

UNIVERSIDADE DE ÉVORA
MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

***CONTROLO DO RISCO DE SALINIZAÇÃO DE
UM SOLO DE BARRO (VERTISSOLO)
MELHORANDO A DRENAGEM INTERNA
COM SUBSOLAGEM E DRENOS TOUPEIRA***

Dissertação orientada pelo Prof. Ricardo Serralheiro

Isabel Maria Fernandes Laranjeira

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri

ÉVORA 2006

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO SOLO E DA ÁGUA

***CONTROLO DO RISCO DE SALINIZAÇÃO DE
UM SOLO DE BARRO (VERTISSOLO)
MELHORANDO A DRENAGEM INTERNA
COM SUBSOLAGEM E DRENOS TOUPEIRA***

Dissertação orientada pelo Prof. Ricardo Serralheiro

Isabel Maria Fernandes Laranjeira



163 3248

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo júri

ÉVORA 2006

AGRADECIMENTOS

O trabalho desenvolvido recebeu apoio e colaboração de diversas pessoas. A todas elas, que das mais diversas maneiras contribuíram para a realização deste trabalho quero expressar os meus sinceros agradecimentos. No entanto devida referência muito especial a algumas delas:

- Ao Senhor Professor Ricardo Serralheiro, na qualidade de Orientador deste trabalho, começo por expressar o meu agradecimento pelo seu empenho e esforço em tornar possível a criação de condições para a realização deste mestrado, o seu rigor e seriedade no trabalho e o seu espírito inovador. Reconhecimento que é igualmente devido por todo o apoio por ele dispensado na ajuda, estímulo, crítica e ensinamentos, ao longo da orientação que tem decorrido continuamente desde 2000, a começar pelo trabalho final do curso de licenciatura e posteriormente, desde 2003, nos trabalhos de preparação do mestrado.

- Ao Sr. Junça, técnico do Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Rural, agradeço o valioso apoio prestado, ao longo destes anos, principalmente no que respeita ao conhecimento e sensibilização para a prestação em projectos de investigação e na prática da experimentação de campo. Foi, aliás, com base no seu apoio e orientação, que foram esquematizados e desenvolvidos os trabalhos de campo.

- Ao Sr. Custódio, técnico do Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Rural, agradeço o acompanhamento e apoio prestado ao longo do trabalho. Sem esquecer a disponibilidade e apoio nas deslocações ao Outeiro.

- Ao Sr. Condenças, técnico do Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Rural, agradeço a ajuda, na experimentação de campo em especial nas deslocações ao Outeiro e nos trabalhos de laboratório.

- À Doutora Beatriz técnica do Laboratório de Hidrologia do Departamento de Engenharia Rural, quero expressar-lhe um sentimento de gratidão pela atenção com que sempre me ouviu, e pelos conselhos e orientações que, em muito contribuíram para a realização deste trabalho. Agradeço também sua disponibilidade e ajuda prestada na realização das análises de solos.

- O meu reconhecimento aos alunos estagiários Pedro Lopes e Samuel Torres que colaboraram em tarefas práticas deste trabalho, pela sua extrema dedicação, espírito de sacrifício e capacidade de trabalho, evidenciado ao longo dos trabalhos de campo.

- O meu agradecimento ao Engenheiro Banza que se disponibilizou a participar nos trabalhos experimentais, demonstrando excelente espírito de cooperação.

- Aos Senhores José Lopes, Virgílio e Luís da Herdade do Outeiro agradeço a amizade e a boa vontade sempre demonstrada.

- Ao Engenheiro Pedro Quartin que das mais diversas maneiras contribuiu para a realização deste trabalho, cumpro o grato dever de expressar os mais sinceros agradecimentos.

- À Engenheira Célia Toureiro, agradeço todo o estímulo, acompanhamento, disponibilidade e apoio prestado na resolução de problemas financeiros relacionados com os trabalhos de investigação.

- À Engenheira Nádia Castanheira não poderia deixar de expressar-lhe um sentimento de gratidão pelo valioso apoio prestado nestes anos e que constituiu um incentivo à realização deste trabalho.

- À Paula Sequeira, pelo apoio que me foi dando durante o tempo que tenho dedicado a este trabalho e por tê-la sobrecarregado durante alguns dias com trabalhos informáticos. Os

- Aos Professores Maria do Rosário Oliveira, Lúcio Santos, Luís Leopoldo e Shakib agradeço a gentil colaboração, que permitiu solucionar algumas dificuldades surgidas ao longo deste trabalho.

- Às entidades que proporcionaram o suporte financeiro que viabilizou a execução deste trabalho: Projectos AGRO 217 e PEDIZA II (Acção 4.2.2.).

- É devida uma referência individual ao Engenheiro João Reis, Sr. Manuel (electricista) e Sr. Victor Tavares.

RESUMO

O objectivo deste trabalho é o de estudar um conjunto de técnicas de drenagem em regadio (subsolado e drenos toupeira) que garantam a melhoria das condições de drenagem interna dos solos de Barro (Vertissolos), contribuindo enquanto condições base para a sua protecção contra a salinização.

Os resultados discutidos no presente trabalho decorrem da monitorização da salinidade do solo, numa parcela localizada no Outeiro em Ferreira do Alentejo, onde foram instalados em solo de Barro (Cp): drenos de plástico com subsolagem e com drenos toupeira e drenos toupeira apenas. Estando sujeita em anos anteriores a culturas de sequeiro, a parcela foi regada com água de má qualidade (C3S1) da Ribeira de Canhestros. A variação vertical de sais deve-se a efeitos da pouca lixiviação verificada durante a campanha de rega, na sequência das pequenas dotações de rega aplicadas e da quase nula precipitação verificada neste período.

Palavras-chave: Barros, salinidade, drenagem, drenos toupeira, subsolagem.

SALINITY CONTROL ON A VERTISOL SOIL BY DEEP LOOSENING AND MOLE DRAINS

ABSTRACT

The objective is to study a set of techniques in irrigated agriculture that contribute to improve drainage of the Vertisol soils, protecting them against salinity.

Discussed results were obtained by monitoring an experiment field with Barros clay soils in Outeiro (Ferreira do Alentejo). A basic drainage system was built based on perforated plastic pipe drains, complemented with three experiment modalities: no further soil deep loosening; subsoiling; mole drains. A supplementary modality was later established consisting on mole drains opening directly into a drainage channel, without basic drainage network.

The experiment field was irrigated with poor quality water from the neighbour Canhestros River (C3S1) and salt contents evolution was monitored within the soil profile and in the drainage water, as compared to soil salinity initial status, which resulted from several years of cereal rainfed cropping.

Important salt increase was observed which is due to poor drainage and rain scarcity during the experiment.

Key words: Vertisol soils, salinity, drainage, mole drains, subsoiling.

ÍNDICE

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
INDICE DE QUADROS.....	xiv
LISTA DE SÍMBOLOS E GRANDEZAS.....	xv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	16
1.2 - OBJECTIVOS GENÉRICOS DO TRABALHO	19
1.3 – OBJECTIVOS ESPECÍFICOS DO TRABALHO	19
1.4 – ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	20
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 - QUALIDADE DA ÁGUA DE REGA.....	21
2.1.1 - Risco de salinização	21
2.1.2 - Risco de alcalização	22
2.1.3 - Classificação da água de rega	22
2.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS	24
2.3 - DRENAGEM AGRÍCOLA.....	24
2.3.1 - Subsolagem	25
2.3.2 - Drenos toupeira	27
2.3.3 - Qualidade da água drenagem	29
CAPÍTULO 3 – FORMULAÇÕES DE BASE.....	31
3.1 - VOLUME ELEMENTAR DE CONTROLO.....	31
3.1.1 - Definição do volume elementar de controlo	31
3.1.1.1 - Equação de balanço de massa	32
3.1.1.2 - Definição dos termos relativos às entradas de massa no volume elementar de referência.....	32
3.1.1.3 - Definição dos termos relativos às saídas de massa no volume elementar de referência	33
3.1.1.4 - Definição dos termos relativos às variações de massa no volume elementar de referência	33
3.1.1.5 - Equação do balanço de massa relativo às diversas componentes de um volume elementar de controlo	34

3.3 OS CONCEITOS DE INFILTRÇÃO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO PROFUNDA A PARTIR DA EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO	35
3.3.1 - Infiltração superficial.....	35
3.3.2 - Infiltração profunda.....	36
3.3.3 – Recarga	37
3.4 – OS CONCEITOS DE INFILTRAÇÃO SUPERFICIAL, INFILTRAÇÃO PROFUNDA E DE RECARGA DEFINIDOS A PARTIR DA EQUAÇÃO DE BALANÇO DE MASSA DE UM DETERMINADO COMPONENTE	38
3.4.1 – Infiltração superficial	38
3.4.2 – Infiltração profunda	38
3.4.3 – Recarga	39
3.5- O ESCOAMENTO NA ZONA VADOSA	40
3.5.1 - Aproximação clássica para a descrição do movimento de água em solo não saturado	40
3.5.1.1 - Equação dinâmica ou de fluxo de água no estado líquido	40
3.5.1.3 - Equação da continuidade ou de conservação da massa.....	41
3.5.1.4 - Equação geral do escoamento.....	43
3.5.1.5 - Quantificação dos processos de escoamento em solo não saturado. Obtenção das relações $h = h(\theta)$ e $K = K(h)$	43
3.6 QUANTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO BALANÇO HÍDRICO	44
3.6.1 – Meio <i>solo</i>	44
3.6.1.1 – Precipitação	44
3.6.1.2 – Variação do armazenamento de água no <i>solo</i>	44
3.6.1.2.1 - Determinação da capacidade de campo e do coeficiente de emurchecimento	46
3.6.1.3 – Infiltração superficial.....	47
3.6.1.4 – Escorrimento	47
3.6.1.5 – Cálculo da evapotranspiração potencial cultural.....	47
3.6.1.6 – Cálculo da evapotranspiração real.....	48
3.6.1.7 - Escoamento lateral de entrada	48
3.6.1.8 - Infiltração profunda.....	49
3.6.2 - Meio <i>zona vadosa intermédia</i>	49
3.6.2.1 Variação do armazenamento de água na zona vadosa abaixo do solo.....	49
3.7 - POSIÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO	50
3.7.1 - Nível freático abaixo do solo	50
3.8.1 - Determinação da concentração de soluto	51
3.8.1.1 – Determinação da massa de soluto na água de escoamento...51	
3.8.1.2 – Determinação da massa de soluto na água de rega	51
3.8.1.2 – Determinação da massa de soluto na água de drenagem	51
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	52

4.1 - DELINEAMENTO DO ESQUEMA EXPERIMENTAL INSTALADO NO CAMPO DE ENSAIOS.....	52
4.1.1 - Localização e caracterização da parcela experimental.....	52
4.1.2 – Caracterização geral do solo	53
4.1.2.1 – Complexo de troca e textura	53
4.1.2.2 – Curvas características da água no solo $\theta(h)$	55
4.1.2.3 - Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento	56
4.1.3 – Modalidades.....	56
4.1.4 - Ensaio A - Sistema de “drenagem combinada”.....	57
4.1.5 - Sistema de “drenagem combinada”.....	58
4.1.6 - Ensaio B – Drenos toupeira, sem sistema de “drenagem combinada”	59
4.2 - BALANÇO HÍDRICO	60
4.2.1 – Armazenamento de água no solo.....	61
4.2.1.1 – Evolução do teor de água no solo ao longo do tempo	61
4.2.2 - Dotação da rega e avaliação do escoamento superficial	62
4.2.3 – Determinação dos caudais de drenagem.....	63
4.2.4 – Determinação da profundidade do nível freático	64
4.2.5 – Evolução das cargas hidráulicas ao longo do tempo	64
4.2.6 - Determinação da curva característica de água $\theta(h)$	65
4.3 BALANÇO DE SAIS. CONTROLO DA SALINIDADE.....	66
4.3.1 Caracterização da qualidade da água.....	66
4.3.1.1 - Recolha de amostras de água.....	67
4.3.2 - Caracterização da salinidade do solo.....	68
4.3.2.1 - Recolha de amostras de solo	69
4.3.2.2 - Método utilizado na determinação da condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo	69

5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.... 70

5.1 - EVOLUÇÃO DOS TEORES DE HUMIDADE AO LONGO DO TEMPO E EM PROFUNDIDADE.....	70
5.1.1 - Modalidade Testemunha.....	70
5.1.2 - Modalidade Subsolagem	72
5.1.3 - Modalidade Toupeira.....	74
5.2 – CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	76
5.2.1 - Potencial de salinização e alcalinização	76
5.3 - CARACTERIZAÇÃO DA SALINIDADE DO SOLO	80
5.3.2 - Perfis de salinização	80
5.3.2.1 - ENSAIO A - Sistema de “drenagem combinada”.....	80
5.3.2.1.1 - Modalidade Testemunha.....	80

5.3.2.1.2 - Modalidade subsolado.....	81
5.3.2.1.3 - Modalidade Toupeira (Mod 3).....	82
5.3.2.2 - ENSAIO B – Drenos toupeira, sem sistema de “drenagem combinada”	83
5.3.2.2.1 - Modalidade Toupeira só (Mod 4)	83
5.4 - NECESSIDADES DE LIXIVIAÇÃO	84
5.5 - BALANÇO HÍDRICO DO SOLO.....	85
5.5.1 - Modalidade Toupeira (<i>Mod 4</i>)	85
5.5.1.1 - Balanço de sais	87
5.5.5.2 - Necessidade de lixiviação (NL)	87
6 - CONCLUSÕES.....	89
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
ANEXO 1	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama do U.S. Salinity Laboratory para classificar as águas quanto aos riscos de salinização e de alcalização	22
Figura 2 – Redução relativa da infiltração por efeito conjunto da salinidade e de alcalização da água de rega (Ayers e Westcot, 1987)	23
Figura 3 – Volume elementar de controlo.....	31
Figura 4 - Infiltração superficial tomando o volume de elementar de referência (VER) abaixo da fronteira da infiltração superficial.....	35
Figura 5 - Infiltração profunda tomando o volume de elementar de referência (VER) acima da fronteira da infiltração profunda.....	36
Figura 6 - Infiltração profunda tomando o volume de elementar de referência (VER) abaixo da fronteira da infiltração profunda.....	36
Figura 7 - Recarga tomando o volume de controlo acima da zona saturada.....	37
Figura 8 - Massa de soluto presente na infiltração superficial tomando o volume elementar abaixo da fronteira da infiltração superficial	38
Figura 9 - Massa de soluto presente na água de infiltração profunda tomando o volume elementar abaixo da fronteira da infiltração profunda	39
Figura 10 - Massa de soluto presente na água de recarga tomando o volume elementar acima da zona saturado	39
Figura 11 – Balanço hídrico da camada de solo considerando que o nível freático se encontra sempre abaixo da base do solo.....	45
Figura 12 – Balanço hídrico da zona vadosa intermédia.....	49
Figura 13 – Posição do nível freático abaixo do solo	50
Figura 14 – Posição do nível freático quando se encontra entre a superfície e a base do solo	50
Figura 15 – Localização da Herdade do Outeiro na Infraestrutura 12 do Perímetro de Rega de Alqueva.....	52
Figura 16 – Manchas de solo Cp na área de estudo.....	53
Figura 17 – Curvas de retenção de água no solo.....	55
Figura 18 - Esquema da parcela experimental	57
Figura 19– Aspecto da superfície do solo após a passagem do subsolador	58
Figura 20 - Dreno toupeira	58
Figura 21 - Forma de ligação dos drenos toupeira ao colector secundário.....	59
Figura 22 - Abertura dos drenos toupeira	60
Figura 23 - Subsolador com o dispositivo “toupeira”	60
Figura 24 - Representação esquemática do estudo do balanço hídrico do solo	61
Figura 25 - Sonda TDR.....	62
Figura 26 - Pluviómetro	62
Figura 27 - Recolha de volumes de excedente. Avaliação do escoamento	63
Figura 28 - Canaletes medidores de caudais com sonda de nível de água	63
Figura 29 - Piezómetro.....	64
Figura 30 - Tensiómetro	64
Figura 31 - Recolha de amostras de terra para determinação do pF.....	65
Figura 32 - Metodologia utilizada para a estimativa do balanço de sais no solo	66
Figura 33 - Recolha de água de drenagem	67
Figura 34 - Recolha de água em piezómetros	68
Figura 35 - Recolha de amostras de terra para determinação da salinidade do solo ..	69

Figura 36 - a) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade ao longo das regas, na modalidade testemunha. b) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade antes e após a primeira rega.	70
Figura 37- a) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade ao longo das regas, na modalidade subsolado. b) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade antes e após a primeira rega.	72
Figura 38- a) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade ao longo das regas na modalidade toupeira . b) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade antes e após a primeira rega.....	74
Figura 39 – Aspecto da cultura do girassol na modalidade testemunha.....	78
Figura 40 - Aspecto da cultura do girassol na modalidade subsolado	79
Figura 41 – Evolução da salinização do perfil do solo na <i>Modalidade Testemunha</i>.	81
Figura 42– Evolução da salinização do perfil solo na <i>Modalidade Subsolação</i>	82
Figura 43 – Evolução da salinização do perfil do solo na <i>Modalidade Toupeira-Mod3</i>.	82
Figura 44 – Evolução da salinização do perfil do solo na <i>Modalidade Toupeira só-Mod4</i>	83
Figura 45 – Nível da toalha freática em função do tempo (após a rega realizada a 9 de Agosto) na modalidade toupeira.....	86

INDICE DE QUADROS

Quadro 1- Características físicas de amostras de solo colhidas a diferentes profundidades na parcela experimental do Outeiro54

Quadro 2 - Caracterização do complexo de troca do solo da parcela experimental ...54

Quadro 3 -Classificação da água76

Quadro 4 - Necessidade de lixiviação para o período84

Quadro 5- Necessidade de lixiviação para o período85

Quadro 6 - Necessidade de lixiviação para o período85

Quadro 7 – Resultados do balanço hídrico para o período compreendido.....85

Quadro 8 - Contribuição dos volumes de rega e de drenagem no balanço de sais87

Quadro 9- Necessidade de lixiviação para o período88

LISTA DE SÍMBOLOS E GRANDEZAS

<i>ac</i>	(L ³ /T ou L/T)	Ascensão capilar
<i>ad</i>	(L ³ /T ou L/T)	Água de drenagem
<i>A_l</i>	(L ³ /T ou L/T)	Armazenamento de água no solo
<i>A_s</i>	(L ³ /T ou L/T)	Armazenamento de água na zona saturada
<i>A_v</i>	(L ³ /T ou L/T)	Armazenamento de água na zona vadosa
ΔA_l	(L ³ /T ou L/T)	$A_{l\text{ fim}} - A_{l\text{ inicio}} = A_l(t + \Delta t) - A_l(t)$
ΔA_s	(L ³ /T ou L/T)	$A_{s\text{ fim}} - A_{s\text{ inicio}} = A_s(t + \Delta t) - A_s(t)$
ΔA_v	(L ³ /T ou L/T)	$A_{v\text{ fim}} - A_{v\text{ inicio}} = A_v(t + \Delta t) - A_v(t)$
<i>ip</i>	(L ³ /T ou L/T)	Infiltração profunda
<i>is</i>	(L ³ /T ou L/T)	Infiltração superficial
<i>iw</i>	(L ³ /T ou L/T)	Água de rega
<i>R</i>	(L ³ /T ou L/T)	Recarga vertical

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE RISCOS DE SALINIZAÇÃO DO SOLO

O Plano Nacional para o Uso Eficiente de Água (PNUEA 2001) refere que a agricultura é claramente o maior utilizador de água em Portugal, com uma procura de 6.550 milhões m³/ano (87% do total), contra 570 milhões m³/ano no abastecimento urbano às populações (8% do total) e 385 milhões m³/ano no abastecimento à indústria (5% do total). “Tornar disponível água para rega representa, portanto, um elemento decisivo de aproveitamento de potencialidades para correcção de restrições naturais, permitindo ganhos de produtividade e diversificação de produções” (Caldas, 2001). Uma questão indissociável das disponibilidades hídricas é o problema da qualidade da água. O armazenamento de água em albufeiras, o qual constitui um potencial de irrigação com águas de superfície, é em alguns casos o maior receptor de cargas poluentes geradas nas bacias hidrográficas em resultado das diferentes actividades sócio-económicas (indústria, agricultura e pecuária) que existem no território, determinando o estado da qualidade da água e o consequente impacto que esse estado pode causar na salinização dos solos.

A introdução do regadio no Baixo Alentejo irá abranger alguns solos com drenagem interna má, como tal sensíveis ao problema da salinidade. Trata-se especialmente dos solos de Barro (Vertissolos) muito argilosos e compactos em todo o perfil que têm na baixa permeabilidade a sua principal deficiência. Não havendo drenagem interna ou sendo muito deficiente, a água acumular-se-á facilmente no perfil, depositando aí os sais que contenha e fazendo subir até às camadas superiores os que estão depositados nos horizontes profundos. O potencial osmótico da solução do solo aumentará, dificultando a absorção pelas plantas da água (e dos nutrientes), provocando condições de déficit hídrico (Serralheiro, 2004). É o conhecido problema da salinidade. Se nos sais tiver presença importante o sódio, trata-se então do problema, especialmente grave, da alcalinidade. É favorecida a dispersão dos colóides argilosos, afectando desfavoravelmente a estrutura do solo, o que se reflecte na erodibilidade, na diminuição da infiltrabilidade e da condutividade hidráulica, logo na drenagem, num ciclo de degradação difícil de quebrar

Para impedir que a concentração salina atinja níveis prejudiciais, é necessário remover o excesso do perfil do solo. O principal problema técnico reside então na necessidade de dispor de água de qualidade, em quantidade suficiente para proceder à lavagem dos sais do perfil do solo. Esta água de qualidade poderá ser fornecida pela precipitação, se for suficiente. Se não for, o problema poderá ser insolúvel (e o regadio insustentável), se não se encontrar outra fonte suficiente de água de qualidade. É preciso pois determinar as dotações a serem aplicadas para rega e regulação da salinidade (dotação de lavagem) e das quantidades a drenar numa dada área, de modo a garantir-se a eliminação dos sais que a rega tenha deixado em excesso no solo. Isto é possível sempre que a infiltração exceda a evapotranspiração. Se a dotação de rega for superior à evapotranspiração e a infiltração e drenagem forem suficientes, a salinidade do solo mantém-se a baixo nível. O problema surge então como um problema de balanço hídrico, que logo toma o aspecto de balanço de sais, ao considerar-se em cada parcela a respectiva concentração salina.

A caracterização do sistema hidrológico e hidráulico ao nível da parcela, com base nos balanços hídrico e de sais poderá dar indicação sobre as condições de risco de salinização de solos regados. Uma avaliação integral da quantidade e da qualidade da água que entra, da que está e da que sai de um sistema de rega-drenagem pode fornecer informação essencial para o manejo dos sistemas culturais de regadio. A aplicação deste conceito (Equação 1.1) a estes sistemas permite gerar informação acerca: da eliminação dos sais na água de drenagem para fora do sistema; da eficácia da drenagem natural e artificial; dos efeitos plausíveis do método de irrigação sobre o funcionamento desses sistemas; dos riscos ligados à qualidade da água de rega (Rhoades *et al.*; 1999)

$$\Delta S = CrR - Cd D \pm Cn C \pm St \quad \text{Eq. 1.1}$$

onde

ΔS é a variação (final - inicial) de sais armazenados no solo; Cr é a concentração salina da água de rega; Cd concentração salina da água de drenagem; Cg é a concentração salina da toalha freática; St representa a quantidade de sais provenientes da meteorização das rochas, precipitação de sais insolúveis, adubos e extracção pela cultura. R , D e C designam o volume de água de rega, drenagem e capilar.

