



# INFLUÊNCIA DA REGA E DO REGIME HÍDRICO NO COMPORTAMENTO DA CULTIVAR CORDOVIL (*Olea europaea* L. cv. CORDOVIL) EM POVOAMENTOS DE BAIXA DENSIDADE NO BAIXO ALENTEJO

*Alice de Fátima Palma Fernandes Ramos*

Tese apresentada à Universidade de Évora  
para obtenção do Grau de Doutor em Ciências da Engenharia do Território e Ambiente  
Especialidade: Engenharia dos Biotistemas

ORIENTAÇÃO: *Prof. Doutor Francisco Lúcio dos Reis Borges Brito dos Santos*

ÉVORA, FEVEREIRO DE 2013













# **INFLUÊNCIA DA REGA E DO REGIME HÍDRICO NO COMPORTAMENTO DA CULTIVAR CORDOVIL (*Olea europaea* L. cv. CORDOVIL) EM POVOAMENTOS DE BAIXA DENSIDADE NO BAIXO ALENTEJO**

---

*Alice de Fátima Palma Fernandes Ramos*

Tese apresentada à Universidade de Évora  
para obtenção do Grau de Doutor em Ciências da Engenharia do Território e Ambiente  
Especialidade: Engenharia dos Biosistemas

ORIENTAÇÃO: *Prof. Doutor Francisco Lúcio dos Reis Borges Brito dos Santos*

ÉVORA, FEVEREIRO DE 2013



As atividades desenvolvidas estiveram integradas no projeto:

*AGRO 728 - Influência da rega e do controlo fitossanitário na produtividade e qualidade do azeite de olivais tradicionais da margem esquerda do Guadiana”* cujo responsável foi o Professor Doutor Francisco Lúcio dos Reis Borges Brito dos Santos da Universidade de Évora.



Ao longo do documento usou-se como separador decimal o ponto “.”.



*À minha mãe.*  
*À memória do meu pai.*





## **Agradecimentos**

Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao meu orientador, Professor Doutor Francisco Lúcio dos Reis Borges Brito dos Santos, por ter possibilitado a execução deste trabalho por todo o empenho, ajuda, disponibilidade e incentivo que sempre demonstrou e o tempo que dedicou à revisão cuidada desta tese. Sendo também o coordenador do projeto Agro 728 agradeço-lhe a forma ágil como procedeu à aquisição dos equipamentos que permitiram a concretização do todo o trabalho de campo;

Aos bolsеiros do projeto Agro 728 pelo empenho e profissionalismo que dedicaram às tarefas inerentes ao trabalho de campo;

Ao Eng.<sup>o</sup> José Casimiro Martins e Eng.<sup>a</sup> Maria da Conceição Gonçalves, investigadores do INIA-Oeiras, pela valiosa ajuda na descrição do perfil do solo e na caracterização física, química e hidrológica do perfil do solo;

Ao Eng.<sup>o</sup> Luís Boteta, técnico do COTR, pela colaboração, simpatia e disponibilidade constante;

Ao Dr. Enrique Fernández (Instituto de Recursos Naturais e Biológicos, Sevilha) pelos ensinamentos prestados relativamente ao método do impulso de calor;

Ao Professor Paulo Infante pela pelas sugestões e comentários relativos a tratamento estatístico dos dados;

A todos os funcionários da Herdade dos Lameirões em especial ao Eng.<sup>o</sup> Borges pela simpatia e condições logísticas que sempre dispensou para a elaboração deste trabalho;

À Cooperativa Agrícola de Moura e Barrancos, em especial ao Eng.<sup>o</sup> João e Dona Catarina pela execução das análises químicas ao azeite;

À Eng.<sup>a</sup> Isabel Baer, assistente do Instituto Politécnico de Beja, pelo auxílio prestado na execução das análises químicas ao azeite.



## RESUMO

A escassez de água na bacia mediterrânica, e as alterações climáticas previstas tornam relevante o estudo do comportamento da oliveira sob diferentes regimes hídricos. Decisões estratégicas de rega, com uma gestão prudente entre a transpiração e a água disponível garantem elevadas produções de azeite. Este estudo teve como objetivos otimizar a condução da rega com conhecimento da evapotranspiração e obter azeite com qualidade DOP Moura. Para tal, instalaram-se quatro tratamentos: tratamento A, rega plena; tratamento B, rega deficitária sustentada; tratamento C, rega deficitária controlada e tratamento D em sequeiro. Concluiu-se que: (1) a técnica do impulso de calor respondeu de forma adequada à dinâmica solo-planta-atmosfera; (2) a estratégia de rega B mostrou-se mais adequada para o olival e variedade em estudo; (3) a rega influenciou a produção final não interferindo no comportamento químico e sensorial do azeite; (4) a deteção remota mostrou-se uma ferramenta promissora na estimativa da transpiração parcelar.

**Palavras-chave:** *Olea europaea* L., evapotranspiração, impulso de calor, extrapolação da transpiração, qualidade do azeite.



# **Influence of irrigation and water regime on the behavior of cordovil cultivar (*Olea europaea* L. cv. Cordovil) in low-density stand in Baixo Alentejo**

## **ABSTRACT**

Water scarcity in the Mediterranean basin and the climatic changes make essential to study the behavior of olive trees under different water regimes. Strategic water applications and prudent water management between tree transpiration and soil water availability ensure high oil yields. The purpose of this study is to define olive water requirements and produce quality oil to retain the Moura denomination of origin (DOP). Four irrigation treatments was implemented: treatment A, full-rate-irrigation; treatment B, sustained deficit irrigation, treatment C, regulated deficit irrigation and treatment D a dry farming. Results show that: (1) heat pulse technique adequately responds to soil-plant atmosphere dynamic; (2) treatment B is the most appropriate irrigation regime for the studied cultivar; (3) the water regimes has different impact on oil production but with no implications on chemical and sensorial characteristics; (4) remote sensing is a promising tool to upscale olive tree transpiration rates.

**Keywords:** *Olea europaea* L., evapotranspiration, heat-pulse, stand transpiration, olive oil quality.



# ÍNDICE GERAL

Agradecimentos.....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xxi
ÍNDICE DE QUADROS.....	xxvii
LISTAS DE SÍMBOLOS.....	xxix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xxxiii
1. INTRODUÇÃO GERAL. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO.....	3
1.1. Conjuntura atual da olivicultura.....	3
1.2. Enquadramento .....	7
1.3. Aplicação do estudo .....	8
1.4. Objetivos .....	10
1.5. Estrutura do trabalho .....	11
1.6. Referências Bibliográficas .....	13
2. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DAS SUAS COMPONENTES EM ESPÉCIES LENHOSAS.....	17
2.1. Introdução .....	17
2.2. Metodologia.....	21
2.2.1. Suporte arbóreo monitorizado .....	21
2.2.2. Avaliação da evapotranspiração.....	24
2.2.3. Avaliação da transpiração utilizando a planta como biosensor .....	37
2.2.3.1. Princípios da técnica do impulso de calor .....	37
2.2.3.2. Origem da técnica do impulso de calor .....	38
2.2.3.3. Instalação dos sensores de fluxo de seiva.....	42
2.2.4. Determinação da evaporação do solo .....	45
2.3. Resultados e discussão.....	50
2.3.1. Quantificação da evapotranspiração pelo balanço de água no solo.....	50
2.3.2. Quantificação das componentes da evapotranspiração.....	58
2.3.2.1. Transpiração .....	58
2.3.2.2. Transpiração relativa .....	63
2.3.3. Evaporação do solo.....	65
2.3.4. Comparação entre a transpiração avaliada pelo método do fluxo de seiva (impulso de calor) e a evapotranspiração estimada pelo método do balanço de água no solo .....	66

2.4.	Conclusão .....	68
2.5.	Artigo 1 .....	71
2.6.	Referências Bibliográficas .....	85
3.	EXTRAPOLAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO PARA A PARCELA, MODELAÇÃO DA CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA E COEFICIENTES CULTURAIS .....	93
3.1.	Introdução .....	93
3.2.	Metodologia .....	97
3.2.1.	Descrição do local de ensaio .....	97
3.2.2.	Avaliação da área foliar por unidade de superfície .....	98
3.2.3.	Estimativa da condutância estomática a partir da transpiração avaliada com a técnica do impulso de calor .....	99
3.2.4.	Extrapolação da transpiração recorrendo ao fluxo de seiva monitorizado em árvores individuais e à informação biométrica.....	101
3.3.	Resultados e discussão .....	107
3.3.1.	Extrapolação da transpiração à escala da parcela através da transpiração avaliada em árvores individuais e de informação biométrica .....	107
3.3.2.	Modelação da condutância estomática através da integração das características fisiológicas da oliveira, dados climáticos e disponibilidade hídrica do solo .....	112
3.3.3.	Análise conjunta das cinéticas diurnas da condutância estomática, transpiração e variáveis ambientais para as diferentes estratégias de rega.....	115
3.3.4.	Coefficiente cultural e coeficiente de stress hídrico.....	119
3.4.	Conclusão .....	123
3.5.	Artigo 2 .....	125
3.6.	Referências Bibliográficas .....	139
4.	QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO OBTIDA NAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE REGA – CORRELAÇÃO COM A COMPOSIÇÃO QUÍMICA E SENSORIAL DO AZEITE .....	145
4.1.	Introdução .....	145
4.2.	Metodologia .....	150
4.2.1.	Descrição do dispositivo experimental.....	150
4.2.2.	Indicadores de défice hídrico .....	151
4.2.3.	Avaliação do crescimento dos ramos .....	152
4.2.4.	Índice de maturação .....	153
4.2.5.	Colheita, extração e produtividade do azeite .....	155
4.2.6.	Parâmetros físico-químicos e sensoriais do azeite .....	157
4.2.7.	Análise estatística.....	159



4.3.	Resultados e discussão .....	160
4.3.1.	Efeito dos tratamentos de rega no desenvolvimento vegetativo e na produção final de azeitona e azeite.....	160
4.3.2.	Eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa na produção de azeite .....	166
4.3.3.	Parâmetros de qualidade do azeite produzido .....	168
4.3.4.	Relação entre os mecanismos fisiológicos e a produtividade .....	174
4.3.4.1.	Potencial hídrico foliar .....	175
4.3.4.2.	Condutância estomática .....	181
4.4.	Conclusão .....	184
4.5.	Artigo 3 .....	187
4.6.	Referências Bibliográficas .....	199
5.	MODELAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO E ESTIMATIVA DE COEFICIENTES CULTURAIS COM RECURSO À DETEÇÃO REMOTA E PARÂMETROS MICROMETEOROLÓGICOS .....	209
5.1.	Introdução .....	209
5.2.	Metodologia .....	213
5.2.1.	Descrição do local em estudo.....	213
5.2.2.	Fonte de dados.....	214
5.2.3.	Base de dados e métodos estatísticos.....	215
5.3.	Resultados e discussão .....	219
5.4.	Conclusão .....	224
5.5.	Referências Bibliográficas .....	226
6.	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS.....	231
6.1.	Conclusões Gerais .....	231
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros .....	233
6.3.	Referências Bibliográficas .....	235



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Localização da Herdade dos Lameirões georeferenciada no Alentejo, concelho de Moura e no distrito de Beja (lat. 38°05'15''N, long. 07°16'39'', alt. 75 m). .....	22
Figura 2.2 - a. porte médio da oliveira do pomar; b. fruto na fase inicial de maturação o que corresponde ao estágio 81 da escala BBCH.....	23
Figura 2.3 - a. área humedecida por cada gotejador; b. vista geral da área molhada pelos gotejadores ao longo da linha. Em média, o diâmetro molhado é de 0.66 m e a área molhada de 0.34 m <sup>2</sup> .....	25
Figura 2.4 - Perfil do solo analisado em dezembro de 2005, onde se observam os horizontes A, Bw e C. Na figura observa-se ainda que o horizonte C constituído por material originário é bastante superficial o que limita a expansão do sistema radical em profundidade.....	25
Figura 2.5 - Avaliação da humidade do solo. a. sensor Watermark; b. datalogger para recolha periódica da informação proveniente dos watermarks.....	28
Figura 2.6 - Curvas características da água do solo correspondente ao solo Vcx obtidas a partir de valores experimentais por diferentes métodos e de ajustamentos com os modelos de van Genuchten. a. profundidade de 0-0.18 m; b. profundidade 0.18-0.45 m. ◆ caixa de sucção e placas de pressão, △ evaporação, ___ ajustamento ao modelo van Genuchten.....	32
Figura 2.7 - Curvas da condutividade hidráulica em solo insaturado correspondente ao solo Vcx obtidas a partir de valores experimentais por diferentes métodos e de ajustamentos com os modelos de van Genuchten. a. profundidade de 0-0.18 m; b. profundidade 0.18-0.45 m. ◆ ar quente, △ evaporação, ___ ajustamento ao modelo van Genuchten. ....	33
Figura 2.8 - Modo de instalação de um conjunto de sondas para medir o fluxo de seiva num tronco através da técnica do impulso de calor (vista de perfil). ....	38
Figura 2.9 - a. conjunto de sondas HPV com a sonda de temperatura (ao centro) e os sensores de temperatura a montante e a jusante; b. sistema de aquisição de dados e datalogger Campbell CR 10X. ....	43
Figura 2.10 - a e b. conjunto de sondas HPV após instalação no tronco.....	44

Figura 2.11 - a. microlisímetro tipo utilizado no ensaio; b. microlisímetro instalado na zona humedecida pelos gotejadores.....	46
Figura 2.12 - Relação entre a humidade volumétrica do solo, a evaporação, a evapotranspiração de referência e a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela copa. A equação da curva é: $y = \frac{1}{(13.87\theta_{10} + 4.833)} ((1 - i_c)ET_0)$ ; $r^2 = 0.77$ .....	47
Figura 2.13 - Humidade volumétrica do solo avaliada com sensores watermark colocados na zona de influência dos gotejadores desde março e novembro de 2006. — tratamento A; — tratamento B; — tratamento C. A zona a cinzento corresponde aos intervalos durante os quais os sensores watermark perderam a eficácia. ....	50
Figura 2.14 - Humidade volumétrica do solo avaliada com a sonda profile probe PR1 da Delta T. As medições efectuaram-se em tubos de acesso colocados na zona de influência dos gotejadores no período compreendido entre março e outubro de 2006. —♦— tratamento A; —■— tratamento B; —▲— tratamento C. ....	52
Figura 2.15 - Componentes do balanço de água no solo durante a época de rega de 2006. — Precipitação; — rega; ▲ armazenamento de água no solo. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D.....	54
Figura 2.16 - Componentes do balanço de água no solo durante a época de rega de 2007. — Precipitação; — rega; ▲ armazenamento de água no solo. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D.....	55
Figura 2.17 - Evolução sazonal da transpiração e da evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith. — evapotranspiração de referência; — tratamento A; — tratamento B; — tratamento C; — tratamento D. a. ano de 2006 e b. ano de 2007. ....	60
Figura 2.18 - Cinética diária da transpiração realizada entre os dias 10 de julho e 15 de julho de 2007. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D....	62
Figura 2.19 - Valores de transpiração relativa calculada pelo método do impulso de calor. — tratamento B; — tratamento C; — tratamento D. a. ano de 2006 e b. ano de 2007.....	64
Figura 2.20 - Evolução da evaporação do solo no tratamento A em três ciclos de dessecação. ■ 1º ciclo; ■ 2º ciclo; ■ 3º ciclo.....	65





















Figura 3.1 - Fotografias hemisféricas obtidas nos quatro quadrantes (Norte, Sul, Este e Oeste) da árvore monitorizada no tratamento A. Imagens capturadas em 2006.....	99
Figura 3.2 - Processo de extrapolação (scaling-up) da transpiração de árvores individuais para uma parcela do olival. ....	102
Figura 3.3 - Avaliação dos parâmetros biométricos na amostra de árvores representativas do agregado. a. medição do diâmetro do tronco à altura do peito; b. avaliação da área da copa projetada. ....	103
Figura 3.4 - Valores de transpiração de árvores individuais, da representativa do agregado (parcela) e desvio padrão para o ano de 2006.  transpiração avaliada em árvores individuais;  tratamento A;  tratamento B;  tratamento C;  tratamento D do agregado. Os valores da transpiração estimados para o agregado são médias (n=11) e as barras verticais correspondem ao desvio padrão.....	109
Figura 3.5 - Relação entre a condutância estomática e o déficit de pressão de vapor.  tratamento A;  tratamento B;  tratamento C;  tratamento D. Valores horários compreendidos entre as 5:00 e as 18:00 horas.....	113
Figura 3.6 - Valores de condutância estomática relativa calculados ao longo da época de rega de 2006.  tratamento B;  tratamento C;  tratamento D.....	114
Figura 3.7 - Cinéticas diurnas (6:00 às 18:00 GMT) de condutância estomática, transpiração, déficit de pressão de vapor e radiação líquida para o período de 3 de julho a 13 de julho de 2006.  tratamento A;  tratamento B;  tratamento C;  tratamento D.....	116
Figura 3.8 - Variação horária no período diurno (6:00 às 18:00 GMT) da transpiração e do déficit de pressão de vapor para o conjunto de medições compreendidas entre 3 de julho e 13 de julho de 2006 no tratamento A.  transpiração;  déficit de pressão de vapor. ....	118
Figura 3.9 - Variação horária no período diurno (6:00 às 18:00 GMT) da transpiração e da condutância estomática para o conjunto de medições compreendidas entre 3 de julho e 13 de julho de 2006 no tratamento A.  transpiração;  condutância estomática. ....	119
Figura 4.1 - a. porómetro de difusão de fluxo contínuo; b. pormenor da medição da condutância na página inferior folhas hipostomáticas. ....	151
Figura 4.2 - a. câmara de pressão acoplada à garrafa de azoto; b. metodologia usada na medição do potencial hídrico foliar. ....	152













Figura 4.3 - a. identificação das árvores onde se procedia à monitorização do crescimento dos ramos e frutos, cada árvore era reconhecida através de uma fita sinalizadora onde estava inscrito o tratamento de rega e o número da árvore dentro da amostra; b. identificação dos ramos onde se monitorizava o crescimento. ....	153
Figura 4.4 - Avaliação do índice de maturação de acordo com Hermoso <i>et al.</i> (1991). a. divisão das azeitonas em grupos de acordo com o estado de maturação que apresentam; b. corte das azeitonas para visualização da extensão da cor do mesocarpo.....	154
Figura 4.5 - Esquema do campo de ensaio e localização dos sub-tratamentos definidos para avaliação da produção de azeitona e azeite. ....	155
Figura 4.6 - a. colheita mecânica de azeitona; b. acondicionamento e identificação das amostras recolhidas nos diferentes tratamentos estabelecidos. ....	156
Figura 4.7 - Sistema Abencor. a. moinho de martelos; b. abencor; c. centrifugadora. ....	156
Figura 4.8 - a. equipamento de ressonância magnética; b. tubo de ensaio com a pasta seca para determinação da percentagem em azeite.....	157
Figura 4.9 - Potencial hídrico foliar de base e potencial hídrico mínimo registado nos tratamentos regados (A, B e C) durante a época estival de 2006.  potencial hídrico foliar de base;  potencial hídrico dos ramos. a. tratamento A, b. tratamento B e c. tratamento C .....	176
Figura 4.10 - Potencial hídrico foliar de base e potencial hídrico mínimo registado nos tratamentos regados (A, B e C) durante a época estival de 2007.  potencial hídrico foliar de base;  potencial hídrico mínimo. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D.....	179
Figura 4.11 - a. relação entre o défice de pressão de vapor e o potencial hídrico dos ramos ao meio-dia solar nos diferentes tratamentos de rega em 2006; b. relação entre o défice de pressão de vapor e o potencial hídrico dos ramos ao meio-dia nos diferentes tratamentos de rega em 2007.  tratamento A;  tratamento B;  tratamento C;  tratamento D.....	180
Figura 4.12 - Condutância estomática medida ao meio-dia solar (13:30 GMT).  tratamento A;  tratamento B;  tratamento C;  tratamento D. a. 2006 e b. 2007.....	182
Figura 5.1 - Curvas de reflectância espectral média de vegetação e solo.....	212

Figura 5.2 - Relação entre a transpiração obtida experimentalmente e o índice de realce da vegetação normalizado ( $EVI^*$ ). Os valores da transpiração foram avaliados pela técnica do impulso de calor. Os valores de  $EVI$  foram obtidos da plataforma MODIS e referentes à Herdade dos Lameirões durante o período experimental de 2006. ( $T = 1.88 (1 + e^{-2.76EVI^*})$ ;  $r^2=0.66$ )..... 217

Figura 5.3 - Relação entre a transpiração normalizada, obtida experimentalmente, e a temperatura máxima do ar. Os valores da transpiração foram avaliados pela técnica do impulso de calor e os seus valores foram normalizados. Os valores de  $t_a$  foram registados na estação meteorológica da Herdade dos Lameirões durante o período experimental de 2006.  $T^* = 0.761 \left( 1 + e^{-\frac{(t_a-22.49)}{0.55}} \right)$ ;  $r^2=0.70$ ).....218

Figura 5.4 - Evolução temporal da transpiração (●) e índices de vegetação, NDVI (◆) e  $EVI$  (■). Os valores das três variáveis foram medidos na Herdade dos Lameirões e correspondem a médias de 16 dias e numa escala temporal que teve início no dia 1 de janeiro..... 220

Figura 5.5 - Valores de  $T$  avaliados experimentalmente e estimados com base no índice de vegetação  $EVI^*$  e  $t_a$  (°C). Os valores referem-se ao ano de 2006 e foram avaliados e estimados na Herdade dos Lameirões. ( $r^2 = 0.95$ ;  $RMSE = 0.147 \text{ mm d}^{-1}$ ) ..... 221

Figura 5.6 - Evolução sazonal da transpiração avaliada (●) e da transpiração estimada (○) através de  $EVI^*$  e  $t_a$  (°C). Valores referentes ao período experimental de 2006 e registados na Herdade dos Lameirões. .... 222

Figura 5.7 - Valores de transpiração  $T$  normalizados, avaliados experimentalmente e estimados com base no índice de vegetação  $EVI^*$  e  $t_a$  (°C). Os valores referem-se ao ano de 2007 e foram avaliados e estimados na Herdade dos Lameirões. .... 223

Figura 5.8 - Evolução sazonal dos valores de  $K_c$  ( $T/ET_0$ ) obtidos com base na estimativa de  $T$  a partir de  $EVI^*$  e  $t_a$  (○) e os obtidos com base nos valores de  $T$  avaliados experimentalmente (●). Os valores referem-se ao ano de 2006 e foram obtidos na Herdade dos Lameirões (---- $y = 0.00003x^2 - 0.0109x + 1.4727$ ;  $r^2=0.77$  e —  $y = 0.00004x^2 - 0.0135x + 1.7231$ ;  $r^2=0.77$ ).. ..... 224





## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Evolução da produção de azeite em Portugal entre os anos de 1998/99 e 2008/09.....	6
Quadro 2.1 - Descrição do perfil do solo.....	26
Quadro 2.2 - Análise granulométrica, classificação textural e massa volúmica aparente média referentes ao solo Vcx em estudo nas profundidades 0-0.18 m e 0.18-0.45 m.	27
Quadro 2.3 - Características hidrodinâmicas referentes ao solo Vcx em estudo nas profundidades de 0-0.18 m e 0.18-0.45 m. ....	29
Quadro 2.4 - Parâmetros obtidos no ajustamento ao modelo van Genuchten para a curva da retenção de água e da condutividade hidráulica do solo Vcx nas profundidades de 0-0.18 m e 0.18-0.45 m. ....	32
Quadro 2.5 - Valores de precipitação média mensal (mm) medidos na estação meteorológica dos Lameirões nos anos de 2005, 2006 e 2007. ....	35
Quadro 2.6 - Quantidade de água aplicada (l/planta) aos três tratamentos durante o período de tempo correspondente à rega. ....	36
Quadro 2.7 - Aspetos relevantes em relação aos sensores HPV instalados durante os anos de 2006 e 2007. ....	45
Quadro 2.8 - Valores do coeficiente m, em função do volume da copa por unidade de superfície ( $m^3 m^{-2}$ ) para diferentes densidades de plantação ( $Dp$ ). ....	49
Quadro 2.9 - Conteúdo relativo de água útil do solo durante o período de rega dos anos de 2006 e 2007. ....	57
Quadro 2.10 - Evaporação do solo relativa obtida em 2007 através da razão entre a evapotranspiração ( $ET_c$ ) e evaporação do solo ( $E_s$ ). Os valores de transpiração foram avaliados com sensores de fluxo de seiva e a evaporação do solo foi avaliada com microlisímetros.....	66
Quadro 2.11 - Estimativa da transpiração ( $mm dia^{-1}$ ) durante o ano de 2006, através de sensores de fluxo de seiva e estimativa de $ET_c$ ( $mm dia^{-1}$ ) para o mesmo período de tempo com recurso à sonda PR1.....	67
Quadro 3.1 - Características médias estruturais das árvores monitorizadas e do agregado dos diferentes tratamentos. Valores referentes ao ano de 2006. ....	104
Quadro 3.2 - Valores médios mensais de $ET_0$ e de $D_a$ para o ano de 2006. ....	110

Quadro 3.3 - Influência dos tratamentos de rega na transpiração das oliveiras durante o ano de 2006 (média $\pm$ desvio padrão).....	111
Quadro 3.4 - Valores mensais de $K_c$ resultantes da razão $T/ET_0$ entre a transpiração do agregado estimada para os quatro tratamentos ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e os valores da evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) determinados pelo método de Penman-Monteith.....	121
Quadro 3.5 - Valores mensais de $K_s$ para o tratamento C, RDI, e para o tratamento D, conduzido em sequeiro, estimados por comparação entre a razão $T_a/ET_0$ para cada um dos tratamentos e a razão $T/ET_0$ para o tratamento B. ....	122
Quadro 3.6 - Comparação entre os valores mensais de $K_c$ obtidos em vários estudos efetuados no sul de Espanha e os obtidos na região de Moura por Ramos e Santos (2009). ....	123
Quadro 4.1 - Produção de azeitona e de azeite (media $\pm$ desvio padrão), água aplicada e eficiência do uso da água para os diferentes tratamentos de rega.....	163
Quadro 4.2 - Crescimento dos ramos (média $\pm$ desvio padrão) para os tratamentos de rega implementados. Valores referentes aos anos de 2006 e 2007.....	166
Quadro 4.3 - Produção de azeitona e azeite, PAR interceptada pela copa, eficiência do uso da radiação para a produção de azeite. Parâmetros avaliados durante os anos de 2006 e 2007 e considerando os tratamentos A, B, C e D.....	168
Quadro 4.4 - Índices de qualidade do azeite proveniente da cv. Cordovil. Consideraram-se os 4 tratamentos (média $\pm$ desvio padrão). ....	170
Quadro 4.5 - Atributos sensoriais do azeite proveniente da cv. Cordovil para os quatro tratamentos de rega.....	173
Quadro 5.1 - Média e matriz de correlação entre a transpiração $T$ , temperatura máxima do ar, $t_a$ , radiação líquida, $R_n$ , déficit de pressão de vapor de água na atmosfera, $D_a$ , evapotranspiração de referência, $ET_0$ , índices de vegetação, $EVI$ e $NDVI$ , índices de vegetação normalizados, $EVI^*$ e $NDVI^*$ , para o ano de 2006 na Herdade dos Lameirões.....	216

## LISTAS DE SÍMBOLOS

<b>Símbolos</b>		<b>Unidades</b>
$A_{cc}$	área média da copa das árvores do agregado	$m^2$
$A_{cm}$	área da copa da árvore monitorizada	$m^2$
$A_{ct}$	área total da copa do agregado	$m^2$
$A_i$	área representativa de cada termopar	$m^2$
$alt$	altitude	m
$\cos \theta$	coseno do ângulo zenital ao meio-dia solar	rad
$C_p$	calor específico do ar	$1.013 \text{ kJ kg } ^\circ\text{C}^{-1}$
$D$	drenagem do solo por percolação	mm
$D_a$	défice de pressão de vapor	kPa
$D_p$	densidade de plantação	árvores $ha^{-1}$
$D(\theta)$	difusividade da água no solo	$cm^2 \text{ dia}^{-1}$
$E_s$	evaporação de água do solo	$mm \text{ dia}^{-1}$
$ET_c$	evapotranspiração cultural	$mm \text{ dia}^{-1}$
$ET_0$	evapotranspiração de referência	$mm \text{ dia}^{-1}$
$EUR$	eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa	
$EVI$	índice de realce da vegetação	
$EVI^*$	índice de realce da vegetação normalizado	
$F_L$	fração volumétrica de água na madeira	
$F_M$	fração volumétrica de madeira	
$fIRS$	Absorção da luz pelo coberto	
$g_c$	condutância estomática da copa	$m \text{ s}^{-1}$
$g_s$	condutância estomática de folhas individuais	$mm \text{ s}^{-1}$ ou $mol \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$H$	raio da seção de madeira não condutora de seiva	m
$h$	pressão efetiva	cm de água ou kPa
$l$	quantidade de água aplicada pela rega	mm
$IM$	índice de maturação	
$i_c$	fração da radiação fotossinteticamente ativa	
$i_{cn}$	fração da radiação fotossinteticamente ativa difusa interceptada pela copa	
$J$	densidade do fluxo de seiva	$m \text{ s}^{-1}$
$J_s$	fluxo de seiva total	$m^3 \text{ h}^{-1}$
$J_{sagregado}$	fluxo de seiva total do agregado	$m^3 \text{ h}^{-1}$

$K$	duração do dia	s
$K_c$	coeficiente cultural	
$K(h)$	condutividade hidráulica em solo insaturado	cm dia <sup>-1</sup>
$K_s$	condutividade hidráulica em solo saturado	cm dia <sup>-1</sup>
$K_s$	coeficiente de stress	
$K_1$	coeficiente de extinção do copado para a radiação fotossinteticamente ativa em dias de céu limpo	
$K_2$	Coeficiente de extinção do copado para a radiação fotossinteticamente ativa em dias de céu nublado	
$K_{232}$	absorvância do ultravioleta no comprimento de onda 232 nm	
$K_{270}$	absorvância do ultravioleta no comprimento de onda 270 nm	
$LAI$	índice de área foliar	
$lat$	índice de área foliar	
$L_d$	latITUDE	Grau
$lon$	densidade da área foliar do copado	m <sup>2</sup> m <sup>-3</sup>
$L_s$	longITUDE	Grau
$M_D$	leituras da sonda profile probe	mvolts
$M_F$	massa de amostra seca	kg
$M_L$	massa de madeira contida numa amostra de madeira húmida	kg
$m$	coeficiente que é função da densidade de plantação e do volume do copado	
$NDVI$	índice de vegetação por diferenças normalizadas	
$NDVI^*$	índice de vegetação por diferenças normalizadas	
$NIR$	normalizado	
$n, \alpha, \ell$	banda espectral de infravermelho próximo	
$P$	parâmetros de ajustamento de van Genuchten	
$PAR$	quantidade de precipitação ocorrida	mm
$Prof$	radiação fotossinteticamente ativa	MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
	profundidade	m
$Q$	fluxo volumétrico de seiva no tronco	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ou l h <sup>-1</sup>
$q(z,t)$	fluxo médio à profundidade z no tempo t	mm h <sup>-1</sup>
$R$	raio do tronco	m
$REW$	conteúdo relativo de água útil no solo	

$R_{m\acute{a}x}$	conteúdo de água correspondente à capacidade de campo	mm
$R_{min}$	conteúdo mínimo de água no solo durante o período experimental	mm
$R_w$	conteúdo de água no solo	mm
$r$	raio do ponto do tronco onde se mede a velocidade da seiva	m
$red$	banda espectral do vermelho	
$SWA$	área média do xilema da árvore monitorizada	$m^2$
$SWA_{agregado}$	área média do xilema do agregado	$m^2$
$SWA_n$	área média do xilema correspondente a cada sensor de temperatura	$m^2$
$T$	transpiração	$mm\ dia^{-1}$
$T (l\ dia^{-1})$	transpiração média diária do agregado	$l\ dia^{-1}$
$T (mm\ dia^{-1})$	transpiração média diária do agregado	$mm\ dia^{-1}$
$T^*$	transpiração média do agregado constituinte de cada tratamento normalizada	
$T_c$	transpiração da copa	$l\ s^{-1}\ m^{-2}$ ou $l\ h^{-1}$
$T_n$	transpiração no tempo n	$l\ h^{-1}$
$T_{n+1}$	transpiração no tempo n+1	$l\ h^{-1}$
$t_z$	tempo ao fim do qual $X_u$ iguala $X_d$	s
$t_a$	temperatura máxima do ar	$^{\circ}C$
$t_1$	tempo inicial do intervalo	dia ou min
$t_2$	tempo final do intervalo	dia ou min
$V$	velocidade de propagação do impulso de calor	$m\ s^{-1}$
$V_c$	velocidade do impulso de calor corrigida	$m\ s^{-1}$
$VI$	índice de vegetação	
$VI^*$	índice de vegetação normalizado	
$VI_{max}$	índice de vegetação máximo	
$VI_{min}$	índice de vegetação mínimo	
$V_i$	soma ponderada da velocidade do fluxo de seiva	$m\ s^{-1}$
$V_T$	volume de amostra recolhida	$m^3$
$V_n$	velocidade média corrigida do fluxo de seiva	$m\ h^{-1}$
$X_d$	distância entre a sonda de calor e a sonda de temperatura colocada a jusante	m

$X_u$	distância entre a sonda de calor e a sonda de temperatura colocada a montante	m
$Z$	profundidade para a qual se quer determina a condutividade hidráulica	m ou cm
$Z_r$	profundidade de referência	m ou mm
$z_1$	profundidade inicial do intervalo considerado	m ou mm
$z_2$	profundidade final do intervalo considerado	m ou mm
$\Delta s$	variação do armazenamento de água no solo	mm
$\Delta t$	intervalo de tempo	dia ou s
$\Delta z$	intervalo de profundidade	cm ou mm
$\theta$	teor de água existente no solo	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
$\theta_r$	teor de água residual	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
$\theta_s$	teor de água à saturação	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
$\theta_{10}$	humidade volumétrica na camada superficial do solo correspondente a 10 cm	%
$\gamma$	constante psicrométrica	$0.0673 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
$\lambda$	calor latente de vaporização	$2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$
$v$	volume do copado por unidade de superfície	$\text{m}^3 \text{ m}^{-2}$
$\rho$	massa volúmica do ar	$\text{Kg m}^{-3}$
$\rho_L$	massa volúmica da água	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_m$	massa volúmica da madeira seca	$1530 \text{ kg m}^{-3}$
$\tau_{atm}$	transmissividade da atmosfera	
$\psi_b$	potencial hídrico de base	MPa
$\psi_{stem}$	potencial hídrico dos ramos	MPa

## LISTA DE ABREVIATURAS

---

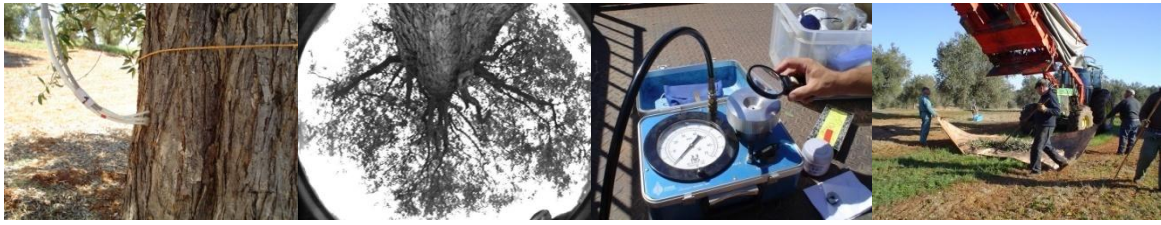
AF	areia fina
AG	areia grossa
AGI	argiloso
BBCH	escala que descreve os estados fenológicos da monocotiledóneas e dicotiledóneas
CHP	compensation heat pulse
COI	Conselho Oleícola Internacional
cv	cultivar
COTR	Centro Operativo e de Tecnologia do Regadio
DHB	diâmetro à altura do peito
DOP	Denominação de Origem Protegida
DRAAL	Direção Regional de Agricultura do Alentejo
EG	elementos grosseiros
FL	franco-limoso
G	argila
GMT	Greenwich Mean Time
Horz	horizonte
HPV	heat pulse velocity
INE	Instituto Nacional de Estatística
L	limo
METRIC	Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MVAM	massa volúmica aparente média
ProDer	Programa de Desenvolvimento Regional
RDI	rega deficitária controlada
RETC	Retention Curve Program for Unsaturated Soils
SDI	rega deficitária sustentada
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land





# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO GERAL. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO



*Neste capítulo faz-se a contextualização do trabalho indicando-se a relevância que o estudo tem no Baixo Alentejo. Apresentam-se os objetivos que estiveram na base da linha de investigação desenvolvida e estabelece-se o elenco da organização do estudo.*



# 1. INTRODUÇÃO GERAL. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

## 1.1. Conjuntura atual da olivicultura

De acordo com o Conselho Oleícola Internacional (COI), a área mundial ocupada pelo olival é de cerca de 9 Mha, com produções de azeite em 2007/2008 a rondar os 2.713 milhões de toneladas. A mesma fonte refere, ainda, que cerca de 93% desta produção está concentrada nos países da bacia mediterrânica, como é o caso de Espanha, Itália, Portugal, Grécia, Tunísia e Marrocos, países igualmente referenciados como os maiores exportadores mundiais de azeite, com um volume total de exportações a alcançar os 88%.

A oliveira (*Olea europaea* L.) é a única espécie da família botânica Oleacea com fruto comestível (Fernández e Moreno, 1999), sendo considerada uma árvore simbólica da bacia mediterrânica, pois constitui parte integrante e significativa do ambiente mediterrânico, tendo recentemente sido reconhecida como cultural e ecologicamente importante para a região. A sua origem atribui-se à Ásia Menor, talvez à Síria ou Palestina, regiões onde foram descobertos vestígios referentes à produção de azeite, nomeadamente fragmentos de vasos datados do início da idade do bronze. Por volta de 3000 anos a.c., a oliveira era já cultivada por todo o crescente fértil, tendo-se propagado depois por toda a costa mediterrânica, onde foram encontradas folhas de oliveira fossilizadas, datadas do Paleolítico e do Neolítico (<http://www.casadoazeite.pt/>). Mais recentemente, a cultura foi introduzida noutros continentes, incluindo as Américas, a Ásia, a África do Sul e a Austrália (Conner, 2005).

Atualmente, pensa-se que a espécie à qual pertence a oliveira, *Olea europaea* L., tenha uma origem híbrida, ou seja fruto do cruzamento de várias espécies. Entre os seus progenitores, cita-se a *Olea africana*, originária da Arábia e do Egito, a *Olea ferruginea*, procedente da Ásia e a *Olea laperrini* abundante no sul de Marrocos e nas ilhas da Macaronésia (<http://www.casadoazeite.pt/>).

Em relação a Portugal, Saldanha (2003) adverte que a oliveira surgiu no Alentejo como resultado da expansão do zambujeiro, espécie bem adaptada às condições mediterrânicas e que, por sua vez, resultou de uma vegetação preexistente que cobria a bacia do mediterrâneo, numa época em que esta possuía um clima mais quente e mais húmido do que o atual. O mesmo autor refere ainda que a existência de zambujeiros no Alentejo, desde tempos mais remotos, permite admitir que a azeitona já aí era conhecida, embora de má qualidade, e que o seu esmagamento para a obtenção de óleo poderia ter ocorrido muito antes de se conhecerem as técnicas de moagem. Em boa verdade, os azeites do Alentejo foram desde há muito identificados e merecem referências históricas e culturais (<http://www.azeitesdoalentejo.com>).

As ocupações sucessivas da região do Alentejo por outros povos não prejudicaram a evolução da cultura da oliveira nem a extração do azeite, havendo mesmo um aperfeiçoamento gradual das técnicas utilizadas. Gouveia (2005) refere que ao longo dos séculos o azeite elaborado no Alentejo alternou entre períodos de abundância e de carência mas, pelas suas características soube resistir a tempos de guerra e de paz, a diferentes modos de fazer política, a sistemas de cultura alternativos, a novas formas de tecnologias extrativas e à concorrência movida por outros óleos e gorduras comestíveis. Assim, a paisagem das regiões de clima mediterrâneo Português é dominada por formações florestais e arbustivas de folhosas esclerófilas perenifólias (<http://www.ensino.uevora.pt/mpa/6ed/>), de que é exemplo a oliveira, que encontra aqui o seu habitat de eleição. Perfeitamente adaptada às altas temperaturas que ocorrem no verão e à grande sazonalidade da precipitação, características típicas do clima mediterrâneo, é uma cultura pouco exigente em água e bastante rústica e que, durante longos anos, ocupou os solos mais delgados e inclinados com pouca aptidão para culturas mais exigentes em solo e água.

A oliveira é, pois, uma espécie particularmente adaptada às condições de sequeiro mediterrânico, conhecida por resistir bem à carência hídrica, tendo desenvolvido adaptações anatómicas e mecanismos fisiológicos que lhe permitem manter as suas funções vitais, mesmo em condições de secura extrema. Na verdade, é uma árvore com baixa taxa de crescimento em que os ajustamentos fisiológicos exercem um papel relevante no seu comportamento

perante a secura, sendo que a tolerância às condições de sequeiro combinam uma baixa condutância estomática foliar com folhas de reduzida área foliar e raízes profundas o que minimiza os rigores do clima e da escassez de água em condições de sequeiro (Conner, 2005). Acresce ainda que a oliveira é hábil em regular a sua transpiração para maximizar a fotossíntese e minimizar as perdas de água, evitando a secura, precursora da formação de embolismo no xilema da árvore. Deste modo, pode dizer-se que os principais mecanismos de que a oliveira dispõe para manter um nível de água adequado ao seu metabolismo durante os períodos secos provêm da sua habilidade para restringir, através do fecho estomático, as perdas de água para a atmosfera. Esta notável resistência da oliveira às condições de secura confere-lhe a capacidade de se desenvolver nesse ambiente exigente e garantir produções comerciais onde a precipitação anual é inferior a 500 mm e a estação seca de 5 a 6 meses (Fernández e Moreno, 1999). Porém, esses mecanismos de tolerância à secura, quando ativados, conduzem a um considerável dispêndio de energia da espécie, em detrimento da formação dos órgãos reprodutivos e do desenvolvimento de novos ramos, o que compromete a produção do ano, assim como a dos anos futuros, bem como a respetiva qualidade (d'Andria, 2008).

A condução da oliveira na bacia mediterrânica, em condições de sequeiro, é feita com compassos largos, (menor ou igual a 100 árvores/ha) mantendo-se por podas acentuadas, copas de pequena dimensão com baixos índices de área foliar, de modo a assegurar diminutas perdas de água por evapotranspiração e, assim, a sobrevivência das árvores durante os longos verões quentes e secos.

Quanto ao azeite, nas últimas décadas, o seu consumo tem sido intimamente relacionado com benefícios para a saúde humana, nomeadamente as suas potencialidades para a proteção contra doenças cardiovasculares, diminuição do risco de certos cancros (mama e do ovário) e controlo de doenças degenerativas (Roche *et al.*, 2000, Menendez *et al.*, 2006 e Kontogianni *et al.*, 2007 citados em Silva 2008). Daí, eventualmente, ser notório o acréscimo no consumo de azeite registado, não só nos países mediterrânicos, onde culturalmente já fazia parte da gastronomia, mas também em países onde tradicionalmente a procura por parte dos consumidores não era expressiva. Perante este facto, e esperando uma continuada mudança de

opinião dos consumidores, em favor do consumo de azeite, empresários agrícolas responderam com a expansão da área agrícola destinada ao olival e, simultaneamente, com conversão dos olivais extensivos, de baixa densidade, considerados olivais marginais, em olivais intensivos, mais produtivos e capazes de garantirem melhores rendimentos económicos, com melhoria e inovação nas técnicas culturais até então aplicadas, incluindo o regadio. Esta intensificação e a competitividade dos olivais tradicionalmente conduzidos em sequeiro vem sendo feita com recurso à aplicação de água de rega, factor de natureza ambiental que mais limitação tem na bacia mediterrânica.

Apesar de Portugal estar entre os sete principais produtores de azeite da Comunidade Europeia, está longe de alcançar a produção de 95 mil toneladas correspondentes ao consumo interno, importando em média cerca de 40 a 50 mil toneladas de outros países, principalmente de Espanha (<http://www.acorianooriental.pt/noticias/view/196015>). Os valores do Quadro 1.1 referem-se à evolução da produção de azeite em Portugal durante o decénio de 1998/99 a 2008/09 e indicam um esforço de melhoria de produtividade para o fim da década, evidenciando também flutuações decorrentes da sensibilidade da produção de azeitona às variações climáticas e aos anos de safra e contra-safra.

Quadro1.1 - Evolução da produção de azeite em Portugal entre os anos de 1998/99 e 2008/09.

Ano	Produção (1.000 ton)
1998/99	35.1
1999/00	50.2
2000/01	24.6
2001/02	33.7
2002/03	28.9
2003/04	31.2
2004/05	41.2
2005/06	29.1
2006/07	47.5
2007/08	36.3
2008/09	53.4

Fonte: COI

## 1.2. Enquadramento

O reconhecido interesse económico, social e ambiental do olival em Portugal, sendo considerado no programa de desenvolvimento regional (ProDeR) como uma fileira prioritária do desenvolvimento agrícola, foram decisivos na seleção da oliveira como objeto de estudo deste trabalho, o qual incidiu sobre um olival de baixa densidade recentemente convertido ao regadio e situado na margem esquerda do Guadiana.

A escolha do local do ensaio resultou da grande expressão que o setor olívicola tem no Alentejo e, muito concretamente, na margem esquerda do Guadiana, comprovado pelo número significativo de pomares existentes nesta região, em relação ao total nacional onde, de acordo com o INE (2009), a área a nível nacional de olival destinado a azeite, é de 331 751 ha dos quais 163 235 ha estão concentrados no Alentejo, decorrendo daí uma ocupação comparativa de 49%. Por ser a cultivar (cv.) Cordovil, conjuntamente com a cv. Galega, uma das mais representativas dos olivais alentejanos (DRAAL, 2007), esta foi eleita como objeto de estudo, quanto à avaliação do seu comportamento quando sujeita a condicionalismos de natureza ambiental e hídrica.

Importa ainda referir que a região onde se desenvolveu o trabalho, a margem esquerda do Guadiana, será abrangida pelo regadio planeado para o perímetro de rega do Alqueva, esperando-se que a curto prazo uma grande maioria dos olivais desta região possa igualmente ser beneficiada. Acresce que, apesar da temática do uso da água por esta espécie ter sido nos últimos anos alvo de estudo especialmente pelos principais países produtores de azeite da bacia do mediterrâneo, em Portugal, esses estudos, bem como o conhecimento das transferências e a determinação da quantidade de água necessária para otimizar a rega, melhorar a eficiência do seu uso pela planta e elevar a produtividade são ainda poucos ou nulos. Daí, os trabalhos de investigação desenvolvidos afigurarem-se de extrema importância não só no que diz respeito à inovação de conhecimento, mas sobretudo na transmissão para um melhor esclarecimento de técnicos, agricultores e gestores sobre as práticas de rega de olivais tradicionais, do uso da água pela planta e da gestão e controlo da mesma na prática da rega.

Cumpra ainda referir que a preferência para o olival de baixa densidade justificou-se pela grande relevância que este tipo de olival tem no Alentejo, quer pela área que ocupa, quer pelo número de agricultores que envolve e que retiram desta atividade agrícola uma parte substancial do seu rendimento anual. Paralelamente, é imprescindível lembrar que esta atividade agrícola de cariz tradicional, praticamente a única a decorrer no inverno, tem exercido um papel importante de agente de promoção da coesão no Alentejo, que importa preservar.

Finalmente, e tendo em conta a baixa produtividade nos olivais tradicionais, mesmo em regadio, não será de descartar a hipótese de, a médio prazo, estes acabarem por dar lugar a olivais mais densos fortemente adotados no Alentejo. De facto, nos últimos anos, o Alentejo tem sido cenário favorável à reconversão dos olivais de baixa densidade em olivais intensivos e superintensivos, reconversão essa que terá, contudo, consequências de natureza ambiental e paisagística que se refletirão na redução da biodiversidade dos ecossistemas e na alteração significativa da paisagem rural. Por essas razões, mas também, porque a produção de azeite desses olivais tradicionais tem elevados padrões de qualidade que, concedendo ao azeite uma identidade única e singular, com características organoléticas do agrado dos consumidores e norma de certificação de qualidade associada à origem abrangendo sobretudo os azeites de “cultivares” alentejanas instaladas nos olivais tradicionais. Neste âmbito, a defesa e implementação da denominação de origem protegida (DOP) dos produtos tradicionais, na qual consta o azeite de olivais tradicionais, confere um estatuto para bem da defesa dos interesses dos consumidores e da preservação deste modo de produzir azeite.

### **1.3. Aplicação do estudo**

A água é imprescindível e assume um papel elementar na melhoria da produção dos olivais tradicionais, sendo impraticável obter melhores produções, diminuir as flutuações resultantes do ciclo de safra e contra-safra, elevar a capacidade produtiva das árvores e garantir qualidade e valor comercial ao produto resultante sem a prática da rega. Sendo a água um



recurso natural, escasso no Alentejo e com valor económico, há necessidade de gerir esse recurso hídrico de forma eficiente, conhecendo com exatidão a quantidade de água consumida e as necessidades hídricas das plantas.

Porém, a previsão desse consumo é complexa sendo o conhecimento das dotações e das eficiências de rega as que maiores incertezas introduzem na determinação das necessidades de água para o olival, daí a necessidade de bem medir variáveis meteorológicas e biológicas de que depende a evapotranspiração da cultura. Em concreto, a evapotranspiração reflete a influência de condicionantes atmosféricas (vento, humidade, défice de pressão de vapor, radiação solar, etc...) das disponibilidades hídricas do solo junto das raízes, da estrutura física do coberto, nomeadamente, a sua rugosidade aerodinâmica e índice de área foliar, e de características morfológicas e resposta fisiológica que controlam a perda de água pelas folhas (Calder, 1990) que importam medir, avaliar e quantificar. Essa quantificação, principalmente da transpiração, principal componente da evapotranspiração cultural ( $ET_c$ ), é uma tarefa difícil pela natureza do fenómeno e pela operacionalidade da estimativa, podendo dizer-se que, em condições normais, a monitorização é feita num número restrito de árvores, por um processo dispendioso e exigente em equipamentos e mão-de-obra especializados.

Ainda que as árvores selecionadas e monitorizadas para a quantificação da transpiração sejam representativas do povoamento vegetal, factores como copas heterogéneas, espaçamento irregular, topografia ondulada e tipo de solo dificultam a estimativa da transpiração média da parcela com base no número limitado de indivíduos monitorizados. Como ressalva, mesmo assim a transpiração média do povoamento vegetal é frequentemente estimada com base em características biométricas medidas numa amostra da população em estudo e generalizada para a todo o povoamento vegetal, num procedimento designado de *scaling-up* na terminologia anglo-saxónica.

Atualmente, a possibilidade de utilização das técnicas de deteção remota com recurso a imagens de satélite tem ajudado a solucionar as limitações da metodologia convencional e através deste processo, alguns parâmetros e variáveis são avaliados e quantificados, fornecendo uma outra oportunidade para estimar as necessidades hídricas de cobertos vegetais e auxiliando na extrapolação do local para o regional. À escala da parcela e até

mesmo à escala regional, a informação pode ser obtida constituindo uma importante técnica de monitorização da dinâmica da vegetação.

#### 1.4. Objetivos

Este trabalho constitui uma proposta alternativa de cálculo do consumo de água em olivais de baixa densidade regados, tendo como objetivos a quantificação do consumo de água efetuado pelas árvores e a caracterização do comportamento das mesmas quando sujeitas a diferentes regimes hídricos e tendo em vista a condução adequada da rega e o melhor aproveitamento do recurso água, bem como a obtenção de acréscimos de produção com a qualidade química e sensorial que caracteriza os azeites DOP de Moura. O consumo de água foi avaliado pela estimativa da transpiração à escala da planta através da técnica do impulso de calor (*heat pulse* na terminologia anglo-saxónica); porém, à escala da parcela o consumo de água foi estimado com recurso a processos biométricos e a informação proveniente de satélites.

O estudo decorreu num olival de baixa densidade ocupado por uma variedade autóctone da margem esquerda do Guadiana e, para alcançar o objetivo principal, foram estabelecidos os seguintes passos e etapas:

- Caracterização dos solos, recorrendo à utilização de parâmetros químicos, físicos e hidrodinâmicos;
- Programação da rega em função da monitorização da água no solo com sensores de humidade;
- Estimativa da transpiração das oliveiras, recorrendo à técnica do impulso de calor com monitorização contínua durante as épocas de rega de 2006 e 2007;
- Estimativa da evapotranspiração do olival com recurso ao método do balanço hídrico do solo, durante as épocas de rega de 2006 e 2007;
- Medição direta da evaporação do solo com recurso a microlisímetros;
- Estabelecimento da correlação entre a  $ET_c$  obtida através do balanço hídrico do solo e da  $ET_c$  obtida através da medição das suas componentes (transpiração e evaporação do solo);

- Monitorização dos parâmetros fisiológicos da planta, i.e, condutância estomática e potencial hídrico foliar e o seu comportamento face a condições ambientais e edáficas prevalentes;
- Identificação do papel da condutância estomática, como regulador da transpiração;
- Estimativa da transpiração à escala da parcela através da transpiração avaliada em árvores individuais e de informação biométrica do agregado (parcela);
- Modelação da condutância estomática através da integração das características fisiológicas da oliveira, de dados climáticos e da disponibilidade hídrica do solo;
- Definição dos valores do coeficiente cultural e de stress para a oliveira instalada em condições de clima mediterrânico;
- Avaliação do impacto dos diferentes tratamentos de rega no desenvolvimento vegetativo e na produção final de azeitona e azeite;
- Identificação das características químicas e sensoriais dos azeites DOP de Moura, provenientes de olivais regados;
- Eleição da melhor estratégia de rega para o olival, estabelecendo o balanço entre a água consumida e a qualidade do azeite produzido;
- Desenvolvimento de um modelo que permita estimar a transpiração através da combinação de dados provenientes da deteção remota e parâmetros micrometeorológicos que possa ser usado a custo baixo pelos técnicos e agricultores.

## **1.5. Estrutura do trabalho**

O trabalho foi dividido em seis partes ou capítulos. O primeiro capítulo consiste numa introdução geral, onde se faz um enquadramento do objeto em estudo e, simultaneamente, justifica-se a importância do mesmo no contexto em que foi desenvolvida a linha de investigação que serviu de base a este trabalho.

No segundo capítulo, estuda-se o solo onde foi implementado o ensaio experimental, considerando as suas características pedológicas, químicas e

hidrodinâmicas, sendo que esta última permite identificar o perfil de extração de água das plantas, a transferência de água no solo por percolação e ascensão capilar e a evapotranspiração da cultura. A identificação das características físicas permite detetar condições potencialmente adversas que limitam a expansão do sistema radical em profundidade e condicionam a instalação dos instrumentos de monitorização de água no solo. Neste capítulo, avalia-se ainda o processo de transpiração da componente arbórea por monitorização de árvores com características idênticas à média do povoamento, a transpiração avalia-se com recurso ao método do impulso de calor e a sua monitorização é feita em contínuo e durante o período do ano correspondente à época de rega. Pretende-se, assim, realçar o papel da árvore como biosensor, com a água na planta a ser o condicionante que interfere diretamente no processo fisiológico da transpiração. Estabelece-se, ainda, a comparação entre a  $ET_c$  avaliada pelo balanço de água no solo e a  $ET_c$  resultante da avaliação das suas componentes.

No terceiro capítulo, constrói-se um padrão de transpiração que permite generalizar o valor desta variável, obtida em árvores isoladas para a parcela em estudo. Simultaneamente, modela-se a condutância estomática da copa através da transpiração do agregado (parcela) e estabelecem-se os valores do coeficiente cultural mensal para situações de conforto hídrico, bem como os valores do coeficiente de stress para situações de défice hídrico em olivais de baixa densidade, na margem esquerda do Guadiana.

No quarto capítulo, avalia-se a produção de azeitona proveniente dos diferentes tratamentos de rega implementados e, simultaneamente, avalia-se a composição química e sensorial do azeite, identificando-se a estratégia de rega que garante maior produção, sem detrimento da qualidade.

No quinto capítulo, procede-se à modelação da transpiração e utiliza-se uma metodologia que envolve dados provenientes da deteção remota e variáveis micrometeorológicas. Posteriormente, procede-se à validação do modelo empírico para o olival em estudo.

No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões gerais e feitas recomendações de carácter prático.

## 1.6. Referências Bibliográficas

Calder, I.A. (1990). Evaporation in the uplands. *John Wiley and Sons, Chichester*.

Conner, D. J. (2005). Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56: 1181–1189.

d’Andria, R. (2008). Olive responses to different irrigation management in the Mediterranean environment. CNR – Institute for Agricultural and Forest Mediterranean Systems. *IV Jornadas de actualización en riego y fertirriego*, Argentina.

DRAAL (2007). Direcção Regional de Agricultura do Alentejo. A olivicultura na margem esquerda do Guadiana. Evolução recente. *VI Feira do Azeite de Vale de Vargo*.

Fernández, J. E. & Moreno, F. (1999). Water use by olive tree. *Journal of Crop Production*, 2(2): 101-162.

Gouveia, J.M.B. (Coord.). (2005). Demonstração de técnicas de gestão da rega do olival e as suas consequências sobre a produção e as características qualitativas do azeite. *Relatório final do projeto Agro 67 (Acção 8.1 do Programa AGRO)*. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.

Saldanha, J. (2003). Azeites e olivais no Alentejo: "montes" com lagar na província transtagana. *Edição adaptada da Tese de Doutoramento "Arquitectura Habitacional Dispersa no Olival do Alentejo Interior"* defendido na Escola Técnica Superior de Arquitectura da Universidade de Sevilha.

Silva, A. A. F. (2008). *Necessidades hídricas e resposta da oliveira (Olea europaea L.) ao deficit hídrico na região da terra quente*. Tese de Doutoramento. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro Vila Real.

Casa do azeite, disponível na:

<http://www.casadoazeite.pt/>, acedido em 18-09-2011.

Centro de estudos e promoção do azeite do Alentejo (CEPAAL), disponível na:  
<http://www.azeitesdoalentejo.com/>, acedida em 18-09-2011.

Conseil Oleicole International (COI), disponível na:  
www: <http://www.internationaloliveoil.org/web/aa-spanish/corp/AreasActivitie/>>, acedido em 18-09-2011.

Instituto Nacional de estatística (INE), disponível na:  
www. ine.pt, acedida em 18-09-2011.

Jornal Açoriano Oriental, disponível na:  
www: <http://www.acorianooriental.pt/noticias/view/196015>, acedido em 18-09-2011.

Universidade de Évora, disponível na:  
www.: [http://www.ensino.uevora.pt/mpa/6ed/acedido em 18-09-2010](http://www.ensino.uevora.pt/mpa/6ed/acedido_em_18-09-2010), acedido em 18-09-2011.

## CAPÍTULO 2

# ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DAS SUAS COMPONENTES EM ESPÉCIES LENHOSAS



*Neste capítulo avaliam-se as necessidades hídricas de um olival tradicional de baixa densidade. Neste âmbito, procede-se à estimativa da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) com base no balanço hídrico do solo e avaliam-se as suas componentes. A estimativa parcelar da transpiração efetua-se pela técnica do impulso de calor (heat pulse) e a evaporação do solo mede-se com recurso a microlisímetros.*

*Os objetivos estabelecidos são:*

- (i) Quantificar a evapotranspiração durante a época de rega, sob diferentes regimes hídricos, pela aplicação do balanço de água no solo;*
- (ii) Quantificar a transpiração, em tempo real, pela aplicação da técnica do “heat pulse”;*
- (iii) Avaliar a evaporação do solo na zona humedecida pelos gotejadores e sua estimativa, utilizando como referência o modelo proposto por Yunusa et al. (2004);*
- (iv) Comparar a transpiração avaliada pela técnica do impulso de calor e a evapotranspiração estimada pelo método do balanço de água no solo.*





## 2. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DAS SUAS COMPONENTES EM ESPÉCIES LENHOSAS

### 2.1. Introdução

Os verões quentes e secos, com elevada luminosidade e com precipitação irregular, fazem do clima mediterrânico um desafio adaptativo para a oliveira. Esta espécie sofreu adaptações morfológicas e fisiológicas de tal forma que se tornou tolerante à *secura* conseguindo estabelecer um gradiente entre as folhas e a raiz para valores de potencial matricial da ordem dos 2.5 MPa e, por conseguinte acima dos 1.5 MPa, valor de referência para o ponto de emurchecimento permanente (Dichio *et al.*, 2003).

Durante o verão, em condições de falta de água, a oliveira assegura níveis de transpiração que lhe garantem a sobrevivência e que são superiores às taxas de absorção de água pela raiz (Lavini *et al.*, 2008). Porém, a falta de água condiciona o desenvolvimento vegetativo e a fase reprodutiva, que cessam por decréscimo da condutância estomática, apesar da atividade fotossintética continuar a taxas mais baixas (Xiloyannis *et al.*, 1999; Chartzoulakis *et al.*, 2000). Como a produção de azeitona depende dos processos vegetativos e reprodutivos, que são bianuais, o défice de água que acontece num ano afeta a produção no ano seguinte. A rega surge assim como uma prática cultural importante no acréscimo da produção de azeitona e azeite (Fernández e Moreno, 1999). Todavia, dadas as limitações hídricas da bacia mediterrânica têm vindo a ser implementadas estratégias de rega deficitárias com benefícios que apontam para o aumento da eficiência do uso da água, diminuição dos custos e redução das perdas de nutrientes por *lexiviação*.

A prática da rega, como técnica bem sucedida, requer um ajustamento da quantidade de água a fornecer às árvores com limitações do consumo ao estritamente necessário o que é conseguido por determinação da  $ET_c$ . O processo de perda de água por  $ET_c$  é um dos menos conhecidos no quadro do ciclo hidrológico, interferindo como regulador do clima quer à escala local quer à escala global, por integrar no seu processo o clima, a hidrologia e a energia

existente e engloba não só factores relacionados com as folhas, como sejam a abertura ou fecho estomática, o índice de área foliar, a estrutura da copa e a orientação das folhas mas também factores ambientais como a radiação solar, a humidade do ar e velocidade do vento. Esta multidisciplinaridade levou a que um número considerável de metodologias tenha sido desenvolvido para a determinação de  $ET_c$ . Os métodos mais convencionais de obtenção de  $ET_c$  são de natureza hidrológica e consistem na estimativa de  $ET_c$  pelo método do balanço de água no solo com recurso a equipamentos de monitorização da água no solo, ou com recurso a lisímetros. Há ainda a acrescentar os métodos de natureza micrometeorológica, que medem o fluxo de energia em um ou dois níveis acima do coberto vegetal.

