

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

**Metodologia de Retorno de Informação  
de Campo para Melhoria da Análise  
e Gestão da Rega em Canteiros de Nível**

António Francisco Canatário Duarte

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA  
DA REGA E DOS RECURSOS AGRÍCOLAS

LISBOA, 1994

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

# **Metodologia de Retorno de Informação de Campo para Melhoria da Análise e Gestão da Rega em Canteiros de Nível**

Dissertação apresentada no Instituto Superior de Agronomia para obtenção do grau de Mestre em Engenharia da Rega e dos Recursos Agrícolas.

António Francisco Canatário Duarte

CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA  
DA REGA E DOS RECURSOS AGRÍCOLAS

LISBOA, 1994

*À minha esposa*  
*Aos meus pais*

## AGRADECIMENTOS

Na Tese de Mestrado que apresentamos colaboraram pessoas e instituições que a diferentes níveis contribuíram para a sua concretização. A todos os que mais directamente nos prestaram a sua ajuda, deixo um agradecimento especial.

Ao Professor Pedro Leão de Sousa, a quem devo o acompanhamento empenhado deste estudo, pelo apoio, sugestões, espírito crítico e revisão do manuscrito, o meu sincero e reconhecido agradecimento.

Ao Professor Ricardo Paulo Serralheiro manifesto o meu especial agradecimento pelo estímulo, correção do manuscrito e conselhos científicos, que nos proporcionou ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Ao Professor Luís Santos Pereira pela sua crítica oportuna e pelas esclarecidas sugestões no delineamento deste estudo, manifesto o meu grato reconhecimento.

Ao Professor Ricardo Jorge pela ajuda na resolução de situações práticas no decorrer dos ensaios de campo, o meu agradecimento.

Aos Consultores do Projecto NATO PO-IRRIGATION Drs. Harold Duke e Tom Trout, agradeço as suas proveitosas sugestões.

À Direcção e funcionários do ex-Departamento de Regadio do I.N.I.A., fico grato pelo apoio e facilidades concedidas na instalação dos ensaios de campo.

Aos colegas Rosário Cameira, Daniela Santos, Henrique Chia, António Monteiro e Luís Brito, o meu reconhecimento pela ajuda nos trabalhos de campo.

Aos colegas Francisco Frazão e Celestino Almeida agradeço a ajuda na correcção do texto.

Ao Centro de Recursos da E.S.A.C.B. fico reconhecido pelo apoio informático, e arranjo gráfico do documento final.

À Escola Superior Agrária de Castelo Branco pela disponibilidade facultada para a realização do Curso de Mestrado, o meu profundo agradecimento.

## RESUMO

As características de infiltração do solo são de importância determinante no estudo dos métodos de rega de superfície, nos quais se inclui o processo de rega por canteiros de nível. A sua deficiente avaliação poderá levar a uma incorrecta análise e gestão deste processo de rega.

O desenvolvimento de uma metodologia de optimização dos parâmetros da equação de infiltração com retorno de informação de campo, constitui o principal objectivo desta tese. A metodologia desenvolvida é verificada para regas rigorosamente observadas, através de um procedimento simplificado. Com recurso ao modelo de simulação de rega de superfície **SRFR 20.5**, é feita uma análise de sensibilidade para o tempo de recessão e para o coeficiente de rugosidade.

No exercício de pesquisa dos parâmetros optimizados da equação de infiltração, faz-se uma utilização exaustiva do modelo de simulação **SRFR 20.5**, no sentido de se procurar a melhor aproximação entre resultados simulados e observados em determinada rega.

A metodologia desenvolvida para uma rega e depois verificada para outras regas, mostra uma validade consistente pela obtenção de valores baixos dos aferidores numéricos SQD e módulo do Desvio, estabelecidos respectivamente para os critérios de comparação tempos de avanço e tempo de recessão, observados e simulados.

Da análise de sensibilidade conclui-se da importância de uma avaliação rigorosa do coeficiente de rugosidade, não sendo esta uma exigência para o tempo de recessão.

**Palavras chave:** Rega por canteiros de nível; retorno de informação de campo; modelos de simulação; optimização dos parâmetros da infiltração; análise e gestão da rega; avaliação do tempo de recessão; avaliação do coeficiente de rugosidade.

## ABSTRACT

The characteristics of water infiltration in soils, are of extreme importance to determine the study methods of surface irrigation, such as level basing irrigation. An erratic evaluation can lead to an incorrect analysis and management of the irrigation process.

The main objective of this project, is to develop a methodology that optimizes the parameters of an infiltration equation with field feedback. The developed methodology is applied to rigorously irrigations by a simplified process. Using a computer program for simulating flow in surface irrigation **SRFR 20.5**, a sensibility analysis of the recession time and roughness coefficient is done.

During the search to optimize the parameters for the infiltration equation, a great use of the computer program for simulating flow in surface irrigation **SRFR 20.5** was carried out, to obtain the best approach between simulated results and those observed in an irrigation.

The developed methodology for an irrigation system then verified for other irrigations, shows a consistent validity by obtaining low values of the Sum of Squares of Deviations (SQD) and Absolute Value, established respectively for the compared advanced time criteria and recession time, observed and simulated.

From the sensibility analysis, the importance of a rigorous evaluation on the roughness coefficient, but not on the recession time, can be concluded.

**Key Words:** Level basing irrigation; field feed back; simulating models; optimization of infiltration parameters; irrigation analysis and management; evaluation of the recession time; evaluation of the roghness coefficient.

# ÍNDICE

RESUMO  
ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS  
LISTA DE QUADROS  
LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais	2
1.2. Objectivos	4
1.3. Organização da tese	5
2. BASES TEÓRICAS DA REGA EM CANTEIROS DE NÍVEL E DA SUA MODELAÇÃO	7
2.1. Equações do escoamento em meio poroso	8
2.1.1. Parâmetros intervenientes nas equações	10
2.1.1.1. Caudal	10
2.1.1.2. Microtopografia	11
2.1.1.3. Rugosidade	12
2.1.1.4. Infiltração	14
2.1.1.5. Secção transversal dos sulcos	18
2.1.1.6. Avanço	20
2.1.1.7. Recessão	22
2.2. Modelação do escoamento	23
2.2.1. Modelo hidrodinâmico completo	25
2.2.2. Modelo de inércia nula	25
2.2.3. Modelo de balanço de volume	26

2.3. Técnicas de retorno de informação com vista à melhoria da qualidade da rega	27
2.3.1. Dificuldades na predicção da qualidade da rega	29
2.3.2. Condições e aplicação das técnicas de retorno de informação	30
2.3.2.1. Melhoria da qualidade da rega com informação de campo	34
2.3.2.2. Controlo da rega em tempo real	34
3. ESQUEMA E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS	37
3.1. Localização e caracterização do campo de ensaios	38
3.2. Nivelção do canteiro	40
3.3. Ensaio de rega	41
3.3.1. Sistema de distribuição da água à parcela	42
3.3.2. Caudais de alimentação aos sulcos	43
3.3.3. Profundidade do escoamento	46
3.3.4. Caracterização da fase de avanço	48
3.3.5. Caracterização da fase de recessão	51
3.4. Geometria da secção transversal dos sulcos	52
3.4.1. Perfilómetro de agulhas	53
3.4.2. Determinação da área e perímetro molhados	54
3.4.3. Equações potência de caracterização transversal dos sulcos	54
3.5. Caracterização da rugosidade	56
3.6. Caracterização da infiltração	56
3.6.1. Infiltrómetro de sulco bloqueado	57
3.6.2. Obtenção das equações de infiltração	58
4. METODOLOGIA DE RETORNO DE INFORMAÇÃO DE CAMPO	61
4.1. Modelo de simulação SRFR	63
4.2. Descrição da metodologia	68
4.2.1. Optimização dos parâmetros da equação de infiltração	71
4.3. Análise de sensibilidade	77
4.3.1. Tempo de recessão	78
4.3.2. Coeficiente de rugosidade	81

4.4. Verificação da metodologia desenvolvida	84
4.4.1. Segunda rega de 1993	84
4.4.2. Terceira rega de 1993	89
4.5. Melhoria da gestão da rega	94
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS DE DESENVOLVIMENTO	97
5.1. Conclusões	98
5.2. Perspectivas futuras de desenvolvimento	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	
ANEXOS A - Fotografias	
ANEXOS B - Quadros de resultados	

## **ANEXOS A**

**Foto 3.1** - Abre-sulcos com rodas compactadoras, utilizado na operação de abertura dos sulcos.

**Foto 3.2** - Manga flexível de plástico com válvulas de alimentação individual dos sulcos.

**Foto 3.3** - Tubo PVC com janelas reguláveis de caudal de alimentação individual dos sulcos.

**Foto 3.4** - Medidores portáteis de soleira espessa modificada para avaliação dos caudais nos sulcos.

**Foto 3.5** - Perfilómetro de agulhas.

**Foto 3.6** - Infiltrómetro de sulco bloqueado.

## **ANEXOS B**

**ANEXO B3.1** - Tempos de avanço observados nas 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> regas dos ensaios de 1992

**ANEXO B3.2** - Tempos de avanço observados nas 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> regas dos ensaios de 1993

**ANEXO B3.3** - Coordenadas dos perfis transversais para o cálculo do coeficiente de rugosidade relativo a cada rega

**ANEXO B3.4** - Ficheiro de saída do programa PERFIL, para a 1<sup>a</sup> rega de 1993

**ANEXO B3.5** - Ficheiro de saída do programa PERFIL, para a 2<sup>a</sup> rega de 1993

**ANEXO B3.6** - Ficheiro de saída do programa PERFIL, para a 3<sup>a</sup> rega de 1993

**ANEXO B3.7** - Coordenadas dos perfis transversais que representam as condições médias dos sulcos para cada rega controlada

**ANEXO B3.8** - Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 1<sup>a</sup> rega de 1992

**ANEXO B3.9** - Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 2<sup>a</sup> rega de 1992

**ANEXO B3.10** - Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 3<sup>a</sup> rega de 1992

**ANEXO B3.11** - Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 1<sup>a</sup> rega de 1993

**ANEXO B3.12** - Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 2<sup>a</sup> rega de 1993

**ANEXO B3.13** - Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 3<sup>a</sup> rega de 1993

**ANEXO B4.1** - Ficheiro de entrada do modelo de simulação de rega de superfície  
SRFR versão 20.5

**ANEXO B4.2** - Blocos do ficheiro de saída do modelo de simulação de rega de  
superfície SRFR versão 20.5

**ANEXO B4.3** - Parâmetros da equação de infiltração otimizados para vários tempos  
de recessão

**ANEXO B4.4** - Parâmetros da equação de infiltração otimizados para dois valores  
do coeficiente de rugosidade

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.1</b> - Fases a considerar numa rega por canteiros de nível (adaptado de Sousa, 1990).	3
<b>Figura 3.1</b> - Localização da Estação Experimental António Teixeira (Sousa, 1990).	39
<b>Figura 3.2</b> - Planta da Estação Experimental António Teixeira, com a localização do canteiro onde decorreram os ensaios (adaptado de Sousa, 1990).	40
<b>Figura 3.3</b> - Sistema de distribuição da água ao canteiro 5.	43
<b>Figura 3.4</b> - Hidrograma dos caudais de alimentação a um sulco de nível do canteiro 5, 2ª rega, em 27/07/92.	44
<b>Figura 3.5</b> - Medidores portáteis de soleira espessa modificada; planta e cortes (Sousa, 1990).	45
<b>Figura 3.6</b> - Medição dos caudais à saída da boca de rega e na cabeceira dos sulcos.	46
<b>Figura 3.7</b> - Registo da profundidade do escoamento e do perfil transversal dos sulcos.	47
<b>Figura 3.8</b> - Cotas da superfície livre do escoamento observadas durante a 1ª rega, em 13/07/93.	47
<b>Figura 3.9</b> - Localização das estações de controlo do avanço e recessão no canteiro 5.	48
<b>Figura 3.10</b> - Curva de avanço observada durante a 1ª rega do canteiro 5, em 15/07/92.	49
<b>Figura 3.11</b> - Curva de avanço observada durante a 2ª rega do canteiro 5, em 29/07/92.	49
<b>Figura 3.12</b> - Curva de avanço observada durante a 3ª rega do canteiro 5, em 25/08/92.	50
<b>Figura 3.13</b> - Curva de avanço observada durante a 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.	51
<b>Figura 3.14</b> - Curva de recessão observada durante a 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.	52
<b>Figura 3.15</b> - Perfilómetro de agulhas.	53

<b>Figura 3.16</b> - Perfis transversais dos sulcos para a 1ª rega do canteiro 5, em 15/07/92.	55
<b>Figura 3.17</b> - Localização dos ensaios de infiltração no canteiro 5.	57
<b>Figura 3.18</b> - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 1ª rega do canteiro 5, em 15/07/92.	60
<b>Figura 4.1</b> - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.	72
<b>Figura 4.2</b> - Perfis transversais dos sulcos para a 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.	73
<b>Figura 4.3</b> - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 1ª rega de 1993.	76
<b>Figura 4.4</b> - Curvas de avanço e recessão observadas, e simuladas com os parâmetros otimizados da equação de infiltração para a 1ª rega de 1993.	77
<b>Figura 4.5</b> - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para tempos de recessão correspondentes a dispersões de $\pm 32\%$ , $\pm 20\%$ e $\pm 10\%$ relativamente ao tempo de recessão observado na 1ª rega de 1993.	78
<b>Figura 4.6</b> - Comparação dos resultados simulados do perfil de infiltração longitudinal para variações dos tempos de recessão de: a) $\pm 32\%$ , b) $\pm 20\%$ e c) $\pm 10\%$ .	80
<b>Figura 4.7</b> - Otimização dos parâmetros das equação de infiltração para coeficientes de rugosidade correspondentes a uma dispersão de $\pm 16\%$ , relativamente ao valor avaliado em ensaios de campo na 1ª rega de 1993.	82
<b>Figura 4.8</b> - Comparação dos resultados simulados dos perfis longitudinais de infiltração para os coeficientes de rugosidade $n=0.030$ e $0.042$ .	83
<b>Figura 4.9</b> - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 2ª rega do canteiro 5, em 03/08/93.	85
<b>Figura 4.10</b> - Perfis transversais dos sulcos para a 2ª rega do canteiro 5, em 03/08/93.	86
<b>Figura 4.11</b> - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 2ª rega de 1993.	88

<b>Figura 4.12</b> - Curvas de avanço e recessão observada e estimada, e simuladas com os parâmetros otimizados da equação de infiltração para a 2ª rega de 1993.	89
<b>Figura 4.13</b> - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 3ª rega do canteiro 5, em 18/08/93.	90
<b>Figura 4.14</b> - Perfis transversais dos sulcos para a 3ª rega do canteiro 5, em 18/08/93.	91
<b>Figura 4.15</b> - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 3ª rega de 1993.	93
<b>Figura 4.16</b> - Curvas de avanço e recessão observada e estimada, e simuladas com os parâmetros otimizados da equação de infiltração para a 3ª rega de 1993.	94

## LISTA DE QUADROS

	Pág.
<b>Quadro 3.1</b> - Parâmetros de ajustamento das equações potência de caracterização da forma transversal dos sulcos, relativos aos ensaios de 1992	56
<b>Quadro 3.2</b> - Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/92	59
<b>Quadro 4.1</b> - Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93	72
<b>Quadro 4.2</b> - Parâmetros da equação de infiltração otimizados para os tempos de avanço - 1ª rega/93	75
<b>Quadro 4.3</b> - Parâmetros da equação de infiltração otimizados para o tempo de recessão - 1ª rega/93	75
<b>Quadro 4.4</b> - Parâmetros otimizados $a$ e $k$ da equação de infiltração para dispersões de $\pm 32\%$ , $\pm 20\%$ e $\pm 10\%$ , relativamente ao tempo de recessão observado na 1ª rega de 1993	79
<b>Quadro 4.5</b> - Resultados simulados da rega com seis pares de parâmetros otimizados $a$ e $k$ da equação de infiltração	79
<b>Quadro 4.6</b> - Parâmetros otimizados $a$ e $k$ da equação de infiltração para uma dispersão de $\pm 16\%$ , relativamente ao coeficiente de rugosidade avaliado na 1ª rega de 1993	81
<b>Quadro 4.7</b> - Resultados simulados da rega com dois pares de parâmetros otimizados $a$ e $k$ da equação de infiltração	83
<b>Quadro 4.8</b> - Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 2ª rega do canteiro 5, em 03/08/93	85
<b>Quadro 4.9</b> - Parâmetros $a$ e $k$ da equação de infiltração resultantes do procedimento adoptado na verificação da metodologia - 2ª rega/93	87
<b>Quadro 4.10</b> - Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 3ª rega do canteiro 5, em 18/08/93	90

<b>Quadro 4.11</b> - Parâmetros $a$ e $k$ da equação de infiltração resultantes do procedimento adoptado na verificação da metodologia - -3ª rega/93	92
<b>Quadro 4.12</b> - Resultados simulados da rega com os parâmetros da equação de infiltração otimizados e resultantes dos testes em sulco bloqueado	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	área da secção transversal do escoamento
$a$	expoente de ajustamento da função de Kostiakov
$a_1$	aceleração
$B$	largura à superfície do escoamento
$b$	comprimento da soleira
$c$	expoente da equação potência de caracterização transversal dos sulcos
$c_1$	constante empírica da equação de infiltração do SCS
$c_2$	constante de ajustamento da equação de infiltração de Horton
$c_3$	constante empírica de equação de infiltração prevista no programa SRFR 20.5
$F$	força exterior
$f_c$	coeficiente da equação SCS do avanço
$g$	aceleração da gravidade
$g_c$	coeficiente da equação SCS do avanço
$i$	taxa de infiltração do solo
$i_f$	taxa de infiltração final
$k$	coeficiente de ajustamento da função de Kostiakov
$L$	comprimento total do sulco
$L_c$	comprimento controlado da parcela
$m$	massa
$n$	coeficiente de rugosidade de Manning
$p$	coeficiente de ajustamento da equação potência do avanço
$Q$	caudal
$q$	caudal unitário
$R$	raio hidráulico
$R_I$	relação entre a altura de água infiltrada e a profundidade do escoamento
$r$	expoente de ajustamento da equação potência do avanço
$S$	declive longitudinal da rasante dos sulcos
$S_0$	declive da superfície do terreno
$S_f$	declive da linha de energia
$t$	tempo
$T_{av}$	tempo de avanço
$T_{rec}$	tempo de recessão

$t_L$	tempo de avanço para o comprimento $L$
$t_{L/2}$	tempo de avanço para $L/2$
$t_x$	tempo de avanço até à distância $x$
$u$	coeficiente da equação potência de caracterização transversal dos sulcos
$V$	velocidade média do escoamento numa secção
$v$	velocidade
$V_a$	volume de água armazenado à superfície do solo
$V_e$	volume total de água aplicado à parcela durante a rega
$V_i$	volume de água infiltrado
$x$	distância
$Y$	profundidade do escoamento
$y$	distância
$Z$	altura de água infiltrada
$Z_{cum}$	altura de água infiltrada acumulada
$Z_{qm}$	altura média de água infiltrada no quartil mínimo
$\beta$	expoente da equação SCS do avanço



# INTRODUÇÃO

## CAPÍTULO 1

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Considerações gerais

Os métodos de rega de superfície têm acompanhado o desenvolvimento da actividade agrícola desde os seus primórdios, adoptando técnicas mais ou menos elaboradas. Desenvolvimentos recentes das técnicas de rega apontam para uma conservação de recursos hídricos e humanos, apresentando quando bem geridos altas eficiências e uma automatização possível (Pereira, 1989).

O processo de rega por canteiros, com as suas características próprias de concepção e funcionamento, é normalmente incluído no método de rega designado de submersão (Serralheiro, 1988; Sousa, 1990).

O recente aperfeiçoamento das técnicas de nivelção permitiu uma adopção mais generalizada do processo de rega por canteiros de nível, em que as parcelas apresentam um declive transversal e longitudinal igual a zero. Neste processo de rega podem-se distinguir, tal como ilustra a Figura 1.1, quatro fases distintas:

**i) avanço** - tempo total de escoamento da água à superfície do terreno desde o início da alimentação do canteiro, até se atingir o seu extremo de jusante;

**ii) enchimento** - fracção de tempo entre o final do avanço e o corte da alimentação ao canteiro;

**iii) esgotamento** - período de tempo de rega desde o corte da alimentação do canteiro, até ao início do desaparecimento da água à superfície do terreno;

**iv) recessão** - corresponde ao período em que se dá o desaparecimento da água na superfície do canteiro, que teoricamente deverá ser instantâneo.

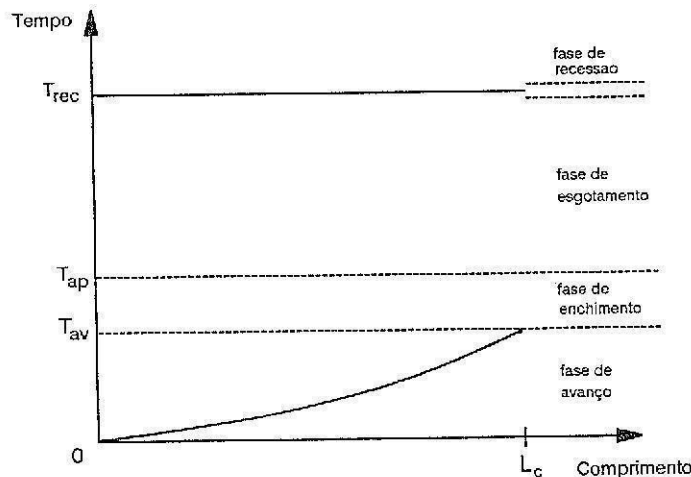


Figura 1.1 - Fases a considerar numa rega por canteiros de nível (adaptado de Sousa, 1990).

A qualidade de uma rega pode ser avaliada através do aferidor **Uniformidade de Distribuição (UD)** referida ao quartil mínimo, sendo definida como a razão entre a altura média de água infiltrada no quarto da área da parcela que recebe menos água, e a altura média de água infiltrada em toda a parcela (Kruse, 1978, citado por Sousa, 1990).

Outro aferidor da qualidade da rega é a **Eficiência de aplicação ( $E_a$ )**, que se define como sendo a razão entre a altura média de água armazenada na zona radicular, e altura média de água aplicada (Kruse, 1978, citado por Sousa, 1990).

Nos métodos de rega de superfície, nos quais se inclui o processo de rega em canteiros de nível, a água infiltra-se no solo à medida que avança na superfície do terreno, pelo que são de primordial importância as características de infiltração do solo. Sousa (1990) refere que a qualidade da rega está grandemente condicionada pelas características de infiltração do solo, e uma deficiência na sua avaliação pode resultar numa irregular distribuição da água, bem como numa excessiva perda de água por escoamento e/ou percolação profunda.

A avaliação das características de infiltração é feita usualmente em dispositivos próprios denominados de infiltrómetros, em pontos localizados na parcela de rega, não contemplando portanto as variações espaciais e temporais inerentes ao processo da infiltração durante a rega (Spurgeon e Duke, 1988b). Izadi *et al.* (1988) referem a este

propósito que a variação espacial e temporal dos parâmetros da infiltração, terão que ser considerados na gestão e avaliação dos sistemas de rega de superfície.

Têm sido feitos esforços no sentido do desenvolvimento de esquemas operacionais que avaliem durante a rega as características de infiltração do solo, e promovam as respectivas correções no sistema de alimentação da parcela (Smerdon *et al.*, 1988; Latimer e Reddell, 1987; Smith e Duke, 1984).

Contudo, algumas limitações têm sido encontradas na operacionalidade destes esquemas, sobretudo no que respeita à avaliação das características de infiltração durante a rega (Clemmens, 1992) e no funcionamento automático dos sistemas (Sousa e Trout, 1991).

## 1.2. Objectivos

A importância do conhecimento das características de infiltração do solo na avaliação e gestão dos métodos de rega de superfície e concretamente neste processo, determina a formulação dos objectivos deste estudo.

Para a sua concretização foi utilizado o modelo de simulação de rega de superfície **SRFR versão 20.5** (Strelkoff, 1992) que, através do fornecimento de informação adequada ao ficheiro de entrada, possibilita a avaliação do processo de rega pela interpretação de um ficheiro de saída, sugerindo indicações para a melhoria da sua gestão.

Para a concretização deste estudo foi organizado um campo de ensaios onde foram feitas avaliações durante as campanhas de rega de 1992 e 1993.

Passamos de seguida a referir os **objectivos**:

⇒ Desenvolvimento de uma metodologia de optimização dos parâmetros da equação de infiltração com retorno de informação de campo, que permita uma melhoria da análise da rega e a formulação de sugestões para a melhoria da sua gestão;

⇒ Verificação da metodologia para outras regas, através de um procedimento que envolva uma pesquisa mais localizada dos parâmetros optimizados da equação de infiltração, e portanto uma utilização menos intensiva do modelo de simulação;

⇒ Exemplificação, para uma das regas, da melhoria da gestão da rega, comparando-se os resultados simulados com os parâmetros otimizados da equação de infiltração, e com os parâmetros da infiltração resultantes dos testes de sulco bloqueado, sugerindo-se a alteração conveniente dos parâmetros de gestão da rega;

⇒ Testar a influência da avaliação do tempo de recessão e do coeficiente de rugosidade na análise e gestão da rega.

### 1.3. Organização da tese

A presente tese organiza-se em cinco capítulos e duas categorias de anexos.

No Capítulo 1 consta uma breve apresentação do tema, os objectivos que estiveram presentes durante a execução do estudo, e a organização do texto deste trabalho.

O Capítulo 2 apresenta algumas bases teóricas da rega em canteiros de nível e da sua modelação, que visam uma melhoria da gestão e análise deste processo de rega. São feitas referências a outros processos de rega de superfície quando se afigure oportuno.

No Capítulo 3 descrevem-se o esquema e as técnicas experimentais que permitiram a obtenção de resultados em ensaios de campo durante duas campanhas de rega, com base nos quais se desenvolve este estudo.

No Capítulo 4 é elaborada uma metodologia de optimização dos parâmetros da equação de infiltração com o objectivo da melhoria da análise e gestão deste processo de rega, sendo depois verificada através de um procedimento mais fácil para outras regas. É também no âmbito deste capítulo exemplificada a melhoria da gestão da rega. *Estuda-se ainda complementarmente a influência da avaliação menos cuidada do tempo de recessão e do coeficiente de rugosidade, na análise e gestão da rega.*

O Capítulo 5 regista as conclusões deste estudo baseadas nos resultados obtidos, assim como algumas recomendações. São perspectivadas algumas acções de desenvolvimento futuro, que permitam a continuidade do estudo deste tema.

Na categoria de Anexos A é apresentado um conjunto de fotografias, que complementa a descrição ou esquematização de algumas das técnicas usadas nos

ensaios de campo. No conjunto de Anexos B apresentam-se resultados que apoiam a concretização de alguns dos pontos do presente trabalho.

**BASES TEÓRICAS DA  
REGA EM CANTEIROS  
DE NÍVEL E DA SUA  
MODELAÇÃO**

**CAPÍTULO 2**

## **2. BASES TEÓRICAS DA REGA EM CANTEIROS DE NÍVEL E DA SUA MODELAÇÃO**

A rega por canteiros tem tido ao longo dos tempos uma importância grande na ocupação das áreas regadas, quer a nível do nosso país, quer a nível mundial. Ainda que a experiência e a compreensão dos fenómenos envolvidos nos métodos de rega de superfície tenham contribuído de alguma forma para o seu aperfeiçoamento, só muito recentemente se conheceram avanços significativos. O desenvolvimento e modernização destes métodos têm evoluído com base no conhecimento cada vez mais aprofundado das leis que regem o movimento da água à superfície do terreno, e o processo de infiltração da água no solo. A sua combinação permite modelar matematicamente o complexo processo de rega (Sousa, 1990).

A consciência de que se podem obter margens de lucro maiores com uma correcta gestão dos sistemas de rega, o aparecimento recente de preocupações ambientais, e ainda a crescente competição pela água têm despertado a preocupação de uma utilização mais racional e eficiente da água de rega. É nesta perspectiva que se têm desenvolvido metodologias para controlo e conhecimento da rega visando uma optimização da sua gestão, e que serão abordadas no presente capítulo.

Sempre que se considere oportuno, far-se-á referência a particularidades do controlo da rega relacionadas com outros processos de rega.

### **2.1. Equações do escoamento em meio poroso**

As características hidráulicas do escoamento numa parcela de rega são diferentes de secção para secção, pelo que o regime é variável durante a rega. Se considerarmos que o solo é um meio poroso, e que tem uma taxa de infiltração que é decrescente com o tempo, que a geometria da secção transversal dos sulcos varia ao longo do comprimento da parcela, e que há uma variação temporal e espacial das

características de infiltração do solo (Spurgeon e Duke, 1988b), facilmente percebemos que será variável o regime do escoamento.

As equações mais completas que descrevem este tipo de escoamento, são as de Saint-Venant (Spurgeon e Duke, 1988a): a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento, que por sua vez foram desenvolvidas com base em leis mais gerais da Física newtoniana, a saber

a Lei da Conservação da Massa

$$\frac{\delta m}{\delta t} = 0 \quad [2.1]$$

e a Lei da Conservação da Quantidade de Movimento

$$F = ma_1 = m \frac{\delta v}{\delta t} = \frac{\delta(mv)}{\delta t} \quad , \quad [2.2]$$

em que  $m$  representa a massa,  $t$  o tempo, e  $F$  a força exterior, que aplicada à massa  $m$  lhe comunica a aceleração  $\delta v / \delta t$ .

A primeira equação de Saint-Venant, ou equação da continuidade, no escoamento em meio poroso torna normalmente a seguinte forma

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta Z}{\delta t} = 0 \quad , \quad [2.3]$$

sendo usual escrever a segunda equação de Saint-Venant, ou equação da quantidade de movimento, sob a forma

$$\frac{1}{g} \frac{\delta V}{\delta t} + \frac{V}{g} \frac{\delta V}{\delta x} + \frac{\delta Y}{\delta x} = S_0 - S_f + \frac{iV}{2gA} \quad [2.4]$$

Nas equações anteriores  $A$  representa a área da secção transversal do escoamento,  $t$  o tempo,  $Q$  o caudal,  $x$  a distância,  $Z$  a altura de água infiltrada,  $g$  a aceleração da gravidade,  $V$  a velocidade média do escoamento,  $Y$  a profundidade do

escoamento,  $S_0$  o declive da superfície do terreno,  $S_f$  o declive da linha de energia ou perda de carga unitária, e  $i$  a taxa de infiltração do solo.

### 2.1.1. Parâmetros intervenientes nas equações

Do rigor da informação para as variáveis independentes das fórmulas anteriores, e que tem a ver com a sua avaliação de campo, depende a precisão com que as equações [2.3] e [2.4] são resolvidas (Sousa, 1990).

De seguida analisam-se os principais parâmetros intervenientes nas equações de Saint-Venant, e a maior ou menor dificuldade de os estimar ou medir.

#### 2.1.1.1. Caudal

Assume-se muitas vezes que o caudal é constante no tempo de duração de uma determinada rega, e ao longo de parte ou de toda a parcela que está a ser regada. Na realidade este pressuposto raramente se verifica, já que ocorrem variações de carga hidráulica no sistema de distribuição de água, com causas a montante da parcela. A variação da cota de entrada nos sulcos é responsável pela variação de caudal de sulco para sulco. Reddy e Clyma (1982) verificaram que, quando ocorrem variações de caudal, a média dos caudais pode constituir um bom indicador da qualidade que se espera da rega, ainda que alguns indicadores mostrem grande sensibilidade à variação do caudal, já que ocasionam variações na altura de água infiltrada e no armazenamento superficial (Clemmens, 1989). Na eventualidade da verificação de variações sensíveis nos caudais de alimentação será mais conveniente a utilização do hidrograma respectivo, pelo que é necessário que o modelo de simulação tenha essa capacidade, e possa avaliar os seus efeitos (Sousa, 1990).

O caudal, como parâmetro de manejo/gestão da rega, se for desapropriado pode causar baixas eficiências na rega por sulcos (Sousa e Trout, 1992), podendo contudo a sua avaliação no campo ser fácil e mais ou menos rigorosa. De facto o seu controlo é mais importante na rega por sulcos, particularmente na técnica com redução do caudal, ou de cut-back (Clemmens, 1989).

Sousa (1990) demonstrou que existe uma relação directa entre a variação do caudal, e a consequente variação relativa da altura média de água infiltrada. No mesmo

estudo foi observado também que acréscimos sucessivos no caudal médio ocasionam aumentos decrescentes na **UD**, enquanto os decréscimos no caudal médio resultam em diminuições de **UD** gradualmente mais importantes.

### 2.1.1.2. Microtopografia

Por definição, os canteiros de nível deverão ter teoricamente um declive longitudinal e transversal igual a zero. Na maioria das vezes não é uniforme, havendo pontualmente depressões e elevações maiores ou menores, levando portanto à constatação da existência de microrelevo no terreno.

A maioria dos modelos não têm a capacidade de contemplar esta informação, assumindo que o declive na parcela é uniforme. Existem contudo modelos que simulam o processo de rega considerando as variações de topografia, como por exemplo o modelo **SRFR** (Strelkoff, 1990), sendo esta uma informação importante na análise da qualidade da rega. De facto, a qualidade da distribuição da água de rega depende em boa parte da microtopografia do canteiro, já que a precisão com que foi feita a nivelção, e posteriormente as operações de manutenção representam um contributo decisivo para que todas as partes do canteiro recebam aproximadamente a mesma quantidade de água (Sousa, 1990).

Sousa e Trout (1992) observaram que na totalidade de um canteiro com a microtopografia expressa por um desvio padrão de 0.923 cm, o valor do parâmetro **UD**, em diferentes bandas do canteiro passava de 81.9% para 90.9% devido às irregularidades da microtopografia. Os mesmos autores e no mesmo estudo concluíram que a microtopografia do terreno pode ter influência significativa no tempo de recessão. Diferenças de 2 cm na topografia, podem resultar em tempos de recessão 50% maiores ou menores.