Serralheiro *et al.* (1996) referem que a prática do que hoje em dia se designa de agricultura sustentável motiva e determina uma conveniente adequação das práticas

agrícolas, nomeadamente no que se refere à instalação de técnicas de drenagem capazes de permitir a lavagem e a conservação do solo e da água. A investigação em drenagem dos solos argilosos constitui um instrumento essencial no desenvolvimento de práticas agrícolas que conduzam à obtenção de eficiências elevadas de drenagem interna do solo, ao aumento de circulação de água no perfil e à lavagem dos sais em excesso. A mobilização profunda do solo como a subsolado e os drenos toupeira podem constituir tecnologias adequadas ao manejo hidroagrícola destes solos. A subsolado e os drenos toupeira, destinam-se a modificar, melhorando, as condições de permeabilidade dos solos argilosos, deixando no perfil galerias e zonas de fractura, por onde passa a escoar-se a água (melhoria das condições de drenagem interna e da capacidade de armazenamento da água) e que constituem espaços adicionais oferecidos na zona ao desenvolvimento radical (melhoria de ocupação do perfil).

1.2 - OBJECTIVOS GENÉRICOS DO TRABALHO

Esta dissertação de Mestrado insere-se no âmbito dos Projectos de Experimentação e Demonstração AGRO 217 e PEDIZA II (Acção 4.2.2). A área de aplicação deste trabalho é uma parcela experimental localizada na Herdade Experimental e de Demonstração do Outeiro pertencente à Universidade de Évora em Canhestros (Ferreira do Alentejo), no distrito de Beja, na qual se criaram condições para o desenvolvimento do regadio.

Genericamente, este trabalho trata da problemática do uso agrícola de água de má qualidade na sua principal vertente (qualidade da água de rega/salinização) fundamentando-se na necessidade de melhorar o conhecimento e reduzir o grau de incerteza sobre os impactes ambientais gerados pela aplicação de uma água de rega de má qualidade em solos regáveis do Alentejo.

Um objectivo geral do Trabalho é determinar as dotações a serem aplicadas para rega e regulação da salinidade e das quantidades a drenar numa dada área, de modo a garantir-se a eliminação dos sais que a rega tenha deixado em excesso no solo para manter os sais a um nível admissível pela cultura e impedir que a concentração salina do solo atinja níveis prejudiciais.

Outro objectivo genérico, associado ao primeiro, é verificar a adequabilidade (técnica e económica) das práticas da subsolagem e dos drenos toupeira como tecnologias melhoradoras das condições de drenagem dos solos de Barro e da circulação da água e dos sais no perfil.

A avaliação dos resultados passará pela realização de um balanço hidrológico e de um balanço químico da água de rega e de drenagem.

1.3 – OBJECTIVOS ESPECÍFICOS DO TRABALHO

Os objectivos específicos do presente estudo consistem basicamente em:

1. Experimentar a subsolagem e os drenos toupeira como técnicas de melhorar as condições de drenagem interna dos Vertissolos, conferindo-lhes permeabilidade que permita a drenagem dos sais dos horizontes superiores do perfil;

2. Monitorizar, na parcela experimental, os diversos parâmetros do balanço de sais do solo, a utilizar na realização do objectivo genérico deste trabalho;
3. Avaliar o nível e os mecanismos decisivos e actuates para o estabelecimento do processo de salinização a partir da monitorização de parâmetros indicadores como a condutividade eléctrica, sólidos suspensos totais e concentração de algumas espécies iónicas;
4. Fazer a caracterização hídrica e hidropedológica da parcela experimental, obtendo informação que permita compreender e explicar o comportamento hidrológico do solo em ensaio;
5. Fazer a caracterização agrícola da parcela experimental, de modo a compreender e explicar o comportamento agrícola do solo em ensaio, designadamente o desenvolvimento da cultura e do respectivo sistema radical.

1.4 – ORGANIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 – Formulações de base apresenta-se o balanço de massa de um volume elementar de referência que abrange a superfície do solo e o meio subsuperficial. Começa-se pela apresentação da equação de balanço de massa e da equação de balanço de massa de água ou equação do balanço hídrico e faz-se a descrição dos diversos processos que ocorrem no meio subterrâneo, desde a entrada de água de rega à superfície do solo até à recarga. Apresenta-se também a formulação clássica que rege o escoamento na zona vadosa.

No Capítulo 3 – Quantificação das variáveis do balanço hídrico aborda-se a forma de fazer a quantificação dos diversos termos do balanço de massa. Caracterizam-se também os processos que representam a passagem de água entre os vários subvolumes dentro do volume elementar de referência.

No Capítulo 4 – Materiais e métodos descrevem-se as metodologias aplicadas para a determinação dos parâmetros do balanço de massa.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - QUALIDADE DA ÁGUA DE REGA

Do ponto de vista químico, todas as águas de rega são soluções electrolíticas. No entanto a sua composição química, a qual reflecte a sua origem, pode não ser compatível com as características físicas e químicas existentes nos solos sobre os quais irá ser aplicada. A adicionar a tudo isto o efeito da concentração de sais resultante da extracção de água pela cultura, bem como a incorporação de fertilizantes no solo poderá ter como consequências a alcalização e a salinização dos solos sujeitos a rega (Sposito, 1989).

A qualidade da água de rega assume um papel determinante na salinização e alcalização dos solos. As restrições que algumas das suas características químicas impõem ao seu uso agrícola, têm custos inerentes, em virtude dos problemas ou riscos que tal uso poderá introduzir no solo e nas culturas (Ayers e Westcot, 1987).

Dois dos mais importantes factores que impõem restrições no uso de uma água para rega é o risco de alcalização e de salinização dos solos (Shainberg *et al.*, 1980).

Os riscos de salinização e de alcalização são frequentemente acelerados devidos não só ao uso de água de rega com qualidade deficiente mas também por regas pouco eficientes e má drenagem dos solos (Rycroft *et al.*, 1995).

2.1.1 - Risco de salinização

Os catiões Ca^{++} , Mg^{++} e Na^{+} assumem papel dominante ao nível do complexo de troca do solo. O cálcio e o magnésio têm uma função estruturante do solo, pois floculam os complexos argilo-húmicos, formando com eles agregados estáveis. Contribuem assim para aumentar a porosidade e com ela a permeabilidade à água e ao ar (Serralheiro, 1992).

A concentração total de catiões, que habitualmente se mede pela condutividade eléctrica (mmho/cm ou dS/m) na água de rega, traduz o risco de salinização, consistindo no aumento do potencial osmótico da água do solo, devido ao uso de uma água com elevada concentração salina, traduzida por elevada condutividade eléctrica (Ayers e Westcot, 1987). Um aumento da concentração total de sais na água traduz-se no aumento do seu potencial osmótico, obrigando as raízes a exercerem maior esforço para a absorção da água e dos nutrientes, podendo mesmo vir a impedir a absorção da água e, o desenvolvimento vegetativo (Hoffman *et al.*, 1990). Um dos aspectos decorrentes do uso de águas nestas condições é o abaixamento da produção (Curtin D. *et al.*, 1994).

2.1.2 - Risco de alcalização

O risco de alcalização é medido pela concentração total de Na⁺ na água de rega relativamente à do total de outros catiões, sendo habitualmente expresso pela RAS (razão adsorção sódio) (Equação 2.1) (Ayers e Westcot, 1987). O sódio tem uma acção desfloculante dos complexos argilo-húmicos, dispersando as partículas terrosas, retirando ao solo permeabilidade. É o efeito de alcalização do solo, que pode chegar a impedir toda a actividade radical. Com as concentrações dos iões expressos em meq/l a RAS é

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}}$$

Eq. 2.1

Um aumento das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} na água de rega baixa o valor de RAS melhorando a qualidade da água. Já os iões HCO_3^- e CO_3^{2-} podem aumentar os riscos de alcalização da água por causarem a precipitação do carbonato de cálcio (Rengasamy et al., 1999).

2.1.3 - Classificação da água de rega

Os riscos de salinização e de alcalização são de tal modo interactuantes que foram considerados em conjunto no clássico diagrama classificativo das águas do U.S. Salinity Laboratory. A consideração conjunta dos dois componentes na qualidade (Figura 1) resulta

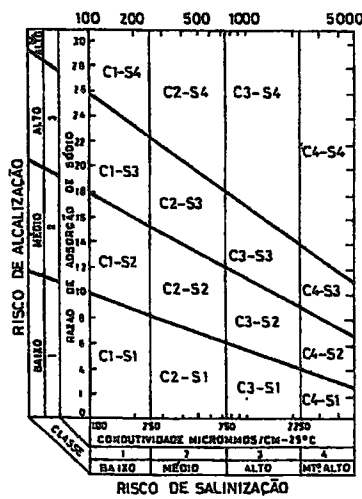


Figura 1 - Diagrama do U.S. Salinity Laboratory para classificar as águas quanto aos riscos de salinização e de alcalização

na definição de 16 classes de qualidade da água, cada uma associada a um determinado grau de restrições quanto ao seu uso agrícola (U.S. Salinity Laboratory, 1954).

Ayers e Westcot, (1987) tratam de outro modo o efeito conjunto da alcalização e da salinidade das águas de rega. Salienta-se, como se pode ver na Figura 2, que o efeito de alcalização de uma água com determinado RAS, traduzido no grau de redução que induz na infiltrabilidade do solo, é tanto maior quanto menor for a salinidade da água.

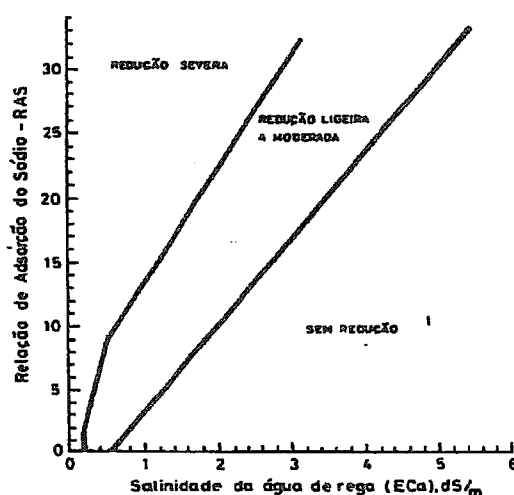


Figura 2 – Redução relativa da infiltração por efeito conjunto da salinidade e de alcalização da água de rega (Ayers e Westcot, 1987)

Para estes autores a dispersão das argilas poderá ocorrer para qualquer valor de RAS se o solo estiver em contacto com uma água com salinidade baixa. Contudo quando o cálcio é o catião dominante e a percentagem de sódio de troca é baixa, a salinidade da água de rega em termos de condutividade eléctrica, tem de ser inferior a 0.4 dS m⁻¹ para causar dispersão. Para valores de RAS >20 o solo poderá vir a dispersar se estiver em contacto com uma água salina (EC>1 dS m⁻¹).

Existem algumas diferenças entre as áreas em que a infiltração da água da chuva ocorre em zonas de regadio, e as outras; isto porque a água usada para regadio pode ter diversas origens, sendo em geral mais salina que a água proveniente da precipitação. Assim, a concentração de sais que atinge o aquífero resulta da concentração dos mesmos na água de regadio, mas também, dos sais que são arrastados do solo por essa água e pela água da precipitação. A salinidade da água infiltrada depende não só da salinidade da água usada

para a rega, como também do método de rega, da dotação e do clima da região (Serra, 2002).

Se a zona de regadio usa a água freática subjacente vai dar lugar ao ciclo: extracção-evaporação-concentração-infiltração-extracção. Deste modo, a água aumenta progressivamente o seu conteúdo em sais onde o único factor de diluição é a água da chuva, dando origem a zonas de elevada salinidade, dureza e com concentrações elevadas dos iões sulfato e cloreto intensificando de forma progressiva, a mineralização total da água subterrânea, fenómeno que se acentua quando o tempo de residência da água no aquífero é muito elevado. Pelo contrário, se a velocidade de escoamento das águas subterrâneas é rápida, este aumento da mineralização não atinge as mesmas proporções. No caso do processo de reciclagem são a permeabilidade e o gradiente hidráulico que controlam a poluição das águas subterrâneas. Esta água de elevada salinidade, que se infiltra, vai permanecer na parte superior do aquífero freático, já que os fenómenos de dispersão e difusão molecular são muito lentos. Ocorre deste modo uma estratificação da água no aquífero, em que a mais salinizada se encontra na parte superior (Stigter et. al., 2002).

2.2 - CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

2.3 - DRENAGEM AGRÍCOLA

A drenagem agrícola consiste na eliminação contínua, por estruturas permanentes, das águas em excesso, que anulam ou diminuem o rendimento das culturas. A estrutura permanente de drenagem é uma rede de valas (abertas ou cegas), de tubos (de barro, de betão, de plástico ou moldado no próprio solo) e de obras complementares e de ligação ao emissário (Serralheiro, 1980).

A primeira preocupação de quem tenha de empreender um projecto de drenagem agrícola deve ter em conta a origem do encharcamento, as condições geológicas e topográficas do solo, bem como as necessidades das plantas (Tiercelin, 1998).

O controlo e prevenção da salinização obrigam a uma eficiente gestão da rega ou à implantação de sistemas de drenagem (Moukhtar, 2003). O objectivo principal da drenagem agrícola é a remoção do excesso de água e de sais do solo e/ou o rebaixamento do nível freático, com o propósito de adequar o meio ao desenvolvimento das culturas (Raper et al., 2004).

Os solos com permeabilidade baixa estão normalmente associados a áreas planas ou à existência de superfícies freáticas com gradiente hidráulico baixo. Estes solos apresentam um risco de salinização, pois são difíceis de lixiviar. A drenagem subterrânea ou superficial realiza a dupla tarefa de controlar a toalha freática e com ela a lixiviação, neutralizando a acumulação de sais no perfil do solo. A água é aplicada normalmente em excesso para além das exigências da cultura. Os sais solúveis são lixiviados na água da drenagem embora em algumas áreas a lixiviação possa acontecer durante a estação chuvosa. Tipicamente as concentrações de sal na água da drenagem são 2 a 10 vezes mais elevadas do que na água da rega. O volume de água de drenagem pode ser reduzido com uma boa gestão da rega. Essa diminuição implicará o agravamento da qualidade da água. Reduzir as entradas de sais no solo é uma forma de melhorar a qualidade de água de drenagem (Edwin, 1996).

Mawgoud *et al.*, (2003), referem que a gestão de solos argilosos e salinos depende essencialmente de fornecer condições eficientes de drenagem ao lado de regas regulares para preservar a salinização do perfil na zona radicular e a ascensão capilar a partir da superfície freática ao longo da campanha de rega.

Robinson (1990) in Beven (2004) refere que a drenagem tende a reduzir o fluxo máximo de drenagem em solos argilosos, aumentando os défices do armazenamento. Nos drenos toupeira e na subsolagem o fluxo é maior quando comparado com drenagem por tubos. Contrariamente, nas valas abertas o fluxo é maior comparativamente à drenagem subsuperficial. O fendilhamento provocado no solo pela passagem do subsolador é importante na eliminação da água, mas a drenagem por tubos tendo a modificar melhor o sincronismo entre a entrada e a saída de água do solo.

Dils, *et al.*, (1999), referem que a drenagem melhora significativamente a estabilidade estrutural e a permeabilidade do solo. No entanto a qualidade de água pode ser afectada pela taxa acelerada do transporte de nutrientes.

Uma das razões de maior importância, pela qual os sistemas de drenagem muitas vezes não são utilizados, é o custo de implantação no terreno, que pode ser elevado (Carter, 1988; Tiercelin, 1998; Moukhtar, 2003; Abdel-Mawgoud, 2003).

2.3.1 - Subsolação

A subsolação é uma técnica de drenagem usada geralmente para corrigir os efeitos adversos da compactação do solo, melhorando a sua condição física. Em circunstâncias



ideais, a subsolagem deve produzir fendas verticais no perfil do solo (Drewry, *et al.*, 2000). A profundidade da subsolagem pode ir até 25 cm para descompactar a camada mais superficial do solo ou até 50 cm para descompactar horizontes mais densos B (Harrison, 1994). Este mesmo autor verificou que a subsolagem aumenta o volume total de poros, a proporção dos macroporos, a infiltração, o crescimento das raízes em profundidade e a absorção da água e dos nutrientes.

Também Greenwood *et al.* (1990) citados por, Drewry *et al.* (2000), verificaram que a subsolagem aumentou a porosidade até 30% do volume total do solo.

Drewry, *et al.* (2000) encontraram também um aumento da macroporosidade até 39%, o que aumentou a condutividade hidráulica saturada do solo, a permeabilidade e o arejamento até duas vezes mais. As melhorias das condições físicas do solo foram mais evidentes após a realização da subsolagem. No entanto após 2 anos e meio verificava-se ainda benefícios da subsolagem entre os 18 e 24 cm de profundidade. Acima dos 18 cm o houve uma recompactação.

Wild (1988) aponta a subsolagem como a forma mais adequada para desagregar o solo, partir o calo da lavoura ou outras camadas compactadas qualquer que seja a sua natureza. Especifica ainda que, nos solos Mediterrâneos pardos, a operação de subsolagem é provavelmente a melhor forma de actuação para tornar o horizonte B mais permeável e penetrável pelas raízes.

Também Serralheiro e Oliveira (1994) concluíram ser a subsolagem uma técnica promissora para aumentar o perfil efectivo de enraizamento e a capacidade utilizável dos solos Mediterrâneos.

Trabalhos realizados por Aguiã (1994) no Divor em solo Mediterrâneo Pmg permitem concluir que a capacidade utilizável é maior em solo subsolado relativamente ao não subsolado, mas que as diferenças não são marcantes. Esta mesma autora refere, relativamente aos perfis hídricos, que as diferenças detectadas entre solo subsolado e não subsolado são pequenas e evidentes apenas nas camadas superficiais. Em relação ao desenvolvimento do sistema radical de uma cultura de milho instalada no ensaio, concluiu que não se obtêm melhorias significativas.

Estudos realizados por Matos (1998) em rega por sulcos num solo Pmg no Divor, mostraram que as operações de subsolado e particularmente a subsolagem profunda proporcionam um aumento acentuado da condutividade hidráulica no horizonte B. Tal facto traduziu-se pelo aumento de circulação da água no horizonte B, reduzindo-se desta

forma a possibilidade de formação de toalhas freáticas suspensas, melhorando o processo de infiltração e aumentando a quantidade de água disponível para as plantas em profundidade.

De igual modo, Santos (1995) em trabalhos desenvolvidos no mesmo campo, mostrou com alguma reserva que os efeitos induzidos pela subsolagem na melhoria das condições de distribuição de água no solo perduram, o mesmo não acontecendo em relação à capacidade de armazenamento.

Moukatar *et al.*, 2004 referem que os problemas da drenagem em zonas do nordeste de Egipto estão associados a áreas planas, a solos pesados com elevados teores em argila e permeabilidade baixa. Este estudo teve como objectivos observar a produção da cultura num sistema de drenagem combinado, drenos de plástico conjuntamente com subsolagem paralela e cruzada. Os drenos estavam espaçados de 15, 30 e 60 m. As culturas instaladas foram o trigo, sorgo e trevo. Estes autores mostraram que a resposta da cultura da planta do trigo - número dos rebentos, peso seco da planta – aumentou significativamente concluindo que a subsolagem é altamente eficaz na melhoria das produções com a diminuição do espaçamento dos drenos. A subsolagem cruzada é mais eficaz do que a subsolagem paralela. A produção total do trigo aumentou também com a subsolagem e a diminuição do espaçamento dos drenos. A altura de planta do sorgo, a matéria seca e a produção mostram um aumento altamente significativo com a diminuição do afastamento dos drenos. Os melhores resultados observaram-se nos drenos afastados de 15 m para as duas modalidades de subsolagem. Também os pesos frescos ou secos do trevo no segundo ou terceiro corte aumentaram nas mesmas condições de afastamento com os drenos espaçados de 15m e subsolagem cruzada. Estes autores concluíram que a subsolagem cruzada e um menor afastamento dos drenos num sistema de drenagem combinada melhora a produção em solos de baixa permeabilidade.

2.3.2 - Drenos toupeira

A drenagem subsuperficial em solos pesados com baixa permeabilidade (condutividade hidráulica saturada inferior a 0,1 m/dia) requer um espaçamento menor entre os drenos pelo que a instalação de drenos toupeira em substituição dos drenos de plástico é uma óptima alternativa pois tem custos menos elevados (Christen *et al.*, 2000; Wyseure, 2001).

Leeds-Harrison *et al.*, (1982) mostraram que a resposta à drenagem é influenciada pela natureza das fendas e pelas alterações provocadas no solo no momento em que são feitos

os drenos toupeira. A drenagem toupeira desenvolve fendas adjacentes e, acima do dreno, o solo tem mais rápida resposta à precipitação do que nos casos em que não há formação de fendas. A possibilidade de sucesso da drenagem toupeira depende fundamentalmente da estabilidade das galerias. Se estas se mantiverem estáveis, constituirão um bom sistema de controlo da água do solo.

Moukatar *et al.*, 2003 referem que a abertura de drenos toupeira juntamente com a instalação de redes simples de drenos de plástico enterrados é uma forma auxiliar de drenagem dos solos argilosos e salinos, permitindo aumentar a profundidade do nível freático e a produtividade dos solos. Além disso têm um custo baixo de instalação e não necessitam de maquinaria avançada para a sua execução.

Mawgoud *et al.*, (2003) em trabalhos desenvolvidos em solos que apresentavam um teor médio de argila de 63,5% até 90 cm de profundidade, uma condutividade hidráulica de 0,0669 m/dia e uma condutividade eléctrica (EC) média do perfil do solo de 25 dS/m, verificou que os drenos toupeira apenas são eficazes em remover sais até 60 cm de profundidade reduzindo a EC para 4 dS/m, nos ensaios onde foram instalados drenos toupeira perpendicularmente a valas abertas espaçadas de 40 m. A transferência dos sais para as camadas mais profundas apenas depende da eficiência de drenagem.

O instituto de pesquisa de Rutherglen na Austrália, em estudos feitos em pastagens permanentes concluiu que a carga de nutrientes na água de drenagem dos drenos toupeira é mais elevada, do que na parcela onde não foram instalados drenos, principalmente em N e P (Media Releases, 1995).

Moukatar *et al.*, 2003 referem que agricultura no delta do Nilo e o vale do Nilo no Egipto, existe desde há 5000 anos em solos argilosos onde a remoção de sais é muito difícil devido à presença de uma toalha freática permanente a pouca profundidade. Com clima árido (taxas elevadas de evaporação (1500-2400 mm/ano) e precipitação 5-200 mm/ano). Este mesmo autor concluiu que os drenos toupeira combinados com drenos colectores são uma forma auxiliar de drenagem em solos argilosos e salinos aumentando a profundidade do nível freático e a produtividade dos solos. Além disso têm um custo baixo de instalação e não necessitam de maquinaria avançada para a sua execução.

Mawgoud, 2003, observou que o fluxo limitado da água através do perfil de solos salinos e argilosos impede a remoção dos sais. Esta situação é agravada se a superfície freática for altamente salina. Este mesmo autor mostrou que a drenagem dos solos com valas abertas não é completamente eficaz para a obtenção de uma boa colheita. Mas a

combinação dos drenos toupeira com valas abertas promove o movimento da água através do perfil melhorando as produções. A recessão rápida da superfície freática a seguir à irrigação é realizado através das fissuras acima dos drenos, reflectindo-se no abaixamento da salinidade do solo na zona das raízes o que conduzindo à obtenção de óptimas produções.