O método do balanço de água no solo com recurso a sensores de humidade foi o usado na avaliação de  $ET_c$ , sendo que esta técnica exige o estudo da dinâmica de água no solo que, por ser um meio heterogéneo, só fica bem caracterizado quando se instala um número considerável de sensores que registam informação espacialmente dispersa e, por vezes, de difícil interpretação. A implementação de estratégias de rega deficitárias bem toleradas pela oliveira dificultam o uso de alguns sensores de humidade que deixam de registar adequadamente quando o conteúdo de água do solo é baixo.

Outra das abordagens consiste em avaliar separadamente as componentes da evapotranspiração, uma vez que o processo de perda de água para a atmosfera no contínuo solo-planta é caracterizado pelo conhecimento da transpiração e da evaporação do solo.

As técnicas de medição da transpiração usam as plantas como biosensores e baseiam-se no fornecimento de calor ao tronco e observação por meio de sondas, do seu deslocamento ascensional através da quantificação do fluxo de seiva no tronco, nos ramos e nas raízes. Atualmente, são já ferramentas incorporadas na gestão da rega, permitindo o estudo do fluxo de água entre as raízes e a atmosfera circundante das folhas, dando respostas imediatas e consistentes do défice de água no solo sem que se interfira no normal processo biológico e fisiológico das plantas (Eastman e Gray, 1998; Goldhamer *et al.*, 1999; Fernández *et al.*, 2001; Ortuño *et al.*, 2004a e b; Nicolás *et al.*, 2005). Estas técnicas possibilitam, conseqüentemente, o

acompanhamento em tempo real da evolução do estado hídrico das plantas face às condições edafo-climáticas a que estão sujeitas e consideram que, como o conteúdo total de solutos da seiva que circula no xilema é geralmente baixo, de cerca de 0.1%, garante sem grandes erros que o fluxo de seiva medido seja equivalente ao fluxo de água posteriormente transpirado (Paços, 2003).

Tratando-se de métodos térmicos o fornecimento de calor pode ser de forma contínua ou descontínua. De entre os métodos cuja aplicação de calor é feita de forma descontínua, destaca-se o método do “compensation heat pulse”, genericamente designado por método do impulso de calor, que estima a densidade do fluxo de seiva com base na igualdade das temperaturas de dois sensores colocados radialmente no tronco e localizados a montante e jusante de uma fonte de aquecimento. Durante o decurso deste trabalho, utilizou-se esta metodologia por já ter sido aplicada com sucesso na medição do fluxo de seiva em oliveiras (Fernández *et al.*, 2001; Giorio e Giorio, 2003; Fernández *et al.*, 2006; Fernández *et al.*, 2008). Por outro lado, é uma técnica versátil onde o declive do terreno e a heterogeneidade espacial não são factores limitativos à sua aplicação, é fiável e de baixa manutenção, permitindo avaliar a taxa de transpiração em tempo real durante largos períodos de tempo. A literatura em geral aponta-a como sendo precisa e apropriada para a estimativa da transpiração em cobertos lenhosos (Green e Clothier, 1988; Steppe *et al.*, 2008).

Neste âmbito, salientam-se também os métodos que aplicam o calor de forma contínua como o de Granier (1985) e o do balanço de calor de Čermák *et al.* (1973) que são amplamente conhecidos.

O método de Granier utiliza duas sondas com sensores de temperatura que se inserem radialmente no tronco, sendo que uma das sondas é aquecida por meio de uma resistência e a outra, colocada a jusante, encontra-se a temperatura idêntica à dos tecidos da planta. Assim, a máxima diferença de temperatura entre os dois pontos de medida é usada como indicador de um fluxo de seiva mínimo ou nulo, enquanto uma diferença mínima é indicador de um fluxo de seiva máximo através da área de transporte. É um método apto para avaliar as taxas de transpiração das plantas e a sua grande vantagem é a facilidade de fabrico e instalação dos sensores. De acordo com Paços (2003), o

uso da equação de calibração original para medição direta da transpiração subestima o valor desta variável.

O método de balanço de calor, cuja primeira versão foi proposta por Čermák *et al.* (1973), permite avaliar o fluxo de seiva num segmento de caule e o princípio de aplicação desta técnica é a medição volumétrica do fluxo de seiva que pode ser admitido como equivalente à transpiração através da utilização da equação do balanço energético. Este método consiste na aplicação de uma quantidade conhecida de calor por unidade de tempo, por intermédio de uma resistência elétrica, que é dissipada sob a forma de calor em regime constante num segmento de caule, sendo repartido pelo segmento do tronco em fluxos de calor conduzidos pelo caule, acima e abaixo do volume controlado. O fluxo axial é estimado considerando que o valor da condutividade térmica do caule das plantas lenhosas é de  $0.42 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$  e os gradientes térmicos dos segmentos superiores e inferiores são medidos com termopares posicionados acima e abaixo da secção aquecida. Assim, os fluxos radiais podem ser avaliados a partir do conhecimento da condutividade térmica do fluxímetro radial e da diferença de temperatura adjacente à resistência elétrica. O fluxo de seiva está dependente do calor transportado convetivamente.

Visando tornar o método proposto por Čermák (1973), mais simples e de mais fácil construção, Sakuratani (1981), desenvolveu um sensor de aquecimento cuja principal alteração foi a da aplicação de uma potência constante, sendo apenas necessário um sistema de corrente constante para alimentação dos sensores de fluxo. Atualmente, existem no mercado várias versões destes sensores que permitem o emprego em diferentes plantas com diferentes diâmetros.

Marin *et al.* (2008), referem que o método do balanço de calor tem a vantagem de ser um método que dispensa procedimentos de calibração e exige equipamentos relativamente simples de fácil construção e de baixo custo. Entre as principais fontes de erro observadas está a não consideração no cálculo do balanço de calor do valor do calor armazenado no segmento do tronco aquecido, o que pode tornar-se importante em árvores de algum porte. Valacogne e Nasr (1989) mostraram a importância de considerar o calor armazenado no tronco na estimativa da transpiração em macieiras.

A avaliação parcelar da evapotranspiração carece ainda da determinação da evaporação do solo ( $E_s$ ) que ocorre intensamente nas zonas semi-áridas como resultado de elevada solicitação evaporativa. A literatura aponta-a como tendo um papel relevante no balanço hidrológico do solo especialmente em olivais com elevado espaçamento. Algumas estimativas indicam que a evaporação do solo constitui uma larga fração do total de água perdida para a atmosfera a partir de solo nú, podendo atingir valores compreendidos entre os 30% a 80% da evapotranspiração total, com os maiores valores registados na época das chuvas quando o solo tem humidade suficiente para evaporar (Bonachela *et al.*, 1999; Jackson e Wallance, 1999). A avaliação de  $E_s$  pode ser conseguida com o uso de microlisímetros.

Em síntese, este capítulo tem como objetivos quantificar as necessidades hídricas da oliveira, quer pela determinação da evapotranspiração da cultura com base no balanço de água no solo, quer pela estimativa das componentes da  $ET_c$  e comparar não só os valores da evapotranspiração avaliada pelo balanço de água no solo como também a transpiração obtida através de sensores de fluxo de seiva.

## **2.2. Metodologia**

### **2.2.1. Suporte arbóreo monitorizado**

O trabalho experimental foi desenvolvido no âmbito do projeto Agro 728 intitulado “Influência da rega e do controlo fitossanitário na produtividade e qualidade do azeite de olivais tradicionais da margem esquerda do Guadiana”. Para tal, selecionou-se como objeto de estudo um olival tradicional da variedade Cordovil (*Olea europaea* L. cv. Cordovil), pertença da Herdade dos Lameirões, pólo de experimentação do Centro Operativo e de Tecnologia do Regadio (COTR) e da Direção Regional de Agricultura do Alentejo (DRAAL) com cerca de 78 ha de área. A Herdade dos Lameirões está localizada no Baixo Alentejo, Concelho de Moura e a 5 km da aldeia de Safara (lat. 38°05'15''N, long. 07°16'39'' W, alt.75 m) (Figura 2.1) e o facto do olival em estudo pertencer a um pólo de experimentação foi um elemento decisivo na

escolha do local, dado que se teve ao dispor factores de natureza logística que facilitaram o desenvolvimento do trabalho experimental.



Figura 2.1 - Localização da Herdade dos Lameirões georeferenciada no Alentejo, concelho de Moura e no distrito de Beja (lat. 38°05'15''N, long. 07°16'39''W, alt. 75 m).

O olival era de baixa densidade (69 árvores ha<sup>-1</sup>) em regime de sequeiro durante mais de 80 anos, com compasso de aproximadamente 12 x 12 m (Figura 2.2) e com linhas de plantação orientadas segundo a direção W-E. A configuração deste tipo de olivais origina cobertos descontínuos ao longo das linhas onde as copas são perfeitamente identificadas. O compasso largo permite a expansão lateral do sistema radical e a absorção de água pelas raízes, garantindo assim a sobrevivência das árvores em condições de sequeiro.

O olival teve o seu primeiro ano de rega em 2005 e a aplicação de água ao solo foi através de um sistema de rega localizado mediante gotejadores autocompensantes afastados de 1 m na linha e com débito de 3.6 l h<sup>-1</sup>, sendo cada árvore beneficiada por 12 gotejadores.

Para a prossecução dos objetivos inicialmente traçados (vd. capítulo 1, secção 1.4) foram definidas quatro parcelas de terreno contíguas, cada uma

das quais com cinco linhas de árvores e com áreas compreendidas entre os 0.4 ha e os 0.7 ha. O local de ensaio era marginado pelas curvas de nível de cotas 187.5 e 195 m e o declive das parcelas era irregular com duas das parcelas a apresentarem um declive compreendido entre 0-5% e as restantes com declives da ordem dos 6-13%.



Figura 2.2 - a. porte médio da oliveira do pomar; b. fruto na fase inicial de maturação o que corresponde ao estágio 81 da escala BBCH.

Em cada uma das parcelas foi aplicada uma estratégia de rega diferente com o objetivo de proporcionar às árvores diferentes condições hídricas e, simultaneamente, testar o efeito das mesmas em diversos processos fisiológicos. Neste contexto, definiram-se quatro tratamentos de rega: tratamento A, com aplicação de água necessária a suprir as solicitações evapotranspirativas ( $100\% ET_c$ ); tratamento B, com aplicações de água necessárias para repor 60% da evapotranspiração da árvore ( $60\% ET_c$ ), sendo esta estratégia de rega usualmente designada por rega deficitária sustentada, também conhecida como *sustained deficit irrigation* (SDI) na terminologia anglo-saxónica; tratamento C, com aplicações de água de rega apenas em três períodos críticos do ciclo vegetativo (antes da floração; ao início do endurecimento do caroço e 15 dias antes da colheita), sendo esta estratégia de rega comumente designada por rega deficitária controlada, conhecida como *regulated deficit irrigation* (RDI) na terminologia anglo-saxónica; tratamento D, conduzido em sequeiro e, por conseguinte, sem aplicação de água de rega.

### 2.2.2. Avaliação da evapotranspiração

Para avaliar a evapotranspiração do coberto vegetal em estudo e quantificar a água consumida pelas oliveiras garantindo uma boa gestão da rega foi usado o método do balanço de água no solo que permitiu a estimativa de  $ET_c$  como termo residual da Eq. [2.1] por determinação dos demais componentes da equação. Esta equação estima o fluxo de água do solo como movimento unidimensional, num dado intervalo de tempo  $\Delta t$  (dias) e numa camada de solo  $\Delta z$  (mm).

$$ET_c = P + I - D \pm \Delta S \quad [2.1]$$

onde,

$ET_c$  - evapotranspiração da cultura (mm);

$P$  - quantidade de precipitação ocorrida (mm);

$I$  - quantidade de água aplicada por rega (mm).

$D$  - drenagem do solo (mm);

$\Delta S$  - variação do armazenamento de água no solo (mm).

As componentes do balanço foram estimadas para a zona afetada pela rega, identificando-se a área humedecida por cada gotejador (Figura 2.3a) através da medição do diâmetro molhado por cada gotejador ao longo da linha (Figura 2.3b). Em média, cada gotejador influencia uma zona circular de 0.66 m de diâmetro, numa área total de 4.11 m<sup>2</sup> (correspondente a 12 gotejadores).

A aplicação da metodologia do balanço de água no solo às parcelas de rega exigiu o conhecimento prévio do suporte edáfico para a caracterização dos padrões de ocorrência dos processos de transferência hídrica no solo. Deste modo, abriu-se um perfil no interior do olival em estudo, para a classificação do solo “*in situ*” (Figura 2.4), para colheita, a diferentes profundidades, de amostras de solo perturbadas e não perturbadas utilizadas na determinação das características pedológicas e hidrodinâmicas do solo.

O perfil foi caracterizado quanto ao tipo e desenvolvimento dos seus horizontes e verificou-se a seguinte sequência: A (0-0.18 m); Bw (0.18-0.45 m)



e C (0.45-1.3 m), tendo o solo sido classificado como calcário vermelho de xistos associados a depósitos calcários (Vcx). A descrição é apresentada no Quadro 2.1.



Figura 2.3 - a. área humedecida por cada gotejador; b. vista geral da área molhada pelos gotejadores ao longo da linha. Em média, o diâmetro molhado é de 0.66 m e a área molhada de 0.34 m<sup>2</sup>.

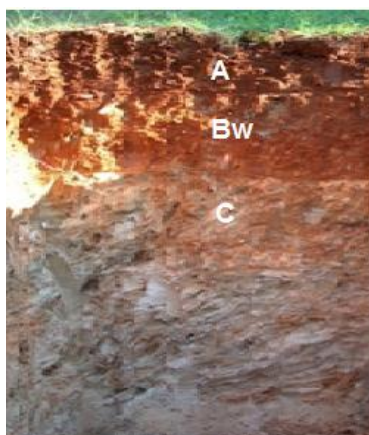


Figura 2.4 - Perfil do solo analisado em dezembro de 2005, onde se observam os horizontes A, Bw e C. Na figura observa-se ainda que o horizonte C constituído por material originário é bastante superficial o que limita a expansão do sistema radical em profundidade.

Quadro 2.1 - Descrição do perfil do solo.

Horizontes	Descrição
A 0-0.18 m	Fresco; vermelho escuro 2,5YR 3/6 (s); pardo avermelhado escuro 2,5YR 3/4 (h); argiloso; plástico; adesivo; bastante saibro, cascalho e pedra miúda de quartzo e calcário; compactidade pequena; firme e extremamente dura; anisforme subangulosa média e fina forte decompondo-se em granulosa média e fina; bastantes raízes finas, médias e algumas grossas (de oliveira); bastante poroso, poros muito finos, finos e alguns médios; sinais evidentes de actividade biológica (anelídeos); impedância mecânica 1,5 a 2,5 kg cm <sup>-2</sup> ; reacção viva ao HCl. Transição nítida plana para
Bw 0.18-0.45 m	Fresco; vermelho 2,5YR 5/6 (s) e 4/6 (h); argiloso; plástico; adesivo; algumas bolsas grandes cinzentas distintas de xisto mais ou menos meteorizado; muitos elementos grosseiros (saibro e cascalho) predominantemente de calcário; compactidade grande; firme e extremamente dura; anisforme subangulosa média e fina forte, composta de granulosa média e fina; algumas raízes muito finas e grossas (de oliveira); bastante poroso, poros muito finos; impedância mecânica > 4,5 kg cm <sup>-2</sup> ; reacção muito viva ao HCl.
C 0.45-1.30 m (F.c.)	Material originário: calcário associado a xisto em meteorização, de cor branca 10YR 8/1 e pardo pálido 10YR 6/3; franco-limoso; compactidade grande; impedância mecânica > 4,5 kg cm <sup>-2</sup> ; efervescência muito viva ao HCl.

A proporção dos vários elementos constituintes da textura do solo foi determinada em amostras de solo perturbadas recolhidas entre os 0-0.18 m e 0.18-0.45 m de profundidade. Na determinação dos lotes de areia fina, limo e argila recorreu-se ao método da pipeta descrito em Silva *et al.* (1975), tendo a classificação textural de cada camada de solo sido definida com base nas proporções dos diferentes lotes granulométricos, de acordo com o diagrama de textura, adaptado aos limites internacionais de Gomes e Silva (1962). A massa volúmica aparente foi determinada em amostras de solo no estado natural pelo método do cilindro. O Quadro 2.2 mostra os valores obtidos na análise granulométrica, propõe a classificação textural e indicam-se os valores da massa volúmica aparente média. Pela análise do mesmo confirma-se, tal como

está ilustrado na Figura 2.4, que o solo é delgado com espessura inferior a 0.5 m, de textura argilosa e com muitos elementos grosseiros (saibro e cascalho) o que, aliado ao facto de ser um solo delgado, lhe confere limitações de ordem física que condicionaram a instalação dos equipamentos de monitorização da água no solo.

Quadro 2.2 - Análise granulométrica, classificação textural e massa volúmica aparente média referentes ao solo Vcx em estudo nas profundidades 0-0.18 m e 0.18-0.45 m.

Horz.	Prof. (m)	Proporção de elementos grosseiros (kg kg <sup>-1</sup> )					Classe	MVAM (kg m <sup>-3</sup> )
		EG	AG	AF	L	G		
A	0-0.18	0.159	0.121	0.237	0.158	0.484	AGI	1520
Bw	0.18-0.45	0.134	0.073	0.200	0.189	0.538	AGI	1640

Nota: EG, elementos grosseiros; AG, areia grossa; AF, areia fina; L, limo; G, argila; AGI, argiloso e MVAM, massa volúmica aparente média.

Para avaliar e conhecer as transferências hídricas do solo para a atmosfera, a dinâmica da água no solo e garantir uma gestão apropriada da rega que permitisse a sua programação em tempo real, recorreu-se a dois tipos de medições: tensiométricas e volumétricas.

As medições tensiométricas foram efetuadas com sensores watermark (Irrometer Co. Inc., Riverside, Estados Unidos da América). Estes sensores (Figura 2.5a) foram instalados nos tratamentos A, B e C, em duas árvores, nas profundidades de 0.25 e 0.45 m, na zona de atividade radical e na profundidade de 0.65 m, para controlar a drenagem por percolação. Os sensores foram colocados ao longo da linha de gotejadores e às distâncias de 1,3 e 6 m do tronco das árvores, sendo os dados obtidos em registo contínuo e armazenados no datalogger, em intervalos de 1 hora (Figura 2.5b).



Figura 2.5 - Avaliação da humidade do solo. a. sensor Watermark; b. datalogger para recolha periódica da informação proveniente dos watermarks.

Para estabelecer a relação entre a pressão efetiva e o teor de água no solo ( $\theta h$ ), determinou-se a curva característica do solo (Quadro 2.3) em amostras de solo naturais e seguindo procedimentos laboratoriais. Assim, a humidade que o solo retém contra uma gama de pressões efetivas compreendidas entre 0 a 1500 kPa foi determinada utilizando os métodos de sucção, pressão e de evaporação. Para valores de pressão efetiva menores ou iguais a 10 kPa recorreu-se a caixas de areia; para valores de pressão efetiva compreendidos entre 10 e 50 kPa utilizaram-se caixas de areia+caulino e o aparelho de membrana de pressão foi utilizado para valores maiores que 100 e até 1500 kPa.

A curva característica de humidade do solo foi também calculada pelo método laboratorial da evaporação de Wind (1966), assumindo-se que pode ser descrita com precisão suficiente por um polinómio.

Quadro 2.3 - Características hidrodinâmicas referentes ao solo Vcx em estudo nas profundidades de 0-0.18 m e 0.18-0.45 m.

Horz.	Prof. (m)	Teor de água (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) para pressões efetivas (kPa) de:									
		0.25	1	3	6	10	20	30	50	100	1500
A	0-0.18	0.42	0.39	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33	0.32	0.31	0.27
Bw	0.18-0.45	0.39	0.36	0.34	0.33	0.32	0.31	0.31	0.30	0.28	0.24

Para descrever o movimento de água no solo e avaliar a drenagem interna foi necessário determinar a condutividade hidráulica em condições de solo insaturado  $K(h)$ . Para tal, os métodos laboratoriais utilizados foram o método da evaporação (Wind, 1966) e o método do ar quente (Arya *et al.*, 1975). O método da evaporação calcula a condutividade hidráulica recorrendo ao método do perfil instantâneo ([Eq. 2.2]), o qual utiliza a equação de Darcy, considerando apenas o fluxo na direção vertical e a equação resultante da integração da equação de Richards entre a profundidade de referência,  $Z_r$ , onde não há fluxo, e a profundidade  $Z$  para a qual se quer determinar o valor da condutividade hidráulica.

$$q(Z, t) = - \int_{Z_r}^Z \frac{d\theta}{dt} dZ \quad [2.2]$$

onde,

$q(Z, t)$  - fluxo médio à profundidade  $Z$  e no tempo  $t$  (mm h<sup>-1</sup>);

$Z_r$  - profundidade de referência (mm);

$Z$  - profundidade para a qual se quer determinar a condutividade hidráulica (mm);

$\frac{d\theta}{dt}$  - variação do teor em água com o tempo na camada de solo de espessura  $Z_r$ - $Z$ .

Outro dos métodos laboratoriais usado na determinação da condutividade hidráulica insaturada foi o método do ar quente que assenta no

método de Gardner (1958), com algumas modificações, e utiliza a equação de Bruce e Klute (1956), para a determinação da difusividade que, posteriormente, foi convertida em condutividade hidráulica insaturada por intermédio da Eq. [2.3].

Todos os procedimentos associados aos métodos laboratoriais utilizados na determinação das propriedades hidráulicas do solo estão devidamente descritos em Gonçalves *et al.* (2000).

$$K(h) = D(\theta) \frac{d\theta}{dh} \quad [2.3]$$

onde,

$K(h)$  - condutividade hidráulica em solo insaturado (dependente do teor de água do solo) ( $\text{cm dia}^{-1}$ );

$D(\theta)$  - difusividade da água no solo ( $\text{cm}^2 \text{dia}^{-1}$ );

$\frac{d\theta}{dh}$  - declive da curva característica da humidade do solo.

Embora de uso relativamente simples, muitos dos métodos laboratoriais existentes para determinação das propriedades hidráulicas do solo são morosos, dispendiosos, bastante trabalhosos e limitados ao tamanho das amostras colhidas para o efeito, restringindo a sua utilização na avaliação das propriedades hidráulicas do solo devido à heterogeneidade do mesmo (Ramos *et al.*, 2009). Daí decorre a facilidade do uso de modelos na determinação da curva característica do solo ( $\theta(h)$ ) e da curva da condutividade hidráulica em solo insaturado ( $K(h)$ ). No caso concreto deste estudo, usou-se o modelo preditivo desenvolvido por van Genuchten (1980) cuja relação  $\theta(h)$  é definida pela Eq. [2.4] e a relação  $K(h)$  é expressa pela Eq. [2.5].

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + (\alpha h)^n]^{-(1-1/n)} \quad [2.4]$$

onde,

$\theta$  - teor de água ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_r$  - teor de água residual isto é o teor em água para o qual o potencial de pressão tende para  $-\infty$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$\theta_s$  - teor de água à saturação ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );

$h$  - pressão efetiva (cm);

$\alpha$  - parâmetro empírico constante que define a forma das curvas;

$n$  - parâmetros empíricos constantes que definem a forma das curvas.

$$K(h) = K_s \frac{((1+(\alpha h)^n)^{1-1/n} - (\alpha h)^{n-1})^2}{(1+(\alpha h)^n)^{(1-1/n)(\ell+2)}} \quad [2.5]$$

onde,

$K(h)$  - condutividade hidráulica em solo insaturado ( $\text{cm dia}^{-1}$ );

$K_s$  - condutividade hidráulica em solo saturado ( $\text{cm dia}^{-1}$ );

$h$  - pressão efetiva (cm);

$\alpha$ ,  $n$ ,  $\ell$  - parâmetros empíricos constantes que define a forma das curvas.

O ajustamento dos valores laboratoriais de  $\theta(h)$  e  $K(h)$  pela equação de van Genuchten foi conseguido por otimização não linear e com recurso ao programa de domínio público RETC (Retention Curve) desenvolvido por van Genuchten *et al.*, (1991). No Quadro 2.4 apresentam-se os valores dos parâmetros obtidos no ajustamento ao modelo van Genuchten.

Quadro 2.4 - Parâmetros obtidos no ajustamento ao modelo van Genuchten para a curva da retenção de água e da condutividade hidráulica do solo  $V_{cx}$  nas profundidades de 0-0.18 m e 0.18-0.45 m.

Prof. (m)	$\theta_r$ ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\eta$	$l$	$K_s$ ( $\text{cm dia}^{-1}$ )
0-0.18	0.1602	0.4339	0.6716	1.0967	-9.9590	244.99
0.18-0.45	0.2202	0.4000	0.1407	1.2316	-5.4888	17.61

Nota:  $\theta_r$ , teor de água residual;  $\theta_s$ , teor de água à saturação;  $\alpha$ ,  $n$ ,  $l$ , parâmetros de ajustamento;  $K_s$ , condutividade hidráulica em solo saturado.

As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam as curvas características do solo e da condutividade hidráulica obtidas.

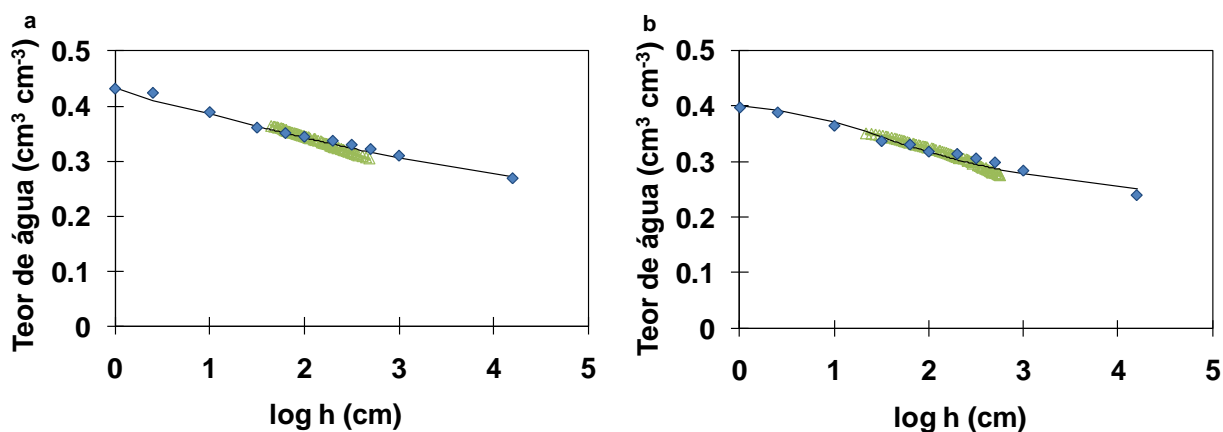


Figura 2.6 -Curvas características da água do solo correspondente ao solo  $V_{cx}$  obtidas a partir de valores experimentais por diferentes métodos e de ajustamentos com os modelos de van Genuchten. a. profundidade de 0-0.18 m; b. profundidade 0.18-0.45 m.  $\blacklozenge$  caixa de sucção e placas de pressão,  $\triangle$  evaporação, — ajustamento ao modelo van Genuchten.



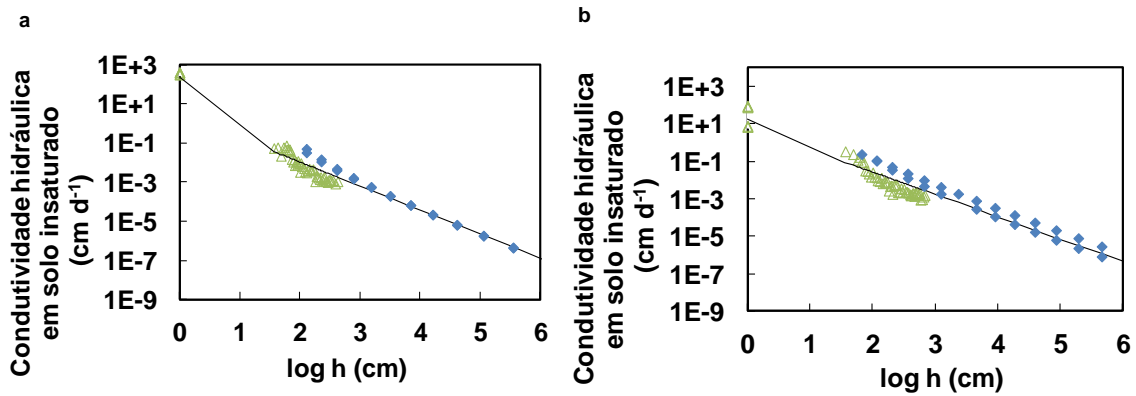


Figura 2.7 - Curvas da condutividade hidráulica em solo insaturado correspondente ao solo Vcx obtidas a partir de valores experimentais por diferentes métodos e de ajustamentos com os modelos de van Genuchten. a. profundidade de 0-0.18 m; b. profundidade 0.18-0.45 m. ◆ ar quente, ▲ evaporação, — ajustamento ao modelo van Genuchten.

O teor volumétrico de água no solo foi medido usando-se a sonda capacitiva profile probe PR1 da Delta T Devices, Ltd., Cambridge, UK. Para o efeito, instalaram-se em cada tratamento, em duas árvores, tubos de acesso à sonda nas distâncias de 1, 2, 3 e 6 m, a partir do tronco. Ainda em cada tratamento instalou-se um tubo de acesso à sonda, na entrelinha das árvores. A calibração da sonda foi efetuada quando se instalaram os tubos de acesso, servindo a terra removida para a determinação da humidade do solo pelo método gravimétrico e estabelecimento da correspondência entre os valores da humidade volumétrica ( $\theta$ ) e os obtidos das leituras da sonda em milivolts ( $L_s$ ), para as profundidades de 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 e 0.60 m foi obtida a regressão linear expressa pela Eq. [2.6].

$$\theta = 0.0034 L_s - 0.3585 \quad n=44 \quad r^2=0.78 \quad [2.6]$$

A variação do armazenamento de água no solo até à profundidade de 0.5 m foi calculada através da Eq. [2.7].

$$\Delta S = \int_{z_1}^{z_2} \theta(z, t_1) dz - \int_{z_1}^{z_2} \theta(z, t_2) dz \quad [2.7]$$

onde,

$\Delta S$  - variação do armazenamento de água no solo (mm);

$z_1$  - profundidade inicial do intervalo considerado (mm);

$z_2$  - profundidade final do intervalo considerado (mm);

$t_1$  - tempo inicial do intervalo (min);

$t_2$  - tempo final do intervalo (min).

A drenagem por percolação foi estimada com recurso à Eq. [2.8].

$$D = K(h) \frac{\Delta(h+z)}{\Delta z} \Delta t \quad [2.8]$$

onde,

$D$  - drenagem por percolação (mm);

$K(h)$  - condutividade hidráulica insaturada ( $\text{cm dia}^{-1}$ );

$h$  - pressão efetiva (cm);

$z$  - profundidade (cm);

$\Delta z$  - intervalo de profundidade (cm);

$\Delta t$  - intervalo de tempo considerado (h).

A contabilização da entrada de água no solo devido à precipitação é apresentada no Quadro 2.5, tendo os dados sido recolhidos na estação meteorológica da Herdade dos Lameirões, umas centenas de metros distante do local de ensaio. A restante informação meteorológica foi obtida do sítio do COTR, na internet, através do serviço SAGRA Net.

A rega efetuou-se regularmente durante os períodos de rega de 2005, 2006 e 2007, com oportunidades e quantidades de rega a aplicar nos diferentes tratamentos variáveis e estabelecidas com base nas leituras do potencial matricial do solo, obtidas através dos sensores watermark

posicionados ao 0.45 m e definindo-se como decisor do número de regas semanais o valor do potencial matricial correspondente ao intervalo -0.06 a -0.07 MPa. Durante os três anos em que decorreu o ensaio as necessidades de água foram maiores nos meses de julho e agosto, consequência das condições ambientais nomeadamente a maior solicitação evaporativa.

Quadro 2.5 - Valores de precipitação média mensal (mm) medidos na estação meteorológica dos Lameirões nos anos de 2005, 2006 e 2007.

Meses do ano	Precipitação (mm)		
	2005	2006	2007
jan	0.5	40.7	31.7
fev	8.7	38.6	44.5
mar	19.7	66.6	6.0
abr	20.2	29.7	52.1
mai	30.1	0.5	31.4
jun	5.5	49.2	17.2
jul	0.6	11.5	0.0
ago	1.1	15.4	17.7
set	0.0	22.2	41.8
out	62.8	156.0	60.6
nov	50.6	62.4	25.0
dez	51.1	29.0	5.7

Para o ano de 2005, o total de precipitação foi excepcionalmente baixo comparado com os anos de 2006 e 2007 (Quadro 2.5) e com o valor médio de 580 mm definido para a região. Como consequência de um ano de reduzida precipitação onde a primavera e o verão foram manifestamente secos com quantidades de água armazenadas na barragem que não foram suficientes para sustentar a rega o que se traduziu em quantidades de água aplicada nos diferentes tratamentos inferiores às aplicadas em 2006 e 2007 (Quadro 2.6).

Quadro 2.6 - Quantidade de água aplicada (l/planta) aos três tratamentos durante o período de tempo correspondente à rega.

Tratamentos	Período do ano (dia, mês e ano)	Água aplicada (l/planta)
A	23-03-05 a 15-09-05	13327.2
B	23-03-05 a 15-09-05	7970.4
C	23-03-05 a 14-05-05	2786.4
	09-07-05 a 28-07-05	2505.6
A	23-03-06 a 17-10-06	24062.4
B	23-03-06 a 17-10-06	14437.4
C	06-05-06 a 16-05-06	1166.4
	03-07-06 a 09-07-06	1339.2
A	30-03-07 a 30-11-07	20304.0
B	30-03-07 a 30-11-07	12182.4
C	14-05-07 a 21-05-07	1382.4
	11-07-07 a 22-07-07	1339.2
	13-11-07 a 23-11-07	950.4

No ano de 2006, a precipitação anual foi de 521.8 mm, valor próximo do que é expetável para a região, pelo que a condução e gestão da rega seguiu o percurso normal, tendo a aplicação de água sido função apenas da estratégia de rega definida. Como as primeiras chuvas surgiram em outubro não se justificou o prolongamento da rega a partir de então. No ano de 2007 houve um prolongamento da rega até novembro em virtude das chuvas que, no clima mediterrânico surgem habitualmente no início do outono, terem ocorrido tardiamente. Durante os anos de 2005, 2006 e 2007, a aplicação e o eventual sucesso da estratégia de rega C de déficit controlado foram condicionados não só pela adequada monitorização da água no solo, mas também pela rigorosa

identificação ao longo do ciclo vegetativo da oliveira dos estádios fenológicos mais sensíveis ao déficit hídrico. Tal foi conseguido usando a escala BBCH (Meier *et al.*, 2002), para definir “*in loco*” os estados fenológicos, tendo-se para o efeito selecionado 9 árvores por tratamento e acompanhado o desenvolvimento do ciclo vegetativo de março a dezembro.

### **2.2.3. Avaliação da transpiração utilizando a planta como biosensor**

Neste ponto, faz-se uma descrição detalhada do método do impulso de calor por ser este o utilizado na avaliação da transpiração das oliveiras.

#### **2.2.3.1. Princípios da técnica do impulso de calor**

A técnica do impulso de calor caracteriza-se por ser uma técnica de medição relativamente simples, que permite determinar a velocidade do fluxo de seiva colocando os sensores radialmente no interior no tronco, ramos ou raízes, na zona onde existe movimento ascendente de seiva (xilema), sendo o calor rastreado por sensores de temperatura que estão colocados a jusante e a montante da sonda de aquecimento (Figura 2.8). Através deste processo, avalia-se a velocidade com que o calor se propaga entre a sonda de aquecimento e as duas sondas de temperatura colocadas a jusante e montante da sonda de aquecimento. O controlo dos impulsos de calor e a acumulação dos dados obtidos pelas sondas é feito com o auxílio de um datalogger que executa um software criado para o efeito.

Fernández *et al.* (2001) calibraram o método do “Compensation heat pulse” (CHP) para a oliveira (*Olea europaea* L., ‘Manzanilla de Sevilha’) utilizando o sistema “Heat pulse velocity” (HPV) desenhado por Green e Clothier (1988), o qual consistia na inserção dos sensores de temperatura 5 mm e 15 mm a montante e a jusante da sonda de aquecimento, respetivamente. Para estimar o fluxo de seiva, Fernández *et al.* (2001), usaram os factores de correção definidos por Green e Clothier (1988). Posteriormente, Green *et al.* (2003), desenharam um novo sistema em que o posicionamento

dos sensores de temperatura é de 5 mm e 10 mm a montante e a jusante da sonda de aquecimento e que está de acordo com a Figura 2.8. Como o posicionamento das sondas de temperatura é um dos parâmetros mais importantes na seleção dos factores de correção a aplicar, Fernández *et al.* (2006), efetuaram nova validação do método.

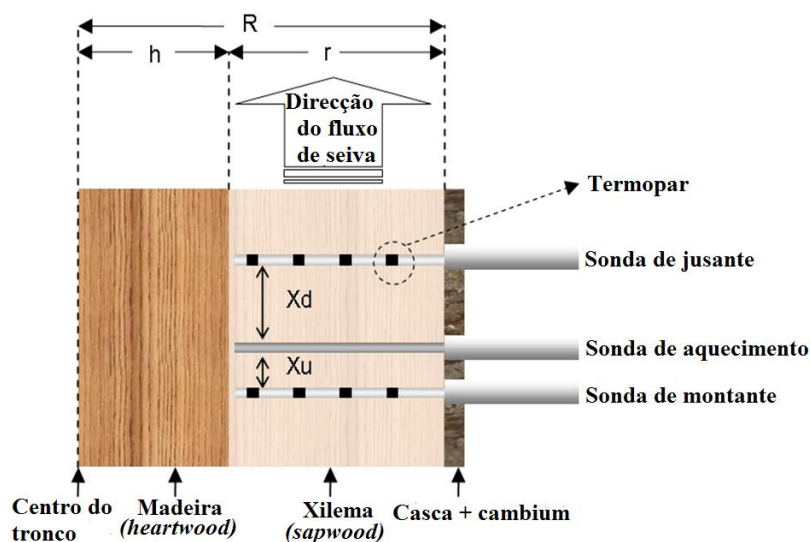


Figura 2.8 - Modo de instalação de um conjunto de sondas para medir o fluxo de seiva num tronco através da técnica do impulso de calor (vista de perfil).

### 2.2.3.2. Origem da técnica do impulso de calor

Foi Huber (1932) quem primeiro estudou a importância do calor transportado pelo fluxo de seiva, reconhecendo também a importância de separar o efeito de convecção provocado pelo movimento da seiva do transporte de calor, por condução térmica. Hubert e Schmidt (1937) conceberam um sistema com dois sensores de temperatura, um a montante e outro a jusante de uma sonda de aquecimento, que permitia medir velocidades de seiva. O tempo de pico de aquecimento do sensor de temperatura de jusante, quando comparado com o colocado a montante, foi usado para compensar o efeito da condução térmica. Marshall (1958), desenvolveu uma fundamentação teórica, corrigindo os pressupostos assumidos por Hubert e propôs sondas inseridas radialmente no caule das plantas, com a temperatura

a ser medida num ponto abaixo da superfície do caule, obtendo uma solução analítica para o processo.

Swanson (1962), usando o princípio analítico de Marshall mas com dois sensores de temperatura colocados assimetricamente e às distâncias de 5 mm e 10 mm a montante e a jusante da sonda de aquecimento, respetivamente, concluiu que a velocidade do impulso de calor,  $V$ , podia ser calculada por:

$$V = \left( \frac{X_d + X_u}{2T_z} \right) \quad [2.9]$$

onde,

$V$  - velocidade de propagação do impulso de calor ( $\text{m s}^{-1}$ );

$X_u$  - distância entre a sonda de aquecimento e o sensor de temperatura colocado a montante (m);

$X_d$  - distância entre a sonda de aquecimento e o sensor de temperatura colocado a jusante (m);

$T_z$  - tempo ao fim do qual a temperatura da sonda colocada a jusante iguala a temperatura da sonda colocada a montante (s).

A determinação de  $V$  a partir da Eq. [2.9] baseada no princípio de Marshall (1958), assume que a sonda de aquecimento não têm efeito na medição do fluxo de calor. Na realidade, a convecção do impulso de calor é perturbada por esta e pelos sensores de temperatura que introduzem feridas nos tecidos do xilema (*wound width* na terminologia anglo-saxónica) aquando da sua colocação. Como consequência, há uma subestimativa sistemática da medição (Green e Clothier, 1988; Cohen *et al.*, 1991) que exige correção da velocidade do impulso de calor. A correção pode ser avaliada pela Eq. [2.10] definida po Swanson e Whitfield (1981).

$$V_c = a + bV + cV^2 \quad [2.10]$$

onde,

$V_c$  - velocidade do impulso de calor corrigida ( $\text{m s}^{-1}$ );

$V$  - velocidade dada pela Eq. [2.9] ( $\text{m s}^{-1}$ );

$a$ ,  $b$  e  $c$  - coeficientes de correlação para vários tamanhos de feridas derivados de Swanson e Whitfield (1981) a partir da solução numérica de Marshall (1958).

É de referir que devido à variabilidade das características da madeira das diferentes espécies lenhosas há necessidade de calibração específica mediante a espécie em causa. Os trabalhos desenvolvidos por Fernández *et al.* (2006a) indicam que para a oliveira a melhor concordância entre o fluxo de seiva obtido por esta técnica e o fluxo de seiva real é conseguida considerando um diâmetro real de instalação (*wound width*) de 2.0 mm, o que foi usado neste trabalho. Após determinação da velocidade corrigida,  $V_c$ , a densidade do fluxo de seiva,  $J$ , foi obtida através da Eq. [2.11]:

$$J = (0.441F_M + F_L)V_c \quad [2.11]$$

onde,

$J$  - densidade do fluxo de seiva ( $\text{m s}^{-1}$ );

$F_M$  - fração volumétrica de madeira;

$F_L$  - fração volumétrica de água na madeira;

$V_c$  - velocidade corrigida ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Os valores de  $F_M$  e  $F_L$  foram determinados na madeira do tronco onde estavam instaladas as sondas, ao longo de toda a época de rega. O procedimento de recolha das amostras de madeira bem como a determinação de  $F_M$  e  $F_L$  estão documentados em Valverde (2005). A fração volumétrica de água,  $F_L$ , e de madeira,  $F_M$ , determinam-se através das Eqs. [2.12] e [2.13].



$$F_L = \frac{M_L}{(\rho_L \cdot V_T)} \quad [2.12]$$

onde,

$F_L$  - fração volumétrica de água na madeira;

$M_L$  - massa de água contida numa amostra de madeira húmida (kg);

$\rho_L$  - massa volúmica da água ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$V_T$  - volume da amostra recolhida ( $\text{m}^3$ ).

$$F_M = \frac{M_D}{(\rho_M \cdot V_T)} \quad [2.13]$$

onde,

$F_M$  - fração volumétrica de madeira;

$M_D$  - massa da amostra seca (kg);

$\rho_M$  - massa volúmica da madeira seca, que se considera constante e igual a  $1530 \text{ kg m}^{-3}$ ;

$V_T$  - volume da amostra recolhida ( $\text{m}^3$ ).

Para avaliar o fluxo volumétrico de seiva no tronco,  $Q$  ( $\text{l h}^{-1}$ ), foi necessário integrar os valores do perfil radial de densidade do fluxo de seiva, obtidos a diferentes profundidades do xilema e correspondentes às profundidades a que se encontravam os termopares que constituíam as sondas de temperatura inseridas radialmente no tronco. Teoricamente, o fluxo de seiva volumétrico,  $Q$ , é dado pela Eq. [2.14] apresentada por Green e Clothier(1988).

$$Q = \int_H^R 2\pi r J(r) dr \quad [2.14]$$

onde,

$Q$  - fluxo volumétrico de seiva no tronco ( $m^3 s^{-1}$ );

$R$  - raio do tronco (m);

$H$  - raio da secção de madeira não condutora de seiva (m);

$r$  - raio do ponto em que se mede a velocidade da seiva, determinado pela profundidade de cada termopar (m);

$J$  - densidade do fluxo de seiva ( $m s^{-1}$ ).

O integral apresentado na Eq. [2.14] pode calcular-se por três métodos diferentes. Porém, o método que permite calcular  $Q$  através da soma ponderada do produto da velocidade do fluxo de seiva pela correspondente área representativa de cada termopar (Eq.[2.15]) foi considerado por Hatton *et al.* (1990) como o melhor método para analisar perfis de velocidade de fluxo de seiva que têm uma curvatura mais acentuada nas zonas radiais mais externas

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i V_i \quad [2.15]$$

onde,

$Q$  - fluxo volumétrico de seiva no tronco ( $m^3 s^{-1}$ );

$A_i$  - área representativa de cada termopar ( $m^2$ );

$V_i$  - soma ponderada da velocidade do fluxo de seiva ( $m s^{-1}$ ).

### 2.2.3.3. Instalação dos sensores de fluxo de seiva

As medições do fluxo de seiva usado na técnica CHP decorreram de forma contínua durante os meses de abril a agosto de 2005, de março a novembro de 2006 e de março a setembro de 2007, sendo utilizadas as sondas HPV (Figura 2.9a) e o software semelhante ao descrito em Green *et al.* (2003). Em intervalos de tempo de 30 minutos, o datalogger encaminhava, para cada

conjunto de sondas, um impulso de calor de curta duração (1s), seguia-se depois um período de tempo em que eram feitas leituras sucessivas das temperaturas nos termopares, estabelecendo-se uma comparação entre as temperaturas registadas, às quatro profundidades, a montante e a jusante da sonda de aquecimento. O sistema de aquisição de dados (Figura 2.9b) era controlado por um datalogger Campbell CR 10X (Campbell Scientific INC., Logan, UT) e alimentado por duas baterias de 12 v, uma para as sondas de aquecimento e outra para o datalogger.

A sonda de aquecimento era constituída por um tubo em aço inoxidável com 1.63 mm de diâmetro e uma resistência elétrica no interior; as sondas de temperatura eram compostas por um tubo de teflon com 1.7 mm de diâmetro, contendo no interior 4 termopares colocados às distâncias de 0.50, 1.20, 2.10, e 3.20 cm.

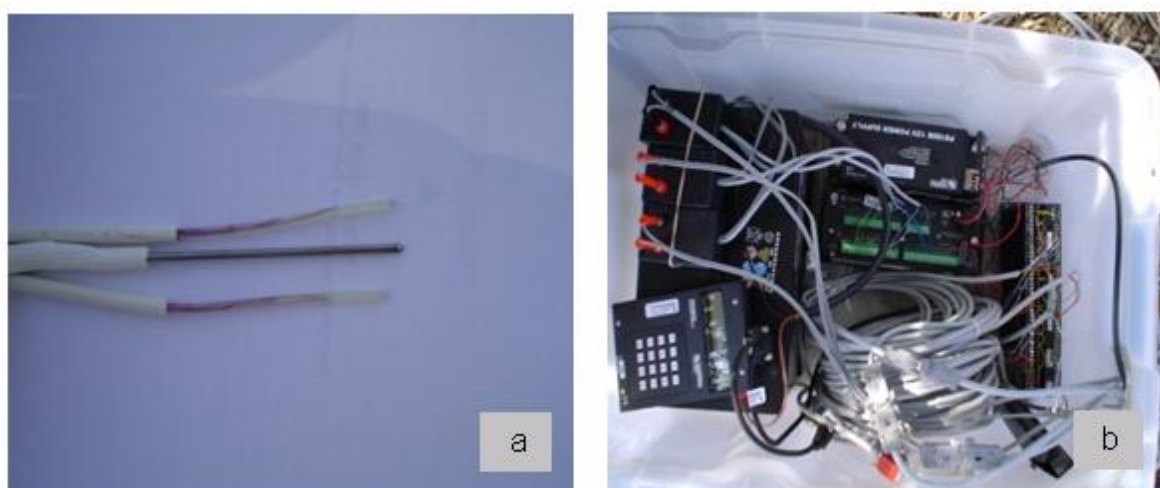


Figura 2.9 - a. conjunto de sondas HPV com a sonda de aquecimento (ao centro) e os sensores de temperatura a montante e a jusante; b. sistema de aquisição de dados e datalogger Campbell CR 10X.

A instalação de cada conjunto de sondas obedeceu à seleção de uma face do tronco homogénea e a uma distância considerável dos ramos ou zonas danificadas. A instalação dos sensores foi feita de forma paralela de modo a permitir que os termopares ficassem inseridos na zona de circulação da seiva e às profundidades consideradas (Figura 2.10ab).



Figura 2.10 - a e b. conjunto de sondas HPV após instalação no tronco.

Para minimizar os efeitos da irregularidade do tronco, foram instalados em faces distintas e à mesma altura três conjuntos de sensores em cada árvore, posicionando-se os três conjuntos de sondas afastados entre si de forma a evitar que o calor emitido por cada conjunto de sondas interferisse com o de sondas vizinho. No Quadro 2.7, deixa-se a listagem dos sensores usados nos tratamentos, período de atividade e orientação da instalação no tronco.

A análise dos dados requereu que se definissem as seguintes características das árvores: fração de madeira, fração de água e espessura da zona em que há condução de seiva (*sapwood* na terminologia anglo-saxónica). A amostragem para reconhecimento da zona ativa de condução de seiva e para determinação das frações de madeira e água na madeira obteve-se com um extrator de amostras do tipo Suunto de 6''.

Quadro 2.7 - Aspetos relevantes em relação aos sensores HPV instalados durante os anos de 2006 e 2007.

Trat.	Sensores		Período de atividade		Instalação			
	Tipo	Nº Termopares	Início	Fim	Altura (cm)	Órgão	Espessura do xilema (cm)	Azimute
A	HPV	4	22-02-06	30-11-06	90	Tronco	6	N
A	HPV	4	22-02-06	30-11-06	90	Tronco	4	SE
A	HPV	4	22-02-06	30-11-06	90	Tronco	5.5	SW
B	HPV	4	01-03-06	30-11-06	90	Tronco	7.8	SE
B	HPV	4	01-03-06	30-11-06	90	Tronco	7.8	SW
B	HPV	4	01-03-06	30-11-06	90	Tronco	6.8	N
C	HPV	4	01-03-06	30-11-06	90	Tronco	5.7	SW
C	HPV	4	01-03-06	30-11-06	90	Tronco	5.2	N
C	HPV	4	01-03-06	30-11-06	90	Tronco	6	SE
D	HPV	4	14-03-06	30-11-06	90	Tronco	4	SW
D	HPV	4	14-03-06	30-11-06	90	Tronco	7.5	N
D	HPV	4	14-03-06	30-11-06	90	Tronco	7.5	SE
A	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	4.0	SE
A	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	6.0	N
A	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	6.5	SW
B	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	6.8	N
B	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	7.8	SE
B	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	7.8	SW
C	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	5.2	N
C	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	6.0	SE
C	HPV	4	26-03-07	19-10-07	90	Tronco	5.7	SW
D	HPV	4	29-03-07	19-10-07	90	Tronco	4.0	SW
D	HPV	4	29-03-07	19-10-07	90	Tronco	7.5	SE
D	HPV	4	29-03-07	19-10-07	90	Tronco	7.5	N

#### 2.2.4. Determinação da evaporação do solo

Para avaliar a evaporação do solo ( $E_s$ ) usaram-se seis microlisímetros isto é, tubos de PVC de pequenas dimensões de forma cilíndrica com 0.10 m de altura e 0.076 m de diâmetro interno que foram construídos de acordo com Evett *et al.* (1995). A base dos microlisímetros era protegida com uma tampa

de poliestireno, vulgarmente designado como esferovite (Figura 2.11a) e eram enterrados ao nível do solo (Figura 2.11b).



Figura 2.11 - a. microlisímetro tipo utilizado no ensaio; b. microlisímetro instalado na zona humedecida pelos gotejadores.

Dado que durante a época de rega a evaporação ocorre predominantemente na zona humedecida pelos gotejadores, instalaram-se três microlisímetros sobre a linha de árvores, entre duas plantas, às distâncias de 1, 2 e 6 m do tronco das árvores e realizaram-se duas repetições. Como se pretendia relacionar a água perdida por evaporação com o conteúdo de água existente no solo, as medições incidiram apenas sobre o tratamento A e junto das árvores onde estavam instalados os tubos de acesso à sonda PR1.

Em 2007, a massa de água perdida por evaporação a partir da superfície do solo foi avaliada diariamente nos três ciclos de dessecação do solo definidos e consideraram-se os seguintes ciclos: de 25 de julho a 27 de julho, de 14 de agosto a 16 de agosto e de 28 de agosto a 30 de agosto.

Na tentativa de modelar a evaporação do olival, tomou-se como referência o modelo descrito em Yunusa *et al.* (2004), que relaciona a evaporação do solo com a fração da radiação fotossinteticamente ativa evapotranspiração de referência e humidade volumétrica. O modelo proposto por estes autores adapta-se a condições de solo de textura grosseira, pelo que não se adequa às condições do ensaio (solo de textura argilosa). Analisou-se o

comportamento destas variáveis definindo-se inicialmente a expressão presente na Eq. [2.16].

$$\frac{E_s}{((1-i_c)ET_0)} = \theta_{10} \quad [2.16]$$

onde,

$E_s$  - evaporação do solo ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$i_c$  - fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela copa;

$ET_0$  - evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$\theta_{10}$  - humidade volumétrica na camada superficial do solo correspondente a 10 cm (%).

O ajustamento do conjunto de dados permitiu obter a curva representada na Figura 2.12. A Eq. [2.16] pode ser expressa em função de  $E_s$  obtendo-se a seguinte expressão,

$$E_s = \frac{1}{(13.87\theta_{10} + 4.833)} ((1 - i_c)ET_0) \quad [2.17]$$

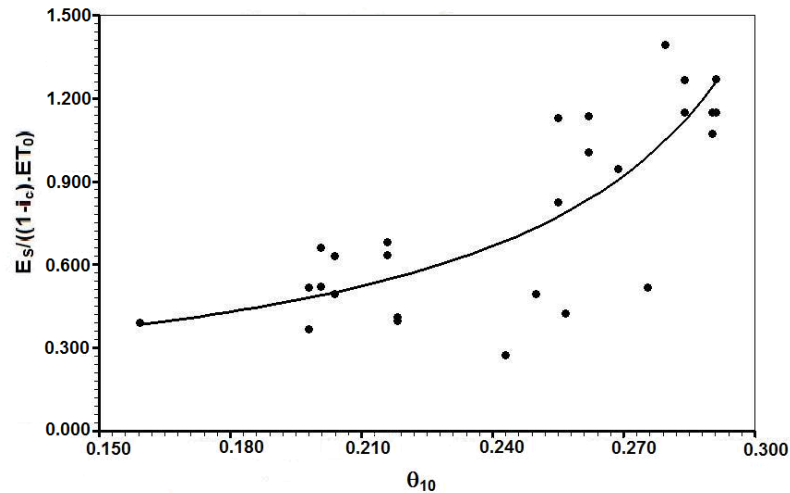


Figura 2.12 - Relação entre a humidade volumétrica do solo, a evaporação, a evapotranspiração de referência e a fração da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela copa. A equação da curva é  $y = \frac{1}{(13.87\theta_{10} + 4.833)} ((1 - i_c)ET_0)$ ;  $r^2 = 0.77$ ).



A aplicação da Eq. [2.16] requereu o cálculo da fração da radiação incidente absorvida pela copa ( $i_c$ ). Na impossibilidade de medir este parâmetro “*in situ*”, a sua estimativa foi encontrada aplicando-se um modelo simples inicialmente descrito em Mariscal *et al.* (2000a) posteriormente simplificado em Orgaz *et al.* (2007) e usado também por Iniesta *et al.* (2009), que permitiu estimar a fração da radiação fotossinteticamente ativa que diariamente foi interceptada pela copa ( $i_c$ ) em condições de céu limpo.

$$i_c = 1 - e^{-k_1 v} \quad [2.18]$$

em que,

$$k_1 = m - 0.0321 L_d + \frac{(0.16+0.115L_d)}{\cos\theta} \quad [2.19]$$

onde,

$i_c$  - fracção da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela copa;

$K_1$  - coeficiente de extinção do copado para a radiação fotossinteticamente ativa em dias de céu limpo;

$v$  - volume do copado por unidade de superfície ( $m^3 m^2$ );

$m$  - é um coeficiente que é função da densidade de plantação ( $Dp$ ) e de  $v$  e cuja expressão a utilizar está de acordo com o Quadro 2.8;

$L_d$  - densidade da área foliar do copado ( $m^3 m^2$ );

$\cos \theta$  - ângulo zenital ao meio dia solar, é função do dia do ano e da latitude (rad).

O valor de  $L_d$  varia entre  $1.2 \leq L_d \leq 2$  e depende de  $v$ , com:

$$L_d = 2 \text{ para } v \leq 0.5 \quad [2.20]$$

$$L_d = 2 - \frac{0.8(v-0.5)}{1.5} \text{ para } v > 0.5 \quad [2.21]$$



Quadro 2.8 - Valores do coeficiente  $m$ , em função do volume da copa por unidade de superfície ( $m^3 m^{-2}$ ) para diferentes densidades de plantação ( $Dp$ ).

$m$	$Dp$ (árvores $ha^{-1}$ )
0.23-0.04 $v$	100
0.32-0.06 $v$	204
0.20	278
0.35	>400

Fonte: Orgaz *et al.* (2007)

Em dias de céu nublado, a fração da radiação fotossinteticamente ativa difusa interceptada pela copa ( $i_{cn}$ ) é obtida por:

$$i_{cn} = 1 - e^{-K_2 v} \quad [2.22]$$

em que,

$$k_2 = 0.52 + 0.0007878 D_p - 0.76 e^{(-1.25L_d)} \quad [2.23]$$

onde,

$i_{cn}$  - fração da radiação fotossinteticamente ativa difusa interceptada pela copa;

$K_2$  - coeficiente de extinção do copado para a radiação fotossinteticamente ativa em dias de céu nublado;

$v$  - volume do copado por unidade de superfície ( $m^3 m^{-2}$ );

$Dp$  - densidade de plantação (árvores  $ha^{-1}$ );

$L_d$  - densidade da área foliar do copado ( $m^3 m^{-2}$ ).

O uso da Eq. 2. 18 ou 2.22 depende da transmissividade da atmosfera, ( $\tau_{atm}$ ) que se expressa pela razão entre a radiação solar incidente à superfície e a radiação extraterrestre. Quando  $\tau_{atm} = 0.8$  assume-se que as condições atmosféricas correspondem a dias de céu limpo e quando  $\tau_{atm} = 0.2$  assume-se que o céu está nublado.

## 2.3. Resultados e discussão

### 2.3.1. Quantificação da evapotranspiração pelo balanço de água no solo

A relação entre a pressão efetiva medida pelos sensores watermark e a correspondente humidade volumétrica do solo obteve-se a partir da Eq. [2.4] e os resultados estão presentes na Figura 2.13.

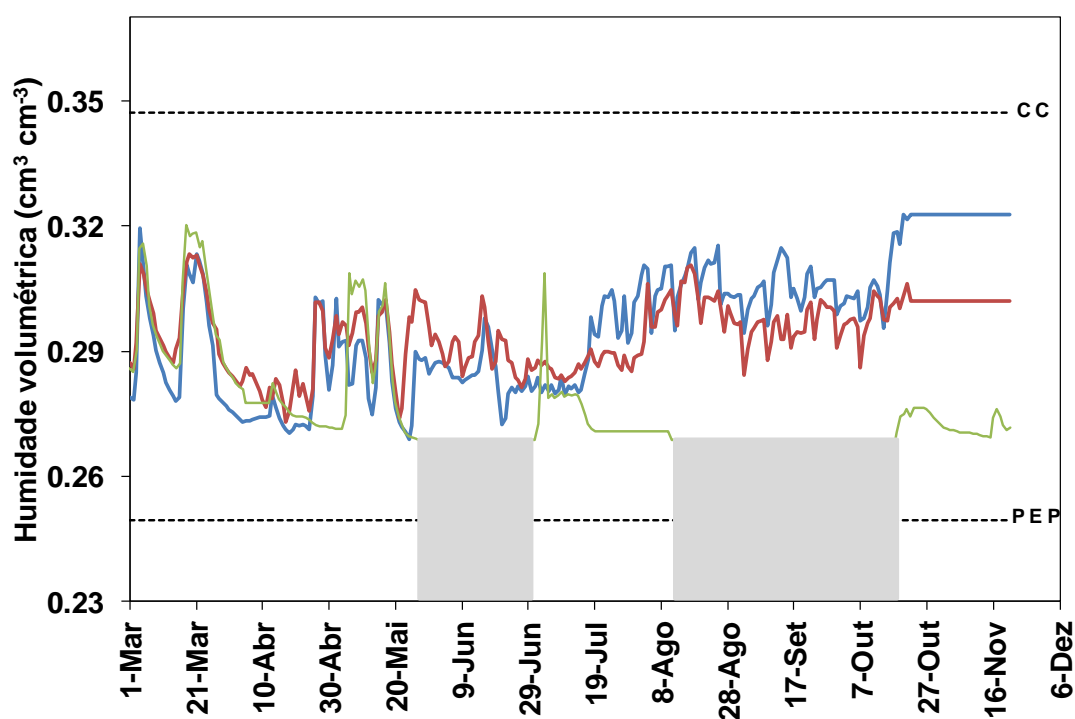


Figura 2.13 - Humidade volumétrica do solo avaliada com sensores watermark colocados na zona de influência dos gotejadores desde março e novembro de 2006. — tratamento A; — tratamento B; — tratamento C. A zona a cinzento corresponde aos intervalos durante os quais os sensores watermark perderam a eficácia.

Pela análise da Figura 2.13, verifica-se que os padrões de variação da humidade do solo oscilaram ao longo do período compreendido entre março e novembro de 2006, em função da sensibilidade dos sensores watermark aos

diferentes teores de água existentes no solo. Os sensores instalados nos tratamentos A e B mostraram-se eficazes a essa monitorização ao longo de toda a época de rega. Em contrapartida, os sensores instalados no tratamento C, tratamento que induz em algumas fases do ciclo vegetativo défices hídricos prolongados, mostraram-se ineficazes na determinação do teor de água no solo para valores iguais ou inferiores a  $0.27 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , uma vez que não registam adequadamente os valores de humidade do solo para além dos -200 kPa. Porém, sabe-se que a oliveira é capaz de estabelecer potenciais abaixo do correspondente ao ponto de emurchecimento permanente entre a folha e as raízes, de modo a extrair água devendo o instrumento de monitorização conseguir tal leitura com exatidão. Tal não é o caso dos watermarks, onde a informação referente ao teor de água do solo recolhida ao longo da época de rega dos anos de 2006 permitiu apurar que, apesar da monitorização da água com o auxílio dos sensores watermark, poder ser uma alternativa viável dado que são equipamentos baratos e facilmente automatizáveis, esta perde a eficiência quando se definem programas de rega deficitários, frequentes na condução de rega destes pomares.

