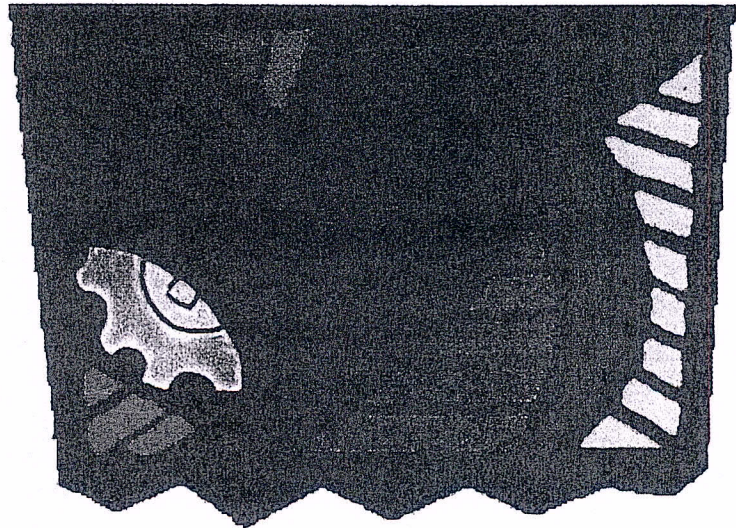


Dezembro de 1997



**Gestão integrada  
da água e do solo  
em regadio**

Dezembro de 1997

# Gestão integrada da água e do solo em regadio



CEER  
Centro de Estudos  
de  
Engenharia Rural



DRARO  
Direção Regional  
de Agricultura  
do Ribatejo e Oeste  
DSDR-DIRHEAA

## PREFÁCIO

A intensificação agrícola resultante das práticas de regadio tem-se vindo a acentuar no nosso País. Se por um lado a agricultura de regadio vem sendo reconhecida como a actividade mais viável para o nosso agricultor, em consequência da forte irregularidade dos factores climáticos, por outro lado regista-se uma crescente utilização de técnicas e de equipamentos modernos. Tais alterações, introduzindo factores e práticas não dominadas pelos agricultores, em particular quando estes passam de uma agricultura de sequeiro para a de regadio, implica riscos elevados no que respeita à sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Os factores solo e água, representando respectivamente o sustentável físico e o principal elemento constituinte da planta, não podem ser desprezados pelo agricultor num processo de rápida evolução técnica, como aquele em que se vive. O estudo integrado, que vem sendo desenvolvido por esta equipa alargada, e que tem como ponto de origem a modernização dos sistemas de rega de gravidade, poderá contribuir positivamente para uma conveniente adequação das práticas agrícolas nesta região atlântico-mediterânica.

É assim que, à experimentação que se vem desenvolvendo desde o início dos anos 80, visando encontrar as soluções mais adequadas para a modernização e mecanização da rega tradicional, se verificou a necessidade de estudar, de uma forma integrada, os impactos resultantes da alteração das práticas de mobilização e preparação do solo. As diferentes operações de pré-sementeira, incluindo mobilização profunda do solo, preparação da cama de semente e eventual armagem do terreno, condicionam todo o processo de infiltração de água no solo, em particular durante as primeiras regas. A distribuição de água no perfil de solo e ao longo de toda a parcela regada é necessariamente afectada por essas operações e consequentemente a qualidade da rega (uniformidade de distribuição e eficiência de aplicação).

Como condição de base para a mecanização dos sistemas de rega de gravidade, é reconhecida a necessidade de garantir um nívelamento preciso do terreno. Foram estudadas e dominadas as técnicas operacionais de nívelamento com recurso a aparelhagem laser e, na sequência desses estudos experimentais, foi concebido e desenvolvido um programa para nívelamento de parcelas irregulares (ISAPLAN).

As irregularidades do micro-relevo em canteiros de nível, resultantes do nívelamento e das operações subsequentes de preparação do solo, a sua influência sobre a uniformidade de distribuição da água e sobre a produção, foi objecto de um estudo experimental.

Tendo em vista o estudo comparativo das principais práticas de mobilização do solo, procedeu-se à instalação, por um período prolongado (presentemente no seu quinto ano consecutivo), de um ensaio em que se estabeleceram três intensidades de preparação do solo: *mínima, reduzida e convencional*. Sobre esta base experimental têm sido avaliados os principais parâmetros que

caracterizam o solo, sob os pontos de vista físico e químico, para além de todo um conjunto de observações e estudos integrados, cujas principais conclusões se apresentam nesta publicação.

O movimento de solutos no solo tem sido estudado com rigor, recorrendo-se à utilização, validação e calibração de modelos de simulação. O azoto e a atrazina têm merecido uma atenção particular, em razão do potencial de contaminação a que estão sujeitos os lençóis freáticos, mais ou menos superficiais, dos Vales do Tejo e do Sorraia. Várias teses de doutoramento e de mestrado foram desenvolvidas nesta área, encontrando-se actualmente em fase de conclusão três teses de doutoramento.

Os aspectos que caracterizam a fertilidade do solo, em particular no que respeita a matéria orgânica, azoto, fósforo, potássio, carbono e pH, estão a ser monitorizados nos diferentes tratamentos de preparação do solo, por forma a verificar a evolução a médio prazo destes indicadores.

A alteração das práticas de mobilização do solo, particularmente nos sistemas envolvendo não reviramento da leiva, implicou um maior cuidado no controlo de infestantes e de pragas. Uma linha de investigação dedicou a sua atenção à quantificação dos prejuízos causados pelas brocas do milho (*Sesamia nonagrioides* (Hüb) e *Ostrinia nubilalis* (Lef.)) em quatro modalidades de preparação do solo.

A erosão em sulcos instalados em parcelas com distintos tratamentos de preparação do solo foi igualmente objecto de estudo e avaliação. O transporte de sedimentos foi quantificado para essas situações, bem como para várias gamas de caudais.

Uma particular atenção foi prestada à avaliação dos impactes das práticas de mobilização na rega por sulcos e por canteiros de nível. Aplicaram-se metodologias simplificadas de avaliação de campo do desempenho dos sistemas de rega de superfície e foram desenvolvidas técnicas de optimização dos parâmetros de infiltração.

A rega intermitente foi objecto de vários estudos, com vista à melhoria da sua gestão e ainda ao desenvolvimento de um programa para controlo de uma válvula automática.

As condições de filtragem da água de rega, como condição para a mecanização e automatização dos sistemas de distribuição de água à parcela, mereceram um estudo aplicado de dimensionamento hidráulico e de avaliação, do qual resultou o desenvolvimento de novos equipamentos fixos e portáteis de filtragem.

O modelo RELREG tem constituído um utensílio importante para a condução da rega em tempo real nas parcelas de ensaio e o modelo ISAREG foi utilizado para o desenvolvimento de técnicas de optimização do uso da água em regadio.