Moukhtar (2003) refere que a dificuldade de eliminar os sais dos solos argilosos na presença de toalha freática salina permanente pode estar no tipo preferencial de fluxo da água que drena apenas através dos macroporos. Consequentemente melhorar a eficiência de lixiviação com a implementação de drenos toupeira perpendicularmente a drenos de tubo no solo seria uma solução possível. Este tipo de drenagem permite acelerar a descida da toalha até à profundidade dos drenos. Deste modo a salinidade e alcalinidade na zona das raízes poderá ser mantida a um teor favorável ao desenvolvimento das plantas. No entanto para a conservação do solo, em boas condições de drenagem, uma gestão da rega eficaz é essencial, para a obtenção de produções óptimas. A redução do intervalo de rega e o incremento da lixiviação são permitirá o abaixamento da superfície freática e a lavagem dos sais do solo. A ascensão capilar é reduzida; a salinização do perfil do solo e a degradação são prevenidas.

Também Abdel-Mawgoud (2003) estudou o efeito da drenagem toupeira na dessalinização do solo ao longo de 5 anos. Observou que a diminuição da salinidade do solo é lenta e gradual. A diminuição depende da salinidade inicial das camadas do perfil. O grau de redução é mais elevado até à profundidade 20 cm.

Auckenthaler *et al.*, 1991, estudaram os efeitos dos drenos toupeira na resposta à drenagem em solos argilosos e concluíram que as fendas no solo provocadas pela abertura dos drenos toupeira observavam-se mesmo após 5 anos. Concluíram também que o espaçamento de 2,5 m entre as galerias permitia evacuar a água infiltrada nas fissuras de forma eficaz.

2.3.3 - Qualidade da água drenagem

Hoje em dia, apresentam-se cada vez mais situações em que é preciso reutilizar na rega as águas de drenagem, o que implica um manejo mais cuidadoso da drenagem e da salinidade do solo.

Estudos desenvolvidos pelo Organismo de Protecção do Meio Ambiente nos Estados Unidos (US-EPA) sobre a qualidade da água permitiram declarar a agricultura como o

principal agente de contaminação, quer das águas subterrâneas quer superficiais. Nada menos que 72 por cento dos rios avaliados e 56 por cento da superfície dos lagos incluídos neste estudo acusaram o efeito contaminante da agricultura.

Também, desde os anos setenta, se tem vindo a observar na Europa uma preocupação crescente pelo aumento de resíduos de azoto, fósforo e pesticidas nas águas superficiais e subterrâneas. Uma comparação recente levada a cabo pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, PNUMA (1996), entre as fontes de contaminação de origem doméstica, industrial e agrícola na zona costeira dos países Mediterrâneos, levou a que o mesmo programa considere a agricultura como a principal fonte de compostos fosfatados e sedimentos na água.

Um estudo sobre a qualidade química da água de rega e da drenagem num solo Mediterrâneo subsolado permitiu verificar que a realização da fertirrega, adicionando à água de rega elevadas quantidades de nutrientes, constitui um risco elevado em termos ambientais, uma vez que os valores dos nitratos e dos fosfatos nas águas excedentes (run-off e percolação) são elevados e por isso com um potencial poluente extremamente forte. A concentração de cálcio também aumenta na água de drenagem, o que resulta da substituição do cálcio nos agregados do solo, facilitando assim a sua desagregação (Matias, 2002).

A perda do fósforo do solo na água de drenagem toupeira é geralmente muito mais baixa do que perdas de fósforo no escoamento. No entanto as concentrações e as perdas do fósforo na drenagem toupeira são mais elevadas do que em sistemas de drenagem com drenos de cerâmica. Um tempo maior de contacto entre subsolo e a água tende a remover mais fósforo dissolvido da água da drenagem do que em sistemas de drenagem da telha (Sharpley *et al.*, 1994 in Coale, 1999).

CAPÍTULO 3 – FORMULAÇÕES DE BASE

Para melhor compreensão dos fenómenos intervenientes nos balanços hídrico e de sais num meio poroso variavelmente saturado, como é o que acontece em sistemas de drenagem subterrânea, é apresentada neste capítulo a definição de um volume elementar de amostragem representativo das condições de drenagem (VER); para a zona vadosa é apresentada a equação de balanço de massa de um soluto e do balanço de massa de água.

3.1 - VOLUME ELEMENTAR DE CONTROLO

3.1.1 - Definição do volume elementar de controlo

Para uma exposição mais fácil dos processos intervenientes nos balanços hídrico e de sais, considere-se um volume elementar de controlo (VER), em que se admitem variações do teor de humidade em profundidade (Fig. 1).

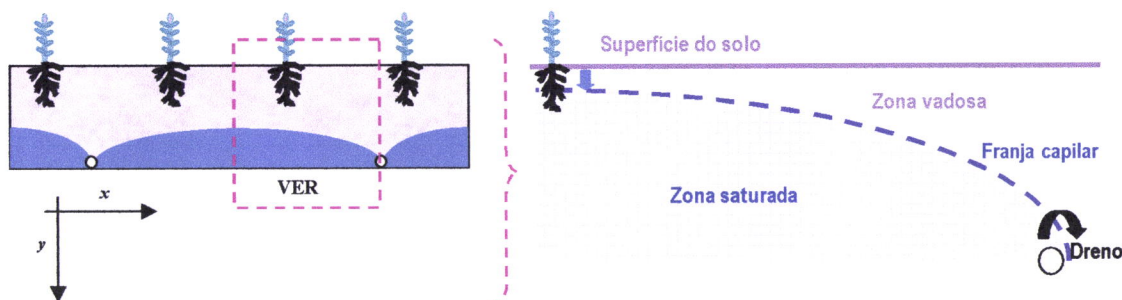


Figura 3 – Volume elementar de controlo

No VER consideram-se 2 parcelas que se diferenciam pelo teor em água: a *zona vadosa* e a *zona saturada*.

A *zona vadosa* divide-se em três regiões (Santos, 2002):

- o *solo* (definido pela espessura de terreno sujeito a evapotranspiração correspondente à profundidade das raízes). Nesta região movimento da água ocorre principalmente na forma de escoamento insaturado, causado por infiltração, percolação, redistribuição e evaporação ou pela acção das raízes das plantas (transpiração). Em alguns solos de baixa permeabilidade podem desenvolver-se superfícies freáticas suspensas devido a precipitações intensas e/ou percolação profunda de água durante condições de prologada aplicação à superfície do solo.
- a *zona vadosa intermédia* abaixo do solo e que ocorre em profundidade até à franja capilar;
- a *franja capilar* que progressivamente se confunde com a *zona saturada*.

Na *zona vadosa*, o movimento da água existe principalmente como escoamento insaturado. Devido à possibilidade de ocorrer evapotranspiração, o teor mínimo de água é dado pelo ponto de emurchecimento (*wp*). O teor máximo é dado pela porosidade deste meio.

Na *zona saturada*, o teor de água é o máximo possível, sendo dado pela porosidade do meio.

3.1.1.1 - Equação de balanço de massa

De acordo com a lei da conservação da massa, para um determinado intervalo de tempo, a quantidade de massa de uma determinada substância que entra no VER através das suas fronteiras é igual à que sai das suas fronteiras mais a variação de massa no inteiro menos a variação de massa que se perde no inteiro do VER. Esta lei pode ser traduzida pela equação do balanço de massa:

$$M_e - M_s = \Delta M_A \quad \text{Eq. 3.1}$$

sendo:

- M_e a entrada de massa da substância em balanço através das fronteiras do VER;
- M_s a saída de massa da substância em balanço através das fronteiras do VER;
- ΔM_A a variação do armazenamento de massa dessa substância no interior do VER;

3.1.1.2 - Definição dos termos relativos às entradas de massa no volume elementar de referência

O termo relativo às entradas de massa de uma determinada substância, M_e , pode traduzir-se através dos seguintes componentes:

$$M_e = M_{iw} + M_{wf} + M_v \quad \text{Eq. 3.2}$$

onde:

- M_{iw} é a massa de substância introduzida no VER pela água de rega;
- M_{wf} é a massa de substância dissolvida na água da zona saturada que entra no VER
- M_v é a massa de substância introduzida no VER com origem na adubação; meteorização das rochas; precipitação de sais insolúveis.

3.1.1.3 - Definição dos termos relativos às saídas de massa no volume elementar de referência

O termo relativo às saídas de massa de uma determinada substância, M_s , pode traduzir-se através dos seguintes componentes:

$$M_s = M_{ETR} + M_{ed} + M_{ad} + M_{Ac} \quad \text{Eq. 3.3}$$

onde

- M_{ETR} representa massa perdida de substância por evapotranspiração de água existente no solo; em condições em que o nível freático se encontra dentro do solo também se pode dar a evapotranspiração a partir da zona saturada;
- M_{ed} é a massa de substância dissolvida na água que sai do VER por escoamento directo superficial;
- M_{ad} a massa de substância dissolvida na água de drenagem;
- M_{ac} é a massa de substância que sai da zona saturada para as camadas superiores do VER.

3.1.1.4 - Definição dos termos relativos às variações de massa no volume elementar de referência

O termo ΔM_A é definido pela variação de massa armazenada devida (i) à variação do volume de água (ii) à variação da concentração de uma substância, por efeito de ocorrência de evaporação de água (soluto conservativo), com consequente enriquecimento da massa de substância:

$$\Delta M_A = \Delta M_{A_l} + \Delta M_{A_v} + \Delta M_{A_s} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Onde

- ΔM_{A_l} é a variação de massa de substância armazenada no *solo* (1) devida à variação do teor de humidade (θ) do solo, onde θ apresenta como valor máximo possível a porosidade total do solo; ou (2) devida ao enriquecimento da concentração da substância na água do solo provocada pela evaporação de água a partir do solo não acompanhada da evaporação da respectiva substância ou pela utilização selectiva pelas plantas que podem não utilizar alguns solutos.

- ΔM_{Av} é a variação de substância armazenada na zona vadosa abaixo do solo, que se pode dever (1) à variação do teor de humidade (θ), em que neste caso θ apresenta como valor mínimo possível a retenção específica do meio e como valor máximo possível a porosidade total do solo, ou (2) à variação da espessura da zona vadosa, uma vez que a fronteira desta com a zona saturada é variável no tempo (devido aos processos de recarga e de descarga).
- ΔM_{As} é a variação de substância armazenada na zona saturada.

3.1.1.5 - Equação do balanço de massa relativo às diversas componentes de um volume elementar de controlo

A equação de balanço hídrico de massa tomando em conta todas as componentes consideradas fica assim:

$$M_{iw} + M_{wf} + M_v - M_{ETR} - M_{ed} - M_{ad} = \Delta M_{Al} + \Delta M_{Av} + \Delta M_{As} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Normalmente, a análise de um soluto presente na água vem expressa em concentração de soluto por volume de solução (Oliveira, 2004). A massa de soluto é dada pelo produto da concentração de soluto pelo volume de água onde ele se encontra dissolvido:

$$M_K = C_K K \quad \text{Eq. 3.6}$$

onde C_K é a concentração (M/L^3) no volume do termo K (L^3/T). Esta igualdade dá-nos a indicação de que a variação de massa pode ser devida à variação de dois factores: a concentração de soluto ou o volume de água onde está dissolvido.

3.2 - EQUAÇÃO DE BALANÇO DA MASSA DE ÁGUA ou EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

Quando o balanço de massa se refere à massa da água, utiliza-se a designação mais simples de balanço hídrico.

Se se puder considerar que a massa específica da água (massa por volume unitário (M/L^3)) é igual para todos os termos considerados é conveniente dividir-se toda a expressão cujos termos são volumes (L^3/T):

$$iw + wf + v - ETR - ed - ad - \Delta A_l - \Delta A_v - \Delta A_s = 0 \quad \text{Eq. 3.7}$$

Os termos volumétricos também podem ser expressos em alturas de água (L/T) que se obtêm dividindo os volumes pela área horizontal utilizada para a elaboração do balanço.

3.3 OS CONCEITOS DE INFILTRÇÃO SUPERFICIAL E INFILTRAÇÃO PROFUNDA A PARTIR DA EQUAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

As expressões apresentadas nas secções anteriores reflectem as entradas e saídas de água do VER. A separar as duas regiões deste VER definem-se 3 processos, dos quais dois representam o fluxo descendente – infiltração superficial e infiltração profunda (I_p). O terceiro processo representa o fluxo ascendente (Ac) por capilaridade.

3.3.1 - Infiltração superficial

A infiltração superficial refere-se (I_s) a toda a água que em sentido descendente atravessa a fronteira entre a superfície do solo e solo propriamente dito. O balanço hídrico na fronteira entre a superfície do solo e o solo é dado por (Fig. 4):

$$I_s = ETR + \Delta A_l + \Delta A_v + \Delta A_s + Ac - iw - ed - ad \quad \text{Eq. 3.8}$$

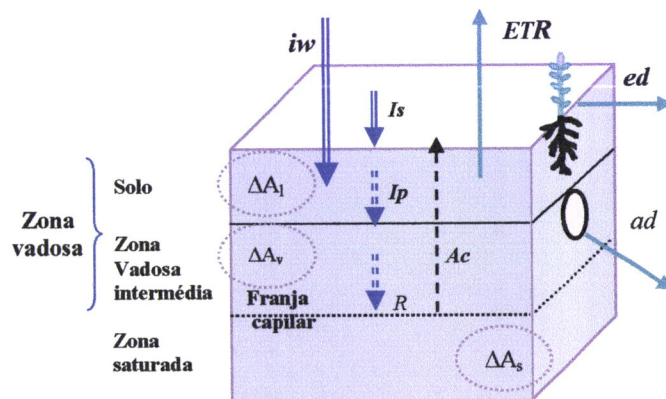


Figura 4 - Infiltração superficial tomando o volume de elemento de referência (VER) abaixo da fronteira da infiltração superficial

3.3.2 - Infiltração profunda

A infiltração profunda (I_p) é a quantidade de água que passa em sentido descendente para baixo da profundidade radical, de forma que não poderá ser evaporada ou utilizada pelas plantas para a transpiração. O balanço hídrico na fronteira entre o solo e a zona vadosa intermédia (Fig. 6) é equacionado da seguinte forma:

$$I_p = iw + Ac - ETR - ed - \Delta A_l \tag{Eq. 3.9}$$

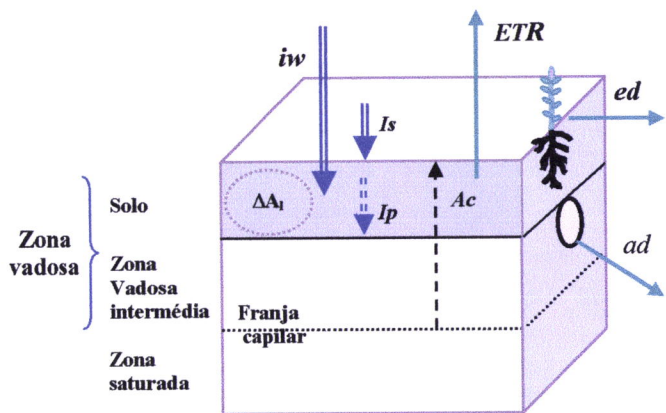


Figura 5 - Infiltração profunda tomando o volume de elementar de referência (VER) acima da fronteira da infiltração profunda

Fazendo o balanço hídrico abaixo do solo, obtém-se:

$$I_p = \Delta A_v + \Delta A_s + Ac - ad \tag{Eq. 3.10}$$

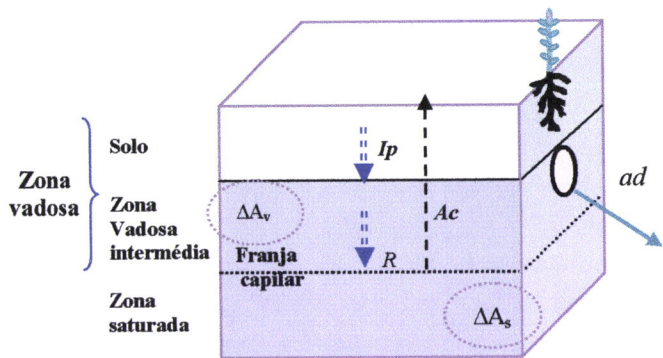


Figura 6 - Infiltração profunda tomando o volume de elementar de referência (VER) abaixo da fronteira da infiltração profunda

Numa situação em que o nível freático se encontre local ou temporariamente dentro do solo, não se define infiltração profunda.

3.3.3 – Recarga

A recarga refere-se à quantidade de água que atinge o topo da zona saturada. Pode definir a recarga a partir dos termos do balanço acima da fronteira (Fig. 7):

$$R = iw + Ac - ETR - Ed - \Delta A_l + \Delta A_v - ed - ad \quad \text{Eq. 3.11}$$

Ou, substituindo, a Eq. 3.9 na Eq. 3.11:

$$R = Ip - \Delta A_v - Ed - ad \quad \text{Eq. 3.12}$$

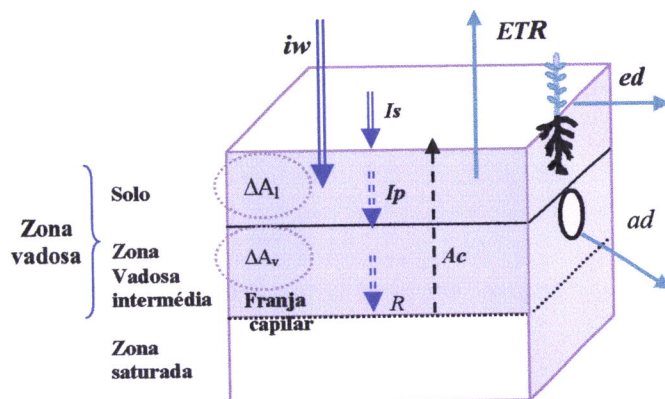


Figura 7 - Recarga tomando o volume de controlo acima da zona saturada

Para as situações em que temporariamente o nível freático se encontre acima da base do solo, os termos relativos à zona vadosa intermédia abaixo do solo anulam-se, mantendo-se os restantes. Nestas situações, ocorre evapotranspiração directamente a partir da zona saturada.

3.4 – OS CONCEITOS DE INFILTRAÇÃO SUPERFICIAL, INFILTRAÇÃO PROFUNDA E DE RECARGA DEFINIDOS A PARTIR DA EQUAÇÃO DE BALANÇO DE MASSA DE UM DETERMINADO COMPONENTE

3.4.1 – Infiltração superficial

A massa de soluto na infiltração superficial pode ser dada pela Eq. 3.13 onde C_{Is} representa a concentração do soluto na água de infiltração superficial(Fig.8):

$$M_{Is} = Is . C_{Is} = M_{ETR} + M_{ed} + M_{ad} + M_{Ac} + \Delta M_{Al} + \Delta M_{Av} + \Delta M_{As} - M_{iw}$$

Eq. 3.13

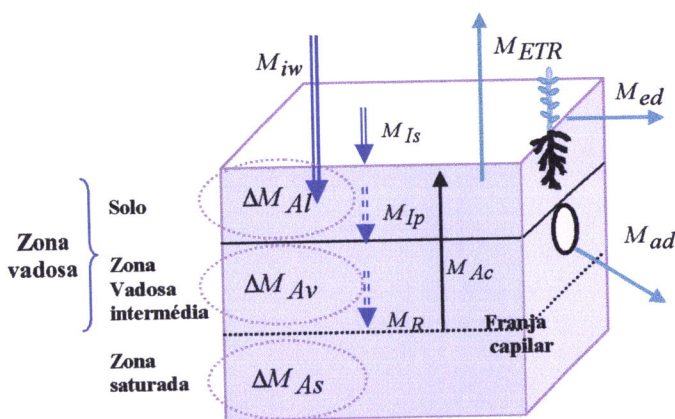


Figura 8 - Massa de soluto presente na infiltração superficial tomando o volume elementar abaixo da fronteira da infiltração superficial

3.4.2 – Infiltração profunda

A equação para a massa de soluto dissolvido na água de infiltração profunda (percolação) é dada por (Eq. 3.14, Fig. 9) onde C_{Ip} representa a concentração do soluto na água de infiltração profunda :

$$M_{Ip} = Ip . C_{Ip} = M_{ad} + M_{Ac} + \Delta M_{Al} + \Delta M_{Av} + \Delta M_{As} - M_{iw}$$

Eq. 3.14

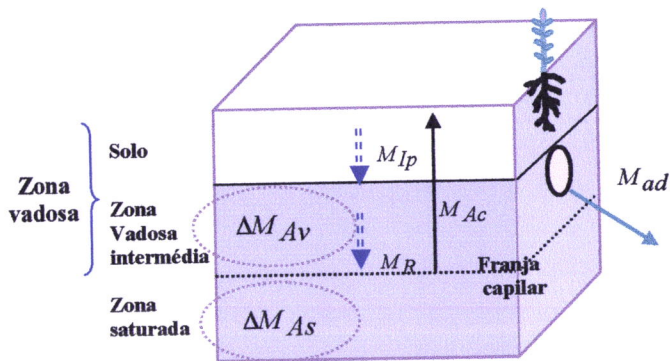


Figura 9 - Massa de soluto presente na água de infiltração profunda tomando o volume elemental abaixo da fronteira da infiltração profunda

3.4.3 – Recarga

A equação do balanço de massa é semelhante à equação do balanço hídrico, mas considerando a massa de soluto e onde C_R representa a concentração da substância no volume de recarga.

$$M_R = R \cdot C_R = M_{iw} + M_{Ac} - \Delta M_{Al} - \Delta M_{Av} - \Delta M_{As} - M_{ed} - M_{ad} \quad \text{Eq. 3.14}$$

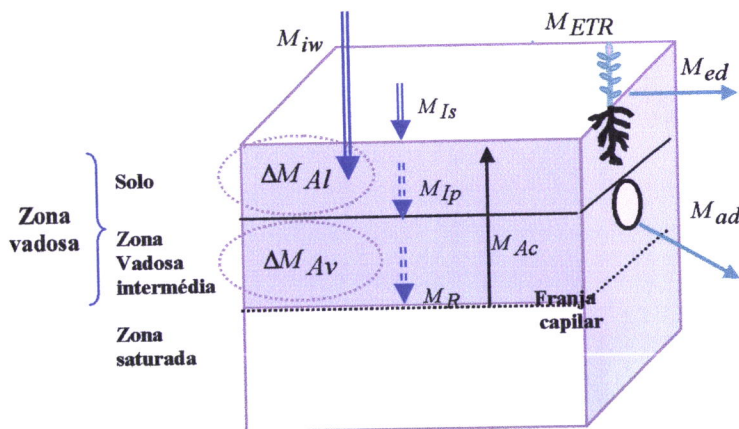


Figura 10 - Massa de soluto presente na água de recarga tomando o volume elemental acima da zona saturado

3.5- O ESCOAMENTO NA ZONA VADOSA

3.5.1 - Aproximação clássica para a descrição do movimento de água em solo não saturado

3.5.1.1 - Equação dinâmica ou de fluxo de água no estado líquido

O movimento da água no solo ocorre se houver um gradiente do potencial total da água entre dois pontos em questão. O potencial total da água resulta da soma dos potenciais gravitacional, de pressão e osmótico. Em solo não saturado, o potencial de pressão depende das forças de ligação da água à matriz do solo, que determina o potencial matricial, e da pressão do ar nos poros, que origina um potencial denominado de potencial de pressão externa. O potencial de pressão (h) denomina-se pressão efectiva quando é expresso em unidades de peso, ou seja expresso em altura de uma coluna de água equivalente:

$$h = h^* + h_a \quad \text{Eq.3.7}$$

onde h^* é a pressão efectiva matricial e é simétrica da pressão capilar, h_c ; h_a é a pressão efectiva do ar nos poros. Se considerarmos a pressão do ar nos poros, h_a , igual à atmosférica ($h_{atm} = 0$), o valor da pressão efectiva, h , virá igual à pressão matricial, h^* , ($h = h^*$). Esta é uma situação normal no âmbito agronómico. As excepções ocorrem principalmente nos processos de infiltração da água no solo, mas mesmo assim aqui este efeito é muitas vezes desprezado.