Em simultâneo, monitorizou-se a água do solo com a sonda profile probe PR1 e na Figura 2.14 está patente o modelo de variação da humidade volumétrica do solo no período de março a outubro de 2006. À semelhança da Figura 2.13, também a monitorização feita com a profile probe revela que em todos os tratamentos houve oscilação da humidade do solo como resultado da dinâmica do sistema radical das árvores. As maiores oscilações surgiram no tratamento C com o solo a apresentar quedas acentuadas de humidade volumétrica nos períodos em que a rega está ausente. Indicam-se aqui os dias 28 de junho, 24 de agosto e 19 de setembro sendo o último aquele que apresenta o menor valor de humidade volumétrica cerca de  $0.11 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Contudo, a sonda profile probe, contrariamente aos sensores watermark, mostrou sempre uma boa performance registando adequadamente a evolução da humidade do solo tendo em conta as diferentes estratégias de rega.

Quando se compara o desempenho dos dois equipamentos, sensores watermark e sonda profile probe, constata-se que os sensores watermark podem considerar-se equipamentos válidos na condução da rega em situações de conforto hídrico para as árvores, como é o caso do tratamento A, contudo,

perdem eficiência e são desaconselhados quando se definem estratégias de rega deficitárias como é o caso dos tratamentos B e C.

As Figuras 2.15 e 2.16 mostram a evolução das componentes do balanço de água no solo durante as épocas de rega de 2006 e 2007 e pela sua análise, é perceptível que no início da época de rega, dia 23 de março de 2006 e dia 30 de março de 2007, todos os tratamentos se encontravam em condições similares, no que diz respeito à água armazenada no solo, com conteúdos próximos do correspondente à capacidade de campo, e que o conteúdo de água armazenado no solo, em média, não diferiu nos dois anos em estudo.

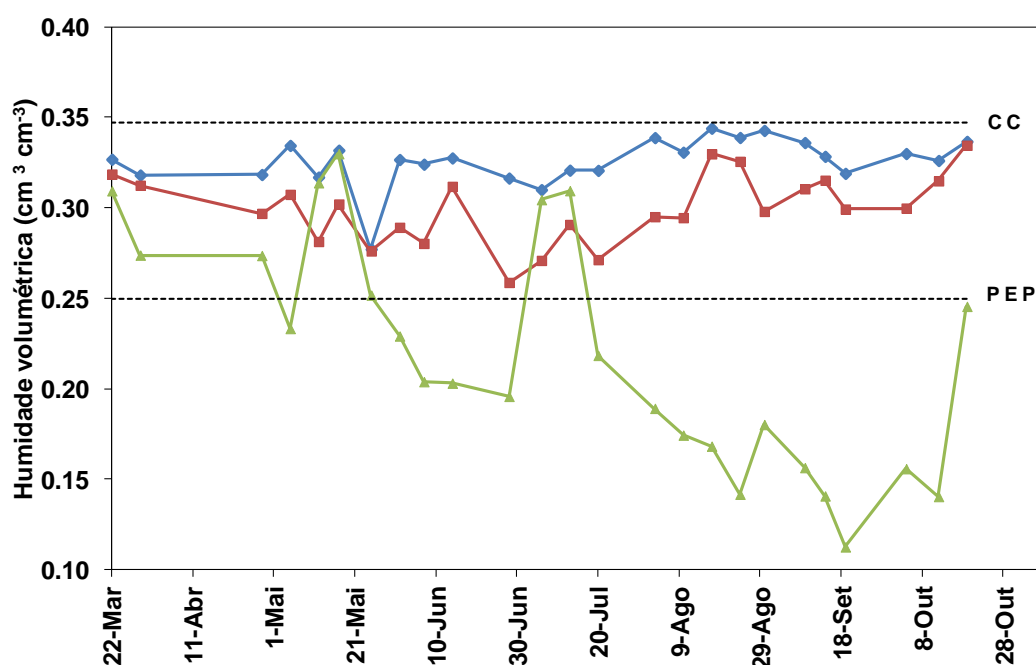


Figura 2.14 - Humidade volumétrica do solo avaliada com a sonda profile probe PR1 da Delta T. As medições efectuaram-se em tubos de acesso colocados na zona de influência dos gotejadores no período compreendido entre março e outubro de 2006. —♦— tratamento A; —■— tratamento B; —▲— tratamento C.

Deste modo, os tratamentos A e B tiveram comportamentos muito semelhantes nos dois anos, o tratamento A apresentou de uma maneira geral mais água no solo do que o tratamento B porque recebia em cada rega mais 40% de água do que este.

O tratamento C, RDI, com aplicações de água apenas em algumas fases do ciclo vegetativo apresentou oscilações acentuadas no conteúdo de água armazenado no solo, contudo os acréscimos de água no solo eram descontínuos e posteriormente acompanhados de períodos prolongados sem rega assistindo-se a quedas acentuadas da água no solo.

No caso do tratamento D, houve um decréscimo ao longo da época de rega do conteúdo de água no solo, porque a extração da água efetuada pelas raízes das árvores não foi acompanhada de uma reposição da mesma ordem de grandeza. Os pequenos eventos de precipitação que ocorreram durante o verão pouco impacto tiveram no acréscimo do conteúdo de água no solo.

Os meses de outubro e novembro do ano de 2006 foram bastante chuvosos (Quadro 2.5) pelo que a rega cessou no dia 17 de outubro. Em 2007, a rega prolongou-se até 23 de novembro em virtude das chuvas outonais terem vindo tardiamente. Daqui decorre o diferencial médio de mais 38 mm de água armazenados no solo no final da época de 2007, comparativamente a 2006.

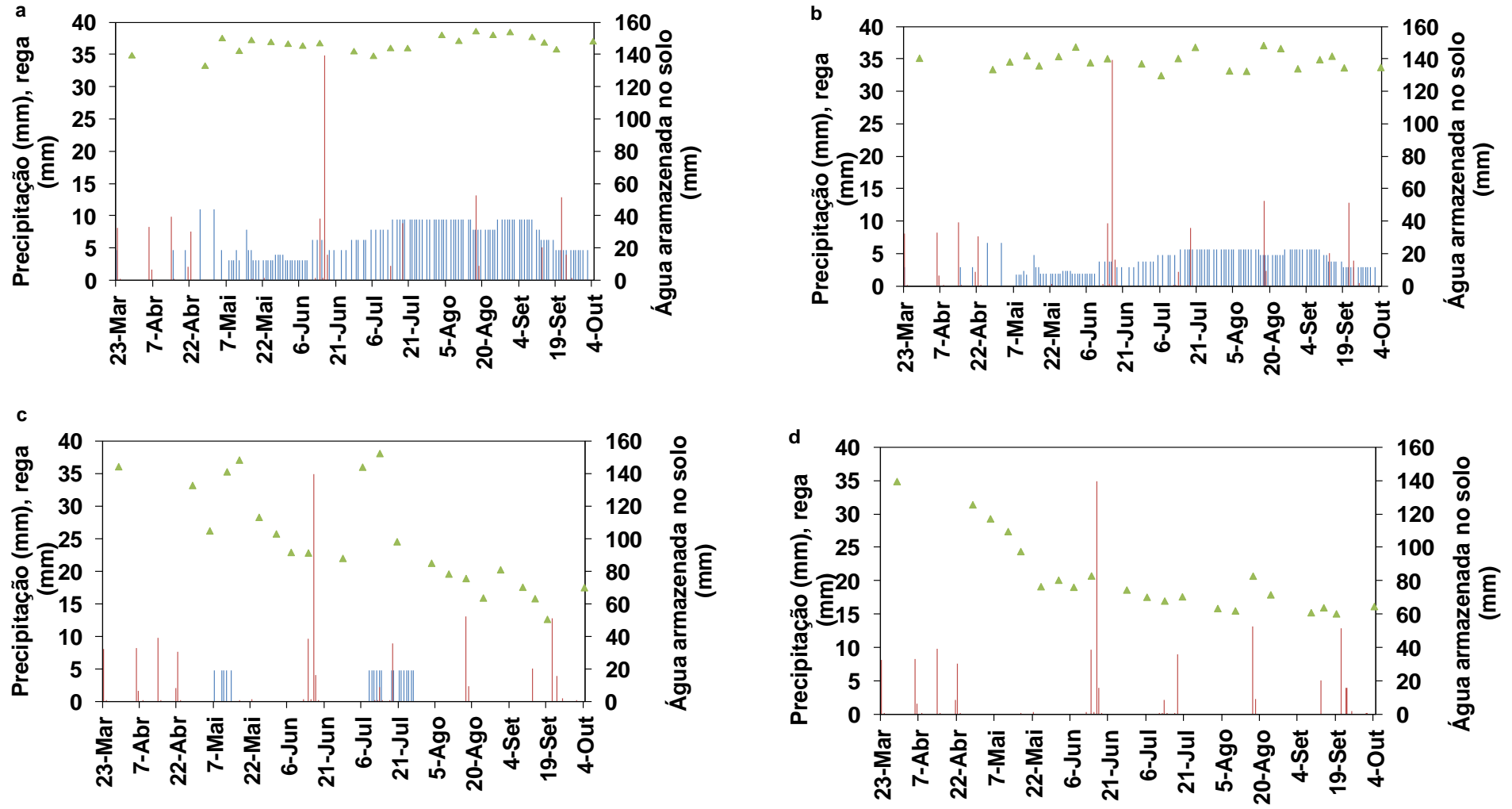


Figura 2.15 - Componentes do balanço de água no solo durante a época de rega de 2006. — Precipitação; — rega; ▲ armazenamento de água no solo. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D.

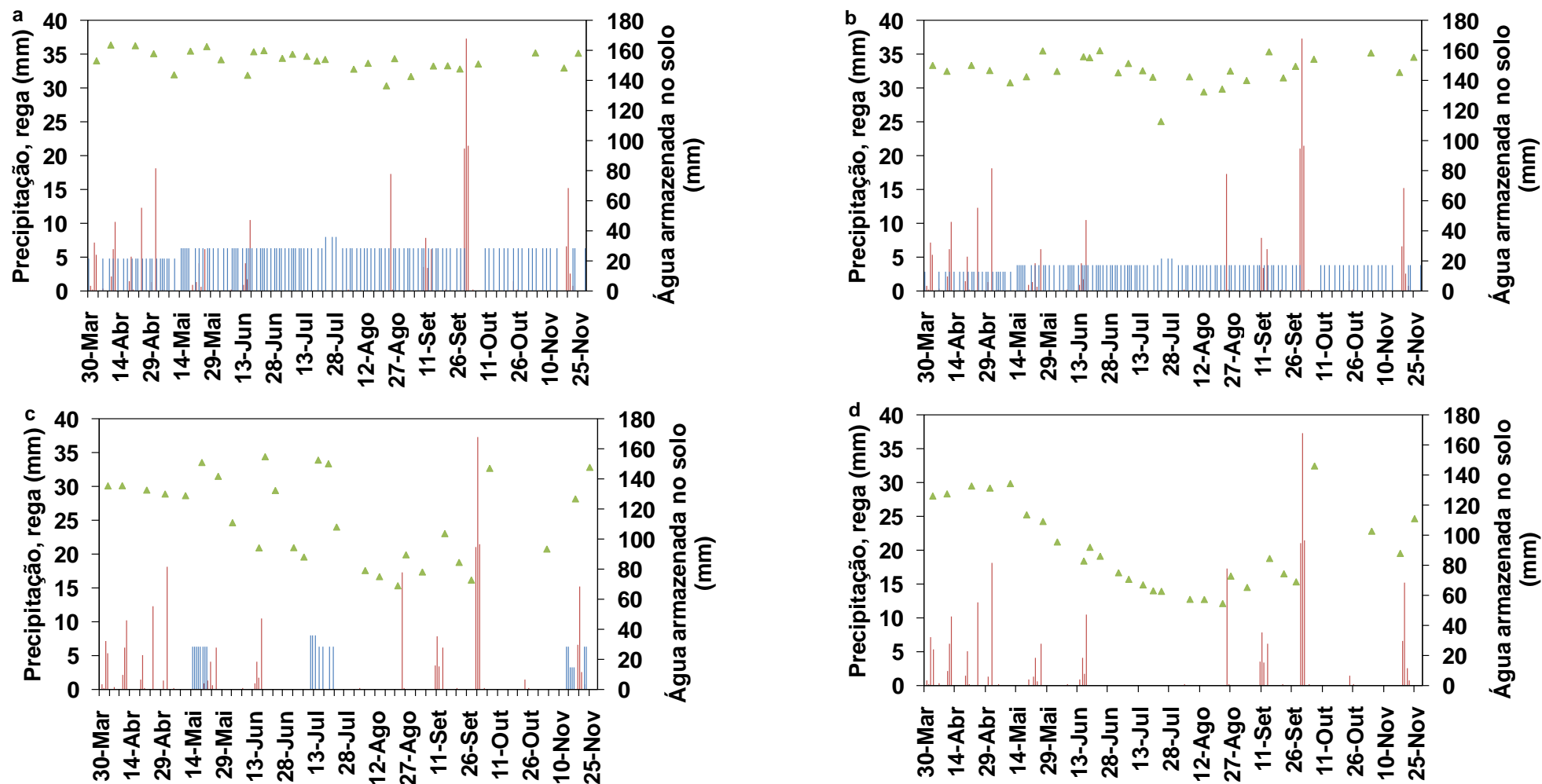


Figura 2.16 - Componentes do balanço de água no solo durante a época de rega de 2007. — Precipitação; — rega; ▲ armazenamento de água no solo. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D.

O Quadro 2.9 apresenta a evolução do conteúdo relativo de água útil no solo (*relative extractable water* na terminologia anglo-saxónica) ao longo das épocas de rega de 2006 e 2007. Este parâmetro é um indicador do abastecimento do solo em água e da quantidade de água disponível para as árvores. Estes obtêm-se através da Eq. [2.24].

$$REW = \frac{(Rw - Rmin)}{(Rmáx - Rmin)} \quad [2.24]$$

onde,

*REW*- conteúdo relativo de água útil no solo;

*Rw* - conteúdo de água no solo (mm);

*Rmin* - conteúdo mínimo de água no solo durante o período experimental (mm);

*Rmáx*- conteúdo de água correspondente à capacidade de campo (mm).

Pela análise do Quadro 2.9, constata-se que o tratamento A manteve valores de *REW* sempre elevados e muito próximos de 1. Em alguns períodos do ano de 2007, de 16 de abril a 12 de maio, de 27 de maio a 9 de junho e de 25 de junho a 19 de julho de 2007, os valores de *REW* foram ligeiramente superiores a 1 o que indicia quantidades de água aplicadas superiores às que o solo pode reter. No geral, os valores de *REW* observados são indicativos de que a zona humedecida pelos gotejadores garantiu valores de humidade bastante confortáveis para as árvores. O solo do tratamento B registou valores de *REW* compreendidos entre 0.76 e 0.91 em 2006 e entre 0.74 e 0.99 em 2007 que, embora ligeiramente inferiores aos do tratamento A, permitiram concluir que este manteve disponibilidades de água elevadas tal como já tinha sido constatado pela observação das Figuras 2.15b e 2.16b.

O tratamento C, com aplicações de água estritamente reduzidas aos períodos de maior sensibilidade ao défice hídrico (antes da floração, ao início do endurecimento do caroço e cerca de 15 dias antes da colheita), justifica o comportamento irregular dos valores de *REW* presentes no Quadro 2.9. Nos anos de 2006 e 2007 até ao dia 12 de maio, período sem rega, os valores de



*REW* decrescem gradualmente, atingindo valores da ordem dos 0.61 e 0.76 respetivamente. A seguir ao período de rega, os valores de *REW* crescem para 0.86 e 0.87 em 2006 e 2007, respetivamente. Este comportamento repete-se no período de 7 de julho a 19 de julho de 2006 e no período de 20 de julho a 3 de agosto de 2007 e, a partir destas datas, os valores de *REW* decrescem gradualmente e atingem os menores valores, 0.08 e 0.37, no período de 10 de setembro a 25 de setembro dos anos de 2006 e 2007, respetivamente.

Quadro 2.9 - Conteúdo relativo de água útil do solo durante o período de rega dos anos de 2006 e 2007.

Período do ano (dia, mês)	Tratamentos							
	A		B		C		D	
	<i>REW</i> (2006)	<i>REW</i> (2007)	<i>REW</i> (2006)	<i>REW</i> (2007)	<i>REW</i> (2006)	<i>REW</i> (2007)	<i>REW</i> (2006)	<i>REW</i> (2007)
18 mar a 31 mar	0.86	1.00	0.89	0.88	0.91	0.85	0.82	0.76
01 abr a 15 abr	0.82	1.00	0.82	0.93	0.84	0.81	0.78	0.72
16 abr a 28 abr	0.82	1.07	0.82	0.93	0.84	0.80	0.78	0.76
29 abr a 12 mai	0.88	1.01	0.76	0.91	0.61	0.76	0.62	0.78
13 mai a 26 mai	0.92	0.97	0.84	0.86	0.86	0.87	0.46	0.69
27 mai a 9 jun	0.92	1.02	0.88	0.98	0.51	0.72	0.26	0.49
10 jun a 24 jun	0.92	0.98	0.85	0.96	0.39	0.69	0.29	0.39
25 jun a 6 jul	0.88	1.02	0.83	0.99	0.41	0.66	0.24	0.30
07 jul a 19 jul	0.87	1.01	0.74	0.94	0.93	0.60	0.17	0.18
20 jul a 3 ago	0.90	0.98	0.91	0.71	0.44	0.71	0.18	0.12
04 ago a 17 ago	0.95	0.95	0.79	0.79	0.29	0.32	0.13	0.13
18 ago a 9 set	0.98	0.91	0.87	0.84	0.21	0.26	0.22	0.22
10 set a 25 set	0.92	0.95	0.83	0.96	0.08	0.37	0.10	0.10

Relativamente ao tratamento D, os valores de *REW* mostram que o solo até 12 de maio de 2006 e até 26 de maio de 2007 apresentou valores de humidade acima do correspondente ao ponto de emurchecimento permanente e, a partir destas datas, os valores de *REW* decresceram gradualmente, atingido valores da ordem dos 0.10. Tal facto vem mais uma vez comprovar a importância da rega dos olivais situados na região do Alentejo, onde as chuvas escassas no final da primavera e durante o verão condicionam o armazenamento de água no solo e o seu uso pelas árvores e, conseqüentemente, a produção de azeitona e azeite.

### 2.3.2. Quantificação das componentes da evapotranspiração

Com a intenção de avaliar cada uma das componentes da evapotranspiração de forma a quantificar a transpiração das árvores, principal elemento da evapotranspiração, e daí separá-la de  $ET_c$ , recorreu-se à avaliação da transpiração por monitorização direta das árvores, utilizando-a como biosensor.

No caso particular deste olival, avaliou-se também a evaporação do solo que pode representar uma fração importante da  $ET_c$  na medida em que uma percentagem considerável de solo, cerca de 80%, fica a descoberto e exposta à evaporação direta.

#### 2.3.2.1. Transpiração

Os padrões de variação da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e da transpiração ao longo das épocas de rega de 2006 e 2007 são apresentados na Figura 2.17. No cálculo da  $ET_0$ , usou-se o método de Penman-Monteith com parâmetros da relva (resistência estomática igual a  $0.70 \text{ m s}^{-1}$  e altura da relva igual a 0.12 m) de acordo com Allen *et al.*, (1998). A evolução da  $ET_0$  para os dois anos em análise permite inferir que, no ano de 2006, os valores de  $ET_0$  foram mais elevados do que em 2007, com registos anuais de 1210 mm para o ano de 2006 e 1191.8 mm para o ano de 2007. O período de tempo referenciado no gráfico é aquele que exhibe os maiores valores de  $ET_0$ ,

aproximadamente 70% do total da  $ET_0$  anual, e que corresponde exatamente ao período durante o qual ocorre a floração e o desenvolvimento do fruto, processos fisiológicos que condicionam a produção de azeitona/azeite. Ao estabelecer comparação entre os valores anuais de  $ET_0$  e a precipitação anual (Quadro 2.5), infere-se que a precipitação anual é bastante inferior e corresponde apenas a 45% em 2006 e 29% em 2007, do valor total da evapotranspiração de referência.

Relativamente à transpiração, foram as árvores do tratamento C que durante o ano de 2006 exibiram os maiores valores diários, cerca de  $5.4 \text{ mm dia}^{-1}$ , os menores valores registaram-se no período de 12 a 14 de março e foram de  $0.55 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Os tratamentos A e B apresentaram valores máximos de transpiração muito similares, da ordem dos  $4.3 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $4.4 \text{ mm dia}^{-1}$ , respetivamente. No que diz respeito aos valores mínimos, estes foram da ordem dos  $0.6 \text{ mm dia}^{-1}$ .

O tratamento D registou os menores valores de transpiração, comparativamente aos restantes tratamentos, os quais estiveram compreendidos entre  $0.9 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $3.8 \text{ mm dia}^{-1}$  nos dias 17 de março e 22 de junho, respetivamente.

Em 2007, os maiores valores de transpiração observaram-se nas árvores o tratamento B e foram de  $6.6 \text{ mm dia}^{-1}$ , sendo que o valor mínimo registado neste tratamento aconteceu no dia 1 de outubro e foi de  $0.8 \text{ mm dia}^{-1}$ . As árvores do tratamento A apresentaram o segundo maior valor de transpiração cerca de  $6 \text{ mm dia}^{-1}$  no dia 29 de julho e no final da época de rega, dia 1 de outubro, registou o valor mais baixo, que foi de  $0.8 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Quanto às árvores do tratamento C, estas registaram como maior taxa de transpiração  $5.8 \text{ mm dia}^{-1}$  no dia 13 de julho e como menor cerca de  $1 \text{ mm dia}^{-1}$ , no final da época de rega no dia 1 de outubro.

À semelhança do padrão de evolução registado em 2006, também foi o tratamento D a exibir os valores mais baixos de transpiração os quais estiveram limitados pelos  $4.7 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $0.8 \text{ mm dia}^{-1}$ .

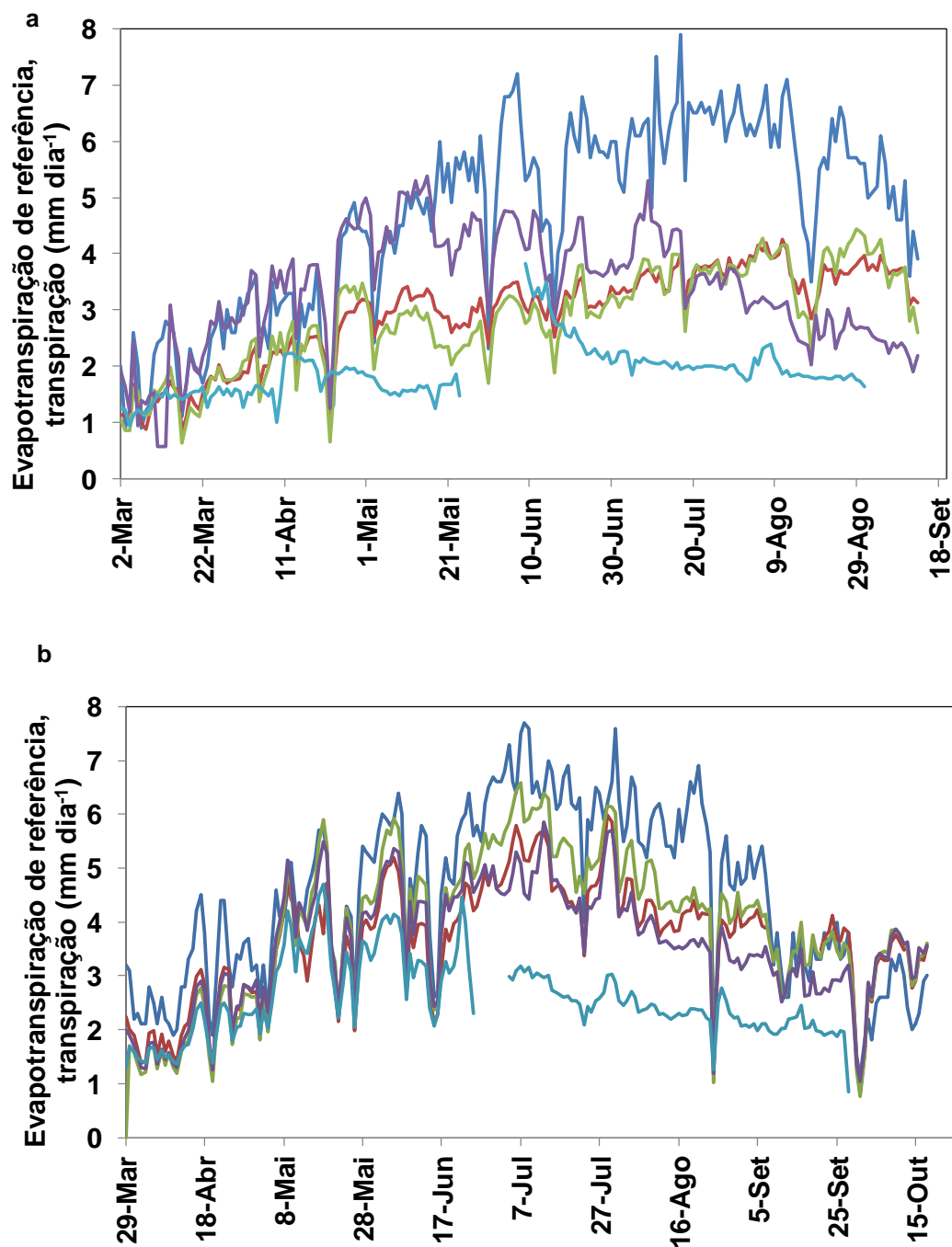


Figura 2.17 - Evolução sazonal da transpiração e da evapotranspiração de referência estimada pelo método da FAO-Penman-Monteith. — evapotranspiração de referência; — tratamento A; — tratamento B; — tratamento C; — tratamento D. a. ano de 2006 e b. ano de 2007.

Na tentativa de estabelecer uma relação entre a evolução sazonal da transpiração definida para os diferentes tratamentos e da  $ET_0$ , comparam-se os padrões de evolução destas duas variáveis. As árvores dos tratamentos A, B e

C foram bastante sensíveis às variações diárias da  $ET_0$  tendo uma evolução no mesmo sentido da  $ET_0$ . Porém, as árvores do tratamento D durante o ano de 2006 e 2007 mostraram uma sintonia entre as duas variáveis até junho e, a partir dessa data, as taxas de transpiração mantiveram-se praticamente constantes com valores da ordem dos  $2 \text{ mm dia}^{-1}$  e insensíveis às variações de  $ET_0$  o que sugere que, quando o conteúdo de água no solo é baixo (Figura 2.15d e 2.16d), as oliveiras deixam de responder de forma eficaz às solicitações atmosféricas e, da superfície das folhas, evapora-se menos água para a atmosfera. Este comportamento espelha a sensibilidade da oliveira às condições atmosféricas bem como os mecanismos fisiológicos de adaptação da oliveira à falta de água.

A figura 2.18, ilustra um exemplo da transpiração horária avaliada através do método do impulso de calor para o período de tempo compreendido entre 10 de julho e 15 de julho de 2007. O fluxo diário da transpiração segue o padrão de uma curva sinusoidal com um ramo de desenvolvimento crescente durante o período da manhã, coincidindo os maiores valores com o período entre as 12:30 e 16:30 horas seguindo-se o ramo descendente a ocorrer no final do dia. No que diz respeito às taxas de transpiração, foram as árvores dos tratamentos C e B que apresentaram os maiores valores de transpiração, cerca de  $11 \text{ l h}^{-1}$  e  $9 \text{ l h}^{-1}$ , respetivamente. As árvores do tratamento A, apesar de estarem em situação de conforto hídrico, transpiraram no período de maior intensidade transpirativa, em particular, menos  $5 \text{ l h}^{-1}$  e menos  $3 \text{ l h}^{-1}$  do que os tratamentos C e B, respetivamente. As árvores do tratamento D, conduzido em sequeiro, exibiram as mais baixas taxas de transpiração, tal como era esperado.

Dado que durante a noite a transpiração cessa, seria de esperar que os valores da taxa de transpiração fossem nulos. No entanto, e a avaliar pela figura 2.17, apesar de serem baixas não coincidem com zero, sendo de concluir que tal fenómeno se prende com o facto do fluxo de seiva continuar a ocorrer, de modo a repor a água perdida pelos tecidos durante o dia.

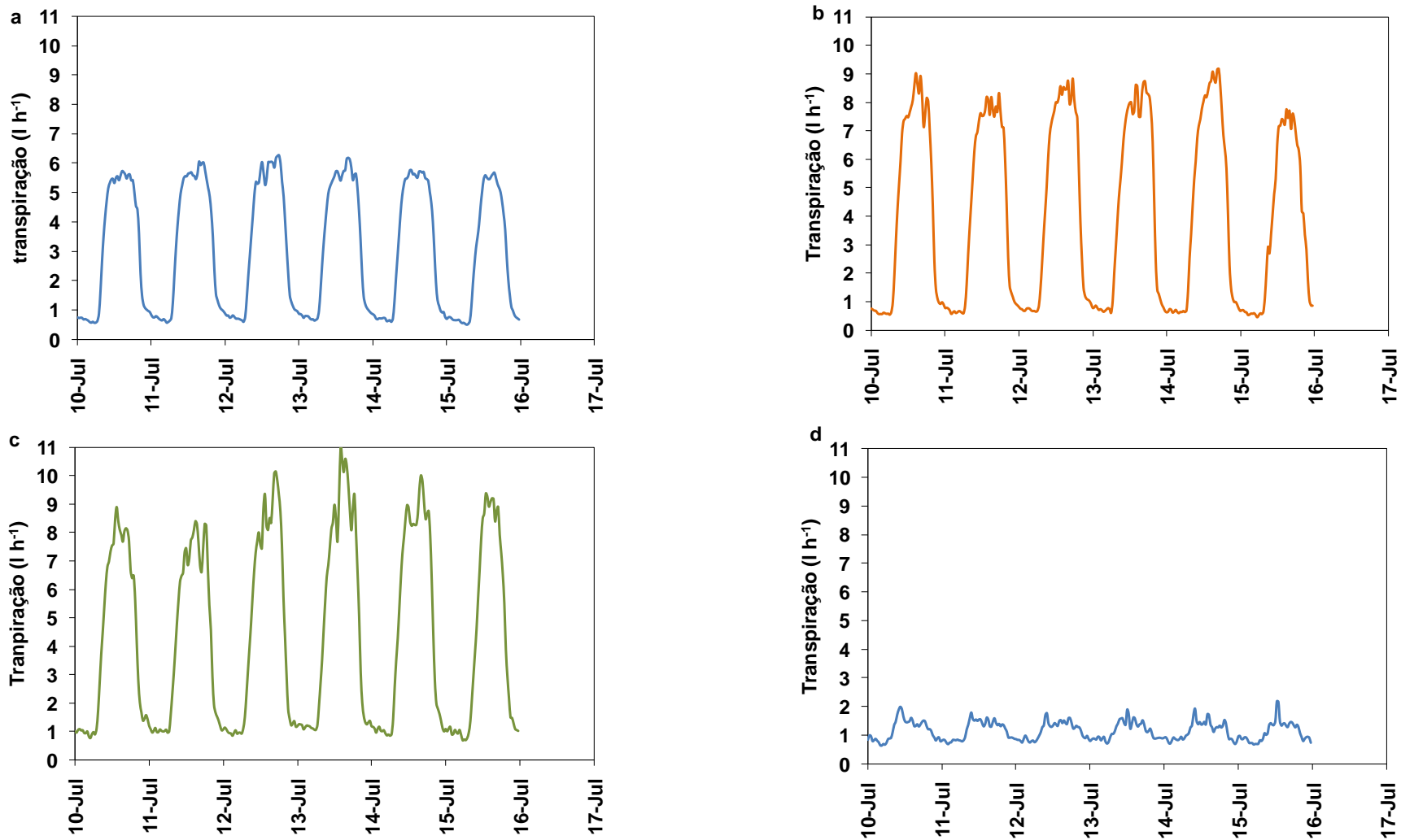


Figura 2.18 - Cinética diária da transpiração realizada entre os dias 10 de julho e 15 de julho de 2007. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D.

### 2.3.2.2. Transpiração relativa

A transpiração relativa (razão entre a transpiração das oliveiras submetidas a rega deficitária e a transpiração obtida em árvores submetidas à rega plena) tem vindo a ser usada como indicador de défice hídrico e, por conseguinte, poderá ser uma boa ferramenta na gestão da rega até porque a sua obtenção resulta do registo contínuo e automatizável da transpiração e recorrendo a sensores de fluxo de seiva.

Na figura 2.19, está patente a evolução da transpiração relativa durante os anos de 2006 e 2007. No ano de 2006, as árvores do tratamento B estiveram sempre em conforto hídrico, já que os valores de transpiração relativa foram muito próximos de 1, havendo apenas a salientar o período entre 29 de março e 3 de maio como aquele em que os valores da transpiração relativa apresentaram maiores oscilações com variações entre 0.7 e 1.5. No que se refere ao tratamento C, o vigor da oliveira monitorizada garantiu sempre valores de transpiração relativa acima dos apresentados pela árvore do tratamento A, havendo inclusivamente períodos de tempo em que este indicador foi igual a 2 não se registando até ao momento monitorizado, 29 de agosto, valores de transpiração relativa que deixassem perceber que as árvores de C estavam em condições de stress hídrico. Quanto ao tratamento D, por beneficiar apenas da água proveniente da chuva, registou valores de transpiração relativa compreendidos entre 0.90, início da época de rega e 0.50 no final da rega o que é indicador de uma transpiração de apenas 50%, correspondente ao ótimo. No ano de 2007, o comportamento de todos os tratamentos foi semelhante ao do ano anterior.

Os tratamentos B e C afiguraram-se para o período em análise com duas boas alternativas ao tratamento A, sendo que com menores aplicações de água garantiram transpirações relativas próximas de 1 o que confirma a permanência em situação de conforto hídrico com menores aplicações de água.

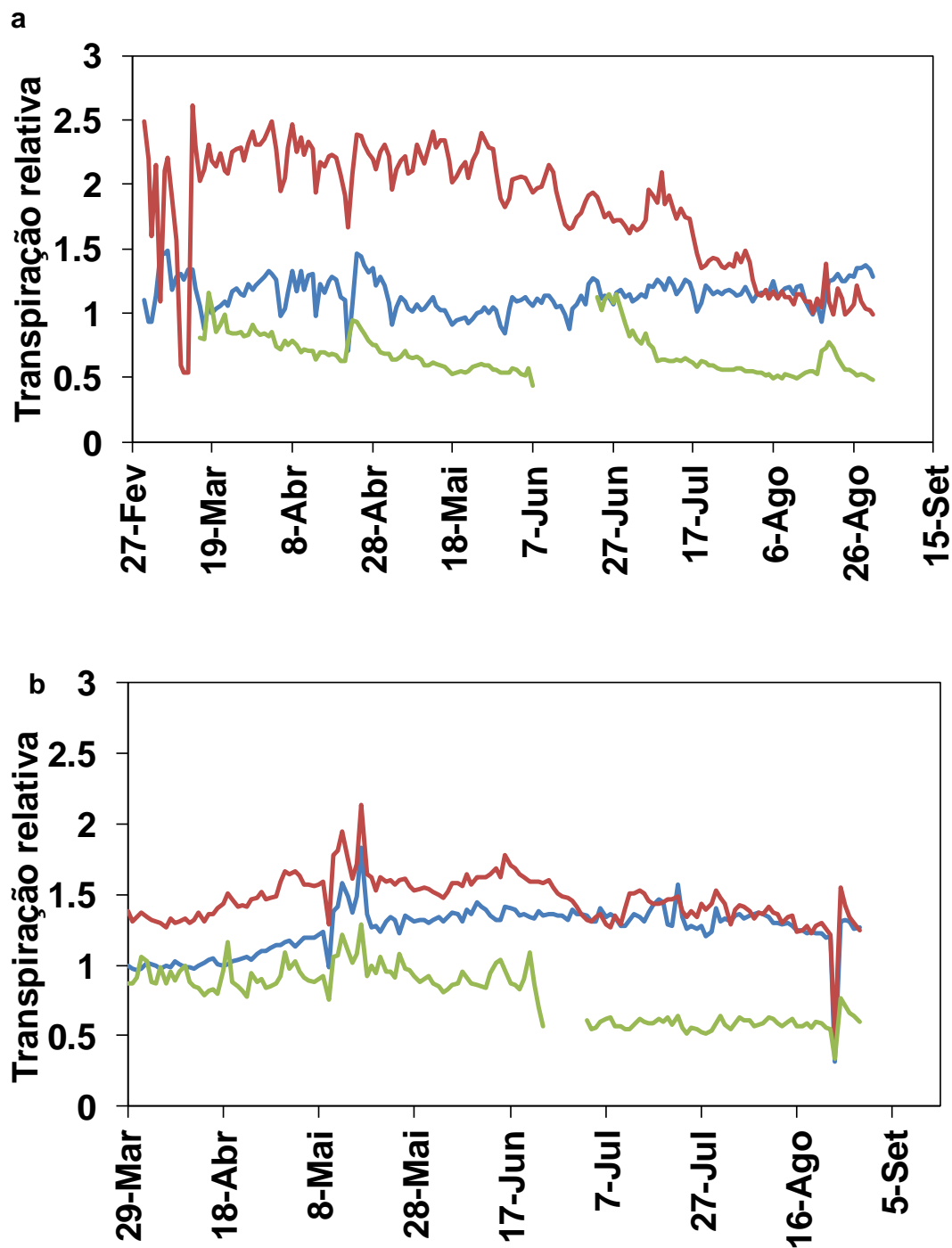


Figura 2.19 - Valores de transpiração relativa calculada pelo método do impulso de calor. — tratamento B; — tratamento C; — tratamento D. a. ano de 2006 e b. ano de 2007.



### 2.3.3. Evaporação do solo

Durante a estação de rega de 2007, três ciclos de dessecação foram conseguidos sendo os valores médios de evaporação apresentados na Figura 2.20.

Em cada um dos ciclos de dessecação houve, como era expectável, um nítido decréscimo dos valores a evaporação do solo, como resultado da diminuição da humidade do solo e da condutividade hidráulica. Comparando os valores de  $E_s$  no primeiro dia de cada ciclo, dias 25 de julho, 14 de agosto e 28 de agosto e tomando como referencia o 3º ciclo, observam-se diferenças da ordem dos 0.81mm e 0.41mm nos dias 25 de julho e 14 de agosto, respetivamente, sendo o dia 28 de agosto o de maior valor de evaporação.

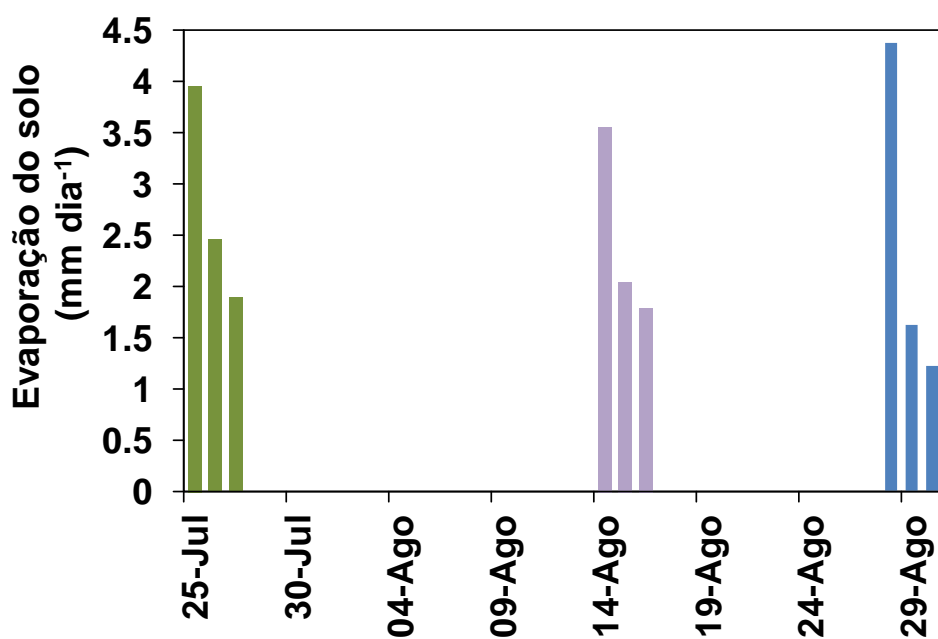


Figura 2.20 - Evolução da evaporação do solo no tratamento A em três ciclos de dessecação . ■ 1º ciclo; ■ 2º ciclo; ■ 3º ciclo.

O Quadro 2.10 confirma a importância da evaporação no processo evapotranspirativo dos olivais regados onde a evaporação relativa (razão entre a evaporação do solo e a evapotranspiração) variou entre 30% e 50%, valores próximos dos alcançados por Testi *et al.* (2006) que, num olival de baixa

densidade ( $100 \text{ árvores ha}^{-1}$ ) situado em Córdoba, obtiveram valores de  $E_s$  correspondentes a 40% do valor anual de  $ET_c$ .

Quadro 2.10- Evaporação do solo relativa obtida em 2007 através da razão entre a evapotranspiração ( $ET_c$ ) e evaporação do solo ( $E_s$ ). Os valores de transpiração foram avaliados com sensores de fluxo de seiva e a evaporação do solo foi avaliada com microlisímetros.

Dia do ano	$T$ (mm)	$E_s$ (mm)	$ET_c$ (mm)	$E_s/ET_c$
25 jul	4.7	4.0	9.0	0.5
26 jul	4.9	2.5	7.3	0.3
14 ago	3.8	3.6	7.4	0.5
15 ago	3.7	4.4	8.1	0.5

#### 2.3.4. Comparação entre a transpiração avaliada pelo método do fluxo de seiva (impulso de calor) e a evapotranspiração estimada pelo método do balanço de água no solo

Quando, para o ano de 2006 e para períodos de aproximadamente quinze dias se estabelece a comparação entre os valores da transpiração obtidos pelo método do impulso de calor e os valores de  $ET_c$  obtidos pelo método do balanço de água no solo (Quadro 2.11), infere-se que no tratamento A em que não houve déficit hídrico, os valores de  $ET_c$  foram em geral superiores aos valores da transpiração. Porém, nos tratamentos B os valores da transpiração superaram os valores da evapotranspiração quase que durante todo o período de tempo considerado, sendo apenas inferiores em três períodos considerados. No tratamento C, a transpiração foi sempre superior à evapotranspiração. A razão das diferenças entre o tratamento A e os restantes decorreu da condução de rega. Entre os tratamentos A e B, não obstante a frequência de rega ser idêntica, as dotações em B foram 40% inferiores às do tratamento A, pelo que o conteúdo de água no solo em B foi inferior, conduzindo a menores valores de  $E_s$ , conforme já explorado em 2.3.3. No tratamento C, com períodos de déficit hídrico severo resultantes de regas

pouco frequentes (Quadro 2.6), apenas a componente transpiração foi significativa, sendo a  $E_s$  praticamente desprezável, já que a superfície do solo permaneceu quase sempre seca. Importa ainda observar que, apesar dos valores de  $ET_c$  se aproximarem de zero, o que induziria considerar paragem da transpiração e a conseqüente morte das árvores, tal é contrariado pelos valores de transpiração que deixam antever que as raízes exploram zonas do solo não monitorizadas e que garantem a dinâmica de fluxo de seiva e a sobrevivência das árvores.

Quadro 2.11 - Estimativa da transpiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) durante o ano de 2006, através de sensores de fluxo de seiva e estimativa de  $ET_c$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) para o mesmo período de tempo com recurso à sonda PR1.

Período de tempo		Tratamentos					
		A		B		C	
		Transpiração	$ET_c$	Transpiração	$ET_c$	Transpiração	$ET_c$
18-03-06	31-03-06	1.6	0.9	1.6	0.6	2.5	0.6
01-04-06	15-04-06	2.1	0.8	2.2	0.5	3.3	0.3
16-04-06	28-04-06	2.4	0.8	2.6	0.5	3.6	0.3
29-04-06	12-05-06	3.0	2.4	2.8	1.1	4.5	1.5
13-05-06	26-05-06	3.0	3.3	2.5	1.6	4.5	0.6
27-05-06	09-06-06	3.1	3.0	2.8	1.7	4.3	0.2
10-06-06	24-06-06	3.1	3.1	2.9	1.7	4.0	0.3
25-06-06	06-07-06	3.2	3.8	3.1	2.0	3.8	1.6
07-07-06	19-07-06	3.6	5.6	3.6	2.9	4.3	1.2
20-07-06	03-08-06	3.8	7.9	3.7	3.7	3.5	0.2
04-08-06	17-08-06	3.8	8.0	3.7	3.8	2.9	0.0
18-08-06	09-09-06	3.7	7.7	3.9	4.0	2.6	0.1

A observância de transpiração, detetada pelo fluxo de seiva e a incerteza relativa ao volume de solo explorado pelas raízes, em profundidade e lateralmente, torna a metodologia do balanço de água no solo inadequada para a estimativa da evapotranspiração em cobertos lenhosos do tipo deste olival de

baixa densidade e confirma que o uso da árvore como biosensor responde melhor à dinâmica da água no solo. A condução das regas é mais adequada quando complementada com avaliações da componente evaporação do solo.

## 2.4. Conclusão

Ao longo deste capítulo, foram apresentados e discutidos resultados relativos à quantificação da evapotranspiração num coberto lenhoso constituído por oliveiras onde foram implementados quatro estratégias de rega. Foi retirada informação suficiente para permitir tirar as seguintes conclusões:

- (1) Os sensores watermark, apesar de serem equipamentos automatizáveis, baratos e de fácil manutenção, perdem a eficiência em regimes de défice hídrico. Em contrapartida, a sonda profile probe PR1 mantém um bom desempenho em quaisquer dos regimes definidos;
- (2) O método do balanço de água no solo não é adequado para estimar a evapotranspiração em olivais antigos com um sistema radical que se expande para além da zona humedecida pelos gotejadores, já que a monitorização é feita em alguns pontos e a incerteza em relação à localização das raízes torna-o pouco eficaz na determinação de  $ET_c$ ;
- (3) O uso da técnica do impulso de calor revelou-se uma metodologia adequada para monitorização da transpiração, uma vez que, para além de permitir um registo contínuo em tempo real, ao utilizar a árvore como biosensor responde bem à dinâmica do solo bem como às variáveis ambientais;
- (4) A componente evaporação do solo, tal como era exetável, tem relevância no compute da  $ET_c$  podendo ser 30 a 50% desta;
- (5) Os cenários de rega deficitária, tratamentos B e C, mantiveram valores de transpiração relativa iguais ou superiores a 1 durante toda a época de rega. Tal facto deixa perceber que são alternativas ao tratamento A, com consumos de água mais reduzidos.

A informação apresentada neste capítulo é ainda complementada com os resultados obtidos e descritos no artigo 1:

Santos, F.L., Valverde, P.C., Ramos, A.F., Reis, J.L. & Castanheira, N.L. (2007). **Water use and response of a dry-farmed olive orchard recently converted to irrigation.** Biosystems Engineering 98: 102-114

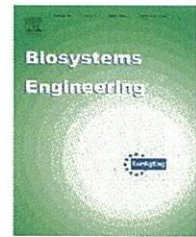


## **2.5. Artigo 1**

---



ELSEVIER

Available at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)journal homepage: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110)

## Research Paper: SW—Soil and Water

# Water use and response of a dry-farmed olive orchard recently converted to irrigation

Francisco L. Santos<sup>a,\*</sup>, Pedro C. Valverde<sup>a</sup>, Alice F. Ramos<sup>b</sup>,  
João L. Reis<sup>a</sup>, Nádía L. Castanheira<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ciências Agrárias Mediterrânicas, University of Évora, Évora, Portugal

<sup>b</sup>Escola Superior Agrária de Beja, Beja, Portugal

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 6 July 2006

Accepted 26 March 2007

Available online 20 July 2007

Experimental results obtained in Southern Portugal from a dry-farmed mature olive tree orchard recently converted to drip irrigation are described. Water use and response to two irrigation management practices by olive trees was monitored with sap flow compensation heat pulse sensors, 'Watermark' granular matrix block sensors and a capacitance probe. The 80-plus-year-old mature olive tree orchard planted on a 12 m by 12 m spacing layout was converted in 2005 from dry-farming to drip irrigation and subjected to two water treatments: trees irrigated daily to supply for crop water demand and trees irrigated before-flowering, during pit-hardening and before crop-harvesting. Sap flow sensors were implanted in sample trees at three different positions around the trunk and measurements were taken at 30 min intervals during 4 months, from April to mid-August of 2005. Tree transpiration rates were estimated as average of sap flow rates. When trees were fully irrigated, the observed differences in daily sap flow rate amplitude were explained by the natural trees difference in canopy cover, plant height and conductance of water vapour sites. However, when deficit irrigation was prescribed and, when the trees stopped being irrigated, they gradually lost their ability to adequately respond to the evaporative demands of the day, showing smaller variations in amplitudes sap flow. After irrigation ceased in May 15, transpiration rate gradually decreased from its maximum of  $71 \text{ h}^{-1}$ , when trees were fully irrigated and soil water content was near to field capacity, to values of less than  $31 \text{ h}^{-1}$  by July 3 as the soil water content gradually acted as the transpiration limiting factor. Transpiration rates recovered after irrigation was re-introduced on July 4. Although low in the non-irrigation period, transpiration rates never dropped to zero and stayed between  $37$  and  $50 \text{ l d}^{-1}$  from May 27 to June 9, as trees were able to extract soil water in the absence of irrigation. Olive trees maintained transpiration to levels as high as  $50 \text{ l d}^{-1}$  suggesting that long after irrigation is suppressed, a considerable amount of water held in the soil is made available to the trees. Differences in evapotranspiration and transpiration rates during the same period also indicated that olive trees, making use of the extensive root system developed in the 12 m by 12 m tree spacing, were able to extract soil water and maintain transpiration levels as high as  $50 \text{ l d}^{-1}$ , while soil water balance indicated tree evapotranspiration rates close to zero. This particular ability of dry-farmed olive trees to remove water held in the soil under adverse conditions of very low soil moisture and uncertainties associated with the real volume of soil effectively explored by the root system, make profile probe sensors, regardless of their accuracy, unsuitable for control of water uptake and management of dry-farmed olive orchards recently converted to irrigation. Likewise,

\*Corresponding author.

E-mail addresses: [fls@uevora.pt](mailto:fls@uevora.pt) (F.L. Santos), [aramos@esab.ipbeja.pt](mailto:aramos@esab.ipbeja.pt) (A.F. Ramos).  
1537-5110/\$ - see front matter © 2007 IAgRE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.  
doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.03.027



watermark sensors, able to capture the variations of high soil water, failed to provide meaningfully values below  $0.28\text{ cm}^3\text{ cm}^{-1}$ . Both sensors should be used with care in managing irrigation of olive tree orchards and, rather than relying on soil moisture status, monitoring tree water-use and response with the compensation heat-pulse method seems a more appropriate approach.

© 2007 IAgrE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Due to the characteristically infrequent and limited annual rainfall in the Mediterranean regions, there is a growing interest in improving the water-use of olive tree orchards as most modern olive orchards are drip irrigated and water availability for agricultural use is often scarce. Olive is a strategic crop in the Mediterranean basin, highly adaptable to drought and known to attain acceptable productions even under dry farming. Nevertheless, the irrigation of olive trees has proven to be important, leading to yield increases and better fruit quality (Fernández & Moreno, 1999). Deficit irrigation management practices often imposed by low water availability can maximise yield returns and provide economic benefits. The optimisation of irrigation management practices requires more research done on olive tree response to water stress through regulated deficit irrigation and efficient irrigation management programmes.

Water-use for olive production has been studied mainly through soil water availability and the influence of local weather on tree soil water consumption. However, soil heterogeneity, which requires the setting up of a considerable number of sensors to achieve acceptable representation of the effective portion of water held in the soil and used by the tree, often makes the information spatially disperse and difficult to use. It is also known (Xiloyannis et al., 1999) that to cope with water stress and effectively mobilise soil water, olive trees establish high potential gradients between the leaves and roots to extract soil water up to  $-2.5\text{ MPa}$ . Irrigation control based on such measurements is unreliable as most soil moisture sensors are often unable to correctly evaluate soil water potential at such low values.

Rather than relying on soil moisture status physiologically based indicators of plant water status are used. This 'plant needs'-based approach uses the tree as a biosensor to monitor the plant water status and its physiological responses to external factors like local atmospheric demand for water and soil water availability. One such approach that has been successfully used for olive trees is the compensation heat-pulse method (CHP) to monitor tree sap flow and transpiration (Green & Clothier, 1988; Fernández et al., 1998, 2001; Green et al., 2003). It uses heat as a tracer for ascending sap movement in stems and trunk. The conductive woody tissue is heated and heat dissipation is assessed from temperature measurements in two locations of the plant stem. The technique requires appropriate sampling (Smith & Allen, 1996) and careful evaluation of the control points (Jones, 2004). The purpose of this paper is to report on the suitability of heat-pulse technique to measure sap flow, evaluate transpiration and real-time olive trees water use

and response in Southern Portugal. Tree evapotranspiration rates due to changes in atmospheric evaporative demand and soil water availability under full and regulated deficit irrigation (RDI) are also reported.

## 2. Material and methods

### 2.1. Experiment location and irrigation management

The research was conducted during 2005 at the Herdade dos Lameirões located near Safara (lat.  $38^{\circ} 05' \text{ N}$ ; long.  $07^{\circ} 16' \text{ W}$ ; alt. 75 m), in the region of Moura, Alentejo, Portugal, on an orchard stand of 269 mature olive trees (*Olea europaea* L. var. *Cordovil*). The 80-plus-year-old mature olive orchard planted on a 12 m by 12 m spacing layout was converted in 2005 from its originally dry-farming to drip irrigation and submitted from mid-March to the end of August 2005 to two different irrigation treatments: treatment A with full-irrigation of 78 trees to provide for approximately 100% of crop evapotranspiration  $ET_c$ , and one regulated deficit irrigation (RDI) or treatment C. In treatment C, water is applied to 60 trees only during three critical phase periods: before-flowering, during pit-hardening and before crop harvesting, to provide for 100% of  $ET_c$ . Crop evapotranspiration was calculated using the FAO-Penman-Monteith method and procedures prescribed by Allen et al. (1998). Each tree was water supplied by a single drip line with emitters spaced 1 m apart throughout the entire length of the emitter line placed at the soil surface and laid out along each tree row and serviced by twelve  $3.6\text{ l h}^{-1}$  emitters. Weather data and rainfall events were collected by an automatic weather station. For the year 2005, the total rainfall of 194 mm, recorded from October 1 of the preceding year to September 30 of following year, was exceptionally low, well below the annual average of 580 mm for the region.

### 2.2. Sap flow measurements

To evaluate sap flow rates and transpiration, a representative tree in each water treatment was selected and implanted with heat pulse probes. Using the compensation heat-pulse technique (CHP) described in Green and Clothier (1988) and Green et al. (2003), sets of one heat source and two temperature probes (Fig. 1) were implanted in each sample tree at three different positions around the trunk. Sap flow measurements of treatment A and treatment C were taken at 30 min intervals during 4 months from April to mid-August of 2005 and tree transpiration rates were estimated as average sap flow rates of the three probes. Each temperature probe houses a set of copper-constantan thermocouple junctions



Nomenclature			
$D$	drainage, mm	$t_1$	interval initial time, min
$EC$	electric conductivity, $dS\ m^{-1}$	$t_2$	interval final time, min
$ET_0$	FAO- Penman-Monteith potential evapotranspiration, mm	$t_z$	time elapsed after heat pulse release, s
$ET_c$	crop evapotranspiration, mm	$X_d$	distance between heater probe and downstream temperature probe, mm
$h$	heartwood radius, mm	$X_u$	distance between heater probe and upstream temperature probe, mm
$h$	water pressure head, cm	$Z_1$	soil initial depth of interval, mm
$I$	irrigation water, mm	$Z_2$	soil final depth of interval, mm
$K$	hydraulic conductivity, $cm\ d^{-1}$	$\alpha, \lambda, \eta$	Mualem-Van Genuchten fitting parameter
$K(h)$	hydraulic conductivity (as a function of water pressure head $h$ ), $cm\ d^{-1}$	$\Delta S$	variation in soil water storage, mm
$K_s$	saturated hydraulic conductivity, $m\ d^{-1}$	$\Delta t$	time interval, h
$R$	measured rainfall, mm	$\Delta z$	soil depth interval, cm
$r$	sapwood depth, mm	$\theta$	soil water content, $cm^3\ cm^{-3}$
$R$	trunk radius, mm	$\theta_r$	residual soil water content, $cm^3\ cm^{-3}$
$SAR$	sodium absorption ratio, $meq\ l^{-105}$	$\theta_s$	saturation soil water content, $cm^3\ cm^{-3}$
		$\psi$	soil matric water potential, MPa

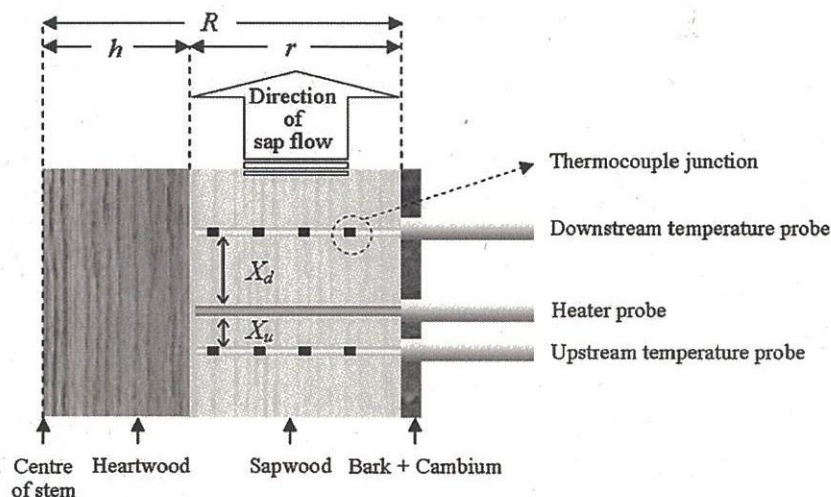


Fig. 1 – Cross-section layout of compensation heat-pulse probes for sap evaluation in a plant stem:  $R$ , stem radius;  $h$ , radius of the heartwood;  $r$ , sapwood depth;  $X_d$ , distance between heater probe and downstream probe;  $X_u$ , distance between heater probe and upstream temperature probe.

placed at different distances inside a 1.7 mm Teflon tube. The sap flow probes had four thermocouple sensors at 5, 12, 21 and 35 mm depth. The heater probes are made of 1.63 mm stainless-steel tube containing a nichrome resistance. The probes and associate equipments supplied by Green (2004) were connected to Campbell CR10X data loggers (Campbell Scientific Instruments, Logan, UT, USA) and installed by drilling holes into the sapwood. The required spacing between probes was preserved by drilling the holes with the help of a guiding jig. Fig. 1 shows the configuration of a single set of heat-pulse probes implanted into a tree stem.

In each sampled tree, the trunk radius  $R$  was evaluated and the heartwood radius  $h$  deduced from sapwood depth  $r$ , visually established from colouration changes in the core samples obtained with a 150 mm Suunto increment core borer. For each set of probes and at 30 min intervals, the data-

logger turns on the heater probe for a short period (0.5–1 s), releases a heat pulse in the sap-conductive area of the trunk (sapwood), performs fast and successive readings on each thermocouple sensor at different sapwood depths and compares the temperatures at constant distances upstream ( $X_u = 10$  mm) and downstream ( $X_d = -5$  mm) from the heat source until the temperatures becomes equal at each depth. The data-logger then records the corresponding elapsed time from the release of the heat pulse  $t_z$  in s. The procedure ends when all probes  $t_z$  values are found. The  $t_z$  data is then analysed using the analysis software and the standard routine defined and implemented in the HPV2004 software designed for calculation of sap flows from  $t_z$  cross-over time readings (Green, 2004). Conversions from time to heat-pulse velocity are done and sap flows are estimated considering also the properties of the woody matrix and the conducting



sapwood cross-sectional area. Recorded sap flows are also corrected for probe-induced wounding effects in the stem that cause disruption of xylem tissue near the probes. The adopted 2.0 mm wound-width correction factor was based on calibration experiments conducted with similar probes in olive trees by Fernández et al. (2001, 2006). With this wound-width factor they obtained the most accurate sap flow values for olive trees from measured heat-pulse values.

2.3. Soil water measurements and water balance approach

To evaluate soil water potential and moisture status in the 0.66 m wet bulb diameters developed by each of the twelve 3.61h<sup>-1</sup> emitters spaced 1 m apart in the 12 m by 12 m tree layout and along the emitter line of the irrigation treatment, sets of soil water potential watermark sensors (Shock et al., 1998; Irrometer Co. Inc., Riverside, California) and Profile Probe-PR1 (Delta T Devices Ltd., Cambridge, UK) soil water content sensors were installed near the trunk of two representative trees and at various depths into the soil. The water potential and profile probe sensors were placed at the wet bulbs located 1 and 3 m from the tree trunk along the tree drip line at 0.25, 0.45, 0.65 m depths and 0.10, 0.20, 0.30 and 0.40 m depths, respectively. Soil samples taken in the olive orchard indicated a clay soil at 0.45 m and silt loam below, underneath which a restrictive layer of very compact limestone and schist prevented further placement of sensors below 0.65 m depth. Table 1 presents the soil characteristics. Table 2 shows the relevant soil parameters associated with the soil water retention and hydraulic conductivity properties presented in Fig. 2 and associated to the Mualem-van Genuchten model (Fares & Alva, 2000, van Genuchten, 1980). A suction crust infiltrometer similar in design to that described by Booltink et al. (1991) was used to evaluate the saturated hydraulic conductivity of the soil. Watermark granular matrix block sensors are affordable, easy

Table 1 – Physical and chemical soil characteristics of soil profile in the mature olive stand

Depth, cm	0–18	18–45	45–65
Texture	Clay	Clay	Silt loam
Sand, %	35.8	27.3	44.0
Silt, %	15.8	18.9	32.6
Clay, %	48.4	53.8	23.4
Expansibility, %	8.38	4.55	2.50
Bulk density, Mg m <sup>-3</sup>	1.52	1.64	—
Total porosity, cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.43	0.40	—
pH (H <sub>2</sub> O)	8.19	8.34	8.82
CaCO <sub>3</sub> , %	7.70	40.5	39.6
Electric Conductivity (EC), dS m <sup>-1</sup>	0.36	0.28	0.19
Sodium Absorption Ratio (SAR), meq l <sup>-1</sup> 0.5	0.19	0.16	0.29

Table 2 – Adjustment parameters of the Mualem-van Genuchten model for soil water retention and hydraulic conductivity curves obtained from soil samples collected at the Herdade dos Lameirões

Parameter	Value
Residual water content $\theta_r$ , cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.2202
Saturation water content $\theta_s$ , cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0.4000
Saturated hydraulic conductivity $K_s$ , m d <sup>-1</sup>	0.1761
Fitting parameter $\alpha$	0.1407
Fitting parameter $n$	1.2316
Fitting parameter $\lambda$	-5.4888

to install, require virtually no maintenance and are suitable for continuous and automated data recording via a data-logger. They consist of two concentric electrodes buried in a granular matrix material where, depending on the pressure balance between the block and the adjacent soil, soil moisture is constantly absorbed or released from it. As the soil dries out due to the flow of water from the block into the surrounding soil and the sensor moisture is reduced, the soil water pressure around the sensor decreases. This loss of water is sensed as an increase in the electrical resistance between the electrodes. The watermark sensor reading range of 0 to -0.20 MPa allows reliable sensing of soil water pressure potential only in the narrow limit of high soil wetness between 0.42 to 0.34 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> in the top layer and 0.39 to 0.31 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> in the root zone as Table 3 illustrates, very close to the soil field capacity values of 0.36 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> in the top layer and 0.34 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> in the root zone. To evaluate the soil temperature and automatically correct for the watermark block resistance readings, for each set of watermark sensors, a thermocouple was installed at 0.25 m depth.