Clemmens (1989) estudou a influência do microrelevo da parcela na estimação dos parâmetros da infiltração, com base nos dados do avanço da rega e utilizando um modelo de simulação da rega. Este autor pode constatar que quando o primeiro ponto de controlo do avanço foi rebaixado 1 mm e o segundo elevado 1 mm, resultando portanto um declive negativo, a solução conduziu a um valor do expoente  $a$  da equação de Kostiakov igual a 0.694 e a um valor de  $44.1 \text{ mm/h}^a$  para o coeficiente  $k$ . Na situação inversa, ou seja com um declive positivo, a solução foi conseguida para um  $a$  de 0.601, e um  $k$  de  $40.1 \text{ mm/h}^a$ .

O efeito da existência das irregularidades no microrelevo do terreno na qualidade da rega pode ser atenuado através da armação do terreno em camalhões/sulcos, que obviamente serão de nível. Dado que os caudais disponíveis são normalmente pequenos, se estes forem concentrados nos sulcos em vez do escoamento se processar em toda a extensão da parcela, contribui-se para a existência de melhores condições hidráulicas no sentido de mais rapidamente a água alcançar o extremo de jusante da parcela.

As operações de manutenção do nivelamento são especialmente importantes no caso dos canteiros de nível, dado que de ano para ano, com a sucessão das culturas e as técnicas culturais que lhe são próprias, existem factores de perturbação da superfície do terreno, constituindo factores principais os assentamentos do solo e as operações que prevêm a intervenção de maquinaria agrícola (Sousa, 1990). Assim, neste processo de rega, a menos que na parcela se tenha optado pela técnica da não mobilização do solo, é imprescindível a correção do microrelevo antes da instalação da cultura de regadio, prática que na maioria das vezes é economicamente justificável.

Sousa (1990) concluiu que nivelamentos mais precisos resultam em uniformidades de distribuição mais elevadas, que por sua vez conduzem a produções mais uniformes. Nesse pressuposto desenvolveu uma metodologia que permitiu quantificar as relações precisão do nivelamento/produções esperadas, de maneira que o regante face aos custos do nivelamento, decida o grau de precisão a impor às suas parcelas. O autor concluiu neste estudo que teoricamente um novo nivelamento não se justificaria se a dispersão da microtopografia do terreno não ultrapassasse um valor de desvio padrão de 1.25 cm.

### **2.1.1.3. Rugosidade**

Ainda que em rega de superfície o regime do escoamento seja variável, aceita-se que a resistência ao avanço da água é idêntica à que se verifica no regime uniforme para as mesmas condições de caudal e de profundidade do escoamento, pelo que as avaliações experimentais deste coeficiente de resistência são efectuadas em regime uniforme tangente (Mendonça, 1975).

Uma das formas da quantificação da resistência ao escoamento é através do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ), que segundo Reddell e Latortue (1986) é um parâmetro que define a capacidade de um canal (neste caso os sulcos) em retardar o escoamento ao longo da sua superfície, sendo por isso um factor de resistência.

As expressões de cálculo são normalmente estudadas para canais, onde as condições diferem mais ou menos das verificadas nas parcelas de rega. Assim, a existência de torrões que são destruídos com a passagem da água, alterado-se no momento a rugosidade da superfície, o crescimento da cultura e de infestantes, a alteração da secção transversal molhada dos sulcos, e o facto da rega de superfície ocorrer em regime variável, impedem que o valor do coeficiente de rugosidade seja determinado com o rigor utilizado com que é para as condições em que as fórmulas de cálculo foram estudadas. Destas, a que em estudos recentes tem sido mais empregue na rega de superfície, e que tem conduzido a bons resultados, é a fórmula de Manning-Strickler

$$q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [2.5]$$

donde resulta

$$n = \frac{AR^{2/3} S^{1/2}}{q} \quad [2.6]$$

em que  $n$  é o coeficiente de rugosidade de Manning,  $A$  é a área da secção transversal do escoamento,  $S$  é o declive longitudinal da razante dos sulcos,  $q$  é o caudal unitário, e  $R$  é o raio hidráulico.

Vários autores são unânimes em considerar que o coeficiente de rugosidade, ainda que seja uma característica importante do escoamento, não o é tanto como outros parâmetros na determinação da qualidade da rega (Serralheiro, 1988; Basset *et al.*, 1981; Reddell e Latortue, 1986; Sousa, 1990).

O estudo de este parâmetro pode ser abordado das seguintes formas:

- i) proceder à sua determinação a partir de parâmetros do escoamento obtidos em ensaios de rega;
- ii) utilizar valores baseados em experiências anteriores de campo, que são assumidos como representativos de determinadas situações, e testar a sua sensibilidade em programas de simulação para diferentes valores do coeficiente de rugosidade; e
- iii) encarar este coeficiente como um parâmetro de ajustamento, e procurar o valor que conduza ao melhor ajustamento dos dados do avanço simulados por um modelo aos dados observados no campo.

Serralheiro (1988) com base em dados obtidos em ensaios de campo calculou o coeficiente de rugosidade para várias regas, e em diferentes secções no comprimento dos sulcos (cabeceira, 100 m, e 200 m), e constatou que não houve influência da posição ao longo do sulco, assim como não houve variação significativa em função do declive. O mesmo autor verificou uma variação grande de sulco para sulco, mas mais evidentes foram as diferenças entre regas que resultaram nos seguintes valores médios de todos os sulcos e secções: **1ª rega** - 0.073; **2ª rega** - 0.055; **3ª rega** - 0.093; **4ª rega** - 0.129.

Tabuada (1989) perante a variação dos valores deste coeficiente, constatada por outros autores (Fangmeir e Ramsey, 1978; Salazar, 1977; Souza, 1981; Lee, 1982 e Haie, 1984, citados por Tabuada, 1989), encaminhou o seu estudo no sentido de considerar a rugosidade, como um parâmetro de ajustamento. Os valores que permitiram um bom ajustamento aos dados do avanço observados até ao fim da parcela foram os seguintes: **rega 2** - 0.02; **rega 4** - 0.021; **rega 6** - 0.022; **rega 7** - 0.023.

Clemmens (1989) num estudo semelhante, ou seja procurando o melhor ajustamento aos dados do avanço observados com a utilização de um modelo de simulação, obteve os valores de 0.173 antes do corte da alimentação aos sulcos, e 0.194 com a totalidade dos dados da curva do avanço.

Sousa (1990) analisou a sensibilidade deste parâmetro utilizando um modelo de simulação de inércia nula, e pode concluir que foi em relação aos tempos de avanço para um comprimento de 70 m, que mais se fez sentir o efeito da rugosidade. Verificou-se um aumento de 93.94 min para 131.50 min, quando o coeficiente de rugosidade passou de 0.04 para 0.15. Um aspecto que se revelou também importante no mesmo estudo, foi o aumento da profundidade de escoamento da lâmina de água à superfície no extremo de montante com aumento da rugosidade, o que obriga a uma preocupação acrescida no correcto dimensionamento dos muretes dos canteiros.

#### 2.1.1.4. Infiltração

Podemos definir o fenómeno da infiltração como a invasão de um meio ou sistema poroso, polifásico, disperso, e heterogéneo (Fernando, 1987), que é o solo, por um fluido molhante, que neste caso é a água, e que é acompanhada pela deslocação de outro fluido não molhante, que é normalmente o ar (Tabuada, 1989).

Quando a água contacta com a superfície do solo, na sequência de um fenómeno natural como a chuva, ou de um fenómeno artificial como a rega, pode

verificar-se um período inicial relativamente rápido da infiltração, dependendo das condições de humidade do solo. Após algum tempo, e à medida que a água atinge maior profundidade no perfil do solo, estes movimentos reduzem-se sobretudo devido à diminuição do gradiente hidráulico, à resistência do ar comprimido nos espaços intersticiais, e à redução do volume destes espaços por aumento da matéria coloidal (Serralheiro, 1988).

Dependendo das condições do solo, mais ou menos estáveis no espaço e no tempo, como sejam a textura, estado de agregação, ocupação do perfil do solo pelas raízes das plantas, condições climáticas e compactação da parcela, as características de infiltração do solo apresentam uma grande variabilidade. Dada a importância que assumem nos processos de rega de superfície, vários têm sido os autores que nos seus estudos lhe têm dado um destaque especial.

Serralheiro (1988) salienta o processo de infiltração como um dos determinantes mais importantes do escoamento, pelo que tem que ser devidamente considerado em qualquer modelo.

Tabuada (1989) considera que para projectar racionalmente sistemas de rega de superfície (sulcos, faixas, e canteiros) e conseqüentemente economizar água e nutrientes, e prevenir a poluição das águas subterrâneas, é necessário o conhecimento ou previsão da quantidade de água infiltrada.

Izadi *et al.* (1988) referem-se à validade das técnicas de controlo da rega que têm sido desenvolvidas, como altamente dependentes da exactidão das funções de infiltração que os modelos de simulação usam.

Para Humpherys e Fisher (1987) o regante tem grande dificuldade de fazer uma predição dos tempos de avanço até ao fim da parcela, dada a variabilidade da taxa de infiltração.

É pois inequívoca a importância do conhecimento das características de infiltração do solo, quer na elaboração de um **projecto** adequado de rega de superfície, que pressupõe uma previsão suficientemente exacta do processo de rega, quer na utilização de modelos de **análise** que muito têm contribuído para uma melhor avaliação da rega de superfície, ou ainda no funcionamento adequado de sistemas operacionais de **controlo** da rega.

As características de infiltração do solo podem ser descritas através de equações de base teórica, cujas soluções assentam em parâmetros físicos do solo, ou de base empírica, cujas soluções são baseadas em parâmetros empíricos. As primeiras têm como principais soluções as de Green-Ampt e Philip, que dadas as simplificações assumidas para o seu desenvolvimento, e dificuldade de contemplarem todos os processos físicos

presentes no solo e respectivas relações, não têm encontrado soluções satisfatórias. A equação de Grenn-Ampt limita a sua aplicação aos métodos de rega que prevejam um escoamento monodimensional, ou seja, a situação em que uma lâmina de água cobre toda a superfície do solo. Tanto a equação de Grenn-Ampt como a equação de Philip, ainda que de base teórica, requerem medições de campo para posterior avaliação empírica de constantes.

A solução das equações de base empírica passa pela obtenção numérica das suas constantes, por via directa em ensaios de infiltração, ou por via indirecta através da derivação da função de infiltração a partir dos dados do avanço.

A equação empírica mais simples, e provavelmente a mais utilizada em rega de superfície, é a de Kostiakov, que normalmente se escreve na seguinte forma

$$Z = kt^a \quad [2.7]$$

onde  $Z$  é a altura de água infiltrada no tempo  $t$ , o expoente  $a$  é o declive da recta de regressão linear obtida por transformação logarítmica das variáveis, e o coeficiente  $k$  representa o valor da infiltração acumulada respeitante à unidade de tempo. Sousa (1990) analisando a sensibilidade de cada um destes parâmetros numa rega simulada, verificou a grande sensibilidade que o modelo demonstrou para as variações do coeficiente  $k$ , evidenciando o expoente  $a$  uma menor sensibilidade.

Se analisarmos a forma derivada desta equação

$$i = akt^{a-1} \quad [2.8]$$

verificamos que a taxa de infiltração  $i$  tende para zero à medida que o tempo tende para infinito, o que é fisicamente incorrecto e não ocorre na realidade, já que deveria tender para um valor constante e igual à condutividade hidráulica saturada.

Para solucionarem esta restrição, alguns autores (Elliot e Walker, 1980) usam uma equação de Kostiakov modificada, também chamada de Kostiakov-Lewis, ou simplesmente de Lewis, que toma a forma:

$$Z = kt^a + i_f t \quad [2.9]$$

onde a constante  $i_f$  representa a taxa de infiltração final ou estabilizada. Podendo descrever melhor a infiltração ao longo de todo o tempo de rega, nalgumas situações revela-se a equação que melhor se ajusta aos valores observados.

Serralheiro (1988) verifica o balanço volumétrico das regas com três tipos de equação de infiltração (Kostiakov, Kostiakov-Lewis, e Philip), e observa que a equação que conduz a erros menores é a equação de Kostiakov-Lewis, ao comparar os volumes infiltrados e excedentes, simulados e observados nos ensaios.

Horton (1940), citado por Sousa (1990), propôs uma equação que inclui um termo exponencial, e pode ser escrita na forma

$$Z = k(1 - e^{-at}) + c_2t \quad [2.10]$$

onde  $k$  é função de um parâmetro que representa a capacidade de infiltração inicial quando o tempo é igual a zero, e de outro parâmetro que traduz o decréscimo da taxa de infiltração. Serralheiro (1988) verificou para esta equação um ajustamento muito deficiente aos dados observados nos ensaios de infiltração.

O Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1974) propõe uma solução que é uma variante da equação de Kostiakov, com os inconvenientes que já foram apontados para esta, e tem a forma

$$Z = kt^a + c_1 \quad [2.11]$$

onde  $c_1$  é uma constante empírica que assume o valor de 7.0 mm para qualquer tipo de solo, quando o tempo é expresso em minutos e a infiltração em mm, e que representa um volume de água inicialmente infiltrado. Os parâmetros  $k$  e  $a$  são valores tabelados e válidos para uma das oito famílias de infiltração, definidas para solos com características de infiltração semelhantes. Apesar da simplificação, esta metodologia tem revelado algum sucesso no projecto de sistemas de rega de superfície, e poderá também fazer uma descrição adequada da infiltração em solos que fendilham, onde a constante  $c_1$  representará aproximadamente o volume de água necessário ao preenchimento das fendas, assim como o volume que se infiltra na área humedecida no início da rega (Merriam e Clemmens, 1985).

Na situação particular de um solo argiluviado, Serralheiro (1988) constatou limitações deste tipo de equação na descrição da infiltração.

### 2.1.1.5. Secção transversal dos sulcos

Uma prática usual nos canteiros é a abertura de sulcos de nível no seu interior, quando se trata de culturas em linhas que são tradicionalmente regadas por este processo. Esta solução apresenta a importante vantagem de concentrar os caudais disponíveis apenas nos sulcos, atingindo a água mais facilmente o final da parcela e portanto melhorando a distribuição da água ao canteiro.

É aceite que a secção transversal dos sulcos afecta a quantidade de água infiltrada através da influência do perímetro molhado, assim como a eficiência hidráulica do sulco para transportar a água (Reddell e Latortue, 1986). Também Sousa (1990), citando Karmeli *et al.* (1978), refere que o escoamento à superfície do solo é necessariamente influenciado pela forma do canal (sulco).

A generalidade dos modelos matemáticos de simulação do escoamento, quer sejam preferencialmente vocacionados para decisões de projecto ou para a análise da rega, requerem informação sobre as relações geométricas entre as dimensões da secção transversal dos sulcos.

Na análise da rega, e considerando que o escoamento se faz em regime variável, não é fácil determinar qual é a melhor forma e dimensões da secção transversal do escoamento para determinadas condições de caudal, infiltração e rugosidade. Na tentativa de encontrar resposta para esta questão Sousa (1990), usando o modelo de simulação **SRFIRRG** (Strelkoff, 1986), considerou diferentes secções transversais dos sulcos e procurou a sua optimização, fixando os outros parâmetros de entrada no modelo.

A secção hidráulicamente mais favorável para um determinado caudal, ou aquela que corresponde a um cálculo da sua optimização na qualidade da rega, é dificilmente executada no campo dado que os derregadores não têm geralmente as dimensões e possibilidades de regulação apropriadas. Durante a rega ocorrem fenómenos de erosão, transporte e deposição de sedimentos que fazem com que a secção transversal dos sulcos se altere de rega para rega. Em relação a este aspecto Serralheiro (1988) verificou alterações da área total da secção transversal dos sulcos, que não eram devidas a terra transportada ao longo dos sulcos, mas a variações dentro da própria secção. A ocorrência de fenómenos erosivos ao longo da parcela de rega é grandemente dependente do módulo parcelar utilizado, que deverá ser inferior ao valor

do caudal máximo não erosivo, determinado empiricamente pela seguinte expressão (Serralheiro, 1988)

$$q = \frac{0.006}{S} \quad [2.12]$$

onde  $q$  é o módulo parcelar em l/s, e  $S$  o declive longitudinal da rasante dos sulcos.

Referimos de seguida alguns estudos onde os autores tentaram analisar a influência da secção transversal, no processo de infiltração em sulcos e nas características do escoamento.

Serralheiro (1988) estudou a influência do perímetro molhado na obtenção das equações de infiltração, com infiltrómetros de sulco com retorno. Este autor constatou que o expoente  $a$  da equação de Kostiakov quase não se altera, verificando-se aumentos significativos no valor do coeficiente  $k$ , quando se considera o perímetro molhado. Neste estudo o autor conclui, de modo análogo ao observado por outros autores (Fangmeier e Ramsey, 1978; Strelkoff e Souza, 1984, citados por Serralheiro, 1988), que a influência da secção transversal dos sulcos nos volumes de água infiltrados, se pode traduzir razoavelmente bem pelo valor do perímetro molhado através do qual se processa a infiltração.

Sousa (1990) fez simulações para sulcos de forma trapezoidal com três larguras de rasto (15, 20 e 25 cm), e dentro de uma gama de inclinação dos taludes dos 15° aos 90° no sentido da optimização da secção transversal dos sulcos, fixados todos os outros parâmetros de entrada no modelo utilizado. O autor verificou uma sensibilidade grande do tempo de avanço, como bom indicador da forma como se processa o escoamento, em relação às variações da inclinação dos taludes dos sulcos. Constatou também uma diminuição da velocidade de avanço ao passar de sulcos de rasto largo (25 cm) para sulcos com rastos menores. O autor verificou ainda um impacto grande do ângulo de inclinação dos taludes sobre a **UD**, cuja variação máxima em solos com taxas de infiltração elevadas foi de 60.7%, quando o ângulo aumentou de 15° para 75°.

Reddell e Latortue (1986) estudaram o efeito da secção transversal dos sulcos na obtenção da equação de Kostiakov com um modelo de simulação que usa dois factores de forma dos sulcos. Estes assumem determinados valores de acordo com a forma da secção (rectângular, triangular e trapezoidal). Os autores observaram uma grande estabilidade dos parâmetros  $a$  e  $k$  da equação de Kostiakov, para as três formas

de secção transversal, dentro de cada uma das situações de infiltração do solo (taxa de infiltração alta, moderada e baixa).

#### **2.1.1.6. Avanço**

A velocidade do escoamento, e portanto a maior ou menor duração da fase de avanço, depende principalmente do caudal, das características de infiltração do solo, da rugosidade, da geometria da secção transversal dos sulcos e do declive longitudinal da superfície onde se processa o escoamento. Para um dado caudal que entra no sulco, uma parte infiltra-se no solo a uma taxa que é decrescente ao longo do tempo em cada secção, pelo que à medida que aumenta a distância do avanço, maior é a superfície infiltrante, e portanto menor é o caudal disponível na frente da lâmina de água. Verifica-se assim uma diminuição gradual do caudal de montante para jusante da parcela. Pode-se pois esperar que para caudais de alimentação maiores ocorram tempos de avanço menores, já que em cada secção será maior o caudal que efectivamente vai contribuir para o escoamento a jusante.

Facilmente se compreende a grande dependência do caudal que contribui para a progressão do avanço, em relação às características de infiltração do solo. Da maneira como ocorre inicialmente o processo de infiltração, e posteriormente da sua evolução ao longo do tempo de avanço, dependerá a velocidade do escoamento na parcela.

Serralheiro (1988) constatou no caso particular de um solo argiluvado, que no início o solo se comporta como muito permeável e o avanço é lento. Logo que a água atinge o horizonte B, quase todo o caudal sobra para contribuir para o escoamento.

A rugosidade da superfície do solo, usualmente quantificada pelo coeficiente de rugosidade de Manning, é particularmente importante na 1ª rega em que apresenta normalmente um valor elevado. Nos sulcos em que não houve uma compactação do solo e destruição dos torrões pela passagem do rodado do tractor, verificam-se tempos de avanço maiores relativamente às regas seguintes. Frequentemente na 3ª ou 4ª regas o valor do coeficiente de rugosidade aumenta devido sobretudo ao desenvolvimento de infestantes nos sulcos, que ocasionam um retardamento importante no avanço da água (Sousa, 1990).

No que respeita à geometria da secção transversal dos sulcos, esta não se altera significativamente ao longo da campanha de rega se os caudais praticados não forem

excessivos. Nos canteiros de nível sendo o declive longitudinal igual a zero, a água terá uma energia cinética relativamente pequena. Contudo, a existência de irregularidades na microtopografia do canteiro com a conseqüente existência de declives positivos e negativos, pode ter uma influência grande na duração do tempo de avanço.

Nos canteiros de nível é importante que a frente de avanço alcance o extremo de jusante da parcela o mais rapidamente possível, não se devendo no entanto verificar a utilização de caudais erosivos. Da rapidez do avanço da água na parcela dependerá a UD, tanto mais quanto maior for a permeabilidade do solo (Sousa, 1990).

O escoamento durante a fase de avanço foi descrito por Elliot e Walker (1982) e Latimer e Reddell (1987), sobretudo em modelos de balanço de volume, por uma função empírica do tipo potência que pode ser escrita

$$x = pt_x^r \quad [2.13]$$

onde  $x$  representa a distância do avanço a partir da cabeceira dos sulcos,  $t_x$  o tempo de avanço até à distância  $x$ ,  $p$  e  $r$  parâmetros empíricos de ajustamento, que dependem do tipo de solo e das condições em que se efectuou a rega. Estes parâmetros não têm qualquer significado físico, sendo válidos apenas para a rega em que foram obtidos, por uma das seguintes maneiras: i) por regressão linear, após transformação logarítmica dos valores  $x$  e  $t$  observados; e ii) pelo método dos dois pontos, que consiste em obter os parâmetros, a partir de um sistema de equações estabelecidas para dois pontos conhecidos. Considera-se normalmente metade do comprimento do sulco ou do canteiro ( $L/2$ ), a totalidade do comprimento ( $L$ ) e os tempos gastos para a água atingir estes pontos ( $t_{L/2}$  e  $t_L$  respectivamente). Elliot e Walker (1982) com esta aproximação calcularam os parâmetros

$$r = \frac{\ln(0.5)}{\ln\left(\frac{t_{L/2}}{t_L}\right)} \quad [2.14]$$

e

$$p = \frac{L}{t_L^r} \quad [2.15]$$

Para sulcos, o Soil Conservation Service (USDA-SCS, 1979) considera a lei do avanço descrita pela relação

$$t_x = \frac{x}{f_c} e^{\beta} , \quad [2.16]$$

sendo

$$\beta = g_c \frac{x}{(qS_f)^{1/2}} \quad [2.17]$$

em que  $t_x$  representa o tempo de avanço,  $x$  a distância desde a cabeceira do sulco até ao ponto considerado,  $q$  o caudal unitário,  $S_f$  o gradiente hidráulico médio,  $f_c$  e  $g_c$  coeficientes empíricos da lei do avanço, tabelados e dependentes da família de infiltração. Segundo esta metodologia, e para sulcos horizontais, o gradiente hidráulico médio  $S_f$ , pode ser determinado pela equação

$$S_f = \frac{1}{L} 0.0875 \cdot q^{0.342} \quad [2.18]$$

onde  $L$  tem o significado já anteriormente referido.

### 2.1.1.7. Recessão

Numa rega bem conduzida esta fase deveria teoricamente ser instantânea. Ley e Clyma (1980) consideram que a recessão ocorre, para uma dada estação de observação, quando a água desaparece em cerca de 50% da área da malha representada por essa estação. Shafique (1984) apresenta um modelo de inércia nula para canteiros com sulcos, considerando que a recessão se inicia quando a área ainda com água à superfície do canteiro é igual ou menor que 10% da área original.

No caso dos sulcos com um determinado declive a recessão deveria ocorrer de montante para jusante, com maior ou menor rapidez dependendo dos outros parâmetros da rega. Esta informação não é fácil de obter no campo, sobretudo devido às

irregularidades na abertura dos sulcos, com as rasantes destes apresentando variações de cota.

Sousa (1990) regista esta dificuldade referindo que as observações só teriam plena validade, se fossem feitas as correções necessárias.

De igual modo Tabuada (1989), para as condições em que fez os ensaios de campo, conclui da dificuldade em observar o instante exacto de desaparecimento da água em cada secção do sulco.

Em sulcos com um certo declive, é geralmente mais fácil a obtenção dos tempos de recessão. Em sulcos de contorno e de terra plana Duarte (1988) verificou um bom ajustamento dos tempos de recessão calculados aos observados, por aplicação do programa de avaliação baseado no princípio do balanço volumétrico ANREGA (Serralheiro, 1988). Os tempos de recessão e do avanço observados e simulados por um modelo, foram usados por Serralheiro (1988) como critério de comparação para a selecção das equações de infiltração, obtidas por métodos diferentes.

Reddell e Latortue (1986), referem a necessidade de uma cuidada medição dos tempos de recessão e de avanço, cuja diferença nos dá o tempo de oportunidade de infiltração, para que um modelo de balanço de volume possa ser usado de forma adequada.

## 2.2. Modelação do escoamento

Um modelo, no âmbito de qualquer ramo do conhecimento, é basicamente um utensílio capaz de simular ou reproduzir um fenómeno. Para tal, um conjunto de parâmetros mais ou menos vasto que caracterizam um determinado acontecimento, constituem os dados de entrada do modelo. Os resultados obtidos do modelo são uma predição da forma como decorreria o fenómeno segundo determinadas condições.

No caso particular da rega de superfície o processo a modelar é o escoamento na parcela, que se faz em regime variável com superfície livre, onde têm que se considerar as equações que regem a propagação da frente de avanço na parcela de rega, a variação de caudal e da altura do escoamento em cada secção durante a fase de alimentação e recessão, e a equação que governa o escoamento em meio poroso. Este tipo de escoamento é descrito na forma mais completa pelas equações

de Saint-Venant (Spurgeon e Duke, 1988a) que já foram apresentadas em 2.1. Estas equações não têm solução analítica, pelo que durante muito tempo não tiveram um contributo significativo no conhecimento da rega de superfície.

Strelkoff (1970) desenvolveu um procedimento para a resolução numérica das equações de Saint-Venant, que permitiu importantes avanços no desenvolvimento de modelos matemáticos descrevendo o fenómeno hidráulico em rega de superfície. De referir que Tabuada (1989) obteve soluções das equações de Saint-Venant para o regime variável em rega por sulcos.

Na derivação destas equações têm-se observado os seguintes pressupostos fundamentais (Yevjevich, 1975, citado por Sousa, 1990):

- i) a distribuição vertical das pressões é hidrostática;
- ii) as perdas de carga que se verificam no regime variável não são significativamente diferentes das que ocorrem em regime uniforme;
- iii) o momento referente à água infiltrada considera-se desprezável, o que resulta numa curvatura da superfície do escoamento;
- iv) a superfície do terreno tem declive muito pequeno; e
- v) os coeficientes de velocidade (Boussinesq e Coriollis), assumem-se iguais à unidade.

A resolução das equações de Saint-Venant, como parte fundamental dos modelos de simulação do escoamento, faz-se muitas vezes com o recurso a simplificações na equação da quantidade de movimento. De acordo com a natureza da simplificação, originam-se diferentes tipos de modelos de escoamento: hidrodinâmico completo, de inércia nula, de onda cinemática e de balanço volumétrico.

Nos modelos de onda cinemática também conhecidos como de "escoamento uniforme", considera-se que o declive da linha de energia ou perda de carga unitária é igual ao declive longitudinal da parcela de rega, o que equivale a dizer de forma diferente que há em cada momento e em cada secção, compensação do declive longitudinal da parcela pelas perdas de energia devidas ao atrito do escoamento. Sendo, como se sabe, o declive longitudinal dos canteiros de nível igual a zero, este tipo de modelo de escoamento não se utiliza na simulação deste processo de rega.

A equação da continuidade é usada por todos os modelos sem alterações. O rigor dos resultados obtidos, que deverão ser concordantes com a realidade, assim como a quantidade e detalhe dos dados de entrada, dependem do modelo utilizado.

### 2.2.1. Modelo hidrodinâmico completo

Estes modelos são os que melhor e mais completamente simulam o complexo processo do escoamento em rega de superfície. Caracterizam-se pelo facto de resolverem as equações completas de Saint-Venant sem simplificações, em que a solução das equações do escoamento é obtida por via numérica, sendo normalmente utilizado o método das características (Sousa, 1990).

São modelos bastante complexos que consomem muito tempo de cálculo em computador, e predizem com grande rigor o escoamento em rega de superfície; os seus resultados servem de referência, na comparação com os resultados de outros modelos, o que determina que a sua utilização prática não seja muito difundida.

Vários investigadores modelaram a rega de superfície com recurso a modelos hidrodinâmicos completos, referindo-se de seguida algumas aplicações.

Basset (1971) aplicou o modelo hidrodinâmico para simular o avanço da lâmina de água em faixas, tendo mais tarde expandido o modelo para todo o processo de rega.

Sakkas e Strelkoff (1974) apresentaram também um modelo para o avanço em faixas.

Souza (1981), citado por Sousa (1990), apresentou uma aproximação hidrodinâmica completa para todas as fases da rega por sulcos.

De desenvolvimento mais recente, o modelo **SRFIRRG** (Strelkoff, 1986) oferece outras opções de resolução para além da aproximação hidrodinâmica completa, sendo capaz de analisar todas as fases da rega em sulcos, faixas e canteiros.

O modelo **SRFR 20** (Strelkoff, 1990) constitui um aperfeiçoamento do modelo anterior. No presente estudo usar-se-á a sua última versão, **SRFR 20.5** (Strelkoff, 1992).

### 2.2.2. Modelo de inércia nula

Este modelo assume a simplificação da anulação dos termos inerciais ou de aceleração. Dado que em rega de superfície a velocidade do escoamento é relativamente pequena, ao se desprezar os termos de aceleração o rigor das simulações não é significativamente afectado, de acordo com autores que têm desenvolvido e

aplicado este tipo de modelo (Serralheiro, 1988). Deste modo a equação [2.4] da quantidade de movimento fica resumida a

$$\frac{\delta Y}{\delta x} = S_0 - S_f \quad [2.19]$$

Katopodes e Strelkoff (1977) referem que o modelo de inércia nula conserva bastante exactidão para a rega por faixas quando o número de Froude é menor que 0.2. Todavia Spurgeon e Duke (1988) consideram através da análise dos resultados do modelo em rega por sulcos, que só a análise do número de Froude não constitui um bom indicador da exactidão do modelo de inércia nula. Observaram ainda que os erros resultantes da aplicação do modelo dependem também do comprimento dos sulcos e da taxa de infiltração que, como se sabe, não afectam o número de Froude.

Shafique (1984) apresenta um modelo de inércia nula para canteiros com sulcos.

#### 2.2.4. Modelo de balanço de volume

Os modelos de balanço de volume baseiam-se no princípio da conservação da massa que, num processo de rega, traduz a ideia de que um dado volume de água entrada numa parcela durante a fase de avanço, ou é armazenado à superfície ou é infiltrado ao longo do perfil do solo, o que é expresso pela igualdade

$$V_e(t) = V_a(t) + V_i(t) \quad [2.20]$$

em que até ao instante  $t$ ,  $V_e$  representa o volume total de água fornecido à parcela durante a rega,  $V_a$  o volume de água armazenado à superfície do solo e  $V_i$  o volume de água infiltrado.

Nos modelos de balanço de volume, a equação da continuidade expressa em termos de volume, toma a forma da expressão anterior, ignorando-se a equação da quantidade de movimento.

aplicado este tipo de modelo (Serralheiro, 1988). Deste modo a equação [2.4] da quantidade de movimento fica resumida a

$$\frac{\delta Y}{\delta x} = S_0 - S_f \quad [2.19]$$

Katopodes e Strelkoff (1977) referem que o modelo de inércia nula conserva bastante exactidão para a rega por faixas quando o número de Froude é menor que 0.2. Todavia Spurgeon e Duke (1988) consideram através da análise dos resultados do modelo em rega por sulcos, que só a análise do número de Froude não constitui um bom indicador da exactidão do modelo de inércia nula. Observaram ainda que os erros resultantes da aplicação do modelo dependem também do comprimento dos sulcos e da taxa de infiltração que, como se sabe, não afectam o número de Froude.

Shafique (1984) apresenta um modelo de inércia nula para canteiros com sulcos.

#### 2.2.4. Modelo de balanço de volume

Os modelos de balanço de volume baseiam-se no princípio da conservação da massa que, num processo de rega, traduz a ideia de que um dado volume de água entrada numa parcela durante a fase de avanço, ou é armazenado à superfície ou é infiltrado ao longo do perfil do solo, o que é expresso pela igualdade

$$V_e(t) = V_a(t) + V_i(t) \quad [2.20]$$

em que até ao instante  $t$ ,  $V_e$  representa o volume total de água fornecido à parcela durante a rega,  $V_a$  o volume de água armazenado à superfície do solo e  $V_i$  o volume de água infiltrado.

Nos modelos de balanço de volume, a equação da continuidade expressa em termos de volume, toma a forma da expressão anterior, ignorando-se a equação da quantidade de movimento.

A primeira aproximação de balanço de volume em rega de superfície, desenvolvida através de uma relação com a fase de avanço, é descrita por Lewis e Milne (1938), citados por Latimer e Reddell (1987).

Serralheiro (1988) usa a técnica de balanço de volume de Elliot e Walker (1982), para obter equações de infiltração em sulcos, a partir dos dados do avanço. No mesmo estudo o autor testa as equações de infiltração que, quando incorporadas num modelo de onda cinemática, conduzem a determinados volumes infiltrados e excedentes, que são comparados com os volumes medidos nos ensaios de rega.

Reddell e Latortue (1986) propõem uma técnica de balanço de volume que usa os dados do avanço e da recessão para avaliação da área média da secção transversal molhada em sulcos.

### **2.3. Técnicas de retorno de informação com vista à melhoria da qualidade da rega**

Entende-se por técnica de retorno de informação ou de "feedback", no seu sentido mais lato, como aquela que usa a informação de como decorre ou decorreu um fenómeno, e a usa num processo inteligente para melhor compreensão do mesmo, permitindo eventualmente o seu controlo. No caso concreto da rega de superfície, as técnicas de retorno de informação baseiam-se na observação de campo de determinados parâmetros da rega, com o objectivo de melhorar a avaliação e gestão dos sistemas.