Em geral, o humedecimento e a secagem do solo ocorrem em simultâneo com o escoamento da água, tornando o teor de humidade e a pressão efectiva funções do tempo e do espaço. Esta situação define o escoamento em regime variável, que requer uma formulação matemática mais completa do que o escoamento em regime permanente. Para simplificação, admite-se normalmente que há apenas variação com a profundidade, onde o referencial espacial é constituído por um eixo vertical Oz cujo versor tem o sentido da aceleração da gravidade. A uma escala macroscópica, o escoamento da água no solo está relacionado com a secção transversal horizontal do solo, com a condição de satisfação do volume elementar representativo – VER. A taxa à qual a água atravessa a secção correspondente ao VER é denominada de fluxo, apresentando as dimensões de velocidade.

A principal equação que deriva desta aproximação macroscópica é a equação de Darcy, chamando-se por isso à escala para a qual esta aproximação é válida de escala Darciana. O fluxo de água numa direcção segundo o eixo z , $\bar{\varphi}_z$ (considerando a orientação o eixo z ascendente e positivo, a referência à superfície d do solo e recordando que o escoamento se produz na direcção de potenciais decrescentes), é a quantidade de água transferida por unidade de tempo através de uma unidade de área perpendicular à direcção oz e é dado pela seguinte expressão:

$$\varphi_z = -K(\theta) \frac{dH}{dz} \quad \text{Eq.3.8}$$

onde: H é a carga hidráulica que representa o potencial total da água do solo expresso em energia por unidade de peso, o equivalente em metros coluna de água; $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo em função do teor de humidade.

A equação de Darcy generalizada, aplicada a meios porosos não saturados baseia-se em dois pressupostos: i) os processos ocorrem em meio isotérmico e isosalino e a pressão do ar do solo é igual à pressão atmosférica e ii) a condutividade hidráulica do solo não saturado é função do teor de humidade e do potencial matricial. Para o escoamento vertical, a equação de Darcy generalizada é expressa por:

$$\varphi_z = -K_z(\theta) \frac{\delta H}{\delta z} = -K_z(\theta) \left(\frac{\delta h}{\delta z} - 1 \right) = -K_z(\theta) \frac{\delta h}{\delta z} + K_z(\theta) \quad \text{Eq.3.9}$$

onde: θ é o teor de humidade volúmico do solo; $K(\theta)$ condutividade hidráulica não saturada/função do teor de humidade volúmico; h é a pressão efectiva da água no solo; φ_z é a velocidade de Darcy para a água no estado líquido na direcção vertical; z é a profundidade.

A primeira parcela da equação (3.7) representa o fluxo devido ao gradiente e a segunda parcela o fluxo devido à gravidade (Santos, 1999).

3.5.1.3 - Equação da continuidade ou de conservação da massa

A equação da continuidade traduz o princípio da conservação da massa. Este princípio quando aplicado a um dado volume de solo traduz-se pela igualdade entre a quantidade de massa de água que entra e que sai durante um intervalo de tempo, e a variação da massa de

água nesse volume de solo durante o mesmo intervalo de tempo. Segundo a orientação o \vec{z} a equação da continuidade para solos saturados e não saturados escreve-se do seguinte modo:

$$\frac{\delta \theta}{\delta t} = - \frac{\delta \varphi_z}{\delta z} - S \quad \text{Eq.3.10}$$

onde S é um termo geral que poderá ser negativo se corresponder à extracção de água pelas raízes, por exemplo, e positivo se for uma adição de água num ponto do interior do solo, designando-se por sumidouro ou fonte, respectivamente; θ é o teor de humidade volúmico do solo (L³ L⁻³); t é o tempo (T); φ_z a velocidade de Darcy para a água no estado líquido (L T⁻¹); e z a profundidade (L).

A equação da conservação da massa relaciona a variação temporal de θ (teor de humidade volúmico do solo), com a variação de φ_w (velocidade de Darcy para a água no estado líquido) num espaço tridimensional elementar de solo. Considerando um sistema monodimensional, isotérmico, isosalino e com pressão relativa igual a zero, e considerado do ponto de vista macroscópico ou à escala Darciana, a conservação da massa da fase líquida é escrita como:

$$\frac{\delta}{\delta t} (\rho_w \theta + \rho_v \theta_a) = \frac{\delta}{\delta z} (\rho_w \varphi_z + \rho_v \rho_a + \rho_v) - \rho_w S \quad \text{Eq.3.11}$$

sendo t o tempo (T); ρ_w a massa volúmica da água no estado líquido (ML⁻³); ρ_v a concentração de vapor de água no ar (ML⁻³); θ_a a porosidade preenchida com ar no solo (L L⁻³); φ_z a velocidade de Darcy para a água no estado líquido (LT⁻¹); ρ_a a velocidade de Darcy para o ar (LT⁻¹); $\rho_w \varphi_z$ o fluxo de massa no estado líquido (ML⁻²T⁻¹); $\rho_v \rho_a$ o fluxo de massa por convecção, de água no estado de vapor; ρ_v o fluxo de massa por difusão, de água no estado de vapor; e $\rho_w S$ o fluxo de massa de absorção de água pelas raízes (MLT⁻¹).

3.5.1.4 - Equação geral do escoamento

A equação (3.10) relaciona fluxos de água, variações de massa e fontes e sumidouros de água. Quando combinada com a equação (3.8) obtém-se a equação de Richards, que permite calcular o teor de humidade ou a pressão efectiva no solo durante o escoamento em regime variável.

Se forem ignorados o armazenamento e o escoamento de água na fase gasosa e não existir absorção radical, a equação de Richards para escoamentos verticais escreve-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad \text{Eq.3.12}$$

a qual modela a variação temporal do teor em água em solos insaturados sujeitos a regime variável e onde $K(h)$ é a relação condutividade hidráulica não saturada/pressão efectiva da água.

A Eq. 3.12 expressa em função da pressão efectiva, toma a forma:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad \text{Eq.3.13}$$

onde $C(h)$ é a capacidade capilar do solo, que representa a derivada da relação $\theta(h)$ e traduz a capacidade de um solo ceder ou armazenar água sob o efeito de uma variação de pressão.

A Eq.3.13 tem a vantagem de descrever o comportamento hidrodinâmico das zonas saturadas e não saturadas. A sua resolução fornece o campo de pressões no domínio de aplicação para cada instante.

3.5.1.5 - Quantificação dos processos de escoamento em solo não saturado. Obtenção das relações $h = h(\theta)$ e $K = K(h)$

O conhecimento das relações pressão efectiva e condutividade hidráulica com o teor de água do solo, $h(\theta)$ e $K(\theta)$, torna-se obrigatória sempre que se deseje modular o movimento da água e de solutos através do perfil do solo.

Existem vários métodos para o cálculo destas curvas, como por exemplo os de Brooks e Corey (1964) ou van Genuchten (1980).

No caso do modelo de van Genuchten, que será utilizada posteriormente nos cálculos, as curvas de retenção da água no solo $\theta(h)$ e a curva da condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$ são dadas pelas equações 3.14 e 3.15 respectivamente

$$K(h) = K_s \frac{((1+(\alpha h)^n)^{1-1/n} - (\alpha h)^{n-1})^2}{(1+(\alpha h)^n)^{(1-1/n)(\ell+2)}} \quad \text{Eq. 3.14}$$

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-(1-1/n)} \quad \text{Eq. 3.15}$$

em que θ é o teor de água ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), h é a pressão efectiva (cm de água), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e na saturação, $K(h)$ é a condutividade hidráulica em solo insaturado (cm dia⁻¹), K_s é a condutividade hidráulica no solo saturado (cm dia⁻¹) e α , n e ℓ são parâmetros de ajustamento que definem a forma das curvas.

3.6 QUANTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO BALANÇO HÍDRICO

3.6.1 – Meio solo

3.6.1.1 – Precipitação

Nesta presente a precipitação é considerada como um dado de entrada que já existe disponível.

3.6.1.2 – Variação do armazenamento de água no solo

A variação do armazenamento corresponde à diferença entre o volume armazenado no final e no início do período de tempo considerado. Ou seja, importa caracterizar qual a diferença entre a água que foi adicionada e a que foi removida do armazenamento no período considerado. O armazenamento de água no solo pode ser calculado através da determinação de água no solo, utilizando processos gravimétricos (pesagem de amostras de solo recolhidas a diferentes profundidades, secagem e nova pesagem) ou pela determinação indirecta do teor volumétrico de água com sondas TDR (*Time Domain Reflectometry*), através dos tubos de PVC instalados em profundidade (Santos, 1999).

Alternativamente a variação do armazenamento de água no solo pode ser estimado utilizando o balanço hídrico.

Considerando que o nível freático se encontra sempre abaixo da base do *solo* a variação do armazenamento de água no *solo* pode ser determinado utilizando o balanço hídrico. Os factores que entram no balanço estão representados na Eq. 3.15 e na Fig. 11:

$$\Delta A_l = A_l \text{ fim} - A_l \text{ inicio} = (I_s + i_w) - (I_p + ad + ed + ETR) \quad \text{Eq. 3.15}$$

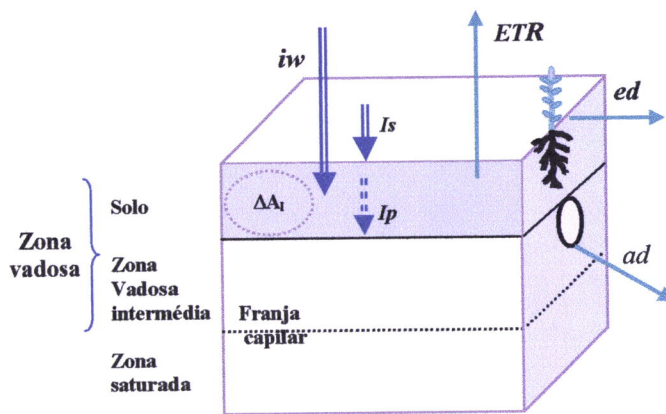


Figura 11 – Balanço hídrico da camada de solo considerando que o nível freático se encontra sempre abaixo da base do solo

Os principais factores que podem fazer diminuir o armazenamento de água no solo são a evapotranspiração, a infiltração superficial e o escoamento.

Para a aplicação da Eq. 3.15, é necessário conhecer o valor da quantidade máxima de água no solo disponível para evapotranspiração, capacidade utilizável do solo (*TAW*, do inglês *Total Available Water*) :

$$TAW = (c_c - p_e) \cdot r_p \quad \text{Eq. 3.16}$$

onde c_c é a capacidade de campo do solo, p_e é o ponto de emurchecimento e r_p é a profundidade do solo sujeita a evapotranspiração (profundidade das raízes das plantas). *TAW* é a quantidade de água que uma cultura consegue extrair da zona da raiz e a sua magnitude depende do tipo de solo e do comprimento das raízes (Santos, 1999).

A capacidade de campo (c_c) refere-se à capacidade que um solo tem para reter água, disponível para as plantas. Depois de uma precipitação ou irrigação, a água do solo irá

escoar até que o teor de humidade do solo retome valores abaixo da capacidade de campo. Na ausência de fornecimento de água ao solo, a humidade, na zona da raíz, diminuiu como resultado da extracção de água pelas raízes. Eventualmente, um valor de humidade é alcançado onde as raízes das plantas não conseguem retirar mais água do solo. A esse valor de humidade é chamado coeficiente de emurchecimento (p_e). Assim, coeficiente de emurchecimento (p_e), é o teor de humidade do solo abaixo do qual as plantas não podem realizar a absorção radical. Só quando a quantidade de água no solo se encontra acima da c_c é que se produz infiltração profunda (I_p), coexistindo neste caso os processos de ETR e I_p . Abaixo da capacidade de campo a água fica retida por forças de capilaridade.

A água armazenada no solo quando o teor de humidade corresponde à capacidade de campo (A_{cc}) é dada por:

$$A_{c_c} = c_c \cdot r_p \quad \text{Eq. 3.17}$$

A água (A_{p_e}) armazenada no solo quando o teor de humidade corresponde ao coeficiente de emurchecimento p_e é dado por :

$$A_{p_e} = p_e \cdot r_p \quad \text{Eq. 3.18}$$

3.6.1.2.1 - Determinação da capacidade de campo e do coeficiente de emurchecimento

É possível estimar c_c e p_e em laboratório, considerando para tal que c_c corresponde ao volume de água retido por uma amostra de solo quando sujeita a uma tensão de sucção cerca de 0,1 bar (aprox. pF 2) e que p_e corresponde ao teor de humidade medido em amostras de solo submetidas a uma sucção de 15 bar (aprox. pF 4,2).

A capacidade de campo de um solo pode ser estimada mediante a equação:

$$c_c = \sum [(pF\ 2) * esp_i] / \sum esp_i \quad \text{Eq. 3.19}$$

onde o somatório se desenvolve de 1 ao número de horizontes presentes no solo e esp_i se refere à espessura do horizonte em questão.

O ponto de emurchecimento (p_e) calcula-se através da seguinte equação:

$$p_e = \sum (pF\ 4,2_i * esp_i) / \sum esp_i \quad \text{Eq. 3.20}$$

3.6.1.3 – Infiltração superficial

A infiltração superficial pode ser estimada utilizando infiltrómetros de tensão. O infiltrómetro de tensão permite avaliar no campo a infiltração superficial para tensões bem controladas.

3.6.1.4 – Escorrimento

Pretende-se quantificar o escoamento da parcela experimental. O escoamento pode ser medido à saída da parcela ou em áreas definidas por anéis de escoamento. Estas medições representam toda a água que se escoia à superfície do solo, sem que se tenha infiltrado no solo.

Este escoamento directo pode gerar-se (1) quer porque a quantidade de água disponível para a infiltração superficial é superior à capacidade de infiltração do solo, (2) quer porque a zona saturada se encontra à superfície não sendo possível que entre mais água no solo.

O escoamento pode ser calculado directamente do balanço hídrico, uma vez quantificados todos os outros termos da equação, tal como apresentado nas secções anteriores.

3.6.1.5 – Cálculo da evapotranspiração potencial cultural

A passagem da evapotranspiração de referência (ET_o) para a evapotranspiração potencial de um determinado coberto vegetal (ET_c) faz-se pela aplicação de um coeficiente cultural (K_c):

$$ET_c = ET_o \cdot K_c$$

Eq. 3.21

De acordo com a Eq. 3.21, a relação entre a evapotranspiração potencial e de referência é dada pelo factor K_c . O valor de K_c varia em função do coberto vegetal e do seu período de desenvolvimento (Allen et al., 1998).

Este coeficiente cultural comporta as diferenças físicas e fisiológicas entre o coberto vegetal e a superfície de referência, pelo que o seu valor pode variar ao longo do tempo (em dependência do período vegetativo) (ANEXO 1).

Podem-se considerar quatro períodos distintos de desenvolvimento de uma cultura: (1) inicial (até 10 % de cobertura), (2) desenvolvimento da cultura (até a cobertura ser total), (3) meia estação (até ao início da maturidade), e (4) final de estação (até ao corte das culturas ou completo envelhecimento). Allen *et al.*, 1998 apresentam uma tabela com os valores indicativos para a duração dos estádios de desenvolvimento dos cobertos vegetais bem como os valores típicos de $K_{c\text{ inicial}}$, $K_{c\text{ médio}}$ e $K_{c\text{ final}}$.

3.6.1.6 - Cálculo da evapotranspiração real

Num solo cujo teor em água se encontra entre a capacidade de campo e um determinado teor de humidade inferior à capacidade de campo, a planta é capaz de retirar água do solo de acordo com a sua evapotranspiração potencial. Abaixo desse valor de humidade limite, a planta não é capaz de retirar a totalidade da água necessária para satisfazer a evapotranspiração potencial, pelo que a evapotranspiração real será inferior à potencial.

Assim, a evapotranspiração real é dada pela Eq. 3.22:

$$ETR = K_a \cdot ET_o \quad \text{Eq. 3.22}$$

onde K_a é o coeficiente de *stress* hídrico, função da água armazenada no *solo*: assume o valor unitário entre A_{c_c} e um valor de armazenamento limite, e assume valores inferiores a 1 abaixo desse valor de armazenamento limite. Esta equação dá resultados razoáveis em situações onde a evaporação do solo não é uma fracção importante da evapotranspiração (Allen *et al.*, 1998).

O armazenamento do solo limite (A_{lim}) é dado por:

$$A_{lim} = A_{c_c} - p \cdot (A_{c_c} - A_{p_e}) \quad \text{Eq. 3.23}$$

onde p é um parâmetro que varia entre 0 e 1 e que depende do tipo de cobertura do solo. Os valores de p encontram-se caracterizados em Allen *et al.*, 1998.

3.6.1.7 - Escoamento lateral de entrada

Nesta situação de cálculo do balanço hídrico, não se considera o escoamento lateral de entrada, considerando-se antes que este apresenta um valor desprezável relativamente à

componente vertical. Este aspecto justifica-se principalmente quando o VER apresenta uma área horizontal muito superior à espessura.

3.6.1.8 - Infiltração profunda

A infiltração profunda (I_p) designa a quantidade de água que atravessa, em sentido descendente, a base do solo podendo ser calculada por balanço hídrico ou por equações de escoamento em meio não saturado (Secção 3.5).

Para o cálculo da infiltração profunda através das equações de escoamento em meio não saturado é necessário quantificar para o tempo considerado, o teor de água no solo, a condutividade hidráulica e o potencial hidráulico na fronteira da base do solo.

Pode-se também determinar a infiltração profunda resolvendo a equação do balanço hídrico do solo Eq.3.15 em ordem a I_p :

$$I_p = I_s + i_w - ad - ed - ETR - \Delta A_l \tag{Eq. 3.24}$$

3.6.2 - Meio zona vadosa intermédia

3.6.2.1 Variação do armazenamento de água na zona vadosa abaixo do solo

A zona vadosa só se pode definir no caso de o nível freático se encontrar abaixo da base do *solo*. A equação do balanço hídrico da zona vadosa resolvida em relação à variação do armazenamento é dada pela Eq. 3.25 e Fig. 12:

$$\Delta A_v = A_v \text{ fim} - A_v \text{ início} = I_p - R - ad \tag{Eq. 3.25}$$

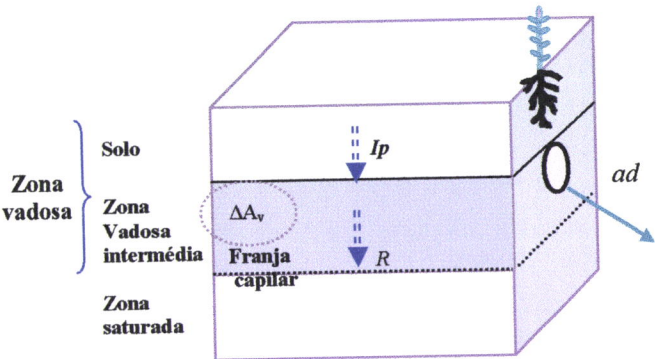


Figura 12 – Balanço hídrico da zona vadosa intermédia

A variação do armazenamento nesta zona pode também ser modelada pelas equações de escoamento em meio não saturado (Secção 3.5).

3.7 - POSIÇÃO DO NÍVEL FREÁTICO

3.7.1 - Nível freático abaixo do solo

A posição do nível freático condiciona o modelo utilizado para o cálculo do balanço hídrico. Para o caso do nível freático se encontrar abaixo do solo (Fig. 13), pode utilizar-se um modelo de balanço hídrico ao nível do *solo*:

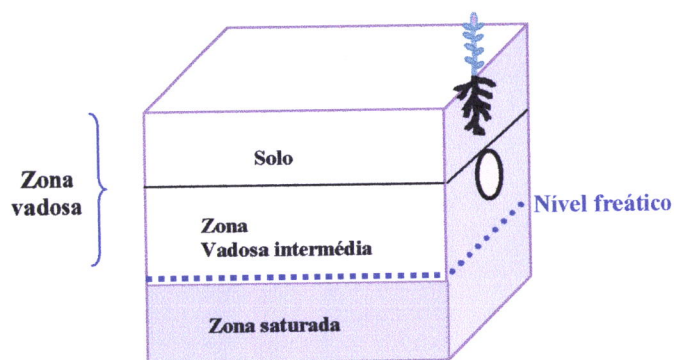


Figura 13 – Posição do nível freático abaixo do solo

No caso em que o nível freático se encontra entre a superfície e a base do solo a saída de água da zona saturada pode fazer-se pelo escoamento lateral no solo, ou por evapotranspiração, pelo que o modelo de balanço hídrico deverá contemplar a posição do nível freático no *solo* (Fig. 14):

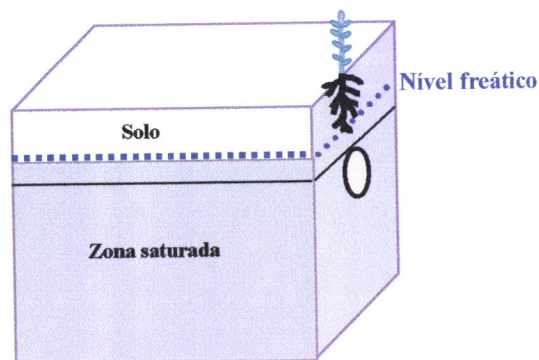


Figura 14 – Posição do nível freático quando se encontra entre a superfície e a base do solo

Ao longo do tempo podem ter-se estas duas situações pelo que é necessário definir o intervalo de tempo para cada uma destas situações.

3.8 - BALANÇO DE MASSA

3.8.1 - Determinação da concentração de soluto

3.8.1.1 – Determinação da massa de soluto na água de escoamento

A massa de soluto que sai por escoamento é calculada mediante a expressão:

$$M_{ed} = \sum_{i=1}^n \{ed(i) \cdot C_{ed(i)} \cdot t(i)\} \quad \text{Eq. 3.26}$$

Nalgumas situações pode ocorrer que o escoamento seja muito pequeno, ou mesmo nulo, devido a: ou a área ser plana e/ou as dotações reduzidas.

3.8.1.2 – Determinação da massa de soluto na água de rega

Neste caso é necessário conhecer o volume de água de rega aplicado durante o intervalo de tempo em análise e a respectiva concentração de soluto ao longo do tempo. A massa de soluto total pode ser dada por:

$$M_{iw} = \sum_{i=1}^n \{w(i) \cdot C_{iw(i)} \cdot t(i)\} \quad \text{Eq. 3.27}$$

Sendo $i = 1$ até n os períodos para os quais se quantifica o volume de água de rega e $C_{iw(i)}$ é a concentração de soluto nessa água determinada para o período i , de duração $t(i)$.