Soil water balance and water storage in the root zone were obtained using the following equation defined for a given time  $\Delta t$  as

$$\Delta S = R + I - D - ET_c \tag{1}$$

where  $\Delta S$  is the variation in water storage in the root zone in mm;  $R$  is the measured rainfall in mm;  $I$  is the irrigation amount in mm;  $D$  is the drainage in mm and  $ET_c$  is the crop evapotranspiration in mm. A negligible water runoff was recorded. The average hourly watermark soil water potentials  $\psi$  in bar at root depths of 0.25 and 0.45 m and below root depth (0.65 m), converted to water pressure head  $h$ , were used in the van Genuchten analytical equation, Eq. (2) to estimate soil water content,  $\theta$  in cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> (van Genuchten, 1980; Fares & Alva, 2000):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha h)^n]^{-(1-1/n)} \tag{2}$$

where  $\theta_r$  is the residual water content in cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;  $\theta_s$  is the saturation water content in cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;  $\alpha$  and  $n$  are fitting parameters and  $h$  is the water pressure head in cm. Subsequently, the variation in water storage  $\Delta S$  between 0 and 0.5 m depth and within a time interval  $\Delta t$  of 1 h was



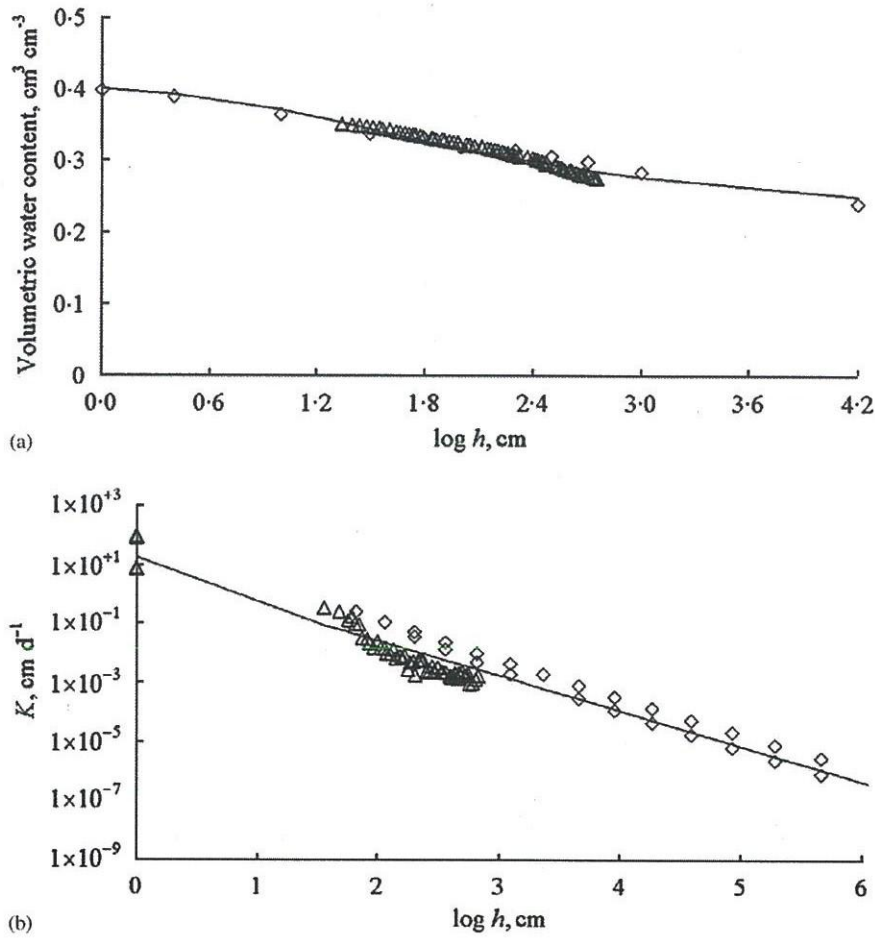


Fig. 2 – Curves obtained for soil profile samples collected at the experimental site of Herdade dos Lameirões, Moura, Portugal, using laboratory methods and adjusting with the Mualem–van Genuchten (M–vG) model parameters of Table 2: (a) soil water retention curve;  $\diamond$ , porous plate assembly (pressure chamber);  $\triangle$ , evaporation; —, M–vG; and (b) hydraulic conductivity  $K(\theta)$  ( $\text{cm d}^{-1}$ ) curves obtained for soil profile samples:  $\diamond$ , hot air;  $\triangle$ , evaporation; —, M–vG.

Table 3 – Soil water retention values evaluated from clay soil samples collected at the Herdade dos Lameirões

Soil water potential $\psi$ , MPa	Soil water content $\theta$ , $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	
	Depth, m	
	0–0.18 (top layer)	0.18–0.45 (root zone)
–0.025	0.4229	0.3889
–0.01	0.3878	0.3648
–0.03	0.3596	0.3370
–0.06	0.3497	0.3309
–0.10	0.3430	0.3180
–0.20	0.3357	0.3139
–0.30	0.3285	0.3058
–0.50	0.3207	0.2986
–0.1	0.3086	0.2837
–1.5	0.2675	0.2394

obtained using Eq. (3).

$$\Delta S = \int_{z_1}^{z_2} \theta(z, t_1) dz - \int_{z_1}^{z_2} \theta(z, t_2) dz, \tag{3}$$

where  $z_1$  is the initial depth interval in mm;  $z_2$  is the final depth interval in mm;  $t_1$  is the initial time interval in min and  $t_2$  is the final time interval in min. Drainage below the root zone required for Eq. (1) was estimated using Eq. (4), where  $K(h)$  is the hydraulic conductivity in  $\text{cm d}^{-1}$  at the corresponding water pressure head  $h$  of the soil layer:

$$D = K(h) \frac{\Delta(h+z)}{\Delta z} \Delta t. \tag{4}$$

The unsaturated hydraulic conductivity  $K(h)$  of Eq. (4) was estimated using Eq. (5) of Mualem–van Genuchten

$$K(h) = K_s \frac{((1 + (\alpha h)^n)^{1-1/n} - (\alpha h)^{n-1})^2}{(1 + (\alpha h)^n)^{(1-1/n)(2+2)}} \tag{5}$$

where  $K_s$  is the saturated hydraulic conductivity in  $\text{cm d}^{-1}$ ,  $h$  is the water pressure head in cm at which  $K(h)$  is being calculated and  $\lambda$  is a fitting parameter.

### 3. Results

#### 3.1. Transpiration rates and daily environmental climatic changes

Fig. 3 shows a typical 5-day period pattern of sap flow variation for the two monitored olive trees under treatments A and C in response to daily local atmospheric evaporative demand. In general, monitored half-hour sap flow rates were

responsive to daily climatic and even brief environmental changes such as the passing of clouds, as seen from the fluctuations in short-term sap flow from May 10 to May 12. With the two treatments in the period between May 8 and May 13 under the same irrigation water regime, the shape-similarity of both sap flow curves shows the same shape-response to local atmospheric daily evaporative demands. The recorded differences in daily sap flow rate amplitude caused by plant absorption of solar radiation are explained by the natural tree differences in canopy cover, plant height, and conductance of water vapour sites. Fig. 4 presents the prevailing daily meteorological variables influencing the daily evaporative demand causing the behaviour of sap flow rates variation and fluctuation presented in Fig. 3. The daily

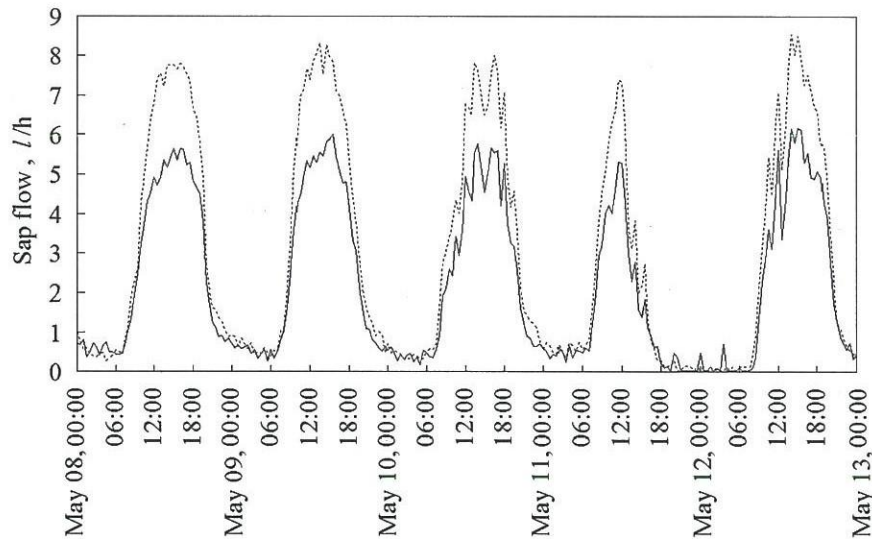


Fig. 3 – Five-day sample results of sap flow measurements in all monitored trees: - - - -, sap flow in the mature olive tree with treatment A; —, sap flow in the mature olive tree with treatment C.

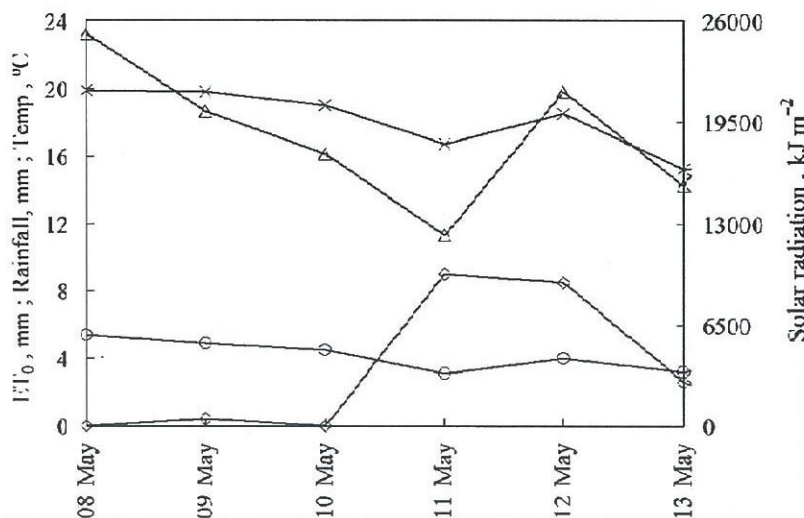


Fig. 4 – Daily meteorological variables recorded in an automatic weather station located near the olive tree stand and daily potential evapotranspiration ( $ET_0$ ):  $\square$ ,  $ET_0$ ;  $\diamond$ , rainfall;  $\times$ , average daily temperature;  $\triangle$ , solar radiation.



changes in the weather data of Fig. 4, responsible also for the changes in the presented FAO-Penman-Monteith (Allen et al., 1998) potential evapotranspiration  $ET_0$ , indicate that the pattern of daily sap flow variation rates of Fig. 3 are in agreement with the daily variations in meteorological parameters. For the 5-day period, the lowest sap flow rate was recorded on May 11, coincident with a significant change in the prevailing weather, occurrence of a considerable rainfall of 9mm and a cloudy day. Such facts decreased the daily average air temperature, solar radiation and, subsequently, the atmospheric demand for water as the sudden drops in sap flow rates well indicate. This close relationship between atmospheric changes and the concurrent changes in sap flow rates were observed throughout the 4 month period of sap flow monitoring.

Whereas trees under treatment A were constantly irrigated throughout the irrigation period to daily supply for their

evapotranspiration needs, trees under treatment C, similarly watered since the onset of irrigation in March, ceased being irrigated between May 15 and July 4. This gradually affected the ability of trees under treatment C to adequately respond to the evaporative demands of the day, presenting smaller amplitudes of sap flow variation after mid-May as Fig. 5 shows. Irrigation was resumed on June 4. Fig. 6 shows for the two treatments the typical long-term impact of meteorological changes on daily reference evapotranspiration  $ET_0$  and the recorded olive tree sap flow rates. The non-watering of treatment C between May 15 and June 4 increased the discrepancy between sap flow and evapotranspiration rates; serious after May 23. Allen et al. (1998) indicate that for a given vegetation surface, potential evapotranspiration depends only on the net radiant energy absorbed by the surface, the air temperature and the corresponding water vapour pressure deficit. Water potential differences between the tree xylem and

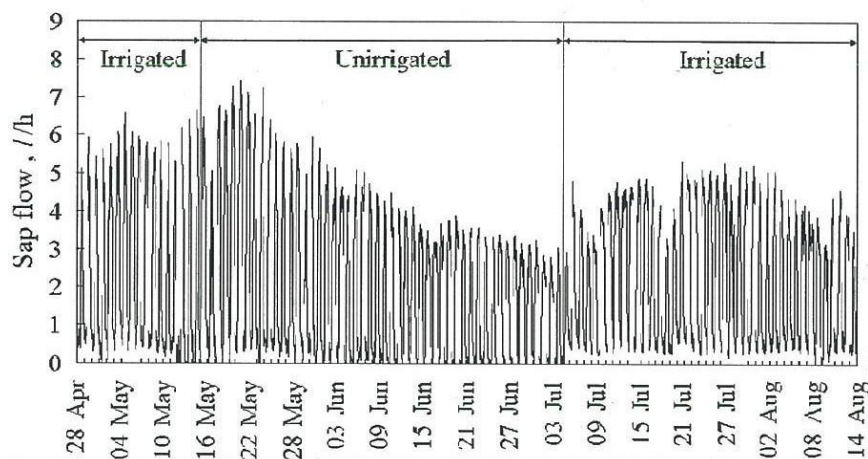


Fig. 5 - Sap flow rates measured in the mature olive tree under treatment C.

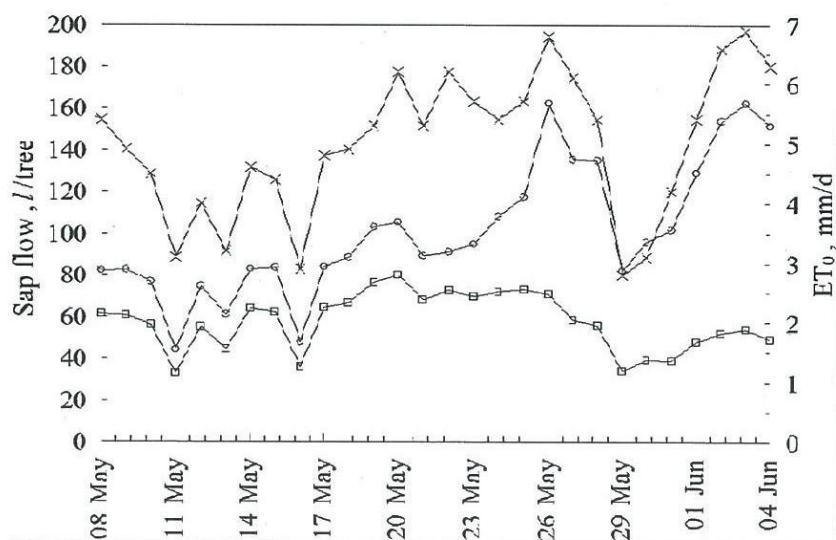


Fig. 6 - Daily sap flow measured on sampled trees in treatments A and C and FAO-Penman-Monteith potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) computed by the local automatic weather station: —x—,  $ET_0$ ; —○—, sap flow measured in treatment A; —□—, sap flow measured in treatment C.



the surrounding environment monitored as sap flow rates are, as a consequence, closely related to the prevailing estimates of evapotranspiration. A universally accepted quantifier of the evaporative demands of the atmosphere influencing primarily the water vapour flux density of vegetated surfaces, transpiration is quantified here as sap flow rates (Green & Clothier, 2003; Valverde, 2004). Accordingly, Fig. 6 shows daily sap flow rates of the well-watered treatment A closely following daily evapotranspiration trend of variation throughout the irrigation period and whilst with the deficit irrigated treatment C sap flows diverged from that trend during the period of non-irrigation between May 15 and June 4.

### 3.2. Transpiration rates and soil water status

According to the regulated deficit irrigation prescribed for treatment C, after flowering in May, the trees were not watered between May 15 and July 4. Irrigation was resumed thereafter. Fig. 5 presents the on-and-off irrigation periods and the corresponding average daily sap flow rates. After the shut down of irrigation on May 15, sap flow rate, taken here as transpiration rate, gradually decreased from its maximum of  $71\text{ h}^{-1}$ , when the trees were fully irrigated and soil water content was near field capacity, to values of less than  $31\text{ h}^{-1}$  by July 3 as soil water content gradually reduced, thus acting as the transpiration limiting factor. Transpiration rates recovered after irrigation and were re-introduced on July 4.

Transpiration rates of treatment C shown in Fig. 5, although low in the period of non-irrigation never dropped to zero. Trees, in the absence of irrigation and making use of the extensive root system developed under dry-farming were able to extract soil water in the large soil volume of the 12 m by 12 m tree spacing. This creates a recognisable problem in the monitoring of soil water status in orchards recently converted to irrigation as it is difficult to obtain reliable and representative soil water information of the whole tree root zone volume

with the few sensors placed at the drip irrigation emitter wet bulb area.

Scarce water resources, caused by a dry hydrological year with only 194 mm rainfall which was well below the 580 mm expected average for the region, precluded the trees being irrigated during the month of August. The last irrigation of July 27 and the two rainfall events of August were not enough to provide for the prescribed water allotment for the month. This is noticeable in Fig. 5 where it that shows a partial recovery of transpiration rates after the irrigation events of July but to levels lower than those observed prior to May 15 and with a significant reduction during the month of August. Table 4 shows the scheduling and amounts of irrigation supplied to treatment A and C trees in the period between the months of March and August. Rainfall amounts were low and did not account for significant changes in soil water content or in trees water uptake, except for a slight increase in soil water observed after the rainfall of August 9.

### 3.3. Olive orchard water balance and use

According to Xiloyannis *et al.* (1999), the ability of olive trees to cope with drought and soil water scarcity allows them to establish high potential gradients between the leaves and roots and extract water held in the soil with tension up to  $-2.5\text{ MPa}$ , well below the traditionally accepted crop wilting tension threshold of  $-1.5\text{ MPa}$ . The  $-2.5\text{ MPa}$  is also well below the watermarks  $-0.20\text{ MPa}$  lower limit of reading and, as a result, watermark sensors may fail to account for all the water in the soil available for plant use. This is noticeable in Fig. 7 which shows the evolution of watermark soil water potential readings for treatments A and C between April 28 and August 14. On both treatments, watermark sensors were able to capture the variations of soil water potential in the periods of irrigation when the soil water content was high, but failed to provide meaningfully values for the low soil

**Table 4 – Rainfall and irrigation supplied to trees in the mature olive stand under full irrigation (treatment A) and regulated deficit irrigation (treatment C) during 2005**

Start	End	Rainfall, mm	Mature olive trees treatment A		Mature olive trees treatment C	
			Irrigation, l/tree	Daily average irrigation, l/tree	Irrigation, l/tree	Daily average irrigation, l/tree
18-Mar	31-Mar	11.6	432.0	30.9	432.0	30.9
01-Apr	15-Apr	19.3	864.0	57.6	864.0	57.6
16-Apr	28-Apr	0.9	496.8	38.2	496.8	38.2
29-Apr	12-May	17.9	864.0	61.7	864.0	61.7
13-May	26-May	10.2	907.2	64.8	129.6	9.3
27-May	09-Jun	3.1	1166.4	83.3	0.0	0.0
10-Jun	24-Jun	4.4	1684.8	112.3	0.0	0.0
25-Jun	06-Jul	0.0	1728.0	144.0	432.0	36.0
07-Jul	19-Jul	0.0	1036.8	79.8	1036.8	79.8
20-Jul	03-Aug	0.6	1036.8	69.1	1036.8	69.1
04-Aug	17-Aug	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0
18-Aug	09-Sep	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



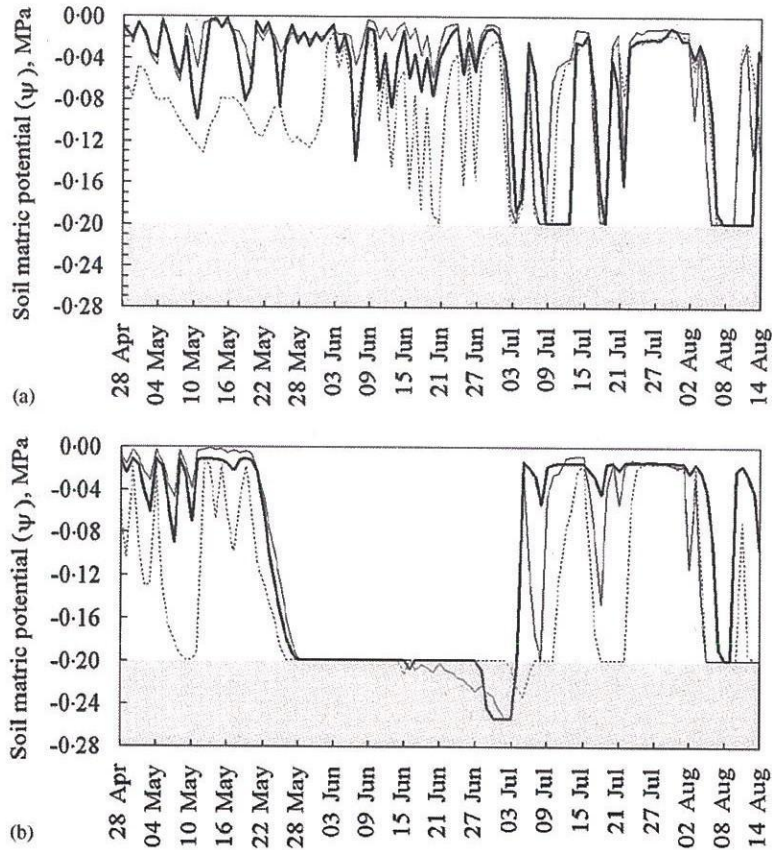


Fig. 7 – (a) Soil water potentials of mature olive stand under treatment A evaluated with watermark sensors placed in the drip emitter’s wet bulb at the depths of: —, 0.25 m; ———, 0.45 m; - - - - -, 0.65 m; ■, dark area shows the soil matric potential value range where the watermark sensors are unable to provide for reliable readings; (b) soil water potentials of mature olive stand under treatment C evaluated with watermark sensors placed in the drip emitter’s wet bulb at the depths of: —, 0.25 m; ———, 0.45 m; - - - - -, 0.65 m; ■, dark area shows the soil matric potential value range where the watermark sensors are unable to provide for reliable readings.

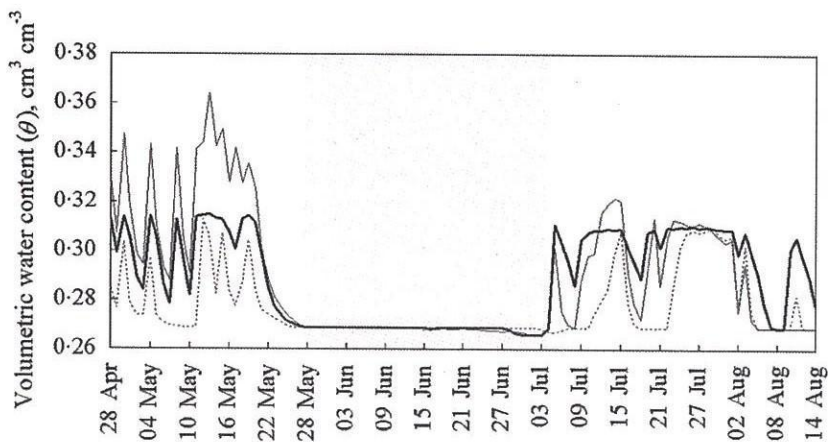


Fig. 8 – Soil volumetric water content in the mature olive stand under treatment C estimated using Eq. (2) with the watermark sensors readings placed in the drip emitter’s wet bulb at the depths of: —, 0.25 m; ———, 0.45 m; - - - - -, 0.65 m; ■, dark area shows the period in which the watermark sensors reached or fell outside the instrument’s measuring minimum limit after the shut down of irrigation in treatment C, thus the real volumetric water content is likely lower than the computed values using this method.



water potential values in the May 28 to July 4 period of non-irrigation when treatment C soil water potentials dropped below  $-0.2\text{Mpa}$ . The shaded area in the figure indicates the range where watermark sensors were unable to provide for reliable readings for soil water potential.

Fig. 8 shows corresponding values of soil water content estimated from the watermark water potential readings of treatment C. Only above the soil water threshold value of  $0.27\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  did the watermarks sense and adequately described depth and time variations of soil volumetric water content. As a result, the watermarks failed to account for much of the water available in the soil during the non-irrigation period. This can be confirmed by comparing watermark values with profile probe soil water content values in Fig. 9 where there is evidence of water availability in the soil well below the watermark lower limit water content of  $0.27\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  for treatment C. As Fig. 9 shows, a considerable

amount of water is held in the soil below the 10 cm depth long after irrigation is reduced and it is made available for daily partial support of the tree transpiration rate. This water storage, capable of supplying the trees with water to partially support their daily transpiration rates, is unaccounted for by the watermark sensors. Fig. 10 shows the corresponding treatment C water storage in the root zone for the period. Water storage reached a maximum value of 142 mm in May 12 and gradually dropped to around a minimum value of 90 mm; still a significant value to consider in the long period of non-irrigation.

Fig. 10 also contrasts soil water storage of treatments C and A, the latter being obtained from volumetric water content values presented in Fig. 11 and evaluated from profile probe sensor readings. As treatment A prescribes, trees were kept under high water content throughout the irrigation period and, consequently, the soil presents higher water storage

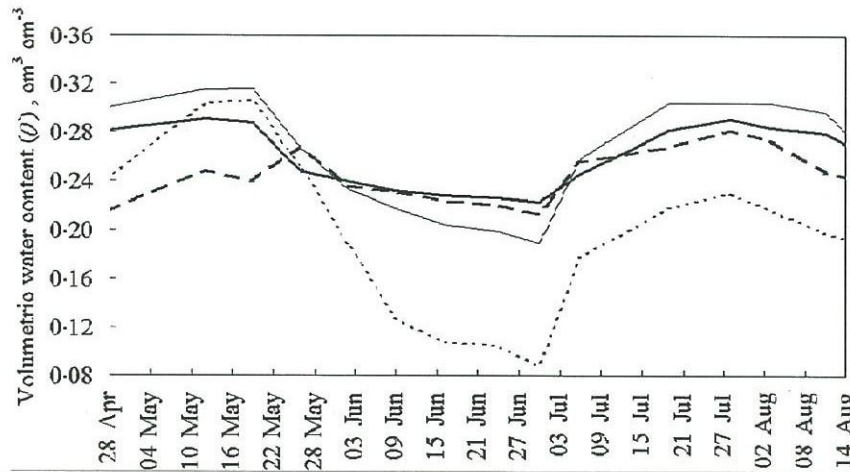


Fig. 9 – Soil volumetric water content in the mature olive stand under treatment C estimated using the Delta T PR1 Profile probe readings with sensors placed in the drip emitter’s wet bulb at the depths of: - - - -, 0.10m; — — —, 0.20 m; — — — —, 0.30 m; — — — — —, 0.40 m.

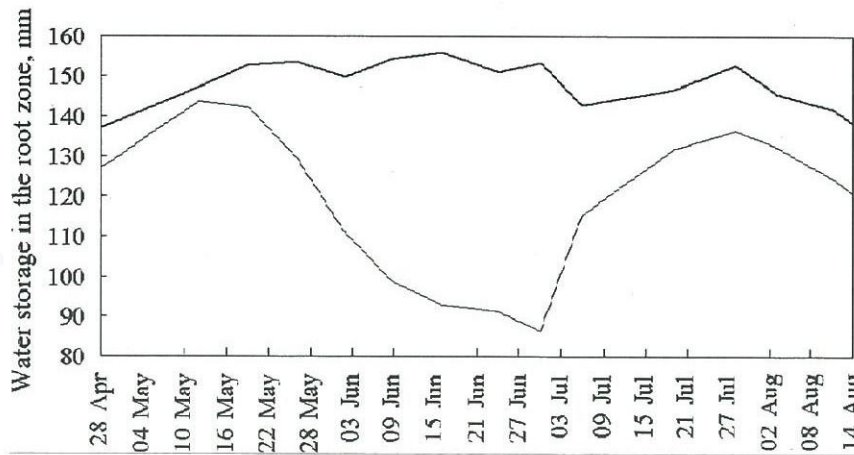


Fig. 10 – Water storage in the root zone estimated for the mature olive stand under treatments A and C with a Delta T PR1 probe: — — — —, water storage in treatment A; — — — — —, water storage in treatment C.



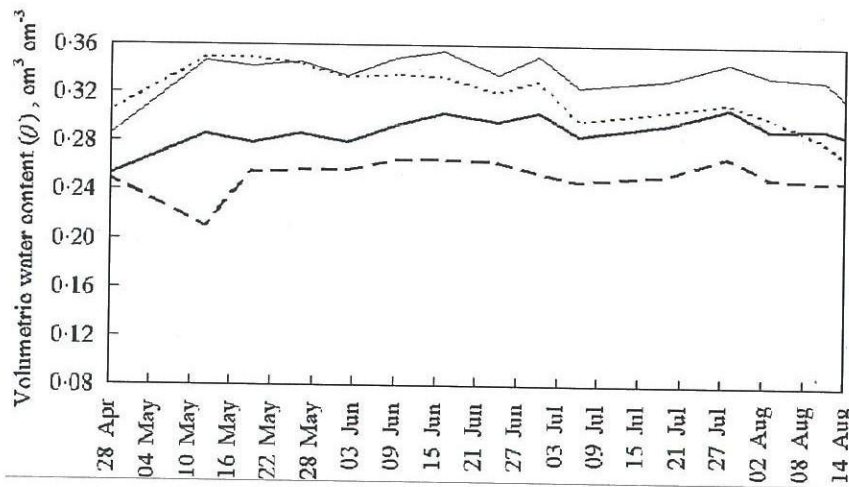


Fig. 11 – Soil volumetric water content in the mature olive stand under treatment A estimated using the Delta T PR1 Profile probe readings with sensors placed in the drip emitter's wet bulb at the depths of: - - - - , 0.10 m; —, 0.20 m; — — — —, 0.30 m; — · — ·, 0.40 m.

Table 5 – Crop evapotranspiration  $ET_c$  rates per tree estimated for the mature olive trees under full irrigation (treatment A) and under regulated deficit irrigation (treatment C) from soil water balance using soil sensors (watermark and Delta T PR1 probe) in the wet bulb developed by the drip irrigation emitters and corresponding tree transpiration estimated from sap flow rates during the period considered for each treatment

Date interval		Mature olive trees treatment A			Mature olive tree treatment C		
Start	End	$ET_c$ from soil water balance With watermark sensors, l/d	$ET_c$ from soil water balance with profile probe, l/d	Transpiration from sap flow rates, l/d	$ET_c$ from soil water balance with watermark sensors, l/d	$ET_c$ from soil water balance With profile probe, l/d	Transpiration from sap flow rates, l/d
18-Mar	31-Mar	25.0	NA	NA	23.7	NA	NA
01-Apr	15-Apr	62.4	54.6	55.0	61.8	58.1	41.0
16-Apr	28-Apr	36.6	41.3	57.9	36.0	42.4	42.9
29-Apr	12-May	58.6	59.7	79.4	60.6	57.9	58.1
13-May	26-May	71.1	65.9	94.3	21.7	16.4	65.7 (*)
27-May	09-Jun	80.6	84.0	145.1	1.2	9.9	50.4 (*)
10-Jun	24-Jun	76.6	114.4	NA	1.2	3.3	40.1 (*)
25-Jun	06-Jul	127.5	146.8	NA	32.7	27.7	36.9 (*)
07-Jul	19-Jul	79.2	85.1	NA	75.5	80.9	54.7
20-Jul	03-Aug	69.2	69.6	NA	67.2	69.1	57.8
04-Aug	17-Aug	7.2	3.5	NA (*)	0.4	4.8	44.7 (*)
18-Aug	09-Sep	2.0	3.5	NA (*)	0.0	9.4	NA (*)

NA = Data not available; (\*) irrigation was shut down in this period

values than observed for treatment C, never dropping below 140 mm. The resulting evapotranspiration rates from profile probe shown in Table 5 for treatment A are consequently high, indicating that until the month of August, irrigation provided water for the daily evapotranspiration rate of trees. Also, the close agreement between evapotranspiration values obtained for treatment A with the watermark and profile probe sensors indicated that water balance method adequately evaluated the soil water content of treatment A, suggesting that both sensors can be used with confidence in management of olive trees subjected to full irrigation. As for treatment C, transpiration rates from sap flow presented in

Table 5 although low in the period of non-irrigation between May 27 and June 9 stayed within 37 and 50 l d<sup>-1</sup> and never dropped to values close to zero as did evapotranspiration estimates from watermark and profile probe sensors. Such discrepancy suggests that in the absence of irrigation, and due to their extensive root system developed under dry farming, olive trees were able to extract soil water in the 12 m by 12 m tree spacing to maintain transpiration to levels as high as 50 l d<sup>-1</sup> between May 27 and June 9 and 40 l d<sup>-1</sup> between June 10 and June 24 while soil water balance estimated the related tree evapotranspiration rates to as low as 1.2 and 9.9 l d<sup>-1</sup> in the drip irrigation wet bulbs.



The observed differences between evapotranspiration and transpiration rates in the period of non-irrigation of treatment C indicate that both sensors were unable to account for the real water uptake of olive trees during the period. They should be used with precaution in the control of regulated deficit irrigation (RDI) of orchards recently converted to irrigation, as with them it is difficult to obtain reliable and representative soil water information of the whole tree root zone volume. Rather than relying on soil moisture status, tree transpiration values presented in Table 5 indicate the compensation heat-pulse method as a more reliable approach to monitor plant water status and its physiological response to soil water availability and local atmospheric evaporative demands.

#### 4. Conclusions

Traditionally a rain-fed crop, olive tree orchards have always played an important role in the rural economy of Portugal. Grown in areas where water is scarce even for human consumption, the large conversion and expansion of rain-fed orchards to irrigation taking place in Southern Portugal makes the water use and irrigation optimisation of these orchards of crucial importance. The issue has been analysed in the study by field trials of full and deficit irrigated trees using the water balance approach and the compensation heat-pulse method for sap flow rate evaluation. With both treatments monitored half-hour sap flow rates were responsive to daily climatic changes. When trees were fully irrigated observed differences in daily sap flow rate amplitude due to plant absorption of solar radiation were explained by natural differences in canopy cover, plant height, and conductance of water vapour sites. However, when deficit irrigation is prescribed to fully irrigated trees and when they are stopped being irrigated, they gradually lost their ability to adequately respond to the evaporative demands of the day, presenting smaller amplitudes of sap flow variation. After the shut down in irrigation, transpiration rate gradually decreased from its maximum of  $71\text{ h}^{-1}$ , when trees were fully irrigated and soil water content was near field capacity, to values of less than  $31\text{ h}^{-1}$ , as soil water content gradually drops, thus acting as the transpiration limiting factor. Transpiration rates recover after irrigation is resumed, also indicating that soil water availability was limiting transpiration. Transpiration rates although low in the non-irrigation period remained between  $37$  and  $50\text{ l d}^{-1}$  and never dropped to zero as trees were able to extract water held in the soil in the absence of irrigation and long after its shut down. Differences between evapotranspiration and transpiration rates also indicate that in the period of non-irrigation, olive trees are able to extract soil water and maintain transpiration rates to levels as high as  $50\text{ l d}^{-1}$ . For the same period, lower soil water balance evapotranspiration estimates of  $1.2$  to  $10\text{ l d}^{-1}$  carried out within the drip emitter wetting area with watermark and capacitance sensors indicate that both instruments underestimate tree water uptake and should not be used for control of dry-farmed olive trees subject to deficit irrigation. The particular ability of those trees to use water held in the soil under very low potential and the uncertainties associated with assessment of

the real volume of soil effectively explored by the root system, make tree water uptake tree estimates from soil water balance in the drip irrigation unreliable under deficit irrigation. Nevertheless, both sensors were able to capture the variations of soil water while high and they could be used in management of full irrigated orchards. However, rather than relying on soil moisture status, tree transpiration rates indicate the compensation heat-pulse method is a more reliable approach to monitor water use and response of olive orchards recently converted to irrigation.

#### Acknowledgements

This work was made possible by partial funding from the Integrated Development of the Alqueva Área Program (PEDIZA II) and by the Agricultural and Rural Development Operational Program AGRO (Medida 8, Acção 8.1, projecto AGRO 728). We acknowledge Engo Luis Boteta of the Centro Operativo e de Tecnologia de Regadio (COTR) and Engo Isaías Pisarra of the Direcção Regional de Agricultura do Alentejo (DRAAL) for his precious help with the field experiment.

#### REFERENCES

- Allen R; Pereira L S; Raes D; Smith M (1998). Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome
- Booltink H W G; Bouma J; Giménez D (1991). A suction crust infiltrometer for measuring conductivity of unsaturated soil near saturation. *Soil Science Society of America Journal*, 55, 566–568
- Fares A; Alva A K (2000). Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 311–318
- Fernández J E; Moreno F (1999). Water Use by the Olive Tree, pp 101–162. *Water Use in Crop Production*, Haworth Press
- Fernández J E; Palomo M J; Diaz-Espejo A; Girón I F; Moreno F (1998). Measuring sap flow in olive trees: potentialities and limitations of the compensation heat-pulse technique. *Fourth International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants*, pp 31–42. IUFRO Publications, Mendel University
- Fernández J E; Palomo M J; Diaz-Espejo A; Clothier B E; Green S; Girón I F; Moreno F (2001). Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, 51, 99–123
- Fernández J E; Durán P J; Palomo M J; Diaz-Espejo A; Chamorro V; Girón I F (2006). Calibration of sap flow estimated by the compensation heat pulse method in olive, plum and orange trees: relationships with xylem anatomy. *Tree Physiology*, 26, 719–728
- Green S R; Clothier B E (1988). Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany*, 39, 115–123
- Green S R; Clothier B E; Jardine B (2003). Theory and practical application of heat-pulse to measure sap flow. *Agronomy Journal*, 95, 1371–1379
- Green S (2004). *Measurements of Sap Flow by the Heat-Pulse Method—An Instruction Manual for the HPV System*. Tranzflo nz Ltd., Palmerston, New Zealand
- Jones H G (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany, Water-Saving Agriculture Special Issue*, 55(407), 2427–2436

- Shock C; Barnum M; Seddigh M (1998). Calibration of 'Watermark' Sensors for Irrigation Management. International Irrigation Show. The Irrigation Association, San Diego, California
- Smith D; Allen S (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47, 1833–1844
- Valverde P (2004). Medição e Modelação da Transpiração e Evapotranspiração em Olivais Regados [Measurement and Modelling of Transpiration and Evapotranspiration of Irrigated Olive Trees.] Final Paper, University of Évora, Portugal
- van Genuchten M Th (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898
- Xiloyannis C; Dichio B; Nuzzo V; Celano G (1999). Defence strategies of olive against water stress. *Acta Horticulturae*, 474, 423–426

## 2.6. Referências Bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* – FAO. Irrigation and drainage, paper 56. Rome, Italy.
- Arya, L. M., Farrell, D. A. & Blake G. R., (1975). A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots. I. Determination of hydraulic properties of the soil. *Soil Science Society of America Journal*, 45: 1023-1030.
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F. & Fereres, E. (1999). Measurement and simulation of evaporation from soil in olive orchards. *Irrigation Science*, 18: 205-211.
- Bruce, R. R. & Klute, A., (1956). The measurement of soil moisture diffusivity. *Soil Science Society American Proceeding*, 20: 458-462.
- Cermák J., Dem, J. & Penka, M. (1973). A new method of sap flow rate determination in tree. *Biologia Plantarum*, 15: 171-178.
- Chartzoulakis K., Bosabadilis, A., Patakas, A. & Vemmos, S. (2000). Effects of waterstress on water relations, gas exchange and leaf structure of olive tree. *Acta Horticulturae*, 537: 241-247.
- Cohen, Y. (1991). Determination of orchard water requirement by combined trunk sap flow and meteorological approach. *Irrigation Science*, 12: 93-98.
- Dichio, B., Xiloyannis, C., Angelopoulos, K., Nuzzo, V., Bufo, S. & Celano, G. (2003). Drought-induced variations of water relations parameters in *Olea europaea*, *Plant and Soil*, 257: 381-389.
- Eastman, J., & Gray, S. A. (1998). A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49: 171–176.



Evelt, S. R., Warrick, A. W. & Mathias, A. D. (1995). Wall material and capping effects on microlysimeter temperatures and evaporation. *Soil Society of America Journal*, 59(2): 329-336.

Fernández, J. E., Díaz-Espejo, A., Infante, J. M., Durán, P., Palomo, M. J., Chamorro, V., Girón, I. F. & Villagarcía, L. (2006). Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. *Plant Soil*, 284: 273-291.

Fernández, J. E., Durán, P. J., Palomo, M. J., Díaz-Espejo, A., Infante, J. M., Chamorro, V., Girón, I. F. & Villagarcía, L. (2006a). Calibration of sap flow estimated by the compensation heat pulse method in olive, plum and orange trees: relationships with xylem anatomy. *Tree Physiology*, 26: 719-728.

Fernández, J. E., Green, S. R., Casparin, H. W., Diaz-Espejo, A. & Cuevas, M. V. (2008). The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines. *Plant and Soil*, 305:91-104.

Fernández, J. E. & Moreno F. (1999). *Water Use by the Olive Tree*. Water Use in Crop Production, Haworth Press.

Fernández, J. E., Palomo, M. J., Díaz-Espejo, A., Clothier, B. E., Green, S. R., Girón, I. F. & Moreno, F. (2001). Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostic of water stress. *Agricultural Water Management*, 51: 99-113.

Gardner, W. R. (1958). Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85: 228-232.

Giorio, P. & Giorio, G. (2003). Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge. *Environmental and Experimental Botany*, 49: 9-20.

Goldhamer, D. A. (1999). Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Horticulturae*, 479: 369-372.

Gomes, M. P. & Silva, A. A. (1962). Um novo diagrama triangular para a classificação básica da textura do solo. *Garcia da Orta*, 10: 171-179.

Gonçalves, M. C., Martins, J. C. & Santos, M. J. (2000). Métodos laboratoriais para determinação das propriedades hidráulicas do solo. *Pedologia*, Oeiras 28: 1-23.

Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42: 193-200.

Green S. R. & Clothier B. E. (1988). Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany*, 39: 115–123.

Green S. R., Clothier B. E. & Jardine B. (2003). Theory and practical application of heat-pulse to measure sap flow. *Agronomy Journal*, 95: 1371–1379.

Hatton T. J. & Vertessy R. A. (1990) Transpiration of plantation *Pinus radiata* estimated by the heat pulse method and the Bowen ratio. *Hydrological Processes*, 4:289–298.

Huber, B. (1932). Beobachtung und messung pflanzlicher saftströme. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 50: 89-109.

Huber, B & Schmidt, B. (1937). Eine Kompensationmethode zur thermoelektrischen messung langsamer saftstroeme. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 55: 514-529.

Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F., & Villalobos, F. J. (2009). The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy*, 30: 258–265.

Jackson N. A. & Wallace J. S. (1999). Soil evaporation measurements in an agroforestry system in Kenya. *Agricultural Forest of Meteorology*, 94: 203-215.

Lavini, A., d'Andria, R., Patumi, M., Morelli, G., Tognetti, R. & Sebastiani, L. (2008). Water management of olive tree (*Olea europaea* L.) in a hilly environment of central-south Italy. *International Conference Irrigation in*

*Mediterranean Agriculture Challenges and Innovation for the Next Decades*. Nápoles, 17-18 junho 2008.

Marin, F. R., Ribeiro, R. V., Angelocci, L. R. & Righi, E. Z. (2008). Fluxo de seiva pelo método do balanço de calor: base teórica, qualidade das medidas e aspectos práticos. *Bragantia: Revista de Ciências Agronómicas*, 67 (1): 1-14.

Mariscal. M. J., Orgaz, F. & Villalobos, F. J. (2000a). Modelling and measurement of radiation interception by olives canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100: 183-197.

Marshall, D. C. (1958). Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33: 385-396.

Meier, U. (2002). Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea* L.). *Annals of Applied Biology*, 140 (2): 151–157.

Nicolás, E., Torrecillas, A., Ortuño, M. F., Domingo, R. & Alarcón, J. J. (2005). Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agricultural Water Management*, 72: 131–145.

Orgaz, F., Villalobos, F. J., Testi, L. & Fereres, E. (2007). A model of daily mean canopy conductance for calculating transpiration of olive canopies. *Functional Plant Biology*, 34: 178-188.

Ortuño, M. F., Alarcón, J. J., Nicolás, E. & Torrecillas, A. (2004a). Comparison of continuously recorded plant-based water stress indicators for young lemon trees. *Plant Soil*, 267: 263-270.

Ortuño, M. F., Alarcón, J. J., Nicolás, E. & Torrecillas, A. (2004b). Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science*, 167: 275-280.

Paços, T. A (2003). *Modelação da evapotranspiração em cobertos descontínuos – programação da rega em pomar de pessegueiros*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.



Ramos, T. B., Gonçalves, M. C. Jacinto, G., Martins J. C. & Pires, F. P. (2009). Avaliação das propriedades hidráulicas do solo por modelação inversa através dos dados obtidos pelo infiltrómetro de tensão e por métodos laboratoriais. *Revista de Ciências Agrárias*, 32 (1):384-396.

Sakuratani, T. (1981). A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 37:9 – 17.

Silva, A. A., Alvim, A & Santos, M. J. (1975). Métodos de Análise de Solos, Plantas e Águas. *Pedologia*, 10 (3): 133-146.

Steppe, K., De Pauw, D. J. W., Saveyn, A., Tahon, P., Nadezhdina, N., Cermák, J., & Lemeur, R. (2008). Radial sap flux profiles and beyond: an easy software analysis tool. *Acta Horticulturae*, 846: 85-92.

Swanson, R. H. (1962). An instrument for detecting sap movement in woody plants. *USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station*, paper 68.

Swanson, R. H. & Whitfield, D. W. A. (1981). A numerical analysis of heat pulse velocity and practice. *Journal of Experimental Botany*, 32:221-239.

Testi, L., Villalobos, F. J., Orgaz, F. & Fereres, E., (2006). Water requirements of olive orchard. I. Simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrigation Science*, 24: 69–76.

Valancogne, C. & Nasr, Z. (1989). Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie*, 9: 609-617.

Valverde, P. M. (2005). *Medição e modelação da transpiração e evapotranspiração em olivais regados*. Trabalho de Fim de Curso, Universidade de Évora.

van Genuchten, M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society America Journal*, 44: 892-898.

van Genuchten, M. Th.; Leij, F. J. & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. *Environmental Protection Agency*, United States.

Wind, G. P., (1966). Capillary conductivity data estimated by a simple method. In: Rijtema, P. E. & H. Wassink (eds.). *Water in the unsaturated zone. Proceeding Wageningen. Symposium, IASH/AIHS - UNESCO*, 1: 181-191.

Yunusa, I. A. M., Walker, R. R., & Lu P. (2004). Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127: 93–107.

Xiloyannis, C., Dichio, B., Nuzzo, V. & Celano, G. (1999). Defense strategies of olive against water stress. *Acta Horticulturae*, 474: 423-426.

## CAPÍTULO 3

# EXTRAPOLAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO PARA A PARCELA, MODELAÇÃO DA CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA E COEFICIENTES CULTURAIS



*Neste capítulo constrói-se um padrão de transpiração que permite generalizar a transpiração obtida em árvores isoladas para a parcela em estudo. Simultaneamente, modela-se a condutância estomática da copa através da transpiração do agregado (parcela) e analisam-se as cinéticas diárias da condutância estomática e de algumas variáveis ambientais que se sabe interferirem na abertura e fecho estomático das folhas da oliveira. Estabelecem-se os valores do coeficiente cultural mensal para situações de conforto hídrico bem como os valores do coeficiente de stress para situações de déficit hídrico em olivais de baixa densidade, na margem esquerda do Guadiana.*

*Os objetivos estabelecidos são:*

- (i) Estimar a transpiração à escala da parcela através da transpiração avaliada em árvores individuais e de informação biométrica do agregado (parcela);*
- (ii) Modelar a condutância estomática através da integração das características fisiológicas da oliveira, de dados climáticos e da disponibilidade hídrica do solo;*
- (iii) Examinar o efeito de variáveis ambientais no comportamento estomático da oliveira;*
- (iv) Estabelecer valores do coeficiente cultural e de stress para a oliveira instalada em condições de clima mediterrânico.*



### **3. EXTRAPOLAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO PARA A PARCELA, MODELAÇÃO DA CONDUTÂNCIA ESTOMÁTICA E COEFICIENTES CULTURAIS**

#### **3.1. Introdução**

O conceito de “Denominação de Origem Protegida” (DOP), desenvolvido pela União Europeia, promove os azeites regionais com sendo azeites com características químicas e sensoriais únicas e, simultaneamente, garante-lhes um valor de mercado superior ao dos restantes azeites. Ao azeite DOP produzido na região de Moura, uma das seis regiões do país com denominação DOP, é atribuída a classificação de azeite virgem-extra e virgem quando têm na sua composição cerca de 35 a 40% de azeite proveniente da cultivar Cordovil. Estes azeites têm características organoléticas muito particulares, devido ao elevado teor em ácidos gordos monoinsaturados, próprio da cultivar Cordovil (<http://www.gppaa.min-agricultura.pt/valor/pqual/?id=63>).

A recente expansão dos olivais intensivos ( $\geq 300$  oliveiras  $ha^{-1}$ ) e superintensivos ( $\geq 1700$  oliveiras  $ha^{-1}$ ) levou à introdução de cultivares de origem Espanhola de baixo porte, conduzidas em sistemas intensivos altamente mecanizados e regados, os quais, pela precocidade e pelas produções que garantem, põem em perigo os olivais tradicionais de menor produtividade, onde prevalecem as cultivares indígenas como é o caso da cultivar Cordovil. Face ao exposto, a continuidade das variedades autóctones só será possível com melhorias substanciais no seu desempenho, o que passa, entre outros, por acréscimos da eficiência do uso da água e da produtividade.

O uso de estratégias de rega deficitárias com taxas de aplicação de água constantes ao longo da época de rega, como é o caso da rega deficitária sustentada, ou com interrupção da rega em alguns períodos de época de rega para os quais a espécie é menos sensível à falta de água, como é o caso da rega deficitária controlada, requer um conhecimento preciso da resposta da cultura ao stress hídrico em estados fenológicos específicos. Porém, a

tolerância à seca varia não só com o estado fenológico, mas também com as características genóticas da cultura.

A quantificação das necessidades hídricas dos olivais onde são implementadas as estratégias de rega plenas e deficitárias é, atualmente e cada vez mais, feita com recurso a medições do fluxo de seiva dos quais já se fez uma abordagem detalhada do capítulo 2. Estas técnicas que oferecem dados de qualidade sobre o processo transpirativo das árvores e da sua variação intra e interanual têm como limitação obterem a informação desejada de árvores isoladas e individualmente monitorizadas e, assim, não integram a transpiração ao nível da parcela (o agregado). Deste modo, o cenário ideal seria a monitorização de todas as árvores que constituem o coberto vegetal da parcela, tarefa utópica quer pela logística complexa, quer pelo tempo e recursos a despender. Assim, a forma de contornar este obstáculo é a estimativa da transpiração para o agregado, usualmente designado por *scaling-up*, feita a partir da informação obtida numa amostra de poucas árvores onde é feita a monitorização da transpiração. O processo de extrapolação da transpiração de árvores individuais para o agregado (a parcela) envolve o conhecimento das características das árvores e a sua relação com o fluxo de seiva.

A abordagem usada no decurso deste trabalho foi a apresentada inicialmente por Wullschleger *et al.* (1998) e aplicada posteriormente por Gazal *et al.* (2006). A metodologia permitiu avaliar a transpiração parcelar num olival através do conhecimento do fluxo de seiva e de informação biométrica como a área média da copa, a área média do xilema da árvore monitorizada e, ainda, a área média e total da copa do agregado e a área média e total do xilema do agregado. Os resultados da nossa aplicação desta metodologia a um olival de baixa densidade sujeito a diferentes estratégias de rega encontram-se no artigo 2, publicado na revista internacional *Biosystems Engineering* 102:321:333.

Outros métodos de extrapolação são citados na literatura científica (Cermák *et al.* 1982, Cermák & Kucera 1990a e Hinckley *et al.* 1994 citados em Cermák *et al.* 2004) mas, independentemente do método de estimativa da transpiração do agregado, este parâmetro reflete a influência das condicionantes atmosféricas, das disponibilidades hídricas solo/subsolo, da estrutura física do coberto (nomeadamente a rugosidade aerodinâmica e índice

de área foliar) e de características morfológicas e mecanismos de resposta fisiológica que controlam a perda de água pelas folhas os quais são exercidos através da abertura e fecho estomático (Calder, 1990). De facto, a resposta estomática da folha às alterações ambientais e ao conteúdo de água no solo tem um papel importante na manutenção do estado hídrico da oliveira, indicando o controlo que a planta exerce sobre as perdas de água para a atmosfera, mantendo as células túrgidas e garantindo uma taxa de transpiração equilibrada com a quantidade de água no solo e na planta. Porém, fechos estomáticos reduzem a absorção de CO<sub>2</sub> com impacto na produção de biomassa.

O comportamento estomático é também responsável pelos valores do coeficiente cultural ( $K_c$ ), razão entre a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e a evapotranspiração potencial do meio ( $ET_0$ ) e dos associados coeficientes de stress hídrico obtidos em situação de pouca disponibilidade de água. De facto, a menor ou maior facilidade com que a planta perde água condiciona a transpiração e esta, por sua vez, permite definir o calendário de rega. A oliveira, espécie adaptada a ambientes semi-áridos, apresenta valores de  $K_c$  que são inferiores à unidade durante o verão, o que denuncia um abrandamento dos processos fisiológicos como forma de evitar a desidratação, estando comprovado que os estomas da oliveira fecham, quando o défice de pressão de vapor é elevado o que leva a que os valores de  $K_c$  dependam das características físicas do meio ambiente (Rojas *et al.*, 1996).

A condutância estomática é usada como um indicador de défice hídrico nas folhas. Contudo, o grande número de variáveis que a condicionam e a sua sensibilidade a variações climáticas, tais como o vento e nuvens, torna difícil a interpretação dos resultados que se pretendem observar (Burrows e Milthorpe, 1976). Acresce ainda a dificuldade de, tal como na transpiração, generalizar ao coberto vegetal as medições pontuais realizadas. Dadas as dificuldades inerentes à quantificação da condutância estomática têm surgido vários modelos que tentam estimar e explicar o comportamento hídrico das culturas através do funcionamento deste indicador.

Um dos modelos propostos para estimar a condutância estomática é o apresentado por Jarvis (1976), que atribuiu as flutuações diárias e sazonais da condutância estomática à inconstância das variáveis ambientais. Este modelo é

de uso frequente na modelação da resposta estomática e usa um algoritmo multiplicativo que ajusta um valor de referência da condutância estomática às variáveis ambientais, assumindo que as variáveis têm apenas um efeito multiplicativo sem que as mesmas tenham interações mutuais.

O modelo de Jarvis (1976) é de fácil aplicação e tem-se revelado de grande aderência com os valores medidos. Todavia, a modelação efetuada para um local não é diretamente extrapolável para outro, uma vez que os valores de alguns dos seus parâmetros empíricos são apenas válidos para o local onde foram estabelecidos, acrescentando ainda o facto do modelo considerar que as variáveis que descrevem o processo estomático são independentes, facto questionável já que o modelo multiplicativo ignora a elevada correlação existente entre a temperatura do ar e o défice de pressão de vapor (Lhomme *et al.*, 1998 e MacFarlane *et al.*, 2004 citados em Vitale *et al.*, 2007). Outros foram apresentados por Ball *et al.* (1987) e Leuning (1990) e receberam também larga atenção e aplicação por já descrevem a dependência da condutância estomática dos factores ambientais humidade relativa ou défice de pressão de vapor e concentração de CO<sub>2</sub> na folha. Apesar de amplamente aplicados na Europa, os processos de modelação da condutância estomática descritos apresentam muitas limitações quando aplicados na região mediterrânica, porque não integram a resposta fisiológica das plantas aos parâmetros ambientais que caracterizam os verões quentes e secos desta região (Vitale *et al.*, 2007). Neste contexto, modelou-se a condutância estomática da oliveira em clima mediterrânico da região de Moura segundo o modelo inicialmente apresentado por McNaughton e Jarvis (1983) e posteriormente aplicado por Yunusa *et al.* (2008a e b). Este modelo é apropriado para árvores de copa aberta e aplicável a várias espécies vegetais (McNaughton e Jarvis, 1983; Ewers e Oren 2000), entre as quais as de folhas pequenas como é o caso da oliveira. A aplicação deste modelo requer a estimativa de parâmetros aerodinâmicos e da copa para melhor se promover a associação entre a vegetação e os factores atmosféricos que controlam a transpiração, principalmente a disponibilidade de energia e o défice de saturação do ar (Jarvis e McNaughton, 1986).

Neste contexto, os objetivos deste capítulo centram-se na apresentação da técnica de extrapolação da transpiração avaliada em árvores individuais



através do método do impulso de calor para a parcela, na modelação da condutância estomática e no estabelecimento de coeficientes culturais e de stress para olivais de baixa densidade, situados na margem esquerda do Guadiana.

## 3.2. Metodologia

### 3.2.1. Descrição do local de ensaio

O trabalho experimental decorreu a Sul de Portugal, na Herdade dos Lameirões situada na freguesia de Safara, concelho de Moura (lat. 38°05'15''N, long. 07°16'39''W, alt.75 m), num solo calcário vermelho de xistos associados a depósitos calcários (Vcx) e cronologicamente, no período compreendido entre 2005 e 2007.

No que concerne ao clima, este é tipicamente mediterrânico com temperaturas elevadas e escassez acentuada de água no verão. Entre os anos de 2005 e 2007, a precipitação anual esteve compreendida entre 250.9 mm e 521.8 mm correspondendo o menor e maior valor aos anos de 2005 e 2006, respetivamente. A precipitação ocorreu principalmente no inverno sendo desprezável nos meses de julho e agosto (vd. Quadro 2.5), proporcionando um ambiente extremamente seco às espécies vegetais.

Os dados meteorológicos referenciados foram recolhidos por uma estação meteorológica automática localizada a alguns metros do olival, com registos horários de velocidade do vento, temperatura do ar, radiação solar, chuva e humidade relativa, sendo que os valores da radiação líquida acima da copa das árvores foram medidos com um radiómetro NrLite (Kipp e Konen, Holland) e recolhidos em intervalos de 30 minutos por um datalogger (Campbell CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA).

Tal como descrito no capítulo 2, definiram-se quatro tratamentos de rega: tratamento A, com aplicação de água necessária para suprir as solicitações evapotranspirativas (100%  $ET_c$ ); tratamento B, com aplicações de água necessárias para repor 60% da evapotranspiração da árvore (60%  $ET_c$ ), sendo esta estratégia de rega usualmente designada por rega deficitária

sustentada; Tratamento C, com aplicações de água de rega apenas em três períodos críticos do ciclo vegetativo (antes da floração, ao início do endurecimento do caroço e 15 dias antes da colheita), sendo esta estratégia de rega comumente designada por rega deficitária controlada; tratamento D, conduzido em sequeiro e, por conseguinte, sem aplicação de água de rega.

### 3.2.2. Avaliação da área foliar por unidade de superfície

Para posterior estimativa e obtenção da condutância estomática das folhas da oliveira ( $g_s$ ), determinou-se a quantidade de área foliar produzida por unidade de área coberta de solo e usualmente designada por índice de área foliar (LAI). Este parâmetro foi avaliado com recurso a fotografias hemisféricas captadas com o Digital Plant Canopy Imager, CID, Inc. (USA), sendo as árvores selecionadas para essa avaliação as equipadas com os sensores de fluxo de seiva e de outras provenientes de uma amostra aleatória de 11 árvores em cada um dos tratamentos definidos. Para cada uma das árvores monitorizadas, capturaram-se quatro imagens hemisféricas, orientadas de acordo com os quatro quadrantes que, a título de exemplo, se ilustram na Figura 3.1.

Relativamente ao referenciado, houve o cuidado de capturar as imagens hemisféricas em dias de céu uniformemente nublado, de modo a obter o maior contraste entre as folhas e o céu (Whitford *et al.*, 1995). A estimativa do LAI resultou da análise das imagens com o software criado para o efeito tendo-se tido, durante o processamento das imagens, o cuidado de eliminar a região coberta pelo tronco de acordo com a sugestão apresentada por Nilson (1999) e Nilson e Kuusk (2004). Assim, o LAI de cada árvore foi obtido pela média das quatro imagens capturadas (Figura 3.1).

Ainda neste âmbito, os valores de LAI determinados durante o ano de 2006 foram de 1.187 para o tratamento A, 1.099 para o tratamento B, 1.101 para o tratamento C e 1.100 para o tratamento D.