Numa aproximação englobando grande parte da informação tratada nas áreas acima descritas, foi concebido um Sistema de Apoio à Decisão com vista ao projecto em rega de gravidade e que se encontra presentemente em adaptação

Trata-se assim de uma publicação que pretende abordar um conjunto de assuntos, todos eles agrupados em torno do tema central que é a modernização da rega de gravidade, e que resulta de uma investigação experimental consequente levada a cabo durante os últimos quinze anos nos Vales do Tejo e do Sorraia.

Para que todo este trabalho se pudesse realizar contribuíram decisivamente as seguintes instituições e projectos: Centro de Estudos de Engenharia Rural, Cooperação Luso-Alemã Entre Universidades no Domínio de Investigação Agrária Aplicada, Projecto NATO-PO-Irrigation, Projectos JNICT 1480/92, JNICT 2322/95 e PAMAF 4050/95.

As instituições participantes neste último projecto PAMAF, em particular a Direcção Regional de Agricultura do Ribatejo e Oeste / Direcção de Serviços de Desenvolvimento Rural – Divisão de Infra-estruturas Rurais, Hidráulica e Engenharia Agrícola e Ambiente e o Instituto Superior de Agronomia / Centro de Estudos de Engenharia Rural, decidiram proceder à publicação deste trabalho, na certeza de que o seu conteúdo poderá ser de relevante utilidade para técnicos, investigadores, estudantes e agricultores com interesse neste tema.

Lisboa, Dezembro de 1997

**Pedro Leão de Sousa**

**Susana Sebastião**

## INDICE

	Páginas
MONITOREIO DO AZOTO E DA ÁGUA PARA UMA ADEQUADA GESTÃO DA FERTIRREGA	1-17
GESTÃO INTEGRADA DA REGA E DA FERTIRREGA COM RECURSO AO MODELO RZWQM	19-37
GESTÃO DA FERTIRREGA COM MEDIDOR DE CLOROFILA	39-48
SISTEMAS ALTERNATIVOS DE MOBILIZAÇÃO DO SOLO EM REGADIO	49-59
AVALIAÇÃO DOS IMPACTES DAS PRÁTICAS DE MOBILIZAÇÃO DO SOLO NA REGA POR SULCOS	61-67
ESTUDO DA EROÇÃO EM SULCOS INCLINADOS SUJEITOS A DIFERENTES SISTEMAS DE MOBILIZAÇÃO DO SOLO	69-76
FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE MOBILIZAÇÃO ALTERNATIVOS	77-89
CÁLCULO DE PREJUÍZOS CAUSADOS PELAS BROCAS DO MILHO, <i>SESAMIA NUNAGRIVIDES</i> (HUB.) E <i>OSTRINA NUBILALIS</i> (LEF.), EM QUATRO MODALIDADES DE TRATAMENTO DO SOLO	91-100
METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA INFILTRAÇÃO	101-119
METODOLOGIAS SIMPLIFICADAS PARA ÁVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE REGA DE SUPERFÍCIE	120-130
AVALIAÇÃO DA MICROTOPOGRAFIA E SEUS IMPACTES NA UNIFORMIDADE DA REGA POR CANTEIROS DE NÍVEL	131-144
NIVELAMENTO DE PARCELAS IRREGULARES. PROGRAMA <i>ISAPLAN</i>	145-155
GESTÃO SIMPLIFICADA DA REGA INTERMITENTE COM O PROGRAMA <i>GESRI</i>	157-177
FILTRAGEM DA ÁGUA DE REGA. FILTRO PORTÁTIL DE AUTO-LIMPEZA	179-186
TÉCNICAS DE OPTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM REGADIO	187-200
CONDUÇÃO DA REGA POR COMPUTADOR EM PARCELAS DE ENSAIO. PROGRAMA <i>RELREG</i> .	201-209
CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO PARA O PROJECTO EM REGA DE GRAVIDADE	211-214

A importância deste problema já foi referida por vários investigadores, de que se destaca o Prof. Pedro Amaro que já em 1981 se referia à broca do milho como uma das principais pragas da cultura (Amaro, 1981 e 1982). No seguimento desta preocupação foi defendida em 1994 uma tese de mestrado subordinada a este mesmo tema (Pereira, 1994).

Verifica-se uma tendência crescente para a utilização de pesticidas por parte dos agricultores. Porém, existe um número cada vez maior de situações em que essa solução veio piorar francamente a situação. Assim, há que continuar a estudar a epidemiologia destas pragas por forma a encontrar meios de luta alternativos à luta química. Esta, não sendo de excluir, deve ser utilizada com cada vez maiores precauções para que os problemas a resolver mais tarde não sejam mais graves do que aqueles que hoje se enfrentam.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amaro, F.S. 1989 *Cálculo de prejuízos causados por Calamobius filum* (Rossi) [Coleoptera: Cerambycidae] em cultivares de tritcale. INIA/DEESA, Lisboa.
- Amaro, P. 1981 A protecção integrada do milho. Extracto do *Manual, Vol II* – Cap10, Curso de Protecção Integrada, FAO / DGPPA, Lisboa, Set. 1980 – Abr. 1981.
- Amaro, P. 1982 *A protecção integrada em agricultura*. CNA, Lisboa.
- Eizaguirre, M. e R. Albajes 1989 Present situation of arthropod pests in maize in the northeast of Spain. *Acta Phytopath. Entomol. Hung.*, **24** (1/2): 77-80.
- Hudon, M. 1968 Minimum number of insecticide applications for the control of European Corn Borer on sweet corn in Quebec. *J. econ. Ent.*, **61**(1) : 75-78.
- Kwolek, W.F. e T. A. Brindley 1959 The effects of the European Corn Borer, *Pyrausta nubilalis* (Hun.) on corn yield. *Iowa St. Coll. J. Sci.*, **33**(3) : 293-323.
- Mexia, A. M. 1985 *A cultura do trigo e o prejuízo causado por algumas pragas*. Dissert. Mestr. Prod. Veg., UTL / ISA, Lisboa.
- Pereira, M. M. 1994 *Estudo de calculo de prejuizos causados por Ostrinia nubilalis Hub. e Sesamia nonagrioides (Lef.) na cultura do milho de regadio*. Dissert. Mestr. Prot. Int., UTL / ISA, Lisboa.

## METODOLOGIA DE OPTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DA INFILTRAÇÃO

António Canatário Duarte<sup>(1)</sup>

### INTRODUÇÃO

Nos métodos de rega de superfície, de entre os quais se inclui o processo de rega por 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. Vários autores, Elliot e Walker (1980), Walker e Skogerboe (1987) e Sousa (1990), referem que a qualidade da rega está grandemente condicionada pelas características de infiltração do solo, pelo que a sua deficiente avaliação pode resultar numa irregular distribuição da água, bem como numa excessiva perda de água por escorrimento e/ou percolação profunda. A este respeito, Serralheiro (1988) apresenta o processo de infiltração como um dos determinantes mais importantes no escoamento, influenciando as quantidades que se escoam tanto no espaço como no tempo, pelo que tem que ser devidamente considerado aquando da simulação da rega.