3.8.1.2 – Determinação da massa de soluto na água de drenagem

Neste caso também é necessário conhecer o volume de água de drenagem durante o intervalo de tempo em análise e a respectiva concentração de soluto ao longo do tempo. A massa de soluto total pode ser dada por:

$$M_{ad} = \sum_{i=1}^n \{ad(i) \cdot C_{ad(i)} \cdot t(i)\} \quad \text{Eq. 3.28}$$

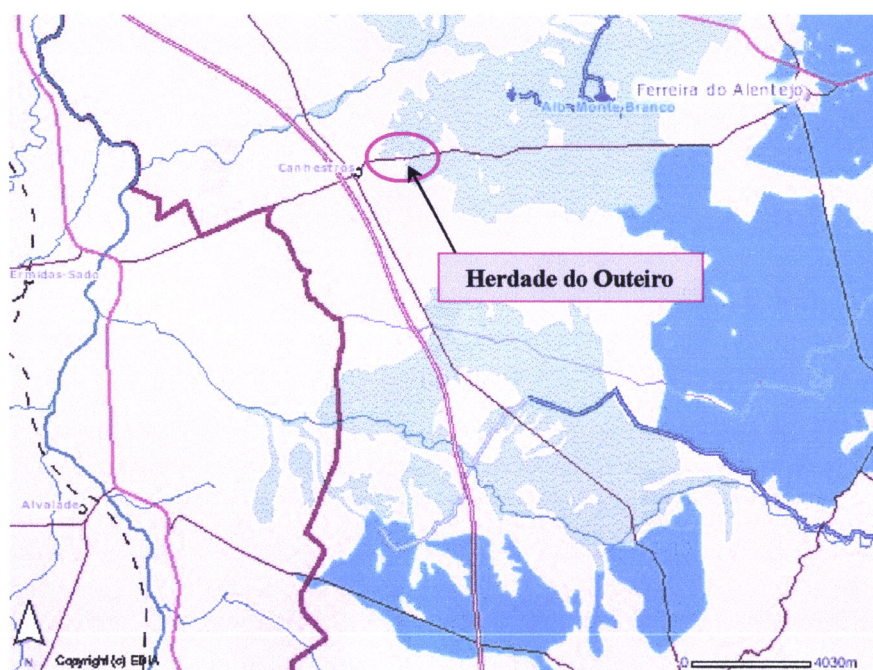
Sendo $i = 1$ até n os períodos para os quais se quantifica o volume de água de rega e $C_{ad(i)}$ é a concentração de soluto nessa água determinada para o período i , de duração $t(i)$.

CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - DELINEAMENTO DO ESQUEMA EXPERIMENTAL INSTALADO NO CAMPO DE ENSAIOS

4.1.1 - Localização e caracterização da parcela experimental

Os ensaios de campo decorreram na Herdade Experimental do Outeiro pertencente à Universidade de Évora, freguesia de Canhestros, em Ferreira do Alentejo, no Distrito de Beja, a qual se encontra inserida na área da Infra-estrutura 12, no perímetro de rega de Alqueva, (Figura 15).



Fonte: Projecto POCI/AGR/57719/2004 (coordenado pelo LNEC)

Figura 15 – Localização da Herdade do Outeiro na Infraestrutura 12 do Perímetro de Rega de Alqueva

Localizada na margem direita da Ribeira de Canhestros e a jusante da mesma (Figura 16), a parcela experimental reúne as condições básicas para uma apreciação evolutiva da salinização de um solo de Barro regado com água de má qualidade, e que são:

Características pedológicas - Barro Preto Calcário pouco descarboxado de rochas eruptivas ou cristalofílicas básicas ou de grés argilosos calcários ou margas (Cp);

Disponibilização de água de rega do Açude da Ribeira de Canhestros – Para além da

existência de sais de origem geológica, na ribeira são descarregados efluentes domésticos, industriais e agrícolas, que influenciam a qualidade da água, condicionando o próprio uso, permitindo encarar a problemática da salinização dos solos de uma forma directa, tornando possível conhecer o comportamento dos solos de Barro (com drenagem interna deficiente) no seu processo de salinização e avaliar o desempenho da subsolagem e drenos toupeira na melhoria das condições de circulação de água e de sais no perfil do solo; Disponibilização de equipamento de rega por aspersão - barra porta-aspersores e canhão móvel; Aspectos culturais – Todos os trabalhos de organização da parcela onde decorrem os ensaios experimentais – preparação do solo e sementeira – são executados pelo agricultor (de acordo com as práticas de cultivo adoptadas na região).

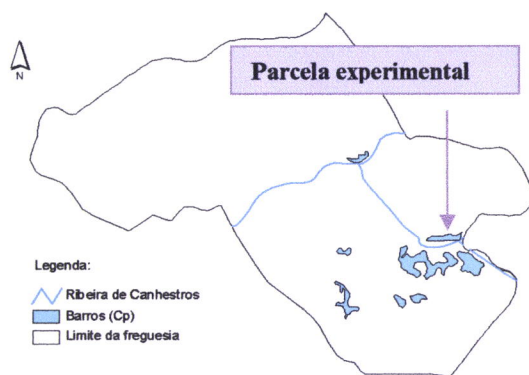


Figura 16 – Manchas de solo Cp na área de estudo

4.1.2 – Caracterização geral do solo

4.1.2.1 – Complexo de troca e textura

Foram instalados talhões experimentais de drenagem subsuperficial e superficial numa parcela com cerca de 9720 m², regada por aspersão, em solo descrito como Barro Preto Calcário pouco descarbonatado de rochas eruptivas ou cristalofílicas básicas ou de grés argilosos calcários ou margas (Cp), o qual foi classificado a partir de um estudo realizado por Teles Grilo (2002). São solos evoluídos de perfil Ap, B1, B2, C1, C2 e 2C, em que o horizonte A, com espessura de 15 - 20 cm, é de textura franco-argilosa com cerca de 39% de argila (Quadro 1). O horizonte B, com textura argilosa, apresenta no horizonte

B1 um teor em argila de 48%, enquanto no horizonte B2 a argila ultrapassa os 50%, o que pode originar problemas de drenagem interna.

No Quadro 2 são apresentados os valores analíticos que caracterizam o solo da parcela experimental obtido a partir de um estudo realizado por Teles Grilo (2002).

Quadro 1- Características físicas de amostras de solo colhidas a diferentes profundidades na parcela experimental do Outeiro

Camadas	Profundidade (cm)	Granulometria (%)				Classificação Textural	Densidade aparente
		Areia grossa	Areia fina	Limo	Argila		
Ap	0-20	25,75	15,73	20,06	38,46	Franco-argiloso	1,50
B1	20-50	22,55	14,39	14,66	48,41	Argiloso	1,65
B2	50-70	21,58	10,57	15,54	52,31	Argiloso	1,72
C1	70-100	27,14	8,67	14,92	49,27	Argiloso	
C2	100-135	30,63	11,03	19,05	39,29	Franco-Argiloso	
	135-160	20,40	43,41	9,79	26,40	Franco-Argilo-Arenoso	
2C	160-190	55,04	10,25	5,95	28,76	Franco-Argilo-Arenoso	
	190+	82,56	2,90	1,50	13,04	Arenoso-franco	

Fonte: Informação pessoal do Eng. Teles Grilo

Quadro 2 - Caracterização do complexo de troca do solo da parcela experimental

Parâmetros	Profundidade (cm)							
	0-20	20 - 50	50 - 70	70 – 100	100 – 135	135-160	160-190	190 +
Fósforo (P2O5) (ppm)	151,00	12,00	-	3,00	27,00	5,00	17,00	5,00
Azoto (NO3) (ppm)	26,00	8,00	6,00	13,00	7,50	3,50	0,50	-
Potássio (K2O) (ppm)	186,00	80,00	84,00	76,00	78,00	70,00	66,00	60,00
Matéria orgânica (%)	1,50	0,80	0,70	0,40	0,40	0,30	0,30	0,30
PH (H2O)	7,90	7,91	8,37	8,53	8,58	8,69	8,16	8,16
Cálcio (Ca) (meq/100g)	14,94	18,25	16,75	18,60	22,43	19,35	8,33	5,21
Magnésio (Mg) (meq/100g)	6,67	6,25	7,08	7,25	6,50	2,85	4,48	3,02
Sódio (Na) (meq/100g)	0,88	0,89	1,28	1,20	0,91	0,70	1,26	0,92
Potássio (troca) (meq/100g)	0,47	0,21	0,23	0,20	0,11	0,18	0,16	0,13
C.T.C. (meq/100g)	25,20	28,50	27,80	27,30	30,00	23,10	17,60	16,20
Azoto Total (%)	0,01	0,05	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	0,03

Fonte: Informação pessoal do Eng. Teles Grilo

4.1.2.2 – Curvas características da água no solo $\theta(h)$

Na Figura 17 apresentam-se as curvas características de água no solo de amostras de solo obtidas a 15, 30, 45, 60 e 75 cm, antes da instalação do ensaio experimental.

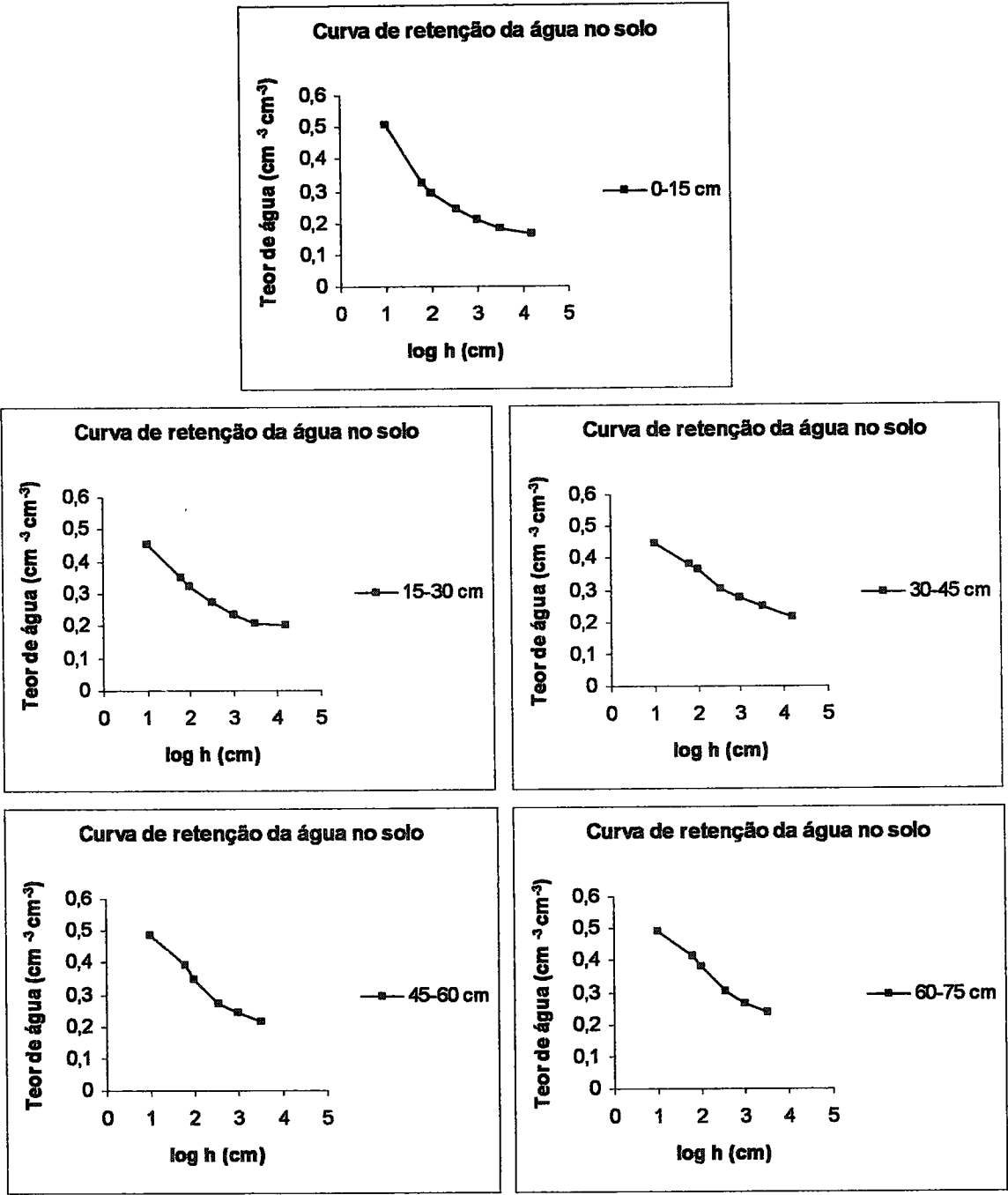


Figura 17 – Curvas de retenção de água no solo

4.1.2.3 - Capacidade de campo e coeficiente de emurchecimento

Paralta *et al.*, 2001, num estudo sobre a avaliação da recarga dos sistema aquífero dos gabros de Beja, indica para um solo de Barro Cp cultivado com trigo, valores de 41,5% e 20,4% para c_c e c_e respectivamente, e uma capacidade utilizável do solo de 105 a 127 mm para uma profundidade das raízes de 500 a 600 mm. Também Ramos (2003) em trabalhos desenvolvidos na avaliação das propriedades hidráulicas de alguns solos regáveis do Alentejo, nomeadamente da Herdade do Outeiro (Canhestros) encontrou para um solo Cp, coberto com milho, a capacidade utilizável do solo a várias profundidades expressa em percentagem do volume aparente do solo e calculada a partir de amostras não perturbadas. Para a camada superficial (0-24 cm), o valor foi de apenas $0.0887 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (8.87%), correspondendo uma água utilizável de cerca de 21 mm. Na camada seguinte (24-50 cm) a capacidade utilizável do solo diminui ligeiramente para $0.0740 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (7.4%), correspondendo a uma água utilizável de cerca de 19 mm. Em material perturbado, as determinações efectuadas indicaram valores muito superiores da capacidade de água utilizável, variando entre os $0.255 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (25,5%) e os $0.254 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (25.4%), para os horizontes de 0-24 e 24-50 cm; a água utilizável corresponde a 61 e 66 mm, para os mesmos horizontes, o que implica uma água utilizável de cerca de 130 mm na espessura de 0-50 cm, que é cerca de 3 vezes o valor avaliado pelas amostras não perturbadas.

4.1.3 – Modalidades

Foram estabelecidas *três modalidades* na parcela, correspondendo a cada modalidade o respectivo talhão de ensaio (81 m x 40 m):

Ensaio A – Sistema de “drenagem combinada”

Modalidade Testemunha (Mod. 1)

Modalidade Subsolagem (Mod. 2)

Modalidade Toupeira (Mod. 3)

Ensaio B – Drenos toupeira, sem sistema de “drenagem combinada” (Mod. 4)

A Figura 16 representa uma carta topográfica da parcela onde decorreu o trabalho experimental com o esquema do ensaio. Nesta parcela os declives transversais máximos observados atingiram valores que variam de 3 % a 7%.

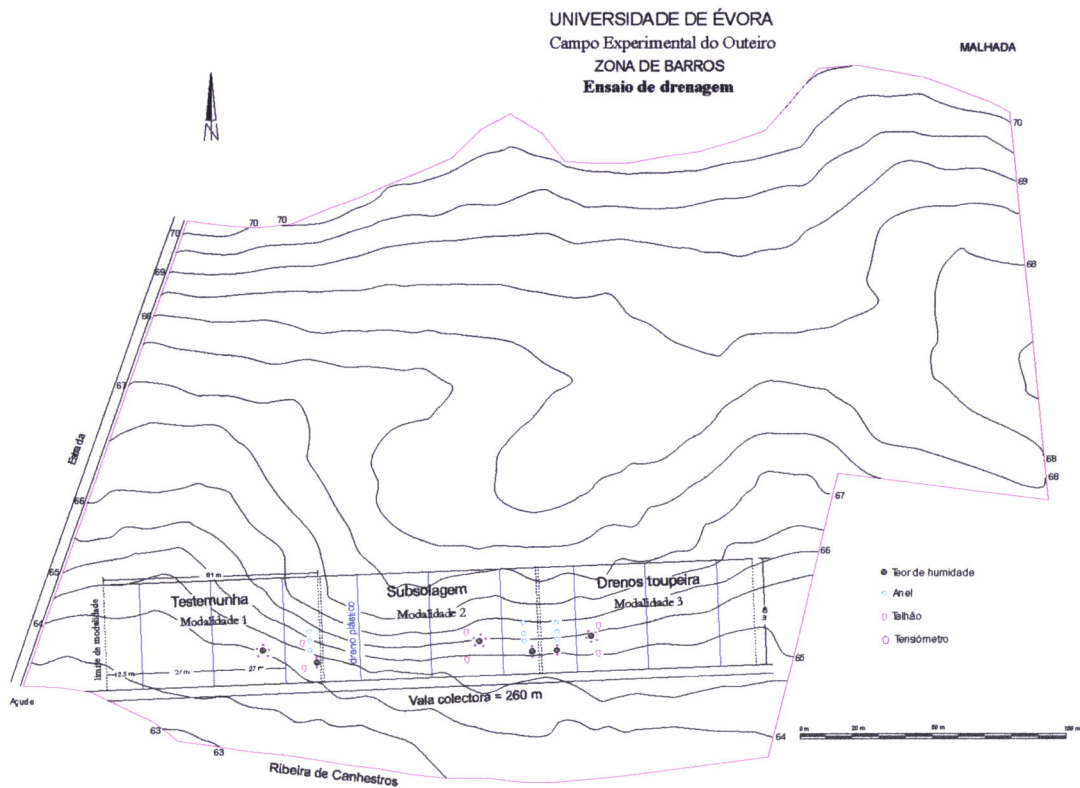


Figura 18 - Esquema da parcela experimental

4.1.4 - Ensaio A - Sistema de “drenagem combinada”

Foi definida uma área útil de ensaio (Figura 16), com cerca de 1 ha, a qual foi dividida em 3 talhões com 81 x 40 metros, onde se instalaram conjuntamente com um sistema de “drenagem combinada” as diferentes modalidades do ensaio: modalidade testemunha, **Mod. 1**, não foi feita mobilização profunda; Modalidade subsolagem, **Mod. 2**, foi efectuada uma operação de mobilização profunda com recurso ao subsolador vibrador. A operação foi efectuada em itinerários paralelos de 1,5 m e a uma profundidade de 70 cm (Figura 17); Modalidade toupeira, **Mod. 3**, foi efectuada uma mobilização com recurso a um dispositivo “toupeira”, moldando falsos drenos também a 70 cm de profundidade e em itinerários paralelos de 1,5 m (Figura 18). Na Figura 16 apresentam-se os limites das modalidades em que se considerou dividida a parcela experimental.



Figura 19– Aspecto da superfície do solo após a passagem do subsolador

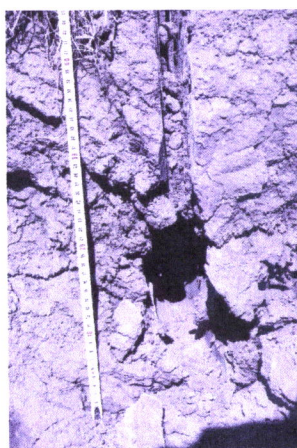


Figura 20 – Perfil do solo mostrando um dreno toupeira e o fendilhamento associado

4.1.5 - Sistema de “drenagem combinada”

O sistema de “drenagem combinada” é composto por drenos em tubo de plástico perfurados, de 6 cm de diâmetro, colocados a 90 cm de profundidade, espaçados de 27 m e assentes directamente sob o horizonte C e cobertos com um filtro de gravilha de 30 cm de espessura, abrindo numa vala colectora de drenagem, em combinação com operações de subsolagem e abertura de drenos toupeira, feitas perpendicularmente aos drenos de tubos, de modo a interceptarem o filtro de gravilha, permitindo a descarga da água que transportam, a qual é recolhida facilmente pelo tubo perfurado e descarregada na vala colectora. A fragmentação do horizonte B e a indução de fissuras provocadas pelo ferro do subsolador terá um papel fundamental no aumento da infiltração da água no perfil, facilitando a lixiviação de sais do solo. Este sistema de “drenagem combinada” é

particularmente indicado em solos argilosos muito compactos, nos quais a instalação de redes simples de drenos de plástico enterrados seria prejudicada pela baixa condutividade hidráulica do solo, exigindo um espaçamento muito denso. A vantagem é, pois, o preço de instalação bastante inferior ao de outras alternativas.

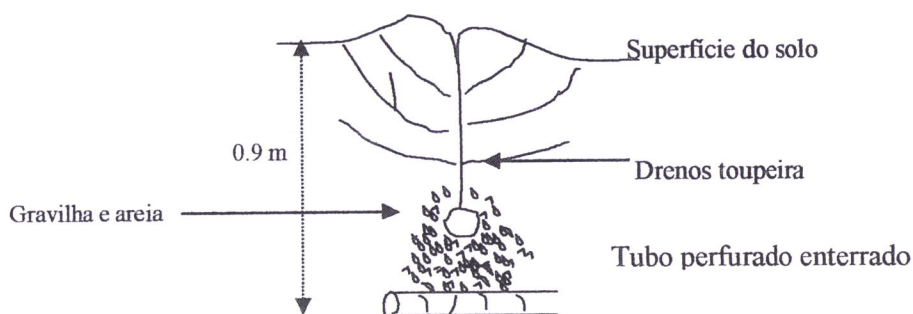


Figura 21 - Forma de ligação dos drenos toupeira ao colector secundário

4.1.6 - Ensaio B – Drenos toupeira, sem sistema de “drenagem combinada”

A verificação na modalidade toupeira de algumas diferenças de comportamento do solo em termos de cinética do movimento da água em profundidade e a ausência de água nos drenos, colocou em causa a continuação desta modalidade naquele local. As dificuldades encontradas na recolha de dados nesta modalidade justificam-se devido à pequena espessura do horizonte B que assenta directamente sobre areia grossa do horizonte C. Esta camada facilita o movimento de água através do perfil do solo para além de diminuir a estabilidade das galerias provocando o desmoronamento das mesmas. A areia desta camada será provavelmente um sedimento, que poderá estar relacionado com a presença da Ribeira de Canhestros.

Foi considerada uma alternativa de localização para a modalidade toupeira, dentro da mesma parcela experimental, tendo em conta os seguintes aspectos: dimensões do talhão experimental (80 x 40 m), maior profundidade do perfil do solo, percentagem em argila e declive do talhão.

Assim, com independência das outras modalidades, foi definida na mesma parcela um outro talhão (81 x 40 metros) onde foram implantados apenas drenos toupeira (*Modalidade Toupeira só (Mod. 4)*). A instalação da nova modalidade implicou a abertura de uma vala trapezoidal com 1 m de profundidade e 80 m de comprimento, traçada de forma a facilitar a abertura dos drenos toupeira e o escoamento do excesso da água de rega para fora do

campo de ensaios. Para a instalação dos drenos foi efectuada uma mobilização profunda com um dispositivo “toupeira”, moldando falsos drenos a 50-60 cm de profundidade, espaçados 1,5 m.



Figura 22 - Abertura dos drenos toupeira



Figura 23 - Subsolador com o dispositivo “toupeira”

4.2 - BALANÇO HÍDRICO

Na Figura 24 faz-se a representação esquemática do estudo experimental que se pretende desenvolver nas três modalidades, para a determinação das componentes do balanço hídrico. A necessidade de determinar o balanço hídrico do solo tem a ver com o facto de este ser importante para a determinação do balanço de sais. O balanço hidrológico toma o aspecto de um balanço de sais ao considerar-se em cada parcela a respectiva concentração salina. O esquema aparece decomposto em duas partes (I e II). Uma primeira

parte em que se faz referência às componentes da equação do balanço hidrológico (1,2,3,4,5 e 6) em análise, e uma segunda parte (II) que se referem sumariamente os parâmetros avaliados e os métodos utilizados na sua determinação.