Diz-se que a técnica é usada em tempo real se o controlo da rega resulta de informação que é obtida no decorrer da mesma rega, o que requiere normalmente a utilização de equipamentos e de meios aperfeiçoados. A informação colhida no campo e posteriormente tratada, poderá ser usada para a melhoria dos resultados das regas seguintes, constituindo uma outra modalidade de retorno de informação.

De todos os factores que influenciam a qualidade da rega, as características de infiltração do solo são sem dúvida das mais decisivas sendo, conjuntamente com a rugosidade, difícil a sua avaliação antes ou durante o processo de rega (Clemmens, 1990a).

Smith e Duke (1984) apontam como um dos maiores obstáculos à gestão dos sistemas de rega de superfície, a dificuldade na predição dos parâmetros de infiltração, ocasionada sobretudo pela variabilidade temporal e espacial das características do solo.

Spurgeon e Duke (1988b) salientam que mudanças espaciais e temporais da infiltração limitam o desempenho dos sistemas de rega de superfície, e referem que a percolação da água para camadas inferiores à profundidade das raízes das plantas, provoca um arrastamento dos fertilizantes reduzindo as produções e poluindo as toalhas freáticas.

Sousa e Trout (1992) consideram que a qualidade da rega de gravidade depende fortemente da superfície do solo bem como das características de infiltração, que variam espacialmente e de rega para rega, sendo portanto difíceis de avaliar.

Pode-se assim concluir da dificuldade dos parâmetros de infiltração, determinados pontualmente em ensaios de campo, descreverem de forma conveniente o fenómeno da infiltração alargado a toda a parcela em condições reais de rega. É nesta ordem de ideias, e com o objectivo de melhor se conhecerem as condições da parcela e os seus efeitos na rega, e se proceder às correções/ajustamentos necessários, que recentemente se têm desenvolvido as técnicas de retorno de informação.

O conhecimento acumulado dos agricultores, na combinação dos factores que afectam a qualidade da rega, e a sua utilização na melhoria continuada das técnicas de rega, é de certo modo também uma forma de retorno de informação, porém bastante falível, já que a alteração individual ou em combinação dos factores, provoca uma modificação do desempenho do sistema que não é previsível pelos regantes.

É pois necessário, tal como refere Clemmens (1990a), um grande esforço na melhoria da gestão dos sistemas de rega, destacando-se entre várias razões a consequência directa na economia de água, particularmente quando esta é um factor limitante.

O potencial de aplicação das técnicas de retorno de informação para controlo da rega é ainda um pouco incerto (Clemmens, 1992), havendo contudo resultados de estudos que fazem antever um futuro promissor. Spurgeon e Duke (1988b) referem resultados de um estudo em que se verificou uma diminuição de 85% das perdas de água por percolação, assim como um aumento da UD.

Clemmens (1990a) compara eficiências de aplicação obtidas com a gestão da rega pelos agricultores, com as obtidas na aplicação das técnicas de retorno de informação. Este autor observa que para dotações de rega elevadas, aquele indicador assume para ambas as formas de manejo valores semelhantes. Porém para valores mais

baixos de dotação de rega, o sistema de controlo com retorno de informação, faz aumentar a  $E_a$ .

Das várias modalidades de técnicas de melhoria da qualidade da rega com retorno de informação, que serão abordadas de uma forma mais pormenorizada nas secções seguintes, podem-se agrupar em três grandes categorias, cada uma correspondendo a diferentes equipamentos utilizados e a condições de aplicação próprias. Assim:

1) existem técnicas de controlo da rega denominadas usualmente como de clássicas, em que os parâmetros que dizem respeito à parcela não são estimados ou otimizados, estando o sistema de alimentação apto a regular o caudal ou o tempo de aplicação, mediante a recepção de um sinal da parcela;

2) noutra categoria, é possível com os meios utilizados uma estimação e optimização dos parâmetros da parcela (infiltração e rugosidade), permitindo um controlo do caudal e tempo de aplicação em tempo real, o que requiere normalmente equipamento mais sofisticado. As técnicas incluídas nas duas categorias anteriores estão, como é óbvio, relacionadas com esquemas mais ou menos automatizados, de que resulta uma vantagem importante que é a economia de mão-de-obra;

3) a terceira categoria inclui técnicas de optimização da rega com informação de campo que não são utilizadas em tempo real. Será uma destas técnicas, com uma metodologia própria, que será desenvolvida no presente estudo. Nestas técnicas, mediante a utilização de um modelo de simulação, procuram-se relações entre as variáveis intervenientes no processo de rega, por forma a que se verifique um bom ajustamento dos resultados simulados aos observados no campo.

### **2.3.1. Dificuldades na predicção da qualidade da rega**

Os resultados dos sistemas de rega de superfície dependem grandemente, como é compreensível, das características de infiltração e da superfície onde ocorre o escoamento (Sousa e Trout, 1992). As avaliações de campo destes parâmetros incorporadas num modelo de simulação como dados de entrada, permitem fazer uma predicção da qualidade da rega. A interpretação dos resultados simulados pelo modelo na análise da rega, ou na concepção de projectos de rega de superfície, deve sê-lo com a consciência de que os parâmetros mal avaliados em ensaios de campo, influenciam o

comportamento dos outros parâmetros intervenientes na simulação do processo de rega.

A este propósito Clemmens (1990b) afirma que erros nos valores dos parâmetros pressupostamente conhecidos, alteram os resultados da estimação dos parâmetros que se pretende conhecer. Particularizando, o mesmo autor refere que erros de medida no caudal e nos tempos de avanço, terão influência na estimação dos outros parâmetros da rega.

Adicionalmente aos erros de avaliação, ou avaliações menos rigorosas dos parâmetros da rega, há que considerar a variabilidade espacial e temporal de alguns na dificuldade de predição da qualidade da rega.

A variabilidade espacial de alguns dos parâmetros da rega pode estar relacionada, de acordo com Sousa e Trout (1992), com: a textura do solo, a traficabilidade dos tractores e alfaias agrícolas, mobilizações de solo e práticas de rega.

Os parâmetros que são mais frequentemente usados na comparação dos resultados simulados por um modelo e os resultados observados em ensaios de campo, são os tempos de avanço, os tempos de recessão, e os volumes excedentes no final da parcela. Obviamente que este último parâmetro de comparação é utilizado unicamente em parcelas não bloqueadas no extremo de jusante.

As dificuldades expostas e o imperativo da melhoria da qualidade da rega de superfície, fazem-nos pensar na necessidade do desenvolvimento e aplicação das técnicas de retorno de informação, com capacidade de serem usadas em tempo real ou não. Na realidade os regantes fazendo uso da sua grande experiência, e não podendo prever as variabilidades que ocorrem, controlam as regas ajustando os caudais e estabelecendo os tempos de rega, para que os resultados sejam aceitáveis. Noutra perspectiva desta realidade Serralheiro (1988) refere que os sistemas poderão ser construídos e inicialmente conduzidos de acordo com os elementos de projecto, como por exemplo a dimensão das parcelas, recolhendo-se posteriormente das próprias regas elementos de análise que permitirão otimizar as suas qualidades.

### **2.3.2. Condições e aplicação das técnicas de retorno de informação de campo**

Com a aplicação das técnicas de retorno de informação, diferentes formas de mecanização e automatização dos sistemas foram desenvolvidas, acompanhadas

normalmente de um aumento da qualidade da rega. Havendo algumas questões por resolver na automatização total dos sistemas, a semiautomatização é muitas vezes a solução mais viável. Procuraremos ponderar as condições e dificuldades de aplicação das técnicas de retorno de informação, a técnica mais adequada a cada tipo de solução, assim como o equipamento utilizado.

Num aproveitamento hidroagrícola, os sistemas de rega na parcela estão fortemente dependentes do projecto e modo de gestão dos canais primários e secundários. Com sistemas de distribuição de água pouco flexíveis, como sejam os esquemas em rotação e em arranjo (Pereira, 1990), a automatização dos sistemas é bastante dificultada. Existem pois, a montante da parcela de rega, restrições à aplicação das técnicas de retorno de informação que são difíceis de solucionar. A este respeito Sousa e Trout (1992) afirmam que para uma total automatização dos sistemas de rega, a forma de distribuição das redes teria que ser organizada num esquema a pedido, ainda que reservatórios locais pudessem resolver esta necessidade.

Dado que na rega por sulcos as condições são significativamente diferentes das verificadas nas faixas e canteiros (Clemmens, 1989), é compreensível que a técnica de retorno de informação dependa do tipo de sistema de rega de superfície. Na rega por sulcos com declive, é reconhecido que uma redução do caudal após se ter completado o avanço poderá aumentar significativamente a *Ea*. Neste processo de rega o hidrograma óptimo de alimentação aos sulcos, deverá começar com o caudal máximo não erosivo, e depois de completado o avanço ser ajustado continuamente, com o consequente aumento da *UD*, e redução das perdas por excedente em sulcos não bloqueados. O momento apropriado do corte da alimentação também contribuirá para o aumento da qualidade da rega. Deste modo, a técnica de retorno de informação mais adequada para este processo de rega, deverá incluir uma fase de estimação dos parâmetros e optimização dos mesmos no sentido de um controlo contínuo do caudal.

Outra questão importante referida por Clemmens (1992) é a localização dos sensores do avanço, por forma a que representem as condições médias da parcela, já que os tempos de avanço são variáveis de sulco para sulco, e é com base naqueles que os parâmetros são estimados. Também a localização do primeiro sensor no sentido do escoamento, não deverá ser muito distante da cabeceira dos sulcos, para que seja possível proceder a ajustamentos na rega em tempo oportuno (Smith e Duke, 1984).

Para os sistemas com canteiros de nível, considerando as suas particularidades, a teoria recomenda que a água seja aplicada ao canteiro no tempo mais curto possível, limitado contudo pelo caudal máximo não erosivo, contribuindo-se assim para o aumento da *UD* e para uma eficiência potencial maior (Clemmens, 1990a). É provável

que uma redução do escoamento para o fim da fase de alimentação, ocasione um melhor desenvolvimento das curvas de avanço e recessão, no sentido do aumento da UD. Para este processo de rega, a técnica de retorno de informação mais adequada para aumentar os seus resultados, deverá contemplar uma optimização e controlo do tempo de aplicação.

A necessidade da estimação do armazenamento superficial é maior com a diminuição do declive longitudinal da parcela (Clemmens, 1992), contribuindo-se para o aumento do volume e rigor de informação da parcela, pelo que será necessário utilizar sensores que avaliem a profundidade do escoamento.

Para além das soluções técnicas mais apropriadas para cada situação, os utilizadores devem ponderar também a compatibilidade entre os resultados acrescidos e os custos do equipamento. É evidente que esta compatibilidade não poderá ser uma mera comparação de números, já que existem factores de ordem social e ambiental que são dificilmente mensuráveis.

Haverá muitos casos onde projectos apropriados de rega de superfície podem apresentar qualidades consideráveis, com práticas correntes e tradicionais de rega. Clemmens (1990a) aponta um exemplo em que, numa parcela de rega e segundo resultados teóricos, a eficiência média de aplicação passava de 70% para 85%, quando o seu comprimento era reduzido de 400 para 200 m.

Este tipo de considerações, numa perspectiva da utilização das técnicas pelos agricultores, em nada deverão desencorajar o prosseguimento da investigação, exactamente para que as limitações que hoje lhe são apontadas venham no futuro a ser ultrapassadas.

Relativamente ao **equipamento utilizado**, que será diferente de acordo com a técnica utilizada, pode classificar-se de uma forma global em três categorias:

- 1) equipamento de recolha dos dados na parcela, normalmente designados por sensores;
- 2) equipamento que estabelece a comunicação entre os locais de medição na parcela, e os receptores que são colocados usualmente próximo dos órgãos de controlo;
- 3) meios para a estimação e optimização dos parâmetros da rega e equipamento de controlo.

O material incluído na primeira categoria, ou seja os **sensores**, pode ser usado para diferentes avaliações na parcela, como sejam o avanço, a recessão, o caudal excedente no final da parcela ou a profundidade do escoamento. A sua localização na parcela de rega, à excepção dos sensores do caudal excedente, tem sido alvo de alguns

estudos para que as avaliações sejam representativas da área da parcela, e para permitirem o ajustamento dos sistemas algum tempo antes de completado o avanço. Os sensores do avanço e recessão podem ser do tipo bóia com interruptor (Clemmens, 1992), ou serem dotados com dois electrodos, que são postos em contacto em presença da água, desencadeando um sinal eléctrico (Humpherys e Fisher, 1987).

Os sensores para avaliação da profundidade do escoamento, normalmente requerida nos canteiros para cálculo do coeficiente de rugosidade (Clemmens, 1990a) e armazenamento superficial, apresentam uma complexidade maior do que os usados para a medição do avanço e recessão.

Relativamente ao equipamento que estabelece a **comunicação** entre a parcela e os receptores, têm sido desenvolvidos e empregues essencialmente dois tipos que utilizam diferentes princípios de transmissão de sinais: por ondas de rádio (Clemmens, 1992) e raios infravermelhos (Humpherys e Fisher, 1987). Segundo estes autores a forma de transmissão por raios infravermelhos apresenta relativamente à transmissão por ondas de rádio, as seguintes vantagens: é normalmente mais barata, não está sujeita a interferências eléctricas e não requiere licença para o seu uso.

Existem também dispositivos mecânicos que mostram bandeiras, como um sinal para que o regante proceda a algum ajustamento, incluindo-o na técnica de controlo da rega, no que se poderá considerar um sistema semiautomático.

Num sistema que envolva optimização e controlo da rega, é requerido um microcomputador com o respectivo **hardware** de estimação e optimização dos parâmetros em tempo real. Clemmens (1990a) refere-se a esta exigência como uma limitação no presente, podendo-se prever que num futuro próximo o regante com o auxílio de uma calculadora, introduza a informação da parcela e lhe sejam aconselhados os ajustamentos a efectuar.

Outro componente integrante nestes sistemas são as **válvulas** que, recebendo informação do computador, controlam automaticamente o caudal em cada sulco ou num grupo de sulcos (Smith e Duke, 1984).

Nas denominadas técnicas clássicas de retorno de informação, a fase de estimação/optimização dos parâmetros de rega não é prevista, sendo necessário apenas um **receptor** que é dotado normalmente de um **sequenciador** (Humpherys e Fisher, 1987). Este, ao receber um sinal de uma parcela determina a abertura ou fecho da comporta ou válvulas que a servem, dado que as parcelas são regadas numa ordem determinada.

O controlo da rega em canteiros, cujo sistema de alimentação envolva comportas, poderá ser feito com **temporizadores** em alternativa às técnicas de retorno de informação (Humpherys e Fisher, 1987).

### **2.3.2.1. Melhoria da qualidade da rega com informação de campo**

A melhoria da qualidade da rega com recurso à utilização de um modelo de simulação, permite com base em informação de campo, o ajustamento de variáveis relacionadas com as condições da parcela. As curvas de avanço e de recessão são os parâmetros de comparação normalmente usados, no sentido de se procurar o melhor ajustamento do conjunto de valores observados na parcela aos simulados pelo modelo. Com este procedimento ultrapassa-se a dificuldade ou deficiência de determinações pontuais na parcela, não serem representativas da realidade de toda a parcela de rega. Esta técnica não sendo utilizada em tempo real, pode no entanto sugerir recomendações para as regas sucessivas, dado que as condições não variam significativamente (Clemmens, 1990a). Para além deste aspecto convirá referir que no domínio da melhoria da análise da rega o seu interesse é evidente.

Importa salientar que, para se obterem resultados satisfatórios com esta técnica, todas as avaliações de campo têm que ser conduzidas com bastante rigor, para que os cálculos dependentes daquelas não comportem os efeitos dos erros de avaliação.

Clemmens (1990b) tendo determinado o valor do expoente  $a$  da equação de infiltração de Kostiakov a partir da média dos valores dos ensaios de infiltração com duplo anel, procurou o melhor ajustamento em 75% e 100% da curva de avanço para determinar o valor do coeficiente  $k$ , para vários valores de coeficiente de rugosidade.

### **2.3.2.2. Controlo da rega em tempo real**

As técnicas de controlo da rega em tempo real usam medições efectuadas por sensores para estimação das condições da parcela, sendo posteriormente determinados num processo de optimização o caudal e o tempo de corte da alimentação, que conduzam aos resultados optimizados da rega (Clemmens, 1990a). Nas técnicas

denominadas de clássicas há uma resposta a um sinal enviado da parcela, a que corresponde uma regulação do valor do caudal ou do tempo de aplicação, não existindo uma fase de optimização. Em qualquer destas modalidades, uma característica importante e definidora da técnica é a de que a acção de controlo seja executada durante o tempo de duração da rega.

Pelo facto de contribuírem para o aumento da qualidade da rega, tal como outras técnicas, e de estarem normalmente relacionadas com sistemas automatizados de rega, algumas vantagens são apontadas por diversos autores.

Smith e Duke (1984) registam que uma maneira fácil de determinar os parâmetros da infiltração durante a rega, atenuaria a sua variabilidade espacial e temporal na parte restante da rega.

Spurgeon e Duke (1988b) consideram que a utilização de medições em tempo real para ajustar o caudal e o tempo de aplicação, representam um avanço potencial na rega de superfície.

Humpherys e Fisher (1987) referem que a automatização dos sistemas de rega em canteiros é conveniente para o regante, já que diminui o emprego de mão-de-obra e aumenta a eficiência de rega.

Os modelos de simulação de rega de superfície foram inicialmente usados na concepção de projectos (Clemmens e Dedrick, 1982), no entanto o incremento dos sistemas de controlo da rega promoveram o seu desenvolvimento e adaptação, como parte fundamental na automatização dos sistemas e aplicação das técnicas de retorno de informação, apontando-se de seguida alguns estudos que contribuíram para o seu aperfeiçoamento.

Reddell e Latortue (1986) propõem um modelo de balanço de volume que usa os tempos de avanço e recessão para avaliação da área média da secção transversal molhada em sulcos, e para predição do parâmetro  $k$  da equação de Kostiakov.

Spurgeon e Duke (1988a) promovem um estudo para selecção de um modelo de simulação de rega por sulcos, com vista ao controlo da rega em tempo real, e do qual concluem que os modelos de onda cinemática e de balanço de volume, pelas simplificações que comportam, poderão apresentar algumas limitações na aplicação das técnicas de retorno de informação.

Spurgeon e Duke (1988b) desenvolvem um algoritmo de controlo, que impõe ao sistema de alimentação a sulcos, o máximo caudal não erosivo durante a fase de avanço e posteriormente um caudal próximo da taxa de infiltração, para obtenção de valores elevados de  $E_a$ .

Smith e Duke (1984) usam os dados de sensores em 30 pontos do avanço em sulcos, para determinarem a sua localização óptima, que permita em tempo real a modificação oportuna do caudal.

Latimer e Reddell (1987) descrevem a aproximação de balanço de volume e o controlo do sistema **ARFIS** (Advance Rate Feedback Irrigation System), o qual é composto pelo equipamento clássico de um sistema automático de controlo em tempo real da rega por sulcos, com técnicas de retorno de informação. Assim, o sistema é composto por:

- 1) sensores para medição do avanço da lâmina de água, localizados em dois pontos do sulco;
- 2) sistema de transmissão/recepção por raios infravermelhos ou ondas rádio, dos dados do avanço registados pelos sensores para o computador;
- 3) computador que estima os parâmetros da infiltração, optimiza o tempo de rega e o caudal; e
- 4) válvulas reguláveis automáticas, para controlo contínuo do caudal de alimentação a cada um dos sulcos.

Neste estudo foram usados dois modelos de balanço de volume, cuja distinção consistia na possibilidade de considerar ou não o armazenamento superficial, com o objectivo de testar a vantagem da sua inclusão no modelo.



# **ESQUEMA E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS**

**CAPÍTULO 3**

### **3. ESQUEMA E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS**

Referem-se neste capítulo os materiais e métodos usados nos trabalhos experimentais, que conduziram aos resultados em que se apoia o presente estudo. A experimentação de campo, que decorreu nas campanhas de rega de 1992 e 1993, foi conduzida de acordo com a informação que se pretendia obter, com o material disponível para o efeito, e com o rigor possível em condições de campo. Relativamente a este último aspecto, saliente-se que a repetição de algumas avaliações de campo em 1993 foi essencial para o aperfeiçoamento das técnicas usadas e para a precisão dos resultados obtidos, questão fundamental na metodologia desenvolvida.

Nesta secção, para além da descrição das experiências e dos materiais utilizados, apresentam-se alguns resultados.

#### **3.1. Localização e caracterização do campo de ensaios**

Toda a experimentação de campo decorreu na Estação Experimental António Teixeira do ex-Departamento de Regadio do I.N.I.A. (Instituto Nacional de Investigação Agrária), situada próximo de Coruche (Figura 3.1). Ocupa uma área de 42.5 ha, localiza-se à latitude de 38° 56' 38", longitude 8° 30' 40" e altitude compreendida entre os 17 e os 23 m. O facto de se situar numa zona representativa do Vale do Sorraia, onde o processo de rega por canteiros ocupa vastas áreas, e ainda pelos meios e apoios aí disponíveis, foram razões decisivas para a escolha do tema e do esquema experimental que aí desenvolveu.

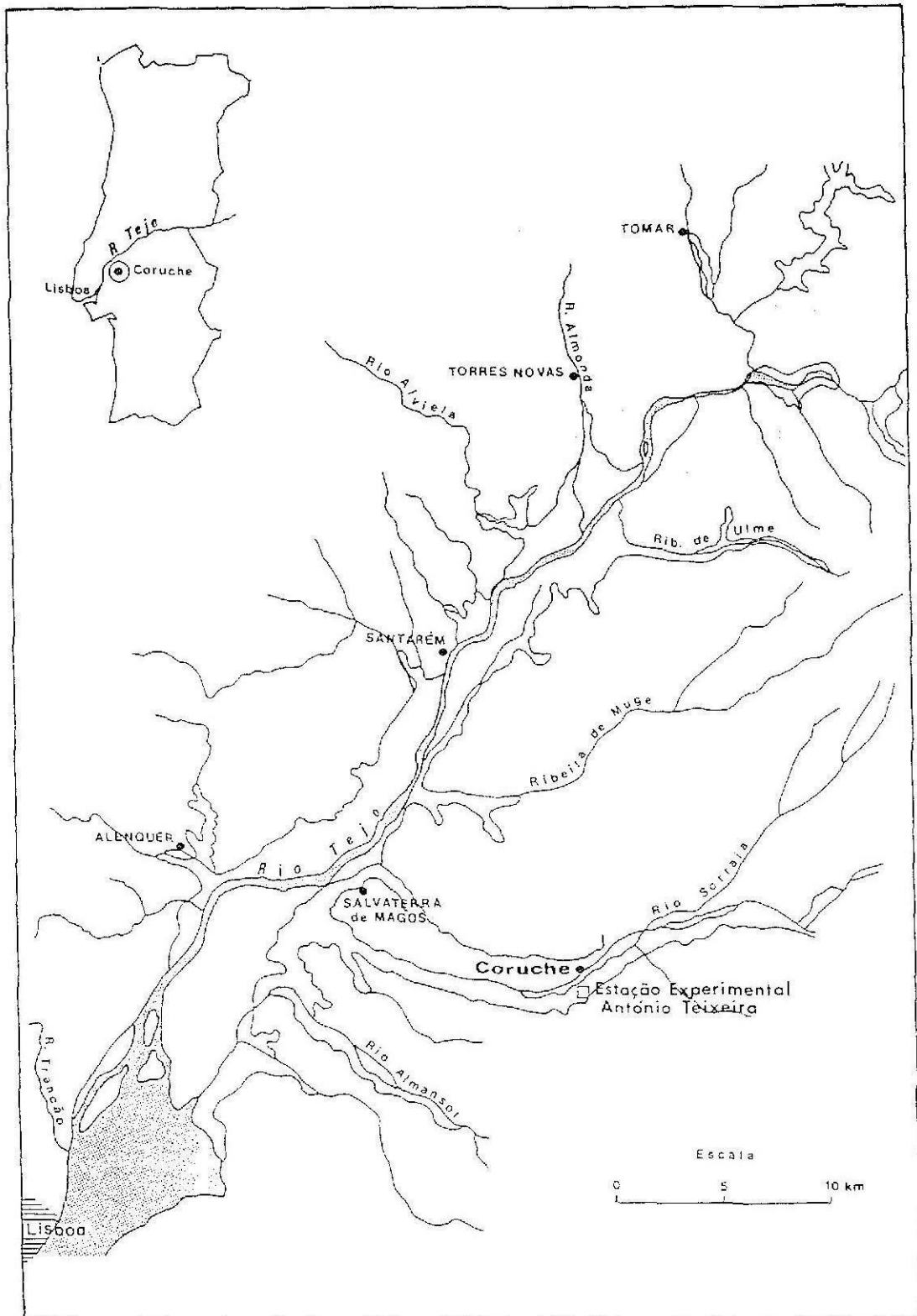


Figura 3.1 - Localização da Estação Experimental António Teixeira (Sousa, 1990).

A estação experimental está dividida em parcelas numeradas conforme ilustra a Figura 3.2, que estão distribuídas por duas categorias de solos. Os talhões 1 a 17 correspondem a uma mancha de aluviosolos modernos, não calcários húmicos, inundáveis.

A totalidade dos ensaios decorreu no canteiro 5, cuja caracterização hidropedológica deste campo se encontra descrita detalhadamente em Sousa (1990).

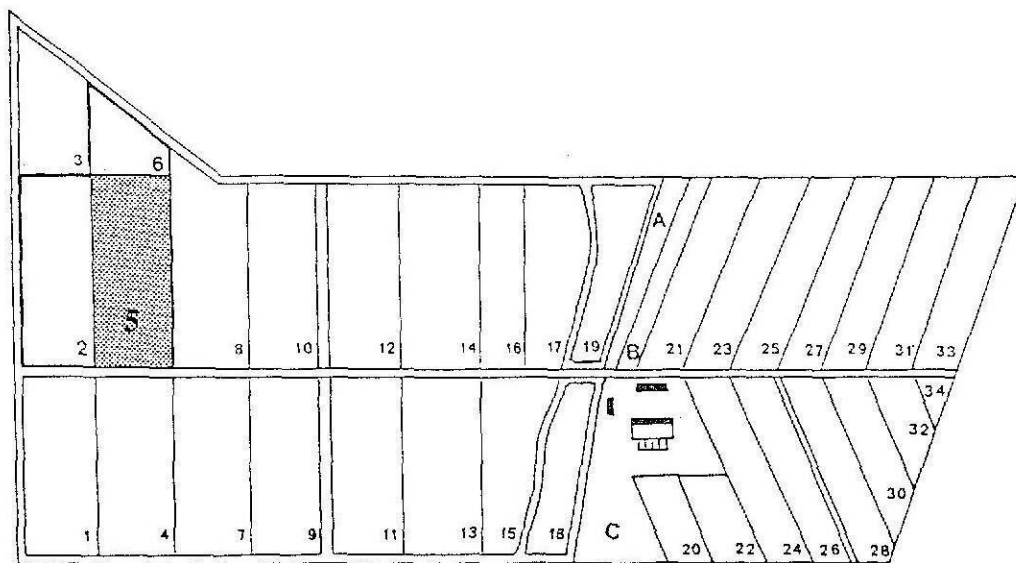


Figura 3.2 - Planta da Estação Experimental António Teixeira, com a localização do canteiro onde decorreram os ensaios (adaptado de Sousa, 1990).

### 3.2. Nivelção do canteiro

Já foi referido em 2.1.1.2, a importância da nivelção do canteiro para que a distribuição da água na parcela se faça facilmente e de uma forma regular. A operação de nivelção com equipamento tradicional revela-se trabalhosa e pouco rigorosa. Com a difusão cada vez maior de equipamento laser, os trabalhos têm sido facilitados e a sua precisão aumentada. Considera-se, na prática, que um canteiro está nivelado de forma aceitável, se apresentar desvios em relação à cota média inferiores a mais ou menos 1.5 cm, em pelo menos 80% da sua área (Dedrick *et al.*, 1982).

O canteiro 5 foi sujeito em 1984 a uma primeira nivelção com importantes movimentações de terra. Procedeu-se a uma operação de manutenção anual, tal como vinha sendo feito em anos anteriores. Apesar disso observámos durante os ensaios de rega na campanha de 1992 diferenças no avanço da água no terreno, e aumentos consideráveis do nível da água nos sulcos no extremo de montante, o que se deveu a deficiências da nivelção.

### 3.3. Ensaios de rega

Os ensaios de rega foram efectuados no canteiro 5 (Figura 3.2), apresentando uma largura de 80m e um comprimento de 210m.

A cultura instalada no canteiro foi o milho híbrido, em linhas espaçadas de 0.75m. Foram abertos sulcos de nível no canteiro quando as plantas tinham 40-50 cm de altura, com o auxílio de um abre-sulcos comandado por equipamento laser. O emissor laser foi regulado para um declive longitudinal e transversal igual a zero, plano esse captado pelo receptor colocado junto da alfaia e que está ligado ao sistema hidráulico do tractor. Este comanda a profundidade de abertura dos sulcos, ao operar as duas rodas ligadas ao abre-sulcos, que se deslocam à superfície do terreno.

O abre-sulcos ou derregador compõe-se essencialmente de uma barra transversal, na qual se pode regular o espaço entre conjuntos constituídos por um braço, um bico e dois discos, que oferecem vários modos de regulação. Assim o braço pode ser ajustado em altura, o bico permite uma variação do ângulo de ataque ao solo, e nos discos pode-se regular a abertura e inclinação dos taludes. A regulação usada na abertura dos sulcos foi aquela que numa primeira análise oferecia boas condições ao escoamento da água, no que diz respeito à inclinação dos taludes e à profundidade de abertura dos sulcos.

Nos ensaios de 1993 o abre-sulcos foi complementado com rodas compactadoras (Foto 3.1), que ao deslocarem-se nos sulcos lhe conferem a forma transversal trapezoidal.

Nos ensaios de 1992 o canteiro foi dividido em três grupos de 35 sulcos, tendo sido feitas avaliações de campo em 2 sulcos de cada grupo. A seguir à 1ª rega deixaram de se fazer observações num dos grupos, dada a grande dificuldade no avanço da água ao longo dos sulcos, cuja justificação se deve às razões já apontadas em 3.2. Este

esquema foi alterado nos ensaios de campo de 1993, em que foram efectuadas avaliações apenas no grupo central de sulcos.

Ao longo das duas campanhas de rega, foram controladas três regas que são designadas ao longo deste estudo de 1ª, 2ª e 3ª rega, ainda que se tenham efectuado mais regas neste canteiro. Os dados recolhidos no campo são sobretudo úteis na utilização de um modelo matemático de simulação da rega, e na obtenção das equações de infiltração.

A dotação pretendida em cada rega era de 40 mm, que está relacionada com o tempo de rega, com o caudal, e com a área servida por cada sulco.

### 3.3.1. Sistema de distribuição da água à parcela

A distribuição da água aos sulcos no primeiro ano de ensaios foi assegurada por uma **manga flexível** de plástico, na qual foram instaladas válvulas que alimentavam individualmente cada um dos sulcos, o que pode ser observado de forma mais pormenorizada na Foto 3.2. No segundo ano de ensaios, e cumprindo o mesmo objectivo, foi utilizado um **tubo PVC** de 200 mm de diâmetro com janelas reguláveis de caudal, distribuindo a água individualmente aos sulcos (Foto 3.3).

Estes sistemas de distribuição são particularmente utilizados em parcelas de rega horizontais ou com pequeno declive, apresentando relativamente a outros sistemas de distribuição algumas vantagens. Evitam-se perdas de água por evaporação e por infiltração, que ocorreriam numa vala de alimentação não revestida, permitem uma facilidade grande na instalação e utilização durante as regas, o que se traduz numa poupança de mão-de-obra, e oferecem ainda a possibilidade de regulação do caudal.

Antes da 1ª rega a manga foi instalada a toda a largura do extremo de montante do canteiro 5 (Figura 3.3), tendo obedecido a alguns cuidados. A manga foi ligada a um medidor de caudais adjacente à boca de rega cuja ligação foi dobrada para reforço. Para evitar o rolamento quando cheia de água, a manga foi assente numa pequena vala aberta ao longo da cabeceira. O final da manga permaneceu aberto e elevado a cerca de 50 cm do nível do solo. O seu enchimento inicia-se com um caudal pequeno, aumentando gradualmente à medida que se vão instalando as válvulas através de um procedimento fácil.

O tubo PVC é comercializado em módulos com um comprimento de 6 metros, sendo a sua ligação ao longo de toda a largura do canteiro fácil e rápida.

Em cada rega o número de sulcos alimentados simultaneamente, dependia do caudal disponível na boca de rega.

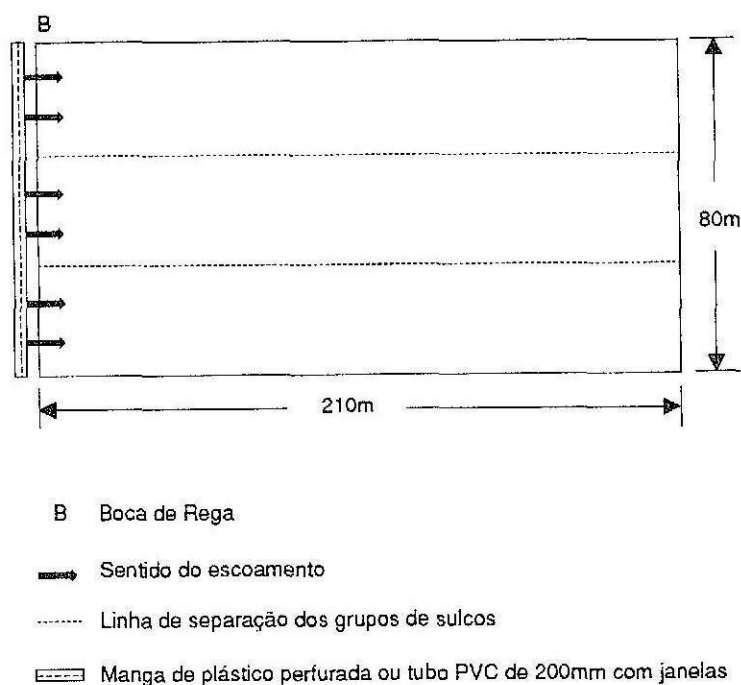


Figura 3.3 - Sistema de distribuição da água ao canteiro 5.