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

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

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 inferir da dificuldade dos parâmetros da infiltração, quando 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, com o objectivo de melhor se conhecerem as condições da parcela e os seus efeitos na rega, e se proceder às correcções / ajustamentos necessários, que recentemente se têm desenvolvido algumas técnicas de retorno de informação.

A avaliação das características de infiltração é feita usualmente com recurso a dispositivos próprios denominados infiltrómetros, em pontos localizados na parcela de rega, não contemplando portanto as variações espaciais e temporais inerentes ao processo de infiltração durante a rega (Spurgeon e Duke, 1988). A este propósito Izadi *et al.* (1988) referem que a variação espacial e temporal dos parâmetros de infiltração terão que ser considerados na gestão e avaliação dos sistemas de rega de superfície. Nesta perspectiva, Reddell e Latorfue (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 infiltração de Kostiaikov.

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 à parcela (Smerdon *et al.*, 1988; Latimer e Reddell, 1987). Cite-se a título de exemplo Smith e Duke (1984), que usam os dados de sensores localizados em 30 pontos do avanço em sulcos, para determinar a sua localização ótima, que permita em tempo real a modificação oportuna do caudal. Contudo, algumas limitações têm sido encontradas na operacionalidade destes esquemas, sobretudo no que se reporta à avaliação das características de infiltração durante a rega (Clemmens, 1992) e no funcionamento automático dos sistemas (Sousa e Trout, 1992).

A importância do conhecimento das características de infiltração do solo na avaliação e gestão dos sistemas de rega de superfície, determinou 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, 1993) que permite uma completa avaliação do processo de rega.

Os **objectivos** que prevaleceram durante a realização deste estudo foram os seguintes:

- Desenvolvimento de uma metodologia de optimização dos parâmetros da equação de infiltração com retorno de informação de campo, que permita uma adequada análise da rega e a formulação de sugestões para a melhoria da sua gestão;
- Verificação da metodologia aplicada a outras regas, através de um procedimento simplificado envolvendo uma pesquisa localizada dos parâmetros optimizados da equação de infiltração e, portanto, uma utilização menos intensiva do modelo de simulação.

## METODOLOGIA PROPOSTA

Para a concretização deste estudo foram efectuados ensaios de rega na Estação Experimental António Teixeira do ex-Departamento de Regadio do I.N.I.A. (Instituto Nacional de Investigação Agrária), onde se fizeram avaliações durante as campanhas de rega de 1992 e 1993. O campo experimental está

mancha que inclui o talhão 5, seleccionado para os ensaios, corresponde a um Aluviossolo Moderno Não Calcário húmico inundável.

A cultura instalada no canteiro foi o milho híbrido, em linhas espaçadas de 0.75 m. Foram abertos sulcos de nível no canteiro quando as plantas apresentavam 40-50 cm de altura, com o auxílio de um abre-sulcos comandado por equipamento laser. No segundo ano de ensaios o abre-sulcos foi complementado com rodas formatadoras, que ao se deslocarem nos sulcos lhe conferiram uma forma transversal trapezoidal.

Os valores obtidos no campo foram usados como dados de entrada do modelo **SRFR 20.5** ou como critério de comparação entre resultados observados no campo e resultados simulados. Importa referir que o rigor dos resultados obtidos em ensaios de campo é bastante importante para o desenvolvimento da metodologia proposta. Refere-se de seguida a informação obtida nos ensaios de campo.

## Caudais de alimentação aos sulcos

Na rega por canteiros de nível, dado que não se dispõe de gradiente gravitacional, os caudais devem ser elevados, já que a velocidade do escoamento depende directamente da carga disponível. A avaliação dos caudais foi feita na cabeceira dos sulcos no início da rega, e posteriormente a intervalos de tempo regulares (10 minutos), tendo revelado uma razoável estabilidade, como pode ser visto na Figura 1, referente à segunda rega da campanha de 1992 (27/07/92). Para tal utilizaram-se medidores portáteis de soleira espessa modificada e, a título de confirmação, o método volumétrico, com recurso a um recipiente graduado e a um cronómetro.

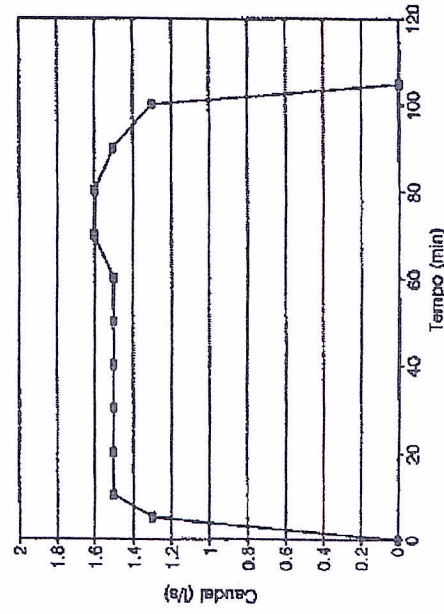


Figura 1 - Hidrograma dos caudais de alimentação a um sulco de nível do canteiro 5, 2ª rega, em 27/07/92.

### Profundidade do escoamento

No primeiro ano de ensaios, para esta medição foram utilizadas pequenas régua graduadas coladas em estacas de madeira, que eram colocadas no talvegue dos sulcos. Esta técnica não se revelou eficiente por contemplar imprecisões e por não tomar em conta as variações da microtopografia do terreno, pelo que no segundo ano se optou por registar as cotas da superfície livre do escoamento, com o auxílio de uma mira de precisão e de um nível topográfico. A partir destas observações é feito o cálculo do gradiente hidráulico do escoamento. Na Figura 2 apresenta-se, a título de exemplo, as cotas da superfície livre do escoamento registadas na 1ª rega de 1993.

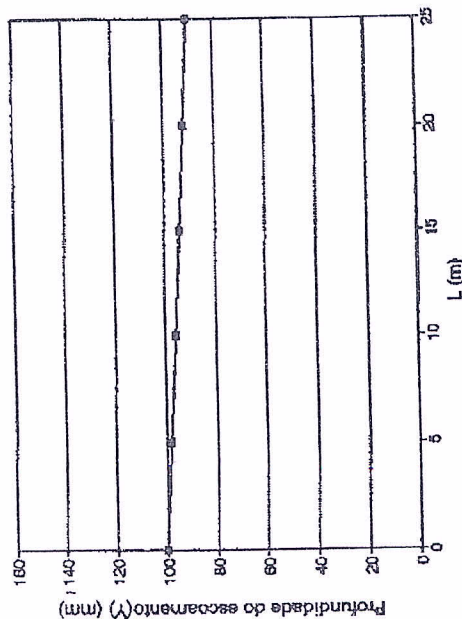


Figura 2 - Cotas da superfície livre do escoamento, observadas durante a 1ª rega, em 13/07/93.