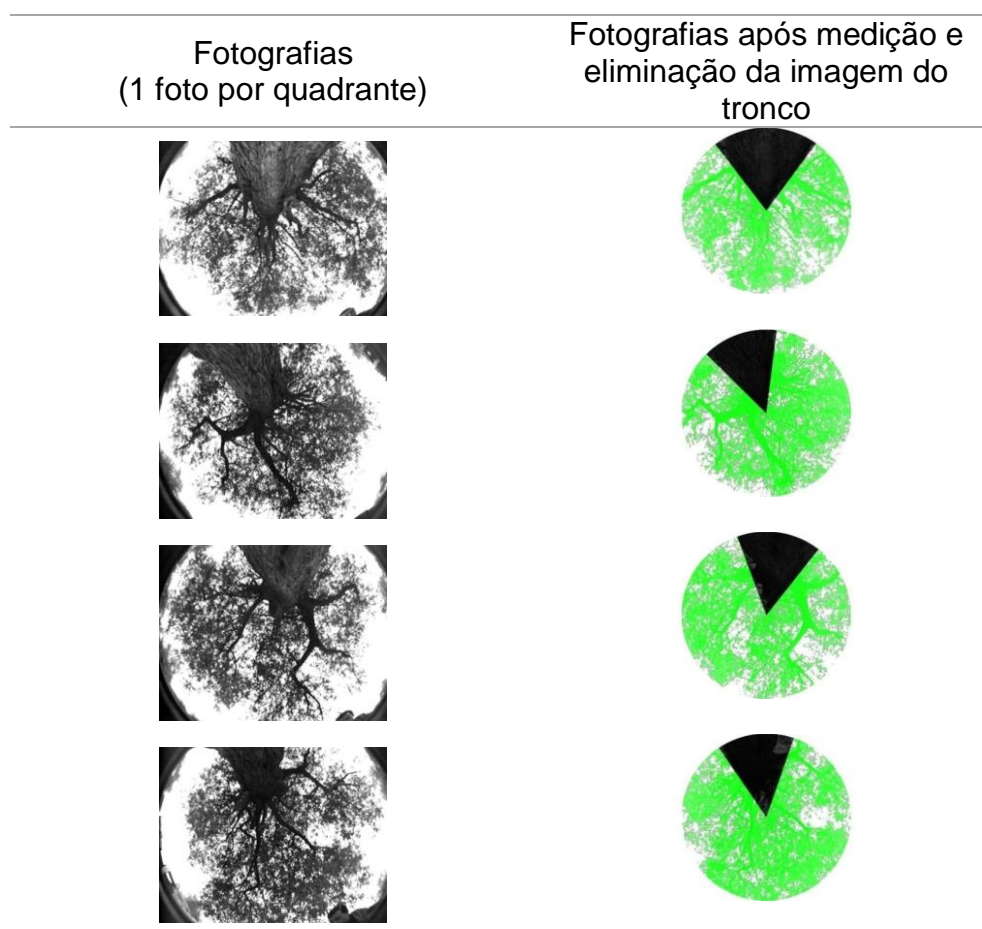


Figura 3.1 - Fotografias hemisféricas obtidas nos quatro quadrantes (Norte, Sul, Este e Oeste) da árvore monitorizada no tratamento A. Imagens capturadas em 2006.

### 3.2.3. Estimativa da condutância estomática a partir da transpiração avaliada com a técnica do impulso de calor

Os dados apresentados no artigo 1 indicam que a dinâmica do fluxo de seiva foi ligeiramente condicionada pelo conteúdo de água no solo e que apenas teve maiores decréscimos no tratamento conduzido em sequeiro. Tal facto deixa perceber que as oliveiras são pouco sensíveis a pequenas variações do conteúdo de água no solo, mantendo taxas de transpiração normais ainda que a quantidade de água no solo seja inferior às condições de rega plena. Face a esta relativa insensibilidade da transpiração a ligeiros

decréscimos de água no solo, optou-se por avaliar a condutância estomática por estar identificada como sendo um indicador sensível ao eventual stress hídrico da oliveira (Fernández *et al.*, 1997; Moriana *et al.*, 2003; Tognetti *et al.*, 2006; Moriana *et al.*, 2007).

Com recurso ao modelo apresentado inicialmente por McNaughton e Jarvis (1983) e posteriormente aplicado por Yunusa *et al.* (2008a e b) e usando as medições de fluxo de seiva, calculou-se a condutância estomática horária para as árvores amostradas em cada tratamento. O modelo é expresso pela Eq. [3.1] que, na sua forma inicial, permite estimar a transpiração da copa, visto que este modelo considera que a transpiração está fortemente associada às condições atmosféricas, presumindo-se que o défice de pressão de vapor junto à copa seja a força motriz do processo transpirativo.

$$T_c = \frac{\left(\rho \frac{cp}{\gamma}\right) D_a g_c}{\lambda} K \quad [3.1]$$

onde,

$T_c$  - transpiração da copa ( $\text{l s}^{-1} \text{m}^{-2}$ );

$\rho$  - massa volúmica do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$cp$  - calor específico do ar ( $1.013 \text{ kJ kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ );

$\gamma$  - constante psicrométrica ( $0.0673 \text{ kPa°C}^{-1}$ );

$D_a$  - défice de pressão de vapor (kPa);

$\lambda$  - calor latente de vaporização ( $2.45 \text{ MJ}$ );

$g_c$  - condutância estomática da copa ( $\text{m s}^{-1}$ );

$K$  - duração do dia tomando como unidade o segundo (s).

Assumiu-se ainda que a transpiração da copa ( $T_c$ ) era equivalente ao fluxo de seiva avaliado nas árvores monitorizadas nos tratamentos A, B, C e D. Paralelamente, o défice de pressão de vapor foi calculado com uma periodicidade horária a partir de registos meteorológicos efetuados na estação meteorológica local e seguindo os procedimentos descritos em Allen *et al.* (1998).

A estimativa da condutância estomática da copa ( $g_c$ ) foi avaliada como sendo função de  $T_c$  e de variáveis meteorológicas locais, através da inversão

da Eq. [3.1] e a razão  $T_d/D_a$  expressa na Eq.[3.2] é um indicador do grau de abertura estomática (Phillips e Oren, 1998; Ewers e Oren, 2000).

$$g_c = \frac{\lambda \cdot T_c}{\left(\rho \cdot \frac{c_p}{\gamma}\right) D_a} \frac{1}{K} \quad [3.2]$$

Constata-se, contudo que, uma das lacunas atribuídas aos modelos usados na estimativa da condutância estomática é a de não contemplarem a humidade do solo. Neste modelo, ainda que tal não seja objetivamente considerado, é-o de certa forma indiretamente através da transpiração, já que o comportamento deste fitomonitor depende do conteúdo de água no solo.

Finalmente, refere-se que, em virtude das folhas da oliveira serem hipoestomáticas, a condutância estomática de folhas individuais ( $g_s$ ) obteve-se através da razão entre a condutância estomática da copa ( $g_c$ ) e o índice da área foliar ( $LAI$ ) de acordo com a Eq.[3.3].

$$g_s = \frac{g_c}{LAI} \quad [3.3]$$

#### **3.2.4. Extrapolação da transpiração recorrendo ao fluxo de seiva monitorizado em árvores individuais e à informação biométrica**

Tendo em conta os diferentes programas de rega implementados, avaliou-se a transpiração da parcela a partir da medição do fluxo de seiva em árvores individuais e independentes, optou-se pelo método apresentado inicialmente por Wullschleger *et al.* (1998) e aplicado por Gazal *et al.* (2006). De acordo com esta metodologia, a transpiração do agregado foi calculada com base nas características estruturais das árvores instrumentadas com sensores de fluxo de seiva e nas características médias dos cobertos vegetais, avaliadas a partir de uma amostra de árvores selecionadas aleatoriamente em cada um dos tratamentos (Quadro 3.1.).

A Figura 3.2, esquematiza a metodologia usada para o caso concreto do olival em estudo. Inicialmente, e de acordo com a descrição detalhada no

capítulo 2 secção 2.2.3, procedeu-se à determinação do fluxo de seiva em árvores individuais monitorizadas nos tratamentos A, B, C e D. A transpiração avaliada em cada uma das árvores instrumentadas foi a matriz usada na extrapolação da transpiração para o agregado.

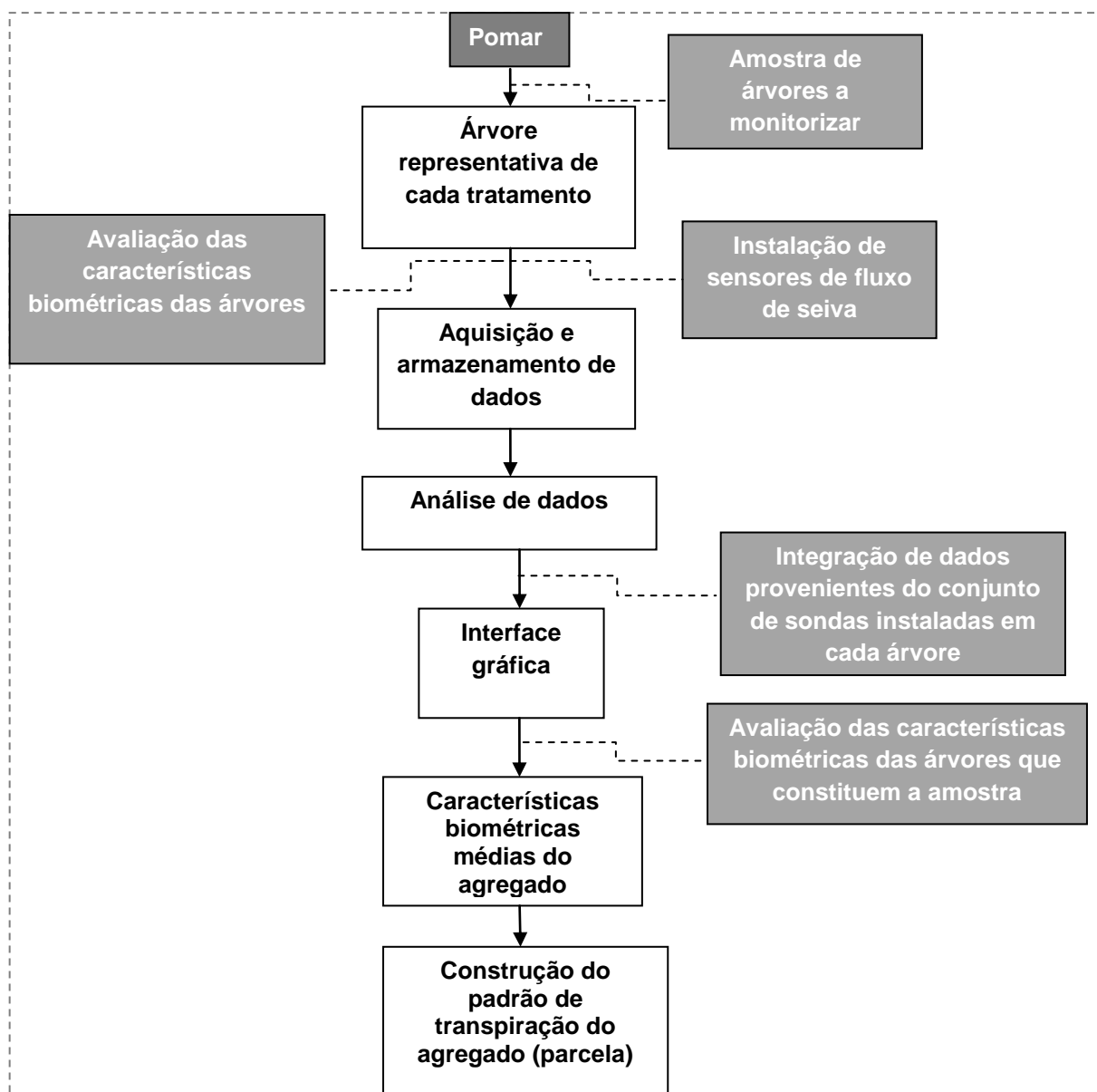


Figura 3.2 - Processo de extrapolação (scaling-up) da transpiração de árvores individuais para uma parcela do olival.

Simultaneamente à instalação dos sensores de fluxo de seiva foram medidos nas árvores monitorizadas os seguintes parâmetros biométricos: altura total da árvore; diâmetro do tronco à altura de instalação dos sensores de fluxo de seiva (Figura 3.3a); diâmetro da copa (Figura 3.3b). A extrapolação da transpiração para o coberto vegetal de cada uma das parcelas referentes aos tratamentos A, B, C e D foi também auxiliada com informação biométrica proveniente da amostra constituída por árvores, representativas da variedade arquitetónica das árvores, observada no local. Depois de selecionadas e devidamente identificadas mediram-se os seguintes parâmetros biométricos: diâmetro do tronco à altura do peito (DHB); área da copa; altura das árvores e altura do tronco. No Quadro 3.1 é feita a referenciação dos parâmetros avaliados na árvore monitorizada e nas árvores representativas do agregado.



Figura 3.3 - Avaliação dos parâmetros biométricos na amostra de árvores representativas do agregado. a. medição do diâmetro do tronco à altura do peito; b. avaliação da área da copa projetada.

Quadro 3.1 - Características médias estruturais das árvores monitorizadas e do agregado dos diferentes tratamentos. Valores referentes ao ano de 2006.

Características estruturais das árvores monitorizadas				Características estruturais do agregado					
Trat.	Diâmetro médio do tronco (m)	Área média do xilema (m <sup>2</sup> )	Área média da copa (m <sup>2</sup> )	Nº de árvores na parcela	Diâmetro médio do tronco (m)	Área média do xilema (m <sup>2</sup> )	Área total do xilema (m <sup>2</sup> )	Área média da copa (m <sup>2</sup> /árvore)	Área total da copa (m <sup>2</sup> )
A	0.40	0.055	27.34	77	0.39±0.107	0.058±0.0183	4.56	17.44±4.88	1360.35
B	0.33	0.058	32.17	64	0.48±0.141	0.074±0.024	4.71	25.67±3.59	1643.19
C	0.50	0.077	40.15	60	0.46±0.115	0.070±0.020	4.21	21.15±3.56	1269.29
D	0.44	0.072	28.27	67	0.48±0.071	0.075±0.012	5.00	21.16±2.90	1417.51



Para avaliar corretamente a transpiração das árvores instrumentadas, foi necessário quantificar a densidade do fluxo de seiva total ( $J_s$ ) ou massa do fluxo de seiva por árvore, para o que, em cada árvore monitorizada com sensores de fluxo de seiva instalaram-se radialmente três conjuntos de sondas, conforme descrito no capítulo 2, secção 2.2.3.3 e considerou-se para o cálculo do fluxo de seiva total a Eq. [3.4].

$$J_s = V_1 SWA_1 + V_2 SWA_2 + V_3 SWA_3 + V_4 SWA_4 \quad [3.4]$$

onde,

$J_s$  - fluxo de seiva total ( $m^3 h^{-1}$ );

$V_n$  - velocidade média corrigida do fluxo de seiva ( $m h^{-1}$ );

$SWA_n$  - área média do xilema correspondente a cada sensor de temperatura ( $m^2$ ).

A estimativa da área média do xilema do agregado ( $SWA_{agregado}$ ) foi auxiliada pela relação entre o diâmetro do tronco à altura do peito e a área média do xilema ( $SWA$ ) medidos numa amostra constituída por 9 oliveiras  $SWA = 0.1702DHB - 0.0076$ ;  $r^2 = 0.94$ . O fluxo de seiva do agregado em cada um dos tratamentos foi estimado com recurso à Eq. [3.5].

$$J_{sagregado} = \left( \frac{J_s}{SWA} \right) SWA_{agregado} \quad [3.5]$$

onde,

$J_{sagregado}$  - fluxo de seiva do agregado ( $m^3 h^{-1}$ );

$SWA$  - área média do xilema da árvore monitorizada ( $m^2$ );

$SWA_{agregado}$  - área média do xilema do agregado ( $m^2$ ).

Para determinar a transpiração média do agregado  $T$  ( $l h^{-1}$ ) recorreu-se à Eq. [3.6].

$$T = (1000 J_s \text{ agregado}) \left( \frac{A_{cc}}{A_{cm}} \right) \quad [3.6]$$

onde,

$T$  - transpiração média do agregado constituinte de cada tratamento ( $l h^{-1}$ );

$A_{cm}$  - área da copa da árvore monitorizada ( $m^2$ );

$A_{cc}$  - área média da copa das árvores do agregado ( $m^2$ ).

A estimativa da transpiração média diária  $T$  ( $l dia^{-1}$ ) do agregado resultou da integração da transpiração estimada em intervalos de 30 minutos que corresponderam a 48 medições diárias.

$$T = \int_{n=1}^{47} \left( 0.5 \left( \frac{T_n + T_{n+1}}{2} \right) \right) \quad [3.7]$$

onde,

$T$  - transpiração média diária do agregado ( $l dia^{-1}$ );

$T_n$  - transpiração no tempo  $n$  ( $l h^{-1}$ );

$T_{n+1}$  - transpiração no tempo  $n+1$  ( $l h^{-1}$ ).

A transpiração média diária  $T$  ( $mm dia^{-1}$ ) resultou da razão entre a transpiração ( $l dia^{-1}$ ) e a área total da copa do agregado conforme a Eq. [3.8].

$$T(mm \text{ dia}^{-1}) = \frac{T(l \text{ dia}^{-1})}{A_{ct}} \quad [3.8]$$

### 3.3. Resultados e discussão

#### 3.3.1. Extrapolação da transpiração à escala da parcela através da transpiração avaliada em árvores individuais e de informação biométrica

A Figura 3.4 estabelece uma comparação entre os valores de transpiração avaliados com técnica do impulso de calor em árvores individuais e os valores de transpiração estimados para o agregado, considerando as características estruturais presentes no Quadro 3.1. O período de tempo selecionado para análise do comportamento fisiológico das árvores que compõem o agregado e da árvore monitorizada foi de 18 de março a 9 de setembro de 2006, durante o qual se definiram intervalos de tempo de aproximadamente 14 dias, a saber: 18 de março a 31 de março; 1 de abril a 15 de abril; 16 de abril a 28 de abril; 29 de abril a 12 de maio; 13 de maio a 26 de maio; 27 de maio a 9 de junho; 10 de junho a 24 de junho; 25 de junho a 6 de julho; 7 de julho a 19 de julho; 20 de julho a 3 de agosto; 4 de agosto a 17 de agosto e 18 de agosto a 9 de setembro.

No tratamento A, com árvores em conforto hídrico durante toda a estação de rega, os valores da transpiração extrapolados para o agregado e os avaliados através da árvore monitorizada aproximaram-se e estiveram compreendidos entre 1.7 mm dia<sup>-1</sup> e 4 mm dia<sup>-1</sup>, no caso do agregado, e entre 1.6 mm dia<sup>-1</sup> e 3.8 mm dia<sup>-1</sup>, no caso da árvore monitorizada. A evolução da transpiração ao longo do período em análise deixa perceber que, desde o início da monitorização até 5 de maio, houve um crescendo da transpiração; entre 19 de maio e 30 de junho, os valores da transpiração praticamente estabilizam e, durante os meses de julho e agosto, registaram-se os maiores valores de transpiração. Dado que as árvores do tratamento A estiveram sempre em conforto hídrico, concluí-se que a maior dinâmica do fluxo de seiva nos meses mais quentes foi resultado das condições meteorológicas. De facto, durante os meses de julho e agosto os valores de  $ET_0$  e do défice de pressão de vapor ( $D_a$ ) foram elevados (Quadro 3.2), pelo que as solicitações atmosféricas foram grandes e a humidade do ar mais baixa.

No tratamento B, SDI, o afastamento entre a transpiração avaliada na árvore instrumentada e a transpiração estimada para a parcela foi maior do que no tratamento A e apresentou para o período considerado variações de 2 mm dia<sup>-1</sup> a 5 mm dia<sup>-1</sup> para o agregado, e 1.6 mm dia<sup>-1</sup> e 3.9 mm dia<sup>-1</sup>, para a árvore monitorizada. Tal facto é explicável por diferenças da área média do tronco e da área média do xilema, que é cerca de 0.016 m<sup>2</sup> maior no agregado do que na árvore monitorizada (Quadro 3.1).

No tratamento C, RDI, as maiores oscilações nos valores da transpiração ocorreram nos intervalos de 29 de abril a 12 de maio, de 13 de maio a 26 de maio e de 7 de julho a 19 de julho, resultando as mesmas do acréscimo de água no solo em virtude da rega e verificando-se aqui uma relação mais estreita entre a transpiração e o conteúdo de água no solo. A transpiração na árvore monitorizada esteve compreendida entre 2.5 mm dia<sup>-1</sup> e 4.5 mm dia<sup>-1</sup>, enquanto que no agregado os valores da transpiração foram ligeiramente inferiores e estiveram compreendidos entre 2.2 mm dia<sup>-1</sup> e 4.1 mm dia<sup>-1</sup>. Verifica-se aqui que, quando em conforto hídrico, o tratamento C apresentou valores de transpiração superiores aos do tratamento A, quer na situação da árvore monitorizada, quer na situação do agregado. Tal facto já tinha sido observado no capítulo 2, secção 2.3.2.1.

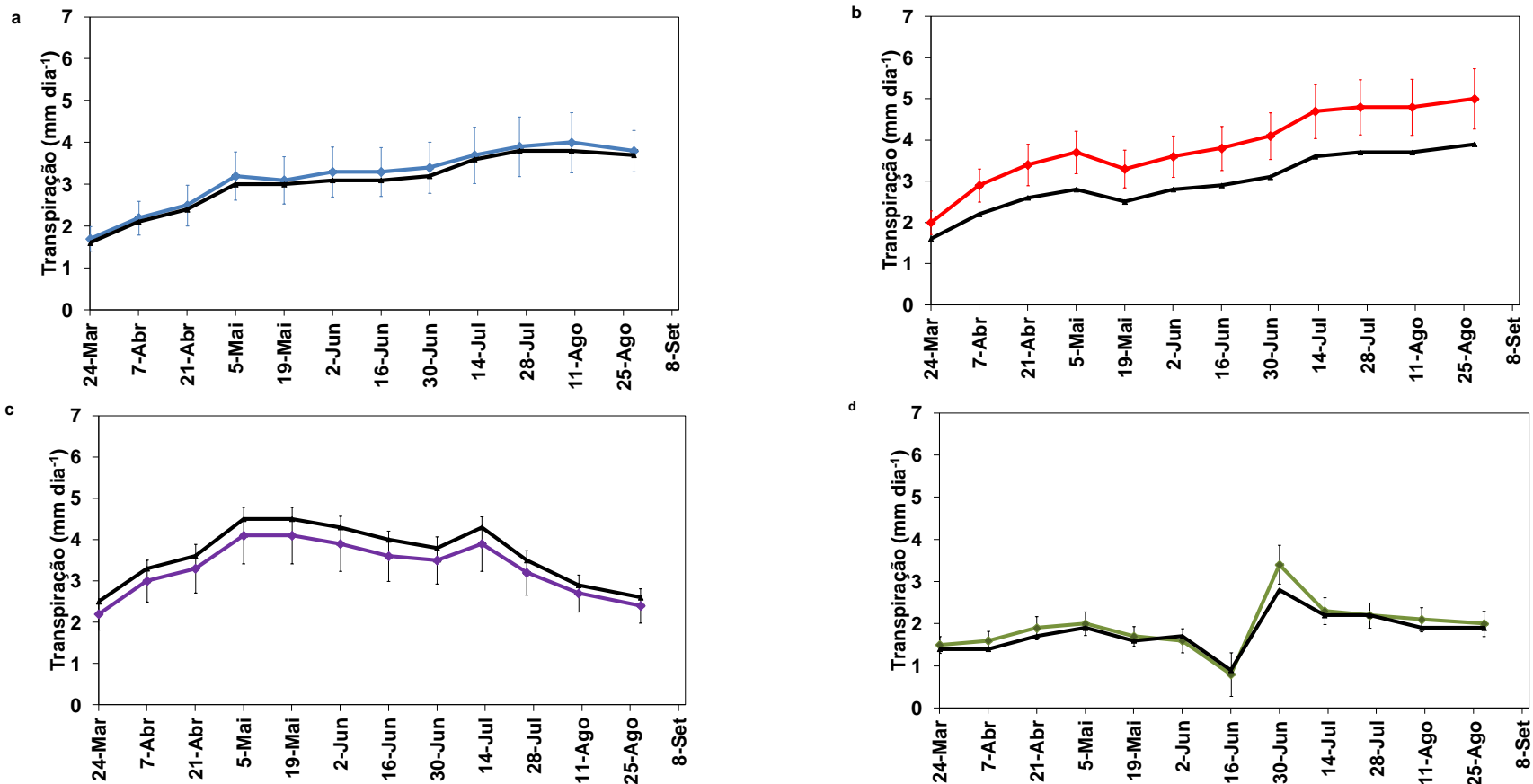


Figura 3.4 - Valores de transpiração de árvores individuais, da representativa do agregado (parcela) e desvio padrão para o ano de 2006. —▲— transpiração avaliada em árvores individuais; —◆— tratamento A; —◆— tratamento B; —◆— tratamento C; —◆— tratamento D do agregado. Os valores da transpiração estimados para o agregado são médias (n=11) e as barras verticais correspondem ao desvio padrão.

Quadro 3.2 - Valores médios mensais de  $ET_0$  e de  $D_a$  para o ano de 2006.

Meses do ano	$ET_0$ (mm dia <sup>-1</sup> )	$D_a$ (kPa)
jan	0.97	0.39
fev	1.57	0.49
mar	2.12	0.59
abr	3.28	0.94
mai	4.74	1.68
jun	5.70	1.93
jul	6.30	2.82
ago	5.87	2.78
set	4.29	2.11
out	2.58	1.07
nov	1.38	0.60
dez	0.86	0.44

No tratamento D, conduzido em sequeiro, as taxas de transpiração foram inferiores às dos tratamentos A, B e C e estiveram compreendidas entre 0.8 e 3.4 mm dia<sup>-1</sup> no agregado, e 0.9 e 2.8 mm dia<sup>-1</sup>, na árvore monitorizada. Estes valores de transpiração, apesar de baixos, garantiram as funções fisiológicas das árvores e a produção de fruto como resultado da adaptação da oliveira às escassas chuvas de verão desenvolvendo um sistema radical volumoso que permitiu a mobilização da água existente no solo.

À exceção do tratamento C, todos os outros mostram que, ao avaliar a transpiração com base na informação da árvore monitorizada, estar-se-ia a subestimar a transpiração num diferencial médio de cerca de 0.145 mm dia<sup>-1</sup>, 0.892 mm dia<sup>-1</sup> e 0.125 mm dia<sup>-1</sup> para os tratamentos A, B e D, repetidamente. No tratamento C, o valor da transpiração obtido na árvore monitorizada foi em média 0.325 mm dia<sup>-1</sup> superiores ao estimado para o agregado.

Numa perspectiva de análise da influência dos tratamentos de rega nas taxas de transpiração das oliveiras constituintes do agregado, procedeu-se à análise estatística com recurso ao programa estatístico SPSS, versão 15, onde a significância do factor tratamento de rega foi suportada pela análise de

variância. O teste de Tukey, com um nível de significância de 0.05, foi usado para identificar as diferenças entre médias (Quadro 3.3) deixando este perceber que os valores da transpiração no período de 18 de março a 9 de setembro de 2006 variaram para os diferentes tratamentos entre  $3.80 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $2.24 \text{ mm dia}^{-1}$  com os maiores e menores valores a ocorrerem nos tratamentos B e D, respectivamente. Estatisticamente, existiram diferenças significativas entre tratamentos, sendo o tratamento B, SDI, o que apresentou os maiores valores de transpiração, seguido do tratamento C que, apesar de em média apresentar uma taxa de transpiração de  $0.44 \text{ mm dia}^{-1}$  inferior ao tratamento B, não o torna significativamente diferente deste último. Dos tratamentos regados, foi o tratamento A o que surpreendentemente apresentou os menores valores médios de transpiração, sendo de cerca de  $0.71 \text{ mm dia}^{-1}$  inferior ao tratamento B e, por isso, significativamente diferente deste último. Tal leva a crer que, fisiologicamente, a oliveira responde mal ao excesso de água imposto pela estratégia de rega definida para A. É ainda evidente que as árvores dos tratamentos regados transpiram significativamente mais do que as árvores do tratamento D, conduzido em sequeiro.

Quadro 3.3 - Influência dos tratamentos de rega na transpiração das oliveiras durante o ano de 2006 (média  $\pm$  desvio padrão).

Tratamento	Transpiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ )
A	$3.09 \pm 0.559b^1$
B	$3.80 \pm 0.543a$
C	$3.36 \pm 0.542ab$
D	$2.24 \pm 0.307c$

<sup>1</sup>Tratamentos com a mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey  $P \leq 0.05$ .

### 3.3.2. Modelação da condutância estomática através da integração das características fisiológicas da oliveira, dados climáticos e disponibilidade hídrica do solo

A literatura aponta para uma relação estreita entre o défice de pressão de vapor ( $D_a$ ) e a condutância estomática das folhas ( $g_s$ ), o que nos levou a pretender avaliar localmente o grau de associação entre a variável ambiental défice de pressão de vapor e o mecanismo de resposta fisiológico de abertura e fecho estomático aferido pela  $g_s$ . Estabeleceu-se, assim, a relação entre os valores horários diurnos de  $D_a$  e correspondentes valores simulados de  $g_s$ , tendo-se definido para tal três períodos de tempo a saber: 2 de abril a 17 de maio, quando os tratamentos A, B e C estavam a ser regados; de 18 de maio a 2 de julho, quando ocorreu a paragem da rega no tratamento C e de 3 de julho a 29 de agosto, quando se reiniciou a rega no tratamento C.

Utilizando 700 pares de observações  $D_a$  versus  $g_s$ , efetuou-se o ajustamento entre as duas variáveis e foram obtidas funções de comportamento não linear do tipo  $g_s = a D_a^{-b}$ , as quais se encontram descritas no artigo 2, publicado no *Biosystems Engineering* 102:321:333. O bom ajustamento entre as duas variáveis indica que o modelo interpretativo usado é correto e a condutância estomática pode ser quantificada a partir do conhecimento de  $D_a$ . Neste âmbito, apresenta-se na Figura 3.5 a representação gráfica do comportamento estomático das oliveiras inseridas nos quatro tratamentos de rega inicialmente definidos e considerando o período de tempo compreendido entre 3 de julho a 29 de agosto.

A análise da figura 3.5 confirma a associação entre o  $D_a$  e  $g_s$  que se manifesta por uma redução da abertura estomática quando a humidade relativa do ar decresce e, por conseguinte, o potencial evaporativo da atmosfera aumenta. Acresce que a magnitude do declive de  $g_s$  com o acréscimo de  $D_a$  é variável e reflete a sensibilidade da oliveira à falta de água no solo. Assim, verificou-se que, para valores de  $D_a$  superiores a 3 kPa, as árvores dos diferentes tratamentos restringiram as perdas de água através do encerramento parcial de estomas (resultados similares foram obtidos por Fernández *et al.*, 1997). Face ao comportamento das funções, julga-se adequado considerar que para valores mais elevados de  $D_a$ , a oliveira, pela



sua capacidade de resistência a condições climáticas adversas, mantém os estomas parcialmente abertos. Lo Gullo e Salleo (1988) referiram que a oliveira evita perdas de água nos dias de elevado potencial evaporativo devido à baixa condutividade hidráulica do xilema.

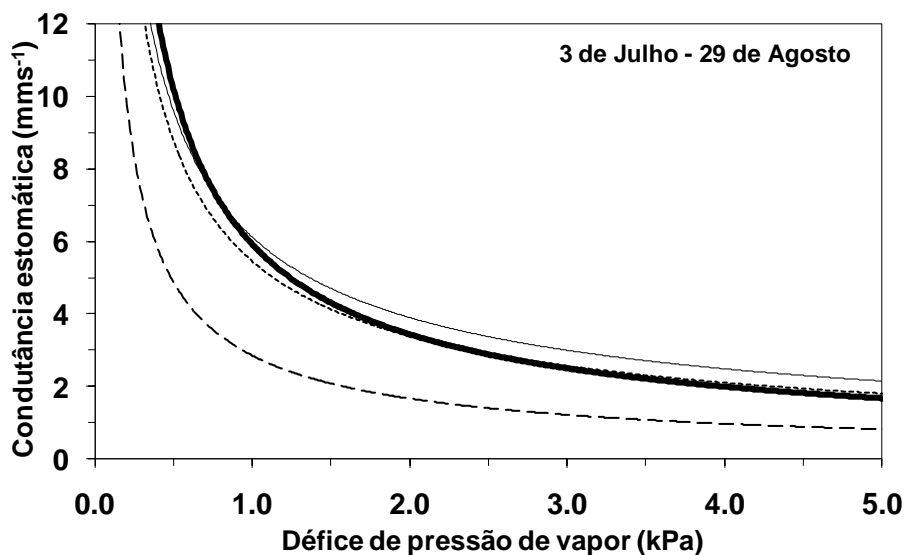


Figura 3.5 - Relação entre a condutância estomática e o déficit de pressão de vapor. — tratamento A; — tratamento B; - - - tratamento C; - - - tratamento D. Valores horários compreendidos entre as 5:00 e as 18:00 horas.

Com base nos valores de  $g_s$  estimados, procedeu-se à estimativa da condutância relativa (razão entre a condutância estomática de oliveiras submetidas a rega deficitária e a condutância estomática de oliveiras submetidas à rega plena). Ferreira *et al.* (1996), e Ferreira *et al.* (1997b), consideraram que o tratamento da condutância estomática em termos relativos permite acautelar as variações de humidade do ar que surgem de dia para dia. A Figura 3.6 mostra o comportamento da condutância estomática relativa (razão entre a condutâncias estomática dos diferentes tratamentos submetidos a stress hídrico e a condutância estomática do tratamento A), sendo visível que o estado hídrico das árvores condicionou a resposta estomática e, por

consequente, a condutância estomática relativa o que se reflete em diferenças nítidas deste indicador para os diferentes tratamentos.

Durante o período de rega considerado, as árvores do tratamento B mantiveram aberturas estomáticas não muito diferentes do tratamento A, dado que em média a condutância estomática relativa rondou a unidade, apesar de existirem oscilações entre os 0.67 e 1.22.

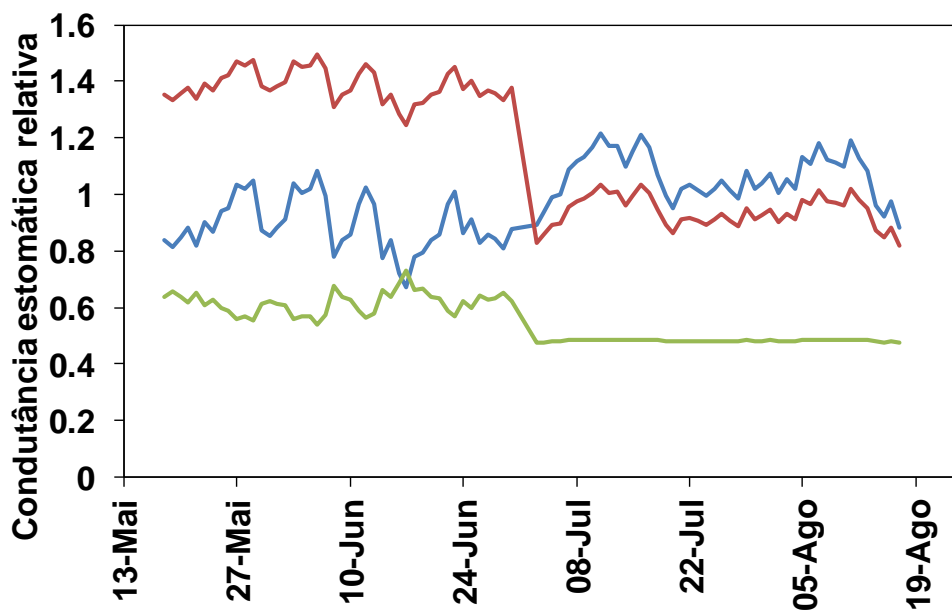


Figura 3.6 - Valores de condutância estomática relativa calculados ao longo da época de rega de 2006. — tratamento B; — tratamento C; — tratamento D.

Relativamente ao tratamento C, os valores da condutância estomática relativa variaram entre 0.82 e 1.50. De facto, num período inicial, entre 18 de maio a 29 de junho, os valores da condutância estomática relativa estiveram sempre acima de 1.2, confirmando a influência do maior diâmetro médio do tronco e área média do xilema das árvores que compõem o agregado do tratamento C comparativamente às árvores do agregado. Entre 29 de junho e 3 de julho, houve uma queda acentuada dos valores deste parâmetro o que está relacionado com um decréscimo gradual dos valores de REW que atingiram neste período valores de 0.41 (vd. Quadro 2.9). A comparação entre os valores

de *REW* para o ano de 2006 e os valores de condutância estomática relativa permite afirmar que os decréscimos de *REW* não se refletiram de imediato na condutância estomática. De facto, decréscimos de *REW* em 27 de maio só vieram a provocar decréscimos nos valores da condutância estomática relativa por volta do dia 30 de junho. Quando a rega foi retomada no tratamento C (3 a 9 de julho) os valores de *REW* cresceram e a condutância estomática relativa também teve um acréscimo rápido.

Quanto ao tratamento conduzido em sequeiro, tratamento D, este manteve valores de condutância estomática relativa próximos do 0.60 o que deixa perceber que as folhas das oliveiras do tratamento D apresentaram uma abertura estomática cerca de 40% inferior às das folhas do tratamento A até 29 de junho, sendo que a partir desta data a condutância estomática relativa decresce para valores da ordem dos 0.5, indicando uma maior redução da condutância estomática em consequência de um défice acentuado de água no solo.

A partir desta data, os valores da condutância estomática relativa no tratamento D mantiveram-se constantes o que leva a inferir que, em situações de défice hídrico severo, a oliveira mantém valores de condutância estomática relativa baixos, mas sem que haja o fecho total dos estomas e, por conseguinte, morte da árvore. Concluí-se que a limitação da perda de água por redução da abertura estomática em situação de carência hídrica é um dos mecanismos de defesa da oliveira face a escassez de água.

### **3.3.3. Análise conjunta das cinéticas diurnas da condutância estomática, transpiração e variáveis ambientais para as diferentes estratégias de rega**

A Figura 3.7 apresenta as cinéticas diárias da condutância estomática, transpiração, défice de pressão de vapor e radiação líquida para um período de 10 dias, após o reinício da rega e considerando apenas o período diurno (das 6:00 às 18:00 GMT).

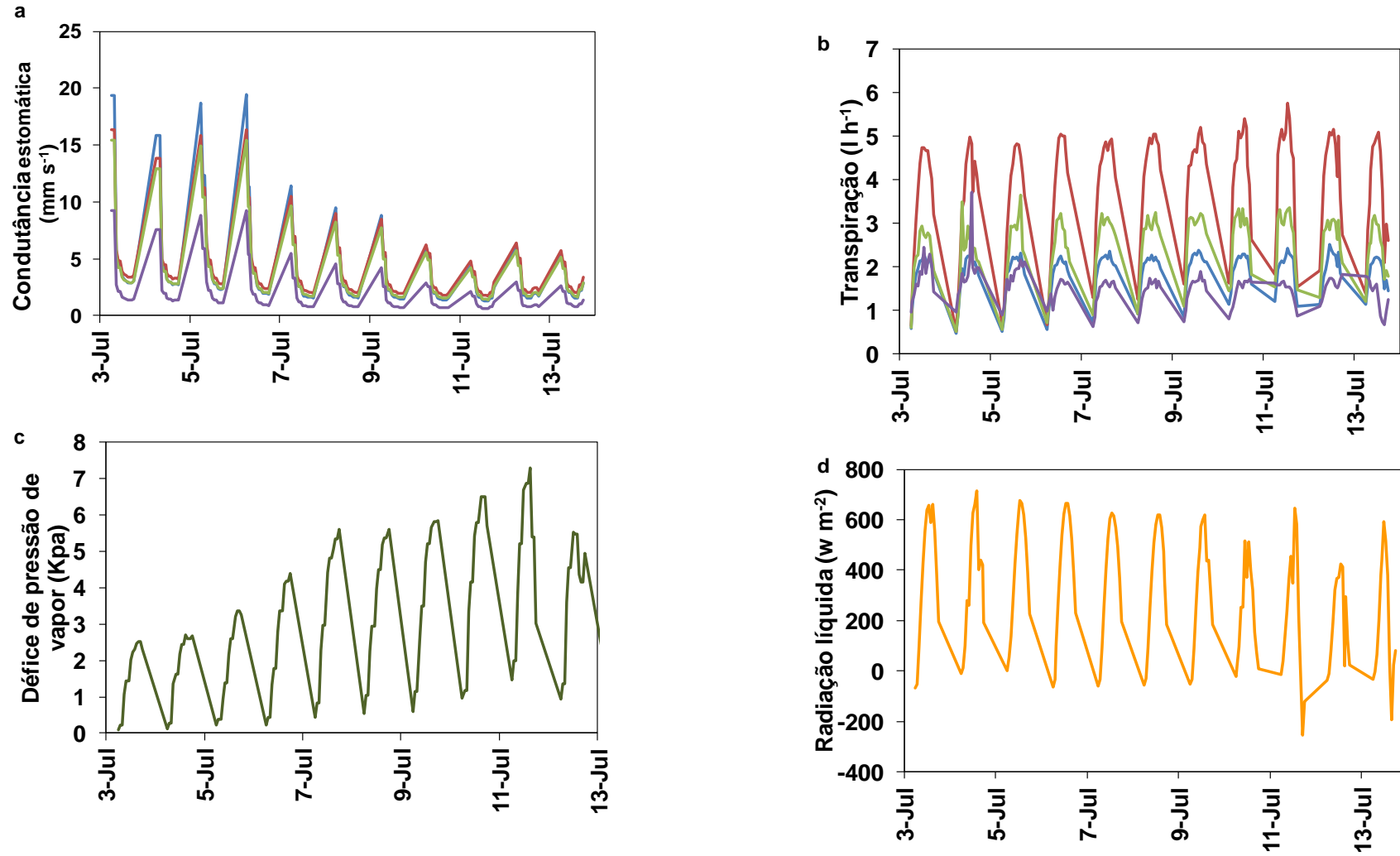


Figura 3.7 - Cinéticas diurnas (6:00 às 18:00 GMT) de condutância estomática, transpiração, déficit de pressão de vapor e radiação líquida para o período de 3 de julho a 13 de julho de 2006. — tratamento A; — tratamento B; — tratamento C; — tratamento D.

Para os quatro tratamentos implementados, o percurso temporal ao longo do dia, da condutância estomática repete-se consistentemente ao longo do período em análise. Exibe os máximos valores pela manhã, entre as 6:00 e as 8:00 GMT e são, em média, de  $11.4 \text{ mm s}^{-1}$ ,  $10.3 \text{ mm s}^{-1}$ ,  $9.5 \text{ mm s}^{-1}$  e  $5.4 \text{ mm s}^{-1}$  nos tratamentos A, B, C e D, respetivamente. Em contrapartida, decresce ao longo da tarde, atingindo os valores mínimos, cerca de  $1.8 \text{ mm s}^{-1}$ ,  $2.3 \text{ mm s}^{-1}$ ,  $1.9 \text{ mm s}^{-1}$  e  $0.9 \text{ mm s}^{-1}$ , geralmente entre as 15:00 e as 18:00 GMT. Este padrão de  $g_s$ , característico das diferentes espécies mediterrânicas como é o caso da oliveira, que tende a reduzir as perdas de água durante o dia mediante o fecho acentuado dos estomas é tipicamente um comportamento isohídrico.

Os tratamentos regados mostraram ligeiras diferenças nos valores de  $g_s$ , com o tratamento A a apresentar valores mais elevados de condutância estomática nos primeiros 4 dias em análise e o tratamento B a apresentar os maiores valores de  $g_s$  nos restantes dias. Em média, os valores diários de  $g_s$  rondaram os  $7 \text{ mm s}^{-1}$  nas árvores dos tratamentos A e B, e os  $4 \text{ mm s}^{-1}$  nas árvores do tratamento D. Entre o dia 7 de julho a 13 de julho, os tratamentos regados apresentaram valores de  $g_s$  da ordem dos  $3 \text{ mm s}^{-1}$  e o tratamento D de  $1 \text{ mm s}^{-1}$ . Pode, então afirmar-se que o comportamento estomático das árvores dos diferentes tratamentos é claramente distinto, sendo menor nas árvores sujeitas a maiores restrições hídricas. Assim, o controlo estomático nas perdas de água aparece como uma resposta das árvores ao stress hídrico, como forma de evitarem a desidratação.

As cinéticas diárias da transpiração, obtidas tendo em conta o espaço de tempo compreendido entre as 6:00 e as 18:00 GMT, mostraram que os maiores valores se registaram entre as 11:00 e as 16:00 GMT e que foram, em média, para os tratamentos A, B, C e D de  $2.3 \text{ l h}^{-1}$ ,  $5.1 \text{ l h}^{-1}$ ,  $3.2 \text{ l h}^{-1}$  e  $1.9 \text{ l h}^{-1}$ , respetivamente. Para o período em análise, foi o tratamento B que evidenciou, em média, os maiores valores de transpiração, cerca de  $118.2 \text{ l dia}^{-1}$ , seguido do tratamento C, com valores médios de transpiração de  $84 \text{ l dia}^{-1}$ . O tratamento D, conduzido em sequeiro, apresentou os menores valores de transpiração de cerca de  $55.2 \text{ l dia}^{-1}$ , o que está em concordância com os menores valores de  $g_s$  registados neste tratamento. Simultaneamente, o  $D_a$  apresentou um valor médio para o período considerado de  $3.20 \text{ kPa}$ . O menor

valor, cerca de 1.54 kPa, registou-se no dia 3 de julho e o maior valor, cerca de 4.70 kPa, ocorreu no dia 11 de julho. É ainda de referir que o déficit de pressão de vapor cresceu durante a manhã e atingiu os maiores valores entre as 15:00 e as 18:00 GMT. Acresce que as condições climáticas foram de céu limpo, com valores médios de máxima radiação líquida a atingir os  $614 \text{ w m}^{-2}$ , entre as 12 e 14 horas.

A Figura 3.8 mostra que o padrão diurno de comportamento da transpiração seguiu aproximadamente a evolução diurna do déficit de pressão de vapor, o que indicia que, em termos sazonais, a transpiração foi fortemente condicionada pelo poder evaporativo da atmosfera.

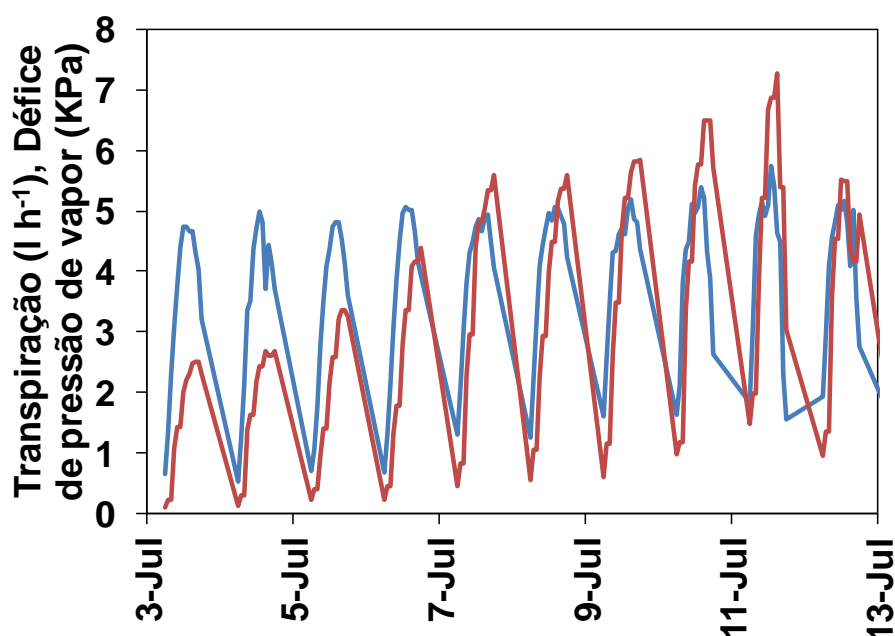


Figura 3.8 - Variação horária no período diurno (6:00 às 18:00 GMT) da transpiração e do déficit de pressão de vapor para o conjunto de medições compreendidas entre 3 de julho e 13 de julho de 2006 no tratamento A. — transpiração; — déficit de pressão de vapor.

Quando se analisa a evolução diurna da transpiração e da condutância estomática para o período compreendido entre 3 de julho e 13 de julho (Figura 3.9), verifica-se que há um desfasamento temporal entre as horas em que se registam os maiores valores de condutância estomáticas e de transpiração. O espaço de tempo em que ocorre o maior valor diário de condutância estomática e o máximo valor diário de transpiração é de 7 a 8 horas.

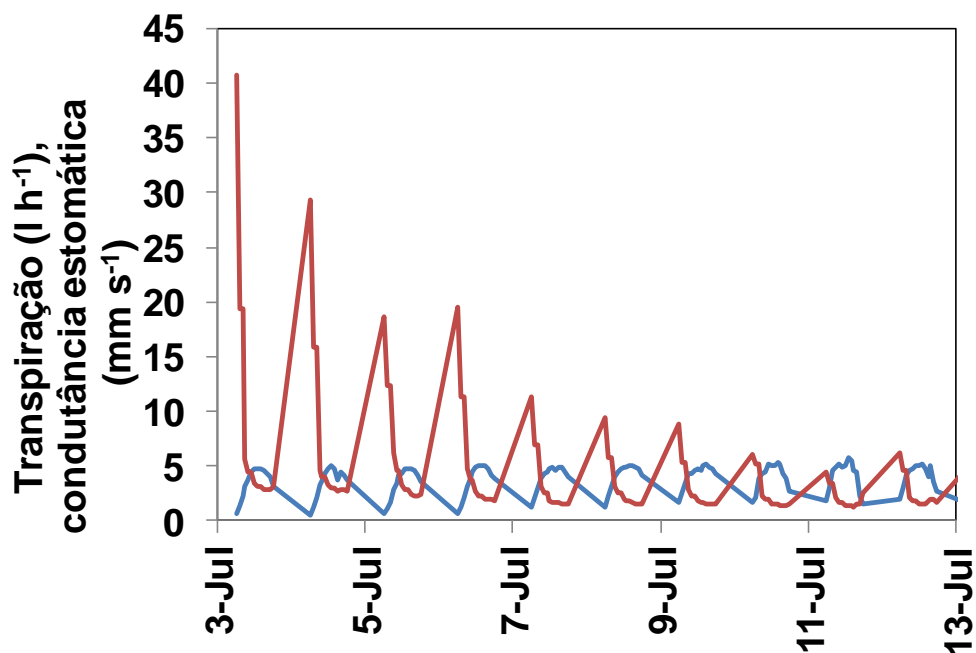


Figura 3.9 - Variação horária no período diurno (6:00 às 18:00 GMT) da transpiração e da condutância estomática para o conjunto de medições compreendidas entre 3 de julho e 13 de julho de 2006 no tratamento A. — transpiração; — condutância estomática.

Em síntese, poderá salientar-se que os maiores valores de transpiração ocorrem como resultado de um déficit de pressão de vapor elevado, ainda que os valores de  $g_s$  sejam baixos nesse período do dia. Este comportamento foi igualmente identificado por Bacelar (2006), quando acompanhou as cinéticas diárias da condutância estomática, déficit de pressão de vapor e transpiração em cinco cultivares.

### 3.3.4. Coeficiente cultural e coeficiente de stress hídrico

A falta de informação relativamente aos valores do coeficiente cultural ( $K_c$ ) da oliveira, a grande incerteza do seu valor em olivais de baixa densidade situados na margem esquerda do Guadiana e a variabilidade deste coeficiente em função da transpiração e da evaporação do solo foram factores que justificaram a necessidade de estabelecer localmente os valores de  $K_c$ .

O Quadro 3.4 apresenta os valores de  $K_c$ , resultantes da razão  $T/ET_0$ , para os 4 tratamentos definidos: A e B, ambos em situação de conforto hídrico e C e D em situação de déficit hídrico. Os maiores valores de  $K_c$  ocorreram no tratamento B e durante a primavera (março e abril), quando o solo ainda se apresentava bem abastecido de água em resultado das chuvas de inverno. No decorrer da primavera e durante o verão, os valores de  $K_c$ , em todos os tratamentos, caíram consideravelmente e atingiram os menores valores entre os meses de julho e agosto. Este decréscimo associado à diminuição do potencial hídrico foliar e a condutância estomática são mecanismos de sobrevivência da oliveira às altas temperaturas associadas a elevadas radiações e baixos valores de humidade atmosférica. No outono, época em que ocorre a acumulação de azeite nos frutos, os valores de  $K_c$  cresceram novamente.

Uma análise mais detalhada do Quadro 3.4 revela que os valores de  $K_c$ , no tratamento A, apresentaram um valor médio de 0.72 com os maiores valores a ocorrerem nos meses de abril e setembro. Nos meses de verão, os valores de  $K_c$  decresceram para 0.60, ainda que os equipamentos de monitorização do solo indicassem que as árvores permaneciam em conforto hídrico (vd. Quadro 2.9). Tal facto sugere que o comportamento de  $K_c$  está dependente dos mecanismos fisiológicos da própria espécie que limita a taxa de transpiração por fecho estomático quando as condições meteorológicas são mais adversas. Considera-se pertinente referir que, aplicações de água conducentes à rega plena, 100%  $ET_c$ , originam subaproveitamento de água e consequentes perdas de água por percolação, uma vez a razão  $T/ET_0$  é bastante inferior a 1.

O tratamento B manteve, durante o verão, valores de  $T/ET_0$  superiores aos do tratamento A com menores quantidades de água aplicadas o que é indicador de uma maior eficiência da água aplicada. A estratégia de rega definida para o tratamento C levou a que os valores da razão  $T/ET_0$  se aproximassem dos obtidos nos tratamentos A e B até ao mês de julho e que nos meses de agosto e setembro decrescessem consideravelmente como resultado de um decréscimo da taxa de transpiração, como se confirma na Figura 3.4c. No mês de outubro, os valores da razão  $T/ET_0$  cresceram nos tratamentos C e D o que indica aqui um acréscimo mais do que proporcional da transpiração relativamente à  $ET_0$ , o que reitera a importância de regar, caso as



chuvas outonais venham tardiamente ou sejam praticamente inexistentes, de modo a garantir o desenvolvimento do fruto e a síntese de azeite.

Quadro 3.4 - Valores mensais de  $K_c$  resultantes da razão  $T/ET_0$  entre a transpiração do agregado estimada para os quatro tratamentos ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) e os valores da evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) determinados pelo método de Penman-Monteith.

Período do ano (mês)	Tratamentos			
	A	B	C	D
mar	0.75	0.92	0.88	0.65
abr	0.80	1.02	1.03	0.59
mai	0.69	0.73	0.88	0.40
jun	0.61	0.70	0.67	0.46
jul	0.60	0.74	0.57	0.39
ago	0.67	0.84	0.44	0.37
set	0.91	1.01	0.39	0.49
out	NA*	NA	1.04	0.70

\* não avaliado.

O Quadro 3.5 mostra os valores do coeficiente de stress ( $K_s$ ) estimados para as árvores dos tratamentos C e D, em situação de rega deficitária e em sequeiro, respetivamente. Para adequar o  $K_c$  às condições hídricas de rega deficitária, utiliza-se o  $K_s$  definido por Allen *et al.* (1998). Os valores de  $K_s$  apresentados no Quadro 3.5 foram obtidos por comparação entre a razão transpiração atual e a evapotranspiração de referência ( $T_a/ET_0$ ), estimada para os tratamentos C e D e a razão  $T/ET_0$  estimada para o tratamento B.

Pela análise do Quadro 3.5, destaca-se que no tratamento C os valores de  $K_s$  foram iguais ou ligeiramente inferiores a 1 nos meses de março, abril, junho e outubro, sendo superiores a 1 no mês maio, indiciando que as taxas de transpiração das árvores do tratamento C foram muito semelhantes às taxas de

transpiração do tratamento B. Porém, durante o verão, os valores de  $K_s$  decresceram e, no mês de setembro, caíram para 0.39. No tratamento conduzido em sequeiro, tratamento D, os valores de  $K_s$ , apesar de inferiores ao do tratamento C, apresentaram-se de forma similar superiores no outono e primavera e inferiores no verão. A evolução dos valores de  $K_s$  deixa perceber que este parâmetro tem um comportamento bifásico durante uma primeira fase, compreendida entre o outono e a primavera, a taxa de transpiração atual das árvores aproxima-se da taxa de transpiração potencial; numa segunda fase, que corresponde ao verão, a taxa de transpiração atual das árvores é bastante inferior à taxa de transpiração potencial assumindo-se assim como proporcional à disponibilidade de água no solo.

Quadro 3.5 - Valores mensais de  $K_s$  para o tratamento C, RDI, e para o tratamento D, conduzido em sequeiro, estimados por comparação entre a razão  $T_d/ET_0$  para cada um dos tratamentos e a razão  $T/ET_0$  para o tratamento B.

Mês	Coeficiente de stress ( $K_s$ )							
	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out
Tratamento C	0.96	1.00	1.20	0.96	0.77	0.52	0.39	1.00
Tratamento D	0.70	0.59	0.55	0.66	0.53	0.44	0.49	0.70

No Quadro 3.6 estabelece-se a comparação entre os valores mensais de  $K_c$  dos tratamentos A e B e os determinados noutros olivais situados em Sevilha e Córdoba, verificando-se que os valores de  $K_c$  obtidos nos tratamentos A e B estão próximos dos obtidos por Fernández *et al.* (2006a), num olival de 15 anos com um compasso de 7 x 5 m situado em Sevilha e dos obtidos por Testi *et al.* (2006a), num olival tradicional com 100 árvores ha<sup>-1</sup> situado em Córdoba. Constata-se ainda que os valores de  $K_c$  obtidos por Pastor e Orgaz (1994), posteriormente corrigidos por Orgaz e Fereres (2001), são inferiores.

Quadro 3.6 - Comparação entre os valores mensais de  $K_c$  obtidos em vários estudos efetuados no sul de Espanha e os obtidos na região de Moura por Ramos e Santos (2009).

Autor	Local	Valores de $K_c$							
		Período do ano							
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out
Pastor e Orgaz (1994)	Córdoba	0,65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.45	0.55	0.60
Orgaz e Fereres (2001)	Córdoba	0.65	0.60	0.55	0.55	0.50	0.50	0.55	0.60
Testi <i>et al.</i> (2006a)	Córdoba	0.74	0.70	0.66	0.60	0.60	0.52	0.60	0.86
Fernández <i>et al.</i> (2006a)	Sevilha	0.88	0.84	0.76	0.70	0.63	0.63	0.72	0.77
Ramos e Santos (2009)	Moura	0.75	0.80	0.69	0.61	0.60	0.67	0.91	NA
	Moura	0.93	1.02	0.73	0.70	0.74	0.84	1.01	NA

### 3.4. Conclusão

Ao longo deste capítulo, foram apresentados e discutidos resultados relativos à construção de um padrão de transpiração generalizado à parcela, utilizando como matriz os valores de transpiração avaliados pela técnica do impulso de calor em árvores individuais; apresentou-se uma proposta de estimativa da condutância estomática e relacionou-se os valores estimados com variáveis ambientais; estimou-se os valores de  $K_c$  parâmetro de grande

importância na calendarização da rega. A informação tratada e analisada no presente capítulo permite as seguintes conclusões:

- (1) A análise estatística comprova que as árvores que constituem o agregado do tratamento B registaram a maior dinâmica de fluxo de seiva e transpiração, levando a crer que a rega deficitária imposta por este tratamento é a mais adequada para o olival tradicional na margem esquerda do Guadiana. Resultados do tratamento A levam a concluir que a rega, dita plena, não é de todo a melhor estratégia de rega para esses olivais;
- (2) A avaliação da transpiração através da monitorização de árvores individuais de uma maneira geral subestima a transpiração;
- (3) Os mecanismos de resistência da oliveira às condições ambientais adversas são observáveis pela redução parcial da abertura dos estomas, evidenciando a sua dependência em relação ao limiar de défice de pressão;
- (4) O indicador de stress hídrico, condutância estomática, é mais sensível às pequenas variações de água do solo do que a transpiração;
- (5) Os valores de  $K_c$  determinados para a margem esquerda do Guadiana indicam que os valores até então usados (Andaluzia) serão inferiores aos valores reais deste coeficiente e, por conseguinte, conduzem a aplicações de água inferiores às necessidades reais da cultura nesse local.

A informação apresentada neste capítulo é ainda complementada com os resultados obtidos e descritos no artigo 2:

Ramos, A.F. & Santos, F.L. (2009). **Water use, transpiration, and crop coefficients for olives (cv. Cordovil), grown in orchards in Southern Portugal.** *biosystems engineering* 102: 321–333

### **3.5. Artigo 2**

---



ELSEVIER

Available at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)journal homepage: [www.elsevier.com/locate/issn/15375110](http://www.elsevier.com/locate/issn/15375110)

## Research Paper: SW—Soil and Water

# Water use, transpiration, and crop coefficients for olives (cv. Cordovil), grown in orchards in Southern Portugal

Alice F. Ramos, Francisco L. Santos\*

Instituto de Ciências Agrárias Mediterrânicas, University of Évora, Évora, Portugal

### ARTICLE INFO

Article history: Received  
21 September 2008  
Received in revised form  
17 November 2008  
Accepted 9 December 2008

To improve the scheduling of irrigation for low-density olive trees (*Olea europaea* L.) grown in a typical Mediterranean environment of Southern Portugal, and to clarify the mechanisms of water uptake by trees, transpiration, soil water status and stomatal response to water deficit were measured in an olive orchard. Olive trees of cv. Cordovil were subject to three irrigation treatments: full-rate irrigation, sustained deficit irrigation (SDI) providing for approximately 60% of water applied at full-rate irrigation, and a regulated deficit irrigation (RDI) with water applied at periods during three critical phases: before-flowering, at beginning of pit-hardening, before crop-harvesting to replenish soil moisture to field capacity. There was also a dry-farming treatment. Trees responded differently to summer rainfall and irrigation water: full-rate irrigation, which received 880 mm of irrigation and 240 mm of rainfall, used 704 mm for transpiration; SDI, which received the same amount of rainfall and 448 mm of irrigation water, used 745 mm of water for transpiration; RDI, which received 69 mm of irrigation water and 240 mm of rainfall, used 638 mm of water for tree transpiration; dry-farming, which received no irrigation, benefited from 240 mm of summer and early autumn rain and used 404 mm of water for transpiration. The results support the hypothesis that trees under RDI and dry-farming satisfy most of their early atmospheric evaporative demand by extracting water from outside of the area wetted by drip irrigation. Scaled-up orchard transpiration was used to define orchard crop and water stress coefficients. With full-rate irrigation and SDI the results showed that during summer droughts olive trees slow down their physiological mechanisms to conserve water, regardless of amount applied. The derived crop coefficient results also indicated that SDI was the most appropriate for scheduling the irrigation of cv. Cordovil orchards in Southern Portugal although applying RDI helped sustain orchard transpiration and yields. Irrigation accounted for 11% of total water used in transpiration, with the balance extracted by roots in the large volume of soil lying in the areas between the trees. However, using the RDI scheme to schedule irrigation appears to be appropriate only in wet years with well distributed late summer rainfall or where there is a shortage of farm irrigation water. In general, and particularly in years with no summer and early autumn rains as can often occur in this region, the SDI regime appears to be more appropriate for scheduling irrigation.