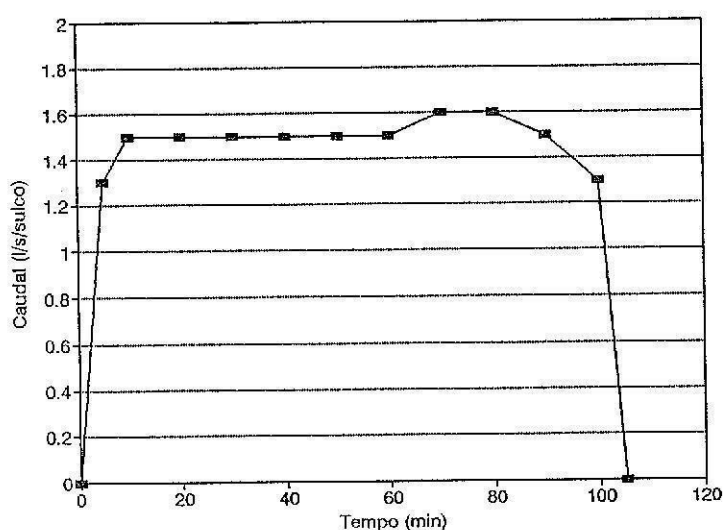
### 3.3.2. Caudais de alimentação aos sulcos

Na rega em canteiros de nível, dado que não se dispõe de gradiente gravitacional, os caudais devem ser elevados, já que a maior ou menor velocidade do escoamento está apenas dependente da carga disponível. Este aspecto é atenuado quando o caudal é concentrado em pequenos canais com um determinado espaçamento, que corresponde à armação da superfície do canteiro em sulcos/camalhões.

No início da rega, e posteriormente a intervalos de tempo regulares, avaliaram-se os caudais à saída da boca de rega num medidor de caudais de secção semi-circular.

Foram efectuadas medições discretas intervaladas de 10 minutos dos caudais de alimentação aos sulcos, tendo revelado uma situação de relativa uniformidade, como pode ser observado na Figura 3.4, referente à 2ª rega. Esta estabilidade já tinha sido

constatada por Sousa (1990) nas bocas de rega que servem o canteiro 5. Os caudais nos diferentes grupos de sulcos mostraram ser bastante semelhantes, pelo que os valores representativos de cada rega nos ensaios de 1992 são os seguintes: **1ª rega** - 1.6 l/s/sulco; **2ª rega** - 1.5 l/s/sulco e **3ª rega** - 1.8 l/s/sulco. Nos ensaios de 1993 registaram-se valores semelhantes: **1ª rega** - 1.5 l/s/sulco; **2ª rega** - 1.8 l/s/sulco e **3ª rega** - 1.8 l/s/sulco.



**Figura 3.4** - Hidrograma dos caudais de alimentação a um sulco de nível do canteiro 5, 2ª rega, em 27/07/92.

A avaliação dos caudais foi feita na cabeceira dos sulcos, de acordo com a Figura 3.6 e Foto 3.4, com o auxílio de medidores portáteis de soleira espessa modificada, e confirmados por medição volumétrica com um recipiente graduado e um cronómetro, num procedimento também usado por Reddell e Latortue (1986). Todos os medidores portáteis utilizados nas avaliações de campo são de forma triangular sendo a secção de controlo trapezoidal, apresentando duas vantagens importantes: acomodação a uma larga gama de caudais, e a sua grande tolerância para funcionamento submerso (Replogle e Birth, 1983, citados por Sousa, 1990). Os medidores apresentam as seguintes características: comprimento da soleira 75 mm, espessura da soleira 112 mm, gama de caudais que podem ser medidos 0.13 - 5.0 l/s, e ângulo de abertura 90°. A planta e cortes deste tipo de medidores de caudais são explicitados na Figura 3.5.

Estes medidores sendo leves e pequenos, podem ser com facilidade transportados de um lugar para outro, o que os torna especialmente indicados para a medição de caudais em sulcos.

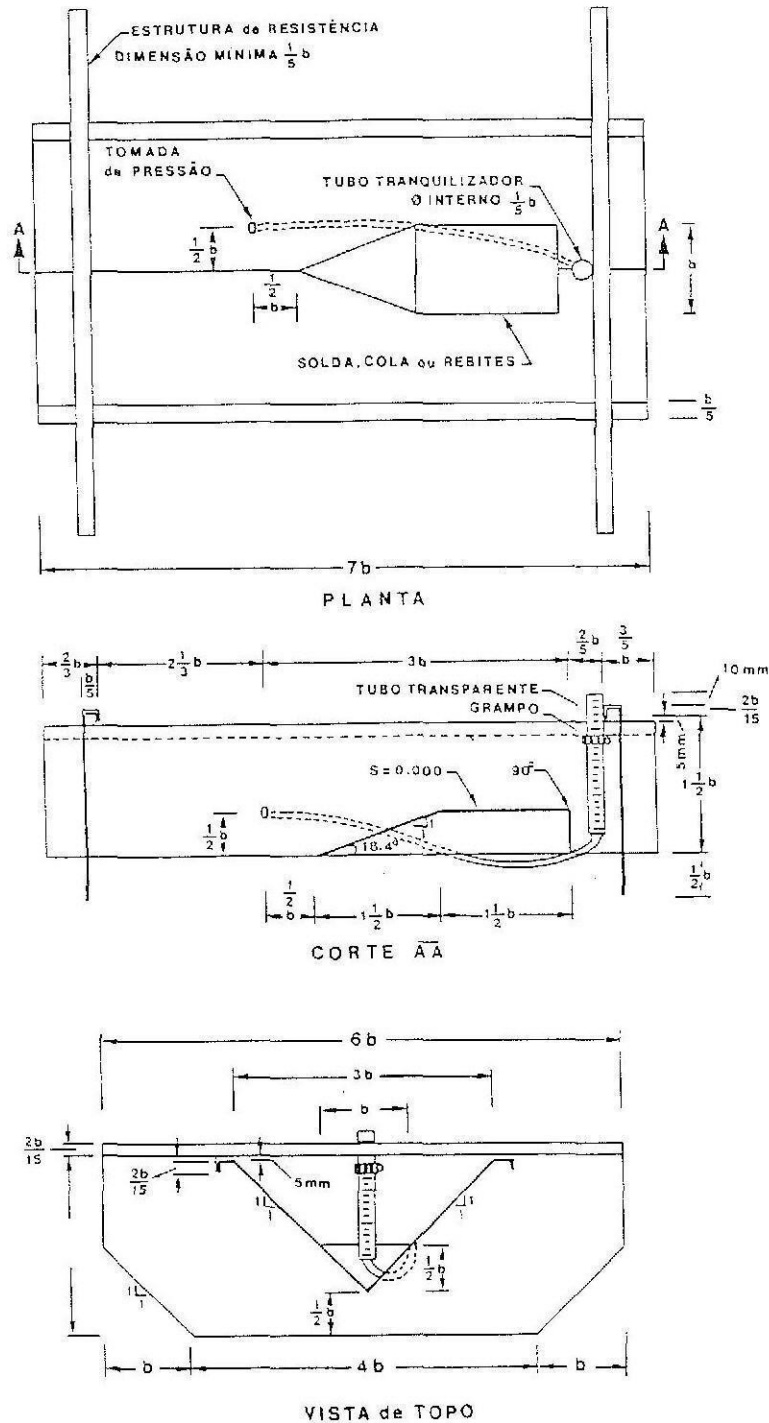


Figura 3.5 - Medidores portáteis de soleira espessa modificada; planta e cortes (Sousa, 1990).

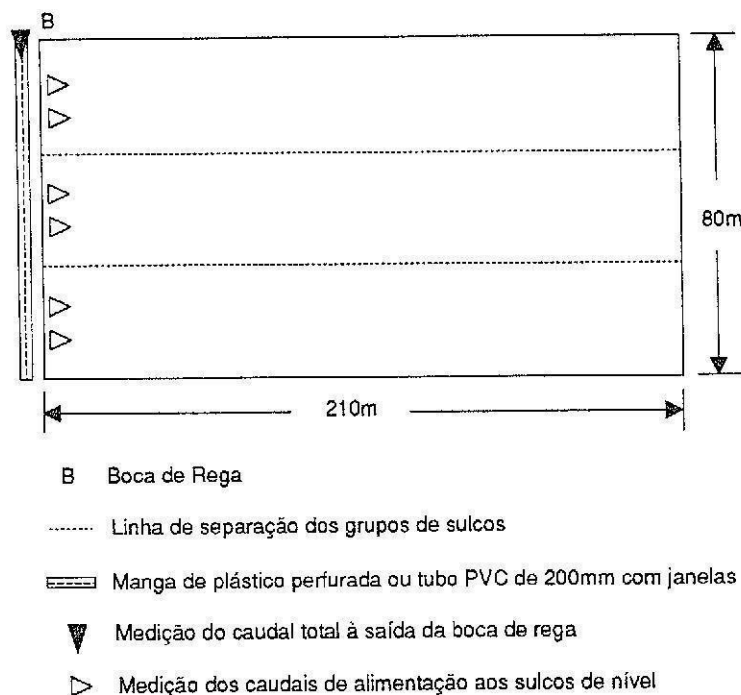


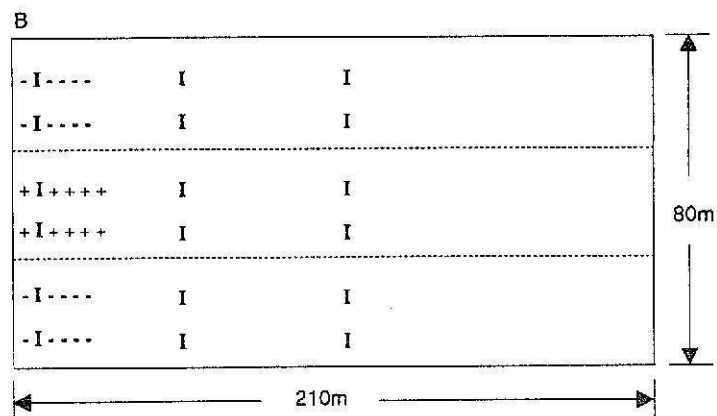
Figura 3.6 - Medição dos caudais à saída da boca de rega e na cabeceira dos sulcos.

### 3.3.3. Profundidade do escoamento

Na medição da profundidade do escoamento utilizaram-se pequenas régua graduadas coladas em estacas de madeira, que eram colocadas no talvegue dos sulcos e a seguir aos medidores de caudal, tal como esquematiza a Figura 3.7. As leituras nas régua foram efectuadas a intervalos de tempo regulares, normalmente sempre que se efectuava a avaliação dos caudais.

Esta técnica não se revelou eficiente por contemplar algumas imprecisões e por não tomar em conta as variações da microtopografia do terreno, pelo que no segundo ano de ensaios se optou por registar as cotas da superfície livre do escoamento, com o auxílio de uma mira e de um nível topográfico.

Esta avaliação de campo foi efectuada em todas as regas controladas durante a campanha de rega de 1993. Com estas observações é feito o cálculo do declive da superfície livre do escoamento, e utilizado na equação de Manning-Strickler para determinação do coeficiente de rugosidade, num procedimento sugerido por Duke (1992), e também usado por Clemmens (1989).



- B Boca de Rega
- Linha de separação dos grupos de sulcos
- I Registo do Perfil Transversal
- Registo da profundidade do escoamento com réguas graduadas
- | Registo da profundidade do escoamento com nível topográfico

Figura 3.7 - Registo da profundidade do escoamento e do perfil transversal dos sulcos.

Na Figura 3.8 apresenta-se, a título de exemplo, as cotas da superfície livre do escoamento registados na 1ª rega de 1993.

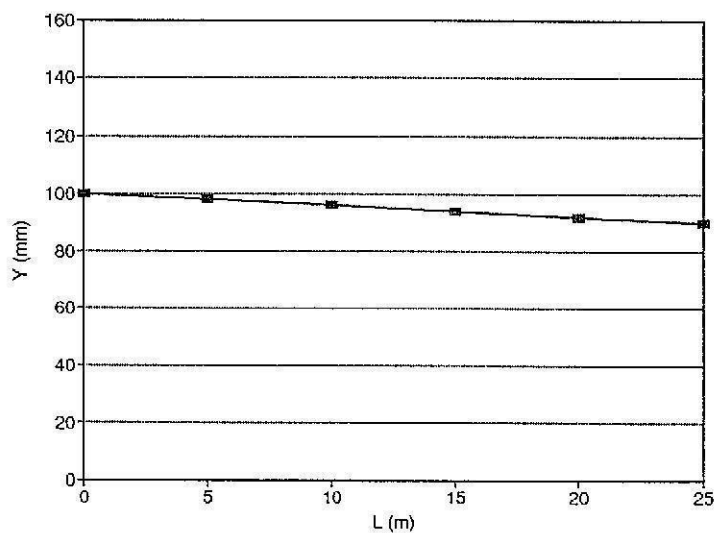


Figura 3.8 - Cotas da superfície livre do escoamento observadas durante a 1ª rega, em 13/07/93.

### 3.3.4. Caracterização da fase de avanço

Antes da 1ª rega colocaram-se estacas espaçadas de 10 m em cada um dos grupos de sulcos, constituindo estações de medição do avanço da água nos sulcos, como se pode observar na Figura 3.9. Nos ensaios de campo de 1992 o avanço da lâmina de água foi controlado até uma distância de 150 m desde a cabeceira dos sulcos, tendo sido reduzida nos ensaios de 1993 para 100 m, como sendo um comprimento suficiente para o objectivo em vista (Trout, 1992). Algumas das medições foram feitas por observação directa da chegada da água a cada uma das estações, e registo dos tempos contados a partir do início da alimentação aos sulcos. Em alternativa usaram-se pequenos relógios digitais, colocados junto a cada uma das estacas, e no talvegue dos sulcos. Quando a frente da lâmina de água atingia uma estação de controlo, era activado o respectivo relógio, que continuava a marcar o tempo até que fosse recolhido no fim da rega. Conhecida a hora do início da rega e registado o momento da recolha de cada um dos relógios, é então possível fazer a determinação correcta dos tempos de avanço.

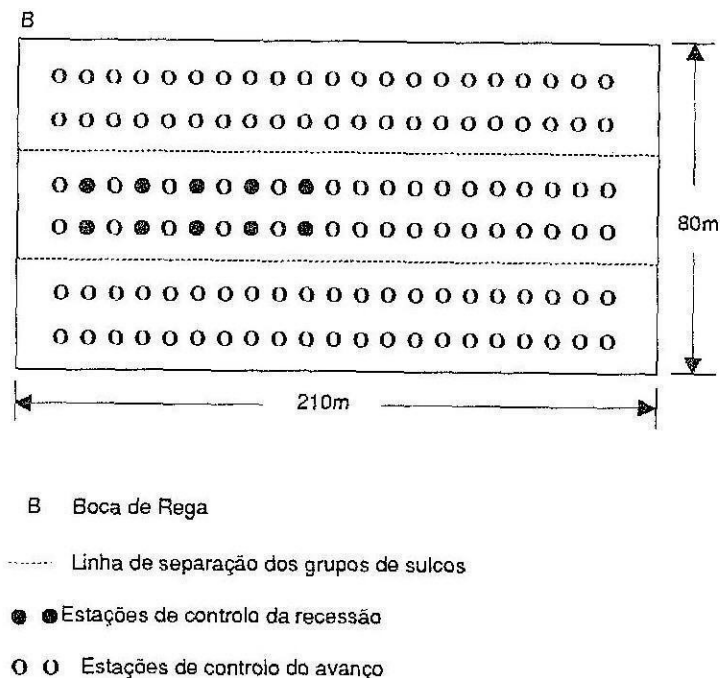


Figura 3.9 - Localização das estações de controlo do avanço e recessão no canteiro 5.

Para cada rega controlada da campanha de rega de 1992, os dados do avanço serão os resultantes da média dos registos efectuados em cada grupo de sulcos, num procedimento análogo ao usado por Sousa (1990).

Podemos ver, por análise da Figura 3.10 e complementarmente pela informação contida no Anexo B3.1, que o avanço da água na 1ª rega e para um caudal de 1.6 l/s/sulco é relativamente lento, mercê sobretudo do estado seco do solo e da rugosidade da superfície, necessariamente maior nesta rega.

Já na 2ª rega, como podemos constatar pela observação da Figura 3.11 e verificação do Anexo B3.1, ainda que o caudal seja um pouco menor, ou seja de 1.5 l/s/sulco, os tempos de avanço são bastante inferiores, sobretudo devido a um teor de humidade no solo maior, e a uma rugosidade à superfície menor.

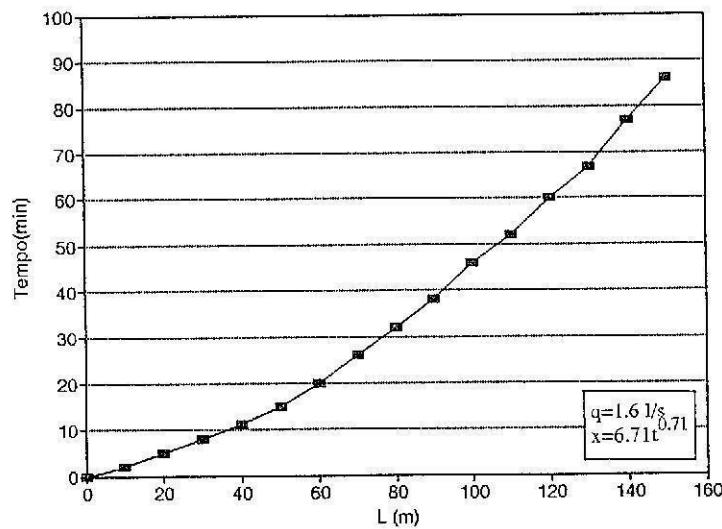


Figura 3.10 - Curva de avanço observada durante a 1ª rega do canteiro 5, em 15/07/92.

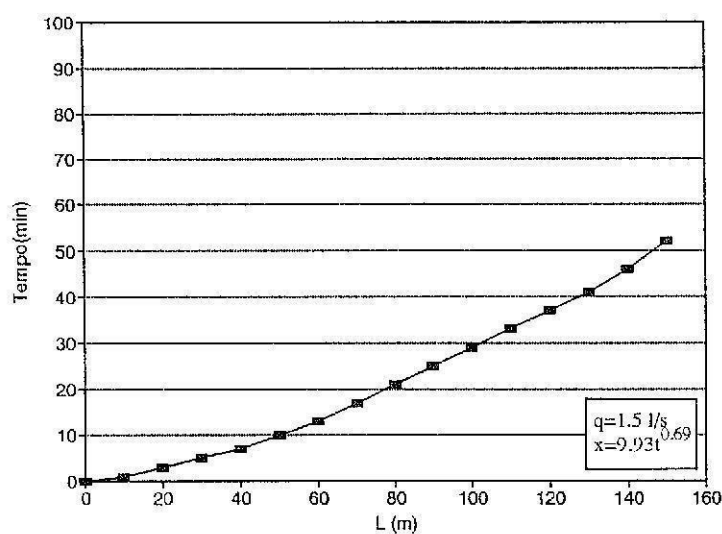


Figura 3.11 - Curva de avanço observada durante a 2ª rega do canteiro 5, em 29/07/92.

Na 3ª rega e se os valores dos caudais fossem iguais, poderíamos esperar tempos de avanço maiores, que se explicariam por um efeito retardador do escoamento em consequência do desenvolvimento de infestantes nos taludes dos sulcos. Por observação da Figura 3.12 e por análise do Anexo B3.1, constatamos tempos de avanço menores do que na 2ª rega, em que um caudal de 1.8 l/s e uma provável diminuição da taxa de infiltração terão um efeito compensador em relação ao aumento do coeficiente de rugosidade.

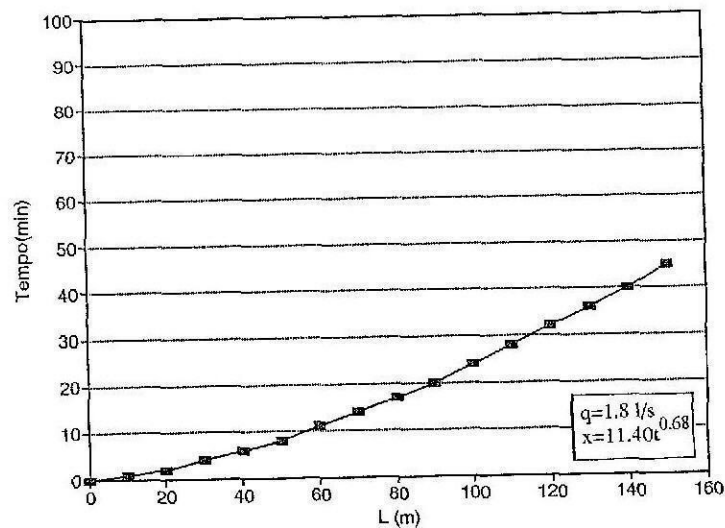


Figura 3.12 - Curva de avanço observada durante a 3ª rega do canteiro 5, em 25/08/92.

Os tempos de avanço de cada uma das regas da campanha de 1993 (Anexo B3.2), quando comparados com os das regas correspondentes da campanha anterior, sugere-nos alguns comentários sobretudo no que respeita à 1ª rega. Por observação da Figura 3.13 constatamos tempos de avanço, para a mesma distância, francamente inferiores aos dos ensaios de 1992, que se justificam pela técnica mais aperfeiçoada na abertura dos sulcos, com alguma compactação no rasto e nos taludes, apresentando consequentemente a superfície onde se processa o escoamento uma rugosidade reduzida.

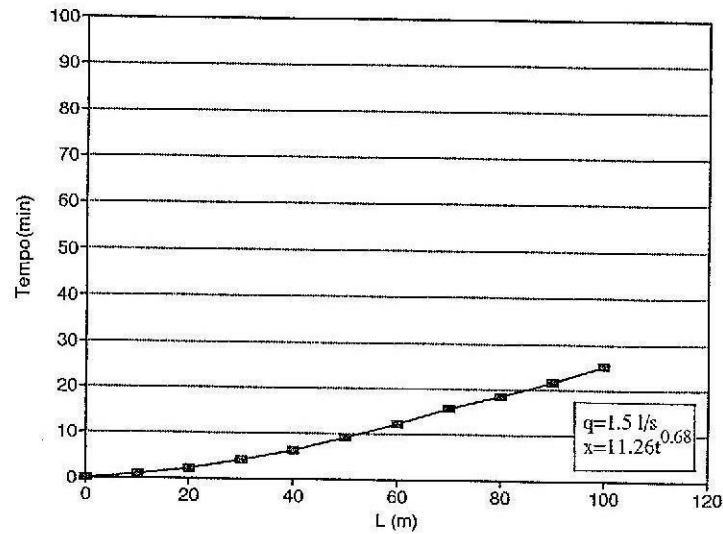


Figura 3.13 - Curva de avanço observada durante a 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.

### 3.3.5. Caracterização da fase de recessão

Quando se pretende caracterizar no campo esta fase da rega, depara-se com a dificuldade de avaliar o momento em que ocorre a recessão num determinado ponto do canteiro.

No canteiro 5 a medição dos tempos de recessão nos ensaios de 1992 revelou-se bastante difícil, com zonas do canteiro onde a água permanecia durante bastante tempo. Este facto foi observado particularmente na cabeceira dos sulcos, havendo contudo zonas do canteiro onde a água desaparecia à superfície num tempo razoável.

Sousa(1990) conduz uma experimentação de campo em que regista neste canteiro tempos de recessão, referindo no entanto que as observações baseadas em critérios subjectivos só terão validade se os valores sofrerem as necessárias e cuidadas correcções.

Pelas dificuldades encontradas em qualquer das regas, não se fez a caracterização da fase de recessão no primeiro ano de ensaios.

Algumas das condições que limitaram a observação da recessão foram ultrapassadas nos ensaios de 1993, em parte pela utilização de rodas compactadoras dos taludes e talvegue dos sulcos, quando da operação de abertura dos sulcos. A sua

utilização teve como consequência uma melhoria das condições do escoamento, e uma regularização de pormenor das cotas da rasante dos sulcos que permitiram uma observação rigorosa dos tempos de recessão. Ainda assim esta avaliação de campo só se efectuou na 1ª rega, já que nas outras regas a recessão prolongou-se para além do fim do dia, havendo contudo a certeza de que não foi inferior a um determinado tempo. Pode-se no entanto estimar o tempo de recessão com uma boa aproximação considerando a profundidade da lâmina de água à superfície dos sulcos, até ao momento em que foi possível a sua observação.

Esta fase da rega foi observada, tal como pode ser visto na Figura 3.9, em pontos do terreno marcados com estacas de madeira intervaladas de 20 m, e registados os respectivos tempos contados a partir dos tempos de avanço para cada ponto considerado.

Não se registaram diferenças significativas dos tempos de recessão ao longo do comprimento da parcela controlado, como podemos constatar pela observação da Figura 3.14, com um tempo de recessão médio próximo de 210 minutos.

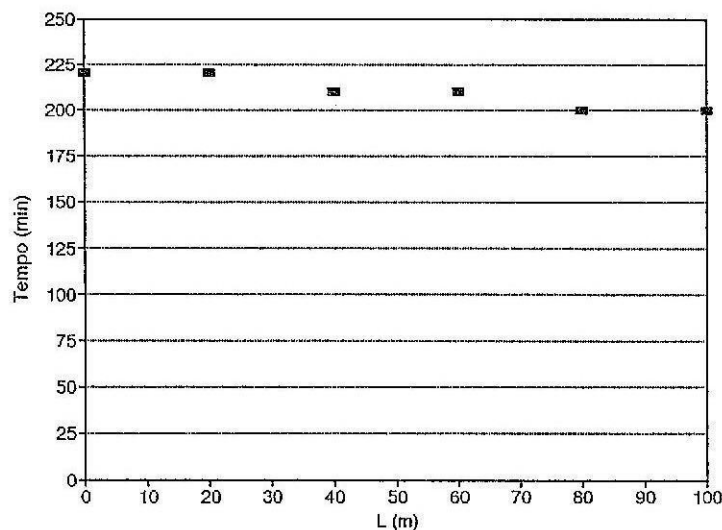


Figura 3.14 - Curva de recessão observada durante a 1ª rega do canteiro 5, 13/07/93.

### 3.4. Geometria da secção transversal dos sulcos

Os perfis transversais dos sulcos foram obtidos nas secções onde se instalaram as régua graduadas na cabeceira dos sulcos para medição da profundidade do escoamento, e meio e no fim do comprimento controlado dos sulcos (Figura 3.7).

Esta avaliação foi efectuada antes de cada rega, com a utilização de um perfilómetro de agulhas, descrito no ponto seguinte.

Duarte (1988) e Serralheiro (1988) obtiveram esta informação de campo mediante o uso de uma régua flexível, que se molda à forma transversal dos sulcos, com um procedimento próprio de campo e gabinete.

Os dados referentes à geometria da secção transversal dos sulcos são necessários para o cálculo do coeficiente de rugosidade, bem como para a determinação de equações potência que relacionam a profundidade com a largura da superfície do escoamento nos sulcos, como forma da sua caracterização transversal.

### 3.4.1. Perfilómetro de agulhas

O termo perfilómetro inserido neste contexto, refere-se a um aparelho ou dispositivo, que reproduz a secção transversal dos sulcos. Este um tipo particular de perfilómetro foi descrito por Walker e Skogerboe (1982).

O dispositivo usado na experimentação de campo é constituído por um painel que está graduado em altura com um rigor até ao milímetro. A parte inferior do painel tem um suporte perfurado a espaços de 2.5 cm, onde deslizam verticalmente um conjunto de varetas cilíndricas. O suporte perfurado é também constituído por uma régua, que é pressionada contra aquele por intermédio de duas molas, permitindo a fixação das varetas em qualquer posição. Pode-se ver no esquema da Figura 3.15 ou na Foto 3.5 como é genericamente constituído este aparelho.

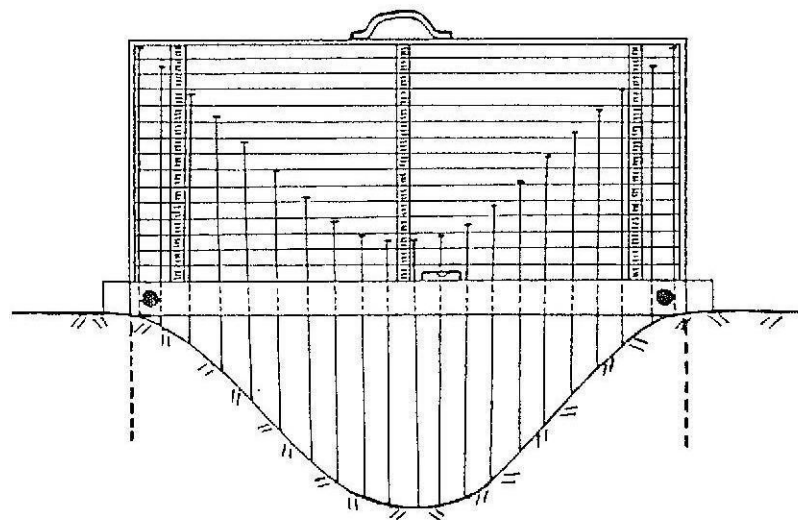


Figura 3.15 - Perfilómetro de agulhas.

Depois de apoiado nos camalhões e horizontalizado, libertam-se as varetas até se apoiarem na superfície do sulco, após o que se fixa a posição deixando de pressionar as molas. Reproduz-se assim no painel rectângular a secção transversal do sulco, registando-se as coordenadas de cada vareta, já que o painel está graduado em largura e altura.

### **3.4.2. Determinação da área e perímetro molhados**

A partir dos dados recolhidos no campo com o perfilómetro é feito o cálculo da área e do perímetro molhados para uma dada profundidade do escoamento. Para o objectivo em vista, que consiste na determinação do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning-Strickler, as profundidades do escoamento foram as que se registaram nas réguas graduadas, ou as que se obtiveram com o nível topográfico nas secções onde eram registados os perfis transversais na cabeceira dos sulcos, cujas coordenadas podem ser analisadas no Anexo B3.3.

A área e perímetro molhados foram determinados com o auxílio de um programa disponível (**PERFIL**) no Departamento de Engenharia Rural do Instituto Superior de Agronomia (I.S.A.), cujos dados de entrada são as coordenadas dos perfis transversais dos sulcos. Os resultados de saída do programa respeitantes a cada rega dos ensaios de 1993 são apresentados nos Anexos B3.4, B3.5 e B3.6. Na situação mais frequente da profundidade do escoamento para uma determinada rega não coincidir exactamente com algum valor do ficheiro de saída, a área e perímetro molhados são calculados por interpolação.

### **3.4.3. Equações potência de caracterização transversal dos sulcos**

Considera-se que, para efeitos de cálculo destas equações potência, o perfil transversal representativo de uma determinada rega seja aquele que apresenta um desenvolvimento intermédio, o que poderá ser verificado como exemplo na Figura 3.16 respeitante à 1ª rega de 1992, em que o perfil seleccionado é P2. As coordenadas dos

perfis transversais que se admitiu representarem as condições médias para cada rega controlada, são apresentadas no Anexo B3.7.

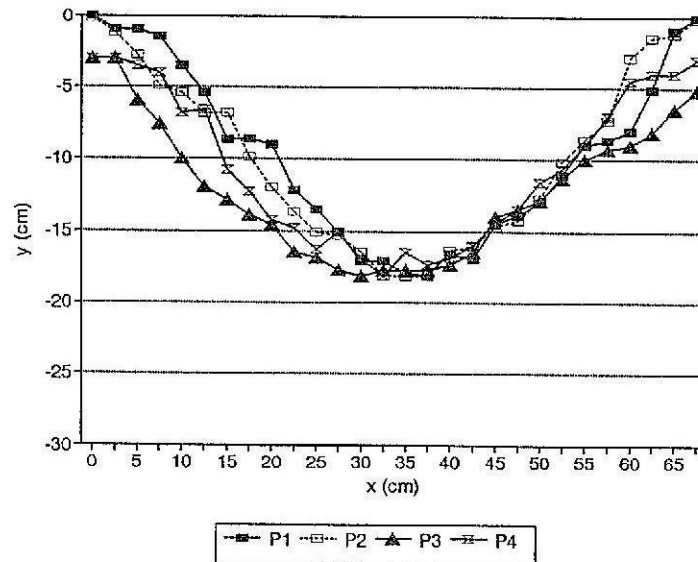


Figura 3.16 - Perfis transversais dos sulcos para a 1ª rega do canteiro 5, em 15/07/92.

Um programa disponível no Departamento de Engenharia Rural do I.S.A. (**PERTRAN**), cujo ficheiro de entrada são as coordenadas dos perfis referidos anteriormente, calcula para uma série de valores de profundidade do escoamento, os respectivos valores da largura à superfície do escoamento, que podem ser analisados nos Anexos B3.8, B3.9, B3.10, B3.11, B3.12 e B3.13.

Após transformação logarítmica destas duas séries de variáveis, obtém-se por regressão linear um expoente  $c$  que é o declive da recta de regressão, e um coeficiente  $u$  que representa o valor da largura à superfície do escoamento  $B$ , quando a profundidade  $Y$  é unitária. Assim a equação assume a seguinte forma

$$B = uY^c \quad [3.1]$$

São os parâmetros empíricos  $u$  e  $c$  de ajustamento desta equação, que constituem dados do ficheiro de entrada do modelo de simulação **SRFR** (Strelkoff, 1992), como uma das formas de caracterização da secção transversal dos sulcos. O Quadro 3.1 apresenta os valores dos parâmetros calculados para cada rega dos ensaios de 1992.