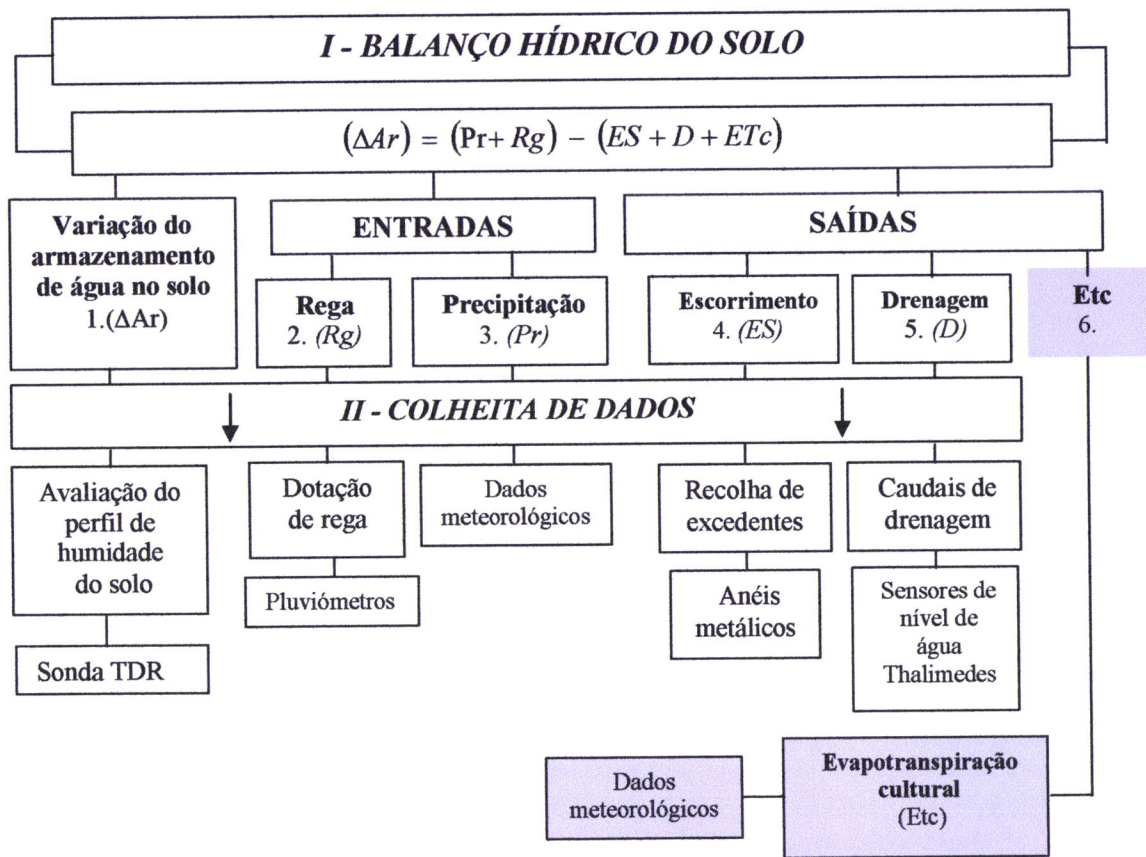


Figura 24 - Representação esquemática do estudo do balanço hídrico do solo

4.2.1 – Armazenamento de água no solo

4.2.1.1 – Evolução do teor de água no solo ao longo do tempo

Durante todo o período de ensaio em cada modalidade foram realizadas, antes e após as regas, medições do teor de humidade a várias profundidades com a sonda TDR em tubos de PVC com 80 cm de comprimento (Figura 25). É assim possível conhecer e compreender melhor os fenómenos de drenagem interna e de redistribuição de água no perfil. Estabeleceram-se dois intervalos de leituras de acordo com o calendário estabelecido para a realização das regas. Um primeiro intervalo que compreendeu aproximadamente 120 horas, durante o qual foram feitas leituras cerca de 24 horas antes da rega e 96 horas após a rega. E um outro intervalo que compreende 72 horas, durante as quais foram obtidos um conjunto de valores 24 horas antes da rega e outro 48 horas após as regas.



Figura 25 - Sonda TDR

4.2.2 - Dotação da rega e avaliação do escoamento superficial

Em cada modalidade e em todas as regas foram medidos os volumes de água colhidos nos pluviômetros colocados no topo do copado a uma altura de 1 m do solo e distanciados de 3 m, de acordo com as normas da ASAE (Figura 26). Foram também



Figura 26 - Pluviômetro

colocados anéis metálicos (Figura 27) com um diâmetro de 50 cm para a recolha dos excedentes provenientes da aplicação da água de rega.



Figura 27 - Recolha de volumes de excedente. Avaliação do escoamento

No campo de ensaio, a água que excedia a capacidade de infiltração das áreas definidas pelos anéis (Figura 23) instalados em cada modalidade era recolhida a seguir à rega em recipientes de plástico. Após medição desses volumes, o escoamento (E) de cada modalidade era estimado através da equação:

$$E(mm) = \frac{V}{A_e} \times 10 \quad \text{Eq. 3.29}$$

em que V é o volume de água escoado (cm^3) e A_e é a área do anel de escoamento (cm^2).

4.2.3 – Determinação dos caudais de drenagem

Para a determinação dos caudais de drenagem foram colocados à saída dos drenos canaletes medidores equipados com sonda de nível de água Thalimedes e datalogger para registo contínuo da altura de água dentro do canaleta (Figura 28).



Figura 28 - Canaletes medidores de caudais com sonda de nível de água

4.2.4 – Determinação da profundidade do nível freático

Foi feita a caracterização do nível freático resultante das regas em piezômetros instalados a 50, 70 e 90 cm. Os níveis freáticos foram monitorizados continuamente com datalogger Thalimedes (Figura 29)



Figura 29 - Piezômetro

4.2.5 – Evolução das cargas hidráulicas ao longo do tempo

Nos mesmos dias de medição do teor de humidade foram realizadas leituras de carga hidráulica, em tensiómetros (Figura - 30) instalados em redor do tubo de acesso à



Figura - 30 Tensiómetro

sonda TDR, às profundidades de 20, 40, 50, 70 e 90 cm. Com estas leituras pretende-se determinar o gradiente hidráulico no perfil e poder assim calcular o fluxo hidráulico.

4.2.6 - Determinação da curva característica de água $\theta(h)$

Para a determinação das relações $\theta(h)$ em laboratório foram utilizadas amostras de solo não perturbadas (Figura 31). Foram recolhidas três repetições em patamares, correspondentes a níveis representativos das camadas do perfil, localizados a 15, 30, 45,



Figura 31 - Recolha de amostras de terra para determinação do pF

60 e 75 cm profundidade. A obtenção dos pontos da curva foi feita determinando-se o teor de humidade retido nas amostras em equilíbrio com pressões conhecidas. Foi utilizado um método combinado da caixa de areia para valores de $pF < 2,0$, o método da placa para valores de pF compreendidos entre 2,54 e 3,0 e o aparelho de membrana de pressão para valores de pF entre 3,5 e 4,2.

4.3 BALANÇO DE SAIS. CONTROLO DA SALINIDADE

4.3.1 Caracterização da qualidade da água

Seguidamente é apresentado na Figura 32 o delineamento experimental a desenvolver nas três modalidades e que tem por objectivo, a colheita de dados durante a época de rega para a realização do balanço de sais.

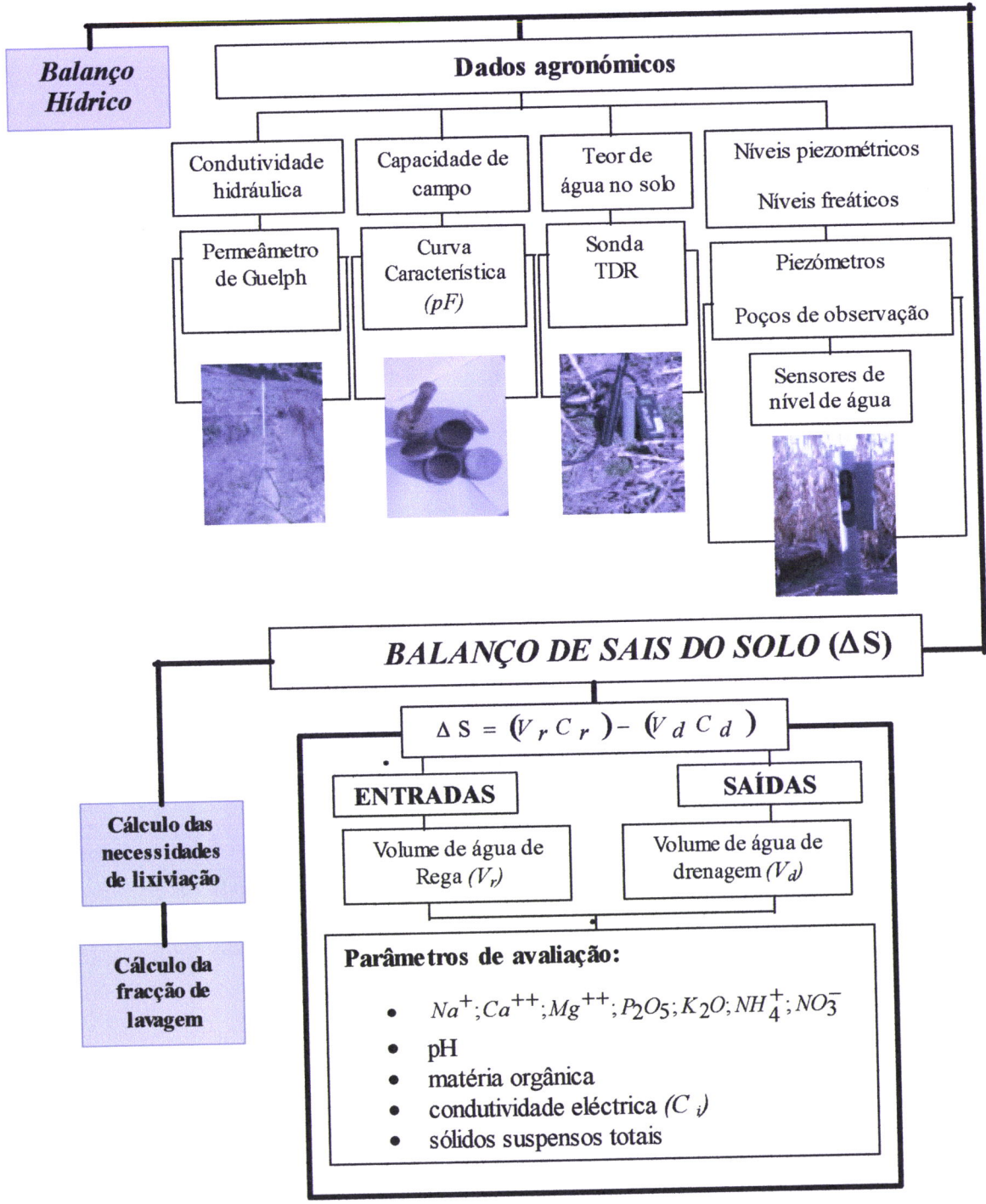


Figura 32 - Metodologia utilizada para a estimativa do balanço de sais no solo

As observações hidráulicas e agronómicas a efectuar serão completadas com determinações do teor em elementos químicos da água de rega e de drenagem (nitratos, sódio, cálcio, magnésio, potássio, fósforo bem como o pH, a matéria orgânica, a condutividade eléctrica e os sólidos suspensos totais), com o objectivo de estabelecer um balanço de sais “entradas-saídas” para avaliar o desempenho das técnicas de drenagem (subsolagem e drenos troupeira) na remoção de sais. Pretende-se também pela quantificação das perdas totais de elementos químicos na água de drenagem, estimar a necessidade de lixiviação e calcular assim a fracção de água aplicada com a rega que deve atravessar o perfil do solo para manter os sais a um nível admissível pela cultura e impedir que a concentração salina do solo atinja níveis prejudiciais.

4.3.1.1 - Recolha de amostras de água

No final de cada rega recolheram-se, para análise química, amostras de água na Ribeira de Canhestros, nos drenos (Figura 33) e nos piezómetros (Figura 34) a 30, 50, 70 e 90 cm de profundidade. Para a recolha de água superficial foram instalados talhões de escoamento.



Figura 33 - Recolha de água de drenagem

As amostras foram colocadas em garrafas de aproximadamente 300 ml de capacidade e colocadas numa mala térmica para minimizar as trocas de azoto durante a permanência no campo e o transporte para o laboratório. Uma vez no laboratório, foram congeladas até análise.



Figura 34 - Recolha de água em piezómetros

Nas amostras de água recolhidas determinou-se em laboratório o teor de elementos químicos: Na^+ ; Ca^{++} ; Mg^{++} ; P_2O_5 ; K_2O ; NH_4^+ ; NO_3^- , bem como o pH, a matéria orgânica, a condutividade eléctrica e os sólidos suspensos totais.

4.3.2 - Caracterização da salinidade do solo

A análise da qualidade química do solo da área em estudo visou, em primeiro lugar, avaliar o grau de salinização do solo nas três modalidades ao longo de duas campanhas de rega e, paralelamente, completar o estudo da qualidade da água no mesmo período, através da integração de ambas as informações numa análise do estado actual da salinização do solo. A análise global da qualidade química do solo foi orientada de acordo com os elementos poluentes provenientes do principal foco de poluição, a água de rega de má qualidade da Ribeira de Canhestros e servirá de suporte à definição de estratégias de gestão da salinidade do solo a propor para a área e o solo em estudo.

Com a análise da evolução da salinidade do solo pretendeu-se observar o comportamento dos sais no solo, no que diz respeito à sua migração vertical até eventualmente atingirem as águas subterrâneas. Para o efeito, foram analisadas amostras de solo a diversas profundidades de forma a obter a indicação da migração vertical dos sais no solo.

4.3.2.1 - Recolha de amostras de solo

Em cada modalidade recolheu-se uma amostra compósita, isto é, cada amostra resultou da colheita de 3 sub-amostras numa área de $3 \times 3 \text{ m}$. Este procedimento visou a obtenção de amostras as mais representativa possível de cada local. A recolha das amostras de solo foi feita com recurso a martelo pneumático até à profundidade de 80 cm (Figura 35).



Figura 35 - Recolha de amostras de terra para determinação da salinidade do solo

4.3.2.2 - Método utilizado na determinação da condutividade eléctrica do extracto de saturação do solo

As amostras de solo foram sujeitas em laboratório a uma diluição de 1:5 (a massa de água adicionada a uma amostra de solo é 5 vezes a massa de solo) para a obtenção do extracto de saturação do solo e respectiva condutividade eléctrica (CE_{es}). Para tal, a condutividade do estrato diluído ($CE_{1:5}$), obtida com um condutímetro portátil, foi multiplicada de um factor de diluição para solos argilosos (Rowell, 1996). De acordo com o mesmo autor, o valor deste factor está dependente da textura do solo, variando entre 6 e 15. A CE do estrato de saturação foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$CE_{es} = 6,4 \times CE_{1:5} \quad \text{Eq. 3.30}$$

5 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 - EVOLUÇÃO DOS TEORES DE HUMIDADE AO LONGO DO TEMPO E EM PROFUNDIDADE

Com a determinação dos perfis de humidade do solo nas três modalidades, antes e após cada rega, pretendeu-se avaliar as prováveis alterações que as operações de mobilização profunda (subsolagem e drenos toupeira) induziram na melhoria das condições de circulação da água no perfil do solo. Os valores apresentados resultam da média feita entre as observações realizada nos dois tubos de acesso à sonda TDR nas três modalidade – testemunha, subsolado e toupeira – respectivamente, ao longo de sete regas.

5.1.1 - Modalidade Testemunha

A Figura 36 mostra a evolução temporal dos perfis de humidade ao longo de sete regas na modalidade testemunha, para cada profundidade de medição.

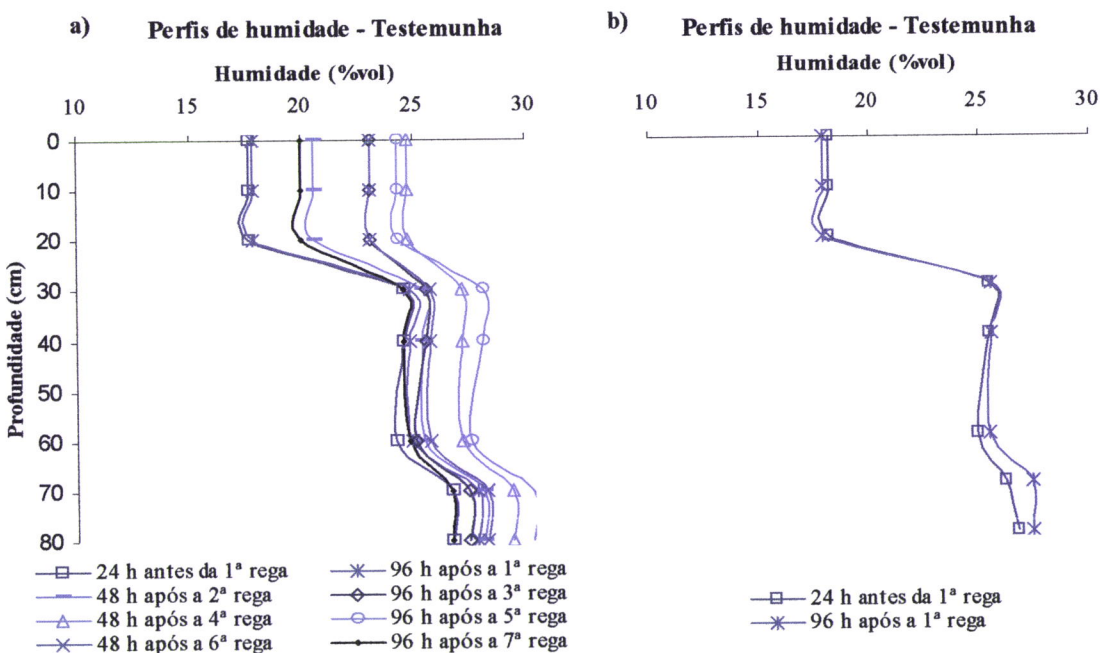


Figura 36 - a) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade ao longo das regas, na modalidade testemunha. b) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade antes e após a primeira rega.

Em todos os perfis hídricos nesta modalidade se demarcam duas zonas constituídas respectivamente pela camada até 20 cm de profundidade e daí até aos 80 cm, cada uma com teor de água bastante homogéneo, registando um aumento brusco entre os 20 cm e os 30 cm de profundidade. Realizada a primeira rega com uma dotação de 13,6 mm e

passadas 96 horas, verifica-se que a água se redistribuiu no perfil a partir dos 45 cm de profundidade, verificando-se que os valores dos teores de humidade se mantiveram praticamente constantes até àquela profundidade (Figura 36.b). Até aos 45 cm o solo encontrava-se provavelmente à capacidade de campo, não contribuindo para a alimentação hídrica das plantas.

Com a segunda rega foi aplicada uma dotação de 10 mm. Quarenta e oito horas após a segunda rega, registou-se um aumento nos teores de água até aos 20 cm, verificando-se entre esta camada e a superfície a maior percentagem de absorção radical. Abaixo dos 20 cm esse aumento foi menos acentuado. Noventa e seis horas após a terceira rega (25 de Julho), onde foram aplicados 11 mm e quarenta e oito horas após a quarta rega (30 de Julho) e noventa e seis horas após a quinta rega (1 Agosto) cuja dotação foi de 7,5 mm, foi sentido um aumento gradual no teor de humidade em todo o perfil. As pequenas variações verificadas nos valores dos teores de humidade ao longo das regas poderá dever-se à elevada frequência das regas e por o solo se encontrar provavelmente à capacidade de campo. No entanto essa variação foi mais notória nas observações realizadas após a quarta rega uma vez que a dotação aplicada foi de 16 mm. Quarenta e seis horas após a sexta rega (6 de Agosto) com uma dotação de 11 mm e noventa e seis horas após a sétima rega (8 de Agosto) com igual dotação verifica-se um esgotamento acentuado dos teores de humidade até aos 20 cm e, mais ligeiro, até aos 80 cm, devido à evaporação do solo e à absorção radical das plantas, uma vez que as necessidades hídricas das plantas são maiores nesta altura. Na última rega os valores observados aproximam-se substancialmente dos valores observados antes da primeira.

Verifica-se ainda pela observação dos perfis de humidade, uma ligeira inversão dos perfis entre os 30 cm e os 60 cm de profundidade. No entanto o perfil a esta profundidade mostra-se bastante humedecido, verificando-se quase sempre valores de teor de humidade muito próximos ou superiores a 25%. Após a quinta rega (1 de Agosto) e a sexta rega (6 de Agosto) os teores de humidade em profundidade registam valores muito próximos dos 30%, provavelmente acima da capacidade de campo. Esta hipótese assume maior credibilidade na sétima rega (8 de Agosto) uma vez que a água drenou em profundidade para fora da zona radical verificando-se a saída de água pela primeira vez através dos drenos.

5.1.2 - Modalidade Subsolagem

A Figura 37 apresenta a evolução temporal e em profundidade do teor de água no solo ao longo das regas, para todas as profundidades em estudo na modalidade subsolagem.

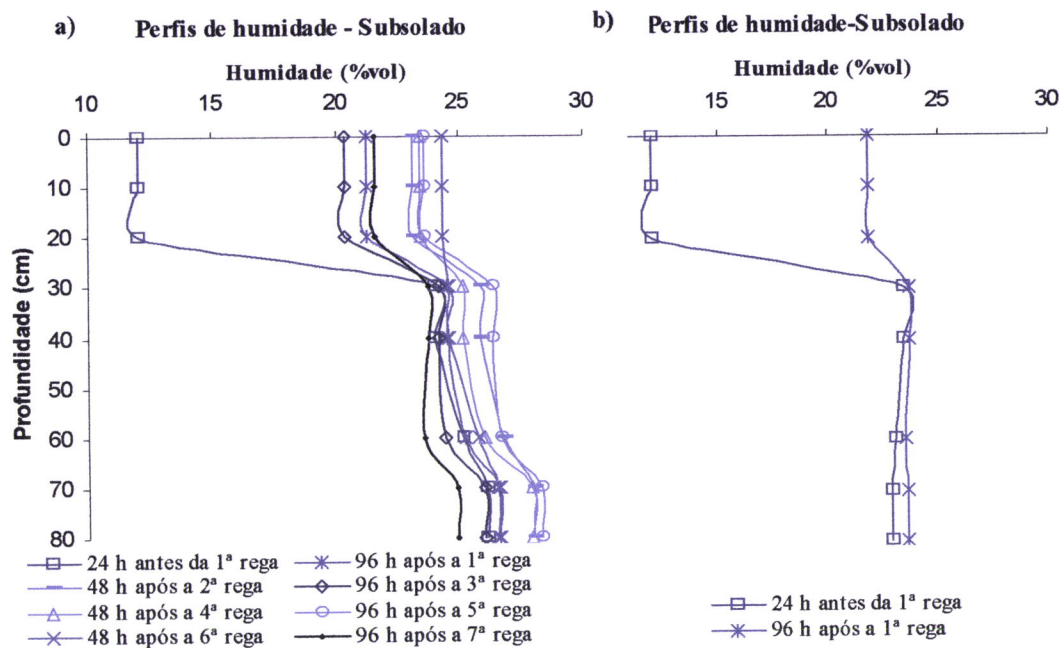


Figura 37- a) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade ao longo das regas, na modalidade subsolado. b) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade antes e após a primeira rega.

A diferença evidente no perfil hídrico observado 24 horas antes da primeira rega (18 de Julho) até à profundidade de 20 cm pode dever-se ao facto de a mobilização de subsolado efectuada, ter criado as condições necessárias para uma intensa evaporação à superfície do solo. Após a primeira rega, o teor de humidade aumentou significativamente até aos 40 cm de profundidade, devido à dotação aplicada de 39 mm, e menos nas camadas profundas do perfil. A Figura 37 – b) representa os perfis de humidade observados, antes e noventa e seis horas após a primeira rega. Verifica-se que a frente de humedecimento praticamente nunca desceu abaixo dos 40 cm, verificando-se entre esta camada e a superfície a maior percentagem de absorção radical. Este comportamento da frente de humedecimento neste tipo de solo, deve-se ao facto de a rega ter sido feita com um teor de humidade baixo nas camadas superficiais, o que, associado à elevada capacidade de armazenamento destes solos, permite reter elevados volumes de água nas camadas de solo superiores.