### Caracterização da fase de avanço

As medições foram feitas por observação directa da chegada da água a cada uma das estações (espaçadas de 10 metros e até um comprimento de 100 metros) e registo dos respectivos tempos. Em alternativa usaram-se pequenos relógios digitais, colocados junto a cada uma das estações de controlo do avanço. Cada relógio era activado quando a frente da lâmina de água atingia a correspondente estação, continuando a funcionar até que fosse recolhido no final da rega. Pode-se constatar na Figura 3 tempos de avanço relativamente rápidos, que se justificam pela técnica mais aperfeiçoada na abertura dos sulcos, com alguma compactação do rasto e dos taludes, apresentando consequentemente a superfície onde se processa o escoamento uma rugosidade reduzida.

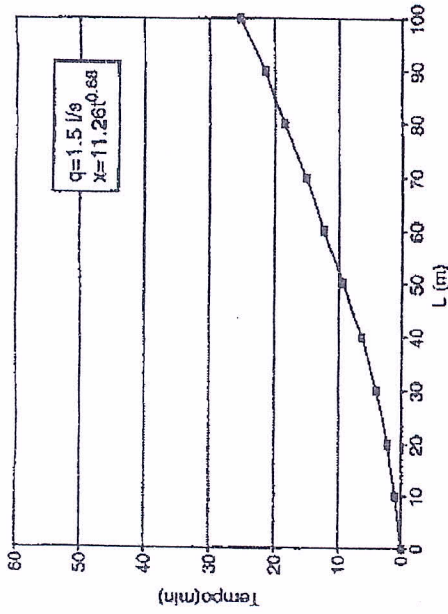


Figura 3 - Curva de avanço observada durante a 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.

### Caracterização da fase de recessão

Esta fase da rega foi observada em pontos do terreno intervalados de 20 metros, e registados os respectivos tempos. Não se observaram diferenças significativas dos tempos de recessão ao longo do comprimento controlado da parcela, como pode ser observado na Figura 4.

### Geometria da secção transversal do escoamento

Os perfis transversais dos sulcos foram obtidos, antes de cada rega, em secções na cabeceira, no meio e no fim dos sulcos, com a utilização de um perfilómetro de agulhas, descrito por Walker e Skogerboe (1987) (Figura 5). Esta informação é utilizada na determinação da área  $A$  ( $m^2$ ) e perímetro molhados da secção transversal do escoamento para uma dada profundidade. Em conjunto com o caudal  $Q$  ( $m^3 s^{-1}$ ) e o gradiente hidráulico  $S$  ( $m m^{-1}$ ), permitem o cálculo do coeficiente de rugosidade,  $n$ , da fórmula de Manning-Strickler:

$$Q = An^{-1} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

em que  $R$  (m) representa o raio hidráulico da secção.

valores logaritimizados. Estas determinações são usadas, quer na seleção da equação de infiltração que melhor se ajusta aos dados dos ensaios de infiltração, quer no cálculo da taxa de infiltração final ou estabilizada, obtida por regressão linear das séries de valores 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.

O procedimento metodológico que seguidamente será descrito 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. A mesma base metodológica poderá posteriormente ser aplicada aos restantes sistemas de rega de superfície, mediante pequenas alterações.

As equações de infiltração consideradas neste estudo são aquelas que normalmente são aceites pela generalidade dos modelos de simulação de rega, e que podem ser descritas pela expressão genérica

$$Z = kt^p + it + C \quad (2)$$

em que  $Z$  representa a infiltração acumulada em  $mm$ ,  $t$  o tempo de oportunidade de infiltração em  $h$ ,  $if$  a infiltração básica ou estabilizada em  $mm\ h^{-1}$ ,  $C$  a altura de água infiltrada no início do processo de infiltração para preenchimento das fendas à superfície do solo, em  $mm$ ,  $e$   $k$  e  $a$  os coeficientes de ajustamento obtidos experimentalmente. A forma mais simples, utilizada quando os tempos de infiltração são curtos, corresponde à anulação de  $if$  e de  $C$ , sendo denominada de Kostiakov. Para tempos mais longos, como em geral se verifica na rega de gravidade, adopta-se normalmente a equação de Kostiakov-Lewis, em que se procede à anulação do termo  $C$ .

A base da metodologia proposta consiste na pesquisa da combinação dos parâmetros da equação de infiltração que conduzam a um conveniente ajustamento dos valores simulados do avanço e recessão aos dados observados (Duarte, 1994). Assume-se que numa rega rigorosamente observada, para cada valor do expoente  $a$  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 referentes à totalidade do comprimento controlado da parcela (Figura 6). Idêntico raciocínio se pode estabelecer relativamente aos dados da recessão.

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) com o mesmo propósito, e o **Desvio absoluto (D)** entre o valor simulado e observado para o tempo de recessão. Convém referir que esta última situação diz respeito a um único valor de tempo de recessão, pois na rega por canteiros de nível se considera a recessão praticamente simultânea em todos os pontos da parcela.

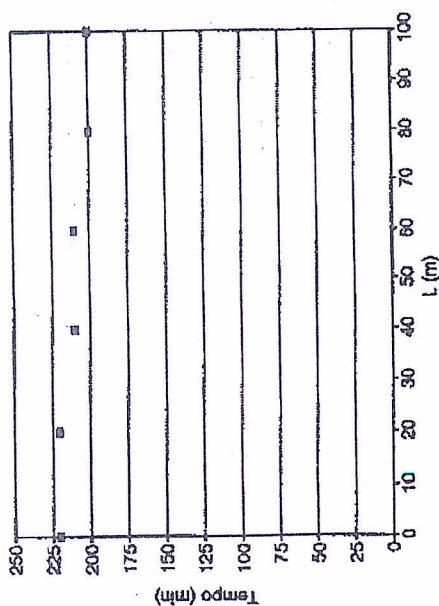


Figura 4 - Curva de recessão observada durante a 1ª rega do canteiro 5, em 13/07/93.

A informação obtida com a utilização do perfilómetro de agulhas, é ainda necessária na determinação de equações potência de caracterização do perfil transversal do escoamento.

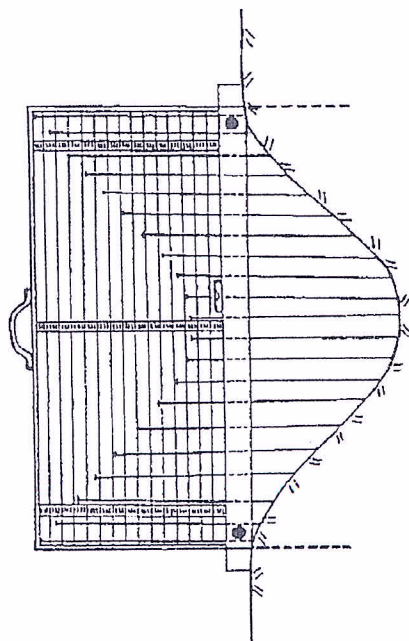


Figura 5 - Perfilómetro de agulhas.