**Quadro 3.1**

Parâmetros de ajustamento das equações potência de caracterização da forma transversal dos sulcos, relativos aos ensaios de 1992

Parâmetros de ajustamento	1ª rega (15/07/92)	2ª rega (29/07/92)	3ª rega (25/08/92)
$u$ (mm/cm <sup>c</sup> )	62.90	109.70	66.90
$c$	0.79	0.58	0.82

### 3.5. Caracterização da rugosidade

Na caracterização da rugosidade utiliza-se o coeficiente  $n$  de Manning, pois trata-se da fórmula mais frequentemente empregue na simulação da rega. Para tal calculam-se, com base em avaliações de campo, todos os outros factores que intervêm na fórmula de Manning-Strickler. Os factores já foram apresentados anteriormente, bem como os critérios usados para o seu cálculo. Importa dizer que, na fórmula anteriormente referida, o factor  $S$  diz respeito ao declive longitudinal da rasante dos sulcos em regime uniforme. Em sulcos de nível aquele factor não poderá ter este significado, e para que a fórmula possa ser aplicada nesta situação, o factor  $S$  deverá representar o declive da superfície livre do escoamento, ou seja o gradiente hidráulico médio ( $S_f$ ).

### 3.6. Caracterização da infiltração

Todos os ensaios de infiltração foram realizados na modalidade de infiltrómetro de sulco bloqueado, com repetições antes de cada rega. Os testes foram feitos em troços dos próprios sulcos, localizados próximo das bocas de rega, como se pode observar na Figura 3.17. Procurou-se que, na preparação dos ensaios de infiltração,

que têm a função de bordaduras ou de fronteiras, tendo por objectivo eliminar do processo de infiltração a influência de uma terceira dimensão. Alguns autores (Duarte, 1988), de cada lado do troço experimental, alimentam dois sulcos bordaduras com condições de infiltração idênticas, e cuja finalidade é a de evitar o movimento lateral da água em condições diferentes das da rega. Outros autores (Serralheiro, 1988) dispensam este cuidado, no pressuposto de que a interferência entre perfis de humedecimento de sulcos adjacentes, acontece numa fase muito adiantada da rega. Os ensaios de infiltração do presente estudo, foram efectuados segundo esta última modalidade, como se pode observar na Foto 3.6, e isto porque tal correspondia à situação da rega, com alimentação sulco sim sulco não.

Antes do teste de infiltração procede-se ao registo das coordenadas do perfil transversal do troço experimental, para o cálculo do perímetro molhado correspondente, permitindo a necessária transformação dos volumes de água em alturas de água infiltrada. No início do ensaio a superfície do troço experimental é impermeabilizada com um plástico que lhe fica aderente. Adiciona-se de seguida água até uma altura que corresponde aproximadamente à profundidade de escoamento nos sulcos durante a rega, após o que é removido o plástico.

O nível da água no troço de sulco é mantido por reposição, com um recipiente cuja capacidade é conhecida, registando-se em cada vez o volume repostado e o tempo. O teste de infiltração termina após a estabilização do volume infiltrado na unidade de tempo, sinal de que se terá atingido a taxa de infiltração estabilizada.

### 3.6.2. Obtenção das equações de infiltração

Com base nas duas séries de variáveis, o tempo e os volumes infiltrados, é possível ajustar as equações descritas em 2.1.1.4., em particular a equação de Kostiakov e a equação de Kostiakov-Lewis.

Os parâmetros destas equações de infiltração foram determinados com o auxílio de uma folha de cálculo, fazendo uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. Serralheiro (1988), descreve dois outros métodos de regressão: o método "dos dois pontos", e o método a que Blair e Reddell (1983), citados por Serralheiro (1988), chamaram de "optimização exacta".

Descrevem-se a seguir alguns dos passos de cálculo na obtenção das equações. A regressão linear é estabelecida entre duas séries de valores logaritmizados, sendo a

que têm a função de bordaduras ou de fronteiras, tendo por objectivo eliminar do processo de infiltração a influência de uma terceira dimensão. Alguns autores (Duarte, 1988), de cada lado do troço experimental, alimentam dois sulcos bordaduras com condições de infiltração idênticas, e cuja finalidade é a de evitar o movimento lateral da água em condições diferentes das da rega. Outros autores (Serralheiro, 1988) dispensam este cuidado, no pressuposto de que a interferência entre perfis de humedecimento de sulcos adjacentes, acontece numa fase muito adiantada da rega. Os ensaios de infiltração do presente estudo, foram efectuados segundo esta última modalidade, como se pode observar na Foto 3.6, e isto porque tal correspondia à situação da rega, com alimentação sulco sim sulco não.

Antes do teste de infiltração procede-se ao registo das coordenadas do perfil transversal do troço experimental, para o cálculo do perímetro molhado correspondente, permitindo a necessária transformação dos volumes de água em alturas de água infiltrada. No início do ensaio a superfície do troço experimental é impermeabilizada com um plástico que lhe fica aderente. Adiciona-se de seguida água até uma altura que corresponde aproximadamente à profundidade de escoamento nos sulcos durante a rega, após o que é removido o plástico.

O nível da água no troço de sulco é mantido por reposição, com um recipiente cuja capacidade é conhecida, registando-se em cada vez o volume repostado e o tempo. O teste de infiltração termina após a estabilização do volume infiltrado na unidade de tempo, sinal de que se terá atingido a taxa de infiltração estabilizada.

### 3.6.2. Obtenção das equações de infiltração

Com base nas duas séries de variáveis, o tempo e os volumes infiltrados, é possível ajustar as equações descritas em 2.1.1.4., em particular a equação de Kostiakov e a equação de Kostiakov-Lewis.

Os parâmetros destas equações de infiltração foram determinados com o auxílio de uma folha de cálculo, fazendo uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados. Serralheiro (1988), descreve dois outros métodos de regressão: o método "dos dois pontos", e o método a que Blair e Reddell (1983), citados por Serralheiro (1988), chamaram de "optimização exacta".

Descrevem-se a seguir alguns dos passos de cálculo na obtenção das equações. A regressão linear é estabelecida entre duas séries de valores logaritmizados, sendo a

primeira série para qualquer das equações o tempo acumulado até ao final do ensaio de infiltração. Para a equação de Kostiakov a segunda série é a que corresponde à infiltração acumulada expressa em altura de água. Para a equação de Kostiakov-Lewis é a infiltração acumulada menos o produto da taxa de infiltração estabilizada pelo tempo.

A taxa de infiltração final ou estabilizada, é obtida por regressão linear das séries do tempo e da infiltração acumulados, mas tomando só os pares de valores finais, ou seja, quando a taxa de infiltração tende para um valor estável.

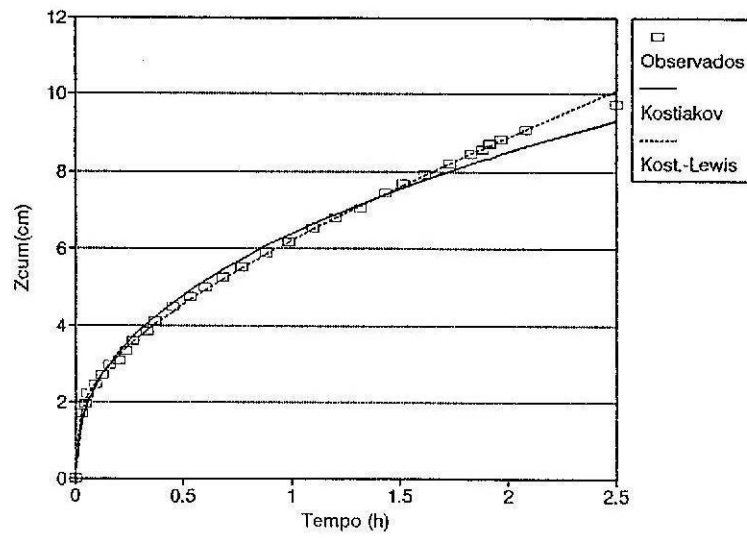
As equações de infiltração, em qualquer dos testes, revelaram um bom ajustamento aos dados de campo, facto que é evidenciado pela análise do aferidor numérico **Soma do Quadrado dos Desvios (SQD)**, dos valores calculados para cada uma das equações relativamente aos valores observados nos testes de infiltração, ou pela observação da representação gráfica do ajustamento das curvas calculadas aos dados observados.

Os critérios para a selecção da equação que melhor se ajusta aos dados de campo, são a análise visual da representação gráfica, e de uma forma mais consistente a SQD. Tomando como exemplo o teste efectuado antes da 1ª rega de 1992, constata-se pela análise do Quadro 3.2 e observação da Figura 3.18 que a equação que melhor se ajusta aos dados de campo é a equação de Kostiakov-Lewis.

**Quadro 3.2**

Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 1ª rega do canteiro 5, em 15/07/92

Equação de Infiltração	Parâmetros			Aferidor SQD
	$k$ (mm/h <sup>2</sup> )	$a$	$i_f$ (mm/h)	
Kostiakov	64.0	0.413	-	1.4
Kostiakov-Lewis	45.0	0.279	17.10	0.2



**Figura 3.18** - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 1ª rega do canteiro 5, em 15/07/92.

**METODOLOGIA  
DE RETORNO DE  
INFORMAÇÃO DE CAMPO**

**CAPÍTULO 4**

## 4. METODOLOGIA DE RETORNO DE INFORMAÇÃO DE CAMPO

No presente capítulo é apresentada uma metodologia que permita uma melhoria da análise e gestão da rega em canteiros de nível, a partir da informação obtida em ensaios de campo. É indispensável para este propósito o uso de um modelo de simulação de rega de superfície, neste caso o programa **SRFR versão 20.5**, cuja apresentação e caracterização se faz no ponto seguinte.

Este exercício de otimização é estabelecido entre resultados observados em ensaios de campo e resultados fornecidos pelo modelo para as características de infiltração do solo, como propriedades da parcela que influenciam de forma decisiva os resultados da rega de superfície. A metodologia é desenvolvida para uma rega rigorosamente observada, concretamente a 1ª rega dos ensaios de 1993, sendo os parâmetros de comparação os tempos de avanço e de recessão observados durante os ensaios.

A metodologia desenvolvida é verificada posteriormente, através de um procedimento mais simplificado para as 2ª e 3ª regas da campanha de 1993, observadas igualmente com rigor.

Na contribuição para a melhoria da análise da rega, de alguma forma está implícita a melhoria da sua gestão, que é exemplificada também neste capítulo.

Estuda-se complementarmente a influência de avaliações menos rigorosas do tempo de recessão e do coeficiente de rugosidade, na análise e gestão da rega.

## 4.1. Modelo de simulação SRFR

O programa **SRFR versão 20.5** é um aperfeiçoamento recente de versões anteriores como seja 20 (Strelkoff, 1990), e representa uma evolução de programas de simulação da rega do mesmo autor, como o **BRDRFLW** (Strelkoff, 1985) e o **SRFIRRG** (Strelkoff, 1986), utilizados no estudo da rega em canteiros de nível por Sousa (1990). De referir que o programa **SRFR 20.5**, no momento do nosso estudo está ainda numa fase experimental, não se encontrando portanto divulgada, tendo sido cedida pelo seu autor em condições particulares.

Tal como os seus antecessores, este modelo de simulação é preferencialmente vocacionado para a análise da rega, já que oferece um importante e bastante aperfeiçoado quadro de diagnóstico, que torna possível um estudo detalhado do processo em simulação.

O programa exige um conjunto de parâmetros de entrada que está relacionado com a diversidade de opções possíveis e com a precisão dos cálculos.

Passamos de seguida a referir algumas particularidades do modo de fornecimento dos dados de entrada no programa, e que é considerada nos cálculos. É possível a inclusão de tabelas com variações espaciais do declive longitudinal da superfície da parcela onde se processa o escoamento, da rugosidade e dos parâmetros da infiltração, durante o tempo que a água permanece à superfície da parcela, já que o programa não faz uma predição destes valores. A caracterização da secção transversal dos sulcos pode ser fornecida como uma variável temporal e espacial, o que permite equacionar situações de erosão e deposição de partículas ao longo da parcela. Deve-se referir no entanto que estes parâmetros não são normalmente conhecidos com suficiente exactidão, de modo a poderem descrever variações espaciais, e muito especialmente variações temporais.

São possíveis vários modos de utilização, definidos através de um dos parâmetros de entrada:

- parâmetros da parcela constantes no espaço e no tempo;
- variações com a distância, mas permanecendo constantes com o tempo;
- variação com a distância, e variação linear com o tempo; e
- variação linear dos parâmetros com a distância e o tempo.

Na definição das condições de fronteira a montante e a jusante, podem-se especificar hidrogramas dos caudais de entrada na parcela, que podem ser contínuos ou intermitentes.

Algumas formas de cálculo equacionam o efeito da profundidade do escoamento (e conseqüentemente do perímetro molhado) no processo de infiltração em sulcos. Um esquema mais simples, não considera as variações do perímetro molhado, admitindo este como constante e igual ao espaçamento entre sulcos.

A infiltração pode ser caracterizada pela expressão:

$$Z = kt^a + i_f t + c_3 \quad [4.1]$$

abrangendo as principais equações empíricas que descrevem o processo da infiltração, dependendo do valor assumido pelos parâmetros que a constituem.

O programa contempla três soluções numéricas, que correspondem à simulação recorrendo aos modelos:

- 1) hidrodinâmico completo (resolução completa das equações de Saint-Venant);
- 2) inércia nula; e
- 3) onda cinemática.

Qualquer dos modelos pode ser resolvido com linearização local, que conduz a uma solução pouco precisa, ainda que mais rápida em termos de tempo de cálculo, ou com solução totalmente não linear das equações, que são resolvidas iterativamente em cada intervalo de tempo. Estes podem ser definidos pelo utilizador, contudo o programa **SRFR** tem a capacidade de ajustar automaticamente os passos de tempo e de distância. Apesar disso pode-se especificar a amplitude dos passos de distância, através do valor de um dos parâmetros de entrada do modelo, sendo o número de passos de tempo dependente daquele.

Relativamente ao ficheiro de entrada do programa, pode-se considerar duas categorias de dados: i) a que respeita aos dados ou parâmetros que são percursos de um determinado modo de cálculo, do rigor de cálculo e do modo de apresentação dos resultados; ii) a que diz respeito aos valores numéricos dos parâmetros que entram directamente nos cálculos, tal como foram introduzidos.

O ficheiro de entrada do programa **SRFR 20.5** apresenta, relativamente aos seus antecessores, a vantagem de registar por cima do valor de cada parâmetro o nome que o identifica, tal como pode ser visto no Anexo B4.1. Se o espaço reservado à caracterização dos parâmetros ficar vazio ou registar a letra D, tal significa que o programa assume valores pré-definidos por omissão ("Default").

Passamos de seguida a referir os vários blocos do ficheiro de entrada do programa (Anexo B4.1), que inclui uma ou mais linhas de informação.

- Linha 1 - Controlo da edição dos dados. Informa o programa da intenção de modificar um ficheiro de dados já existente, ou de proceder aos cálculos com os dados já definidos.

- Linha 2 - Identificação das unidades de saída dos resultados do programa.

- Linha 3 - Parâmetro que indica se existe relação entre a presente simulação e a anterior.

- Linha 4 - Identificação da simulação, podendo conter até 78 caracteres incluindo espaços em branco.

- Linha 5 - Parâmetro que define o sistema de unidades a utilizar.

- Linha 6 - Introdução de dados relativos às propriedades do solo e da cultura, precursores de um determinado modo de cálculo. Caracteriza a maneira como o programa interpreta os parâmetros da infiltração e rugosidade, como estes variam com a distância e com o tempo, bem como os parâmetros definidores da secção transversal.

- Linha 7 - Caracterização do comprimento da parcela em três alternativas: i) constância das propriedades do solo e da cultura com a distância e com o tempo; ii) variação das referidas propriedades com a distância e iii) variação no espaço e no tempo das propriedades do solo e da cultura.

- Linha 8 - Identificação das propriedades da parcela relativamente à infiltração e à rugosidade. Os parâmetros relacionados com cada uma das propriedades anteriores, dependem da combinação de dois parâmetros previamente seleccionados na Linha 6.

- Linha 9 - Dados relativos à geometria da parcela, precursores de um determinado modo de cálculo. Definição das condições de fronteira a montante e a jusante, de acordo com a descrição da superfície da parcela e da forma da secção transversal do escoamento.

- Linha 10 - Registo do perfil longitudinal da superfície da parcela onde se processa o escoamento.

- Linha 11 - Caracterização da secção transversal do escoamento e do espaçamento entre unidades contíguas do escoamento.

- Linha 12 - Dados relativos aos parâmetros de gestão da rega, que são precursores de um determinado modo de cálculo: i) declaração da dotação de rega; ii) qual o tipo de hidrograma de entrada; iii) profundidade da frente do escoamento no fim do sulco após o corte na alimentação da parcela; e iv) número de Froude relativo ao escoamento.

- Linha 13 - Parâmetros de gestão da rega, que dependem da selecção efectuada na linha anterior. As hipóteses possíveis correspondem a hidrogramas de entrada relativos a: i) um único ciclo com caudal constante; ii) vários ciclos com intermitência ou com redução de caudal; e iii) ao fornecimento de um hidrograma expresso através de uma tabela de pares de valores ( $t_i, Q_i$ ).

- Linha 14 - Parâmetros para a escolha da solução numérica: i) modelo hidrodinâmico completo; ii) modelo de inércia nula ou iii) modelo de onda cinemática. É ainda definido o controlo da linearização da solução em cada passo de tempo, e a definição do caudal, profundidade do escoamento, comprimento e tempo característicos, calculados pelo programa e posteriormente usados para mudar os dados de entrada da forma dimensional para a forma adimensional.

- Linha 15 - Dimensionamento hipotético da parcela.

- Linha 16 - Parâmetros numéricos que governam o procedimento a seguir na solução.

- Linha 17 - Dados que determinam o tamanho e a convergência no primeiro passo de tempo do avanço da água.

- Linha 18 - Parâmetros da solução numérica e experimentais que descrevem as simulações relativas a escoamentos muito lentos.

- Linha 19 - Parâmetros da solução numérica.

- Linha 20 e 21- Parâmetros relacionados com o diagnóstico e controlo dos ficheiros de saída do programa.

- Linha 22 - Dados que determinam a apresentação dos resultados no monitor.

Os parâmetros incluídos nas restantes linhas orientam a forma como são apresentados os resultados.

Depois desta forma mais ou menos exaustiva de descrição do ficheiro de entrada, deve-se referir que a conveniente utilização e exploração das suas particularidades não dispensa a consulta cuidada do manual sempre que tal seja necessário.

De igual modo referem-se de seguida os vários blocos do ficheiro de saída do programa **SRFR**, podendo-se observar de uma forma mais pormenorizada, no Anexo B4.2, o conteúdo de alguns dos blocos desse mesmo ficheiro.

- Registo dos parâmetros relacionados com a solução numérica (ex: número máximo de passos de tempo por ciclo de uma onda).

- Confirmação do ficheiro de entrada do programa (ex: comprimento da parcela).

- Listagem dos parâmetros armazenados no ficheiro PLTPRM (ex: número de cores possíveis no monitor).
- Apresentação de uma forma sistematizada das propriedades da cultura e do solo, e que servem aos cálculos hidráulicos (ex: expoente da equação de infiltração).
- Parâmetros da geometria do sistema de rega (ex: declive médio da superfície da parcela onde se processa o escoamento).
- Parâmetros da configuração da superfície da parcela (ex: espaçamento entre sulcos).
- Parâmetros de gestão da rega (ex: dotação de rega).
- Registo dos parâmetros característicos (ex: profundidade crítica do escoamento).
- Parâmetros relacionados com a solução numérica (ex: as funções da variação da profundidade e descarga numa determinada secção são tratadas como totalmente não lineares).
- Sinopse dos resultados da rega, que inclui perfil da água infiltrada (ex: tempos de avanço e recessão).
- Parâmetros da fiabilidade dos cálculos (ex: erro relativo dos volumes calculados).
- Sinopse dos resultados da rega (ex: coeficiente de uniformidade de Christiansen).
- Confirmação da finalização dos cálculos efectuados pelo programa.

Pelo volume e teor de informação de saída do programa, podemos nos aperceber da sua importância como instrumento de análise e diagnóstico da rega de superfície.

O programa comporta no entanto algumas limitações (Strelkoff, 1992), das quais registamos algumas.

Podem ocorrer problemas de convergência na situação de solos que fendilham, e nas zonas próximas da frente de avanço do escoamento. Esta categoria de solos exibe uma taxa de infiltração inicial bastante grande, seguida da quase não existência de infiltração, por aumento do volume de solo e fecho das fendas. Quando a equação que descreve o processo é uma equação potência, com um valor alto do coeficiente  $k$ , e baixo do expoente  $a$ , e está associada a uma outra equação potência que caracteriza a secção transversal dos sulcos, a variação do volume infiltrado por unidade de comprimento de sulco é não linear. Há também nesta situação, uma relação  $R_I = Z/Y$  desapropriada no valor assumido por omissão, ou seja a relação entre a altura de água infiltrada ( $Z$ ), e a profundidade do escoamento ( $Y$ ), não é traduzida pelo valor de  $R_I$ .

Um valor de  $R_I$  maior que o valor por omissão pode corrigir eventuais dificuldades de convergência, assim como o alargamento do critério de convergência, ou o incremento do número de iterações permitido.

A solução mais fácil de adoptar na resolução das dificuldades dos procedimentos numéricos, para esta condição pedológica, é a adopção da equação de infiltração empírica  $Z=kt^a+it+c_3$ , com os parâmetros mais concordantes com as circunstâncias físicas verificadas. O processo de infiltração pode ser descrito de um modo conveniente, com um valor alto do coeficiente  $c_3$ , que prevê o preenchimento das fendas, e a fase de infiltração seguinte descrita por um valor pequeno do coeficiente  $k$ , e alto do expoente  $a$ .

É condição não admissível pelo programa a ocorrência de recessão a partir do final da parcela, enquanto a alimentação da mesma se verifica. Ainda que haja circunstâncias em que tal possa ocorrer na realidade, o programa ajusta os parâmetros numéricos no sentido de esta situação não se verificar. Na rega com redução de caudal, se no início a frente de avanço atingir o final da parcela, e depois o caudal não for suficiente para suprir a taxa de infiltração do solo ao longo de todo o comprimento da parcela, pode ocorrer recessão a partir do fim desta.

Na modalidade de escoamento intermitente, não se admite na simulação que o escoamento relativo a uma onda, ultrapasse na parcela o escoamento relativo à onda imediatamente anterior. Uma modelação apropriada desta realidade deve contemplar a transformação das duas ondas numa só (Strelkoff, 1992).

Em parte, a eficácia ou rigor da solução de uma determinada simulação pode ser avaliada pela análise do erro relativo do volume total, incluído no bloco da sinopse dos resultados da rega no ficheiro de saída do programa, em que valores superiores a 1-2% podem sugerir defeitos de cálculo.

## 4.2. Descrição da metodologia

A metodologia aqui descrita pretende ser um instrumento de melhoria da análise e gestão da rega em canteiros de nível, contribuindo para o aprofundamento da compreensão deste processo de rega.

Tal como já foi referido anteriormente é bastante importante o rigor dos resultados obtidos em ensaios de campo para o desenvolvimento da metodologia.

No presente estudo as avaliações de campo do segundo ano permitiram corrigir algumas deficiências, tendo-se conseguido um aperfeiçoamento suficiente das técnicas usadas.

Através de um procedimento que será descrito neste ponto, pretende-se a caracterização das condições da parcela, concretamente aspectos relacionados com a infiltração, que conduzam a uma melhoria da análise e gestão da rega. Segundo Clemmens (1992) mais duas categorias de variáveis afectam a qualidade de uma determinada rega: a geometria da parcela, que tem a ver com o comprimento, largura e o declive, que usualmente é estabelecida na fase de projecto, e as variáveis de gestão da rega, o caudal e o tempo de aplicação, e sobre as quais se faz o controlo da rega.

Com esta finalidade é utilizado o programa de simulação de rega de superfície **SRFR**, que é, na opinião de alguns investigadores desta área, um dos mais aperfeiçoados para análise da rega (Duke, 1992). O programa é usado na opção de cálculo que corresponde à resolução do modelo de inércia nula.

A ideia fundamental da metodologia consiste na pesquisa da combinação dos parâmetros da equação de infiltração que conduzem a um melhor ajustamento entre os dados do avanço e recessão simulados e observados. Katopodes *et al.*(1989), abordaram esta questão com uma aproximação semelhante, usando somente os dados do avanço. Especificando melhor o que será elaborado em 4.2.1., aceitamos que fazendo variar o coeficiente  $a$  da equação de infiltração, existirá um valor do coeficiente  $k$ , que permite a obtenção de um bom ajustamento entre os valores simulados e observados do avanço e da recessão referentes à totalidade do comprimento controlado da parcela. Os aferidores numéricos usados na verificação do melhor ajustamento aos tempos observados são para os tempos de avanço a **Soma do Quadrado dos Desvios (SQD)**, também usado por Clemmens (1989) no mesmo propósito, e para o tempo de recessão o **módulo do Desvio** entre o valor simulado e observado (**|Desvio|**). Desenvolvem-se assim dois conjuntos de pares de valores dos coeficientes da equação de infiltração, que num sistema de eixos são dois conjuntos de pontos, um referente aos dados do avanço e outro aos dados da recessão. A união dos pontos referentes a cada um dos conjuntos, dará origem a duas linhas que se interceptam num ponto, e que constitui o par de valores dos coeficientes da equação de infiltração, que verdadeiramente pode descrever o fenómeno da infiltração alargado a toda a parcela, nas condições hidropedológicas em que se efectou a rega.

Desta forma, pode-se dar resposta à dificuldade que advém da equação de infiltração obtida pontualmente na parcela em ensaios de infiltração, poder representar de uma forma conveniente toda a parcela.

Alguns estudos, relacionados com técnicas de retorno de informação em tempo real, têm sido efectuados com o objectivo de determinar a melhor localização dos sensores do avanço na parcela para que, em momento oportuno, seja considerada a variação espacial e temporal dos parâmetros do solo, nomeadamente a infiltração, e eventualmente se proceda a uma modificação do caudal (Smith e Duke, 1984). Também a este propósito Izadi *et al.* (1988), referem que o método dos dois pontos (Elliot e Walker, 1980) para estimação dos parâmetros da infiltração durante uma determinada rega, ainda que integrem uma vasta área da parcela, resulta numa avaliação desses parâmetros com alguma variabilidade, dependendo da localização dos dois pontos de observação. Clemmens (1992) acerca das técnicas de retorno de informação na rega por sulcos questiona a localização dos sensores do avanço, para que estes possam representar as condições médias da parcela, dado que os tempos de avanço são frequentemente diferentes de sulco para sulco, e é a partir deles que são estimados os parâmetros da infiltração.

O procedimento anterior é desenvolvido para um único valor de coeficiente de rugosidade, que foi determinado de uma forma cuidada na parcela, e que se supõe ser o verdadeiro valor para as condições observadas.

A metodologia desenvolvida para a 1ª rega de 1993 é posteriormente verificada para as 2ª e 3ª regas da mesma campanha, através de um procedimento menos trabalhoso que passamos de seguida a explicar.

Os parâmetros otimizados para a 1ª rega serão válidos para uma conjugação de condições que permitiram a observação de um conjunto de resultados. É lícito pensar-se que em regas posteriores se alterem as características de infiltração do solo, o que ocasiona a observação de resultados diferentes. Admitindo que as características de infiltração do solo não variam radicalmente ao longo da estação de rega, e considerando o desenvolvimento das duas curvas referentes à optimização dos parâmetros da infiltração, relativos aos tempos de avanço e recessão na zona da sua intercepção, sugere-se um procedimento que será verificado nos pontos seguintes.

Apresentando o expoente  $a$  da equação de infiltração uma razoável estabilidade ao longo da estação de rega (Clemmens, 1989; Sousa, 1990), é estabelecida uma pequena amplitude de variação positiva e negativa relativamente ao seu valor optimizado para a 1ª rega. Para cada um destes valores do parâmetro  $a$  da equação de

infiltração, são pesquisados os valores do coeficiente  $k$  que minimizem a SQD entre os tempos de avanço observados e simulados, e o módulo do Desvio entre o tempo de recessão estimado e simulado. Obtêm-se assim dois valores do coeficiente  $k$  que minimizam cada um dos aferidores numéricos usados, cujas uniões originam dois segmentos de recta que se interceptam num ponto. Considera-se este ponto de intercepção, como o de optimização das características de infiltração válidas para determinada rega, a que corresponde um valor do expoente  $a$  e do coeficiente  $k$ .

Refira-se que dado o comportamento do coeficiente  $k$  relativamente ao expoente  $a$  da equação de infiltração no processo de optimização, a amplitude de variação do expoente  $a$  ainda que pequena, deverá ocasionar uma intercepção entre as curvas de optimização relativas aos tempos de avanço e de recessão.

#### **4.2.1. Optimização dos parâmetros da equação de infiltração**

Para o desenvolvimento da metodologia em que é imprescindível a utilização intensiva do modelo de simulação, é necessário definir o seu ficheiro de entrada. Este é essencialmente baseado nos dados obtidos nas avaliações de campo, cujas técnicas experimentais foram referidas anteriormente, e em opções de solução numérica. O modelo de simulação é usado num processo continuado de pesquisa com o objectivo apontado anteriormente, em que se fazem variar os parâmetros de infiltração mantendo-se todos os outros dados do ficheiro de entrada.

Passamos de seguida a referir a informação fornecida ao modelo, organizada da seguinte forma sistematizada.

##### **• Propriedades hidráulicas do solo e da cultura**

• Características de infiltração - mais do que determinar os valores dos parâmetros das equações de infiltração em estudo, pretende-se nesta opção seleccionar o tipo de equação que evidencia o melhor ajustamento aos dados observados nos testes de infiltração.

A observação da Figura 4.1 e análise do Quadro 4.1, onde constam os valores dos parâmetros das equações de infiltração assim como do aferidor numérico usado,

permite-nos seleccionar a equação de Kostiakov-Lewis para descrever o processo de infiltração, para a 1ª rega do canteiro 5, na época de 1993.

A taxa de infiltração final ou estabilizada que é prevista neste tipo de equação é determinada do modo já explicado em 3.6.2.

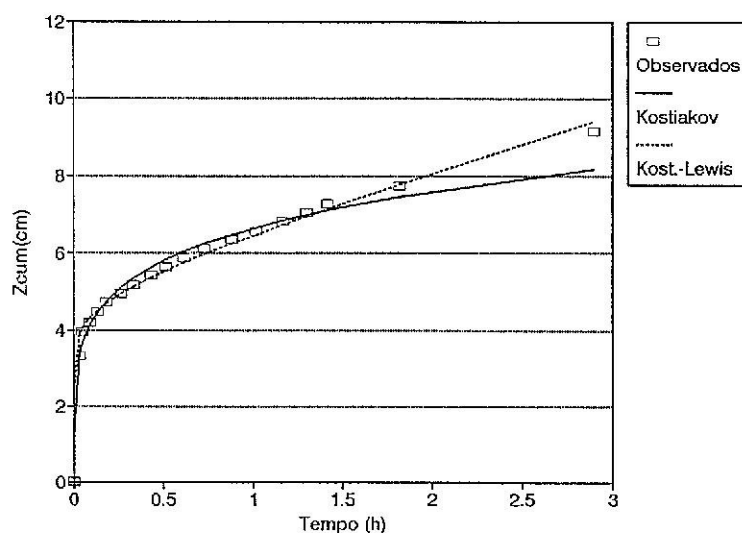


Figura 4.1 - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 1ª rega no canteiro 5, em 13/07/93.

**Quadro 4.1**

Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93

Equações de Infiltração	Parâmetros			Aferidor
	$k$ (mm/h <sup>a</sup> )	$a$	$i_f$ (mm/h)	
Kostiakov	66.0	0.198	-	SQD 1.3
Kostiakov-Lewis	51.0	0.085	15.53	0.6

- Coeficiente de rugosidade - este coeficiente de resistência do escoamento é calculado pela fórmula de Manning-Strickler, na qual os restantes factores assumem os seguintes valores:

- Caudal,  $q$  - 1.5 l/s/sulco;
- Área molhada,  $A$  - para o perfil respeitante à 1ª rega de 1993, cujas coordenadas constam do Anexo B3.3, e para uma profundidade do escoamento de 10 cm, calcula-se por interpolação a partir dos valores constantes do Anexo B3.4 uma área molhada igual a 0.0189 m<sup>2</sup>;

- Raio hidráulico,  $R$  - considerando a mesma profundidade de escoamento e com base nos valores do mesmo Anexo, resulta um raio hidráulico igual a 0.0533 m;

- Gradiente hidráulico médio,  $S_f$  - tendo em consideração as cotas registadas da superfície livre do escoamento, o gradiente hidráulico médio assume o valor de 0.0004.

Com este conjunto de valores obtém-se um coeficiente de rugosidade  $n$  igual a 0.036.

• Geometria da parcela

- comprimento controlado dos sulcos - 100 m.
- canteiro sem escorrimento final.
- declive médio - dado tratar-se de um canteiro de nível os declives longitudinal e transversal são nulos.

- forma transversal dos sulcos - é caracterizada através de uma equação potência estabelecida para um perfil que representa as condições médias do sulco observado para esta rega. Da observação da Figura 4.2, resulta a selecção do perfil P3 cujas coordenadas podem ser analisadas no Anexo B3.7.

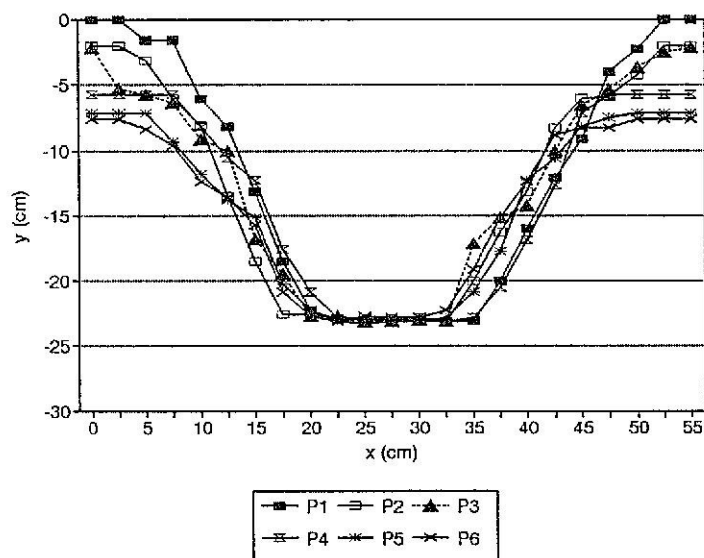


Figura 4.2 - Perfis transversais dos sulcos para a 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.