© 2008 IAgrE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

\* Corresponding author.

E-mail address: [fls@uevora.pt](mailto:fls@uevora.pt) (F.L. Santos).

1537-5110/\$ – see front matter © 2008 IAgrE. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.12.006



Nomenclature	
$\Delta S$	variation in water storage in the root zone, mm
$A_{cc}$	average canopy area of the trees in the stand, $m^2$
$A_{cm}$	canopy area of the tree where sap flow was measured, $m^2$
$A_{ct}$	total canopy area of the olive tree population, $m^2$
$C_p$	specific heat of air, $1.013 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
$D$	drainage, mm
$D_a$	air vapour pressure deficit, kPa
$EC$	electric conductivity, $\text{dS m}^{-1}$
$ET_0$	FAO-Penman–Monteith potential evapotranspiration, mm
$ET_c$	crop evapotranspiration, mm
$gc$	canopy conductance, $\text{mm h}^{-1}$
$h$	water pressure head, cm
$I$	irrigation water, mm
$J_s$	total sap flow rate, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$
$J_{s\text{stand}}$	total sap flow rate of the stand, $\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$
$kc$	crop coefficient
$ks$	water stress coefficient
$n$	number subscripts
$R$	measured rainfall, mm
$r$	sapwood depth, mm
$R$	trunk radius, mm
$R$	actual soil water content, mm
$REW$	relative extractable water
$R_{max}$	soil water content at field capacity, mm
$R_{min}$	minimum soil water content, mm
$SWA$	total sapwood area, $m^2$
$T$	stand transpiration, $\text{l h}^{-1}$
$T_a$	adjusted transpiration
$T_c$	canopy transpiration, $\text{l s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
$t_{di}$	trunk diameter, m
$t_z$	time elapsed after heat-pulse release, s
$V_n$	average corrected sap flow velocity, $\text{m h}^{-1}$
$X_d$	distance between heater probe and downstream temperature probe, mm
$X_u$	distance between heater probe and upstream temperature probe, mm
$\gamma$	psychrometric constant, $0.0673 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}$
$\Delta t$	time interval, h
$\Delta z$	soil depth interval, cm
$\theta$	soil water content, $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$
$\lambda$	latent heat of vaporisation, $2.45 \text{ MJ}$
$\rho$	density of air, $\text{kg m}^{-3}$
$t_1$	initial time interval, min
$t_2$	final time interval, min
$z_1$	initial depth interval, mm
$z_2$	final depth interval, mm
$K(h)$	hydraulic conductivity, $\text{cm d}^{-1}$
$K_s$	saturated hydraulic conductivity, $\text{cm d}^{-1}$
$\lambda, \alpha, n$	fitting parameter
$K$	timescale duration, seconds or 3600 s for hourly time scales

## 1. Introduction

Olive trees are well adapted to the Mediterranean-type agroecosystems of Southern Portugal and have traditionally been cultivated in areas with no irrigation. According to the latest agricultural census (INE, 1999) the olive tree cultivation area in Portugal is around 335,029 ha, of which 148,402 ha are in the southern province of Alentejo and 37,298 ha in its sub-region of Moura, where the dry-farmed cultivars Cordovil, Verdeal and Galega are traditionally grown in orchards of around 100 trees  $\text{ha}^{-1}$ . The cultivar Cordovil is highly appreciated for its high fruit free fatty acid (oleic acid) content and the fine sensory properties of extracted oil. It is mainly responsible for the seal of quality “Protected Designation of Origin (PDO)” conferred to the olive oil coming from the region (CE, 2006); the result of a balanced blend of 35–40% Cordovil, 15–20% Verdeal and Galega oils. In recent year, because of the growing interest of farmers in increasing the size of their olive orchards to take advantage of the European Commission decision 2000/406/CE (Official Journal L 154, 27/06/2000 P. 0033–0033) to expand the Portuguese olive tree planting quota to 30,000 ha of new orchards, hundreds of drip irrigated high tree-density ( $\geq 300$  trees  $\text{ha}^{-1}$ ) orchards of the cultivar Cobrançosa from north eastern Portugal and of the very high density ( $\geq 1700$  trees  $\text{ha}^{-1}$ ) Spanish cultivar Arbequina have been established in the region. Dry-farmed cv. Cordovil orchards are traditionally widely spaced to take full advantage of the stored water from winter rains for spring and summer

growth and were in the process of being converted to drip irrigation but they are now losing ground to newly introduced non-indigenous cultivars. This change has initiated a regional debate over the role of biodiversity and the preservation of the indigenous olive tree cultivars, the character of the local oil, and the need to increase the water use efficiency and the productivity of the Cordovil cultivar under irrigation (Anon, 2008a,b).

Because of the large range of summer rainfall, microclimate, soils and tree spacing in the olive growing areas, water requirements and the strategies used to irrigate olive trees vary widely. The literature contains few results on the irrigation of traditional, low-density olive orchards. Lavee et al. (1990) already showed that a single complementary irrigation of 75 mm following pit-hardening was effective in doubling olive production and oil yield in old olive trees of cv. Souri, when compared to rain-fed conditions. Pastor et al. (1999) reported an increase in yield in a 80 ha irrigated olive orchard compared to growth under rain-fed conditions, with no differences however between the irrigated treatments. In a low-density olive orchard of 69 trees  $\text{ha}^{-1}$  Moriana et al. (2007) showed that the trees in the water deficit and rain-fed treatments rapidly recovered from water stress after receiving irrigation water or autumn rainwater. They suggest that since recovery from water stress is rapid when irrigation is concentrated in the second half of the summer, this could allow efficient use of water in areas of limited available resources.



The current trend in the irrigation of olive trees is to develop either sustained deficit irrigation (SDI) or regulated deficit irrigation (RDI) strategies, whereby the water is applied at a rate less than the needs of evapotranspiration with only very small reductions in yield (Goldhamer, 1999; Tognetti et al., 2005). SDI applies a fixed fraction of the evapotranspiration rate throughout the irrigation season while RDI imposes a period of water stress that is controlled in terms of its intensity. At the onset of full bloom, which is the most sensitive period for olive trees, water supply should not be halted (Moriana et al., 2007). The second phase of fruit development, when pit-hardening occurs, has been identified as the most resistant to water deficit, which is when water supplies can either be reduced or halted (Goldhamer, 1999). Severe water stress during pit-hardening has been found to only reduce fruit and oil production slightly (Goldhamer et al., 1994; Moriana et al., 2003). The third phase of fruit development and oil accumulation is also very sensitive to water stress (Lavee and Wodner, 1991; Tognetti et al., 2005). The main advantages of RDI are the savings of water, the maintenance of high yields and the effects on olive oil quality. Under conditions of scarce water supply and drought, SDI and RDI irrigation regimes at selected phenological phases can lead to greater economic gains than simply maximising yields per unit of water as shown by Tognetti et al. (2006). However, they cautioned this approach requires precise knowledge of crop responses to water stress at specific physiological stages as drought tolerance varies considerably by genotype and growth stage.

Detailed information on plant water status is therefore essential when planning deficit irrigation practices for olive orchards (Fernández et al., 1997; Tognetti et al., 2006; Sofo et al., 2008). Water use strategies of olive trees are often affected by changes in environmental water status, radiation and temperature. Stomata close slowly as water deficit increases so that the photosynthetic rate can be maintained over a wide range of leaf water potential, and the stomatal response to vapour pressure deficit is attenuated in highly stressed plants (Fernández et al., 1997; Moriana et al., 2003; Moriana et al., 2007).

Both olive water consumption and the dynamics of transpiration and water uptake by main roots can be estimated from sap flow measurements (Fernández, 2006; Ortuño et al., 2006; Intrigliolo and Castel, 2006; Santos et al., 2007). The potential of this indicator for irrigation scheduling in olive was outlined by Fernández et al. (2001), who showed that this plant-based indicator uses the tree as a biosensor which responds to the soil water status, the plant characteristics and the atmosphere demands (Fernández et al., 1998; Green et al., 2003; Fernández, 2006). Tested to examine the robustness of the technique, the compensation heat-pulse method for measuring sap flow was deemed suitable for estimation of the short-time dynamics of transpiration, or changes in the hydraulic behaviour of the trees (Fernández et al., 2001).

Estimation of the transpiration of orchards and their water use on the basis of sap flow measurements in individual trees requires the scaling-up of data. A relationship between sap flow and selected biometric parameters that can be directly measured on trees in the field (Čermák et al., 2004) is often used, with the diameter at breast height or the basal area as

the most commonly used. The biometric parameters must be directly measurable on a number of trees to represent the stand (Goodrich et al., 2000; Čermák et al., 2004; Gazal et al., 2006). Gazal et al. (2006) evaluated cottonwood stand transpiration based on individual tree sap flow, total sapwood area (SWA) and crown area of the cluster.

The aim of the present work was to establish the relationship between orchard olive transpiration from sap flow measurements and soil water status under full, sustained and RDI management, and to understand and improve the irrigation schedules of low-density olive trees of cv. Cordovil grown in typical Mediterranean environment of Southern Portugal. Such responses were used to quantify and predict stomatal conductance and to calculate crop and soil water stress coefficients for the orchard trees. The effect of environmental water status on olive tree stomatal conductance under the different water management was also examined.

## 2. Material and methods

### 2.1. Experiment location, meteorological measurement and irrigation management

The research was conducted during 2006 at the Herdade dos Lameirões located near Safara (lat. 38°04'57"N; long. 07°16'27"W; alt. 75 m), in the region of Moura, Alentejo, Portugal, using an orchard stand of mature olive trees (*Olea europaea* L. cv. Cordovil). The over 80 year-old mature olive orchard was planted on a 12 by 12 m spacing layout and was converted in 2005 from dry-farming to drip irrigation. The trees were treated from mid-March to the end of October 2006 using one of four irrigation treatments: a treatment A with full-rate irrigation of 77 trees to the full soil water holding capacity and continuously replenished, a SDI treatment B with irrigation of 64 trees to provide for approximately 60% of the water applied in treatment A, a RDI or treatment C in which water is applied to the 60 trees only during the three critical phase periods: before-flowering, at beginning of pit-hardening and before crop-harvesting, to provide enough water to replenish the soil moisture to field capacity, and a dry-farming treatment D. Reference evapotranspiration,  $ET_0$  was calculated using the FAO-Penman-Monteith method and the procedures prescribed by Allen et al. (1998). Each tree was supplied with water by a single drip line with emitters spaced 1 m apart throughout the entire length of the emitter line placed at the soil surface and laid out along each tree row and serviced by twelve  $3.6 \text{ l h}^{-1}$  emitters.

Weather data and rainfall events were collected by an automatic meteorological station placed within a few hundred metres from the olive orchard. Hourly averages of the meteorological parameters, wind speed, air temperature, solar radiation, precipitation and relative humidity were recorded and evaluated. Half-hour averages of the net radiation above the canopy of the trees were measured using one NrLite net radiometer (Kipp & Konen, Holland) connected to a data logger (Campbell CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA).



## 2.2. Sap flow measurements

To evaluate sap flow rates and transpiration, a representative tree in each treatment was selected and implanted with heat-pulse probes. Using the compensation heat-pulse technique (CHP) described in Green and Clothier (1988), Green *et al.* (2003) and Santos *et al.* (2007), sets of one heat source and two temperature probes were implanted in each sample tree at three different positions around the trunk. Sap flow measurements were taken at 30 min intervals during 8 months from March to end of October 2006 and tree transpiration rates were estimated as average sap flow rates of the three probes. Recorded sap flows were corrected for probe-induced wounding effects in the stem that cause disruption of xylem tissue near the probes.

## 2.3. Leaf area index and plant measurements

The leaf area index (LAI) was measured using a Digital Plant Canopy Imager CI-110 (CID, Inc., WA, USA). The trees chosen for LAI measurements were also monitored with sap flow probes. They came from a sample of 11 randomly chosen trees in each treatment.

Four images were taken from each tree canopy in opposite directions and the CI-110 software was used to determine the LAI for each tree considering the average of the four images taken.

## 2.4. Stomatal conductance estimates from sap flow measurements

Previous works of Santos *et al.* (2007) have shown that a noticeable decrease in measured olive tree sap flow rates occurs only when there is a considerable reduction in the soil water content. This indicates that transpiration rates of olive trees recently converted to irrigation are not sensitive to small variations in soil water content as the tree is still capable of extracting water from the soil and maintaining “normal” transpiration rates even under very low soil water contents. Stomatal conductance has been identified as a more sensitive indicator of olive tree water status (Fernández *et al.*, 1997; Moriana *et al.*, 2003; Tognetti *et al.*, 2006; Moriana *et al.*, 2007). Using the methods of Yunusa *et al.* (2008a,b) and sap flow measurements, the hourly stomatal conductance for the sampled trees for each treatment was calculated. The procedure described below to estimate stomatal conductance depends on local meteorological variables, measured sap flow and tree canopy variables.

Transpiration from the olive canopy,  $T_c$  can be calculated (Yunusa *et al.*, 2008b) using

$$T_c = \frac{(\rho \cdot C_p / \gamma) \cdot Da \cdot g_c}{\lambda} \quad (1)$$

where  $\rho$  is density of air ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  the specific heat of air ( $1.013 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $\gamma$  psychrometric constant ( $0.0673 \text{ kPa }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $Da$  is the vapour pressure deficit (kPa),  $\lambda$  is the latent heat of vaporisation ( $2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$ ),  $g_c$  is the canopy conductance and  $K$  is the timescale duration under consideration, which is daylight hours in seconds for the daily, or 3600 s for hourly, time scales. Assuming that canopy transpiration  $T_c$  ( $\text{ls}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ) is equivalent to our measured sap flow for each

tree, and that the vapour pressure deficit  $Da$  (kPa) and the density of air,  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) can be determined locally from meteorological measurements, the canopy conductance,  $g_c$  can be expressed as function of transpiration  $T_c$ . Inverting Eq. (1),  $g_c$  was estimated from the sap flow results in each sampled tree as

$$g_c = \frac{T_c \cdot \lambda}{(\rho \cdot C_p / \gamma) \cdot Da K} \quad (2)$$

Eq. (2) is an approximation of  $g_c$  that applies when transpiration is strongly coupled to atmospheric conditions. These are appropriate assumptions for trees with relatively open canopies and under water supply as in the present study, and have been effectively used in a variety of vegetative types (McNughton and Jarvis, 1983; Fernández *et al.*, 1997; Ewers and Oren, 2000). Yunusa *et al.* (2008a) provide good comparison between measured and calculated  $g_s$  under varying micrometeorological conditions. It presumes that  $Da$  in the bulk air above the canopy is the driving force for stand transpiration  $T_c$ , and that leaves are at the same temperature as the bulk air over the canopy. The term  $T_c / Da$  taken as the ratio of stand water flux to vapour pressure deficit is an indicator of the degree of stomatal opening at a given value of  $Da$  (Phillips and Oren, 1998; Ewers and Oren, 2000).

To replace the sap flow measurements in the canopy transpiration  $T_c$  variable in Eq. (2) the sap flow rate units were converted from  $\text{lh}^{-1}$  to  $\text{ls}^{-1} \text{ m}^{-2}$  by dividing the sap flow rate of each tree by its canopy area. The deficit vapour pressure  $Da$  (kPa) was computed hourly using the data from the local automatic meteorological station and the procedures described in Allen *et al.* (1998). Finally, stomatal conductance  $g_s$  for a given canopy conductance was estimated considering  $g_c$  as in Yunusa *et al.* (2008a) the product of LAI and stomatal conductance, knowing that olives are hypostomatous.

## 2.5. Scaling of the sap flow and estimation of orchard transpiration

Olive orchard water uptake can be expressed as crop evapotranspiration, accounting for total water consumption by transpiration and soil evaporation, or solely as transpiration. This poses a problem because each treatment would require the monitoring of a large number of trees. A scaling-up process to achieve estimates of stand-level transpiration from individually sampled trees is often the only solution. To evaluate stand-level transpiration rates from measurements of individual-independent trees, the scaling method proposed in Gazal *et al.* (2006) was implemented. Stand transpiration  $T$  for each treatment was calculated based on individual tree sap flow, SWA, and the total canopy area of the tree plot. The total canopy area of the population of trees in each treatment was estimated from the average values taken from a sample of 11 randomly chosen trees. Table 1 presents the structural characteristics of the olive tree orchard (or stand), the computed total sapwood and canopy area of each treatment.

The SWA of all trees in the stand was determined considering a set of nine randomly chosen trees of different



**Table 1 – Structural characteristics of the olive tree orchard (stand), computed total SWA, m<sup>2</sup> and canopy area for each treatment**

Measured trees						Tree stand structural characteristics				
Treatment	Average trunk diameter, m	SWA, m <sup>2</sup>	Canopy area, m <sup>2</sup> tree <sup>-1</sup>	Trees	LAI	Average trunk diameter, m	Average SWA, m <sup>2</sup>	Total SWA, m <sup>2</sup>	Average canopy area, m <sup>2</sup> tree <sup>-1</sup>	Total canopy area, m <sup>2</sup>
A	0.40	0.055	27.34	77	1.187	0.39	0.058	4.56	17.44	1360.35
B	0.33	0.058	32.17	64	1.099	0.48	0.074	4.71	25.67	1643.19
C	0.50	0.077	40.15	60	1.101	0.46	0.070	4.21	21.15	1269.29
Dry-farmed	0.44	0.072	28.27	67	1.100	0.48	0.075	5.00	21.16	1417.51

trunk diameters where a linear relationship was observed between trunk diameter and the sapwood area, thus a linear equation was established defining SWA in m<sup>2</sup> as a function of the trunk diameter,  $t_{di}$  in m using

$$SWA = 0.1702t_{di} - 0.0076 \quad (3)$$

Each sampled tree equipped with sap flow probes had across its sapwood radial profile three probes with four thermocouple sensors each placed at 5, 12, 21 and 35 mm depth. Considering the average of the three probes in each tree, the total sap flow  $J_s$  was computed as

$$J_s = V_1SWA_1 + V_2SWA_2 + V_3SWA_3 + V_4SWA_4 \quad (4)$$

where  $J_s$  is the total sap flow rate in m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>;  $V_n$  is the average corrected sap flow velocity at thermocouple sensor  $n$  in m h<sup>-1</sup>;  $SWA_n$  is the sapwood area corresponding to the thermocouple sensor  $n$  in m<sup>2</sup> and  $n$  is the number subscripts at the four thermocouple sensor positions. The total sap flow rate of the stand  $J_{s_{stand}}$  in m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> in each treatment was divided by the SWA of the measured tree and multiplied by the SWA of the tree stand,  $SWA_{stand}$

$$J_{s_{stand}} = (J_s/SWA)SWA_{stand} \quad (5)$$

To determine the transpiration  $T$  in l h<sup>-1</sup> of a hypothetical tree representing the average of the population in each treatment, the total sap flow of the stand  $J_{s_{stand}}$  in m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> was multiplied by 1000 to convert it to l h<sup>-1</sup>, then divided by the canopy area  $A_{cm}$  in m<sup>2</sup> of the tree where sap flow was measured, and then multiplied by the average canopy area of the trees in the stand  $A_{cs}$  in m<sup>2</sup>. Thus,

$$T = (1000 J_{s_{stand}}) (A_{cs}/A_{cm}) \quad (6)$$

The daily transpiration  $T$  in l day<sup>-1</sup> was then determined by averaging and integrating in time the 30 min-interval measurements provided by the sap flow probes, consisting in a total of 48 measurements per day.

$$T = \sum_{n=1}^{47} \left( 0.5 \left( \frac{T_n + T_{n+1}}{2} \right) \right) \quad (7)$$

The daily transpiration  $T$  in l day<sup>-1</sup> was converted to ground-area based transpiration  $T$  in mm day<sup>-1</sup> dividing  $T$  by the total canopy area of the olive tree population  $A_{ct}$  in m<sup>2</sup>

$$T(\text{mm day}^{-1}) = T(\text{l day}^{-1})/A_{ct} \quad (8)$$

## 2.6. Soil water measurements and crop evapotranspiration

To evaluate soil moisture status in the 0.66 m diameter wetted areas produced by each of the twelve 3.6 l h<sup>-1</sup> emitters spaced 1 m apart in the 12 by 12 m tree layout and along the emitter line of the irrigation treatment, sets of Profile Probe-PR1 (Delta T Devices Ltd, Cambridge, UK) soil water content sensors were installed near the trunk of two representative trees in each treatment and at various depths into the soil. The profile probe sensors were placed in the wet areas around the tress located 1 and 3 m from the tree trunk along the tree drip line at depths of 0.10, 0.20, 0.30 and 0.40 m. Soil samples taken in the olive orchard indicate a clay soil at 0.45 m with a silt loam below and with a non-uniform and restrictive layer of very compact limestone and schist underneath which prevented the deeper placement of sensors. The average apparent bulk soil density was 1.58 Mg m<sup>-3</sup>. Volumetric soil water content at field capacity (i.e. at -0.03 MPa) was 0.36 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> in the top layer and 0.34 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> in the root zone, whereas it was 0.27 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> in the top layer and 0.24 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> in the root zone at wilting point (i.e. at -1.5 MPa).

Crop evapotranspiration,  $ET_c$  in mm was obtained from the soil water balance in the root zone using the following equation defined for a given time  $\Delta t$  as

$$ET_c = R + I - D \pm \Delta S \quad (9)$$

where  $\Delta S$  is the variation in water storage in the root zone in mm;  $R$  is the measured rainfall in mm;  $I$  is the irrigation amount in mm;  $D$  is the drainage in mm. A negligible water runoff from irrigation was recorded. The variation in water storage  $\Delta S$  between 0 and 0.45 m depth and within a time interval  $\Delta t$  was obtained using Eq. (10).

$$\Delta S = \int_{z_1}^{z_2} \theta(z, t_1) dz - \int_{z_1}^{z_2} \theta(z, t_2) dz \quad (10)$$

where  $z_1$  is the initial depth interval in mm;  $z_2$  is the final depth interval in mm;  $t_1$  is the initial time interval in min and  $t_2$  is the final time interval in min. Drainage below the root zone required for Eq. (9) was estimated using Eq. (11), where  $K(h)$  is the hydraulic conductivity in cm d<sup>-1</sup> at the corresponding water pressure head  $h$  of the soil layer.

$$D = K(h) \frac{\Delta(h+z)}{\Delta z} \Delta t \quad (11)$$

The unsaturated hydraulic conductivity  $K(h)$  of Eq. (11) was estimated using Eq. (12) (van Genuchten, 1980)



$$K(h) = K_s \frac{\left( (1 + (\alpha h)^n)^{1-1/n} - (\alpha h)^{n-1} \right)^2}{(1 + (\alpha h)^n)^{(1-1/n)(\lambda+2)}} \quad (12)$$

where  $K_s$  is the saturated hydraulic conductivity in  $\text{cm d}^{-1}$ ,  $h$  is the water pressure head in cm at which  $K(h)$  is being calculated and  $\lambda$ ,  $\alpha$  and  $n$  are fitting parameters. More details on procedure, soil characteristics and associated soil parameters were given by Santos et al. (2007) and Fares and Alva (2000).

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Irrigation and orchard transpiration

In 2006 the summer distribution of rainfall was highly favourable for growing trees (Table 2), with frequent light rains during the usually dry summer months and considerable rainfall in September, when olives in the final stage of maturation and oil accumulation need irrigation or rainfall (Moriana et al., 2007). Treatment A received 880 mm of irrigation from mid-March through to October (Table 2) to provide for adequate water in the soil profile, satisfying the atmospheric water demand of the trees. A sustained deficit was induced to treatment B which received 448 mm of irrigation water. The regulated deficit scheduled for treatment C was only accomplished before-flowering, when 29.1 mm of water was applied between April 29 and May 26 and at beginning of pit-hardening, when 33.4 mm of water was applied on July 3rd for a week thereby raising the soil moisture to field capacity. Early autumn rains in September and October, just before crop-harvesting, precluded the need to provide for the scheduled irrigation before crop-harvesting. The dry-farming treatment D received no irrigation water and fortunate to receive 240 mm of well distributed summer rainfall and early and abundant autumn rains.

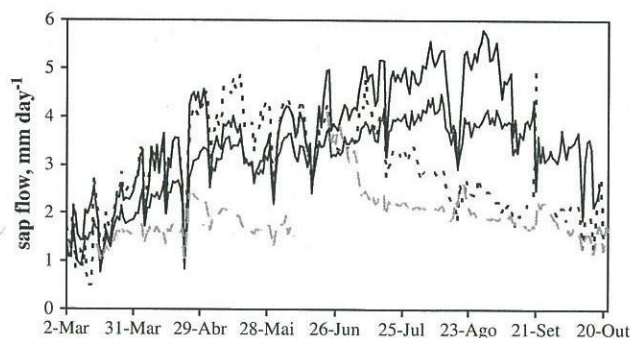
The daily total sap flow of olive stand orchards at the experimental site (Fig. 1) reflected the structural characteristics

of the tree cluster in each treatment (Table 1) and the irrigation regime imposed. Table 3 shows the accumulative orchard transpiration values for each treatment, with a total of 704 mm for treatment A, 745 mm for treatment B, 638 mm for treatment C and 404 mm for treatment D. They were higher for treatment B and noticeably different from values of treatment A which received approximately 40% more water throughout the growing season. A marked decline in sap flow values for treatment C was observed during the peak of summer drought following the irrigation events in July. However, the application of 29.1 mm of water in May and 33.4 mm in July sustained sap flow at substantially higher rates than the observed for treatment D, whose values stayed low throughout the irrigation season. Individual monitored tree transpiration values were 657 mm for treatment A, 599 mm for treatment B, 726 mm for treatment C and 373 mm for treatment D.

The trees responded differently to the summer rainfall and the irrigation water. Treatment A that received 880 mm of irrigation and 240 mm of rainfall only needed to mobilise 63% of that total for the total growing seasonal transpiration of trees. Treatment B, which received the same rainfall as treatment A but 51% of its irrigation water, was able to extract and use 745 mm of water from the soil. The sparse but well distributed summer rainfall and the early rains of September and October helped to maintain and stabilise the transpiration rates of treatment C during the irrigation period. Receiving only 69 mm of irrigation water and 240 mm of rainfall, treatment C was able to mobilise and use a total of 638 mm of water for tree transpiration, 106% more water than the combined amount supplied with irrigation and rainfall. Some features of the olive root system, as observed by Fernández et al. (1991, 1994), give it a high adaptability to water stress conditions and the capability to explore large volumes of soil for water. Sofó et al. (2008) also report that olive plants subjected to water deficit can lower the water content and potential of their tissues, thereby establishing a particularly high potential gradient between leaves and roots, stopping canopy growth but not photosynthetic activity and transpiration. Differences in the structural characteristics of the trees (Table 1) monitored in treatment C, including tree diameter and canopy area, may explain the differences observed in the transpiration when compared with treatments A and B.

**Table 2 – Accumulated values of rainfall, reference evapotranspiration  $ET_0$ , and applied irrigation for each treatment, during 2006**

Start	End	$ET_0$ , mm	Rainfall, mm	Irrigation, mm		
				A	B	C
18-Mar	31-Mar	33.5	44.4	4.7	2.4	3.2
01-Apr	15-Apr	45.0	19.9	4.7	2.4	3.2
16-Apr	28-Apr	41.4	9.8	15.8	8.1	0.0
29-Apr	12-May	58.6	0.0	33.2	16.5	22.6
13-May	26-May	73.0	0.5	42.7	21.8	6.5
27-May	09-Jun	79.0	0.0	47.4	24.2	0.0
10-Jun	24-Jun	79.0	49.2	39.5	20.1	0.0
25-Jun	06-Jul	69.8	0.0	44.2	22.6	22.6
07-Jul	19-Jul	82.3	11.5	79.0	40.3	10.8
20-Jul	03-Aug	97.3	0.0	113.8	58.0	0.0
04-Aug	17-Aug	84.6	13.1	110.6	56.4	0.0
18-Aug	09-Sep	124.7	2.3	178.6	91.0	0.0
10-Sep	25-Sep	61.7	22.2	75.8	38.7	0.0
26-Sep	20-Oct	72.2	67.5	90.1	45.9	0.0
Totals		1002.1	240.4	880.1	448.4	68.9



**Fig. 1 – Sap flow ( $\text{mm day}^{-1}$ ) for each treatment after scaling the results to orchard-level average conditions: treatment A, —; treatment B, - -; treatment C, . . .; dry-farming, - . - .**



**Table 3 – Stand transpiration estimated from sap flow scaling method to replicate the transpiration from a hypothetical olive tree representative of the average structural characteristics of the cluster for each treatment**

2006		Stand transpiration, mm			
Start	End	Treatment			
		A	B	C	Dry-farming
18-Mar	31-Mar	24.0	28.6	31.4	20.6
1-Apr	15-Apr	33.6	43.2	44.6	24.4
16-Apr	28-Apr	32.9	43.8	42.3	24.4
29-Apr	12-May	44.8	51.5	57.7	28.5
13-May	26-May	43.6	45.5	57.3	24.3
27-May	9-Jun	46.0	50.8	55.2	22.1
10-Jun	24-Jun	48.9	57.1	54.3	12.3
25-Jun	6-Jul	40.8	48.8	41.6	40.4
7-Jul	19-Jul	48.7	61.1	50.7	30.1
20-Jul	3-Aug	55.1	67.2	44.9	30.3
4-Aug	17-Aug	56.1	67.7	37.3	29.0
18-Aug	9-Sep	87.9	115.6	54.2	46.8
10-Sep	25-Sep	56.5	64.3	23.2	29.7
26-Sep	20-Oct	84.8	N/A	43.4	40.6
	Totals	703.6	745.3	638.0	403.5

The dry-farmed treatment D also benefited from summer and early autumn rains enabling it to mobilise and use 404 mm of water for transpiration when rainfall accounted for only 240 mm.

### 3.2. Olive tree water balance and consumptive use

Table 4 shows the tree evapotranspiration  $ET_c$  rates estimated from the soil water balance for treatment A. The daily transpiration rates from sap flow measurements and the daily applied irrigation rates are also included. Table 5 presents

similar values obtained for treatment B and similar data for treatment C are shown in Table 6.

According to the prescribed water application, treatment A trees received continuous irrigation water throughout the season, with daily rates increasing gradually up to 7.9 mm in August. Initially, by taking advantage of winter water stored in the soil, the trees were able to maintain transpiration rates above the applied irrigation rate until May 12. The irrigation rates were lower than the transpiration rate values until May 12 probably because the profile probe sensors are unable to capture the dynamics of tree root-water extraction outside the wet area of the drip irrigation emitters, particularly when the surrounding soil moisture is high and is available for crops. The sensors work considerably better when irrigation becomes the main source of water for the sampled soil volume and the surrounding soil moisture is low. This was demonstrated from May 19 to the end of September when there was a closer match between  $ET_c$  and the irrigation applied. As indicated earlier, in response to atmospheric water demand, the trees were able to maintain transpiration rates above the applied irrigation rate until May 12. Thereafter, the transpiration rates closely matched the irrigation water applied until June 6 when they began to slowly decline despite the amounts of applied water. The T to I ratio approached 0.5 at the end of July and this dropped to 0.48 in August and to 0.47 in September. This suggests that an excess of irrigation water was applied in this treatment, and from the end of June onwards water was lost by soil evaporation. After June 26,  $ET_c$  to I ratios of 1.0, or slightly higher, confirm the daily average of 3.7–4.0 mm of water consumed by soil evaporation during this period. The sustained high level of relative extractable water (REW) during the course of irrigation season (0.99–0.89) also indicates that water was lost by soil evaporation. REW was calculated as

$$REW = (R - R_{min}) / (R_{max} - R_{min}) \quad (13)$$

**Table 4 – Crop tree transpiration estimated during year 2006 from sap flow measurements for the mature olive tree under full-rate irrigation (treatment A) during the period considered and corresponding crop evapotranspiration  $ET_c$  rates per tree estimated from soil water balance using the Delta T PR1 soil moisture sensor probe placed in the wet bulb developed by drip irrigation emitters**

Date interval		Mature olive tree treatment A (canopy area = 27.34 m <sup>2</sup> )			
Start	End	Transpiration from sap flow rates, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	$ET_c$ from soil water balance with profile probe, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Daily average irrigation, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	REW
18-03-2006	31-03-2006	1.6	0.9	0.34	0.86
01-04-2006	15-04-2006	2.1	0.8	0.32	0.82
16-04-2006	28-04-2006	2.4	0.8	1.21	0.82
29-04-2006	12-05-2006	3.0	2.4	2.37	0.88
13-05-2006	26-05-2006	3.0	3.3	3.05	0.92
27-05-2006	09-06-2006	3.1	3.0	3.39	0.92
10-06-2006	24-06-2006	3.1	3.1	2.63	0.92
25-06-2006	06-07-2006	3.2	3.8	3.69	0.88
07-07-2006	19-07-2006	3.6	5.6	6.08	0.87
20-07-2006	03-08-2006	3.8	7.9	7.59	0.90
04-08-2006	17-08-2006	3.8	8.0	7.90	0.95
18-08-2006	09-09-2006	3.7	7.7	7.76	0.98

REW corresponds to the average REW in the wet bulb.



**Table 5 – Crop tree transpiration estimated during year 2006 from sap flow measurements for the mature olive tree under full irrigation (treatment B) during the period considered and corresponding crop evapotranspiration  $ET_c$  rates per tree estimated from soil water balance using the Delta T PR1 soil moisture sensor probe placed in the wet bulb developed by drip irrigation emitters**

Date interval		Mature olive tree treatment B (canopy area = 32.17 m <sup>2</sup> )			
Start	End	Transpiration from sap flow rates, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	$ET_c$ from soil water balance with profile probe, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Daily average irrigation, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	REW
18-03-2006	31-03-2006	1.6	0.6	0.17	0.89
01-04-2006	15-04-2006	2.2	0.5	0.16	0.82
16-04-2006	28-04-2006	2.6	0.5	0.62	0.82
29-04-2006	12-05-2006	2.8	1.1	1.18	0.76
13-05-2006	26-05-2006	2.5	1.6	1.55	0.84
27-05-2006	09-06-2006	2.8	1.7	1.72	0.88
10-06-2006	24-06-2006	2.9	1.7	1.34	0.85
25-06-2006	06-07-2006	3.1	2.0	1.88	0.83
07-07-2006	19-07-2006	3.6	2.9	3.10	0.76
20-07-2006	03-08-2006	3.7	4.0	3.87	0.91
04-08-2006	17-08-2006	3.7	4.0	4.03	0.79
18-08-2006	09-09-2006	3.9	4.0	3.96	0.87

REW corresponds to the average REW in the wet bulb.

where  $R$  is the actual soil water content, mm;  $R_{min}$  is the minimum soil water content measured during the experiment, mm;  $R_{max}$  is the soil water content at field capacity, mm.

In contrast, treatment B maintained the same rate of tree transpiration as treatment A throughout the irrigation season, using in the process the entire amount of daily water supplied to the treatment by irrigation. Values for  $T$  to  $I$  ratio of 1.0 or higher support this and indicate that virtually no soil evaporation took place. Estimates for  $ET_c$ , from profile probe sensors also rose steadily from beginning of irrigation in March and closely followed the irrigation applied. Tree transpiration rates stayed slightly above estimated  $ET_c$  values from March

to July 19 as trees used irrigation water and soil water stored outside the wet area of the drip emitters. Thereafter, the rates were closely matched indicating that all the irrigation water and some rainfall was used for tree growth, with hardly any lost via non-physiological processes such as runoff or soil evaporation. Recorded REW stayed between 0.76 and 0.91 (Table 5). Almost the same amount of water was used through transpiration in treatment A and treatment B suggesting that olive trees, adapted to prolonged periods of drought that occur during summer in the Mediterranean basin, have developed a series of mechanisms to slow down their physiological processes and improve water use efficiency. This process is identified by the lower average crop coefficient values (0.6–0.7

**Table 6 – Crop tree transpiration estimated during year 2006 from sap flow measurements for the mature olive tree under full irrigation (treatment C) during the period considered and corresponding crop evapotranspiration  $ET_c$  rates per tree estimated from soil water balance using the Delta T PR1 soil moisture sensor probe placed in the wet bulb developed by drip irrigation emitters**

Date interval		Mature olive tree treatment C (canopy area = 40.15 m <sup>2</sup> )			
Start	End	Transpiration from sap flow rates, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	$ET_c$ from soil water balance with profile probe, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	Daily average irrigation, l d <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup>	REW
18-03-2006	31-03-2006	2.5	0.6	0.23	0.91
01-04-2006	15-04-2006	3.3	0.3	0.21	0.84
16-04-2006	28-04-2006	3.6	0.3	0.00	0.84
29-04-2006	12-05-2006	4.5	1.5	1.61	0.61
13-05-2006	26-05-2006	4.5	0.6	0.46	0.86
27-05-2006	09-06-2006	4.3	0.2	0.00	0.51
10-06-2006	24-06-2006	4.0	0.3	0.00	0.39
25-06-2006	06-07-2006	3.8	1.6	1.88	0.41
07-07-2006	19-07-2006	4.3	1.2	0.83	0.93
20-07-2006	03-08-2006	3.5	0.2	0.00	0.44
04-08-2006	17-08-2006	2.9	0.0	0.00	0.29
18-08-2006	09-09-2006	2.6	0.1	0.00	0.21

REW corresponds to the average REW in the wet bulb.



or lower) attributed to olive trees from June to September (Fernández, 2006), as trees use their inbuilt mechanisms to temporarily shut down their physiological systems until the cooler temperatures of late summer or early autumn arrive. It appears that during this resting phase applying water to treatment A in excess of that needed to sustain tree transpiration was inefficient for vegetative growth and it stimulated losses through soil water evaporation.

Daily transpiration rates for treatment C (Table 6) were unexpectedly high throughout the season, being similar to the values of treatments A and B, despite receiving much lower irrigation water in May (29.1 mm) and later in July (33.4 mm). As noted earlier, September and October rains just before crop-harvesting precluded the need to provide for irrigation. Much higher daily transpiration values than crop evapotranspiration estimates may also be caused by the use of rainfall water stored in the soil outside the zone of the drip irrigation emitters and the ability of roots to explore and extract soil water at depths and in the large soil volumes because of the 12 m by 12 m tree spacing. This ability was recognised by Fernández et al. (1991, 1997) in olive trees and by Rana et al. (2004) in vineyards, as a process that allows trees to get their water supply during drought periods. Modelling studies show that predicting  $ET_c$  based only on root zone averaged soil moisture may be an oversimplification, particularly if plants can compensate for a portion of their roots being in dry soil (Guswa et al., 2002). REW decreased gradually to a value of 0.39 in the middle of June, only to increase to a value of 0.93 after the irrigation events at the beginning of July. From there on, and in the absence of irrigation water or rainfall, the REW of treatment C dropped steadily until middle August, where the 13.1 mm of rainfall restored it to higher values for a short while. A more sustained recovery was established at the end of September when more regular rains brought soil water storage back to around 100 mm (Table 6). The structure of the trees monitored in treatment C, with their much larger canopy area, diameter trunk and subsequently root system, may be responsible for the increase in sap osmotic pressures enabling the roots to extract more water when the soil dries as suggested by Abd-El-Rahaman et al. (1966), or for establishment of a higher water potential gradient between canopy and root system (Tombesi et al., 1986).

Trees from the dry-farming treatment also benefitted from the same mechanisms to supply their water requirements during the drought periods (Table 3). However, not being irrigated, their transpiration values are lower than those of treatment C. As for treatment C, in a favourable wet year the trees sustained remarkably high daily transpiration rates. These rates could not be explained by evapotranspiration rates calculated from the probe soil moisture sensors (data not shown).

### 3.3. Orchard crop and water stress coefficient

Fig. 2 shows the average seasonal  $T/ET_0$  calculated separately for each treatment to account for each stand characteristics and the water applied. Larger  $T/ET_0$  values occur in March and April when the moisture stored in the soil from winter rains and first irrigation events was still high. As drought from summer months occurs, regardless of the water applied, the

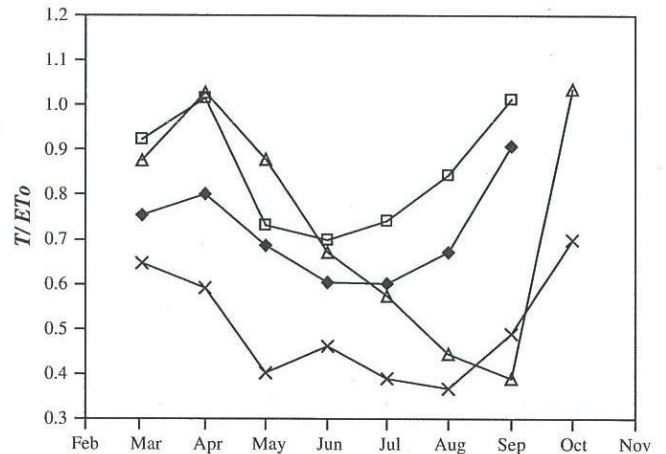


Fig. 2 –  $T/ET_0$  values, estimated as the ratio between the scaled transpiration for each treatment,  $mm\ day^{-1}$  and Penman–Monteith  $ET_0$ ,  $mm\ day^{-1}$  computed by the local meteorological station: ◆, treatment A; ◻, treatment B; ▲, treatment C; ×, dry-farming.

olive trees slowed down their physiological mechanisms to conserve water and their  $T/ET_0$  ratio was reduced. It is worthwhile noticing that despite the large amount of water applied to treatment A throughout the summer drought (Table 4),  $T/ET_0$  ratio declined to values as low as 0.6. With an unlimited supply of water, treatment B received adequate amounts of irrigation water to compensate for transpiration (Table 5) and showed a decline in  $T/ET_0$  values during the same months but to slightly higher values than treatment A.

$T/ET_0$  values for treatment B are similar to the crop coefficient ( $k_c$ ) values for olive trees obtained by Fernández (2006) for the well-watered “Manzanilla de Sevilla” trees near Sevilla, southern Spain, planted at 7 m × 5 m spacing. The values for treatment B were higher than the values of 0.38 and 0.39 obtained in July and August, respectively by Orgaz and Pastor (2005) for mature “Picual” trees near Cordoba, southern Spain. Sevilla is much closer to our experimental site. It also has a climate that is more similar to Moura than Cordoba which is more peninsular. Nonetheless, all values reflect the summer rest period of the olive trees and the more intense transpiration activity in the months preceding and following rest, when crop coefficient values approach unity.

Table 7 – Monthly water stress coefficient  $k_s$  for RDI and dry-farmed treatments as the ratio of their  $T_a/ET_0$  estimates to corresponding  $T/ET_0$  values for the well-watered treatment

	RDI	Dry-farming
Mar	0.96	0.70
Apr	1.00	0.59
May	1.20	0.55
Jun	0.96	0.66
Jul	0.77	0.53
Aug	0.52	0.44
Sep	0.39	0.49
Oct	1.00	0.70



When plants are under water stress the standard transpiration is reduced and the crop coefficient is adjusted to those conditions using a water stress coefficient  $k_s$  (Allen et al., 1998). The adjusted transpiration rate,  $T_a$ , is the product of  $k_c$ ,  $k_s$ , and  $ET_0$ . The coefficient  $k_s$  is often used in irrigation scheduling schemes to adjust the measured ET to reflect soil water conditions. Table 7 presents the monthly estimated  $k_s$  water stress coefficient for treatments C and D, where there was water deficit, using the ratio of their  $T_a/ET_0$  estimates to compare with the  $T/ET_0$  values for treatment B. Soil evaporation is taken as zero as all estimates of tree evapotranspiration either closely match the transpiration rates of treatment B or are lower (treatments C and D). The results confirm the steadily decline in transpiration rates of treatment C from May to September, when transpiration dropped to 39% of treatment B. The dry-farmed orchard, that benefitted from the same amount of rainfall but was not irrigated, showed much sharper decline in the water stress coefficient from May to October. Comparing treatments B and C, results confirm that by March, when the stress coefficient was 0.7, the stored moisture in the soil from the winter rains was already not sufficient to increase the dry-farmed transpiration rates to values close to those of treatment C. Irrigating treatment C in that period maintained tree transpiration rates high until June, at around 96% of treatment B, which is in contrast to the estimated 66% value for the dry-farmed orchard. Likewise, irrigating treatment C in July helped sustained water stress to values close to 77% of treatment B. It is worthwhile recalling that treatment C also took advantage of the high annual rainfall and early autumn rains which enable most of the atmospheric evaporative demands of the treatment to be from water extracted from outside of the area wetted by the drip irrigation emitters. Also autumn rains in September and October, just before crop-harvesting, precluded the need to provide for the scheduled irrigation. Similar experiments conducted by Santos et al. (2007) in the drier year of 2005, where there was no significant rainfall in August and early September and scarce farm water resources that caused irrigation to be proscribed during those months, showed a much more significant reduction in transpiration rates.

#### 3.4. Stomatal conductance and orchard productivity

Olive trees, being sensitive to high air vapour pressure deficit  $Da$ , avoid periods of excessive transpiration drought by

regulating stomatal conductance (Moriana et al., 2003; Moriana et al., 2007; Yunusa et al., 2008a). A proportional decrease in stomatal conductance,  $g_s$  with increasing  $Da$  for values of up to approximately 3.5 kPa was reported by Fernández et al. (1997). However, Bongi and Loreto (1989) found little response of  $g_s$  to  $Da$  whereas Giorio et al. (1999) found no correlation between  $g_s$  and  $Da$ . We assessed the seasonal variations in stand-level stomatal aerodynamic conductance to vapour pressure deficit  $Da$  throughout the irrigation season to evaluate the responsiveness of trees in our irrigation treatments to atmospheric water demand. Fig. 3 shows the typical daily course of air vapour pressure deficit,  $Da$  and net radiation,  $R_n$  in the experimental site in the months from June to September when there was irrigation.  $R_n$  and  $Da$  followed the same trend throughout the day, with steady rise of  $R_n$  in the early hours of the day and peaks at around 12:00 and 14:00 hour.  $Da$  lagged behind or followed the course of  $R_n$  and often peaked at latter times, usually between 16:00 and 18:00 hours. This daily cycle takes  $Da$  values rapidly to around 2.5 and 3 kPa in mid morning to as high as 5 kPa in the afternoon. The long term relationships between  $g_s$  and  $Da$ , from April 2nd to May 17th, from May 18th to July 2nd and from July 3rd to August 29th, respectively were derived. Figs. 4, 5 and 6 present the best-fit relationships for the four treatments and time intervals. They were best described by power function using a non-linear least squares curve-fitting technique and by adjusting approximately 700 hourly  $g_s$  data points per treatment with their counterparts of  $Da$ . Table 8 shows the adjusted best-fit equations and coefficients of determination ( $r^2$ ) for the time intervals and treatments.  $R^2$  give the proportion of variability in the dependent variable that can be explained by the independent variables (Sokal and Rohlf, 1995).

Although the diurnal variation of  $T$  closely tracked  $R_n$ , the stomatal openings as indicated by  $g_s$  actually peaked early in the day and then rapidly decreased as  $Da$  increased. For all treatments stomatal conductance was also considerably depressed throughout the irrigation season until the end of August, as daily  $Da$  increased. It is worthwhile noticing the higher sap flow rates (Fig. 1) and stomatal conductance (Fig. 4 and 5) of treatment C from April 2nd to July 2nd than treatment A and B. This is when moisture content was high enough in the irrigated and surrounding soil volume to prevent serious drought stress (Table 7). From there, the stomatal conductance of treatment C progressively converged to that of treatments A and B values and transpiration concurrently

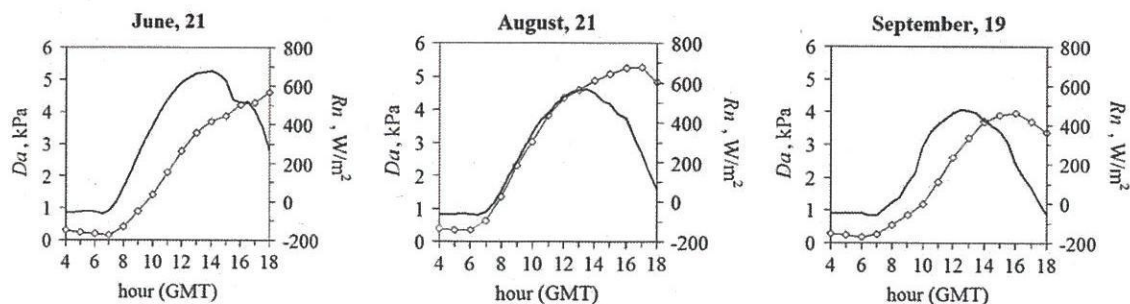


Fig. 3 – Typical daily trend in air vapour pressure deficit,  $Da$  and net radiation,  $R_n$  in the experimental site during irrigation months, from June to September.  $\diamond$ , air vapour deficit  $Da$ , kPa; —, net radiation,  $R_n$ ,  $W\ m^{-2}$  measured above the tree canopy.



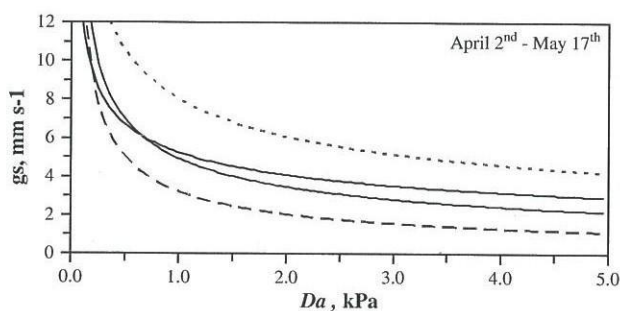


Fig. 4 – Best-fit relationship between stomatal conductance,  $g_s$  and air vapour pressure deficit,  $D_a$  from April 2nd to May 17th: —, treatment A; —, treatment B; ···, treatment C; - · -, dry-farming at the Herdade dos Lameirões site.  $D_a$  was determined for daylight hours (5:00–18:00 hour).

declined (Fig. 1 and Table 7), making it difficult to rank  $g_s$  treatment values by order of amount of water supplied. Also, as summer progressed, as expected, the  $g_s$  vs.  $D_a$  values of treatment A and B almost always overlapped. The relatively higher values of  $g_s$  vs.  $D_a$  observed for treatment B than treatment A in Figs. 4, 5 and 6 might explain its higher sap flow values measured throughout the irrigation season (Fig. 1).

Table 9 shows the average olive orchard fruit production in 2006 and in 2004, when the orchard was still under dry-farming and prior to its conversion to irrigation in 2005. No significant differences in fruit production were obtained in 2006 among the irrigated treatments. However, the more restricted water treatment C averaged an unexpectedly high yield of  $58.4 \pm 8.4$  kg tree<sup>-1</sup>, probably because of the high stomatal conductance and sap flow rates observed from April 2nd to July 2nd. Moriana et al. (2007) had reported that the osmotic adjustment of olive trees can lead to large amount of water extracted from the soil, reducing the effect of irrigation in low-density olive orchards. Yet, in 2005, a drier year with no significant rainfall in August and early September and scarce water resources, a similar experiment (Santos et al., 2007) conducted at the same site showed that in absence of water,

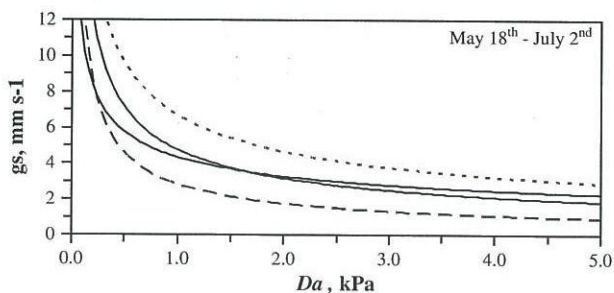


Fig. 5 – Best-fit relationship between stomatal conductance,  $g_s$  and air vapour pressure deficit,  $D_a$  from May 18th to July 2nd: —, treatment A; —, treatment B; ···, treatment C; - · -, dry-farming at the Herdade dos Lameirões site.  $D_a$  was determined for daylight hours (5:00–18:00 hour).

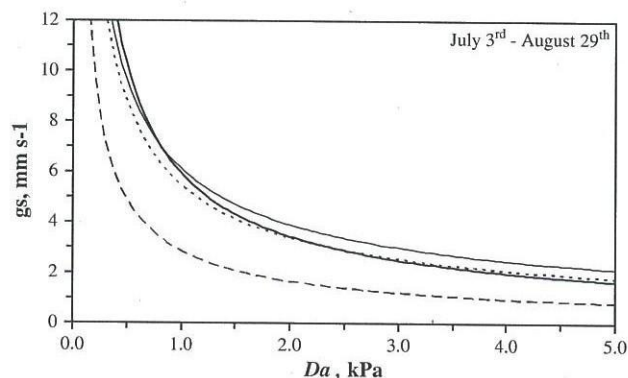


Fig. 6 – Best-fit relationship between stomatal conductance,  $g_s$  and air vapour pressure deficit,  $D_a$  from July 3rd to August 29th: —, treatment A; —, treatment B; ···, treatment C; - · -, dry-farming at the Herdade dos Lameirões site.  $D_a$  was determined for daylight hours (5:00–18:00 hour).

treatment C had a highly significant reduction in tree fruit yield of  $9.6 \pm 6.4$  kg tree<sup>-1</sup>.

The above results might indicate that the prescribed RDI of treatment C is the most suitable for olive orchards during wet years with well distributed summer rainfall, when roots have available water to explore outside the wet area developed by the irrigation system, or in years where there is a shortage of farm water for irrigation. Drier years with no summer and early autumn rains occur frequently in the region.

Considerable differences were observed between the stomatal conductance of irrigated and non-irrigated treatments. Throughout the irrigation season trees of the dry-farmed treatment showed evidence of stomatal limitation with closing of the stomata under conditions of high air vapour pressure deficit to avoid excessive transpiration, maintaining low and relative constant values of  $g_s$  around  $2.0$  mm s<sup>-1</sup> for  $D_a$  over 1.0 kPa. However, the highly favourable distribution of rainfall during the normally dry summer

Table 8 – Adjusted power equation of best-fit stomatal conductance  $g_s$ , mm s<sup>-1</sup> vs. air deficit vapour pressure  $D_a$ , kPa for treatment A, B, C and dry-farming in three different time intervals, April 2nd to May 17th, May 18th to July 2nd, and July 3rd to August 29th

Time interval	Treatment	Adjusted equation	$r^2$
April 2nd–May 17th	A	$g_s = 4.9256D_a^{-0.5092}$	0.9042
	B	$g_s = 5.2371D_a^{-0.3607}$	0.6641
	C	$g_s = 8.003D_a^{-0.3991}$	0.7604
	Dry-farming	$g_s = 3.2081D_a^{-0.6492}$	0.9308
May 18th–July 2nd	A	$g_s = 4.748D_a^{-0.5883}$	0.8298
	B	$g_s = 4.3342D_a^{-0.4062}$	0.5779
	C	$g_s = 6.6674D_a^{-0.5209}$	0.7971
	Dry-farming	$g_s = 2.8276D_a^{-0.6929}$	0.7840
July 3rd–August 29th	A	$g_s = 5.9174D_a^{-0.7842}$	0.8813
	B	$g_s = 6.1129D_a^{-0.6491}$	0.6505
	C	$g_s = 5.4497D_a^{-0.6863}$	0.8420
	Dry-farming	$g_s = 2.8501D_a^{-0.774}$	0.8698



**Table 9 – Orchard productivity in kg tree<sup>-1</sup> for 2004 dry-farmed year, and for the subsequent irrigation treatments A, B, and C of year 2006**

Year	A	B	C	Dry-farming
	kg tree <sup>-1</sup>			
2004	27.0 ± 5.10 <sup>a</sup>			
2006	54.3 ± 6.3a	69.6 ± 16.9a	58.4 ± 8.4a	41.7 ± 2.3b

a Production in 2004 when the entire orchard was dry-farmed, prior to conversion to irrigation in 2005. Data are means of three replicate plots. The same letters in the line indicate that means are not statistically different ( $P = 0.05$ ).

months, and the considerable rainfall in September 2006 gave average yields of  $41.7 \pm 2.3$  kg tree<sup>-1</sup>, considerably higher than the  $27.0 \pm 5.10$  kg tree<sup>-1</sup> harvested in 2004 and the  $6.7 \pm 1.5$  kg tree<sup>-1</sup> harvested in 2005, a dry and disappointing year for olive production.

#### 4. Conclusions

The irrigation regime, and the summer and early autumn rains, differently affect the influence of water treatments on transpiration rates, soil water status and tree stomatal resistance. Excessive irrigation water was applied in the full-rate irrigation treatment. The SDI treatment, which received virtually the same amount of water as the full-rate irrigation treatment, maintained similar levels of transpiration rates but with no soil evaporation. The low average  $T/ET_0$  ratios from June to August 2006 demonstrated by the full-rate irrigation and SDI treatments suggest that olive trees of cv. Cordovil slow down their physiological processes in the summer to improve their water use efficiency. Furthermore, during drought periods the daily transpiration rates of the RDI treatment above those supplied by irrigation reflect the propensity of olive trees to extract soil water from the large volume of soil around the trees, created by the 12 m by 12 m tree spacing. Trees from the dry-farmed treatment also benefited from the same mechanisms to extract water but by being not irrigated, they showed a much sharper decline in water stress coefficients than the RDI treatment. The fruit yield from RDI and dry-farmed treatments during 2006 contrasted to those found during the disappointing dry year of 2005 where there was more reduced fruit yield per tree, suggesting that RDI should be used for the irrigation of olive orchards in wet years with well distributed late summer rainfall and when from the onset of irrigation season farm water is in short supply. Otherwise, SDI appears to be the better option for scheduling irrigation of cv. Cordovil olives in Southern Portugal.