### Caracterização da infiltração

O processo da infiltração em sulcos tem características particulares, que determinam que o seu estudo se faça em modalidades adequadas, como sejam os infiltrómetros de sulco. No presente estudo foram utilizados infiltrómetros de sulco bloqueado. Os parâmetros das equações de infiltração, em particular as

de pesquisa, em que se fazem variar os parâmetros de infiltração, mantendo-se todos os outros dados do ficheiro de entrada.

A informação fornecida ao modelo para o presente estudo corresponde à primeira rega do talhão 5, observada em 13/07/93, e organizada da forma sistematizada que a seguir se apresenta.

Propriedades hidráulicas do solo e da cultura

- Características de infiltração - nesta opção é possível seleccionar o tipo de equação que evidencia o melhor ajustamento aos dados observados nos testes de infiltração. A análise do Quadro 1, onde constam os valores dos parâmetros das equações de infiltração assim como do aferidor numérico usado, permitiu escolher previamente a equação de Kostiakov-Lewis para descrever o processo de infiltração para esta rega;

**Quadro 1** - Parâmetros das equações de infiltração de Kostiakov e de Kostiakov-Lewis, ajustados a partir dos dados observados antes da rega, em ensaio de sulco - infiltrómetro bloqueado. Coruche, Talhão 5, 13/07/93.

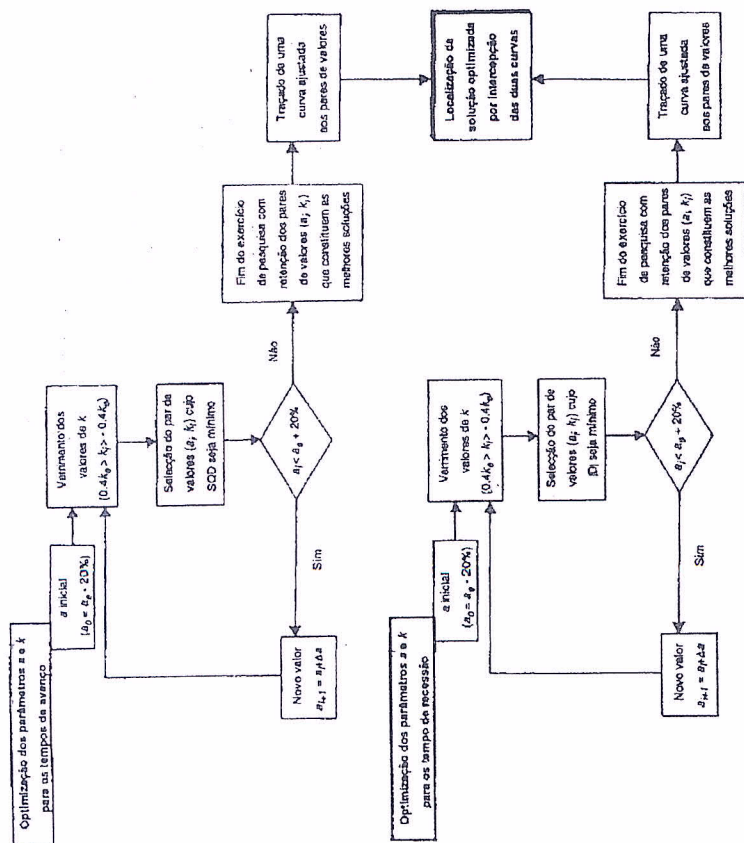
Equações de Infiltração	Parâmetros			Aferidor
	k (mm/ha)	a	$i_f$ (mm/h)	
Kostiakov	66.0	0.198	-	SQD (mm <sup>2</sup> ) 1.3
Kostiakov-Lewis	51.0	0.085	15.53	0.6

- Coeficiente de rugosidade (n) - este factor de resistência ao escoamento é calculado a partir dos valores observados durante a rega, tendo-se obtido para a rega em estudo um valor de 0.036.

Geometria da parcela

- Comprimento do canteiro - 100 m;
- Canteiro sem escurrimto final;
- Declive médio - dado tratar-se de um canteiro de nível os declives longitudinal e transversal são nulos;
- Forma transversal dos sulcos - foi caracterizada através de uma equação potência que relaciona a profundidade do escoamento, y (cm), com a sua largura à superfície, B (mm), estabelecida para o perfil que representa as condições médias do sulco observado para esta rega, cuja equação proposta por Walker e Skogerboe (1987) e usada por Sousa et al. (1995) assume a seguinte forma:

$$B = c \cdot y^m$$



**Figura 6** - Esquema do procedimento adoptado no desenvolvimento da metodologia onde  $a_0$  e  $k_0$  representam os coeficientes obtidos em ensaios de infiltração.

Desenvolvem-se assim dois conjuntos de pares de valores dos coeficientes da equação de infiltração, um referente aos dados do avanço e o outro aos da recessão. A união dos pontos referentes a cada um dos conjuntos, dará origem a duas linhas que se interceptam num ponto. O correspondente par de valores dos coeficientes da equação de infiltração, deverá ser aquele que descreve o fenómeno da infiltração alargado a toda a parcela, nas condições hidropedológicas em que se efectuou a rega.

O procedimento anterior foi desenvolvido para um único valor de coeficiente de rugosidade, que foi determinado de uma forma cuidada na parcela, e que se assume como representativo para as condições observadas.

Para a aplicação da metodologia, em que se torna imprescindível a utilização intensiva do modelo de simulação **SRFR 20.5**, é necessário definir em detalhe o seu ficheiro de entrada. Este é essencialmente baseado nas observações de campo, de acordo com determinadas técnicas experimentais, e em opções de

Com base nos registros de campo das coordenadas do perfil transversal, os parâmetros empíricos de ajustamento da equação potência são calculados após transformação logarítmica. Para o caso presente obteve-se um valor de 117.90 mm/cm<sup>m</sup> para o coeficiente c e um valor de 0.39 para o expoente m;

- Espaçamento entre sulcos - 0.75 m.

Parâmetros de gestão da rega

- Dotação útil requerida - 40 mm;
- Caudal unitário constante de 1.5 l s<sup>-1</sup> sulco<sup>-1</sup> e fornecido num só impulso;
- Tempo de aplicação - 35 min.

Parâmetros de solução numérica

- Modelo de inércia nula;
- Equações algébricas não linearizadas, resolvidas iterativamente para cada passo de tempo (Strelkoff, 1992);
- 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 otimização a pesquisa envolveu um largo espectro para os parâmetros a e k da equação de infiltração, que se foi estreitando à medida que se começou a evidenciar a zona de intercepção das curvas de otimização relativas aos tempos de avanço e de recessão. Depois de estudada com mais pormenor esta zona, é obtida a informação constante do Quadro 2 referida aos tempos de avanço, onde figuram também os valores do aferidor numérico usado (SQD).