Contrariamente ao que acontece na modalidade testemunha, a frente de humedecimento no solo subsolado redistribui-se ao longo de todo o perfil a partir da segunda rega. Acrescente-se que a condutividade hidráulica quer horizonte A (2,72 cm/dia) quer no horizonte B (2,33 cm/dia) da parcela subsolada é mais elevada, do que na modalidade testemunha e que é de 0,85 cm/dia e 0,78 cm/dia para os mesmos horizontes, respectivamente. Convém pois conjugar estas duas informações de forma a poder afirmar-se, então, ainda com algumas reservas, que a parcela sujeita a subsolado evidencia os efeitos positivos na melhoria de circulação da água em todo o perfil, induzidos por esta mobilização profunda. De facto a realização da segunda rega (23 de Julho), com uma aplicação de 12 mm, conduziu a um aumento substancial dos teores de humidade ao longo de todo o perfil. Noventa e seis horas após a terceira rega (25 de Julho) e com a aplicação de uma dotação de 15 mm, verifica-se uma diminuição acentuada nos teores de humidade também em todo o perfil. Esta diferença poderá dever-se ao facto de as necessidades hídricas da cultura serem grandes nesta altura, tendo extraído parte da água em todo o perfil, verificando-se entre a superfície do solo e os 30 cm a maior percentagem de absorção radical. Quarenta e oito horas após a quarta rega (dotação 21 mm) e 96 horas depois da quinta rega (dotação de 11 mm), verifica-se novamente um aumento do teor de humidade ao longo de todo o perfil. Realizada a sexta rega (6 de Agosto) com uma dotação de 13 mm, e após quarenta e oito horas, a diminuição do teor de humidade em profundidade ocorre quase em simultâneo com a diminuição nas camadas mais superficiais. Com a sétima rega, cuja dotação foi de 16 mm e quarenta e oito horas depois da sua realização, verifica-se novamente uma diminuição do teor em água em todas as profundidades estudadas, em maior percentagem entre a superfície do solo e os 30 cm, devido à extracção radical e à evaporação do solo.

Tal como acontece na modalidade testemunha os teores de humidade nas camadas mais profundas do perfil na modalidade subsolado compreendem valores quase sempre superiores a 25%. Também nesta modalidade é apenas na sétima rega que se verifica saída de água nos drenos o que indica que a capacidade de armazenamento do solo foi superada. De facto se observar-mos o gráfico, quarenta e oito horas após a sétima rega o teor de água no solo é nitidamente menor.

5.1.3 - Modalidade Toupeira

A Figura 38 mostra a evolução no tempo dos perfis verticais de humidade com indicação para cada profundidade, na modalidade toupeira.

Da observação dos perfis de humidade da modalidade toupeira (Figura 16 – a)) ressalta que estes, comparativamente aos determinados nas outras modalidades, são caracterizados por teores de humidade mais baixos nas camadas mais profundas, nomeadamente entre os 30 cm e os 60 cm de profundidade. Este comportamento do solo poderá dever-se ao facto da condutividade hidráulica desta camada sofrer uma ligeira diminuição, 1,02 cm/dia, pois provavelmente encontra-se em estado mais compactado, para além de que as dotações praticadas em todas as regas são menores relativamente às outras modalidades e é elevado o consumo de água por parte da cultura entre as regas. No horizonte A condutividade hidráulica é de 1,14 cm/dia. Conforme se pode verificar e em comparação com as outras modalidades, apenas foram ultrapassados os 25% de humidade nos primeiros 30 cm do perfil, quarenta e oito horas após a segunda rega, cuja dotação foi apenas de 8 mm. No entanto poderemos afirmar que as alterações provocadas pela realização dos drenos toupeira tiveram um efeito positivo na circulação da água no solo em todo o perfil. É de salientar o efeito das regas dos dias 18 (Figura 38 – b)) e 23 de Julho que provocaram um aumento do teor de humidade em todo o perfil.

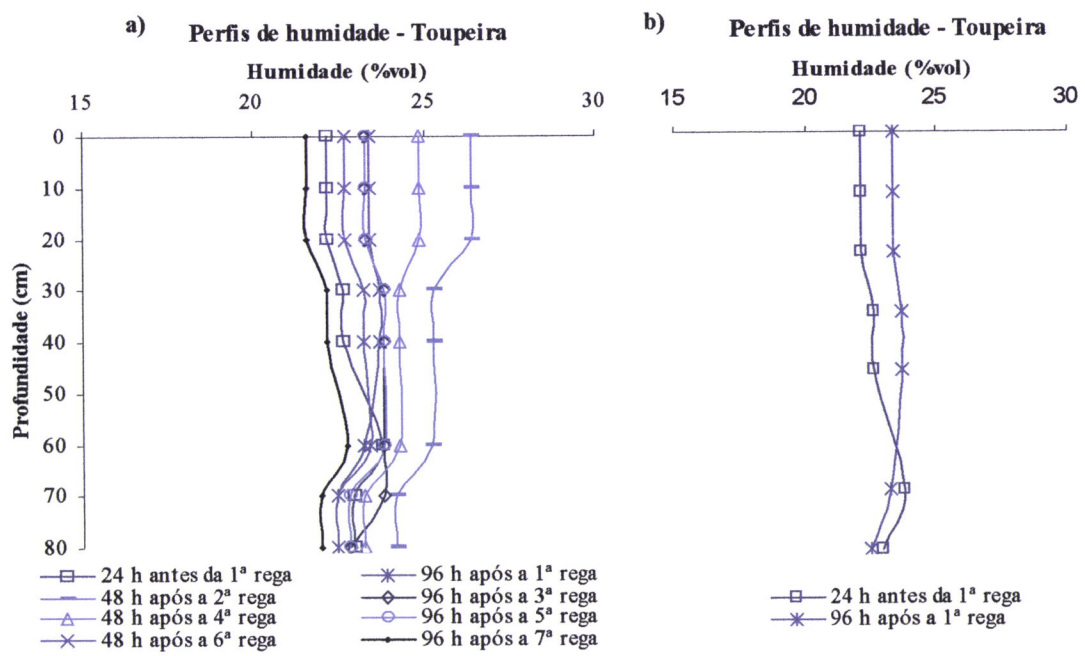


Figura 38- a) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade ao longo das regas na modalidade toupeira . b) Evolução temporal e em profundidade dos perfis de humidade antes e após a primeira rega.

Verifica-se que o aumento dos teores de humidade em profundidade até aos 60 cm ocorre quase em simultâneo com o aumento nas camadas mais superficiais. Os valores dos teores de humidade diminuem acentuadamente a partir dos 60 cm de profundidade, manifestando-se a tendência para uma inversão no perfil. Tal facto poderá dever-se por um lado à possibilidade da existência em profundidade de uma camada compactada que não permite a variação hídrica ao longo dos respectivos intervalos de rega, limitando assim de forma mais evidente a disponibilidade de água nas camadas mais profundas. Refira-se que os drenos toupeira foram feitos mais ou menos à profundidade de 70 cm o que não permitiu a fragmentação do solo a partir desta mesma profundidade. Nesta modalidade não foram registados quaisquer saídas de água nos drenos.

5.2 – CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

5.2.1 - Potencial de salinização e alcalinização

Neste ponto são apresentados alguns resultados das análises químicas feitas à água recolhida em Agosto e Setembro de 2002 no Açude da Ribeira de Canhestros. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3 e referem-se à condutividade eléctrica (CE), aos teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na) e aos valores da razão de adsorção de sódio (SAR), bem como à classificação da água quanto ao risco de salinidade e de alcalinidade com base no diagrama do U.S. Salinity Laboratory.

Analisando o Quadro 3 pode verificar-se que os valores da razão de adsorção de sódio relativos às amostras de água recolhidas na ribeira durante a campanha de rega situam-se entre 1,64 e 4,12 meq/l, revelando-se pouco elevados (a legislação portuguesa estabelece para a SAR o valor de 8, como VMR). Tal poderá atribuir-se à elevada concentração de cálcio e magnésio na água da ribeira. A infiltração é normalmente favorecida pela aplicação de águas com salinidade elevada, já que o cálcio e o magnésio têm uma função estruturante do solo, pois flocculam os complexos argilo-húmicos, formando com eles agregados estáveis, aumentando assim a porosidade e com ela a permeabilidade à água.

Quadro 3 -Classificação da água

Recolha Ano 2002	Local de amostragem	pH	CE (dS m ⁻¹)	Ca	Mg	Na	SAR	Classf. USSL*
				(meq/l)				
08-Ago	Ribeira	8,13	2,33	5,50	-	12,52	-	C ₄
	Dreno (MT)	7,66	2,01	12,65	11,97	10,00	2,85	C ₃ -S ₁
	Dreno (MS)	7,92	3,65	-	-	19,74	-	C ₄
22-Ago	Ribeira	8,16	2,05	5,00	8,93	10,87	4,12	C ₃ -S ₁
	Dreno (MT)	7,76	3,45	8,95	8,93	15,04	5,03	C ₄ -S ₂
	Dreno (MS)	7,97	3,48	13,30	13,11	10,52	2,90	C ₄ -S ₁
06-Set	Ribeira	8,08	0,93	5,40	6,94	4,07	1,64	C ₃ -S ₁
	Dreno (MT)	7,54	3,42	17,35	12,79	17,30	4,46	C ₄ -S ₂
	Dreno (MS)	7,64	3,33	9,80	8,93	13,22	4,32	C ₄ -S ₂
24-Set	Ribeira	7,94	1,88	6,15	6,09	8,78	3,55	C ₃ -S ₁
	Dreno (MT)	7,77	2,32	8,45	8,36	16,87	5,82	C ₄ -S ₂
	Dreno (MS)	7,71	4,91	27,15	22,13	17,74	3,57	C ₄ -S ₂
30-Set	Ribeira	8,10	2,00	7,75	8,08	8,61	3,06	C ₃ -S ₁
	Dreno (MT)	7,60	2,52	9,55	9,84	11,17	3,59	C ₄ -S ₂
	Dreno (MS)	7,69	2,93	14,15	8,93	12,52	3,69	C ₄ -S ₂

Se observarmos o Quadro 3 podemos verificar que a condutividade eléctrica (CE) da água da ribeira apresenta valores muito elevados nas duas primeiras recolhas (2,33 e 2,05 dS/m respectivamente), verificando-se uma tendência para uma ligeira diminuição dos

valores da CE nas amostragens seguintes. Verificamos no mesmo quadro que a água da ribeira apresenta no mês de Setembro CE ligeiramente inferior à obtida no mês de Agosto, o que se explica pelas descargas de água dos canteiros de arroz feitas a montante e pela precipitação ocorrida no final de Setembro, diminuindo a concentração electrolítica da água da ribeira.

Com base no diagrama classificativo da água de rega do U.S. Salinity Laboratory e analisando o Quadro 3, poderemos verificar que a qualidade da água da ribeira, expressa como combinação de CE e SAR, apresenta valores de salinidade elevada (C_3) a muito elevada (C_4), com teores baixos de sódio (S_1). Neste caso e de acordo com a mesma classificação, a água do Açude da Ribeira de Canhestros apenas deve ser usada em solos com boa drenagem, com aplicação de volumes de água em excesso para facilitar a lixiviação dos sais e nos casos de plantas tolerantes ou mesmo muito tolerantes à salinidade.

O risco de salinização revela-se assim preocupante, pois foram adicionados ao solo em média 1289 g de sais por metro cúbico de água da ribeira, admitindo-se assim abaixamentos importantes dos rendimentos das culturas, com os inerentes custos económicos. Com um volume de água aplicado de 2210 m³/ha, calcula-se que tenham sido colocados no solo aproximadamente 2829 Kg/ha de sais, no total das 20 regas. A quantidade de sais que este solo deve conter para que se possa considerar salino é de 6400 Kg/ha. Nesta perspectiva poderemos concluir que o número de anos de rega para que o solo onde decorrem os ensaios (solo de Barro) se considere salino é aproximadamente de 2 anos. Repare-se que a legislação portuguesa estabelece (decreto lei nº 236/98 de 1 de Agosto) para a condutividade eléctrica das águas destinadas a rega o VMR em 1dS/m e VMA em 3 dS/m.

A salinidade total da água de rega age tanto sobre o solo como sobre as plantas, interferindo no seu processo osmótico. Ayers e Westcot (1987) referem que no caso do girassol (cultura instalada no campo em 2002 – Ano I de instalação) o valor da condutividade eléctrica da água de rega abaixo do qual o rendimento da planta do girassol é na ordem dos 100% (salinidade limiar) é de 3,5 dS/m (planta moderadamente sensível), sendo a produção afectada apenas em 25% no caso da condutividade eléctrica da água ser igual a 5 dS/m.

Assim o fraco desenvolvimento vegetativo apresentado pela cultura do girassol na modalidade testemunha apresentado pela cultura do girassol na modalidade testemunha

Figura 39) não se deve aparentemente à má qualidade da água de rega, uma vez que a salinidade limiar da cultura (3,5 dS/m) é superior à condutividade eléctrica apresentada pela água da ribeira. O fraco desenvolvimento manifestado por parte das plantas poderá dever-se neste caso às pequenas dotações aplicadas e aos valores de evapotranspiração cultural verificados, não chegando no mês de Julho a satisfazer as necessidades hídricas das plantas. Não houve pois, neste caso, remoção de sais em excesso no solo. A concentração de sais à superfície diminuiu a absorção de água por parte das plantas o que, associado aos problemas de drenagem interna dos solos de Barro, levou à acumulação de água e de sais à superfície do solo, criando problemas de arejamento e de absorção de água por parte das plantas, interferindo no seu processo osmótico e impedindo o desenvolvimento vegetativo.

Já nos meses de Agosto e Setembro os volumes de rega foram suficientes para satisfazer as necessidades hídricas da cultura e promover a lavagem de sais.

Na modalidade subsolado o desenvolvimento verificado na cultura deve-se ao fendilhamento produzido pela operação de subsolagem (Ano I de instalação dos ensaios), o qual promoveu a melhoria das condições de drenagem do solo, fazendo com que a água e com ela os sais se movimentassem melhor em profundidade sem dar lugar à acumulação de excessos no solo. Além de que a descompactação do solo facilitou o aprofundamento radical, aumentando assim o volume do solo explorado pelas raízes e como tal permitiu um bom desenvolvimento da cultura (Figura 39).



Figura 39 – Aspecto da cultura do girassol na modalidade testemunha



Figura 40 - Aspecto da cultura do girassol na modalidade subsolado

Já em 2003 (Ano II de instalação dos ensaios) a qualidade da água de rega para além de outros factores como o processo de salinização do solo iniciado no ano anterior, o uso de água da ribeira com salinidade elevada, a má drenagem do solo, as altas temperaturas do ar que se verificaram durante o Verão, as dotações aplicadas (em média 15 mm em cada rega) e as elevadas necessidades hídricas da cultura ($\cong 30$ mm), foram factores decisivos para as pequenas produções verificadas na cultura do milho, com perdas de rendimento da ordem de 70% das produções esperadas. A produção na modalidade testemunha foi cerca de 3000 Kg/ha, com um ligeiro aumento na modalidade subsolado (4000 Kg/ha). Ayers e Westcot (1987) referem que, no caso do milho, o limite de tolerância de sais na água de rega é de 1,1 dS/m, classificando-se como uma planta sensível à salinidade. Para o milho, a percentagem de redução do rendimento por unidade de condutividade eléctrica (dS/m) é de 25%, quando a condutividade eléctrica da água de rega é de 2,5 dS/m e de 50%, quando a condutividade é de 3,9 dS/m. Contudo, o aumento de produção verificada na modalidade subsolado mostra que a cultura do milho é influenciada pela melhoria das condições de drenagem interna provocadas pelas operações de mobilização profunda.

5.3 - CARACTERIZAÇÃO DA SALINIDADE DO SOLO

Os resultados discutidos no neste ponto decorrem da monitorização da salinidade do solo da parcela experimental, nos anos de 2003, 2004 e 2005. A parcela foi regada com água (de má qualidade) da Ribeira de Canhestros, classificada como C₃S₁ (U.S. Salinity Laboratory). A caracterização da salinidade do solo incidiu na análise do comportamento dos sais, no que diz respeito à sua migração vertical através do perfil do solo, até eventualmente atingirem as águas subterrâneas. Apesar dos dados se referirem apenas a cinco amostragens, parece que a variação vertical encontrada se deveu a efeitos da pouca lixiviação verificada durante a campanha de rega, na sequência das pequenas dotações de rega aplicadas e da quase nula precipitação verificada neste período.

5.3.2 - Perfis de salinização

Nas Figuras 39, 40 e 41 são apresentados os perfis de salinização do solo obtidos nas modalidades *Testemunha*, *Subsolado*, *Toupeira (Mod.3)* e *Toupeira só (Mod.4)* com indicação, para cada camada, dos valores da condutividade eléctrica do estrato de saturação do solo (CE_{es}) em 2003, 2004 e 2005. Esta selecção foi feita com o objectivo de apresentar os diversos tipos de variações encontradas. Assim, apresentam-se os casos em que os valores da condutividade sofrem pequenas alterações com a profundidade (*Subsolado* e *Toupeira só (Mod.4)*) e os casos em que se detecta uma clara alteração – quase sempre aumento – dos valores da condutividade em profundidade (*Testemunha* e *Toupeira (Mod.3)*).

5.3.2.1 - ENSAIO A - Sistema de “drenagem combinada”

5.3.2.1.1 - Modalidade Testemunha

O perfil de salinização correspondente a 1 de Junho de 2003 (Figura 41) refere-se à salinidade inicial do solo, antes de ter sido efectuada qualquer rega. Refira-se que a parcela até esta data esteve dedicada apenas a culturas cerealíferas de sequeiro. Os resultados obtidos permitem verificar que o maior valor, que se registou na camada de 70 cm, é 612 $\mu\text{S}/\text{cm}$, portanto sem evidenciar risco de salinização do solo. O incremento da salinidade do solo em Agosto/02 foi, em geral, mais expressivo nas camadas mais profundas, atingindo um valor de 3389 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ficando muito perto do nível limite para classificar o solo de salino, CE_{es} > 4 dSm⁻¹ (Richard's, 1954). Neste caso, as dotações de rega

aplicadas até esta data, num total de 221.2 mm, não foram suficientes para promover uma lixiviação significativa dos sais em profundidade adicionados pela água de rega e, assim, reduzir a salinidade do solo para condições próximas da salinidade inicial do solo. Apesar de se ter verificado um aumento da salinidade do solo após três campanhas de rega, observa-se que os valores se encontram praticamente constantes em todo o perfil, nas amostras colhidas em 11/11/04. Tal facto poderá estar relacionado com a precipitação verificada nos dias anteriores à recolha das amostras, o que permitiu alguma lixiviação no perfil do solo.

Um importante aspecto a referir tem a ver com o perfil de salinização apresentado pelo solo após a campanha de rega de 2005. Os 320 mm de dotação aplicados permitiram a lixiviação de sais até à profundidade de 50 cm.

Refira-se que apenas se verificou a saída de água pelos drenos em 2003, razão que poderá justificar os valores elevados da salinidade observados nos anos seguintes.

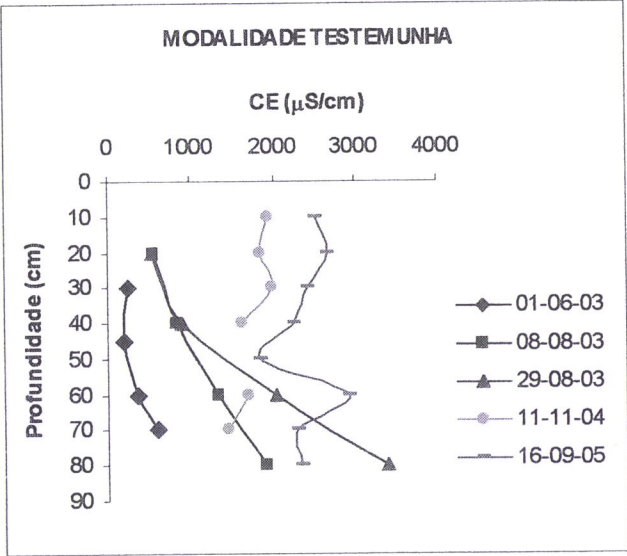


Figura 41 – Evolução da salinização do perfil do solo na *Modalidade Testemunha*.

5.3.2.1.2 - Modalidade subsolado

Pela observação dos perfis de salinização nesta modalidade (Figura 42) e para as mesmas dotações verificadas na modalidade testemunha, pode afirmar-se que a parcela sujeita a subsolado evidencia os efeitos positivos na melhoria de circulação da água em todo o perfil, mesmo após 3 campanhas de rega. Nas avaliações efectuadas os valores da salinidade do solo são significativamente menores relativamente aos valores verificados na

Modalidade Testemunha, diminuindo cerca de 1,5 vezes, havendo uma certa estabilização da salinidade do perfil em profundidade.

Contrariamente ao que se verificou na *Modalidade Testemunha*, na *Subsolagem* observou-se a saída de água pelos drenos durante as campanhas de rega o que permitiu a lavagem dos sais para fora do perfil do solo.

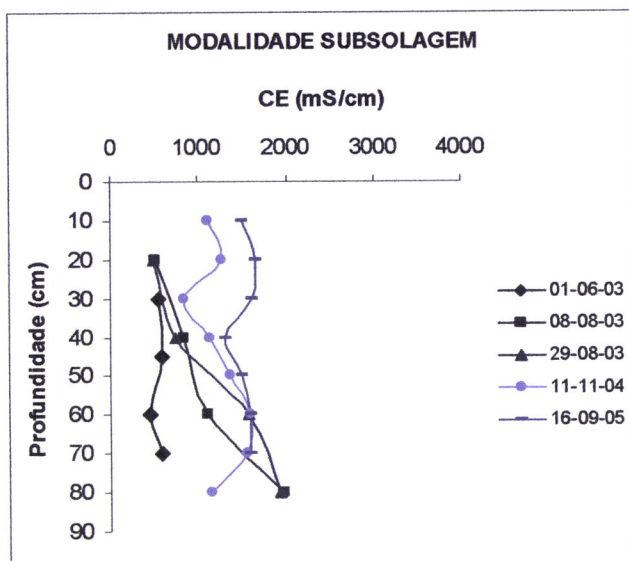


Figura 42– Evolução da salinização do perfil solo na *Modalidade Subsolagem*

5.3.2.1.3 - Modalidade Toupeira (Mod 3)

Para as mesmas dotações verificadas nas modalidades *Testemunha* e *Subsolagem*, a Figura 43 mostra o estado de salinização do solo após 3 anos de instalação dos drenos

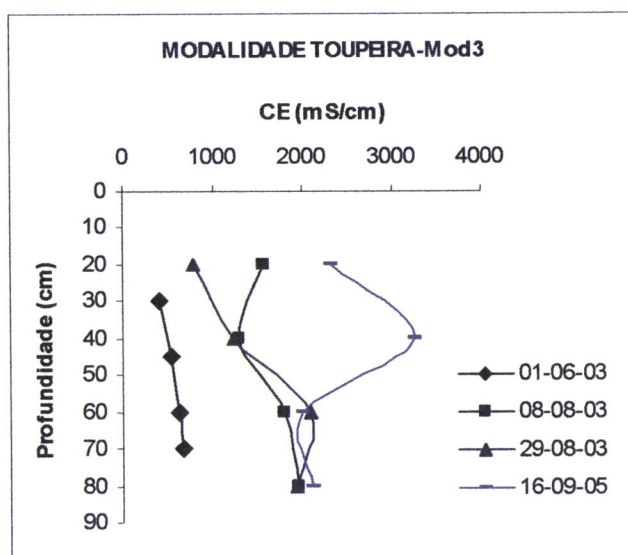


Figura 43 – Evolução da salinização do perfil do solo na *Modalidade Toupeira-Mod3*.

toupeira. Conforme se pode verificar pela observação do perfil do solo em 2005, os valores da salinidade até aos 50 cm poderão dever-se à obstrução dos drenos toupeira verificada logo no ano de instalação dos mesmos.