#### Acknowledgements

This work was made possible by partial funding from the Integrated Development of the Alqueva Área Program (PEDIZA II) and by the Agricultural and Rural Development Operational

Program AGRO (Medida 8, Acção 8.1, projecto AGRO 728). The corresponding author acknowledges the sabbatical leave scholarship provided by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

#### REFERENCES

- Abd-El-Rahaman A A; Shalaby A F; Balegh M (1966). Water economy of olive under desert conditions. *Flora*, 156, 202–219.
- Allen R; Pereira L S; Raes D; Smith M (1998). *Crop Evapotranspiration, Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome.
- Anonymous (2008a). Olivais “alentejanos” dos espanhóis recolhem aprovação das cooperativas, mas críticas dos ambientalistas. [Spanish olive orchard in Alentejo approved by Portuguese farmer cooperatives but criticised by environmental groups]. *Jornal de Notícias*. [http://jn.sapo.pt/PaginaInicial/Interior.aspx?content\\_id=923817](http://jn.sapo.pt/PaginaInicial/Interior.aspx?content_id=923817).
- Anonymous (2008b). Quercus denuncia abate ilegal de azinheiras por empresários espanhóis. [The environmental group Quercus denounces illegal cuts of Quercus suber trees from Spanish entrepreneurs]. *Jornal de Notícias*. [http://jn.sapo.pt/PaginaInicial/Interior.aspx?content\\_id=925539](http://jn.sapo.pt/PaginaInicial/Interior.aspx?content_id=925539).
- Bongi G; Loreto F (1989). Olive. In: *Handbook of Environmental Physiology of Fruit Crops: Temperate Crops* (Shaffer B; Anderson P C eds), Vol. 1, pp. 1408–1416. CRC Press, Boca Raton.
- Čermák J; Kučera N; Nadezhdina (2004). Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, 18, 529–546.
- CE (2006). Regulamento (CE) n° 509/2006 do Conselho. *Jornal Oficial da União Europeia*. [Official Journal of European Union]. <[http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/pt/oj/2006/l\\_093/l\\_09320060331pt00010011.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/pt/oj/2006/l_093/l_09320060331pt00010011.pdf)> (accessed 31.08.08).
- Ewers B; Oren R (2000). Analyses of assumptions and errors in the calculation of stomatal conductance from sap flux measurements. *Tree Physiology*, 20, 579–589.
- Fares A; Alva A K (2000). Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 64, 311–318.
- Fernández J E; Moreno F; Cabrera F; Arrue J L; Martín-Aranda J (1991). Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees. *Plant and Soil*, 133, 239–251.
- Fernández J E; Moreno F; Martín-Aranda; Rapport H F (1994). Anatomical response of olive roots to dry and irrigated soils. *Advances in Horticultural Science*, 8, 141–144.
- Fernández J E; Moreno F; Girón I F; Blázquez O M (1997). Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant and Soil*, 190, 179–192.
- Fernández J E; Palomo M J; Diaz-Espejo A; Girón I F; Moreno F (1998). Measuring sap flow in olive trees: potentialities and limitations of the compensation heat-pulse technique. In *Fourth International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants*, pp. 31–42. IUFRO Publications, Mendel University.
- Fernández J E; Palomo M J; Diaz-Espejo A; Clothier B E; Green S; Girón I F; Moreno F (2001). Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, 51, 99–123.
- Fernández J E (2006). Irrigation management in olive. In: *Biotechnology and Quality in Olive: Recent Advances in Olive*



- Industry (Caruso T; Motisi A; Sebastiani L eds), pp. 295–305, Marsala, Italy.
- Gazal R M; Scott R L; Goodrich D C; Williams D G (2006). Controls on transpiration in a semiarid riparian cottonwood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137, 56–67.
- Goldhamer D A (1999). Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Horticulturae*, 474, 369–372.
- Goldhamer D A; Dunai J; Ferguson L F (1994). Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Horticulturae*, 356, 172–175.
- Giorio P; Sorrentino G; d'Andria R (1999). Stomatal behaviour, leaf water status and photosynthetic response in field-grown olive trees under water deficit. *Environmental and Experimental Botany*, 42, 95–104.
- Goodrich D C; Scott R; Qi J; Goff B; Unrich C L; Moran M S; Williams D; Schaeffer S; Snyder K; MacNish R; Maddock T; Pool D; Chehbouni A; Cooper D I; Eichinger W E; Shuttleworth W J; Kerr Y; Marssett R; Ni W (2000). Seasonal estimates of riparian evapotranspiration using remote and in situ measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 105, 281–309.
- Green S R; Clothier B E (1988). Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of Experimental Botany*, 39, 115–123.
- Green S R; Clothier B E; Jardine B (2003). Theory and practical application of heat-pulse to measure sap flow. *Agronomy Journal*, 95, 1371–1379.
- Guswa A; Celia M; Rodriguez-Iturbe (2002). Models of soil moisture dynamics in ecohydrology: a comparative study. *Water Resources Research*, 38(9), 1166. doi:10.1029/2001WR000826.
- Intrigliolo D S; Castel J R (2006). Performance of various water stress indicators for prediction of fruit size response to deficit irrigation in plum. *Agricultural Water Management*, 83, 173–180.
- INE (1999). Recenseamento geral da agricultura. [General Agricultural Survey]. Instituto Nacional de Estatística, Portugal.
- Lavee S; Wodner M (1991). Factors affecting the nature of oil accumulation in fruit of olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Journal of Horticultural Science*, 66, 583–591.
- Lavee S; Nashif M; Wodner M; Harshemesh H (1990). The effect of complementary irrigation added to old trees (*Olea europaea* L.) cv. "Souri" on fruit characteristics, yield and oil production. *Advances in Horticultural Science*, 4, 135–138.
- Moriana A; Orgaz F; Pastor M; Fereres E (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425–431.
- Moriana A; Pérez-López D; Gómez-Rico A; Salvador M D; Olmedilla N; Ribas F; Fregapane G (2007). Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: water relations and influence in oil characteristics. *Agricultural Water Management*, 87, 171–179.
- McNughton K G; Jarvis P G (1983). Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: *Water Deficits and Plant Growth* (Kozlowski T T ed), pp. 1–47. Academic Press, New York.
- Orgaz F; Pastor M (2005). Fertirrigación del olivo. Programación de riegos. [Olive fertigation. Irrigation scheduling]. In: *Fertirrigación. Cultivos Hortícolas, Frutales y Ornamentales* (Mundi-Prensa S A ed). [In *Fertigation of Horticultural Crops, Fruit Trees and Ornamentals*], pp. 285–306, Madrid.
- Ortuño M F; Garcia-Orellana Y; Conejero W; Ruiz-Sánchez M C; Mounzer O; Alarcón J J; Torrecillas A (2006). Relationships between climatic variables and sap flow, stem water potential and maximum daily trunk shrinkage in lemon trees. *Plant and Soil*, 279, 229–242.
- Phillips N; Oren R (1998). A comparison of daily representations of canopy conductance based on two conditional time-averaging methods and the dependency of daily conductance on environmental factors. *Annales des Sciences Forestières*, 55, 217–235.
- Pastor M; Castro J; Mariscal M J; Vega V; Orgaz F; Fereres E; Hidalgo J (1999). Respuesta del olivar tradicional a diferentes estrategias y dosis de agua de riego. [Response of traditional olive tree to different strategies and doses of irrigation water]. *Investigación Agrícola*, 14, 393–404.
- Rana G; Katerji N; Introna M; Hammami A (2004). Microclimate and plant water relationship of the "overhead" table grape vineyard managed with three different covering techniques. *Scientia Horticulturae*, 102(1), 105–120.
- Santos F L; Valverde P C; Ramos A F; Reis J L; Castanheira N L (2007). Water use and response of a dry-farmed olive orchard recently converted to irrigation. *Biosystems Engineering*, 98, 102–114.
- Sofó A; Manfreda S; Fiorentino M; Dichio B; Xiloyannis C (2008). The olive tree: a paradigm for drought tolerance in Mediterranean climates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 293–301.
- Sokal R; Rohlf J (1995). *Biometry*. W H Freeman and Company, New York.
- Tognetti R; d'Andria R; Lavini A; Morelli G (2006). The effect of deficit irrigation on crop yield and vegetative development of *Olea europaea* L. (cultivars Frantoio and Leccino). *European Journal of Agronomy*, 25, 356–364.
- Tognetti R; d'Andria R; Morelli G; Alvino A (2005). The effect of deficit irrigation on seasonal variations of plant water use in *Olea europaea* L. *Plant and Soil*, 273, 139–155.
- Tombesi A; Proeitti P; Nottiani G (1986). Effect of water stress on photosynthesis, transpiration, stomatal resistance and carbohydrate level of olive tree. *Olea*, 17, 35–40.
- van Genuchten M Th (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.
- Yunusa I A M; Nuberg I K; Fuentes S; Lu P; Eamus D (2008a). A simple field validation of daily transpiration derived from sapflow using porometer and minimum meteorological data. *Plant and Soil*, 305, 15–24. doi:10.1007/s11104-007-9287-4.
- Yunusa I A M; Nuberg I K; Fuentes S; Lu P; Eamus D (2008b). A simple field validation of daily transpiration derived from sapflow using porometer and minimum meteorological data. *Plant and Soil*, 310, 269. doi:10.1007/s11104-008-9713-2.

### 3.6. Referências Bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements – FAO*. Irrigation and drainage, paper 56. Rome, Italy.

Bacelar, E. L. (2006). *Ecophysiological responses of olive (Olea europaea L.) to restricted water availability Limitations, damages and drought resistance mechanisms*. Tese de Doutorado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

Ball, J. T., Woodrow, I. E. & Berry, J.A. (1987). A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In *Progress in Photosynthesis Research (ed. I. Biggens)*, Pp. 221– 224. Martinus-Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands.

Burrows, F.J. & Milthorpe, F.L. (1976). Stomatal conductance in the control of gas exchange. In: Kozlowski, T.T. (ed.), *Soil Water Measurement, Plant Responses, and Breeding for Drought Resistance*, Academic Press, Inc., New York, Pp. 103-152.

Calder, I.A. (1990). *Evaporation in the uplands*. John Wiley and Sons, Chichester.

Cermák, J., Kucera, J. & Nadezhdina, N. (2004). Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees*, 18: 529–546.

Ewers, B. & Oren, R. (2000). Analyses of assumptions and errors in the calculation of stomatal conductance from sap flux measurements. *Tree Physiology*, 20: 579–589.

Fernández, J. E., Durán, P. J., Palomo, M. J., Díaz-Espejo, A., Infante, J. M., Chamorro, V., Girón, I. F. & Villagarcía, L. (2006a). Calibration of sap flow

estimated by the compensation heat pulse method in olive, plum and orange trees: relationships with xylem anatomy. *Tree Physiology*, 26: 719-728.

Fernández J. E., Moreno F., Girón I. F. & Blázquez, O. M. (1997). Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant and Soil*, 190: 179–192.

Ferreira, M. I., Pacheco, C. A., Valancogne, C., Michaelsen, J., Ameglio, T. & Daudet, F. A. (1997b). Evapotranspiration, water stress indicators and soil water balance in a *Prunus persica* orchard, in central Portugal. *Acta Horticulturae*, 449, 379-384.

Ferreira, M. I. & Zitscher, H. (1996). Measurements performed with Granier method in short trunks near the soil. *3rd workshop on measuring sap flow in intact plants*, Sitges, Barcelona, outubro 1996.

Gazal, M. R., Scott, L. R., Goodrich, C. D. & Williams G. D. (2006). Controls on transpiration in a semiarid riparian cottonwood forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 56–67.

Jarvis P. G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B-Biology Sciences*, 273: 593–610.

Jarvis P. G. & McNaughton K. G. (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research*, 15: 1–49.

Leuning, R. (1990). Modelling stomatal behaviour and photosynthesis of *Eucalyptus grandis*. *Australian Journal of Plant Physiology*, 17 (2): 159–175.

Lo Gullo, M.A. & Salleo S.A. (1988). Different strategies of drought resistance in three mediterranean sclerophyllous trees growing in the same environmental conditions. *The New Phytologist*, 108:267–276.

McNaughton, K. G. & Jarvis, P. G. (1983). Predicting the effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In *Water Deficits and Plant Growth*, Vol. VII. T.T. Kozlowski (ed.) Academic Press, New York. Pp 1 - 47.

Moriana, A., Orgaz, F., Pastor, M. & Fereres, E. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(3), 425–431.

Moriana, A., Pérez-López, D., Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Olmedilla, N., Ribas, F. & Fregapane, G. (2007). Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: Water relations and influence on oil characteristics. *Agricultural Water Management*, 87: 171-179.

Nilson, T. (1999). Inversion of gap frequency data in forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99: 437-448.

Nilson, T. & Kuusk, A. (2004). Improved algorithm for estimating canopy indices from gap fraction data in forest canopies. *Agriculture and Forest Meteorology*, 124: 157-169.

Orgaz & Fereres (2001). Riego. En: D. Barranco, R., Fernández-Escobar & Rallo, L. (Eds), *El cultivo del olivo, 4ª ed.*, Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Paços, T.A (2003). *Modelação da evapotranspiração em cobertos descontínuos – programação da rega em pomar de pessegueiros*. Tese de Doutoramento. Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.

Pastor, M. & Orgaz, F. (1994). Riego deficitario del olivar: los programas de recorte de riego en olivar. *Agricultura*, 746: 768-776.

Phillips, N. & Oren, R. (1998). A comparison of daily representations of canopy conductance based on two conditional time-averaging methods and the dependency of daily conductance on environmental factors *Annales des Sciences Forestieres*, 55: 217–235.

Rojas, R., Roldan, J., Luque, R. L., Alcaide, M. & Camacho, E. (1996). El riego del olivar en la provincial de Jaén (II): programación de riegos. *Ingeniería del Agua*. Vol. 3 Num. 1.

Testi, L., Villalobos, F. J., Orgaz, F. & Fereres, E. (2006a). Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrigation Science*, 24: 69-76.

Tognetti, R., d'Andria, R., Lavini, A. & Morelli, G. (2006). The effect of deficit irrigation on crop yield and vegetative development of *Olea europaea* L. (cultivars Frantoio and Leccino). *European Journal of Agronomy*, 25, 356–364.

Vitale, M., Anselmi, S., Salvatori, E. & Manes, F. (2007). New approaches to study the relationship between stomatal conductance and environmental factors under Mediterranean climatic conditions. *Atmospheric Environment* 41: 5385–5397.

Yunusa, I. A. M., Nuberg I. K., Fuentes S., Lu, P. & Eamus, D. (2008a). A simple field validation of daily transpiration derived from sapflow using porometer and minimum meteorological data. *Plant and Soil*, 305: 15–24.

Yunusa I. A. M., Nuberg I. K., Fuentes S., Lu, P. & Eamus, D. (2008b). A simple field validation of daily transpiration derived from sapflow using porometer and minimum meteorological data. *Plant and Soil*, 310: 269.

Whitford, K. R., Colquhoun, I. J., Lang, A. R. G., & Harper, B. M. (1995). Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. *Agriculture and Forest Meteorology*, 74: 237-249.

Wullschleger, S.D., Meinzer, F.C., Vertessey, R.A. (1998). A review of whole-plant water use studies in trees. *Tree Physiology*, 18: 499–512.

Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas – Gabinete do planeamento e das políticas. Produtos de qualidade em Portugal, disponível na www: <http://www.gppaa.min-agricultura.pt/valor/pqual/?id=63>, acedido em 18-12-2011.



## CAPÍTULO 4

# QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO OBTIDA NAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE REGA – CORRELAÇÃO COM A COMPOSIÇÃO QUÍMICA E SENSORIAL DO AZEITE

---



*Neste capítulo avalia-se a produção de azeitona proveniente dos diferentes tratamentos de rega implementados e, simultaneamente, avalia-se a composição química e sensorial do azeite identificando-se a estratégia de rega que garante maior produção sem detrimento da qualidade. Como a produção está diretamente associada ao desempenho fotossintético das árvores avalia-se também o comportamento estomático das árvores e infere-se da sua influência na produção de biomassa.*

*Os objetivos estabelecidos são:*

- (i) Avaliar o impacto dos diferentes tratamentos de rega no desenvolvimento vegetativo e na produção final de azeitona e azeite;*
- (ii) Identificar as características químicas e sensoriais dos azeites DOP da região de Moura, provenientes de olivais antigos regados;*
- (iii) Clarificar a relação entre os mecanismos fisiológicos e a produção de azeitona.*





## 4. QUANTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO OBTIDA NAS DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE REGA – CORRELAÇÃO COM A COMPOSIÇÃO QUÍMICA E SENSORIAL DO AZEITE

### 4.1. Introdução

A produção de azeite tem uma importância histórica na bacia mediterrânica com evidências do seu consumo há cerca de 5000 a 6000 anos atrás (Ben-Gal *et al.*, 2010). O potencial da região Alentejo para o desenvolvimento do setor olivícola, bem como a possibilidade de acesso à água proveniente da barragem do Alqueva e a crescente procura do azeite por parte dos consumidores levou a um crescimento substancial deste sector no Alentejo, em particular na margem esquerda do Guadiana, e arrastou consigo novas oportunidades de desenvolvimento para a região.

Os olivais que até então produziam o azeite de denominação de origem protegida (DOP), originários da região delimitada de Moura, beneficiavam apenas da água da chuva sem que a rega interferisse no processo produtivo. Estes azeites têm atributos que lhes garantem qualidade e valorização comercial, comprovado pela preferência e decisões dos compradores que, na sua grande maioria, são os consumidores. Relativamente ao aspeto e características organoléticas, são azeites de cor amarela dourada, ou esverdeada, aroma frutado suave de grande sensação de doce, com acidez normalmente baixa (<http://www.gppaa.min-agricultura.pt/valor/pqual/?id=849>).

Cada vez mais há uma procura crescente de azeite de qualidade, conceito que resulta da combinação de atributos ou características de um produto e que têm significado na determinação do grau de aceitabilidade do mesmo pelo consumidor (Custódio, 2009). A qualidade do azeite pode ser encarada numa perspetiva nutricional, comercial ou organolética. Custódio (2009) refere que a qualidade é associada a características ou propriedades do mesmo produto que diferenciam, por classes ou tipos, os produtos semelhantes, com vantagem associada à qualidade melhor. Refere ainda que, em termos de marketing, a qualidade é a capacidade de um produto

desempenhar as suas funções que inclui durabilidade, confiabilidade e precisão entre outros atributos valiosos.

A qualidade do azeite, na perspetiva comercial, é avaliada pelas suas propriedades químicas (acidez, índice de peróxidos, absorvância no ultravioleta a 232 nm e a 270 nm) norteadas pelos regulamentos da União Europeia EEC 2568/91 e EC 1893/03. Na perspetiva organolética esta é avaliada pela sua qualidade sensorial que geralmente indica a aceitabilidade e apetência por parte do consumidor, sendo determinada por um conjunto de características avaliadas através dos órgãos sensoriais (Angerosa et al., 2003). O mesmo autor refere ainda que a análise sensorial é o método mais efetivo para avaliar diferenças qualitativas e quantitativas nos estímulos sensoriais originados pelos alimentos e determinar o seu nível de preferência. Gouveia (2005) citado em Silva (2008) refere que a cor, aspeto, sabor e aroma são as principais características avaliadas pelos órgãos dos sentidos, constituindo os principais parâmetros para definição da qualidade sensorial do azeite.

A competitividade do mercado do azeite impôs a requalificação deste setor, onde a rega é sem dúvida o investimento que mais o promove e o valoriza. Os olivais antigos da margem esquerda do Guadiana são povoados por cultivares indígenas, cultivados tradicionalmente em condições de sequeiro e com um elevado espaçamento entre árvores, com vista a tirar um maior proveito da água armazenada no solo durante a época das chuvas, originando produções aceitáveis, mas aquém do potencial produtivo das árvores.

Com o intuito de aumentar a produção desses olivais tradicionais e competir com novas cultivares que vêm sendo introduzidas na região e, simultaneamente, preservar as características do azeite produzido por essas variedades tradicionais, a rega tem sido o factor de produção que melhor tem ajudado a cumprir esses objetivos dos agricultores. Porém, a inquietação deste setor está relacionada com a identificação do comportamento químico e sensorial do novo azeite DOP de Moura, quando eventualmente sujeito à rega. De facto, vários estudos (Lavee et al., 2007; Moriana et al., 2007; d'Andria et al., 2009; Dabbou et al., 2010) revelam que existem potenciais conflitos entre a qualidade do azeite e os níveis de aplicação de água, enquanto outros indicam que a rega não afeta os principais critérios de qualidade do azeite (Motilva et al., 2000; Patumi et al., 2002, Tognetti et al., 2007)

De modo a estudar a interferência da rega na produção de azeitona e de azeite têm vindo a ser desenvolvidas várias linhas de trabalho (Lavee, 1986; Lavee *et al.*, 1990; Chartzoulakis *et al.*, 1992; Goldhamer *et al.*, 1994; Pastor *et al.*, 1996; Inglese *et al.*, 1999; Patumi *et al.*, 2002; Moriana *et al.*, 2003), com os estudos centrados na avaliação do comportamento da oliveira, quando sujeita a diferentes regimes hídricos. Neste âmbito, tem sido consensual que a oliveira responde positivamente à aplicação de água, com acréscimos no número de frutos, no volume e diâmetro transversal dos mesmos, no conteúdo de água no mesocarpo e no conteúdo em clorofila (Lavee *et al.*, 1990; Goldhamer *et al.*, 1999; Moriana *et al.*, 2003; Grattan *et al.*, 2006).

A literatura contém pouca informação sobre o efeito da rega na produção de azeitona e azeite em olivais tradicionais. Relativamente aos olivais de baixa densidade cultivados no Alentejo em regime de sequeiro, são praticamente inexistentes os estudos que analisam o seu comportamento para diferentes cenários de rega. Na verdade, a variabilidade climática, a heterogeneidade do solo, a arquitetura e disposição das árvores na parcela dificultam a extrapolação desses resultados do comportamento das cultivares face a diferentes níveis de aplicação de água para outros olivais onde o sistema de condução e cultivares sejam outros. Lavee *et al.* (1990) mostraram que uma rega complementar de apenas 75 mm após o endurecimento do caroço foi efetiva na duplicação da produção de azeite em olivais antigos, comparativamente a olivais conduzidos em sequeiro; Pastor *et al.* (1999) identificaram um aumento da produção, cerca de 40 kg de azeitona/oliveira, num olival de 80 ha, situado no sul de Espanha, comparativamente ao olival de sequeiro; de forma similar, Moriana *et al.* (2007) estudaram o impacto da rega num olival de baixa densidade (69 árvores ha<sup>-1</sup>) e obtiveram maiores produções para diferentes níveis de aplicação de água comparativamente ao regime de sequeiro.

Face a estes dados, não há dúvida, pela análise da bibliografia (Samish e Speigel 1961; Lavee *et al.*, 1990; Moriana *et al.*, 2003; Grattan *et al.*, 2006), quanto à importância da água no acréscimo de produtividade da oliveira. Consequentemente, sendo a escassez de água um factor problemático nas zonas áridas e semi-áridas em cujo cenário se encontra o Alentejo, as estratégias de rega deficitárias para a produção atualmente consideradas como

estratégias de sucesso (Fererres e Soriano, 2007) e que têm vindo a ser progressivamente aplicada a olivais, com especial relevância para os situados na bacia mediterrânica onde é consensual que estratégias de rega deficitárias como o RDI (rega deficitária controlada) e SDI (rega deficitária sustentada) podem conduzir a poupanças de água com ligeiras reduções na produção de fruto e óleo. Nos últimos anos, várias linhas de trabalho estudaram o impacto quer da aplicação de rega deficitária controlada antes do endurecimento do caroço (Goldhamer, 1999; Alegre *et al.*, 2000; Motilva *et al.*, 2000; Gómez-Rico *et al.*, 2007), quer da aplicação de rega deficitária sustentada ao longo de toda a época de rega (Patumia *et al.*, 2002), havendo poucas diferenças entre as produções obtidas nestes tratamentos de rega e nas obtidas em situação de rega plena.

Neste contexto, Iniesta *et al.* (2009) estudaram o efeito das estratégias de rega RDI e SDI comparativamente à rega plena num olival adulto cv. Arbequina situado no sul de Espanha e verificaram que a expressão vegetativa foi fortemente reduzida nas árvores sujeitas a rega deficitária, a produção de fruto reduziu ligeiramente, sendo a produção de azeite nos tratamentos de rega deficitária 15% inferior à da rega plena.

A redução da quantidade de água aplicada pelas estratégias de rega deficitárias diminui a dependência da água e geralmente é acompanhada por um decréscimo muito reduzido da produção o que incrementa a produtividade da água (Sepaskhah *et al.*, 2010).

Ainda neste âmbito Moriana *et al.* (2007), num olival de baixa densidade (69 árvores ha<sup>-1</sup>) situado na região mediterrânica mostraram recuperação rápida do stress quando a rega se concentrava na segunda metade do verão. No entanto, para melhor conhecimento e clarificação desses efeitos da rega, é necessário conhecer os estados fenológicos da oliveira, bem como a sensibilidade das árvores ao défice hídrico nos seus diferentes ciclos de crescimento, de modo a poder garantir-se sucesso na aplicação de estratégias de rega deficitária Assim, na fase correspondente ao endurecimento do caroço, fase identificada como aquela em que a oliveira é mais resistente ao défice hídrico a quantidade de água aplicada pode ser reduzida em 50% relativamente à rega plena, sem que ocorra perdas de produção (Goldhamer, 1999). Outros estudos revelaram que, quando se repõe apenas 25 %  $ET_c$ ,

ocorrem decréscimos na produção de azeite principalmente devido à redução do número de frutos (Alegre *et al.*, 2000; Girona *et al.*, 2000; Martin- Vertedor *et al.*, 2011). Na terceira fase do desenvolvimento do fruto, quando ocorre a acumulação de azeite no mesmo, há uma sensibilidade acrescida à falta de água que se traduz na redução do fruto e na quantidade de azeite produzida (Lavee e Wodner, 1991; Goldhamer *et al.*, 1994; Moriana *et al.*, 2003; Tognetti *et al.*, 2005). Em geral, os programas de rega deficitária tendem a reduzir as taxas de fotossíntese e produção, mas existem estudos que comprovam que a oliveira é mais tolerante à seca que a maioria das plantas, sobrevivendo a potenciais baixos (i.e. -5 a -8 MPa) e mantendo taxas elevadas de fotossíntese, durante longos períodos de stress hídrico (Dichio *et al.*, 2004).

Para uma vasta gama de potenciais hídricos foliares, o fecho estomático é gradual, pelo que a taxa de fotossíntese decai suavemente. Porém, quando os ciclos de stress hídrico se repetem, há uma adaptabilidade fotossintética das árvores (Matthews e Boyer, 1984) e as folhas de oliveira que cresceram sob condições de stress hídrico há séculos, estarão mais aptas a controlar a transpiração por folhas menores e mais espessas e com uma maior densidade de estomas (Chartzoulakis *et al.*, 1999a; Bosabalidis e Kofidis, 2002).

Estudos realizados por Motilva *et al.* (2000) provaram que as estratégias de rega definidas podem ter impacto nas características do azeite produzido. Assim, d'Andria (2008), em estudos realizados em variedades de azeitona Italiana concluiu que aplicações de água superiores a 66% de  $ET_c$  não conduziam a produções maiores e de melhor qualidade. Patumi *et al.* (1999, 2002) constataram que os diferentes níveis de aplicação de água não afetavam a acidez e índice de peróxidos do azeite; Gómez-Rico *et al.* (2007), verificaram que o azeite proveniente de um olival tradicional da cv. Cornicabra, sujeito a estratégias de rega deficitária apresentava uma qualidade química e sensorial ligeiramente superior à dos tratamentos bem regados contudo, sem que as diferenças fossem significativas. Assim, características sensoriais como o frutado, o picante e o amargo eram afetados com o acréscimo da aplicação de água; Muñoz-Cobo (2005) verificaram que os azeites provenientes dos tratamentos bem regados apresentam características sensoriais menos perceptíveis, comparativamente aos azeites provenientes dos tratamentos



sujeitos a rega deficitária; Palese *et al.* (2010), constataram que o conteúdo de água no solo não afetou os índices de qualidade do azeite.

Quanto à região Alentejo poucos ou nenhuns estudos existem no que se refere ao impacto da rega na composição e qualidade do azeite da cultivar Cordovil (nativa da região de Moura) considerada a principal cultivar responsável por grande parte das características sensoriais e químicas dos azeites virgem-extra produzidos nesta região e que lhe conferem a designação de DOP.

Em síntese, neste capítulo analisa-se o comportamento produtivo das oliveiras face às quatro estratégias de rega já definidas anteriormente e procede-se a uma avaliação e caracterização dos azeites produzidos em termos físico-químicos e sensoriais.

## **4.2. Metodologia**

### **4.2.1. Descrição do dispositivo experimental**

Num olival antigo situado na região de Moura, previamente descrito no capítulo 2 e 3, estabeleceram 4 tratamentos de rega: tratamento A constituído por 77 árvores, sem limitações de água; tratamento B, constituído por 64 árvores onde se estabeleceu uma estratégia de rega deficitária sustentada (SDI) com reposição de apenas 60% da água aplicada ao tratamento A; tratamento C, constituído por 60 árvores onde se estabeleceu uma estratégia de rega controlada (RDI) com aplicações de água faseadas em três períodos distintos (antes da floração, ao início do endurecimento do caroço e 15 dias antes da colheita), períodos esses identificados com recurso à escala BBCH, que é amplamente utilizada e que se baseia num código decimal que identifica o desenvolvimento das plantas mono e dicotiledóneas com estádios principais e secundários; por último, o tratamento D, constituído por 67 árvores sem rega, beneficiando do regime de sequeiro tradicional.

#### 4.2.2. Indicadores de défice hídrico

Durante os anos de 2006 e 2007, procedeu-se à medição da condutância estomática em cerca de 3 folhas por tratamento. Assim, selecionaram-se folhas bem desenvolvidas e iluminadas, em ramos do ano e situadas à altura do peito e mediu-se a condutância estomática ao longo da manhã até ao meio-dia solar (13:30 GMT), usando para o efeito um porómetro de difusão de fluxo contínuo LI-1600 (LI-1600 Inc., USA) semelhante ao descrito por Parkinson (1985) e apresentado na Figura 4.1.

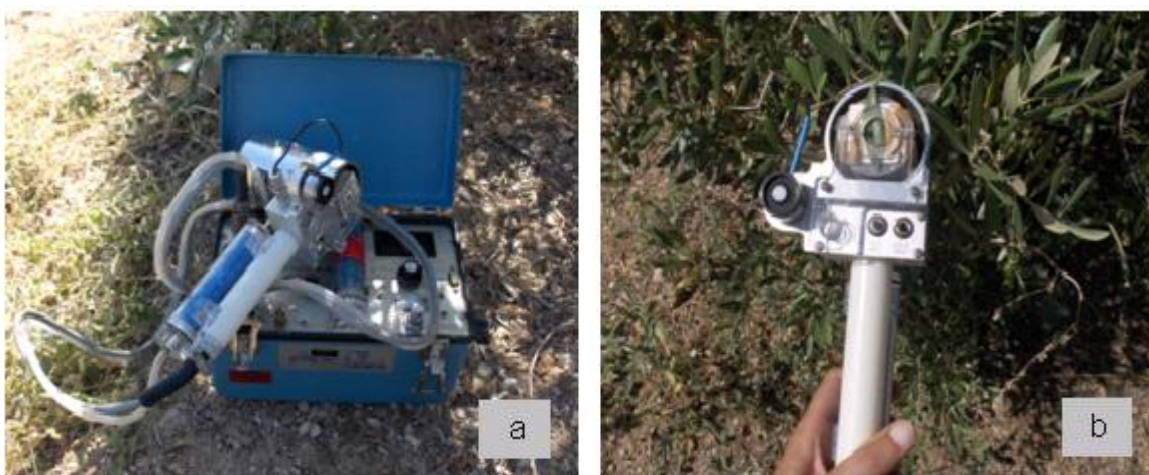


Figura 4.1 - a. porómetro de difusão de fluxo contínuo; b. pormenor da medição da condutância na página inferior folhas hipostomáticas.

Nos dois anos em que decorreu o ensaio, mediu-se também o potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ) e o potencial hídrico dos ramos ( $\Psi_{stem}$ ), sendo que na medição  $\Psi_{stem}$  se optou por folhas localizadas à sombra, de modo a aproximar o potencial hídrico foliar do potencial no xilema dos ramos (Valancogne, 1995 citado em Paços, 2003).

Para que a medição do potencial hídrico foliar se equilibrasse com o potencial hídrico dos ramos ( $\Psi_{stem}$ ), seguiu-se a metodologia apresentada por Goldhamer *et al.* (2001) que consistia na seleção, à altura do peito, de folhas sombreadas que eram cobertas por um pano húmido durante o espaço de tempo que decorria entre a incisão e a colocação da folha na câmara de

pressão. O equipamento usado para o efeito foi uma câmara de pressão do tipo *Schölander* (Schölander *et al.*, 1965) PMS (PMS Inst., Corvallis, OR, USES). A Figura 4.2 mostra o equipamento e o processo de medição.



Figura 4.2 - a. câmara de pressão acoplada à garrafa de azoto; b. metodologia usada na medição do potencial hídrico foliar.

#### 4.2.3. Avaliação do crescimento dos ramos do ano

Ao longo dos anos de 2006 e 2007, monitorizou-se o crescimento dos ramos, como forma de estabelecer um protótipo de desenvolvimento vegetativo e, simultaneamente, identificar o comportamento das árvores perante diferentes cenários de rega. Em cada um dos quatro tratamentos de rega selecionaram-se e identificaram-se 9 árvores (Figura 4.3a) e em cada uma das árvores identificaram-se 4 ramos, de acordo com a sua disposição e orientação dos principais pontos cardeais (Figura 4.3b). A monitorização do crescimento dos ramos efetuou-se entre março e junho considerado o período de crescimento mais intenso (Henar *et al.*, 2002).



Figura 4.3 - a. identificação das árvores onde se procedia à monitorização do crescimento dos ramos, cada árvore era reconhecida através de uma fita sinalizadora onde estava inscrito o tratamento de rega e o número da árvore dentro da amostra; b. identificação dos ramos onde se monitorizava o crescimento.

#### 4.2.4. Índice de maturação

A variação de cor da epiderme e mesocarpo da azeitona são parâmetros utilizados para avaliar o estado de maturação deste fruto e, por conseguinte, a época da colheita. A avaliação subjetiva da extensão da cor da epiderme e do mesocarpo serve de base ao cálculo do índice de maturação proposto pelo Instituto Nacional de Investigação Agronómica de Espanha (Hermoso *et al.*, 1991).

Neste contexto, a azeitona apresenta diferentes fases de desenvolvimento da coloração da sua epiderme. Assim, numa primeira fase a azeitona modifica a coloração verde para amarelo devido à redução acentuada dos pigmentos clorofílicos e numa segunda fase, inicia-se a biossíntese de antocianinas que vão interferir na coloração do fruto, variando entre o violeta claro e o negro.

Na fase que antecedeu a colheita, procedeu-se à determinação do índice de maturação da azeitona em duas datas distintas: 18 de novembro e 27 de dezembro de 2007. A metodologia usada na determinação deste índice



seguiu o proposto por Hermoso *et al.* (1991) que consiste na avaliação visual da extensão da cor da epiderme e mesocarpo da azeitona (Figura 4.4). De acordo com esta metodologia recolheu-se aleatoriamente, de cada tratamento, um conjunto de 100 azeitonas em 10 árvores. As azeitonas recolhidas foram agrupadas, segundo uma escala de 0 (azeitonas de cor verde intenso) a 7 (100% do mesocarpo com cor púrpura), tendo o índice de maturação sido obtido através da Eq. [4.1].

$$IM = \frac{(\sum Nn)}{100} \quad [4.1]$$

onde,

*IM* - índice de maturação;

*N* - valor na escala de 0 a 7;

*n* - número de azeitonas no grupo.

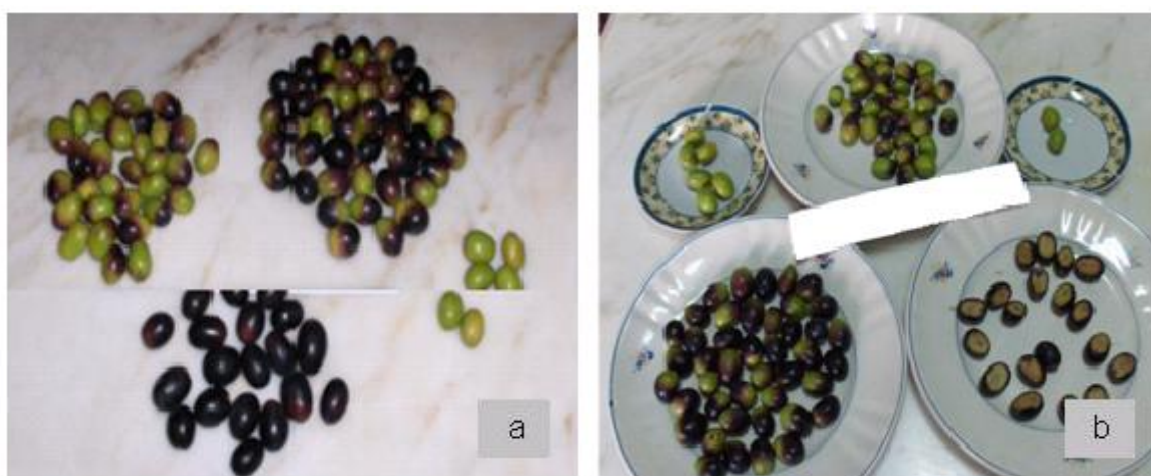


Figura 4.4 - Avaliação do índice de maturação de acordo com Hermoso *et al.* (1991). a. divisão das azeitonas em grupos de acordo com o estado de maturação que apresentam; b. corte das azeitonas para visualização da extensão da cor do mesocarpo.

#### 4.2.5. Colheita, extração e produtividade do azeite

A colheita da azeitona realizou-se durante o mês de dezembro e janeiro dos anos de 2006 e 2007, respetivamente. Estabeleceu-se, em cada um dos tratamentos, três sub-tratamentos constituídos por conjuntos de 3 árvores situadas na mesma linha (Figura 4.5). Para monitorização da quantidade de azeitona e azeite oriundos de cada sub-tratamento, procedeu-se à recolha da azeitona que foi pesada, identificada e devidamente acondicionada (Figura 4.6). Da azeitona proveniente de cada um dos sub-tratamentos recolheu-se uma amostra de aproximadamente 3 kg que foi posteriormente transportada para o laboratório da Cooperativa Agrícola de Moura e Barrancos, onde se procedeu à extração do azeite recorrendo ao sistema abencor (MC2, Ingenierias y System, S.L Sevilla, Spain) que reproduz o sistema industrial de extração do azeite (Grattan *et al.*, 2006).

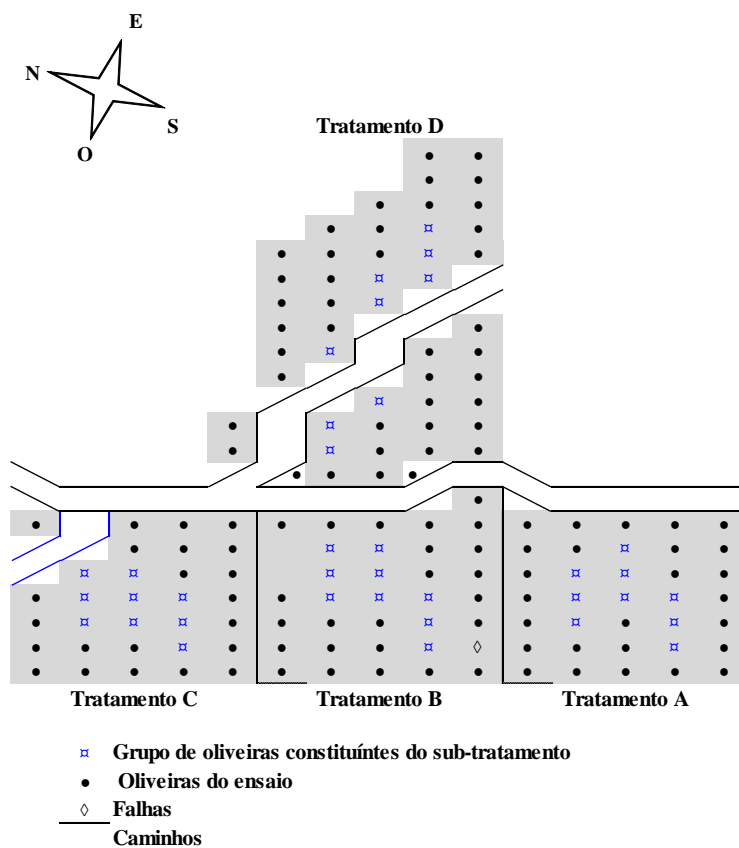


Figura 4.5 - Esquema do campo de ensaio e localização dos sub-tratamentos definidos para avaliação da produção de azeitona e azeite.





Figura 4.6 - a. colheita mecânica de azeitona; b. acondicionamento e identificação das amostras recolhidas nos diferentes tratamentos estabelecidos.

As fases de extração do azeite estão descritas de forma detalhada em Berenguer *et al.* (2006) e, de uma forma sintética, faz-se aqui uma descrição do processo. Inicialmente retirou-se uma amostra de azeitona de cerca de 2 kg que foi moída no moinho de martelos do analisador Abencor (Figura 4.7a), da qual resultou uma pasta que posteriormente foi colocada num termobatedora usualmente designada por Abencor (Figura 4.7b). O processo de extração do azeite ficou concluído quando se procedeu à centrifugação (Figura 4.7c), da massa, proveniente da termobatedora.



Figura 4.7 - Sistema Abencor. a. moinho de martelos; b. Abencor; c. centrifugadora.

A percentagem de água existente na pasta de azeite obtida a partir do sistema Abencor foi estimada por diferença entre a massa da pasta húmida e a massa da pasta seca, sendo a percentagem de azeite contida na pasta seca avaliada por um equipamento de ressonância magnética nuclear (NMS 110 minispec NMR Nalyser Bruker) ilustrado na Figura 4.8. O azeite obtido foi depois transferido para garrafas de cor escura e armazenado à temperatura de 4°C para posteriores análises químicas e sensoriais.

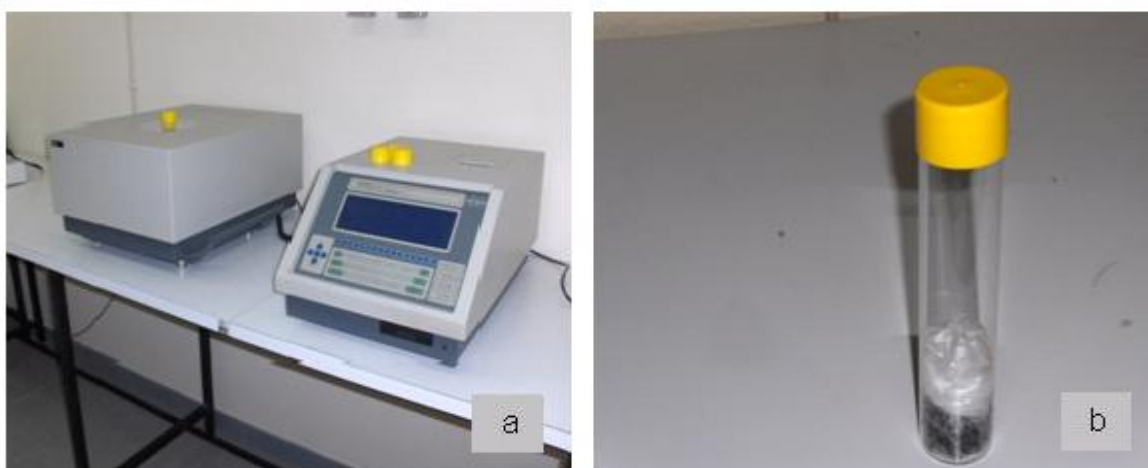


Figura 4.8 - a. equipamento de ressonância magnética; b. tubo de ensaio com a pasta seca para determinação da percentagem em azeite.

#### 4.2.6. Parâmetros físico-químicos e sensoriais do azeite

Segundo o regulamento da União Europeia EEC 2568/91 e EC 1893/03, a classificação do azeite é feita, usando uma árvore de decisão, com base na percentagem de acidez, no índice de peróxido, nas absorvâncias no ultravioleta e na análise sensorial (Custódio, 2009).

Silva (2008) faz uma breve descrição das diferentes categorias de azeite definidas no regulamento da União Europeia EC 1893/03 classificando em:

- a) Azeite virgem: azeite com acidez livre, expressa em percentagem de ácido oleico, menor ou igual a 2%, com gosto irrepreensível e com características que cumprem com as estabelecidas para esta

categoria na norma comercial. É um azeite obtido por processos mecânicos;

- b) Azeite virgem extra: azeite com acidez livre, expressa em percentagem de ácido oleico, menor ou igual a 0.8% e com características organoléticas que cumpram com as estabelecidas para esta categoria na norma comercial. É considerada a melhor categoria de azeite;
- c) Azeite lampante;
- d) Azeite refinado;
- e) Azeite constituído por azeites refinados e virgens.

Ao consumidor chegam as duas primeiras categorias e a última.

A acidez corresponde à percentagem de ácidos gordos livres e expressa-se em percentagem de ácido oleico. A presença de uma elevada acidez está associada a uma manipulação incorreta dos frutos. A deterioração do azeite é avaliada pelo índice de peróxido e também pela absorvância no ultravioleta a 232 nm ( $K_{232}$ ) e a 270 nm ( $K_{270}$ ) e pela análise sensorial. O índice de peróxido avalia a formação de produtos primários da oxidação e a deterioração dos antioxidantes naturais, sendo o limite máximo aceitável para consumo humano de 20 meq  $O_2$   $kg^{-1}$ , enquanto que a absorvância no ultravioleta avalia a quantidade de dienos e trienos conjugados provenientes da formação de produtos primários e secundários da oxidação, respetivamente (Vichi *et al.*, 2003 citado em Custódio, 2009). A absorvância no ultravioleta pode ainda fornecer informação sobre a qualidade, estado e modificações devidas ao processamento tecnológico da matéria gorda (Comissão Europeia, 1991 citado em Silva, 2008).

As metodologias usadas na determinação dos quatro parâmetros foram as definidas no regulamento da União Europeia EEC 2568/91 anexos II, III e IX, respetivamente, tendo sido os parâmetros químicos acidez, índice de peróxidos e absorvância na região do ultravioleta nos comprimentos de onda 232 nm e 270 nm determinados em triplicado a partir de cada um dos sub-tratamentos definidos.

A análise sensorial pretende avaliar os atributos positivos do azeite, como sejam o frutado, amargo e picante. Com este tipo de procedimento

pretende-se ainda detetar no azeite a presença de produtos secundários da oxidação, voláteis, que afetam as suas propriedades organoléticas. A determinação das características sensoriais do azeite foi feita por provadores, selecionados para o efeito, seguindo procedimentos definidos no regulamento da União Europeia EEC 2568/91 anexo XII, o que permitiu classificar os azeites numa escala de perceção e intensidade do sabor e odor. O regulamento ordena a intensidade dos atributos sensoriais do azeite numa escala de 6 divisões que tem início em 0, de perceção impercetível e 5, de máxima perceção. A pontuação do painel foi estabelecida para a escala de 9 divisões, entre 1, o azeite de baixa qualidade, e 9, o azeite de qualidade excepcional, o que permitiu classificar os azeites nas diferentes categorias, sendo que azeites com uma pontuação igual ou superior a 6.5 foram classificados de virgem-extra. Os azeites com pontuação compreendida entre 5.5-6.5 classificaram-se como azeites virgem, sendo os azeites correntes os compreendidos entre 3.5-5.5.

#### **4.2.7. Análise estatística**

A análise estatística foi realizada com o programa SPSS, versão 15.0 for Windows. A análise baseou-se no delineamento experimental adaptado e, considerou-se como variável independente, o tratamento de rega dado que foi uma condição do ensaio e como variáveis dependentes ou que se pretendem analisar, a produção de azeitona, a produção de azeite e o comprimento dos ramos. Testou-se assim o efeito significativo da variável independente sobre cada uma das variáveis dependentes através da aplicação de ferramentas estatísticas disponibilizadas pelo software. Considerou-se que o comportamento de cada uma das variáveis era influenciado apenas por um factor pelo que se aplicou a ANOVA a um factor (one-way). A comparação múltipla de médias foi analisada com o teste de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) e os resultados foram apresentados utilizando a notação alfabética em que os valores médios seguidos da mesma letra não eram significativamente diferentes.

### **4.3. Resultados e discussão**

#### **4.3.1. Efeito dos tratamentos de rega no desenvolvimento vegetativo e na produção final de azeitona e azeite**

Nesta secção, apresentam-se os valores das produções de azeitona e azeite obtidas durante os anos de 2006 e 2007 e identificam-se os tratamentos mais eficientes no uso da água. Também se apresentam os resultados referentes à monitorização do crescimento dos ramos.

No que diz respeito à produção de azeitona (Quadro 4.1), constata-se que esta variou consideravelmente nos dois anos em estudo, manifestando-se a tendência acentuada da oliveira para a alternância de frutificação, processo natural e designado por safra e contra-safra, resultante de uma frutificação elevada num dos anos (de safra) associada a grande consumo de recursos energéticos disponíveis com inibição na indução floral no ano seguinte e redução da carga floral (Levee *et al.*, 2007; Cuevas *et al.*, 1994 citado em Al-Shdiefat *et al.*, 2008). A alternância de frutificação está presente mesmo em olivais intensivos onde o controlo da rega, nutrição e outras técnicas culturais são feitos de forma rigorosa. Porém, a sua ocorrência é menos acentuada e o nível de produção maior e mais controlado do que num olival tradicional conduzido em sequeiro (Levee *et al.*, 2007; Rodrigues e Correia, 2009). O grau de alternância é também altamente dependente das condições ambientais através da indução de alterações metabólicas. Em suma, o hábito de alternância da produção evidenciado pela oliveira parece não ser um fenómeno completamente controlável pelo homem no entanto, práticas culturais adequadas, incluindo a rega como factor determinante na produção de fotoassimilados e no crescimento da árvore, pode manter as árvores em boas condições de crescimento e atenuar o fenómeno. Porém, no caso particular deste estudo ainda que tenha havido uma aplicação de forma equilibrada das práticas culturais, em particular da rega, a minimização da severidade da contra-safra não foi visível. Tal facto sugere que as árvores, por serem antigas e possuírem uma arquitetura já bem definida, reagem de forma pouco célere a novas práticas culturais, como é o caso da rega.

No ano de 2006, ano de maior produção (de safra), não houve diferenças significativas na produção de azeitona entre os tratamentos regados. A produção variou entre 4801 kg ha<sup>-1</sup> e 2875 kg ha<sup>-1</sup>, com a maior e menor produção nos tratamentos B e D, respetivamente. O tratamento C foi o segundo mais produtivo, apresentando uma quebra de produção, comparativamente a B, de 770 kg ha<sup>-1</sup>. A produção no tratamento melhor regado, tratamento A, foi inferior em 1056 kg ha<sup>-1</sup> à produção obtida no tratamento B. Em 2007, ano de baixa produção (de contra-safra), também não houve diferenças significativas entre os tratamentos. A produção sofreu uma quebra, relativamente a 2006, de 84 % e 86.5% nos tratamentos A e B, respetivamente, enquanto que nos tratamentos C e D a quebra de produção foi ainda mais acentuada de 95.8% e 96.2%, respetivamente, demonstrando o processo uma maior severidade da contra-safra para as árvores em condições de stress em água mais acentuadas (tratamento C e D).

A quebra de produção generalizada em situações de contra-safra, como as do ano de 2007 pode ser, segundo Serrano *et al.* (1998), de 90% do ano de safra. Em relação ao território nacional, a quebra de produção na campanha de 2007/2008 foi estimada em 50% sendo o principal motivo para este decréscimo atribuído às condições climatéricas adversas registadas no período de floração, mais concretamente nos primeiros dez dias do mês de maio, quando se registaram temperaturas elevadas, muito anormais para a época, seguidas de temperaturas também anormalmente baixas para a época (<http://www.confagri.pt>).

Em 2006, em resposta aos vários tratamentos de rega, a produção de azeite por hectare foi menos sensível do que as variações de produção de azeitona: os tratamentos A e D registaram o menor e o maior rendimento em azeite respetivamente, com um diferencial entre os mesmos de 2.7% (informação detalhada no artigo 3, publicado na revista internacional *Agricultural Water Management* 97: 363–373 e apresentado no final deste capítulo). Estes resultados estão de acordo com os apresentados por Muñoz-Cobo (2005) que identificou os tratamentos regados como sendo aqueles em que a extração de azeite é normalmente inferior, apontando como causa a formação de emulsões entre a água e o azeite, o que dificulta a sua separação. Em contrapartida, os tratamentos A, B e C produziram significativamente mais



azeite por hectare do que o tratamento D (Quadro 4.1). Em geral, a produção de azeite variou entre 966 e 564 e kg azeite ha<sup>-1</sup>, surgindo os tratamentos B e D com as maiores e menores produções, respetivamente. Apesar de não terem sido detetadas diferenças significativas na produção de azeite por hectare entre os tratamentos regados, foi o tratamento B que registou as maiores produções.

Quadro 4.1 - Produção de azeitona e de azeite (media  $\pm$  desvio padrão), água aplicada e eficiência do uso da água para os diferentes tratamentos de rega.

Trat.	Produção de azeitona (kg/ha)		Produção de azeite (kg/ha)		Aplicação de água (mm)		Eficiência do uso da água (kg de azeite /mm água)		Eficiência do uso da água (kg de azeite /mm água aplicada)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
A	3744.4 $\pm$ 433.06ab <sup>1</sup>	504.5 $\pm$ 234.84a	652.6 $\pm$ 82.72a	118.5 $\pm$ 57.13a	1307.6 (880.1) <sup>2</sup>	1045.8 (742.7)	0.499	0.084	0.742	0.118
B	4800.7 $\pm$ 1164.49a	783.5 $\pm$ 506.0a	966.3 $\pm$ 235.81a	197.9 $\pm$ 127.80a	876.3 (448.8)	681.9 (378.7)	1.103	0.231	2.153	0.417
C	4031.1 $\pm$ 576.42ab	165.6 $\pm$ 172.91a	735.7 $\pm$ 105.2a	42.03 $\pm$ 43.62a	496.4 (62.5)	394.7 (91.5)	1.482	0.077	11.771	0.331
D	2875.0 $\pm$ 184.17b	108.9 $\pm$ 45.15a	564.0 $\pm$ 39.13b	30.7 $\pm$ 12.93a	427.5	303.2	1.319	0.071	—	—

<sup>1</sup>Tratamentos com a mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey  $P \leq 0.05$ .

<sup>2</sup> O primeiro valor representa o total de água aplicada (precipitação e rega) desde o início do desenvolvimento vegetativo (de 5 de março a 22 de dezembro de 2006 e de 10 de março a 18 de janeiro de 2007) o valor entre parêntesis corresponde à água aplicada pela rega.

Relativamente ao ano de 2007, os tratamentos A e D voltaram a registar o maior e o menor rendimento em azeite, com um diferencial de 4.8% entre eles. Quanto aos tratamentos B e C, não apresentaram diferenças significativas no rendimento em azeite, ainda que se tenha observado que todos os tratamentos registaram uma maior percentagem de azeite extraído em 2007, comparativamente a 2006. À semelhança da produção de fruto, não houve diferença significativa entre a produção de azeite por hectare entre os diferentes tratamentos. Contudo, apesar do decréscimo acentuado da produção de azeite em 2007, comparativamente a 2006, a maior produção continuou a ser registada no tratamento B, de 198 kg azeite ha<sup>-1</sup>, e a menor para o tratamento D, com 31 kg azeite ha<sup>-1</sup>. A redução na produção de fruto no ano de 2006 entre os tratamentos B e A foi de 22% e entre os tratamentos B e C foi de 16%, tendo sido a redução na produção de azeite entre os mesmos tratamentos de 33% e 24%, respetivamente. Em relação a 2007, a quebra de produção de fruto e azeite entre os tratamentos B e A foi de 36 % e 40%, respetivamente, tendo havido para o mesmo ano uma quebra de produção de azeitona e azeite de 79% entre os tratamentos B e C. Estes resultados contrastam com os obtidos por Lavee *et al.* (2007) que, num ensaio com uma cultivar de oliveira israelita, encontraram quebras de produção médias, para um período de quatro anos consecutivos, maiores para o fruto do que para o azeite. De forma similar, Moriana *et al.* (2003) obtiveram num olival maturo maiores quebras de produção para diferentes níveis de aplicação de água na produção de fruto do que na produção de óleo. Porém, Pérez-López *et al.* (2007) obtiveram quebras de produção de azeitona e azeite para diferentes níveis de aplicação de água muito semelhantes. Tal sugere que não existe um comportamento padronizado na quebra de produção de fruto e azeite quando os níveis de aplicação de água diminuem.

Em geral, foi o tratamento B, o que registou os maiores valores de produção de azeitona e de azeite, tendo em 2006 produzido mais 314 kg azeite ha<sup>-1</sup> com menos 431 mm de água aplicada do que no tratamento A. No ano de 2007 e, apesar da baixa generalizada de produção, o tratamento B com menos 364 mm de água produziu mais 79 kg azeite ha<sup>-1</sup> do que o tratamento A.

Quanto à eficiência do uso da água no ano de 2006 (Quadro 4.1), o tratamento C foi o mais eficiente com a produção de 11.8 kg de azeite por mm

de água aplicada. Apesar de se ter aplicado água apenas nas fases consideradas críticas para a cultura, a resposta não se fez sentir ao nível da eficiência do uso da água, o que confirma que esta eficiência aumenta em situações de stress hídrico, quando ocorre uma forte redução da transpiração atribuída ao fecho parcial dos estomas (Boland *et al.*, 1993; Tognetti *et al.*, 2007). O tratamento B foi o segundo mais eficiente em termos de uso da água aplicada, registando um rendimento de 2.2 kg de óleo por mm de água aplicada o que demonstra que, apesar de menos eficiente que o C, a sua produção foi superior em 231 kg azeite ha<sup>-1</sup>. O tratamento A foi o menos eficiente dos tratamentos. Em 2007 e, devido à redução acentuada de produção observada, houve uma quebra generalizada da eficiência do uso da água em todos os tratamentos.

Para além da produção de fruto, mediu-se também o crescimento de matéria vegetal responsável pelo aumento de dimensão da copa e interceção da radiação solar e, conseqüentemente, pelo processo fotossintético das árvores, visível no Quadro 4.2 que apresenta os resultados do tratamento estatístico referente ao crescimento dos ramos. Em 2006, o seu crescimento médio foi reduzido, com um comprimento final compreendido entre 1.6 cm por ano e 2.2 cm por ano e sem diferenças significativas entre tratamentos. No ano de 2007, o crescimento médio dos ramos foi ligeiramente superior com uma diferença generalizada entre os dois anos da ordem dos 200% para os tratamentos A, B e D e de 400% para o tratamento C, havendo ainda diferenças significativas entre os tratamentos regados e o tratamento conduzido em sequeiro. Os valores do comprimento médio dos ramos obtido em 2007 aproximaram-se dos apresentados por Melgar *et. al* (2008) para um olival regado de 18 anos situado em Córdoba e constituídos por árvores espaçadas de 7 x 7m, onde durante 9 anos foram implementadas três estratégias de rega. Estes autores analisaram estatisticamente o comprimento dos ramos para os diferentes tratamentos de rega e encontraram diferenças significativas apenas em 3 dos 9 anos em que decorreu o ensaio. O comprimento médio dos ramos foi de 5.47 e de 4.98 cm para os tratamentos correspondentes à rega plena e sequeiro, respetivamente.

Quadro 4.2 - Crescimento dos ramos (média  $\pm$  desvio padrão) para os tratamentos de rega implementados. Valores referentes aos anos de 2006 e 2007.

Tratamentos de rega	Comprimento dos ramos (cm)	
	2006	2007
A	2.18 $\pm$ 0.66a <sup>1</sup>	4.69 $\pm$ 3.61ab
B	1.63 $\pm$ 0.80a	3.62 $\pm$ 1.99b
C	1.57 $\pm$ 0.50a	6.18 $\pm$ 1.11a
D	1.46 $\pm$ 0.43a	3.45 $\pm$ 1.52c

<sup>1</sup>Tratamentos com a mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey  $P \leq 0.05$ .

Henar *et al.* (2002) avaliaram o comprimento dos ramos num olival regado de cultivar Morisca e obtiveram crescimentos anuais de 9 cm. Em contrapartida, Girona *et al.* (2000), num olival regado de cultivar Arbequina, obtiveram crescimentos anuais dos ramos de 15-25 cm por ano.

Face aos resultados obtidos em comprimento final dos ramos e analisando as produções obtidas nos anos de 2006 e 2007, parece haver evidência de que o reduzido comprimento médio dos ramos em 2006, comparativamente aos valores obtidos por outros autores, tenha condicionado a produção de azeitona em 2007; os ramos curtos e pouco vigorosos de 2006 poderão ter reduzido a floração e, conseqüentemente, a produção.

#### 4.3.2. Eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa na produção de azeite

A produção de azeite depende da quantidade de radiação solar absorvida pela copa e da maior ou menor eficiência das folhas para converterem esta energia em energia química através da fotossíntese. De acordo com Monteith (1977), a eficiência do uso da radiação mede a eficiência da conversão da energia solar interceptada pela copa, em matéria seca acumulada. A eficiência do uso da radiação fotossinteticamente ativa (EUR) corresponde à razão entre a produção de matéria seca e a radiação

fotossinteticamente ativa anual, interceptada pelo copado (Monteith, 1977). A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) interceptada pela copa é o factor determinante na produção de matéria seca, tornando-se o maior recurso de energia para a fotossíntese (Mariscal *et al.*, 2000a). Num olival, ao contrário da maioria das culturas, a folhagem horizontal é não homogénea e uma simples descrição da estrutura da copa não é suficiente para analisar as trocas de energia. A copa da oliveira ficará melhor definida através da combinação do espaço entre árvores (linha e entrelinha) da altura das mesmas, orientação das linhas, da projeção e volume da copa (Conner, 2005). Este autor refere ainda que para olivais tradicionais, onde a cobertura do solo é baixa, as árvores interceptam mais radiação incidente por unidade de área foliar do que as culturas de porte reduzido. Este comportamento é especialmente acentuado nas árvores que se localizam nas latitudes temperadas, onde o ângulo solar é baixo por vários meses do ano.

A quantidade de PAR interceptada é determinada pelas condições da radiação incidente, tal como as propriedades arquitetónicas e óticas da parcela (Mariscal *et al.*, 2000a). No caso concreto, a estimativa da PAR interceptada pela copa foi encontrada aplicando-se um modelo simples inicialmente descrito em Mariscal *et al.* (2000a), posteriormente simplificado em Orgaz *et al.* (2007) e usado também por Iniesta *et al.* (2009), e já descrito no capítulo 2, secção 2.2.4.

De acordo com o Quadro 4.3 no ano de 2006, os valores da EUR para a produção de azeite variaram entre de 0.12 g MJ<sup>-1</sup> e 0.08 g MJ<sup>-1</sup> para os tratamentos regados A e B e para o tratamento D, respetivamente. Os tratamentos regados foram os mais eficientes no uso da radiação, com maiores conversões da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela copa para a produção de azeite. Em contrapartida, o tratamento D, sem rega e em regime de sequeiro, foi o menos eficiente, em cerca de 33% comparativamente aos tratamentos A e B, diferenciando-se claramente em virtude das limitações hídricas impostas que reduziram a sua eficiência no uso da radiação na produção de azeite. No ano de 2007, os valores da EUR foram bastante inferiores aos de 2006 indicando uma taxa de conversão da radiação fotossinteticamente ativa em azeite muito reduzida. Porém, continuaram a ser os tratamentos regados os que interceptaram mais radiação. Em suma, a EUR



decreceu com o aumento do déficit de água no solo, indiciando um fecho estomático e uma redução na produção de biomassa.

Quadro 4.3 - Produção de azeitona e azeite, PAR intercetada pela copa, eficiência do uso da radiação para a produção de azeite. Parâmetros avaliados durante os anos de 2006 e 2007 e considerando os tratamentos A, B, C e D.

Trat. de rega	Produção de azeitona (g m <sup>-2</sup> )	Produção de azeite (g m <sup>-2</sup> )	PAR intercetada pela copa (MJ m <sup>-2</sup> )	EUR para a produção de azeite (g MJ <sup>-1</sup> )
<b>Ano: 2006</b>				
A	374.44	65.26	574.64	0.12
B	480.07	96.63	783.87	0.12
C	403.11	73.57	666.17	0.11
D	287.50	56.40	666.44	0.08
<b>Ano: 2007</b>				
A	50.45	11.85	574.80	0.021
B	78.35	19.79	799.17	0.025
C	16.56	4.20	679.28	0.006
D	10.89	3.07	679.55	0.005

Em 2006 a quantidade de azeite produzida por unidade de radiação fotossinteticamente ativa intercetada pela copa nos tratamentos regados foi inferior à obtida por Villalobos *et al.* (2006), num olival regado no sul de Espanha (0.17 g MJ<sup>-1</sup>).

#### 4.3.3. Parâmetros de qualidade do azeite produzido

Os parâmetros de qualidade avaliados foram: acidez, índice de peróxidos, absorvância no ultravioleta e análise sensorial. A rega, como técnica cultural que melhora significativamente a produção de azeitona, pode também interferir na qualidade do azeite extraído. O sabor e aroma do azeite são influenciados pelo índice de maturação dos frutos, sendo assim um indicador a

ter em conta quando se pretende a produção de um azeite com características sensoriais e químicas bem definidas. Neste contexto, faz-se nesta seção uma análise dos parâmetros de qualidade dos azeites provenientes dos diferentes tratamentos de rega.

Os resultados apresentados no Quadro 4.4 mostram que a acidez, expressa em percentagem de ácido oleico, variou entre 0.77 (tratamento A) e 0.53 (tratamentos C e D). Entre os tratamentos sujeitos a rega deficitária (tratamentos B e C) e o tratamento conduzido em sequeiro não se verificaram diferenças significativas; no entanto, entre os tratamentos A e D houve diferenças significativas, apresentando os azeites provenientes do tratamento melhor regado uma acidez, expressa em percentagem de ácido oleico, 0.24 superior à do tratamento D.

No ano de 2007, a percentagem de acidez, expressa em percentagem de ácido oleico, não foi estatisticamente diferente entre os azeites oriundos dos tratamentos sujeitos a rega deficitária (tratamentos B e C) e o tratamento conduzido em sequeiro. Porém, entre os tratamentos A e D houve diferenças significativas. O azeite proveniente do tratamento A registou uma percentagem de acidez, expressa em percentagem de ácido oleico, de 0.73 e ligeiramente superior à apresentada pelos restantes tratamentos em cerca de 0.23 superior à do tratamento D. Os valores da acidez dos azeites obtidos em 2006 e em 2007 foram inferiores, apesar de muito próximo do limiar, no caso dos azeites do tratamento A, ao limite máximo definido no regulamento EEC N<sup>o</sup> 1989/2003 para os azeites virgem extra ( $\leq 0.8\%$ ). A influência da quantidade de água aplicada na acidez do azeite foi consistente e os resultados obtidos são concordantes com os apresentados por Berenguer *et al.* (2006) que, num estudo efetuado com a variedade Arbequina, verificaram que num dos anos o azeite proveniente dos tratamentos bem regados apresentou uma maior percentagem de acidez, ainda que com menores aplicações de água.