De igual modo é obtida a informação do Quadro 3 respeitante ao tempo de recessão. Com base nos elementos constantes dos dois quadros traçaram-se as duas curvas da Figura 7.

Quadro 2 - Parâmetros da equação de infiltração otimizados para os tempos de avanço e correspondentes à rega em estudo.

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

Quadro 3 - Parâmetros da equação de infiltração otimizados para o tempo de recessão e correspondentes à rega em estudo.

Expoente a	Coefficiente k (mm/ha)	Aferidor  D  (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/ha, que são substancialmente diferentes dos valores 0.085 e 51 mm/ha obtidos no teste de infiltração. Verifica-se assim que nas condições da rega abrangendo a totalidade da parcela, a infiltração é menos intensa do que a observada no ensaio de sulco - infiltrómetro bloqueado. Tal poderá dever-se ao carácter pontual do ensaio, não representando as características gerais da parcela.

De referir que a taxa de infiltração final ou estabilizada da equação de infiltração de Kostakov-Lewis (i<sub>f</sub>), é calculada da forma já descrita anteriormente, não sendo alvo deste exercício de optimização, por se considerar que o ensaio é suficientemente longo para fornecer um valor já muito próximo do real.

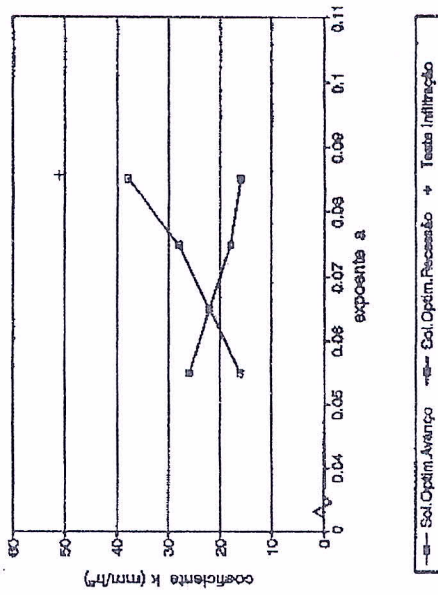


Figura 7 - Curvas de optimização (avanço; recessão) dos parâmetros da equação de infiltração para a rega em estudo.

procedimento de pesquisa localizada na zona de intercepção das duas curvas de optimização (relativas ao avanço e à recessão) dos parâmetros da equação de infiltração (Figura 7).

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 relativamente ao valor optimizado na rega precedente. Para cada um destes valores do parâmetro  $a$  da equação de infiltração (resultantes de uma variação positiva e negativa com a mesma amplitude), são pesquisados os valores do coeficiente  $k$  que minimizem a SQD entre os tempos de avanço observados e simulados, e o  $|D|$  entre o tempo de recessão estimado e simulado. Obtêm-se assim dois pares de valores do coeficiente  $k$  que minimizam cada um dos afeidores 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 essa rega.

Refira-se que, dado o comportamento do coeficiente  $k$  para a variação imposta do expoente  $a$  deverá ocasionar uma intercepção entre as curvas de optimização, de acordo com a Figura 9. Se tal amplitude de variação for pequena, sem que daí resulte a intercepção das duas curvas, então dever-se-á aumentar o limite de variação imposto para que se verifique o cruzamento das duas curvas, e que corresponde ao ponto que representa a optimização das características de infiltração válidas para essa rega.

Procede-se de seguida à verificação da metodologia para a 2ª rega do canteiro 5, em 03/08/93, que foi igualmente caracterizada com rigor. A amplitude de variação estabelecida para o expoente  $a$  foi de  $\pm 15\%$ , tendo sido suficiente para que se verificasse a intercepção das curvas.

A informação fornecida ao programa foi idêntica à que ocorreu na definição da metodologia, com as seguintes excepções:

#### Propriedades hidráulicas do solo e da cultura

Características de infiltração - nesta série de simulações impôs-se uma variação de  $\pm 15\%$  relativamente ao expoente  $a$  optimizado anteriormente, pesquisando-se os valores de  $k$  que constituíam boas soluções.

- Coeficiente de rugosidade ( $n$ ) - um valor de  $n$  igual a 0.017 foi calculado a partir dos dados observados durante a rega.

#### Geometria da parcela

Para esta rega as características transversais de escoamento alteraram-se relativamente à primeira rega da campanha, tomando a equação potência valores para  $c$  e  $m$  respectivamente de 102.7 mm  $cm^{-m}$  e 0.55.

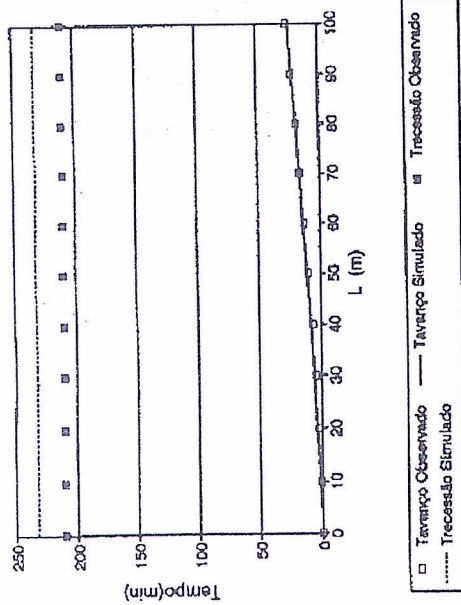


Figura 8 - Valores de avanço e de recessão observados e simulados com os parâmetros optimizados da equação de infiltração para a rega em estudo.

A simulação da rega com este par de valores dos parâmetros  $a$  e  $k$  da equação de infiltração de Kostiaikov-Lewis conduz a resultados simulados bastante próximos dos observados, facto que é suportado pelo cálculo de uma SQD igual a 11.5  $min^2$ , relativamente aos tempos de avanço, e a um  $|D|$  igual a 22.2 minutos relativamente ao tempo de recessão, ou de um modo diferente pela observação da Figura 8.

Importa registar que o  $|D|$  da recessão (22.2  $min$ ), correspondendo a um erro de cerca de 10% do tempo de recessão, é devido provavelmente a um critério diferente de avaliação do momento da recessão considerado pelo modelo, relativamente ao usado na observação de campo. Apesar da forma rigorosa seguida nas observações de campo, convém não perder de vista o carácter subjectivo a que a avaliação da recessão está sujeita (Sousa, 1990).

### VERIFICAÇÃO DA METODOLOGIA E PROPOSTA DE PROCEDIMENTO SIMPLIFICADO

A metodologia foi desenvolvida tendo por base uma rega rigorosamente observada. A sua verificação foi concretizada numa outra rega da mesma campanha, através de um procedimento simplificado que apresenta validade para todas as regas subsequentes na mesma parcela, cuja descrição se apresenta de seguida.