Os parâmetros empíricos de ajustamento da equação são calculados com base na informação do Anexo B3.11, obtendo-se um coeficiente  $u$  igual a 117.90 mm/cm<sup>c</sup> e um expoente  $c$  igual a 0.39.

- espaçamento entre sulcos - 0.75 m.

• **Parâmetros de gestão da rega**

- dotação requerida - 40 mm.
- caudal fornecido num só impulso.
- caudal unitário constante - 1.5 l/s/sulco.
- tempo de aplicação - 35 min.

• **Parâmetros de solução numérica**

- solução de inércia nula.
- equações algébricas não linearizadas e resolvidas iterativamente para cada passo de tempo.
- número de células em que é dividida uma onda - 10.
- número máximo admissível de iterações para se atingir a convergência - 20.

No início do exercício de optimização a pesquisa envolvia um largo espectro para os parâmetros  $a$  e  $k$  da equação de infiltração, que se foi estreitando à medida que se começava a evidenciar a zona de intercepção das curvas de optimização relativas aos tempos de avanço e recessão. Depois de estudada com mais pormenor esta zona, é obtida a informação dos Quadros 4.2 respeitante aos tempos de avanço, onde figura também os valores do aferidor numérico usado.

**Quadro 4.2**

Parâmetros da equação de infiltração otimizados  
para os tempos de avanço - 1ª rega/93

Expoente <i>a</i>	Coefficiente <i>k</i> (mm/h <sup>2</sup> )	Aferidor SQD
0.055	26.0	10.7
0.065	22.0	11.5
0.075	18.0	11.9
0.085	16.0	11.3

De igual modo é obtida a informação do Quadro 4.3 respeitante ao tempo de recessão, que conjuntamente com a informação do Quadro 4.2, servem à elaboração da Figura 4.3.

**Quadro 4.3**

Parâmetros da equação de infiltração otimizados  
para o tempo de recessão - 1ª rega

Expoente <i>a</i>	Coefficiente <i>k</i> (mm/h <sup>2</sup> )	Aferidor  Desvio  (min)
0.055	16.0	36.0
0.065	22.0	22.2
0.075	28.0	12.5
0.085	38.0	6.4

Os valores dos parâmetros  $a$  e  $k$  da equação de infiltração correspondentes ao ponto de intercepção das duas curvas são respectivamente 0.065 e 22.0 mm/h<sup>a</sup>, que são substancialmente diferentes dos valores 0.085 e 51.0 mm/h<sup>a</sup> calculados a partir dos dados obtidos nos testes de infiltração.

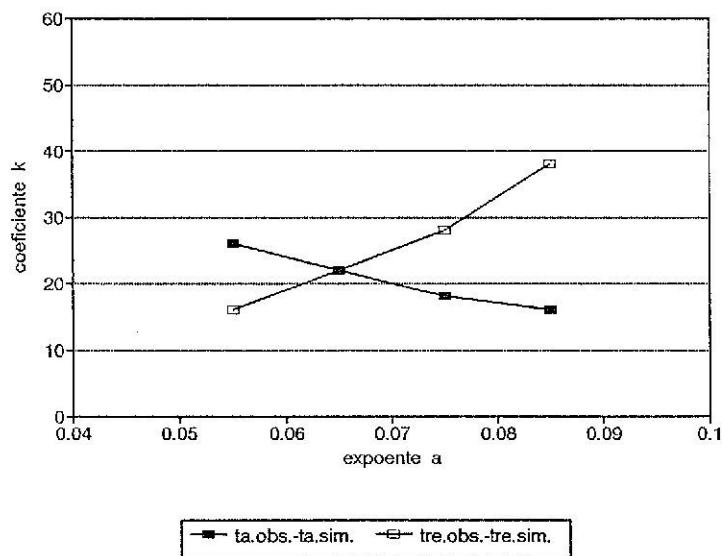


Figura 4.3 - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 1ª rega de 1993.

A simulação da rega com este par de valores dos parâmetros da equação de infiltração conduz a resultados simulados bastante próximos dos observados, facto que é suportado pelo cálculo de uma SQD igual a 11.5 relativamente aos tempos de avanço, e a um módulo do Desvio igual a 22.2 minutos relativamente aos tempos de recessão, ou de um modo diferente pela observação da Figura 4.4.

Importa registar que o módulo do Desvio resultante da simulação com os parâmetros otimizados da equação de infiltração ainda que relativamente pequeno, não é devido a erros de avaliação do tempo de recessão, pois esta foi feita de forma rigorosa nos ensaios de campo. Provavelmente deve-se a um critério ligeiramente diferente da avaliação simulada do tempo de recessão, relativamente ao usado na avaliação de campo.

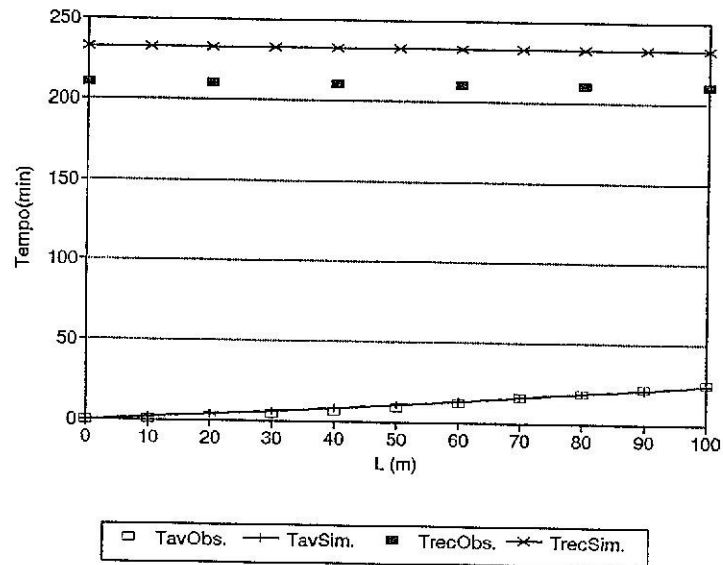


Figura 4.4 - Curvas de avanço e recesso observadas, e simuladas com os parâmetros otimizados da equação de infiltração para a 1ª rega de 1993.

#### 4.4. Análise de sensibilidade

Complementando a metodologia desenvolvida no ponto anterior, testa-se aqui a importância da avaliação de forma rigorosa do tempo de recesso e do coeficiente de rugosidade na análise da rega, através da verificação dos resultados simulados da rega para várias amplitudes de variação relativamente a um tempo de recesso e coeficiente de rugosidade rigorosamente avaliados. Os outros parâmetros que podem influenciar a qualidade da rega, como sejam o caudal, o avanço e a forma transversal dos sulcos, oferecem menos dificuldade à sua avaliação no campo, podendo ser avaliados de forma relativamente rigorosa.

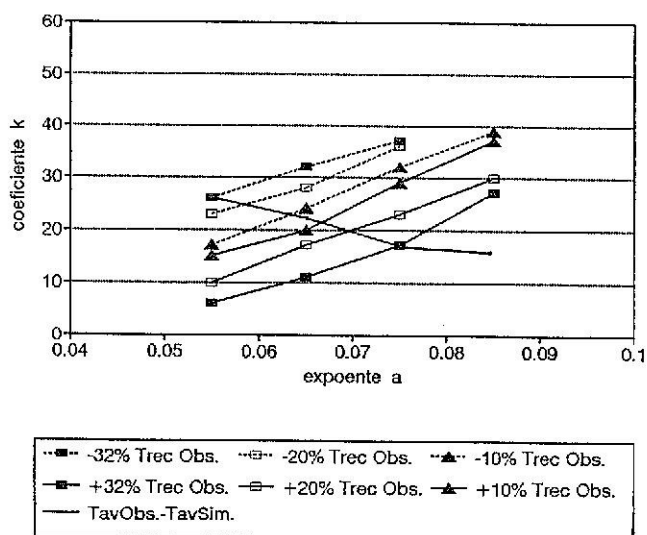
### 4.3.1. Tempo de recessão

Este estudo é motivado por sabermos da dificuldade de avaliação deste parâmetro no campo, e por o tempo de observação, em geral longo, ocasionar muitas vezes limitações práticas do tipo das que foram encontradas nos ensaios de campo.

De forma idêntica à descrita em 4.2.1., faz-se uma pesquisa dos valores do coeficiente  $k$  para cada valor do expoente  $a$  da equação de infiltração, que conduzem à menor diferença entre os tempos de recessão simulados e os vários tempos de recessão correspondentes a amplitudes de variação estabelecidas, relativamente ao tempo de recessão observado na 1ª rega de 1993. Foram assim estabelecidas as amplitudes de variação de: **a)** mais ou menos 32%, que representa numa distribuição normal a probabilidade de dispersão de um desvio padrão (64%); **b)** mais ou menos 20%, e **c)** mais ou menos 10%.

Os parâmetros da rega utilizados neste exercício e que fazem parte do ficheiro de entrada do modelo de simulação, são os válidos para a 1ª rega de 1993.

Obtêm-se assim, seis curvas de optimização válidas para seis tempos de recessão diferentes, que interceptam em seis pontos distintos a curva de optimização relativa aos tempos de avanço para a mesma rega. Tal como pode ser visto na Figura 4.5, e cuja informação necessária à sua elaboração está registada no Anexo B4.3.



**Figura 4.5** - Optimização dos parâmetros da equação de infiltração para tempos de recessão correspondentes a dispersões de  $\pm 32\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 10\%$ , relativamente ao tempo de recessão observado na 1ª rega de 1993.

A cada um destes pontos corresponde um par diferente do expoente  $a$  e do coeficiente  $k$  da equação de infiltração, que se encontram explicitados no Quadro 4.4.

**Quadro 4.4**

Parâmetros otimizados  $a$  e  $k$  da equação de infiltração para dispersões de  $\pm 32\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 10\%$  relativamente ao tempo de recessão observado na 1ª rega de 1993

Parâmetros da equação de infiltração	+32% Trec Obs. (277 min)	+20% Trec Obs. (252 min)	+10% Trec Obs. (231 min)	-10% Trec Obs. (189 min)	-20% Trec Obs. (168 min)	-32% Trec Obs. (143 min)
Expoente $a$	0.076	0.070	0.066	0.063	0.058	0.055
Coefficiente $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	17.1	20.0	20.9	22.5	24.3	26.0

São executadas seis simulações variando as características de infiltração, mantendo-se os outros parâmetros da rega constantes, com o objectivo de comparação de alguns dos resultados simulados da rega, entre conjuntos de valores que dizem respeito à mesma percentagem de variação do tempo de recessão. Seleccionam-se como aferidores deste estudo a **Ea** e a **UD**, cujos valores se encontram reunidos no Quadro 4.5.

**Quadro 4.5**

Resultados simulados da rega com seis pares de parâmetros otimizados  $a$  e  $k$  da equação de infiltração

Aferidores	+32% Trec Obs. (277 min)	-32% Trec Obs. (143 min)	+20% Trec Obs. (252 min)	-20% Trec Obs. (168 min)	+10% Trec Obs. (231 min)	-10% Trec Obs. (189 min)
<b>Ea</b> (%)	94.3	93.4	93.9	93.3	93.8	93.6
<b>UD</b> (%)	94.4	93.4	94.0	93.4	93.8	93.6

Analisando os valores do quadro anteriormente referido e complementarmente a Figura 4.6, podemos afirmar que um erro de avaliação do tempo de recessão até mais

ou menos 20% relativamente ao seu verdadeiro valor, tem uma influência muito pequena na análise da rega e por extensão na sua gestão.

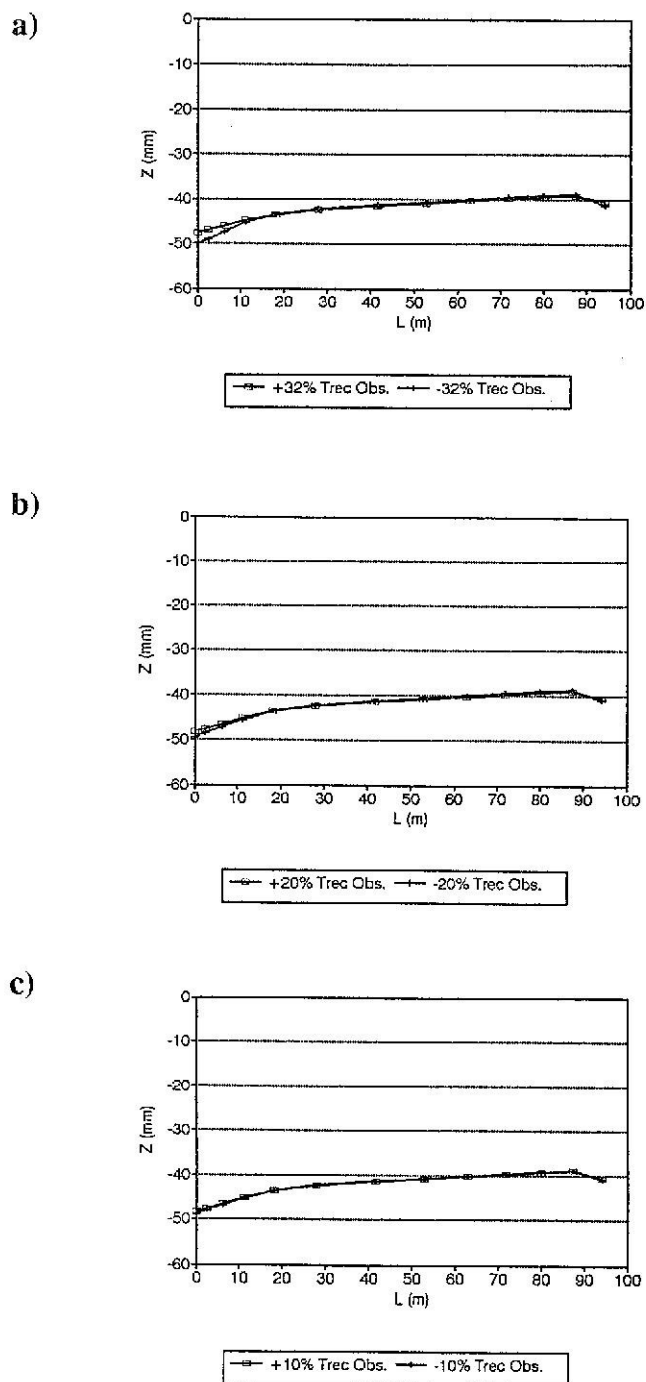


Figura 4.6 - Comparação dos resultados simulados do perfil de infiltração longitudinal para variações dos tempos de recessão de: a)  $\pm 32\%$ , b)  $\pm 20\%$  e c)  $\pm 10\%$ .

No respeitante à variação de mais ou menos 32%, ainda que a diferença entre os dois conjuntos de resultados aferidores seja naturalmente a maior, aquela não é suficientemente significativa, de tal modo que se pode concluir que um erro de avaliação com esta amplitude não tenha influência na análise e gestão da rega.

### 4.3.2. Coeficiente de rugosidade

A avaliação, em ensaios de campo, do coeficiente de rugosidade pode levar a imprecisões se não for realizada com rigor.

Neste ponto, à semelhança do exercício de optimização em 4.2.1., pesquisam-se os parâmetros optimizados  $a$  e  $k$  da equação de infiltração para cada valor do coeficiente de rugosidade que se pretende testar. Estes valores são de mais ou menos 16% do valor do coeficiente de rugosidade observado na 1ª rega dos ensaios de 1993 (0.036), ou seja mais ou menos metade de um desvio padrão numa distribuição normal, a que correspondem respectivamente os valores 0.042 e 0.030.

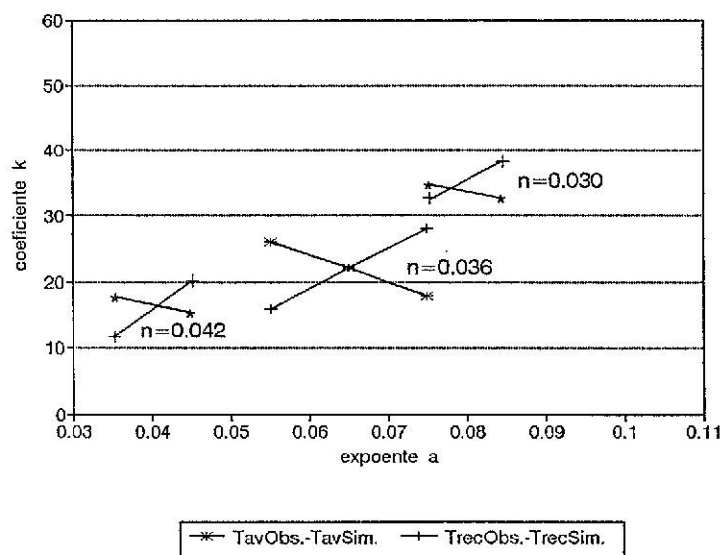
Os dois pares de parâmetros optimizados da equação de infiltração são apresentados no Quadro 4.6, e resultam da análise gráfica da Figura 4.7 cujos dados para a sua elaboração podem ser analisados no Anexo B4.4.

**Quadro 4.6**

Parâmetros optimizados  $a$  e  $k$  da equação de infiltração para uma dispersão de  $\pm 16\%$ , relativamente ao coeficiente de rugosidade avaliado na 1ª rega de 1993

Parâmetros da equação de infiltração	- 16% Coef. Rug. Obs. ( $n=0.030$ )	+ 16% Coef. Rug. Obs. ( $n=0.042$ )
Expoente $a$	0.080	0.041
Coefficiente $k$ (mm/h <sup>2</sup> )	35.0	16.0

De referir que, no exercício de otimização para o coeficiente de rugosidade igual a 0.042, do cálculo do módulo do Desvio entre os tempos de recessão simulados e observados, resultam desvios mínimos relativamente elevados, constituindo contudo pontos de melhor ajustamento.



**Figura 4.7** - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para coeficientes de rugosidade correspondentes a uma dispersão de  $\pm 16\%$ , relativamente ao valor avaliado em ensaios de campo na 1ª rega de 1993.

Fazendo variar o coeficiente de rugosidade e as características de infiltração que lhe correspondem, são executadas duas simulações mantendo todos os outros dados do ficheiro de entrada do modelo válidos para a 1ª rega de 1993. Do conjunto de resultados simulados da rega destacam-se a **Ea** e a **UD**, como resultados aferidores da influência da rugosidade na análise e gestão da rega.

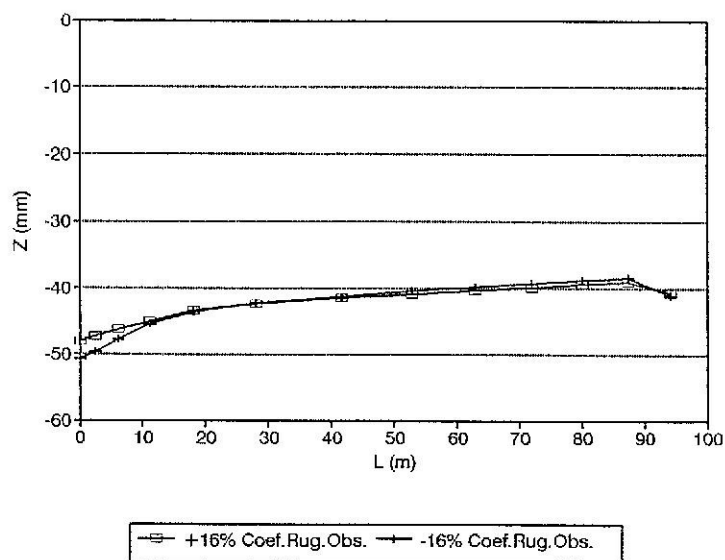
A observação dos resultados simulados no Quadro 4.7 e complementarmente da Figura 4.8, sugere uma atenção devidamente ponderada quando se atribui um valor recomendado e pressupostamente válido para determinadas condições de superfície onde se processa o escoamento. Impõe-se pois a necessidade de uma avaliação cuidada deste coeficiente quando as condições de superfície são por algum motivo mais adversas, como por exemplo na 1ª rega de uma campanha.

**Quadro 4.7**

Resultados simulados da rega com dois pares de parâmetros otimizados a e k da equação de infiltração

Aferidores	- 16% Coef. Rug. Obs. ( $n=0.030$ )	+ 16% Coef. Rug. Obs. ( $n=0.042$ )
<b>Ea</b> (%)	92.5	94.2
<b>UD</b> (%)	91.3	93.0

Deve-se pois registrar a importância de uma avaliação rigorosa do coeficiente de rugosidade, dada a grande sensibilidade que o modelo **SRFR 20.5** demonstra para as variações deste parâmetro.



**Figura 4.8** - Comparação dos resultados simulados dos perfis longitudinais de infiltração para os coeficientes de rugosidade  $n=0.030$  e  $0.042$ .

## 4.4. Verificação da metodologia desenvolvida

A metodologia desenvolvida é verificada pelo procedimento explicado em 4.2., para as regas que foram também observadas com rigor, concretamente as 2ª e 3ª regas de 1993.

A utilização do modelo é agora menos intensiva, mantendo-se constante a parte do ficheiro de entrada respeitante aos parâmetros de solução numérica. Alteram-se, relativamente à situação da 1ª rega de 1993, as propriedades hidráulicas do solo e da cultura, e alguns dos dados relativos à geometria da parcela e aos parâmetros de gestão da rega.

Pelas limitações apontadas em 3.3.5. não foi possível a observação completa da recessão pelo que, nas regas para as quais é verificada a metodologia, aquele tempo é estimado em valores que se julgam próximos da realidade. Assim para a 2ª rega o tempo de recessão foi estimado em 720 minutos e para a 3ª rega em 360 minutos.

### 4.4.1. Segunda rega de 1993

De acordo com o que está definido em 4.2. para a verificação da metodologia, foi estabelecida numa primeira tentativa uma amplitude de variação de mais ou menos 10% do valor do expoente  $a$  da equação de infiltração otimizado para a 1ª rega (0.065).

No desenvolvimento do exercício de pesquisa para esta situação, não se verificou uma intercepção das curvas optimizadas para os tempos de avanço e recessão, pelo que a amplitude de variação do expoente  $a$  foi aumentada para mais ou menos 15%, sendo esta suficiente para ocasionar o cruzamento das duas curvas.

Nesta rega constatam-se volumes infiltrados comparativamente mais baixos, tempos de avanço substancialmente menores do que nas outras regas, e um valor estimado do tempo de recessão francamente mais alto, o que se explica pelo relativamente elevado teor de humidade que o solo apresentava quando ocorreu esta rega.

Apresenta-se de seguida a informação fornecida ao programa e sintetizada da mesma forma que em 4.2.1.

• **Propriedades hidráulicas do solo e da cultura**

• características de infiltração - a análise gráfica da Figura 4.9, onde estão representadas as curvas ajustadas de infiltração acumulada, bem como a constatação dos valores do Quadro 4.8, permite-nos concluir do melhor ajustamento da equação de Kostiakov-Lewis aos valores observados em testes de campo.

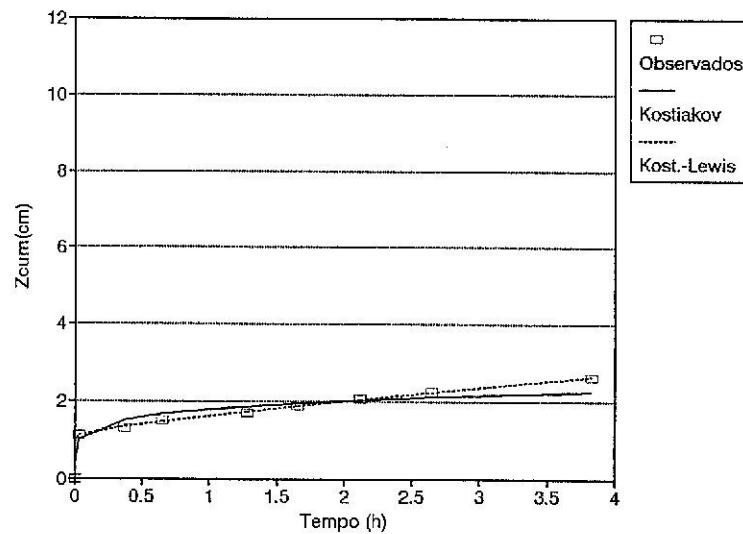


Figura 4.9 - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 2ª rega do canteiro 5, em 03/08/93.

**Quadro 4.8**

Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 2ª rega do canteiro 5, em 03/08/93

Equações de Infiltração	Parâmetros			Aferidor
	$k$ (mm/h <sup>a</sup> )	$a$	$i_f$ (mm/h)	SQD
Kostiakov	18.0	0.170	-	0.3
Kostiakov-Lewis	13.0	0.041	3.35	0.1

• coeficiente de rugosidade - determinado pela fórmula de Manning-Strickler, os factores intervenientes tomam nesta rega os seguintes valores:

-  $q$  - 1.8 l/s/sulco;

-  $A$  - para o perfil respeitante à 2ª rega de 1993, cujas coordenadas estão presentes no Anexo B3.3, e para a profundidade de escoamento de 10 cm, a área transversal molhada é de 0.0166 m<sup>2</sup>;

-  $R$  - para a mesma profundidade de escoamento o raio hidráulico é igual a 0.0444 m;

-  $S_f$  - as cotas da superfície livre do escoamento registadas implicam que este factor assumo o valor de 0.0002.

O coeficiente de rugosidade  $n$  assume para esta rega o valor de 0.017.

#### • Geometria da parcela

Relativamente a esta categoria de dados fornecidos ao programa, o que varia da 1ª para a 2ª rega é a forma transversal dos sulcos.

O perfil seleccionado como representativo das condições médias para esta rega é o P6, resultante da análise da Figura 4.10, e cujas coordenadas estão registadas no Anexo B3.7.

Considerando a informação do Anexo B3.12 são calculados os parâmetros empíricos de ajustamento da equação potência, no valor de 102.70 mm/cm<sup>c</sup> para o coeficiente  $u$  e no valor de 0.55 para o expoente  $c$ .

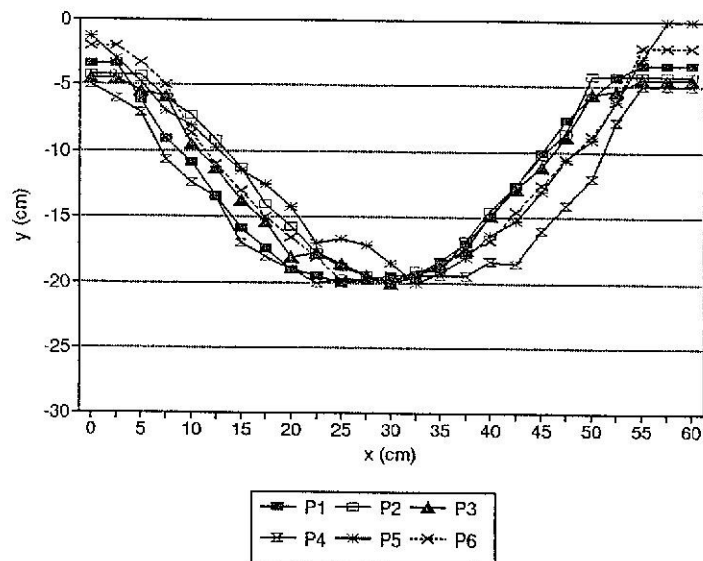


Figura 4.10 - Perfis transversais dos sulcos para a 2ª rega do canteiro 5, em 03/08/93.

• **Parâmetros de gestão da rega**

A dotação requerida continua a ser nesta rega de 40 mm, assegurada pelo fornecimento de um caudal constante de 1.8 l/s/sulco durante um tempo de aplicação de 30 minutos.

O exercício de pesquisa referido em 4.2., sendo mais localizado e tendo uma técnica definida, envolve o uso do computador de uma forma muito menos intensiva do que o exercício executado em 4.2.1.

Da sua execução resultam dois valores do coeficiente  $k$  que minimizam a SQD para os tempos de avanço, e dois valores do mesmo coeficiente que minimizam o módulo do Desvio para os tempos de recessão, que são apresentados no Quadro 4.9.

**Quadro 4.9**

Parâmetros  $a$  e  $k$  da equação de infiltração resultantes do procedimento adoptado na verificação da metodologia - 2ª rega/93

		$a=0.075$ (+15%)		$a=0.055$ (-15%)			
Avanço $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	SQD	Recessão $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)	Avanço $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	SQD	Recessão $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)
14.0	0.7	24.0	7.2	22.0	1.8	18.0	76.6

Da união dos pontos de optimização obtidos para a variação imposta de  $\pm 15\%$  de  $a$ , traçam-se dois segmentos de recta conforme a Figura 4.11, em que ao ponto de intercepção corresponde um expoente  $a$  igual a 0.062 e um coeficiente  $k$  igual a 19.0 mm/h<sup>a</sup>, tidos como parâmetros optimizados da equação de infiltração.

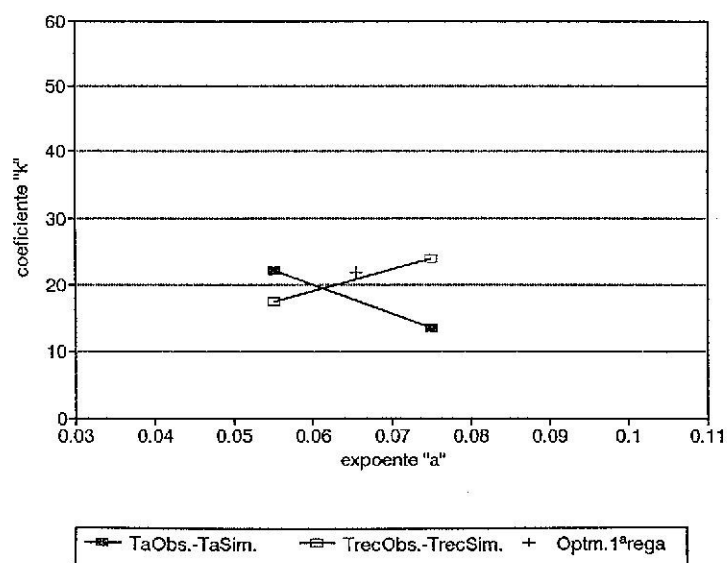
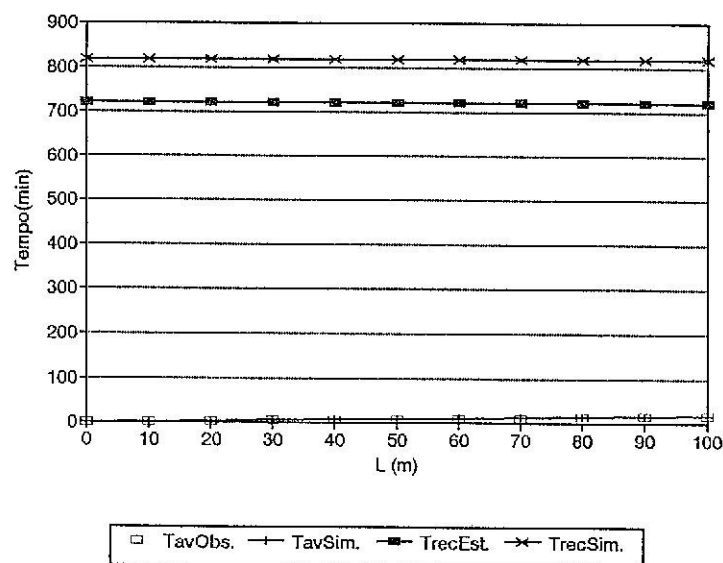


Figura 4.11 - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 2ª rega de 1993.

Os valores dos parâmetros otimizados para esta rega não são substancialmente diferentes dos que se obtiveram no estabelecimento da metodologia na 1ª rega, ainda que os tempos de avanço e recessão sejam bastante diferentes. Esta diferença poderá ser explicada por uma rugosidade mais reduzida, cuja influência é preponderante nos tempos de avanço, e por uma taxa de infiltração final também menos intensa, cuja influência se faz sentir sobretudo no tempo de recessão.

Com os valores dos parâmetros otimizados da equação de infiltração é executada uma simulação e são comparados os tempos de avanço observados e o tempo de recessão estimado, com os respectivos tempos simulados, através dos aferidores numéricos que assumem os valores de 1.7 para a SQD e 98.8 minutos para o módulo do Desvio, ou pela observação da Figura 4.12. De referir que o módulo do Desvio apresenta um valor relativamente elevado certamente devido ao facto da recessão ter sido estimada.

Pode-se pois inferir que as características de infiltração avaliadas por este procedimento, permitem obter resultados simulados suficientemente próximos dos observados nos ensaios de campo.



**Figura 4.12** - Curvas de avanço e recessão observada e estimada, e simuladas com os parâmetros otimizados da equação de infiltração para a 2ª rega de 1993.

#### 4.4.2. Terceira rega de 1993

Da mesma forma que para a 2ª rega e de acordo com o procedimento definido em 4.2., faz-se neste ponto a verificação da metodologia para as condições que se verificaram na 3ª rega.

A amplitude de variação estabelecida do expoente  $a$  da equação de infiltração, no exercício de pesquisa do melhor ajustamento dos valores do coeficiente  $k$  para os tempos de avanço e recessão é de 15%, sendo suficiente para que se verifique a intercepção das curvas optimizadas para o avanço e recessão.

##### • Propriedades hidráulicas do solo e da cultura

- características de infiltração - atendendo ao desenvolvimento das curvas ajustadas aos dados observados representado na Figura 4.13, e à informação constante do Quadro 4.10, permite-nos seleccionar a equação de Kostikov-Lewis como a que melhor pode descrever o processo de infiltração para as condições relativas à 3ª rega.

