90 |
| 489,05 | 29,71 | 35,30 | 30,80 | 28,70 |
| 506,20 | 29,54 | 35,40 | 30,70 | 28,50 |
| 523,20 | 29,35 | 35,50 | 30,50 | 28,30 |
| 540,07 | 29,17 | 35,60 | 30,3 | 28,10 |
| 556,81 | 28,99 | 35,80 | 30,10 | 27,90 |
| 573,41 | 28,82 | 35,90 | 29,90 | 27,60 |
| 589,90 | 28,65 | 36,20 | 29,70 | 27,40 |
| 606,26 | 28,48 | 36,40 | 29,50 | 27,20 |
| 622,51 | 28,31 | 36,80 | 29,30 | 27,00 |

Tabela B-21 – Volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de RAMSEY.

| DISTÂNCIA (m) | VOLUME INFILTRADO (m³/m) | LÂMINA (mm) |
|--------------------------|--|------------------------|
| 0,00 | 3,86.10 ⁻² | 38,60 |
| 9,09 | 3,94.10 ⁻² | 39,40 |
| 18,18 | 3,97.10 ⁻² | 39,70 |
| 27,27 | 3,96.10 ⁻² | 39,60 |
| 36,36 | 3,95.10 ⁻² | 39,50 |
| 45,45 | 3,94.10 ⁻² | 39,40 |
| 54,54 | 3,94.10 ⁻² | 39,40 |
| 63,64 | 3,93.10 ⁻² | 39,30 |
| 72,73 | 3,92.10 ⁻² | 39,20 |
| 81,82 | 3,90.10 ⁻² | 39,00 |
| 90,91 | 3,88.10 ⁻² | 38,80 |
| 100,00 | 3,87.10 ⁻² | 38,70 |

Tabela B-22 – Volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de HORTICULTURE.

| DISTÂNCIA (m) | VOLUME INFILTRADO (m³/m) | LÂMINA (mm) |
|--------------------------|--|------------------------|
| 0,00 | 3,67.10 ⁻² | 32,83 |
| 25,00 | 3,69.10 ⁻² | 33,01 |
| 50,00 | 3,67.10 ⁻² | 32,83 |
| 75,00 | 3,62.10 ⁻² | 32,38 |
| 100,00 | 3,55.10 ⁻² | 31,75 |
| 125,00 | 3,45.10 ⁻² | 30,86 |
| 150,00 | 3,34.10 ⁻² | 29,87 |
| 175,00 | 3,23.10 ⁻² | 28,89 |

Tabela B-23 – Volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de STIEBEN.

| DISTÂNCIA (m) | VOLUME INFILTRADO (m³/m) | LÂMINA (mm) |
|--------------------------|--|------------------------|
| 0,00 | 7,82.10 ⁻³ | 13,03 |
| 25,00 | 7,82.10 ⁻³ | 13,03 |
| 50,00 | 7,79.10 ⁻³ | 12,98 |
| 75,00 | 7,76.10 ⁻³ | 12,93 |
| 100,00 | 7,75.10 ⁻³ | 12,92 |
| 125,00 | 7,73.10 ⁻³ | 12,88 |
| 150,00 | 7,69.10 ⁻³ | 12,82 |
| 175,00 | 7,65.10 ⁻³ | 12,75 |
| 200,00 | 7,59.10 ⁻³ | 12,65 |
| 225,00 | 7,53.10 ⁻³ | 12,55 |
| 250,00 | 7,48.10 ⁻³ | 12,47 |
| 275,00 | 7,40.10 ⁻³ | 12,33 |
| 300,00 | 7,34.10 ⁻³ | 12,23 |
| 325,00 | 7,28.10 ⁻³ | 12,13 |
| 350,00 | 7,22.10 ⁻³ | 12,03 |

Tabela B-24 – Volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco e lâminas infiltradas obtidas com dados observados de BENSON.

| DISTÂNCIA (m) | VOLUME INFILTRADO (m³/m) | LÂMINA (mm) |
|--------------------------|--|------------------------|
| 0,00 | 3,30.10 ⁻² | 33,00 |
| 50,00 | 3,28.10 ⁻² | 32,80 |
| 100,00 | 3,26.10 ⁻² | 32,60 |
| 150,00 | 3,23.10 ⁻² | 32,30 |
| 200,00 | 3,20.10 ⁻² | 32,00 |
| 250,00 | 3,16.10 ⁻² | 31,60 |
| 300,00 | 3,12.10 ⁻² | 31,20 |
| 350,00 | 3,08.10 ⁻² | 30,80 |
| 400,00 | 3,05.10 ⁻² | 30,50 |
| 450,00 | 3,01.10 ⁻² | 30,10 |
| 500,00 | 2,98.10 ⁻² | 29,80 |
| 550,00 | 2,93.10 ⁻² | 29,30 |
| 600,00 | 2,89.10 ⁻² | 28,90 |
| 625,00 | 2,86.10 ⁻² | 28,60 |