5.3.2.2 - ENSAIO B – Drenos toupeira, sem sistema de “drenagem combinada”

5.3.2.2.1 - Modalidade Toupeira só (Mod 4)

Na Figura 44 apresentam-se os perfis de salinidade do solo obtidos com base em amostras de solo recolhidas em 2004 a meio da campanha de rega e após 2 meses do final da mesma. A ausência de concentrações elevadas de sais solúveis ao longo do perfil a meio da campanha, deve-se em parte às dotações elevadas praticadas neste ensaio e ao fluxo descendente de água e sais favorecido pela abertura dos drenos toupeira em condições de saturação. Em fins de Novembro de 2004, uma nova amostragem do solo mostrou que a salinidade ainda persistia, apesar da chuva ter proporcionado a lavagem do solo. Refira-se que entre a última rega e o dia anterior à amostragem de solo, 18-11-04 verificou-se uma precipitação de 118 mm.

Os valores obtidos em 2005, após a campanha de rega permitem verificar uma salinização intensa do solo, o que acontece também nas restantes modalidades. Tal facto poderá dever-se ao papel decisivo que a salinidade da água de rega tem no estado de

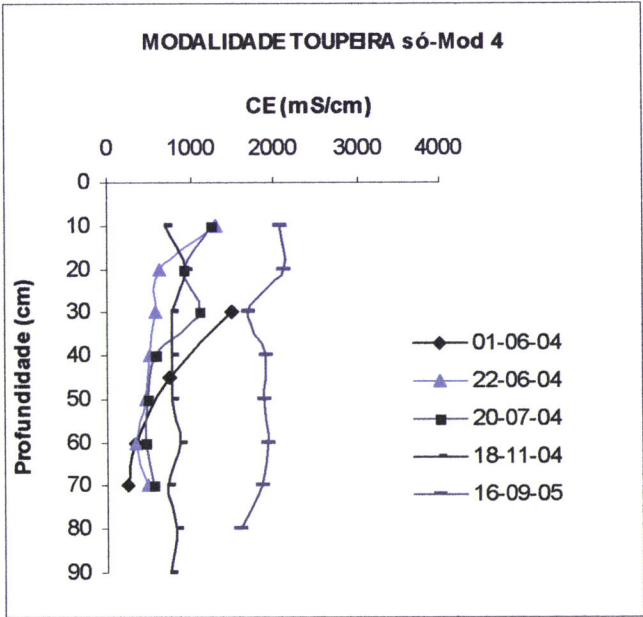


Figura 44 – Evolução da salinização do perfil do solo na Modalidade Toupeira só-Mod4

salinização do solo. Neste ano a condutividade eléctrica da água de rega variou, fundamentalmente, entre 3,05 e 3,40 dS/m, enquanto em 2003 e 2004 os valores máximos encontrados foram de 2,33 e 2,21 dS/m, respectivamente.

5.4 - NECESSIDADES DE LIXIVIAÇÃO

Nos Quadros 4, 5 e 6 são apresentadas as necessidades de lixiviação (NL) para 3 campanhas de rega (2003/4/5) nas *Modalidades Testemunha, Subsulado e Modalidade Toupeira (Mod 4)*, bem como os valores da dotação, evapotranspiração e valores médios da condutividade eléctrica da água de rega (CE_{ar} , dSm⁻¹) e do extracto de saturação do solo observado à profundidade de 60 cm (CE_{es} , dSm⁻¹) para o mesmo período, comparativamente com o máximo admitido pela tolerância da cultura (CE_{esc} , dSm⁻¹).

Pela observação dos Quadros 4, 5 e 6 pode verificar-se que o processo de salinização secundário, traduzido na evolução da salinidade do extracto de saturação do solo, CE_{es} , foi menos acelerado do que o previsto de acordo com a qualidade da água da Ribeira de Canhestros, devido não só à prática de dotações reduzidas como também à melhoria da infiltração do solo favorecida pela mobilização profunda. As dotações aplicadas permitiram manter o solo a uma salinidade compatível com as culturas. A aplicação de níveis de lixiviação como os calculados levaria necessariamente a eliminações grandes por lixiviação profunda, com a consequente poluição das águas de drenagem e de jusante (que no entanto seriam, no presente caso, as mesmas da origem para rega).

Atendendo à sensibilidade das plantas aos sais, em solos que apresentam CE_{es} entre 2 e 4 dSm⁻¹, o comité de terminologia da Sociedade Americana de Ciência do Solo tem recomendado baixar para 2,0 dSm⁻¹ o limite entre solos salinos e não salinos.

Quadro 4 - Necessidade de lixiviação para o período compreendido entre 2003 e 2005, *Modalidade Testemunha*

Ano	Necessidades de lixiviação (NL)							
	Cultura	Limiar de salinidade (100%) CE_{esc} (dS/m)	Dotação (mm)	Etc (mm)	Água de rega CE_{ar} (dSm ⁻¹)	Extracto de saturação do solo observado (60 cm) CE_{es} (dSm ⁻¹)	NL (%)	NL (mm)
2003	Girassol	5.3	221.2	423	1.83	3.2	0.07	457
2004	Milho	1.7	291.6	473	1.56	1.9	0.22	610
2005	Sorgo	4.0	384.0	452	3.25	2.9	0.19	561

Quadro 5- Necessidade de lixiviação para o período compreendido entre 2003 e 2005, Modalidade Subsolado.

Ano	Necessidades de lixiviação (NL)							
	Cultura	Limiar de salinidade (100%) CEesc(dS/m)	Dotação (mm)	Etc (mm)	Água de rega CEar(dSm ⁻¹)	Extracto de saturação do solo observado (60 cm) CEes(dSm ⁻¹)	NL (%)	NL (mm)
2003	Girassol	5.3	221.2	423	1.83	1.9	0.07	457
2004	Milho	1.7	291.6	473	1.56	1.6	0.22	610
2005	Sorgo	4.0	384.0	452	3.25	1.5	0.19	561

Quadro 6 - Necessidade de lixiviação para o período compreendido entre 2003 e 2005, Modalidade Toupeira só (MOD 4).

Ano	Necessidades de lixiviação (NL)							
	Cultura	Limiar de salinidade (100%) CEesc(dS/m)	Dotação (mm)	Etc (mm)	Água de rega CEar(dSm ⁻¹)	Extracto de saturação do solo observado (60 cm) CEes(dSm ⁻¹)	NL (%)	NL (mm)
2004	Milho	1.7	291.6	473	1.56	0.9	0.22	610
2005	Sorgo	4.0	320.0	452	3.25	1.9	0.19	561

5.5 - BALANÇO HÍDRICO DO SOLO

5.5.1 - Modalidade Toupeira (Mod 4)

Neste ponto são apresentados os resultados relativos ao balanço hídrico do solo, bem como da evolução da toalha freática após uma rega, e ao balanço de sais.

No Quadro 7 apresentam-se os valores acumulados dos termos de entrada e saída do balanço hídrico, precipitação (Pr), rega (Rg), drenagem (D) e evapotranspiração (Etc), para o período compreendido entre 3 e 31 de Agosto.

Quadro 7 – Resultados do balanço hídrico para o período compreendido entre 3 e 31 de Agosto, Modalidade Toupeira, 2004.

TERMOS DO BALANÇO HÍDRICO	
(mm)	
Entradas	
Rg	147
Pr	10
Saídas	
D	14.51
Etc	177
ΔAr medido	-32.73

A fronteira inferior do sistema para o qual foi realizado o balanço coincide com a profundidade de 50 cm, uma vez que à profundidade a que se localizam os drenos toupeira

(± 50 cm) não foram registadas variações de armazenamento, devido à presença de toalha freática temporária abaixo desta profundidade. A verificação da existência da toalha freática poderá dever-se em parte à ineficiência do sistema de drenagem. A quase obstrução dos drenos toupeira e a existência de uma camada impermeável abaixo dos 60 cm, parecem ser os responsáveis pela existência da referida toalha. De facto se observarmos o gráfico da Figura 45 - que é o Output do Programa HYDRAS 3 que funciona com as sondas Thalimedes – podemos verificar que a evolução da profundidade da toalha freática em função do tempo verificada após a rega do dia 9 de Agosto, num poço de observação colocado a 85 cm de profundidade equipado com um sensor de nível de água Thalimedes que a variação do nível da toalha freática após a rega, mostrou um efeito pouco positivo dos drenos toupeira na velocidade de drenagem. A referida toalha atingiu cerca de 40 cm de profundidade após 5 h de drenagem situando-se acima dos drenos, atingindo o nível dos drenos após 2 dias de se ter verificado a saída de água nos drenos. Repare-se que as perdas de água por drenagem, correspondem apenas a 9% das entradas de água através das regas e da precipitação. É possível concluir sobre a significativa contribuição da toalha freática como fonte de água para a cultura, uma vez que se verificou apenas um déficit de armazenamento de água (ΔAr) no solo de - 32.73 mm no período considerado para o balanço hídrico.

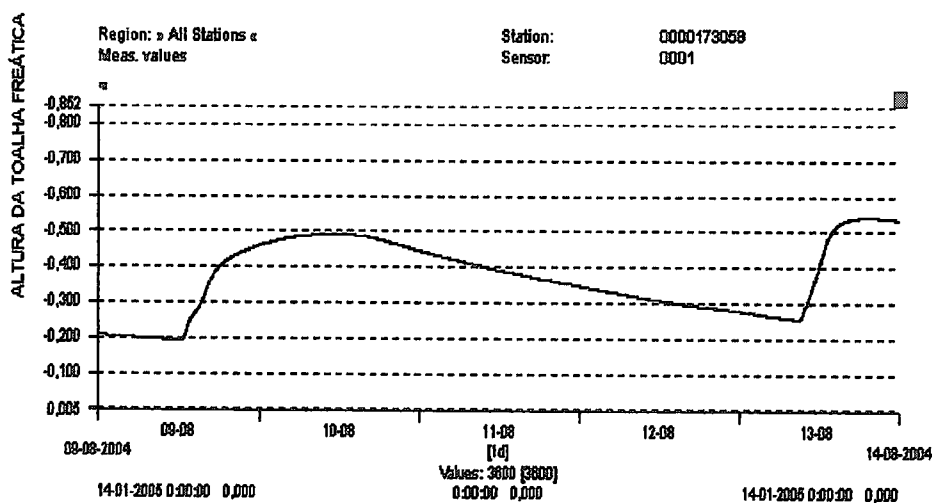


Figura 45 – Nível da toalha freática em função do tempo (após a rega realizada a 9 de Agosto) na modalidade toupeira.

Repare-se que a quantidade total de água que entra no sistema e que correspondeu a 157 mm não é suficiente para satisfazer as necessidades hídricas da cultura e que são de 177 mm para o mesmo período.

A contribuição da toalha freática deve assim ser considerada na previsão do balanço hídrico para efeitos de condução e programação de regas.

5.5.1.1 - Balanço de sais

No Quadro 8 apresentam-se os valores dos termos de entrada e saída do balanço de sais, rega (Rg), drenagem (D), bem como a condutividade eléctrica da água de rega (C_r) de drenagem (C_r), para o período compreendido entre 3 e 31 de Agosto.

Quadro 8 - Contribuição dos volumes de rega e de drenagem no balanço de sais para o período compreendido entre 3 e 31 de Agosto, Modalidade Toupeira, 2004

BALANÇO DE SAIS	
Entradas	
Rg (mm)	147
C_r (dSm ⁻¹)	2
Saídas	
D (mm)	14.5
C_r (dSm ⁻¹)	3
Variação de sais ($\square S$)	
(mgm ⁻²)	159298

Contabilizando apenas os volumes de rega e de drenagem para o mês de Agosto, podemos verificar por observação do Quadro 8 que o volume de drenagem não foi suficiente para promover a remoção de sais, o que fez com que ficassem acumulados no solo 159740 mgm⁻².

Para alteração deste cenário teria que se promover a lixiviação de sais.

5.5.5.2 - Necessidade de lixiviação (NL)

A necessidade de lixiviação é a fracção de água aplicada com a rega que deve atravessar o perfil do solo para manter os sais a um nível admissível pela cultura. Ayers e Westcot, (1994).

Pela observação do Quadro 9 poderemos verificar que para as concentrações médias em sais verificadas em Agosto na água de rega e de drenagem, a necessidade de lixiviação é de 15 % para evitar um aumento de sais na zona radicular. O mesmo será dizer que para satisfazer as necessidades hídricas da cultura e promover a lixiviação teríamos que aplicar 208.96 mm de água. Ou seja, 88.5 mm (3% do total) de água de rega é suficiente para evitar um aumento da concentração de sais na zona radicular acima do valor de 3 dSm⁻¹. Repare-se que para a planta do milho a diminuição do rendimento da cultura é de aproximadamente 10% para este valor de salinidade do solo.

Quadro 9- Necessidade de lixiviação para o período compreendido entre 3 e 31 de Agosto, Modalidade Toupeira, 2004

NECESSIDADE DE LIXIVIAÇÃO			
C _r (dSm ⁻¹)	C _{es} (dSm ⁻¹)	NL (%)	(mm)
2	3	0.15	208.96

6 - CONCLUSÕES

A análise global dos resultados obtidos e a sua comparação permitem retirar as seguintes conclusões:

Apesar dos dados se referirem apenas a cinco amostragens, parece que a variação vertical encontrada se deve a efeitos da pouca lixiviação verificada durante as campanhas de rega, na sequência das pequenas dotações de rega aplicadas e da quase nula precipitação verificada neste período. Os resultados são preocupantes, visto que a parcela do Ensaio A está sujeita a rega há apenas 3 anos, enquanto o Ensaio B (*Toupeira só (Mod.4)*) é apenas regado há 2 anos, expressando o impacto negativo da gestão da rega ao longo do perfil do solo. Os valores da condutividade são, em média, extremamente elevados, ficando muito perto do nível considerado limite para classificação do solo como salino, $CEs > 4 \text{ dSm}^{-1}$ (Richard's, 1954). No entanto, o processo de salinização com o tempo foi menos acelerado do que o previsto, devido não só à prática de dotações reduzidas como também à melhoria da infiltração do solo, favorecida pela mobilização profunda.

As dotações aplicadas permitiram manter o solo a uma salinidade admitida pelas culturas.

As condutividades mais elevadas registam-se sempre nas modalidades *Testemunha e Toupeira (Mod.3)*, aquelas em que é mais deficiente a drenagem interna do perfil. De um modo geral, os valores da condutividade aumentam com a profundidade, traduzindo, em maior ou menor grau conforme a modalidade, a deficiente drenagem que se promoveu do perfil do solo. A eliminação destes sais acumulados em profundidade no solo teria requerido quantidades adicionais de água de rega, com $CEar$ reduzida.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiã, M. F. N.** (1994) *Controlo do perfil hídrico do solo e do armazenamento mediante operações de tecnologia do solo e da água*. Trabalho de fim de curso. Universidade de Évora, Évora.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M.** (1998) *Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*, FAO, Irrigation and Drainage Paper, nr.56.
- Auckenthaler J.; Zimmer D.** (1991) *Comparison de différents modes de drainage dans les argiles verts sarthoises. Resultats hydrauliques et agronomiques de l' experimentation de Courcival*. Mise en valeur des sols difficiles. Drainage et après-drainage de argiles vertes. Etudes du CEMAGREF, série Hydraulique Agricole, n° 11 : 27-46.
- Ayers, R.S., D.W. Westcot** (1987) *La qualité de l'eau en agriculture*. Rome, Bull. FAO Irr.Drain. n° 29.
- Beven K.J.; O'Connell P.E.; Harris, Clements R.O.** (2004) - *Impact study report Appendix A: Review of UK data sources relating to the impacts of land use and management on flood generation* R&D Technical Report FD2114/TR.
http://www.defra.gov.uk/science/project_data/DocumentLibrary/FD2114/FD2114_2198_OTH.pdf
- Caldas, J. C.** in III Congresso Ibérico sobre Gestión e Planificación del Agua. Sevilla.
- Carter, C.E.; Bengtson, R.L.; Rogers J.S.** (1988) *Drainage needs as indicated by hight water tables*. *Transactions of the ASAE*, V.31, n.5, p. 1410-1415.
- Coale F.J.** (1999) *The science of phosphorus from agriculture and other sources entering the chesapeake bay*. University of Maryland, College Park at <http://www.arec.umd.edu/Policycenter/Pfisteria/coale/coale.htm>

Christen E.W.; Spoor G. (2000) - Improving mole drainage channel stability in irrigated areas. *Agricultural Water Management* 48 (2001) 239-253.

Curtin, D., H. Steppuhn, F. Selles (1994) Clay Dispersion in Relation to Sodicty, Electrolyte Concentracion, and Mechanical Effect.. *Soil Sci.Soc.Am.J.* 58:995-996.

Custódio, E.Llamas, M. R. (1996) “*Hidrologia Subterranea*”, 2ª edição, Ediciones Omega, Barcelona.

Dils, R.M.;Heathwaite A.L. (1999) The controversial role of tile drainage in phosphorus export from agricultural land. *Water Science and Technology* Vol 39 No 12 pp 55–61 at <http://www.iwaponline.com/wst/03912/wst039120055.htm>

Drewry J.J. ; Lowe, J. A. H.; Paton, R.J. (2000) *Effect of subsoiling on soil physical properties and pasture production on a Pallic Soil in Southland, New Zealand* New Zealand Journal of Agricultural Research, Vol.43:269-277

Edwin D.O (1996) *Control of water pollution from agriculture*. FAO Irr. Drain. nº 55.

Elisabete Serra (2002) *Vulnerabilidade e Risco de Poluição Agrícola no Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Sector da Margem Esquerda do Rio Guadiana)*, Trabalho de licenciatura. Instituto Superior Técnico.

Harrison D.F.; Cameron K.C.; McLaren R.G. (1994) Effect of subsoil loosening on soil physical properties, plant root growth, and pasture yield , *Journal of Agricultural Research*, Vol.37: 559-567

Leeds-Harrison, P.B.; Spoor; G.; Godwin, R.J. (1982) *Water flow to mole drains. J. Eng. Res.* 27:81-91.

Matias, S.C.E. (2002) *Estudo químico da água de rega e da drenagem num solo Mediterrâneo*. Trabalho de Fim de Curso em Engenharia dos Recursos Hídricos. Universidade de Évora.

Matos, L.S.D. (1998) Estudo do efeito da subsolado num solo Mediterrâneo regado por sulcos. Dissertação apresentada à Universidade de Évora para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Solo e da Água. Évora.

Media releases (1995) *Minimising nutrient loss would protect rivers and farms at*
<http://enterprise.canberra.edu.au/WWW/wwwmediareleases.nsf/0/8e6bfe55c170d4d04a2566880033af7c?OpenDocument>

Moukhtar M.M.; El-Hakim M.H.; Abdel-Mawgoud ; Nagib Abdel-Aal; Shewikhand M.B. ; Abdel-Khalik M.L.I. (2003) *Drainage and role of mole drains for heavy clay soils under saline watertable*, Paper No 078. Presented at the 9th International Drainage Workshop, September 10 13, Utrecht, The Netherlands.

Mohamed M.Moukhtar, El-Sayed El-Hadidy, and Mohamed .A.B.El Shewikh^{34th}
(2004) *Crop Production and Drainage in Conjunction with subsoiling Role in Deteriorated Egyptian*, Soil International Crop Science Congress at
http://www.cropsscience.org.au/icsc2004/poster/1/5/1112_moukhtarmm.htm

Paralta, E.; Oliveira, M.M.; Lubczynski M.W.; Ribeiro L.F - *Avaliação da recarga do sistema aquífero dos gabros de Beja segundo critérios múltiplos – disponibilidades hídricas e implicações agro-ambientais* in 6º SILUSBA – Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa

PNUEA (2001) *Programa Nacional para Uso Eficiente da água* – Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.

Raper, R.L., Schwab, E.B., Balkcom, K.S., Burmester, C.H., Reeves, D.W. (2004)
Frequency Of In-Row Subsoiling Required For Southeastern U.S. Silt Loam Soils.

American Society Of Agricultural Engineers. Asae Paper No. 041083. (Technical Handout) August 1-4, 2004, St. Joseph, Minnesota. P. 12.

Projecto POCI/AGR/57719/2004 – Metodologia para um melhor planeamento e gestão do uso do solo agrícola atendendo à vulnerabilidade dos aquíferos à poluição difusa (2005) 1.º Relatório de execução material. O projecto é coordenado pelo LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e conta com a participação do ICAM (Instituto de Ciências Agrárias e Mediterrânicas), do IMAR (Instituto do Mar), e do IST (Instituto Superior Técnico).

Rycroft D.W., Mohamed H.Amer (1995) *Prospects for the drainage of clay soils.* Irrigation and Drainage Paper 51. FAO, Rome.

Richards, L.A. (1954) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* Washington DC, US Department of Agricultural . 160p. (USDA Agricultural Handbook, 60).

Rhoades J.D.; ChanduviF.; Lesch S. (1999) Soil Salinity assessment. Methods na interpretation of electrical conductivity measurements. FAO Irr. Drain. nº 57.

Rowell D.L. (1996) *Soil Science: Methods and Applications.* 3ª ed. Addison Wesley. Longman Limited. England.

Santos, C. A. (1995) *Estudo da subsolado e drenagem toupeira nas condições hidropedológicas dum solo argiluiado regado por sulcos.* Trabalho de fim de curso. Universidade de Évora, Évora.

Santos F.L. (1999) *Movimento e qualidade de água na zona vadosa. Conceitos, Métodos e Técnicas de Controlo.* Publicações “Universidade de Évora” Série: Ciências da Natureza e do Ambiente. Nº 2.

Serralheiro, R.P. (1980) *Hidráulica agrícola II, Texto de apoio didáctico.* Faculdade de Ciências Agrárias. Huambo.

Serralheiro, R.P. (1992) *Qualidade da água: impacto na agricultura.* Encontro Técnico Água e Agricultura. Não Publicado.

Serralheiro, R.P.; Oliveira, M.R. (1994) *Furrow irrigation on a subsoiled Mediterranean brown soil: water balance and root growth*. Report nº.94_A-022 to the XII CIGR World Congress and AgEnG'94 Conference. Milano, Italy.

Serralheiro, R.P.; Bettencourt, A; Fernandes, J.P; Carvalho, J.M.; Pinto, P. (1996) *Recursos hídricos do Alentejo. Perspectivas de utilização sustentável*. Évora, Coleção "Publicações Universidade de Évora", série Ciências da Natureza e Ambiente, nº 1.

Serralheiro, R. P.; (2004) - *O Futuro do Regadio e a Protecção do Ambiente*, Lição inaugural do ano lectivo 2003/2004. Universidade de Évora. At <http://www.unizar.es/fnca/docu/docu26.doc>

Shainberg, L., J.D. Rhoades, e J. Prather (1980) *Effect of Low Concentration of Clay Dispersion and Hydraulic Conductivity of a Sodic Soil*. Soil.Sci.Soc.Am.J. 45:273-277.

Sousa, E.C.; Perdigão, A. M., (1985) *Soils with drainage problems in Portugal. Seminars on Drainage*, ICID national committees of Portugal and Federal Republic of Germany, Lisboa.

Sposito, G. (1989) *The chemistry of soils*. Oxford Univ. Press, New York.

Stigter, T.Y.; Dill, A.C. (1999) *Limitações do modelo DRASTIC. Aplicação a duas regiões algarvias contaminadas por nitratos*. Seminário sobre Águas Subterrâneas. LNEC, Lisboa.

Tiercelin, J.P. (1998) *Traité d'Irrigation*, p.p 640-687. Lavoisier Tec & Doc. Paris.

Weyseure G. (2001) *Drainage engineering*. Modulo 9 .Free University of Brussels, Belgium.

**Wild, A. (1988) *Russell's soil conditions & plant growth*. New York, Longman Scientific
& Technical**