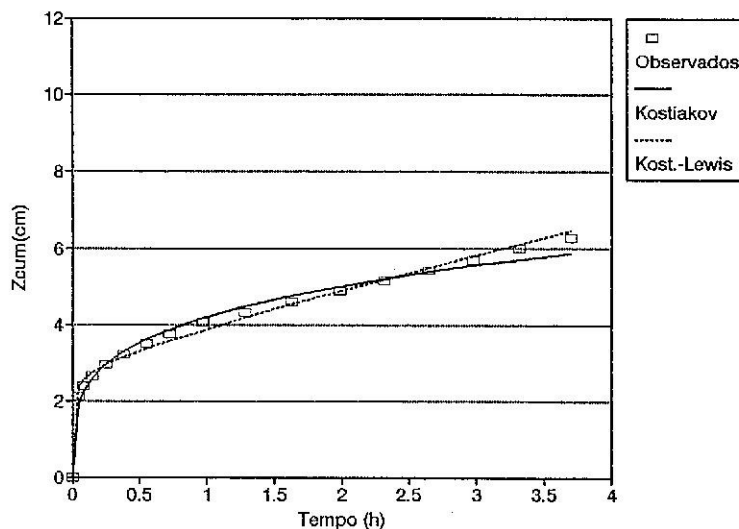


Figura 4.13 - Ajustamento das equações de infiltração aos dados observados em teste realizado antes da 3ª rega do canteiro 5, em 18/08/93.

**Quadro 4.10**

Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da 3ª rega do canteiro 5, em 18/08/93

Equações de Infiltração	Parâmetros			Aferidor SQD
	$k$ (mm/h <sup>a</sup> )	$a$	$i_f$ (mm/h)	
Kostiakov	42.0	0.255	-	0.4
Kostiakov-Lewis	31.0	0.086	8.18	0.2

• coeficiente de rugosidade - para a resolução da fórmula de Manning-Strickler, assumiram-se os seguintes valores:

-  $q$  - 1.8 l/s/sulco;

- *A* - as coordenadas do perfil válido para esta rega (Anexo B3.3), permitem através do uso do programa **PERFIL** o cálculo da área transversal molhada e do perímetro molhado para várias profundidades de escoamento (Anexo B3.6), sendo o valor da primeira calculado por interpolação e igual a 0.0208 m<sup>2</sup> para uma profundidade de escoamento de 10 cm;

- *R* - os valores do Anexo B3.6, para a mesma profundidade de escoamento permitem calcular um raio hidráulico igual a 0.0537 m;

- *S<sub>f</sub>* - o registo das cotas da superfície livre do escoamento com o auxílio de um nível topográfico, permitem o cálculo de um declive médio igual a 0.0006.

Com estes valores dos factores intervenientes na fórmula de cálculo do coeficiente de rugosidade *n*, este assume o valor 0.039.

• **Geometria da parcela**

Tal como na rega anterior só varia, relativamente à 1ª rega, a forma transversal dos sulcos, mantendo-se constante o comprimento controlado dos sulcos, o bloqueamento final do canteiro e a ausência de declive longitudinal e transversal.

A análise visual da Figura 4.14 leva à selecção do perfil P6, como representando as condições médias da secção transversal onde se processou o escoamento para esta rega, sendo possível a leitura das suas coordenadas no Anexo B3.7.

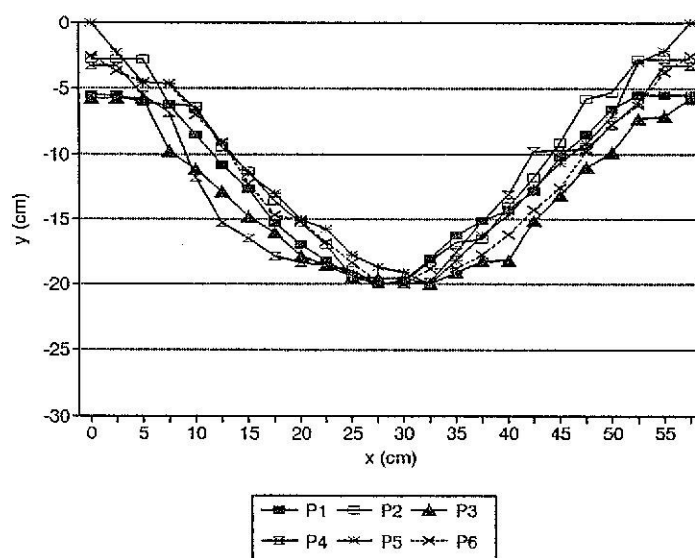


Figura 4.14 - Perfis transversais dos sulcos para a 3ª rega do canteiro 5, em 18/08/93.

A informação de saída do programa **PERTRAN** constante no Anexo B3.13, suporta o cálculo dos parâmetros empíricos  $u$  e  $c$  de ajustamento da equação potência que caracteriza a forma transversal dos sulcos, cujos valores são respectivamente de 100.00 mm/cm<sup>c</sup> e 0.55.

De salientar que estes valores são praticamente iguais aos da rega anterior, o que traduz, para os caudais utilizados, uma estabilização da superfície onde se processa o escoamento.

**• Parâmetros de gestão da rega**

Todos os dados desta categoria de informação fornecida ao modelo, permanecem os mesmos relativamente à rega anterior.

Do exercício de pesquisa definido em 4.2. resultam dois valores do coeficiente  $k$  da equação de infiltração que minimizam a SQD quando comparados os tempos de avanço observados e simulados, e dois valores do mesmo coeficiente que minimizam o módulo do Desvio quando comparado o tempo de recessão estimado e simulado, que são apresentados no Quadro 4.11.

**Quadro 4.11**

Parâmetros  $a$  e  $k$  da equação de infiltração resultantes do procedimento adoptado na verificação da metodologia - 3ª rega/93

$a=0.075$ (+15%)				$a=0.055$ (-15%)			
Avanço $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	SQD	Recessão $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)	Avanço $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	SQD	Recessão $k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)
16.0	3.31	20.0	4.1	18.0	3.9	12.0	1.5

Do procedimento gráfico, num sistema de eixos, de união dos pontos optimizados, resultam dois segmentos de recta que se interceptam num ponto conforme a Figura 4.15, ao qual corresponde um expoente  $a$  igual a 0.067 e um coeficiente  $k$  igual a 17.0 mm/h<sup>a</sup>, considerados parâmetros optimizados da equação de infiltração.

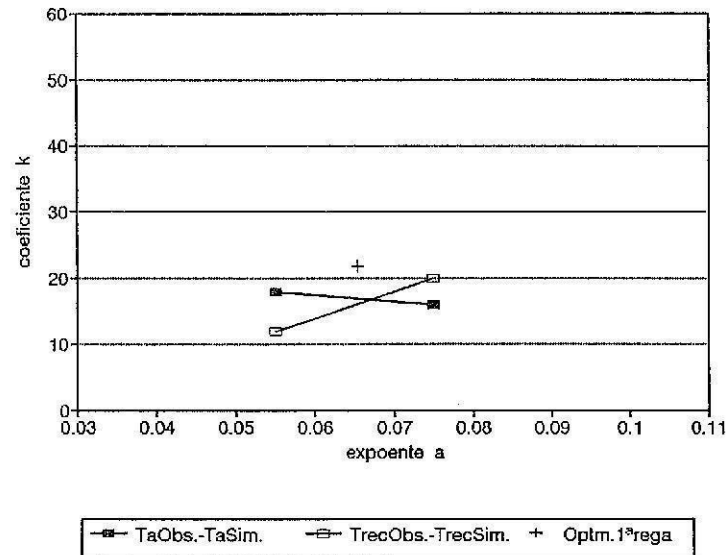


Figura 4.15 - Otimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 3ª rega de 1993.

Com estes parâmetros otimizados da equação de infiltração, mantendo-se os outros dados do ficheiro de entrada válidos para esta rega, executa-se uma simulação e comparam-se os tempos de avanço observados e de recessão estimado com os respectivos tempos simulados. Esta comparação é estabelecida pela observação da Figura 4.16 em que se regista uma boa aderência dos valores simulados aos valores observados e estimados, ou de uma forma mais consistente pela interpretação dos valores dos aferidores numéricos utilizados, em que a SQD é igual a 3.2 e o módulo do Desvio igual a 6.8 minutos.

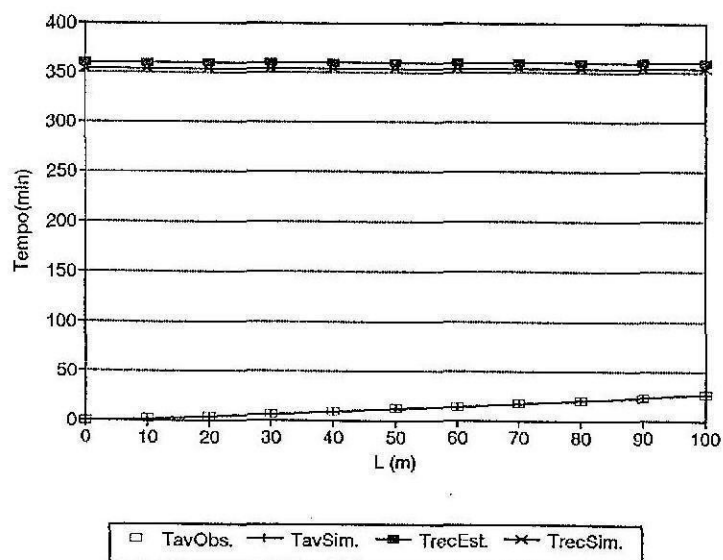


Figura 4.16 - Curvas de avanço e recessão observada e estimada, e simuladas com os parâmetros otimizados da equação de infiltração para a 3ª rega de 1993.

Também nesta rega os resultados simulados evidenciam uma boa aproximação aos valores observados, pelo que o procedimento usado mostra validade na determinação das características de infiltração que prevaleceram durante a rega.

## 4.5. Melhoria da gestão da rega

A gestão de um sistema de rega tem a ver com a questão de como regar (Wattenburger, 1985 citado por Sousa, 1990), que por sua vez em canteiros de nível, de geometria conhecida, se reduz ao fornecimento de um determinado caudal num período de tempo pré-estabelecido.

O regante, para projectar convenientemente uma rega, terá que conhecer as características de infiltração do solo para que, conciliando o caudal e o tempo de aplicação, obtenha uma boa **UD** e uma elevada **Ea**. Operando automaticamente transformações no sistema durante a rega, num processo de optimização/melhoria da qualidade da rega em tempo real, poderá conseguir os mesmos objectivos.

Alicerçando a ideia, já expressa anteriormente, de que características de infiltração distintas ocasionam resultados diferentes da rega, interferindo na sua análise e dando indicações sobre a melhoria da sua gestão, procede-se neste ponto a um exercício exemplificativo referente à 3ª rega de 1993.

Para tal são executadas duas simulações com os parâmetros da equação de infiltração determinados em ensaios de sulco bloqueado, e os parâmetros otimizados pelo procedimento adoptado em 4.4.2., mantendo-se todos os outros dados do ficheiro de entrada do modelo de simulação usados para esta rega. Os parâmetros da equação de infiltração são respectivamente os seguintes:  $a$  igual a 0.086 e 0.067,  $k$  igual a 31.0 e 17.0 mm/h<sup>a</sup> e  $i_f$  igual a 8.18 mm/h.

Dos resultados simulados pelo modelo selecciona-se a **Ea**, a **UD** e a  $Z_{qm}$ , para comparação das duas situações de simulação.

Da análise dos valores do Quadro 4.12, constatam-se valores de **Ea** e **UD** maiores na simulação executada com os parâmetros otimizados da equação de infiltração, que na simulação executada com os parâmetros determinados a partir dos ensaios de infiltração em sulco bloqueado, o que se traduz numa subavaliação da qualidade da rega executada. Registam-se também alturas médias de água infiltrada no quartil mínimo ( $Z_{qm}$ ), bastante semelhantes nas duas situações simuladas.

**Quadro 4.12**

Resultados simulados da rega com os parâmetros da equação de infiltração otimizados e resultantes dos testes em sulco bloqueado

Resultados Simulados	Parâmetros da equação de infiltração dos ensaios	Parâmetros otimizados da equação de infiltração
<b>Ea</b> (%)	91.5	94.2
<b>UD</b> (%)	91.5	94.2
$Z_{qm}$ (mm)	39.6	40.7

O que foi registado diz respeito simplesmente à comparação de duas situações de simulação, referentes a uma rega executada. A melhoria da gestão da rega verifica-se

mais usualmente manipulando o parâmetro tempo de aplicação (Clemmens, 1989). Deste modo, conhecendo os parâmetros otimizados da equação de infiltração para esta situação concreta, um tempo de aplicação de 21 minutos teria sido suficiente para se obter uma UD de 91.5% e uma Ea de 91.4%, no lugar dos 30 minutos que se praticaram na execução da rega, com uma evidente economia de água. Contudo, a dotação média no quartil mínimo ( $Z_{qm}$ ), nesta situação otimizada seria de 27.3 mm, ou seja um valor naturalmente menor do que o correspondente a um tempo de aplicação de 30 minutos.

Pode-se pois inferir que uma incorrecta avaliação da infiltração, podendo ser o caso do teste em sulco bloqueado, pode induzir a uma incorrecta gestão da rega, como seja a defenição de um tempo de aplicação incorrecto.

Deve-se referir que este exercício de exemplificação da melhoria da gestão da rega, é feito do ponto de vista teórico a partir de situações simuladas, já que é durante a execução da rega que se procede à sua gestão, através da manipulação dos parâmetros caudal e tempo de aplicação. No entanto, é possível num esquema operacional que envolva técnicas de retorno de informação, uma estimação/optimização dos parâmetros da equação de infiltração, no sentido de operar no sistema as necessárias transformações para melhoria /optimização da gestão da rega.

**CONCLUSÕES E  
PERSPECTIVAS FUTURAS  
DE DESENVOLVIMENTO**

**CAPÍTULO 5**

## **5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS DE DESENVOLVIMENTO**

O que motivou a realização deste estudo, que incluiu toda a experimentação de campo durante duas campanhas de rega, foi o desenvolvimento de uma metodologia de optimização das características de infiltração do solo, que permita a melhoria da análise e gestão deste processo de rega. Estudou-se complementarmente a influência das imprecisões na avaliação do tempo de recessão e do coeficiente de rugosidade na análise e gestão da rega em canteiros de nível.

É evidente o interesse e a actualidade do tema, que se traduz na economia da água como recurso escasso, nas situações em que os sistemas de rega são correctamente geridos, ou quando se perspectiva a sua reconversão e melhoria.

Pensamos ter cumprido os objectivos a que nos propusemos neste estudo, que nos permitiu um bom aprofundamento de conhecimentos, com uma forte componente de investigação aplicada, e uma exploração intensiva de um dos modelos de simulação de rega de superfície mais potentes e precisos da actualidade.

### **5.1. Conclusões**

Passamos de seguida a referir as conclusões resultantes do estudo empreendido, apontando também algumas recomendações.

⇒ Validade da metodologia de optimização dos parâmetros da equação de infiltração, e também do procedimento simplificado na sua verificação para regas posteriores, que é traduzida por valores baixos dos aferidores numéricos usados (SQD para os tempos de avanço e módulo do Desvio para os tempos de recessão), ou seja uma razoável aproximação entre os valores observados ou estimados e os valores simulados para cada uma das regas em estudo. Importa referir que, do

desenvolvimento da metodologia na 1ª rega e da sua verificação na 2ª rega, ainda que se obtenham valores do módulo do Desvio moderadamente elevados, eles correspondem a variações percentuais inferiores às contempladas no estudo do ponto 4.3. Tal permite concluir que não teriam influência significativa na análise e gestão da rega.

⇒ Melhoria da gestão da rega exemplificada para a 3ª rega de 1993, em que a análise dos resultados simulados com os parâmetros otimizados da equação de infiltração e com os determinados a partir dos testes de infiltração em sulco bloqueado, permite reduzir o tempo de aplicação de 30 para 21 minutos para se obter a mesma UD (91.5%) e uma Ea de 91.4%, quando o processo é simulado com os parâmetros otimizados da equação de infiltração. Nesta situação otimizada a dotação média no quartil mínimo seria reduzida para 27.3 mm, o que implicaria uma frequência maior de regas, que não teria como consequência um aumento de mão-de-obra se houver uma automatização dos sistemas.

⇒ Influência pouco pronunciada de uma avaliação pouco precisa do tempo de recessão na análise e gestão da rega, facto que é suportado por variações pouco significativas da Ea e UD e desenvolvimento bastante próximo das curvas de infiltração acumulada ao longo do comprimento da parcela, para as variações percentuais do tempo de recessão estudadas.

Decorrente desta conclusão e pela dificuldade e morosidade desta avaliação no campo, admite-se para estas situações que se estime o tempo de recessão com base noutras avaliações de campo e em observações de anos anteriores.

⇒ Influência mais marcada do coeficiente de rugosidade na análise e gestão da rega, evidenciada por uma maior sensibilidade da Ea, UD e das curvas de infiltração acumulada ao longo do comprimento da parcela, para as variações percentuais do coeficiente de rugosidade estudadas.

Esta conclusão sugere-nos a necessidade da avaliação rigorosa do coeficiente de rugosidade, nas regas em que se prevejam condições mais adversas ao escoamento, como por exemplo na 1ª rega de uma campanha.

Podemos registar outras conclusões que não estão directamente relacionadas com os objectivos definidos, mas que são igualmente permitidas pelos resultados obtidos neste estudo e que passamos a referir.

⇒ Das equações de infiltração em estudo, aquela que evidenciou um melhor ajustamento aos dados observados em todos os testes de infiltração em sulco bloqueado foi a de Kostiakov-Lewis, facto que é baseado na análise visual dos gráficos e por confirmação do aferidor numérico SQD.

⇒ Impacto da utilização de rodas compactadoras na operação de abertura dos sulcos na 1ª rega de 1993, o que se traduziu por um valor reduzido do coeficiente de rugosidade de 0.036, e na melhoria das condições hidráulicas do escoamento. Esta situação permitiu a observação de um tempo de avanço até aos 100 metros (25.3 minutos) que corresponde a pouco mais de metade do registado na 1ª rega de 1992 (46.0 minutos).

⇒ Estabilização da forma transversal dos sulcos a partir da 1ª rega, facto que é constatado pelos valores idênticos dos parâmetros empíricos de ajustamento da equação potência, e que só é possível pela utilização de caudais de alimentação não erosivos.

## **5.2. Perspectivas futuras de desenvolvimento**

Cientes do interesse deste tema, numa época em que limitações de vária ordem impõem uma importância crescente na economia da água de rega, justificam a continuidade do seu estudo.

Assim, pensamos que seria interessante a verificação da metodologia desenvolvida para outras realidades hidropedológicas no mesmo aproveitamento hidroagrícola onde se realizaram os ensaios de campo, ou noutros onde seja ou venha a ser praticado o processo de rega em canteiros de nível. A extensão da sua aplicação à rega por sulcos inclinados permanece válida, essencialmente no que respeita a um melhor conhecimento das características de infiltração, pelo que ensaios específicos para verificação da metodologia deverão também ser efectuados para estas condições.

Na perspectiva da melhoria da gestão da rega, afigura-se útil o desenvolvimento de um esquema operacional que dê indicações sobre o controlo da rega, ligado ou não à automatização da distribuição da água à parcela.



**REFERÊNCIAS  
BIBLIOGRÁFICAS**

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Basset, D.L.** 1971. Mathematical model of water advance in border irrigation. *Transactions of the ASAE*, 15(5): 992-995.
- Basset, D.L., D.D. Fangmeier, T. Strelkoff.** 1981. Hydraulics of surface irrigation. Chapter 12. In: M.E. Jensen (ed). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*. ASAE Monograph nº 3: 447-498.
- Clemmens, A.J., A.R. Dedrick.** 1982. Limits for practical level-basin design. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, 108 (IR2): 127-141.
- Clemmens, A.J.** 1989. Management of Basin/Border Irrigation Systems With Feedback Control. *ASAE Paper No. 89-2550. ASAE International Winter Meeting*, New Orleans, Louisiana, December 12-15, 15 p.
- Clemmens, A.J.** 1990a. Feedback control for surface irrigation management. In Visions of the Future. *Proceedings on Third National Irrigation Symposium*, Phoenix, Arizona, 28 Oct.-01 Nov., 1990, 255-260.
- Clemmens, A.J.** 1990b. Infiltration or roughness from surface irrigation advance. *Proceedings of the 1990 National Conference*, ASCE Proc. Conf., Durango, Colorado, July 11-13, 1990, 46-53.
- Clemmens, A.J.** 1992. Feedback control of basin-irrigation system. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 118(3): 480-496.
- Dedrick, A.R., L.J. Erie, A.J. Clemmens.** 1982. Level-basin irrigation. In, D. Hillel (ed.), *Advances in Irrigation*, Academic Press, New York, Vol. 1: 105-145.
- Duarte, A.F.C.** 1988. *Estudo da viabilidade das novas técnicas de rega por sulcos no Perímetro do Mira: segunda abordagem*. Relatório final do Curso de Engenharia Agrícola. Universidade de Évora.

- Duke, H.R.** 1992. Comunicação pessoal.
- Elliot, R.L., W.R. Walker.** 1980. Furrow irrigation infiltration and advance functions. *ASAE Paper No. 80-2075. ASAE Summer Meeting, San Antonio, Texas, June 15-18.*
- Elliot, R.L., W.R. Walker.** 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE, 25(2): 396-400.*
- Fernando, R.M.C.** 1987. *Algumas propriedades hidráulicas do solo.* Instituto Superior de Agronomia, UTL, Lisboa.
- Humpherys, A.S., H.D. Fisher.** 1987. Basin/border irrigation using feedback via infrared telemetry. *ASAE Paper No. 87-2636. ASAE International Winter Meeting, Chicago, Illinois, December 15-18, 23 p.*
- Izadi, B., D.F. Heermann, H.R. Duke.** 1988. Sensor Placement for Real Time Infiltration Parameter Evaluation. *Transactions of the ASAE, 31(4): 1159-1166.*
- Katopodes, N.D., T. Strelkoff.** 1977. Hydrodynamics of border irrigation- a complete model. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, 103(IR3): 309-324.*
- Katopodes, N.D., J-H. Tang, A.J. Clemmens.** 1989. Estimation of Surface Irrigation Parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, sbmitted.*
- Latimer, E.A., D.L. Reddell.** 1987. Effect of neglecting surface storage on performance of an automated furrow irrigation system. *ASAE Paper No. 87-2639. ASAE International Winter Meeting, Chicago, Illinois, December 15-18, 14 p.*
- Ley, T.W., W. Clyma.** 1980. Evaluation of graded border irrigation systems. In: EWVP, *Problem Identification Training Manual for On-farm Irrigation Syetems*, Vol. II, Egypt Water Use and Manegement Project, C.S.U., Fort Collins, Colorado.

- Mendonça, P.V.** 1975. *Excertos das Lições de Hidráulica Geral e Agrícola*. 5ª edição ciclostilada, Lisboa.
- Merriam, J.L., A.J. Clemmens.** 1985. Time rated infiltrated depth families. *Proceedings of the Specialty Conference "Development and Management Aspects of Irrigation and Drainage Systems"*, IR Div/ASCE, San Antonio, Texas, July 1985, 67-74.
- Pereira, L.S.** 1989. Mitigation of droughts: 2. irrigation. *ICID Bulletin 1989*, 38(2): 16-34.
- Pereira, L.S.** 1990. *Lecture notes on real time control of surface irrigation systems*. Senior Advanced Course on Appropriate Modernization and Management of Irrigation Systems, IHE, Delft, 10 Set.-19 Oct., 1990, 79 p.
- Reddell, D.L., H.F. Latortue.** 1986. Evaluation of furrow surface storage and the Kostiakov infiltration parameters using irrigation advance data. *ASAE Paper No. 86-2574. ASAE Winter Meeting*, Chicago, Illinois, December 16-19, 27 p.
- Reddy, J.M., W. Clyma.** 1982. Analysis of basin irrigation performance with variable inflow rate. *Agriculture Water Management*, 5: 295-308.
- Sakkas, T.G., T. Strelkoff.** 1974. Hydrodynamics of surface irrigation- advance phase. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, 100(IR1): 31-48.
- Serralheiro, R.P.** 1988. *Um estudo da rega por sulcos num solo argiluvado*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Évora.
- Shafique, M.S.** 1984. *Zero-inertia model for basin-furrow irrigation*. Fort Collins. Colorado State University, PhD Dissertation.
- Smerdon, E.T., A.W. Blair, D.L. Reddell.** 1988. Infiltration from furrow irrigation advance data I: theory. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 114(1): 4-17.

- Smith, D.L., H.R. Duke.** 1984. Prediction of irrigation advance rates in real time. *ASAE Paper No. 84-2590. ASAE Winter Meeting*, New Orleans, Louisiana, December 11-14, 17 p.
- Sousa, P.L.** 1990. *Modelação e Gestão em Rega por Canteiros de Nível*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, UTL, Lisboa.
- Sousa, P.L., T.J. Trout.** 1992. Constraints to real-time control of surface irrigation. *Proceedings of the Workshop on Real Time Sensing and Control Automated Irrigation Systems. ICID 16 th European Regional Conference*, Budapest, 26 June, 1992.
- Spurgeon, W.E., H.R. Duke.** 1988a. Furrow irrigation model selection for real time control. *ASAE Paper # 88-2017. ASAE International Summer Meeting*, Rapid City, South Dakota, June 26-29, 20 p.
- Spurgeon, W.E., H.R. Duke.** 1988b. Furrow irrigation performance using real time control. *Proceedings on Planning Now for Irrigation & Drainage*, IR Div/ASCE, Lincoln, Nebraska, July 18-21, 133-140.
- Strelkoff, T.** 1970. Numerical solution of Saint-Venant equations. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 96(HY1): 223-252.
- Strelkoff, T.** 1985. *BRDRFLW: a mathematical model of border irrigation*. U.S.D.A., Agricultural Research Service, ARS-29, 100 p.
- Strelkoff, T.** 1986. *SRFIRRG: a mathematical model of surface irrigation*. U.S.D.A., Agricultural Research Service, Draft copy, 52 p.
- Strelkoff, T.** 1990. *SRFR version 20: a computer program for simulating flow in surface irrigation*. U.S.D.A., Agricultural Research Service, 69 p.
- Strelkoff, T.** 1992. *SRFR version 20.5 (experimental): a computer program for simulating flow in surface irrigation*. U.S.D.A., Agricultural Research Service, 59 p.

- Tabuada, M.A.** 1989. *Modelação bidimensional e tridimensional da rega por sulcos*.  
Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, UTL, Lisboa.
- Trout, T.J.** 1992. Comunicação pessoal.
- USDA, Soil Conservation Service.** 1974. Border irrigation. In: *National Engineering Handbook*, Section 15, Chapter 4, U.S. Government Printing Office, 77 p.
- USDA, Soil Conservation Service.** 1979. Furrow irrigation. In: *National Engineering Handbook*, Section 15, Chapter 5, U.S. Government Printing Office, 77 p.
- Walker, W.R., G.V. Skogerboe.** 1982. *Theory and practice of surface irrigation*.  
Logan, Utah.



# ANEXOS

# **ANEXOS A**



**Foto 3.1** - Abre-sulcos com rodas compactadoras, utilizado na operação de abertura dos sulcos.



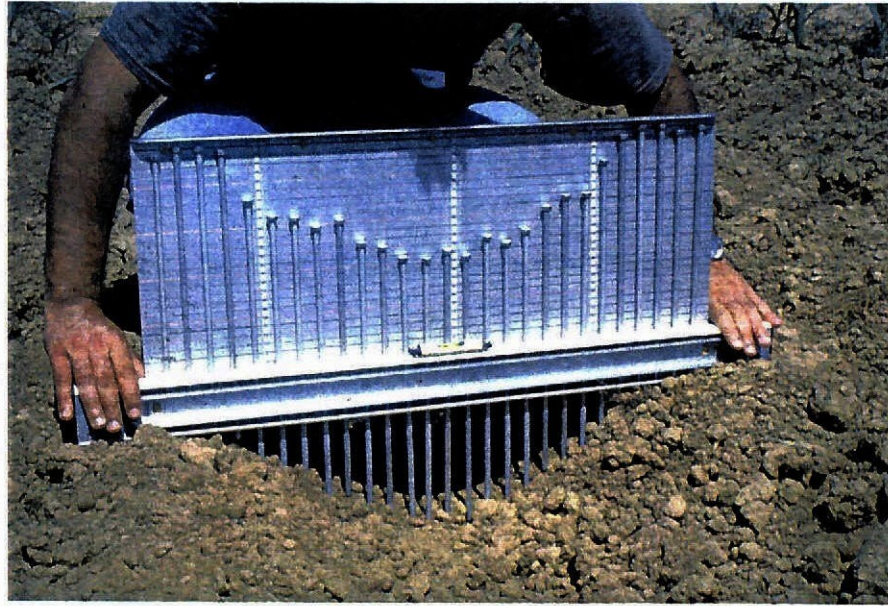
**Foto 3.2** - Manga flexível de plástico com válvulas de alimentação individual dos sulcos.



**Foto 3.3 -** Tubo PVC com janelas reguláveis de caudal, de alimentação individual dos sulcos.



**Foto 3.4 -** Medidores portáteis de soleira espessa modificada para avaliação dos caudais nos sulcos.



**Foto 3.5 - Perfilómetro de agulhas.**



**Foto 3.6 - Infiltrómetro de sulco bloqueado.**

## **ANEXOS B**

### ANEXO B3.1

Tempos de avanço observados nas 1ª, 2ª e 3ª regas  
dos ensaios de 1992

Distância (m)	Tempo de Avanço (min)		
	1ª rega (15/07/92)	2ª rega (29/07/92)	3ª rega (25/08/92)
0	0.0	0.0	0.0
10	2.0	1.0	1.0
20	5.0	3.0	2.0
30	8.0	5.0	4.0
40	11.0	7.0	6.0
50	15.0	10.0	8.0
60	20.0	13.0	11.0
70	26.0	17.0	14.0
80	32.0	21.0	17.0
90	38.0	25.0	20.0
100	46.0	29.0	24.0
110	52.0	33.0	28.0
120	60.0	37.0	32.0
130	67.0	41.0	36.0
140	77.0	46.0	40.0
150	86.0	52.0	45.0

### ANEXO B3.2

Tempos de avanço observados nas 1ª, 2ª e 3ª regas  
dos ensaios de 1993

Distância (m)	Tempo de Avanço (min)		
	1ª rega (13/07/93)	2ª rega (03/08/93)	3ª rega (18/08/93)
0	0.0	0.0	0.0
10	0.9	1.0	1.8
20	2.2	2.3	4.0
30	4.0	3.8	6.5
40	6.3	5.3	9.3
50	9.3	6.7	12.0
60	12.3	8.6	15.0
70	15.8	10.5	18.0
80	18.5	12.8	20.5
90	21.5	14.8	23.5
100	25.3	17.0	26.5

### ANEXO B3.3

Coordenadas dos perfis transversais para o cálculo do coeficiente de rugosidade relativo a cada rega

x (cm)	y (cm)		
	1ª rega/93 P1	2ª rega/93 P4	3ª rega/93 P4
0.0	0.0	-5.0	-3.3
2.5	-1.6	-6.0	-3.3
5.0	-1.6	-7.1	-5.5
7.5	-6.1	-10.7	-3.8
10.0	-8.2	-12.4	-11.8
12.5	-13.2	-13.5	-15.3
15.0	-18.5	-17.0	-13.5
17.5	-22.3	-18.0	-17.9
20.0	-23.0	-19.0	-18.4
22.5	-23.0	-20.0	-18.6
25.0	-23.0	-19.7	-19.0
27.5	-23.1	-19.8	-20.0
30.0	-23.2	-19.8	-20.0
32.5	-23.1	-19.5	-19.9
35.0	-20.0	-19.5	-17.6
37.5	-16.0	-19.5	-15.2
40.0	-12.1	-18.4	-13.1
42.5	-9.1	-18.6	-9.8
45.0	-4.0	-16.0	-9.7
47.5	-2.3	-14.1	-9.6
50.0	0.0	-12.0	-7.8
52.5		-7.7	-6.0
55.0		-5.0	-3.3
57.5		-5.0	-3.3
60.0		-5.0	

## ANEXO B3.4

Ficheiro de saída do programa PERFIL, para a 1ª rega de 1993

\*\*\*\*\*

PERFIL: sulBreg1

\*\*\* SEMI PERFIL ESQUERDO \*\*\*

h(m)	B(m)	A(m2)	P(m)
.0000	.0250	.0000	.0250
.0070	.0500	.0003	.0510
.0450	.0750	.0026	.0964
.0980	.1000	.0073	.1550
.1480	.1250	.0129	.2109
.1690	.1500	.0158	.2436
.2140	.1750	.0231	.2951
.2140	.2000	.0231	.3201
.2300	.2250	.0265	.3498

\*\*\* SEMI PERFIL DIREITO \*\*\*

h(m)	B(m)	A(m2)	P(m)
-.0010	.0250	-.0000	.0250
-.0020	.0500	-.0001	.0500
-.0010	.0750	.0000	.0751
.0300	.1000	.0027	.1149
.0700	.1250	.0072	.1621
.1090	.1500	.0126	.2084
.1390	.1750	.0175	.2474
.1900	.2000	.0270	.3042
.2070	.2250	.0306	.3345

\*\*\*\*\*

## ANEXO B3.5

Ficheiro de saída do programa PERFIL, para a 2ª rega de 1993

\*\*\*\*\*

PERFIL: sulBreg2

\*\*\* SEMI PERFIL ESQUERDO \*\*\*

h(m)	B(m)	A(m2)	P(m)
.0160	.0250	.0002	.0297
.0370	.0500	.0010	.0623
.0530	.0750	.0020	.0920
.0590	.1000	.0025	.1177
.0780	.1250	.0046	.1491
.0970	.1500	.0073	.1805
.1240	.1750	.0116	.2173

\*\*\* SEMI PERFIL DIREITO \*\*\*

h(m)	B(m)	A(m2)	P(m)
.0040	.0250	.0000	.0253
.0230	.0500	.0008	.0567
.0410	.0750	.0019	.0875
.0580	.1000	.0034	.1178
.0840	.1250	.0063	.1538
.0970	.1500	.0081	.1820
.1200	.1750	.0118	.2160