Os parâmetros optimizados para a rega para a qual foi desenvolvida a metodologia são válidos para as condições prevaletentes que foram objecto de observação minuciosa. É lícito esperar-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

Parâmetros de gestão da rega

A dotação requerida continua a ser nesta rega de 40 mm, assegurada pelo fornecimento de um caudal constante de  $1.8 / s^{-1} sulco^{-1}$ , durante um tempo de aplicação de 30 minutos.

O exercício de pesquisa já referido anteriormente, sendo mais localizado e tendo uma técnica definida, envolve o uso do computador de uma forma muito menos intensiva do que o exercício executado no desenvolvimento da metodologia. A avaliação de campo foi também simplificada, não se tendo procedido ao teste de infiltração, o que limita as observações aos registos decorrentes durante a rega.

Da sua execução resultam dois valores do coeficiente  $k$  da equação de infiltração que minimizam a SQD para os tempos de avanço, e dois valores do mesmo coeficiente que minimizam o  $|D|$  para os tempos de recessão, que se apresentam no Quadro 4.

Do procedimento gráfico, por união dos pontos de optimização obtidos para a variação imposta de  $\pm 15\%$  de  $a$ , resultam dois segmentos de recta que se interceptam num ponto, conforme representado na Figura 9, ao qual corresponde um expoente a igual a 0.062 e um coeficiente  $k$  igual a  $19.0 \text{ mm/ha}$ .

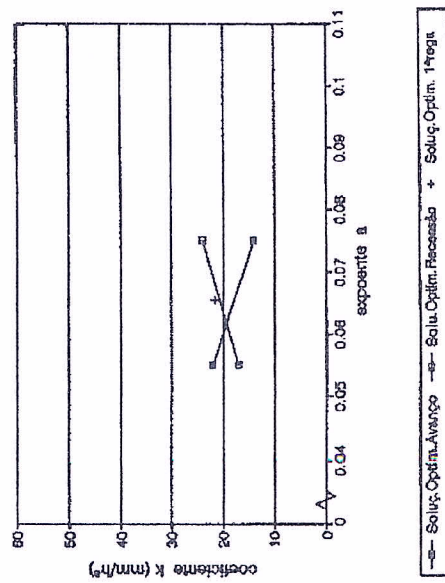


Figura 9 - Optimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 2ª rega de 1993.

Quadro 4 - Valores de  $k$  da equação de infiltração resultantes do procedimento adoptado na verificação da metodologia e correspondentes a uma variação de  $\pm 15\%$  do expoente  $a$  obtido na optimização da 1ª rega do talhão 5 (13/07/93).

$a = 0.075$ (+15%)				$a = 0.055$ (-15%)			
Avanço		Recessão		Avanço		Recessão	
$k$ (mm/ha)	SQD (min <sup>2</sup> )	$ D $ (mm/ha)	$ D $ (min)	$k$ (mm/ha)	SQD (min <sup>2</sup> )	$k$ (mm/ha)	$ D $ (min)
14.0	0.7	24.0	7.2	22.0	1.8	18.0	76.6

Com estes parâmetros optimizados da equação de infiltração procedeu-se à simulação, mantendo-se os restantes dados do ficheiro de entrada para esta rega, tendo daí resultado uma boa aderência dos valores simulados aos valores observados, como se pode observar na Figura 10, ou de uma forma mais consistente por indicação dos aferidores numéricos utilizados, com a SQD igual a  $1.7 \text{ min}^2$  e o  $|D|$  igual a 98.8 minutos. De referir que o  $|D|$  apresenta um valor relativamente elevado, certamente devido ao facto da recessão ter sido estimada.

De igual modo, faz-se a verificação da metodologia para a 3ª rega do canteiro 5, em 18/08/93, que foi igualmente caracterizada com rigor. Impôs-se uma amplitude de variação de  $\pm 15\%$  para o expoente  $a$ , tendo sido suficiente para que se verificasse a intercepção das curvas.

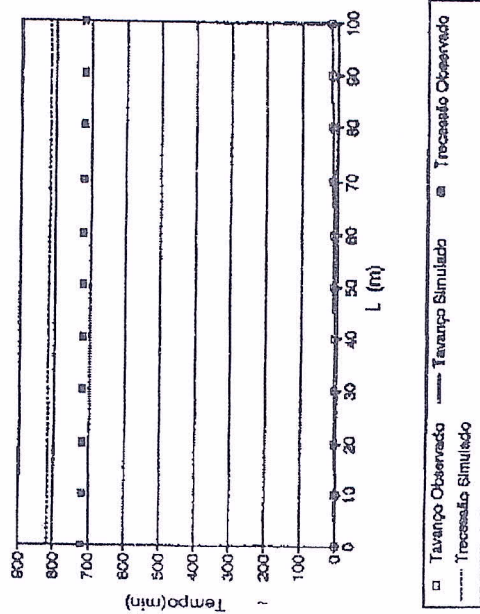


Figura 10 - Valores de avanço e de recessão observados e estimados, e simulados com os parâmetros optimizados da equação de infiltração para a 2ª rega do talhão 5 (03/08/93).

Apresenta-se de seguida a informação fornecida ao programa, para esta rega.

Propriedades hidráulicas do solo e da cultura

- Características de infiltração - impôs-se uma variação de  $\pm 15\%$  relativamente ao expoente  $a$  otimizado para a 1ª rega, pesquisando-se os valores de  $k$  que constituíam boas soluções.
- Coeficiente de rugosidade ( $n$ ) - valor de  $n$  igual a 0.039, calculado a partir dos dados observados durante a rega em causa.

Geometria da parcela

Os parâmetros  $c$  e  $m$ , da equação potência de caracterização transversal do escoamento, tomam para esta rega os valores de  $100 \text{ mm cm}^{-1}$  e 0.55, respectivamente.

Parâmetros de gestão da rega

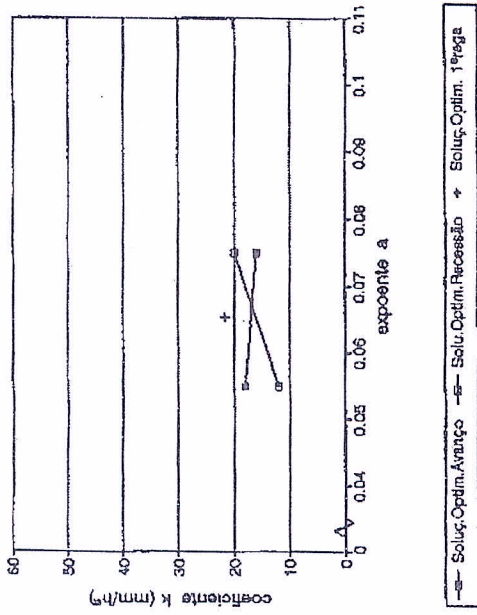
A dotação requerida continua a ser de  $40 \text{ mm}$ , assegurada pelo fornecimento de um caudal constante de  $1.8 \text{ l/sulco}^{-1}$ , durante um tempo de aplicação de 30 minutos.