\*\*\*\*\*

## ANEXO B3.6

Ficheiro de saída do programa PERFIL, para a 3ª rega de 1993

\*\*\*\*\*

PERFIL: sulBreg3

\*\*\* SEMI PERFIL ESQUERDO \*\*\*

h(m)	B(m)	A(m2)	P(m)
.0100	.0250	.0001	.0269
.0140	.0500	.0003	.0522
.0160	.0750	.0004	.0773
.0210	.1000	.0008	.1028
.0350	.1250	.0024	.1315
.0470	.1500	.0041	.1592
.0820	.1750	.0098	.2022
.1310	.2000	.0189	.2572
.1450	.2250	.0219	.2859

\*\*\* SEMI PERFIL DIREITO \*\*\*

h(m)	B(m)	A(m2)	P(m)
.0010	.0250	.0000	.0250
.0240	.0500	.0009	.0590
.0480	.0750	.0024	.0936
.0690	.1000	.0042	.1263
.1020	.1250	.0079	.1677
.1030	.1500	.0081	.1927
.1040	.1750	.0082	.2177
.1220	.2000	.0116	.2485
.1400	.2250	.0154	.2793

\*\*\*\*\*

### ANEXO B3.7

Coordenadas dos perfis transversais que representam as condições  
médias dos sulcos para cada rega controlada

x (cm)	y (cm)					
	1ª rega/92 P2	2ª rega/92 P4	3ª rega/92 P3	1ª rega/93 P3	2ª rega/93 P6	3ª rega/93 P6
0.0	-0.2	0.0	0.0	-2.2	-2.0	-2.6
2.5	-1.2	-2.9	-2.0	-5.3	-2.0	-3.7
5.0	-2.8	-2.5	-2.2	-5.7	-3.3	-4.6
7.5	-4.9	-5.7	-2.9	-6.4	-5.0	-4.7
10.0	-5.4	-6.9	-5.2	-9.2	-8.7	-7.0
12.5	-6.9	-7.3	-6.9	-10.0	-11.0	-9.1
15.0	-6.8	-9.2	-8.1	-16.8	-13.0	-12.2
17.5	-9.9	-10.0	-7.8	-19.5	-15.0	-14.7
20.0	-12.0	-12.2	-8.5	-22.7	-16.6	-15.2
22.5	-13.7	-12.9	-9.7	-22.7	-18.1	-16.8
25.0	-15.1	-14.6	-11.8	-23.2	-19.9	-18.4
27.5	-15.3	-15.7	-13.4	-23.1	-19.8	-19.9
30.0	-16.5	-16.9	-14.9	-23.0	-20.0	-20.0
32.5	-18.1	-17.3	-16.2	-23.1	-19.6	-18.9
35.0	-18.2	-16.6	-17.0	-16.2	-18.6	-18.9
37.5	-18.2	-17.2	-16.3	-15.2	-17.7	-17.8
40.0	-16.4	-15.3	-16.0	-14.2	-16.8	-16.2
42.5	-16.1	-14.4	-16.1	-10.0	-14.6	-14.3
45.0	-14.7	-12.5	-15.5	-6.6	-12.5	-12.6
47.5	-14.3	-10.4	-14.5	-5.4	-10.6	-9.8
50.0	-12.7	-8.8	-13.2	-3.7	-8.8	-7.7
52.5	-10.2	-7.2	-12.0	-2.5	-6.2	-6.3
55.0	-8.6	-5.6	-10.8	-2.2	-2.0	-3.8
57.5	-7.3	-5.0	-9.0		-2.0	-2.6
60.0	-2.9	-3.0	-6.6		-2.0	
62.5	-1.5	-1.0	-6.0			
65.0	-1.2	0.0	-4.8			
67.5	-0.2		-2.0			

### ANEXO B3.8

Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 1ª rega de 1992

\*\*\*\*\*

#### IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ==> REG1S3

Xi	yi	xi+1	Yi+1	h	B	B
.0	.00	2.50	1.80	.00	.00	.00
.0	.00	2.50	1.80	.50	.69	3.82
.0	.00	2.50	1.80	1.00	1.39	5.30
.0	.00	2.50	1.80	1.50	2.08	6.77
2.5	1.80	5.00	2.10	2.00	4.17	9.79
5.0	2.10	7.50	3.50	2.50	5.71	12.38
5.0	2.10	7.50	3.50	3.00	6.61	17.02
7.5	3.50	10.00	3.90	3.50	7.50	18.61
10.0	3.90	12.50	5.50	4.00	10.16	21.96
10.0	3.90	12.50	5.50	4.50	10.94	23.44
10.0	3.90	12.50	5.50	5.00	11.72	24.95
12.5	5.50	15.00	8.00	5.50	12.50	26.47
12.5	5.50	15.00	8.00	6.00	13.00	27.71
12.5	5.50	15.00	8.00	6.50	13.50	28.86
12.5	5.50	15.00	8.00	7.00	14.00	29.95
12.5	5.50	15.00	8.00	7.50	14.50	31.05
15.0	8.00	17.50	9.40	8.00	15.00	32.14
15.0	8.00	17.50	9.40	8.50	15.89	33.55
15.0	8.00	17.50	9.40	9.00	16.79	34.85
17.5	9.40	20.00	10.90	9.50	17.67	36.13
17.5	9.40	20.00	10.90	10.00	18.50	37.37
17.5	9.40	20.00	10.90	10.50	19.33	38.61
20.0	10.90	22.50	15.30	11.00	20.06	39.73
20.0	10.90	22.50	15.30	11.50	20.34	43.17
20.0	10.90	22.50	15.30	12.00	20.63	44.29
20.0	10.90	22.50	15.30	12.50	20.91	45.41
20.0	10.90	22.50	15.30	13.00	21.19	47.19
20.0	10.90	22.50	15.30	13.50	21.48	49.22
20.0	10.90	22.50	15.30	14.00	21.76	50.09
20.0	10.90	22.50	15.30	14.50	22.05	50.97
20.0	10.90	22.50	15.30	15.00	22.33	51.85
22.5	15.30	25.00	16.70	15.50	22.86	53.01
22.5	15.30	25.00	16.70	16.00	23.75	54.69
22.5	15.30	25.00	16.70	16.50	24.64	56.36
30.0	17.00	32.50	18.00	17.00	30.00	62.50
30.0	17.00	32.50	18.00	17.50	31.25	65.00

\*\*\*\*\*

### ANEXO B3.9

Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 2ª rega de 1992

\*\*\*\*\*

IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ==> REG2S24

Xi	yi	xi+1	Yi+1	h	B	B
.0	.00	2.50	.30	.00	.00	.00
7.5	.30	10.00	1.60	.50	7.88	8.93
7.5	.30	10.00	1.60	1.00	8.85	10.93
7.5	.30	10.00	1.60	1.50	9.81	12.99
10.0	1.60	12.50	2.50	2.00	11.11	15.43
12.5	2.50	15.00	4.40	2.50	12.50	17.79
12.5	2.50	15.00	4.40	3.00	13.16	19.19
12.5	2.50	15.00	4.40	3.50	13.82	20.58
12.5	2.50	15.00	4.40	4.00	14.47	21.97
15.0	4.40	17.50	6.50	4.50	15.12	24.40
15.0	4.40	17.50	6.50	5.00	15.71	26.06
15.0	4.40	17.50	6.50	5.50	16.31	27.22
15.0	4.40	17.50	6.50	6.00	16.90	28.38
17.5	6.50	20.00	8.10	6.50	17.50	29.55
17.5	6.50	20.00	8.10	7.00	18.28	31.09
17.5	6.50	20.00	8.10	7.50	19.06	33.44
17.5	6.50	20.00	8.10	8.00	19.84	35.24
20.0	8.10	22.50	9.70	8.50	20.63	36.68
20.0	8.10	22.50	9.70	9.00	21.41	38.12
20.0	8.10	22.50	9.70	9.50	22.19	39.56
22.5	9.70	25.00	11.30	10.00	22.97	42.97
22.5	9.70	25.00	11.30	10.50	23.75	44.79
22.5	9.70	25.00	11.30	11.00	24.53	46.61
25.0	11.30	27.50	11.90	11.50	25.83	48.57
27.5	11.90	30.00	16.90	12.00	27.55	50.67
27.5	11.90	30.00	16.90	12.50	27.80	51.32
27.5	11.90	30.00	16.90	13.00	28.05	51.96
27.5	11.90	30.00	16.90	13.50	28.30	52.60
27.5	11.90	30.00	16.90	14.00	28.55	53.24
27.5	11.90	30.00	16.90	14.50	28.80	56.73
27.5	11.90	30.00	16.90	15.00	29.05	57.41
27.5	11.90	30.00	16.90	15.50	29.30	58.09
27.5	11.90	30.00	16.90	16.00	29.55	58.77
27.5	11.90	30.00	16.90	16.50	29.80	59.46

\*\*\*\*\*

### ANEXO B3.10

Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 3ª rega de 1992

\*\*\*\*\*

#### IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ==> REG3S15

Xi	yi	xi+1	Yi+1	h	B	B
.0	.00	2.50	1.00	.00	.00	.00
.0	.00	2.50	1.00	.50	1.25	2.81
5.0	.60	7.50	1.50	1.00	6.11	9.00
7.5	1.50	10.00	2.50	1.50	7.50	11.35
7.5	1.50	10.00	2.50	2.00	8.75	13.56
10.0	2.50	12.50	3.80	2.50	10.00	15.67
10.0	2.50	12.50	3.80	3.00	10.96	17.46
10.0	2.50	12.50	3.80	3.50	11.92	19.26
12.5	3.80	15.00	5.00	4.00	12.92	21.04
12.5	3.80	15.00	5.00	4.50	13.96	22.86
15.0	5.00	17.50	6.20	5.00	15.00	24.69
15.0	5.00	17.50	6.20	5.50	16.04	26.40
15.0	5.00	17.50	6.20	6.00	17.08	28.04
17.5	6.20	20.00	8.00	6.50	17.92	29.46
17.5	6.20	20.00	8.00	7.00	18.61	30.75
17.5	6.20	20.00	8.00	7.50	19.31	32.22
20.0	8.00	22.50	10.40	8.00	20.00	33.96
20.0	8.00	22.50	10.40	8.50	20.52	35.52
20.0	8.00	22.50	10.40	9.00	21.04	37.83
20.0	8.00	22.50	10.40	9.50	21.56	42.81
20.0	8.00	22.50	10.40	10.00	22.08	44.38
22.5	10.40	25.00	11.00	10.50	22.92	46.00
25.0	11.00	27.50	12.20	11.00	25.00	48.82
25.0	11.00	27.50	12.20	11.50	26.04	50.60
25.0	11.00	27.50	12.20	12.00	27.08	52.30
27.5	12.20	30.00	14.00	12.50	27.92	53.68
27.5	12.20	30.00	14.00	13.00	28.61	54.92
27.5	12.20	30.00	14.00	13.50	29.31	56.15
30.0	14.00	32.50	17.00	14.00	30.00	57.39
30.0	14.00	32.50	17.00	14.50	30.42	59.35
30.0	14.00	32.50	17.00	15.00	30.83	63.33
30.0	14.00	32.50	17.00	15.50	31.25	64.38
30.0	14.00	32.50	17.00	16.00	31.67	65.42
30.0	14.00	32.50	17.00	16.50	32.08	66.46

\*\*\*\*\*

## ANEXO B3.11

Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 1ª rega de 1993

\*\*\*\*\*

IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ==> reglper3

Xi	yi	xi+1	Yi+1	h	B	B
.0	.00	2.50	.10	.00	.00	.00
7.5	.10	10.00	7.00	.50	7.64	12.64
7.5	.10	10.00	7.00	1.00	7.83	13.22
7.5	.10	10.00	7.00	1.50	8.01	13.79
7.5	.10	10.00	7.00	2.00	8.19	14.36
7.5	.10	10.00	7.00	2.50	8.37	14.93
7.5	.10	10.00	7.00	3.00	8.55	15.50
7.5	.10	10.00	7.00	3.50	8.73	16.08
7.5	.10	10.00	7.00	4.00	8.91	16.69
7.5	.10	10.00	7.00	4.50	9.09	17.33
7.5	.10	10.00	7.00	5.00	9.28	17.98
7.5	.10	10.00	7.00	5.50	9.46	18.62
7.5	.10	10.00	7.00	6.00	9.64	19.27
7.5	.10	10.00	7.00	6.50	9.82	19.86
12.5	5.80	15.00	9.00	7.00	13.44	23.66
12.5	5.80	15.00	9.00	7.50	13.83	24.23
12.5	5.80	15.00	9.00	8.00	14.22	24.81
12.5	5.80	15.00	9.00	8.50	14.61	25.38
15.0	9.00	17.50	13.20	9.00	15.00	25.96
15.0	9.00	17.50	13.20	9.50	15.30	26.44
15.0	9.00	17.50	13.20	10.00	15.60	26.92
15.0	9.00	17.50	13.20	10.50	15.89	27.40
15.0	9.00	17.50	13.20	11.00	16.19	27.88
15.0	9.00	17.50	13.20	11.50	16.49	28.36
15.0	9.00	17.50	13.20	12.00	16.79	28.84
15.0	9.00	17.50	13.20	12.50	17.08	29.33
15.0	9.00	17.50	13.20	13.00	17.38	29.81
17.5	13.20	20.00	17.60	13.50	17.67	31.11
17.5	13.20	20.00	17.60	14.00	17.95	32.95
17.5	13.20	20.00	17.60	14.50	18.24	33.69
17.5	13.20	20.00	17.60	15.00	18.52	34.42
17.5	13.20	20.00	17.60	15.50	18.81	35.15
17.5	13.20	20.00	17.60	16.00	19.09	35.88
17.5	13.20	20.00	17.60	16.50	19.38	36.61
17.5	13.20	20.00	17.60	17.00	19.66	37.87
17.5	13.20	20.00	17.60	17.50	19.94	39.94
22.5	17.80	25.00	19.50	18.00	22.79	45.37
22.5	17.80	25.00	19.50	18.50	23.53	46.51
22.5	17.80	25.00	19.50	19.00	24.26	47.65
25.0	19.50	27.50	20.70	19.50	25.00	48.79
25.0	19.50	27.50	20.70	20.00	26.04	50.24
25.0	19.50	27.50	20.70	20.50	27.08	51.68

\*\*\*\*\*

## ANEXO B3.12

Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 2ª rega de 1993

\*\*\*\*\*

IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ==> reg2per6

Xi	yi	xi+1	Yi+1	h	B	B
.0	.00	2.50	.50	.00	.00	.00
2.5	.50	5.00	1.50	.50	2.50	7.92
2.5	.50	5.00	1.50	1.00	3.75	9.86
5.0	1.50	7.50	2.40	1.50	5.00	11.81
5.0	1.50	7.50	2.40	2.00	6.39	13.89
7.5	2.40	10.00	3.30	2.50	7.78	16.11
7.5	2.40	10.00	3.30	3.00	9.17	18.33
10.0	3.30	12.50	5.50	3.50	10.23	20.23
10.0	3.30	12.50	5.50	4.00	10.80	21.58
10.0	3.30	12.50	5.50	4.50	11.36	22.93
10.0	3.30	12.50	5.50	5.00	11.93	24.28
12.5	5.50	15.00	7.60	5.50	12.50	25.50
12.5	5.50	15.00	7.60	6.00	13.10	26.72
12.5	5.50	15.00	7.60	6.50	13.69	27.94
12.5	5.50	15.00	7.60	7.00	14.29	29.16
12.5	5.50	15.00	7.60	7.50	14.88	30.38
15.0	7.60	17.50	9.50	8.00	15.53	31.65
15.0	7.60	17.50	9.50	8.50	16.18	32.93
15.0	7.60	17.50	9.50	9.00	16.84	34.22
17.5	9.50	20.00	11.30	9.50	17.50	35.43
17.5	9.50	20.00	11.30	10.00	18.19	36.67
17.5	9.50	20.00	11.30	10.50	18.89	37.91
17.5	9.50	20.00	11.30	11.00	19.58	39.15
20.0	11.30	22.50	13.90	11.50	20.19	40.26
20.0	11.30	22.50	13.90	12.00	20.67	41.08
20.0	11.30	22.50	13.90	12.50	21.15	41.90
20.0	11.30	22.50	13.90	13.00	21.63	42.72
20.0	11.30	22.50	13.90	13.50	22.12	43.53
22.5	13.90	25.00	18.10	14.00	22.56	44.32
22.5	13.90	25.00	18.10	14.50	22.86	44.95
22.5	13.90	25.00	18.10	15.00	23.15	45.59
22.5	13.90	25.00	18.10	15.50	23.45	46.54
22.5	13.90	25.00	18.10	16.00	23.75	47.57
22.5	13.90	25.00	18.10	16.50	24.05	48.61
22.5	13.90	25.00	18.10	17.00	24.35	49.73
22.5	13.90	25.00	18.10	17.50	24.64	50.99
22.5	13.90	25.00	18.10	18.00	24.94	52.25

\*\*\*\*\*

### ANEXO B3.13

Ficheiro de saída do programa PERTRAN, para a 3ª rega de 1993

\*\*\*\*\*

IDENTIFICAÇÃO DO PERFIL ==> reg3per6

Xi	yi	xi+1	Yi+1	h	B	B
.0	.00	2.50	.10	.00	.00	.00
5.0	.10	7.50	2.20	.50	5.48	8.64
5.0	.10	7.50	2.20	1.00	6.07	10.07
5.0	.10	7.50	2.20	1.50	6.67	11.50
5.0	.10	7.50	2.20	2.00	7.26	12.89
7.5	2.20	10.00	3.80	2.50	7.97	14.38
7.5	2.20	10.00	3.80	3.00	8.75	15.94
7.5	2.20	10.00	3.80	3.50	9.53	17.50
10.0	3.80	12.50	5.70	4.00	10.26	19.01
10.0	3.80	12.50	5.70	4.50	10.92	20.45
10.0	3.80	12.50	5.70	5.00	11.58	22.58
10.0	3.80	12.50	5.70	5.50	12.24	24.94
12.5	5.70	15.00	7.40	6.00	12.94	26.14
12.5	5.70	15.00	7.40	6.50	13.68	27.38
12.5	5.70	15.00	7.40	7.00	14.41	28.61
15.0	7.40	17.50	10.20	7.50	15.09	29.79
15.0	7.40	17.50	10.20	8.00	15.54	30.70
15.0	7.40	17.50	10.20	8.50	15.98	31.55
15.0	7.40	17.50	10.20	9.00	16.43	32.40
15.0	7.40	17.50	10.20	9.50	16.88	33.25
15.0	7.40	17.50	10.20	10.00	17.32	34.10
17.5	10.20	20.00	12.30	10.50	17.86	35.03
17.5	10.20	20.00	12.30	11.00	18.45	36.07
17.5	10.20	20.00	12.30	11.50	19.05	37.26
17.5	10.20	20.00	12.30	12.00	19.64	38.45
20.0	12.30	22.50	13.70	12.50	20.36	39.76
20.0	12.30	22.50	13.70	13.00	21.25	41.25
20.0	12.30	22.50	13.70	13.50	22.14	42.69
22.5	13.70	25.00	16.20	14.00	22.80	43.89
22.5	13.70	25.00	16.20	14.50	23.30	44.93
22.5	13.70	25.00	16.20	15.00	23.80	45.97
22.5	13.70	25.00	16.20	15.50	24.30	49.58
22.5	13.70	25.00	16.20	16.00	24.80	51.47
25.0	16.20	27.50	17.40	16.50	25.62	53.58
25.0	16.20	27.50	17.40	17.00	26.67	55.76

\*\*\*\*\*

## ANEXO B4.1

### Ficheiro de entrada do modelo de simulação de rega de superfície SRFR versão 20.5

```

EDITMD
  0
  U2      U3      U4
  0       7       9
ISTMOD
  1
ID
Simulação com os parâmetros otimizados da equação de infiltração
INPMOD
  1
INFMOD RUFMOD FPCFLG
  1      2      1
L
100
  K      A      B      C      NMAN      AN
  22.    .065   15.53  0      .036     .000
  DBC    UBC    SOMOD  MXSG
  2      2      1      4
SOAVG
  0.0
CDEF    EXPO    DFUR    CHNSPC
  117.   0.39    D      0.75
ZREQ    MODQ    YUBC
  38.    1
  Q1     TCYCLE  ROT     RQ2Q1  NCYCLE
  1.5    35.     1      0      1
SOLMOD  LINMOD  DMLMOD  MAZ    MSZ
  d      d      d      d      d
INPMDH  YO     NMANO  500

MDENSE/N  IMAX  TMAX  YREC  RDXD  RLSTRM  RDXU  NYUBC

  RO      R1     RCMXR  RMMXR  JMAX  JHI  JLO
  d      d     d      d      40   d    d
IUCLDF  DTLRAT  QCOAVG  IWRST1  WRSTT1  INHALT  WHALTD

FILFT  NSTFLG  RDTSTG  IT40  YDB1

PAUSES  IDIAG  IDCH  ID2  IDCHCH  IDTAU  IDZ  IDPLOT  IDPLSC

IDSTRM  IDNODS  IDIAG9  IDIAG4  IDIAG5  IDLVLS  FLGPVE

VID.MOD  SCRPRFLVL  SCRPRF  GRANULARITY  FONHT

RLLEFT  RLRGHT  RYBOT  RYTOP

IPLOTW  IPLOTA  IPLOTH  IPLITQ  IPLTC

SIMLNO  COLRNO  R FSX  R FSA  R FSH  R FSQ  R FST  R FSZ

PLTPTH

TSMOD
  0
  
```

## ANEXO B4.2

### Blocos do ficheiro de saída do modelo de simulação de rega de superfície SRFR versão 20.5

POST-IRRIGATION SYNOPSIS

..... ULTIMATE INFILTRATION PROFILE .....

INFILTRATED DEPTHS REPRESENT VOLUMES PER UNIT FIELD AREA												
K	X*	TA*	TR*	Z*	TA MIN	TR MIN	NSRGS	X METERS	Z MM	X FEET	Z IN	
1	.0000E+00	.0000E+00	.7668E+01	.6520E+00	.0	268.4	1	.0	48.7	.0	1.92	
2	.4517E-02	.8615E-02	.7668E+01	.6419E+00	.3	268.4	1	2.5	48.0	8.4	1.89	
3	.1084E-01	.2446E-01	.7668E+01	.6265E+00	.9	268.4	1	6.1	46.8	20.1	1.84	
4	.1969E-01	.4656E-01	.7668E+01	.6055E+00	1.6	268.4	1	11.1	45.2	36.5	1.78	
5	.3209E-01	.8295E-01	.7668E+01	.5845E+00	2.9	268.4	1	18.1	43.7	59.4	1.72	
6	.4944E-01	.1408E+00	.7668E+01	.5672E+00	4.9	268.4	1	27.9	42.4	91.5	1.67	
7	.7373E-01	.2317E+00	.7668E+01	.5545E+00	8.1	268.4	1	41.6	41.4	136.5	1.63	
8	.9356E-01	.3130E+00	.7668E+01	.5453E+00	11.0	268.4	1	52.8	40.7	173.2	1.60	
9	.1114E+00	.3908E+00	.7668E+01	.5373E+00	13.7	268.4	1	62.9	40.1	206.3	1.58	
10	.1275E+00	.4642E+00	.7668E+01	.5305E+00	16.2	268.4	1	71.9	39.6	236.0	1.56	
11	.1419E+00	.5330E+00	.7668E+01	.5248E+00	18.7	268.4	1	80.1	39.2	262.8	1.54	
12	.1549E+00	.5969E+00	.7668E+01	.5203E+00	20.9	268.4	1	87.4	38.9	286.9	1.53	
13	.1667E+00	.6561E+00	.7668E+01	.5157E+00	23.0	268.4	1	94.1	40.8	308.6	1.61	
14	.1772E+00	.7105E+00	.7668E+01		24.9	268.4	1	100.0		328.1		

..... MEASURES OF MERIT OF COMPUTATION .....

(VOLUMES COMPUTED FOR ONE FURROW)

COMPUTATIONAL VOLUME BALANCE VQ\* = .1000E+01 VZ\* = .1001E+01 VRO\* = .0000E+00 ..... RELATIVE VOLUME ERROR = -.6346E-03

## ANEXO B4.2 (continuação)

..... SYNOPSIS OF RESULTS OF IRRIGATION .....

SURGE 1		HOURS	MINUTES	DIMENSIONLESS
T ST	(START TIME) .....	.00	.00	.0000E+00
T CB	(CUT-BACK TIME) .....	.58	35.00	.1000E+01
T CO	(CUT-OFF TIME) .....	.58	35.00	.1000E+01
T L	(TIME ADVANCE ENDS) .....	.41	24.87	.7105E+00
T R	(TIME RECESSION STARTS AT UPSTREAM END) .....	4.47	268.38	.7668E+01
T FR	(TIME RECESSION STARTS AT DOWNSTREAM END) .....	4.47	268.38	.7668E+01
T E	(TIME ALL SURFACE WATER DISAPPEARS) .....	4.47	268.38	.7668E+01

		ENGLISH FT**3/FT	METRIC M**3/M	DIMENSIONLESS
VOLUMES ARE GIVEN PER UNIT WIDTH OF FIELD				
V QI HYD	(APPLIED VOLUME ~ GROSS) .....	45.2	4.20	.9961E-01
V BK FLW	(VOLUME OF BACKFLOW AFTER CUTOFF) .....	.0	.00	-.4631E-05
V Q	(NET INFLOW VOLUME) .....	45.2	4.20	.9962E-01
V Z	(INFILTRATED VOLUME) .....	45.2	4.20	.9968E-01
V RO	(RUNOFF VOLUME) .....	.0	.00	.0000E+00

		ENGLISH	METRIC	DIMENSIONLESS	% OF DEPTH
Y MAX U	(MAXIMUM DEPTH OF SURFACE STREAM ATTAINED AT UPPER END) .....	.22 FOOT	68.02 MM	.9105E+00	
Y MAX D	(MAXIMUM DEPTH OF SURFACE STREAM ATTAINED AT LOWER END) .....	.20 FOOT	59.51 MM	.7965E+00	
Y MAX	(MAXIMUM DEPTH OF SURFACE STREAM ATTAINED AT ANY POINT) .....	.22 FOOT	68.02 MM	.9105E+00	
X YMAX	(LOCATION OF POINT OF MAXIMUM DEPTH) .....	.00 FOOT	.00 M	.0000E+00	
WP MAX	(MAXIMUM WETTED PERIMETER OF STREAM) .....	2.06 FOOT	.628 M	.8406E+01	

INFILTRATED DEPTHS REPRESENT VOLUMES PER UNIT FIELD AREA

Z MIN	(MINIMUM DEPTH OF INFILTRATION) .....	1.53 INCH	38.88 MM	.5203E+00	92.6 %
Z MAX	(MAXIMUM DEPTH OF INFILTRATION) .....	1.92 INCH	48.71 MM	.6520E+00	116.0 %
Z LQ	(AVERAGE LOW-QUARTER DEPTH OF INFILTRATION) .....	1.55 INCH	39.37 MM	.5270E+00	93.7 %
Z REQ	(REQUIRED DEPTH OF INFILTRATION) .....	1.50 INCH	38.00 MM	.5086E+00	90.5 %
Z Q	(AVERAGE APPLIED DEPTH VQ/L) .....	1.65 INCH	42.00 MM	.5622E+00	100.0 %
Z AVG	(AVERAGE INFILTRATED DEPTH VZ/L) .....	1.65 INCH	42.03 MM	.5626E+00	100.1 %
Z RO	(AVERAGE DEPTH OF RUNOFF VRO/L) .....	.00 INCH	.00 MM	.0000E+00	.0 %

Z DP ZREQ	(AVERAGE DEPTH OF DEEP-PERCOLATION VOLUME BASED ON GIVEN REQUIRED DEPTH) .....	.16 INCH	4.03 MM	.5392E-01	9.6 %
Z DP ZMIN	(AVERAGE DEPTH OF DEEP-PERCOLATION VOLUME BASED ON ZREQ = ZMIN) .....	.12 INCH	3.15 MM	.4221E-01	7.5 %
Z DP ZLQ	(AVERAGE DEPTH OF DEEP-PERCOLATION VOLUME BASED ON ZREQ = ZLQ) .....	.11 INCH	2.70 MM	.3619E-01	6.4 %
Z U ZREQ	(AVERAGE OF INFILTRATED DEPTHS LESS THAN OR EQUAL TO REQUIRED DEPTH) .....	1.50 INCH	38.00 MM	.5086E+00	90.5 %
Z U ZMIN	(AVERAGE OF INFILTRATED DEPTHS LESS THAN OR EQUAL TO ZMIN) .....	1.53 INCH	38.88 MM	.5203E+00	92.6 %
Z U ZLQ	(AVERAGE OF INFILTRATED DEPTHS LESS THAN OR EQUAL TO ZLQ) .....	1.55 INCH	39.32 MM	.5264E+00	93.6 %

UC C	(CHRISTIANSSEN UNIFORMITY COEFFICIENT) (WEIGHTED) .....			.950	
UC H	(HSPA UNIFORMITY COEFFICIENT) .....			.934	
DU	(DISTRIBUTION UNIFORMITY ZMIN/ZAVG) .....			.925	
DU LQ	(LOW-QUARTER DISTRIBUTION UNIFORMITY ZLQ/ZAVG) .....			.937	
RP	(RUNOFF FRACTION IN PERCENT VRO/VQ) .....			.00%	
		BASED ON	BASED ON	BASED ON	
		GIVEN ZREQ	ZREQ=ZMIN	ZREQ=ZLQ	
IE	(IRRIGATION EFFICIENCY ZU/ZQ) .....	90.47%	92.56%	93.63%	
UZ	(USEFUL FRACTION OF INFILTRATED VOLUME ZU/ZAVG) .....	.904	.925	.936	
SE	(STORAGE EFFICIENCY ZU/ZREQ) .....	100.00%	100.00%	99.39%	
AAP	(PERCENT OF TOTAL AREA ADEQUATELY IRRIGATED) .....	100.00%	100.00%	86.05%	
DR	(DEFICIENCY RATIO, AVERAGE DEFICIT IN UNDERIRRIGATED AREA, PERCENT OF ZREQ) .....	.00%		.81%	
XEQ	ENDED 19:13:59. 7				

### ANEXO B4.3

Parâmetros da equação de infiltração otimizados  
para vários tempos de recessão

Tempos de recessão	Expoente $a$							
	0.055		0.065		0.075		0.085	
	$k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)	$k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)	$k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)	$k$ (mm/h <sup>a</sup> )	Desvio  (min)
-32% Trec Obs. (143 min)	26	87.2	32	82.4	37	76.7	-	-
-20% Trec Obs. (168 min)	23	64.6	28	72.3	36	37.9	-	-
-10% Trec Obs. (189 min)	17	58.3	24	48.1	32	45.6	39	8.1
+10% Trec Obs. (231 min)	15	13.8	20	13.7	24	3.9	37	28.9
+20% Trec Obs. (252 min)	10	24.9	17	7.6	23	28.1	30	26.6
+32% Trec Obs. (277 min)	6	18.5	11	38.9	17	44.4	27	36.9

### ANEXO B4.4

Parâmetros da equação de infiltração otimizados  
para dois valores do coeficiente de rugosidade

Expoente <i>a</i>	<i>n</i> =0.030				<i>n</i> =0.042			
	Recessão		Avanço		Recessão		Avanço	
	<i>k</i> (mm/h <sup><i>a</i></sup> )	Desvio  (min)	<i>k</i> (mm/h <sup><i>a</i></sup> )	SQD	<i>k</i> (mm/h <sup><i>a</i></sup> )	Desvio  (min)	<i>k</i> (mm/h <sup><i>a</i></sup> )	SQD
0.035	-	-	-	-	12	48.3	18	12.5
0.045	-	-	-	-	20	30.8	16	10.9
0.075	34	12.0	36	10.6	-	-	-	-
0.085	38	6.4	34	10.9	-	-	-	-

## ERRATA

Página	Linha	Onde se lê	Deve ler-se
Agradecimentos	9	correção	correção
Índice	64	Perspectivas	Perspectivas
Lista de Figuras	55	das equação	da equação
4	1-2	terão que ser considerados	terá que ser considerado
4	5	correções	correções
9	21	velocidade	velocidade
12	14	correção	correção
13	3	alterado-se	alterando-se
13	21	dele parâmetro	deste parâmetro
14	20	pode	pôde
15	9	raízes	raízes
16	18	evidenciando	ocasionando
16	22	fisicamente	fisicamente
17	3	conduz	conduz
17	19	definidas	definidas
19	31	rectângular, triangular	rectangular, triangular
23	4	correções	correções
23	29	altura	profundidade
25	23	usar-se-á	usar-se-á
26	16	entrada	entrada
28	6	raízes	raízes
28	16	correções/ajustamentos	correções/ajustamentos
32	14	dificilmente	dificilmente
35	10	durante e rega	durante a rega
38	20	af desenvolveu	af se desenvolveu
40	2	distribuídas	distribuídas
41	18	constituídos	constituídos
44	11	triangular	triangular
52	19	e meio	no meio
53	12	Este um tipo	Este tipo
53	14	constituído	constituído
54	3	rectângular	rectangular
68	3	iterações	iterações
74	20	dos Quadros	do Quadro
75	3	na Figura 4.3	da Figura 4.3
75	Quadro 4.3	1ª rega	1ª rega/93
76	Figura 4.3	ta.obs.-ta.sim.	TavObs.-TavSim.
76	Figura 4.3	tre.obs.-tre.sim.	TrecObs.-TrecSim.
77	1	4.4.	4.3.
79	Quadro 4.4	recessão observado	recessão observado
83	Quadro 4.7	a e k	a e k
84	6	númerica	numérica
88	Figura 4.11	coeficiente "k"	coeficiente k
88	Figura 4.11	expoente "a"	expoente a
88	Figura 4.11	TaObs.-TaSim.	TavObs.-TavSim.
93	Figura 4.15	TaObs.-TaSim.	TavObs.-TavSim.
93	7	númericos	numéricos
94	1	evidenciam	evidenciam
96	11	definição	definição