Da execução do exercício de pesquisa já referido para a 2ª rega, resultam dois valores do coeficiente  $k$  da equação de infiltração que minimizam a SQD para os tempos de avanço, e dois valores do mesmo coeficiente que minimizam o  $|D|$  para os tempos de recessão, que se apresentam no Quadro 5.

**Quadro 5** - Valores de  $k$  da equação de infiltração resultantes do procedimento adoptado na verificação da metodologia e correspondentes a uma variação de  $\pm 15\%$  do expoente  $a$  obtido na optimização da 1ª rega do talhão 5 (13/07/93).

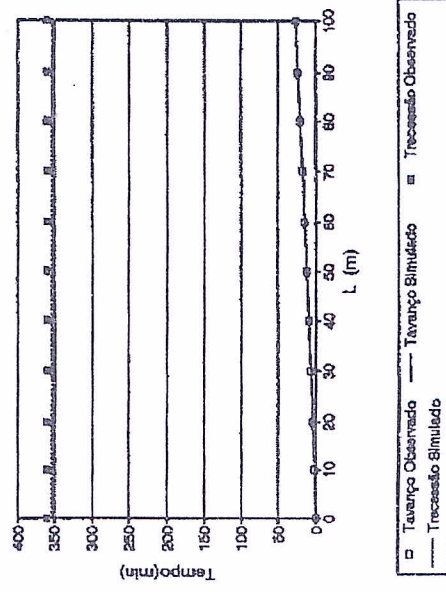
Avanço $k$ (mm/ha)	$a = 0.075$ (+15%)		$a = 0.055$ (-15%)	
	SQD (mm <sup>2</sup> )	$ D $ (min)	Avanço $k$ (mm/ha)	Recessão $k$ (mm/ha)
16.0	3.31	4.1	18.0	12.0
			SQD (mm <sup>2</sup> )	$ D $ (min)
			3.9	1.5

Do mesmo procedimento gráfico, por união dos pontos de optimização obtidos para a variação imposta de  $\pm 15\%$  de  $a$ , resultam dois segmentos de recta que se interceptam num ponto, conforme representado na Figura 11, ao qual corresponde um expoente  $a$  igual a 0.067 e um coeficiente  $k$  igual a  $17.0 \text{ mm/ha}$ .



**Figura 11** - Optimização dos parâmetros da equação de infiltração para a 3ª rega do talhão 5 (18/08/93).

Procedeu-se a uma simulação da rega, com estes parâmetros optimizados da equação de infiltração, mantendo-se os restantes dados do ficheiro de entrada para esta rega. Os valores simulados do avanço e recessão evidenciam uma excelente aderência aos valores observados, como se pode constatar na Figura 12, ou de uma forma mais consistente por indicação dos aferidores numéricos utilizados, com a SQD igual a  $3.2 \text{ mm}^2$  e o  $|D|$  igual a 6.8 minutos.



**Figura 12** - Valores de avanço e de recessão observados e simulados com os parâmetros optimizados da equação de infiltração para a 3ª rega do talhão 5 (18/08/93).

Pode-se pois inferir que as características de infiltração avaliadas por este procedimento, permitem obter resultados simulados da rega suficientemente próximos dos observados nos ensaios de campo, pelo que o procedimento usado mostra validade na determinação das características de infiltração que prevaleceram durante esta rega.

Esta metodologia que usa as observações de campo, é especialmente útil e representa um contributo, na melhoria da avaliação de uma rega praticada, podendo dar indicações para a sua gestão. Ainda assim, será possível o seu aperfeiçoamento através do aumento da informação disponível, e da integração, por meios informáticos, dos processos de cálculo parcelares desta metodologia.

## CONCLUSÕES

Deste estudo, que envolveu um detalhado esquema experimental e um intensivo trabalho de simulação em computador, torna-se possível, desde já, enunciar as seguintes conclusões preliminares:

- Validade da metodologia de optimização dos parâmetros da equação de infiltração, e também do procedimento simplificado na sua verificação para outra rega, que se traduz por valores baixos dos aferidores numéricos usados, ou seja uma razoável aproximação entre os valores observados e os valores simulados para cada uma das regas.
- A incidência prática da metodologia desenvolvida está claramente relacionada com um maior rigor na análise da rega, através da utilização de parâmetros de infiltração adequados, e consequentemente perfazer uma progressiva optimização da gestão dos sistemas de rega.
- A metodologia desenvolvida é susceptível de aplicação a outros sistemas de rega de gravidade, desde que as observações de campo sejam efectuadas com precisão e se utilize um modelo de simulação como o SRFR, ou outro idênticamente rigoroso.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 p.
- Clemmens, A.J. 1990. 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. 1992. Feedback control of basin-irrigation system. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 118(3): 480-496.
- Duarte, A. C. 1994. *Metodologia de retorno de informação de campo para melhoria da análise e gestão da rega em canteiros de nível*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia Universidade Técnica de Lisboa.

Elliot, R.L. e W.R. Walker. 1980. Furrow irrigation infiltration and advance functions. *ASAE Paper No. 80-2075*. ASAE Summer Meeting, San Antonio, Texas, June 15-18.

Izadi, B.; D.F. Heermann e H.R. Duke. 1988. Sensor placement for real time infiltration parameter evaluation. *Transactions of the ASAE*, 31(4): 1159-1166.

Latimer, E.A. e 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.

Reddell, D.L. e H.F. Latortue. 1986. Evaluation of furrow surface storage and the Kostakov infiltration parameters using irrigation advance data. *ASAE Paper No. 86-2574*. ASAE Winter Meeting, Chicago, Illinois, December 16-19, 27 p.

Serralheiro, R.P. 1988. *Um estudo da rega por sulcos num solo argiluvado*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Évora.

Smerdon, E.T.; A.W. Blair e 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. e 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.

Spurgeon, W.E. e H.R. Duke. 1988. Furrow irrigation performance using real time control. *Proceedings on Planning Now for Irrigation & Drainage*. IR Div/ASCE, Lincoln, Nebraska, July 18-21, 133-140.

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. e 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.

Sousa, P.L.; A.R. Dedrick; A.J. Clemmens e L.S. Pereira. 1995. Effect of furrow elevation differences on level-basin performance. *Transactions of the ASAE*, 38(1): 153-158.

Strelkoff, T. 1993. *SRFR 20.5 version 20.5 (experimental): a computer program for simulating flow in surface irrigation*. U.S.D.A. - A.R.S., United States Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona, 59 p.

Walker, W.R. e G.V. Skogerboe. 1987. *Surface irrigation - theory and practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 386 p.