Em contrapartida, Muñoz-Cobo (2005) verificou sempre maior acidez nos azeites provenientes de árvores mais bem regadas do que de árvores em condições de rega deficitária ou sequeiro. Contudo, Dettori *et al.* (1989) e Tovar *et al.* (2002) concluíram que a acidez do azeite não era influenciada pela rega.

Quadro 4.4 - Índices de qualidade do azeite proveniente da cv. Cordovil. Consideraram-se os 4 tratamentos (média±desvio padrão).

Índices de qualidade	Tratamentos de rega	Época de rega	
		2006	2007
Acidez (% ácido oleico)	A	0.767±0.058a <sup>1</sup>	0.733±0.058a
	B	0.667±0.058ab	0.567±0.058ab
	C	0.533±0.058b	0.533±0.058b
	D	0.533±0.058b	0.500±0.100b
Índice de peróxidos (meq O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> )	A	9.433±0.115b	6.033±0.153d
	B	6.600±0.100c	6.933±0.153c
	C	9.067±0.058b	13.033±0.153a
	D	10.267±0.251a	10.000±0.200b
K <sub>270</sub>	A	0.144±0.004c	0.123±0.004b
	B	0.157±0.004b	0.122±0.004b
	C	0.177±0.003a	0.156±0.003a
	D	0.180±0.004a	0.121±0.004b
K <sub>232</sub>	A	1.792±0.004a	1.630±0.030a
	B	1.838±0.004a	1.549±0.026ab
	C	1.789±0.003a	1.620±0.056a
	D	1.552±0.004b	1.450±0.05b

<sup>1</sup>Tratamentos com a mesma letra na mesma coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey P≤0.05.

Nos dois anos em estudo, o azeite proveniente dos vários tratamentos registou valores de índice de peróxidos inferiores ao limite definido pela legislação ( $\leq 20$  meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>). Em 2006, os valores do índice de peróxidos estiveram compreendidos entre 10.3 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> e 6.6 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> e registaram-se nos tratamentos D e B, respetivamente. A análise estatística aos valores do índice de peróxidos revelaram que os tratamentos foram significativamente diferentes entre si, à exceção dos tratamentos A e C. Em 2007, os valores do índice de peróxidos estiveram compreendidos entre 13.0 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> e 6 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> e registaram-se nos tratamentos C e A; importa referir que todos os tratamentos foram significativamente diferentes entre si.

Apesar da resposta do índice de peróxidos aos níveis de aplicação de água não ser consistente para os anos de 2006 e 2007, fica claro que os azeites provenientes dos tratamentos sujeitos a maior stress hídrico (Tratamentos D e C) registaram os maiores valores de índice de peróxidos e que o valor desde índice decresceu nos azeites provenientes dos tratamentos melhor regados (Tratamentos A e B). Estes resultados estão em concordância com os apresentados por Ben-Gal *et al.* (2011), quando analisaram a qualidade do azeite obtido para diferentes níveis de aplicação de água.

A literatura não fornece indicações precisas quanto à influência da rega no valor do índice de peróxidos. Contrariamente aos valores obtidos e anteriormente descritos, vários estudos apontam para maiores índices de peróxidos em tratamentos bem regados (Sales *et al.*, 1997; Tovar *et al.*, 2002; Silva, 2008); há ainda estudos que mostram não haver influência da rega no valor do índice de peróxidos (Patumi *et al.*, 1999).

O Quadro 4.4 informa que durante o ano de 2006, a absorvância do ultravioleta no comprimento de onda 270 nm ( $K_{270}$ ), variou entre 0.18 e 0.14 nos tratamentos D e A, respetivamente. O tratamento A distinguiu-se significativamente dos restantes e os tratamentos D e C não registaram diferenças significativas entre si; no ano de 2007, os valores deste índice variaram entre 0.12 e 0.16, valores ligeiramente inferiores aos obtidos em 2006, e registaram-se nos tratamentos C e D, respetivamente; destacou-se o valor de  $K_{270}$  obtido no azeite proveniente do tratamento C, não tendo havido diferenças significativas entre os restantes tratamentos. Os resultados obtidos estão em concordância com os apresentados por Berenguer *et al.* (2006), os quais no ano em que todos os tratamentos receberam menos água, à semelhança de 2007, a diferença estatística nos valores de  $K_{270}$  entre os diferentes tratamentos foi atenuada. Em contrapartida, outros estudos indicam que o valor de  $K_{270}$  não é influenciado pela rega (Tovar *et al.*, 2002; Silva, 2008; Gómez-Rico *et al.*, 2009).

No que diz respeito à absorvância do ultravioleta no comprimento de onda 232 nm ( $K_{232}$ ) nos dois anos do ensaio, foi menor no tratamento de sequeiro, tratamento D, e não apresentou diferenças significativas nos diferentes tratamentos regados (Quadro 4.4). Estes resultados são contraditórios com os obtidos por Muñoz-Cobo (2005), uma vez que este autor

obteve os maiores valores de  $K_{232}$  nos azeites produzidos em sequeiro. Silva (2008) não obteve diferenças de grandeza nos valores de  $K_{232}$  para níveis de aplicação de água distintos. É de referir que os valores de  $K_{270}$  e  $K_{232}$  obtidos nos diferentes tratamentos ao longo dos dois anos foram inferiores aos limites definidos pela legislação ( $\leq 0.22$  para  $K_{270}$  e  $2.50$  para  $K_{232}$ ).

Assim, em termos globais, constata-se que nos anos de 2006 e 2007, os azeites provenientes dos diferentes tratamentos foram classificados de acordo com a legislação EEC N<sup>o</sup> 1989/2003, como sendo de alta qualidade.

Quanto à avaliação das características sensoriais, ou organoléticas, dos azeites provenientes dos tratamentos A, B, C e D (Quadro 4.5) verificou-se o seguinte: em 2006, todo o azeite produzido nos diferentes tratamentos registou como amargo, um valor muito reduzido cerca de 0.5; já em 2007, esse atributo de sensação de amargo esteve ausente em todos os tratamentos, tendo-se obtido azeites considerados doces que, em geral, são os preferidos dos consumidores; quanto ao atributo picante, todos os azeites registaram um quase impercetível picante, cerca de 1 numa escala de 0 a 5, que se manteve inalterável nos dois anos em estudo. De registar que apenas o atributo frutado foi superior, cerca de 3 numa escala de 0 a 5, nos tratamentos com maior défice hídrico (Tratamentos C e D), enquanto que nos os tratamentos A e B a sensação de frutado foi mais baixa, cerca de 2 numa escala de 0 a 5. Globalmente, a avaliação sensorial indica que os azeites menos regados apresentaram nos dois anos um sabor a frutado que é de média perceção, enquanto que nos regados este atributo foi de perceção ligeira.

Globalmente, o azeite do tratamento C obteve em 2006 a maior valorização organolética, sendo que na escala de 1 a 9 foi de 8. Em 2007, continuou entre os de maior valorização organolética em conjunto com os tratamentos B e D, ou seja de índice organolético 7.5. Em geral, e para os dois anos, todas as amostras obtiveram uma apreciação global superior a 6.5 o que, de acordo com o regulamento CE N<sup>o</sup> 1893/2003, permite classificá-las como sendo de qualidade superior e, por isso, azeites “virgem extra”. Face aos resultados, quer químicos quer sensoriais, é legítimo afirmar que os azeites provenientes dos quatro tratamentos de rega apresentaram um perfil de qualidade que lhes permite serem classificados como azeites de alta qualidade. Assim, o factor rega não parece ter tido papel negativo na qualidade do azeite,

havendo apenas a salientar que o azeite do tratamento A apresentou uma acidez próxima do limite regulamentado para os azeites virgem-extra e que obteve as menores pontuações no painel teste; em contrapartida, os azeites dos tratamentos B, C e D registaram menores valores de acidez e foi o tratamento C o que maior pontuação teve no painel teste.

Quadro 4.5 - Atributos sensoriais do azeite proveniente da cv. Cordovil para os quatro tratamentos de rega.

Índices de qualidade	Tratamentos de rega	Época de rega	
		2006	2007
Frutado <sup>a</sup>	A	2	2
	B	2	2
	C	3	3
	D	3	3
Amargo	A	0.5	0
	B	0.5	0
	C	0.5	0
	D	0.5	0
Picante	A	1	1
	B	1	1
	C	1	1
	D	1	1
Pontuação Painel teste <sup>b</sup>	A	7.5	7
	B	7.5	7.5
	C	8	7.5
	D	7.5	7.5

<sup>a</sup> Atributos sensoriais avaliados numa escala de 0-5 onde 0 imperceptível e 5 extremo.

<sup>b</sup> classificação geral avaliada numa escala de 0-9 onde 0 corresponde à pior qualidade e 9 a qualidade excepcional.

Da análise dos parâmetros de qualidade química dos diferentes azeites e da abordagem feita pela literatura, pode inferir-se que o factor rega não tem uma influência consistente nos parâmetros de qualidade química do azeite.

Segundo Montedoro e Servili (1991) citado em Tovar (2002), a composição do azeite é o resultado de uma série de interações entre factores genéticos, ambientais e tecnológicos que marcam a fase de desenvolvimento e maturação do fruto; Lotti *et al.* (1982) verificaram que o ácido oleico aumenta na polpa do fruto quando o clima é mais frio.

No que diz respeito ao índice de maturação realizou-se uma primeira avaliação deste parâmetro em 2007, e verificou-se que o seu valor não foi significativamente diferente entre os tratamentos C e D, ainda que o tratamento D tenha registado um maior valor de índice de maturação, cerca de 3.57, numa escala de 0 a 7 a qual foi ligeiramente superior à dos restantes tratamentos. O tratamento A foi o que teve maior atraso no amadurecimento do fruto, registando por isso um valor do índice de maturação significativamente mais reduzido, cerca de 2.73 numa escala de 0 a 7. Quanto à segunda amostragem, as azeitonas provenientes do tratamento D tiveram ainda o maior índice de maturação cerca de 4.85, mas sem diferença significativa entre os tratamentos A, B e C. De salientar que entre a primeira e a segunda amostragem choveu cerca de 31 mm, o que sugere que tal facto terá tido influência no retardamento do amadurecimento dos frutos, facto já registado por Gratten *et al.* (2006) e Motilva *et al.* (2000). Tendo a colheita ocorrido 15 dias após a última amostragem, todas as azeitonas terão ultrapassado o intervalo do índice de maturação expetável na colheita para a maioria dos azeites, que é de 2.5 a 4.5.

#### **4.3.4. Relação entre os mecanismos fisiológicos e a produtividade**

O potencial hídrico e a condutância são medidas do estado hídrico da planta. O potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ) e o potencial hídrico dos ramos ( $\Psi_{stem}$ ) têm especial relevância já que são indicadores, por um lado da capacidade da oliveira para re-hidratar durante a noite e restabelecer o seu estado hídrico e, por outro, da capacidade da oliveira para evitar decréscimo acentuado do estado energético da água das folhas em situações de maior défice hídrico. A condutância estomática mede a maior ou menor abertura dos



estomas, indicando assim em cada momento a capacidade para as árvores absorverem dióxido de carbono e produzirem fotoassimilados.

#### 4.3.4.1. Potencial hídrico foliar

A tendência do  $\Psi_b$  e  $\Psi_{stem}$  durante os períodos estivais de 2006 está presente na Figuras 4.9. Relativamente ao  $\Psi_b$  a Figura 4.9 mostra que para todos os tratamentos, o potencial hídrico decresceu gradualmente durante a manhã atingindo os valores mínimos por volta do meio-dia solar. No decurso do período estival, as oliveiras do tratamento A registaram valores de  $\Psi_b$  compreendidos entre -0.9 e -1.05 MPa, valores superiores aos do tratamento B (-1 e -1.25 MPa) e do tratamento C (-0.9 e -1.65 MPa). Fernández *et al.* (1997) referiram que estudos efetuados em espécies lenhosas sugerem que valores de  $\Psi_b$  de -0.50 MPa podem ser considerados o limite para uma re-hidratação completa das árvores durante a noite. Tendo em conta estes estudos e analisando os valores de  $\Psi_b$  obtidos em todos os tratamentos, pode afirmar-se que a re-hidratação das árvores nos dias em que se efetuaram as medições não foi completa e que foram as árvores do tratamento C que mostraram maior dificuldade para re-hidratar durante a noite, indicando nos meados de agosto e setembro um défice hídrico acentuado de -1.5 MPa e -1.65 MPa acompanhados de reservas de água no solo igualmente baixas (vd. Quadro 2.9). Porém, é de referir que existiu uma contradição entre os valores de *REW* e os valores de  $\Psi_b$ , bastante evidente nos tratamentos A e B. De facto, registaram-se nos dois tratamentos valores de *REW* elevados ao longo de toda a época de rega (vd. Quadro 2.9); no entanto, os valores de  $\Psi_b$  indicaram uma dificuldade de re-hidratação das árvores durante a noite a reforçar a conclusão já apresentada no final do capítulo 2, no que concerne à incerteza de expansão do sistema radical destas oliveiras antigas.

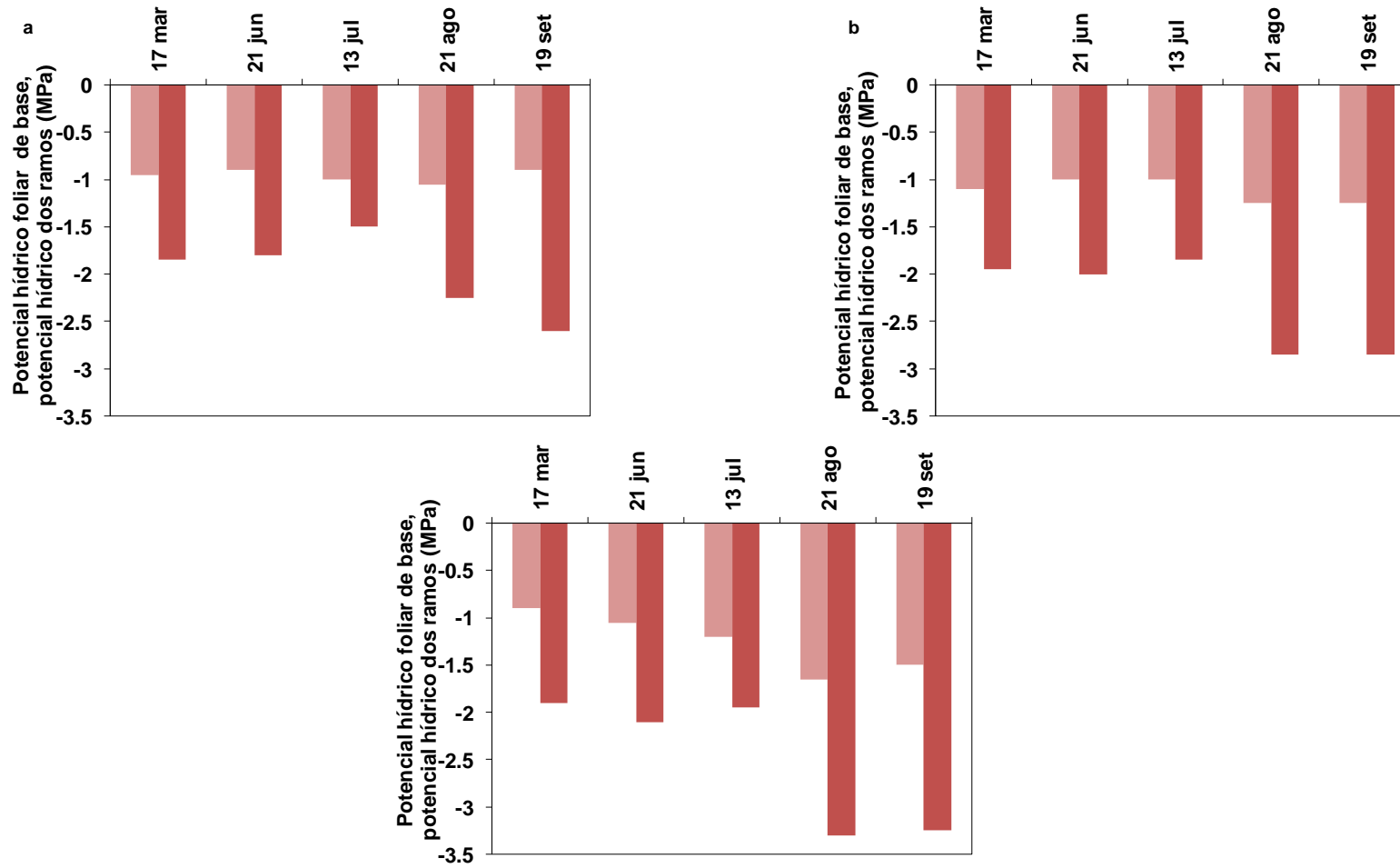


Figura 4.9 - Potencial hídrico foliar de base e potencial hídrico mínimo registado nos tratamentos regados (A, B e C) durante a época estival de 2006. ■ potencial hídrico foliar de base; ■ potencial hídrico dos ramos. a. tratamento A, b. tratamento B e c. tratamento C.

Em 2006, a tendência do potencial dos ramos ( $\Psi_{stem}$ ) foi semelhante em todos os tratamentos com o tratamento A a registrar os maiores valores, compreendidos entre -1.5 MPa e -2.6 MPa e o tratamento C a registrar os menores valores, os quais estiveram compreendidos entre -1.9 MPa e -3.25 MPa. As medições efetuaram-se em cinco datas e verificou-se que, nos três primeiras dias, as árvores dos tratamentos B e C registaram valores de  $\Psi_{stem}$  próximos de -2 MPa e as do tratamento A, valores do  $\Psi_{stem}$  próximos de -1.72 MPa. Nos restantes dois dias, o valor do  $\Psi_{stem}$  foi mais baixo e esteve próximo de -2.5 MPa no tratamento A e de -3MPa nos tratamentos B e C. Porém, nos últimos dois dias de medições do  $\Psi_{stem}$  os valores do  $\Psi_b$  foram mais baixos em todos os tratamentos, manifestando as árvores uma dificuldade na re-hidratação acusando assim um stress hídrico ao início do dia que parece ter um efeito nos menores valores de  $\Psi_{stem}$  obtidos ao meio-dia solar.

No ano de 2007, os valores do  $\Psi_b$  avaliados durante o período compreendido entre 29 de maio e 28 de setembro foram mais elevados do que os registados em 2006 (Figura 4.10), acompanhados de valores de REW ligeiramente superiores aos obtidos em 2006 (vd. Quadro 2.9). As árvores do tratamento A atingiram valores de  $\Psi_b$  mais elevados e compreendidos entre -0.34 MPa e -0.90 MPa; as árvores do tratamento D, que apenas beneficiaram da água da chuva, foram as que registaram valores mais baixos entre -0.46 e -1.55 MPa, indicadores de uma maior dificuldade das árvores para re-hidratarem durante a noite. A Figura 4.10, mostra ainda que os valores de  $\Psi_{stem}$  no primeiro dia de medições, 29 de maio de 2007, estiveram compreendidos entre -1.1 MPa e -1.4 MPa, decrescendo para todos os tratamentos a partir dessa data, como resultado dos maiores valores do déficit de pressão de vapor, influenciando na transferência de água para a atmosfera. À semelhança de 2006, foi o tratamento A que registou os maiores valores de  $\Psi_{stem}$  sendo que o menor valor, cerca de -2.7 MPa, foi atingido no dia 7 de agosto. Ainda à semelhança de 2006, a estratégia de rega imposta ao tratamento B foi mais benéfica para as árvores do que a estratégia de rega implementada no tratamento C, o que se manifestou pelos maiores valores de  $\Psi_{stem}$  que estiveram compreendidos entre -1.15 MPa e -2.7 MPa no tratamento B e entre -1.4 MPa e -2.85 MPa no tratamento C. No que respeita ao tratamento D, e

como era previsível, os valores do  $\Psi_{stem}$  foram inferiores aos dos restantes tratamentos e decresceram desde meados de junho até ao final de setembro. Os valores de  $\Psi_{stem}$  atingiram os -3.15 MPa no final de setembro apesar de uma ligeira recuperação no dia 4 de setembro de 2007, em virtude de precipitação que ocorreu anteriormente (17.5 mm). De modo a perceber a interferência das variáveis climáticas no valor do  $\Psi_{stem}$ , analisou-se a relação entre o potencial hídrico dos ramos e o déficit de vapor no ano de 2006 (Figura 4.11a) e no ano de 2007 (Figura 4.11b). Da análise da Figura 4.11a, depreende-se que o comportamento das duas variáveis é distinto em 2006 o que eventualmente poderá ser justificado por um reduzido número de medições. No ano de 2007 (Figura 4.11b), verifica-se que para défices de pressão de vapor compreendidos entre 2 e 3 kPa a evolução do  $\Psi_{stem}$  é semelhante a do déficit de pressão de vapor com os valores do  $\Psi_{stem}$  a decrescerem para acréscimos de  $D_a$ . Porém, para valores de  $D_a$  fora do intervalo, as variáveis não manifestaram comportamento semelhante.

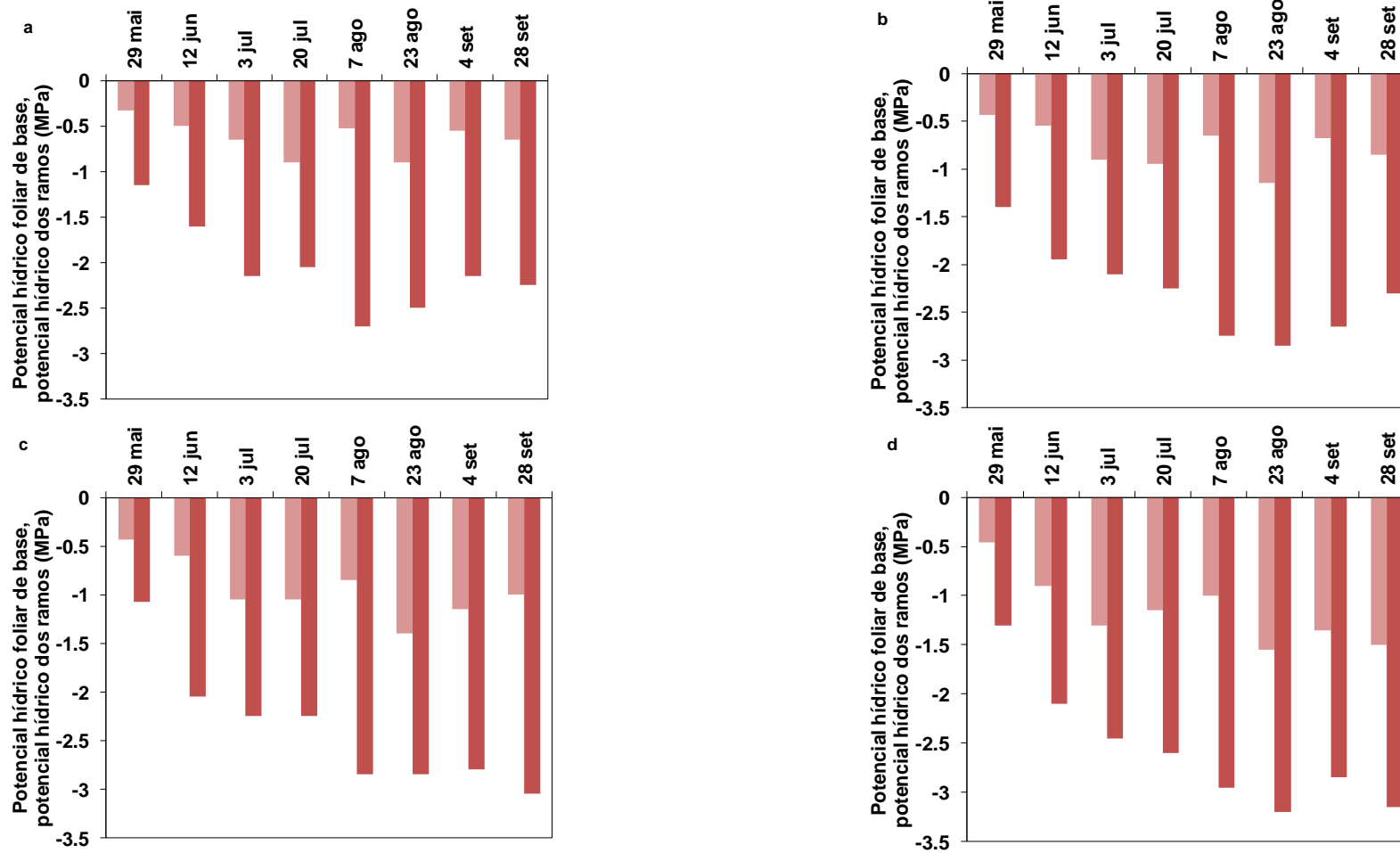


Figura 4.10 - Potencial hídrico foliar de base e potencial hídrico mínimo registado nos tratamentos regados (A, B e C) durante a época estival de 2006. ■ potencial hídrico foliar de base, ■ potencial hídrico mínimo. a. tratamento A, b. tratamento B, c. tratamento C e d. tratamento D.

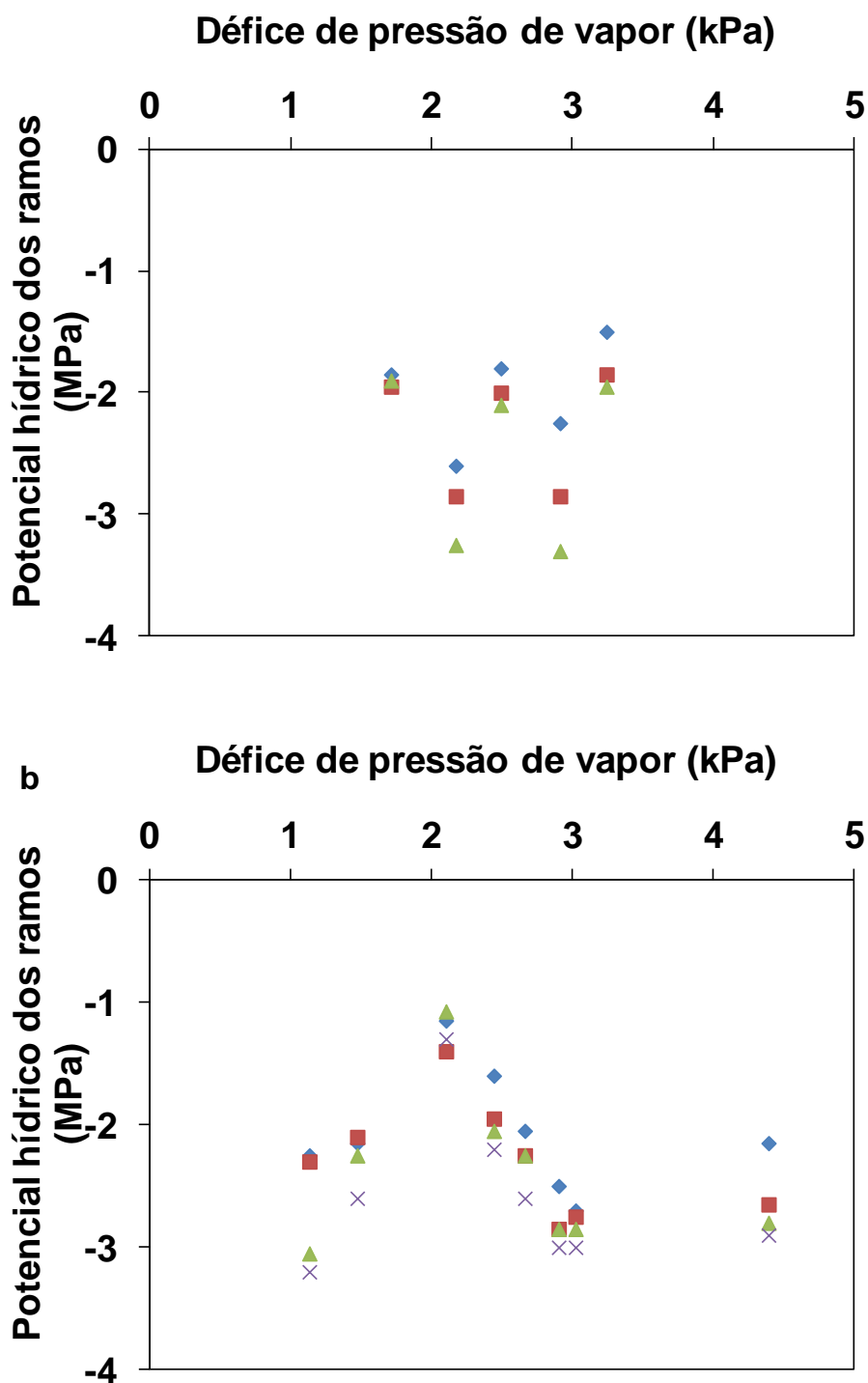


Figura 4.11 - a. relação entre o défice de pressão de vapor e o potencial hídrico dos ramos ao meio-dia solar nos diferentes tratamentos de rega em 2006; b. relação entre o défice de pressão de vapor e o potencial hídrico dos ramos ao meio-dia nos diferentes tratamentos de rega em 2007. ◆ tratamento A; ■ tratamento B; ▲ tratamento C; × tratamento D.

#### 4.3.4.2. Condutância estomática

O comportamento estomático regulado pela maior ou menor abertura estomática é um dos indicadores que interfere nas taxas de transpiração das plantas, sendo com frequência usado como ferramenta na programação da rega. A condutância estomática decresce ao longo da manhã e atinge os menores valores próximo do meio-dia solar, daí a importância de fazer a sua medição ao meio-dia solar ( $g_s$ ).

No ano de 2006 (Figura 4.12a), os valores de  $g_s$  no tratamento A, oscilaram entre  $0.079 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0.176 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , enquanto que no tratamento B estiveram compreendidos entre  $0.082 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0.154 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e no tratamento C, entre  $0.073 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0.113 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . As árvores dos tratamentos A e B registaram os valores mais baixos na primavera, dia 17 de maio ainda que, nesse dia o teor de humidade no solo fosse de  $0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , valor superior ao correspondente à capacidade de campo. Porém, havia muita nebulosidade, a radiação líquida ao meio-dia solar era baixa cerca de  $431.2 \text{ W m}^{-2}$ , o défice de pressão de vapor era de  $2.9 \text{ kPa}$  e a temperatura do ar de  $31^\circ\text{C}$ .

As árvores do tratamento B, em condições de SDI, mostraram um comportamento muito semelhante às do tratamento A, mas com valores de  $g_s$  ligeiramente mais baixos. As árvores do tratamento C, nos três primeiros dias em que se efetuaram as medições, apresentaram valores de  $g_s$  próximos de  $0,10 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Apesar das árvores do tratamento C se encontrarem a ser regadas no dia 13 de julho, os valores de  $g_s$  estiveram aquém dos medidos nas árvores do tratamento A. No dia 21 de agosto, registou-se o menor valor de  $g_s$  quando o teor de humidade do solo era de  $0.155 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , valor abaixo do correspondente ao ponto de emurchecimento permanente. Em meados de setembro, os valores de  $g_s$  tiveram uma ligeira subida acompanhada de valores de  $\Psi_{\min}$  baixos, o que não é justificável, nem por um acréscimo do teor de humidade do solo, nem por um acréscimo da radiação líquida, mas apenas por uma redução no défice de pressão de valor de  $0.74 \text{ kPa}$ , comparativamente ao dia 21 de agosto.



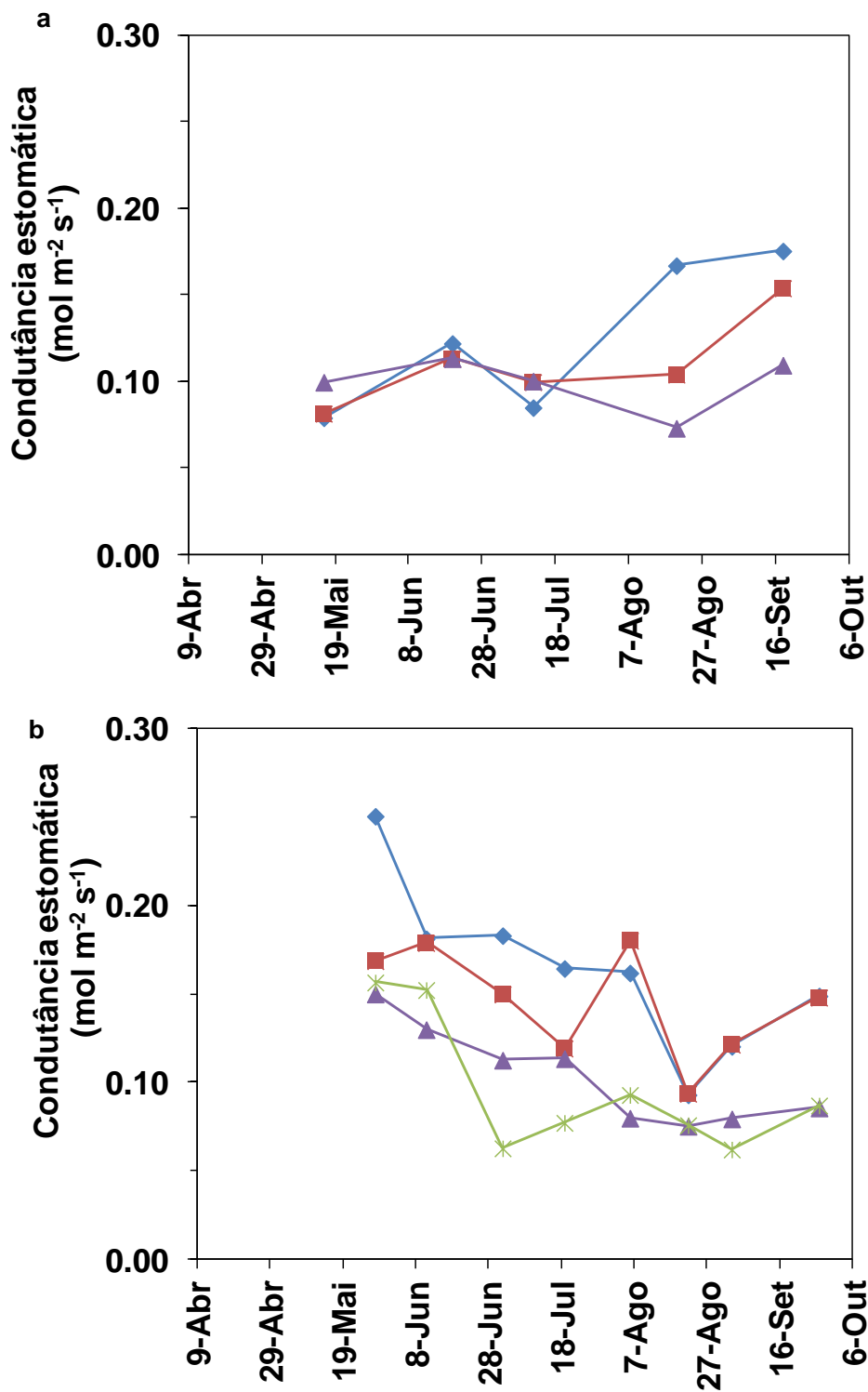


Figura 4.12 - Condutância estomática medida ao meio-dia solar (13:30 GMT).

—◆— tratamento A; —■— tratamento B; —▲— tratamento C; —\*— tratamento D. a. 2006 e b. 2007.

O conjunto de valores obtidos em 2007 (Figura 4.12b) permite observar que as árvores do tratamento A registaram os maiores valores de  $g_s$ , os quais estiveram compreendidos entre  $0.093 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0.251 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , sendo que o maior valor de  $g_s$  se registou na primavera, dia 29 de maio e o menor valor registou-se no dia 23 de agosto, porque houve uma pequena avaria no sistema de rega e as árvores desenvolveram mecanismos de defesa contra a redução do teor de água no solo através do fecho estomático, pelo que o valor  $g_s$  baixou para  $0.093 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . No que diz respeito ao tratamento B, os valores estiveram compreendidos entre  $0.093 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e  $0.179 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e em 3 das 8 medições, registaram valores de  $g_s$  inferiores aos do tratamento A; nos restantes dias, as árvores mostraram comportamento estomático semelhante às árvores em conforto hídrico. Relativamente às árvores do tratamento C, ainda na primavera, dia 29 de maio, começaram por apresentar valores de  $g_s$  próximos do tratamento D, cerca de  $0.157 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , para no dia 20 de julho, registarem valores próximos do tratamento B. No dia 7 de agosto, os valores de  $g_s$  decresceram para valores próximos de  $0.080 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , os quais se mantiveram até ao final do verão. As árvores do tratamento D, durante os três primeiros dias de medições, registaram um decréscimo nos valores de  $g_s$ , porque também a água no solo foi diminuindo, ocorrendo entre o primeiro dia de medições e o terceiro um diferencial de água no solo de  $0.071 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para uma variação de  $g_s$  de  $0,094 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

A análise conjunta dos parâmetros fisiológicos, potencial hídrico foliar e condutância estomática permite afirmar que os valores destes indicadores nos tratamentos C e D foram na maioria do período de tempo em análise e comparativamente aos tratamentos A e B mais baixos. Quando regadas, as árvores do tratamento C recuperaram parcialmente após stress hídrico e os valores dos parâmetros fisiológicos aproximaram-se dos obtidos em B, apenas 6 dias e 10 dias após a rega se ter iniciado em 2006 e 2007, respetivamente. Este comportamento do tratamento C está em concordância com o já observado por Fernández *et al.* (1996) que, ao medirem a velocidade do fluxo de seiva nas raízes e a diferentes profundidades, em oliveiras sujeitas a stress hídrico severo, verificaram que, mesmo havendo um incremento na absorção de água após a rega, a capacidade da condutância das raízes não tinha sido

totalmente recuperada depois do reumedecimento do solo, provavelmente devido à cavitação dos vasos xilémicos.

Os tratamentos C e D apresentaram condições favoráveis a menor condutância estomática, o que potenciou menor concentração de dióxido de carbono e baixas taxas de fotossíntese com redução na produção de biomassa e quebras de produção. Em 2006, a quebra de produção de azeitona entre o tratamento mais produtivo, tratamento B e o tratamento D foi significativa cerca de 1925.7 kg, respetivamente. É provável que o stress hídrico a que as árvores dos tratamentos D ficaram sujeitas durante o verão não tenha sido recuperado logo a partir do final de outubro, quando a estação de chuvas teve início apesar do fruto ainda se encontrar em fase, quer de acumulação de óleo quer de crescimento. De acordo com Muñoz-Cobo (2005), as chuvas outonais são as que proporcionam maior rentabilidade em azeite. A produção de B e C não foi afetada pelo stress a que as árvores ficaram sujeitas durante o verão o que está em conformidade com os resultados obtidos por Fereres *et al.* (1996), segundo os quais um stress moderado no verão não afeta o rendimento, uma vez que as árvores recuperam o status de água quando há uma recarga do perfil do solo. No ano de 2007, as produções decresceram consideravelmente não havendo diferenças significativas entre tratamentos, o que justamente não permite tirar ilações relativamente à interferência dos valores parâmetros fisiológicos na produção final.

#### **4.4. Conclusão**

Considerando as estratégias de rega aplicadas ao olival durante os anos de 2006 e 2007, concluiu-se o seguinte:

- (1) Houve uma diferenciação de produção entre os tratamentos regados (A, B e C) e o tratamento D em regime de sequeiro, tendo os tratamentos regados maior produção, beneficiando do complemento de água da rega;

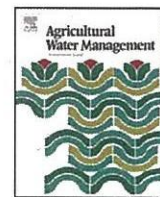
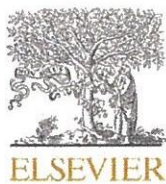
- (2) A rega não parece ter atenuado ou reduzido a severidade da contra-safra, provavelmente pela recente introdução da rega neste olival com mais de 80 anos;
- (3) Os tratamentos de rega deficitária foram mais produtivos, principalmente o tratamento B, indiciando a não proporcionalidade entre acréscimos de produção e acréscimos de água aplicada para olivais regados no Alentejo;
- (4) O comportamento químico e sensorial do azeite proveniente dos diferentes tratamentos mostrou que a rega não interferiu na qualidade comercial do azeite, porque os valores dos parâmetros químicos e sensoriais estavam dentro do que é regulamentado para os azeites virgem-extra.
- (5) A influência da rega nos parâmetros químicos do azeite carece de maior número de estudos já que os resultados obtidos em várias linhas de trabalho não são consensuais.
- (6) Em ano de safra, os tratamentos B e C mostraram-se mais eficientes na produção de biomassa por mm de água aplicada o que permite concluir que são alternativas bastantes promissoras em regiões semi-áridas como o Alentejo;
- (7) Os tratamentos regados foram os mais eficientes na intercepção da radiação e no uso para a produção. Porém, em anos de contra-safra essa eficiência decresce em virtude do elevado custo energético dispendido na acumulação de azeite no ano anterior;
- (8) O crescimento dos ramos foi menos acentuado em ano de safra, originando ramos curtos e pouco vigorosos que condicionaram a fraca produção de 2007, dado que o ciclo da oliveira é bianual;
- (9) Os baixos valores da condutância estomática registados no tratamento D, em situação de déficit hídrico severo, interferiram nos valores da produção final que, mesmo em ano de safra, foi baixa neste tratamento.

A informação apresentada neste capítulo é ainda complementada com os resultados obtidos e descritos no artigo 3:

Ramos, A.F. & Santos, F.L. (2010). **Yield and olive oil characteristics of a low-density orchard (cv. Cordovil) subjected to different irrigation regimes** *Agricultural Water Management* 97: 363–373

### **4.5. Artigo 3**

---



## Yield and olive oil characteristics of a low-density orchard (cv. Cordovil) subjected to different irrigation regimes

Alice F. Ramos\*, Francisco L. Santos

Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, ICAAM, University of Évora, 7800-661 Beja, Portugal

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 30 April 2009

Accepted 11 October 2009

#### Keywords:

Olive orchard transpiration  
Olive orchard (cv. Cordovil)  
Olive oil  
Quality  
Water use of olive trees in southern Portugal

### ABSTRACT

The impact of different irrigation scheduling regimes on the quantity and quality of olive oil from a low-density olive grove in southern Portugal was assessed during the irrigation seasons of 2006 and 2007. Olive trees were subjected to one of the following treatments: A—full irrigation; B—sustained deficit irrigation (SDI) with 60% of  $E_{Tc}$  water applied with irrigation; C—regulated deficit irrigation (RDI) with irrigation water applied at three critical phases: before flowering, at the beginning of pit hardening and before crop harvesting and D—rain-fed treatment. Olive oil yield was significantly higher than rain-fed conditions in 2006, an “on year” of significant rainfall during summer. No significant yield differences were observed in the following “off year”. Among the irrigated treatments, olive oil production of treatment B was 32.5% and 40.1% higher in 2006 and 2007, respectively than the fully irrigated treatment A, despite receiving 49% less irrigation water. Such strategy could allow for an efficient use of water in the region, of very limited available resources, and for modest but important oil yield increase. Nonetheless, on the “on year” of 2006 treatment C used 13.9% of the water applied to treatment B and produced only 23.9% less olive fruits which could also make it illegible as the next possible strategy to use for irrigating olive trees in the region, provided that water is secured latter in the summer, a period of vital importance for oil accumulation and very sensitive to water stress as the poor results of 2007 revealed. The different treatment water regimes did not impact on the chemical characteristics of olive oils that were within the set threshold limits. Similarly, the sensory characteristics of the olive oils as well as bitterness and pungency were negligible for all treatments allowing them to be assessed as of “superior quality”. Overall, irrigation treatments had no influence on the commercial value of produced oils, being all classified as “extra virgin”. Such funding may be of vital importance to farmers willing to further their irrigation area, save water and still retain the protected designation of origin (PDO) seal of quality for their oil.

© 2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

According to the International Olive Oil Council (IOOC) the world area devoted to olive-growing is 8.8 Mha (Carbot, 2007). This area is centered mainly in the Mediterranean basin, which has about 99% of the world's olive groves and produced in 2007/2008 around 2 030 800 metric tons of olive oil. In Europe, Portugal is the fourth largest olive oil producer, with 34 900 metric tons of olive oil produced in 2007/2008, mostly from its Southern Alentejo province where olive is a strategic crop providing for safe economic returns to farmers and jobs to entire rural communities.

According to the latest agricultural census (INE, 1999) the olive tree cultivation area in the southern province of Alentejo is around 148 402 and 37 298 ha in its sub-region of Moura, where the dry-

farmed cultivars Cordovil, Verdeal and Galega are traditionally grown in orchards of around 100 trees  $ha^{-1}$ . Due to the characteristically infrequent and limited annual rainfall of the region, there is a growing interest in improving the water use and oil content of those olive tree orchards through irrigation, if proven to be important in yield increases and better fruit quality. The cultivar Cordovil is highly appreciated for its high fruit free fatty acid (oleic acid) content and the fine sensory properties of extracted oil. It is mainly responsible for the seal of quality “Protected Designation of Origin (PDO)” conferred to the olive oil coming from the region (CE, 2006); the result of a balanced blend of 35–40% Cordovil, 15–20% Verdeal and Galega oils, making the region of Moura in Alentejo one of the five protected designation of origin (PDO) regions of Portugal.

Being olive-growing an integral part of the social fabric of the rural communities and one that provides safe economic returns to farmers, there is ambition among the olive growers to convert their traditional low-density olive groves into irrigation, a process that is

\* Corresponding author. Tel.: +351 962996336.  
E-mail address: [alice\\_f\\_amos@yahoo.com](mailto:alice_f_amos@yahoo.com) (A.F. Ramos).



### Nomenclature

ETO	FAO–Penman–Monteith potential evapotranspiration (mm)
ETc	crop evapotranspiration (mm)
gs	stomatal conductance at midday ( $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
K <sub>232</sub>	UV absorbance (232 nm)
K <sub>270</sub>	UV absorbance (270 nm)
R	actual soil water content in the root zone (mm)
R <sub>max</sub>	soil water content at field capacity
R <sub>min</sub>	minimum soil water content observed during the experiment (mm)
$\psi_b$	predawn leaf potential (MPa)
$\psi_{\text{min}}$	Midday leaf water potential (MPa)

already taking place. Also, with consumers demanding better quality olive oil and more perceptive about olive oil quality, the fine and distinct characteristics of those mono-variety oils from low-density autochthonous cultivars are assuming a special relevance in the marketplace, as producers seek to find market niches for their low-producing but highly appreciated olive oil.

Dry-farmed cv. Cordovil orchards are traditionally widely spaced to take full advantage of the stored water from winter rains for spring and summer growth. Yields are however low (Santos et al., 2007). To improve yields, compete with newly introduced and productive non-indigenous cultivars and preserve biodiversity and the character of the local oil, they are being converted to drip irrigation. Imposed often by the severe low water availability in the region, deficit irrigation management is being advocated as a way out to better yields, oil quality and economic returns of the irrigated orchards.

Because of the large range of summer rainfall, microclimate, soils and tree spacing in the olive-growing areas, water requirements and the strategies used to manage olive trees vary widely. The literature contains few results on the irrigation of traditional, low-density olive orchards. Lavee et al. (1990) showed that a single complementary irrigation of 75 mm following pit hardening was effective in doubling olive production and oil yield in old olive trees of cv. Souri, when compared to rain-fed conditions. Pastor et al. (1999) reported an increase in yield in an 80 ha irrigated olive orchard compared to growth under rain-fed conditions. In a low-density olive orchard of 69 trees ha<sup>-1</sup> Moriana et al. (2007) showed that the trees in the water deficit and rain-fed treatments rapidly recovered from water stress after receiving irrigation water or autumn rainwater, suggesting that since recovery from water stress is rapid when irrigation is concentrated in the second half of the summer, this irrigation strategy could allow efficient use of water in areas of limited available resources.

The current trend in the irrigation of olive trees is to develop either sustained (SDI) or regulated deficit (RDI) irrigation strategies, whereby the water is applied at a rate less than the needs of evapotranspiration with only very small reductions in yield (Goldhamer, 1999; Tognetti et al., 2005). SDI applies a fixed fraction of the evapotranspiration rate throughout the irrigation season while RDI imposes a period of water stress that is controlled in terms of its intensity. The second phase of fruit development, when pit hardening occurs, has been identified as the most resistant to water deficit, which is when water supplies can either be reduced or halted (Goldhamer, 1999). The third phase of fruit development and oil accumulation, after pit hardening, is however very sensitive to water stress (Lavee and Wodner, 1991; Goldhamer et al., 1994; Moriana et al., 2003; Tognetti et al., 2005), being found to reduce fruit and oil production. Results and sensitivity of

both SDI and RDI on low-density orchards also show that outcome vary considerably by genotype, summer rainfall and related local environmental conditions.

Water use strategies on irrigation of olive trees are often affected by changes in environmental water status, radiation and temperature that markedly impact on their seasonal physiological characteristics and oil. Stomata close slowly as water deficit increases so that the photosynthetic rate can be maintained over a wide range of leaf water potential, and the stomatal response to vapour pressure deficit is attenuated in highly stressed plants (Fernández et al., 1997; Moriana et al., 2003; Moriana et al., 2007). A successful programme to irrigate low-density olive orchards seems to require and depend on knowledge of trees physiological responses and sensitivity to different irrigation strategies at different stages of their growth cycle. Also, according to Motilva et al. (2000), regimes of water stress may impact on oil characteristics and quality. Patumi et al. (1999) and d'Andria (2008) in studies conducted on Italian olive varieties concluded that applications of water in excess of 66% ETc during the whole season neither led to increases in production nor to better fruit quality, a clear indication of the benefits of deficit irrigation regimes. d'Andria et al. (2004) had shown that the production and quality of olive fruit of five studied cultivars benefited from deficit irrigation and had high yield when only 66% of ETc was supplied with irrigation. Grattan et al. (2006), in a study carried out on high-density olive trees of cv. Arbequina I-18 in California reported maximum productivity when 75% of ETc was supplied with irrigation. They argued that the best oil chemical quality is obtained from irrigation regimes supplying 33–40% of ETc water. Moriana et al. (2007) in a study conducted on low-density olive trees subjected to one of four treatments: rain-fed, 100% ETc, 125% ETc and a deficit irrigation treatment with 60 mm of water, obtained no significant statistical differences between treatments for fruit yield or oil production. However, Grattan et al. (2006) report that increases in yield due to irrigation water application can be largely offset by reductions in the percent of oil extracted. Concerning oil quality, Patumi et al. (1999, 2002) found fatty oils, acid composition, peroxide levels and shelf life not being affected by the amount of irrigation. Conversely, Gómez-Rico et al. (2005) report that oils of trees that undergo regulated deficit irrigation (RDI) regimes are of superior quality but similar in composition to ones under fully irrigated regimes. They argue that olive oil bitterness, spiciness and fruitiness are affected by irrigation, with a slight but more noticeable decrease in bitterness with increases in water application. Similarly, Muñoz-Cobo (2005) reports oils from highly irrigated olive trees been milder in sensory characteristics than counterpart oils from deficit irrigation regimes.

Definitive conclusions and consensus on the behaviour of yield and olive oil characteristics of low-density orchard subjected to different irrigation regimes are hard to establish, making the issue an on-going and debatable matter needing ever more site specific studies and research. Certainly, capturing the specific effects of regional and local climates, soils and indigenous olive trees genotypes on yields and oil quality under different irrigation regimes is of importance to all olive researchers and technicians. In southern Portugal it is of vital significance to farmers that owe their livelihood to olive oil trading and to entire rural communities tied up to jobs in olive orchard management as well on the being off of their farming community.

As seen, in order to apply a successful irrigation programme to olive trees it is of critical importance to have knowledge of their physiological responses and sensitivity to different irrigation strategies at different stages of their growth cycle. It is the aim of the present work to study those relationships and quantify yield and olive oil characteristics of low-density olive trees of cv. Cordovil grown in orchards in southern Portugal under full,



sustained and regulated deficit irrigation management. The effect of soil and crop water status on olive tree physiological responses obtained via the plant water stress indicators stomatal conductance and predawn and midday leaf potential is evaluated at different stages of their growth cycle, to quantify leaf and plant water status and determine their sensitivity to different irrigation strategies. Concurrently, soil water status is evaluated through soil moisture profile probe sensors to account for the applied water and its accessibility by olive trees rooting system. Subjected to different irrigation schedules and amounts that might impact on oil quality, such is quantified by chemical and sensory analyses from extracted oils obtained from carefully harvested representative sub-treatments selected from each irrigation treatment.

## 2. Material and methods

### 2.1. Experiment location and design

This study was carried out in at the Herdade dos Lameirões near Safara, in the region of Moura, province of Alentejo, Portugal (lat. 38°05'15"N; long. 07°16'39"W; alt. 75 m) using a representative orchard stand of mature olive trees (*Olea europaea* L. cv. Cordovil). The over 80-year-old mature olive orchard was planted on a 12 by 12 m spacing layout and was converted in 2005 from dry-farming to drip irrigation. The trees were treated in 2006 and 2007 from mid March to the end of October in 2006 and from mid March to the end of November in 2007 using one of four irrigation treatments: a treatment A with full-rate irrigation of 77 trees to the full soil water holding capacity and continuously replenished, a SDI treatment B with irrigation of 64 trees to provide for approximately 60% of the water applied in treatment A, a regulated deficit irrigation (RDI) or treatment C in which water is applied to the 60 trees only during the three critical phase periods: before flowering, at beginning of pit hardening and before crop harvesting, to provide enough water to replenish the soil moisture to field capacity, and a dry-farming treatment D. Phenological stages of the olive trees was recorded throughout the irrigation cycle following the widely accepted BBCH decimal code and procedure described in Sanz-Cortés et al. (2002), a phenological descriptor of olive trees whereby the entire developmental cycle of the crop is subdivided into ten clearly recognizable and distinguishable longer lasting phases of principal and secondary growth stages. In the process, the pit hardening phase was identified and used to establish the onset of irrigation for treatment C, in July 3, 2006 and July 11, 2007, respectively.

Reference evapotranspiration, ET<sub>0</sub> was calculated using the FAO-Penman-Monteith method and the procedures prescribed by Allen et al. (1998). Each tree was water supplied by a single drip line with emitters spaced 1 m apart throughout the entire length of the emitter line placed at the soil surface and laid out along each tree row and serviced by twelve 3.6 l h<sup>-1</sup> emitters. Weather data and rainfall events were collected by an automatic meteorological station placed within a few hundred meters from the olive orchard. Hourly averages of the meteorological parameters, wind speed, air temperature, solar radiation, precipitation and relative humidity were recorded and evaluated. Half-hour averages of the net radiation above the canopy of the trees were measured using one *NrLite* net radiometer (Kipp & Konen, Holland) connected to a data logger (Campbell CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA).

The in situ soil classification indicates a clay soil (Vcx) until 0.40 m and silt loam transition to 0.45 m, underneath which a restrictive layer of very compact limestone and gravel elements limited root development and placement of soil moisture probes. Soil volumetric water content at field capacity (−0.03 MPa) was estimated as 0.36 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> to 0.18 m, and 0.34 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> between

0.18 and 0.50 m, whereas wilting point (−1.5 MPa) soil volumetric water content was 0.27 and 0.24 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, respectively.

### 2.2. Soil water evaluation

Two representative trees per treatment were instrumented with access tubes for profile probe PR1 sensors (Delta T Devices, Ltd., Cambridge, UK) at distances of 1, 2, 3 and 6 m along the tree rows and at depths of 0.10; 0.20; 0.30 and 0.45 m, below which the restrictive layer of limestone and gravel limited placement of access tubes and probes. One access tube was also installed between rows. Soil water content was monitored and recorded throughout 2006 and 2007 irrigation season, with results used to estimate the equivalent depth of water in the soil to 0.45 m, and its relative extractable water (REW) defined by Granier (1987) as:

$$REW = \frac{(R - R_{\min})}{(R_{\max} - R_{\min})} \quad (1)$$

where  $R$  (mm) is the actual soil water content in the root zone;  $R_{\min}$  (mm) the minimum soil water content observed during the experiment and  $R_{\max}$  (mm), the soil water content at field capacity.

To complement the profile probe sensors readings and also guide the onset of irrigation, Watermark sensors (Irrometer Co. Inc., Riverside, USA) were placed inside the wet bulbs developed by the drip emitters at 1 and 3 m from the trunk and along the tree row, at 0.25; 0.45 and 0.65 m depths. Data were recorded via data logger and averaged on hourly intervals. When scheduled for each treatment, according to the full, RDI and SDI options and limits of water application, irrigation was applied to trees until reading on the Watermark sensor placed at 0.45 m depth approached the water potential of −0.06 to −0.07 MPa, a management decision that provided for the least number of weekly irrigation and helped to reduce losses via soil evaporation. Table 1 presents the amount of irrigation water applied to each treatment during 2006 and 2007. Data collected from an automatic meteorological station near the olive orchard provided for the inputs used on the calculation of Penman-Monteith potential evapotranspiration (ET<sub>0</sub>).

### 2.3. Plant water stress indicators

During 2006 and 2007 stomata conductance measurements were carried out in fully expanded leaves of the year of three trees per treatment, at sunrise and 13:30 GTM, well illuminated and at chest height. A diffusion of continuous flow LI-1600 porometer (LI-1600 Inc., IT USES) similar to the one described in Parkinson (1985) was used.

Predawn ( $\psi_b$ ) and midday leaf potential ( $\psi_{\min}$ ) were also evaluated to determine leaf and plant water status, according to the methodology described in Goldhamer and Salinas Fereres (2001). A pressure chamber type PMS (PMS Inst., Corvallis, OR, USES) was used and healthy leaves of the year in the shade and at chest height were monitored, after covering them with a wet cloth during the short period of time in-between incision and their placement in the pressure chamber. The  $\psi_b$  describes the plant water status when a balance between soil and tree water potential is deemed achieved Bergonci et al. (2000), while  $\psi_{\min}$  provides critical tree water potential values when transpiration rates are at peak.

### 2.4. Sap flow measurement

The Compensation Heat-Pulse method (CHP) developed by Swanson and Whitfield (1981) and modified by Green et al. (2003) was used to evaluate tree sap flow and tree transpiration rates. As



**Table 1**  
Fruit and oil yield (mean and standard deviation), water applied and water use efficiency for the different irrigation treatments.

Treatment	Yield production (kg/ha)		Oil yield (kg/ha)		Water applied (mm)		Water use efficiency (kg of oil/mm water)		Water use efficiency (kg of oil/mm water applied)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
A	3741.3 ± 432.80ab <sup>a</sup>	504.5 ± 234.84a	652.6 ± 82.72ab	118.5 ± 57.13a	1307.6 (880.1) <sup>b</sup>	1045.8 (742.7)	0.50	0.08	0.74	0.12
B	4800.9 ± 1164.23a	783.5 ± 506.0a	966.3 ± 235.81a	197.9 ± 127.80a	876.3 (448.8)	681.9 (378.7)	1.10	0.23	2.15	0.42
C	4031.1 ± 576.42ab	165.6 ± 172.91a	735.7 ± 105.2ab	42.03 ± 43.62a	496.4 (62.5)	394.7 (91.5)	1.48	0.08	11.77	0.33
D	2875.0 ± 184.17b	108.9 ± 45.15a	564.0 ± 39.13b	30.7 ± 12.93a	427.5	303.2	1.32	0.07	-	-

<sup>a</sup> Treatments with the same letter in the same column are not significantly different by Tukey test at  $P \leq 0.05$ .

<sup>b</sup> The first value represents the total water applied (irrigation and rainfall) from the beginning of the vegetative development event to the harvest (in 2006 from March 5 to December 22 and in 2007 from March 10 to January 18); the value in-between parenthesis represents the total water applied by irrigation.

described in Fernández et al. (1996, 1997) a representative tree in each treatment was selected and outfitted with three set of heat-pulse velocity (HPV) probes and specific software was used for analysis of results. More detail on procedure is found in Santos et al. (2007).

### 2.5. Orchard yield, oil extraction and analyses

At harvest, olives from three representative sub-treatments in each irrigation treatment were hand picked and weighed. Concurrently, a sample of olives of about 3 kg per harvested sub-treatment were selected and transported to the laboratory for oil extraction. An Abencor analyzer (MC2, Ingenierias y System, Seville, Spain) system that reproduces industrial oil extraction (Grattan et al., 2006) was used for extraction of olive oil from the olive samples following the procedure and extraction phases described in Berenguer et al. (2006). The extracted oil was afterwards transferred to bottles of dark glass and stored at 4° C temperature while waiting for the chemical and sensory analyses.

Oil samples were analyzed for acidity (% of oleic acid), peroxide value (meq O<sub>2</sub> per kg of oil), UV absorbance (K<sub>232</sub> and K<sub>270</sub>) and sensory attributes of organoleptic evaluation, according to European Union Regulation EEC 2568/91 and European Union Regulation EC 1893/03 regulations. The ripeness index (RI) was evaluated following procedures described in Hermoso et al. (1999) by setting the maturity index scale from 0 (olives with intense green color) to 7 (olives with black skin and flesh purple to the pit). The percent of moisture in the resulting olive paste obtained from the Abencor extraction was estimated as moisture difference between wet and dry paste. The percent of oil content in the dry paste was evaluated by Nuclear Magnetic Resonance (NMS 110 minispect analyzer, Bruker) while the oil acidity, an indicator of free fatty acid levels in the oil, was expressed as percent of oleic acid (European Union Regulation EEC 2568/91 annex II). Free fat acid auto-oxidation plays an important role in the flavor characteristics and formation of organoleptic toxic compounds that reduce the nutritional value of the olive oil and its market value. Peroxide values were evaluated, as they indicate the state of initial oxidation of given oil and they are defined as the quantity of active oxygen (meq) in 1 kg of fat or oil (European Union Regulation EEC 2568/91 annex III). Secondary products resulting of oil oxidation where evaluated as UV absorbance, K<sub>232</sub> and K<sub>270</sub>, indices that indicate the state of oil conservation and secondary alterations induced by technological processes (European Union Regulation EEC 2568/91, annex IX).

Sensorial evaluation of the oil flavor was done by following the organoleptic method of classifying oil in a numerical scale of perception of the intensity of flavor stimulus in the mouth. It follows the present European Union Regulation EEC 2568/91 annex XII procedures where the intensity of the attribute is measured in a scale of 6, being 0 an imperceptible perception and 5, an extreme one. No negative attributes were observed. An overall grading procedure in a nine-point scale ranging from 1, the lowest quality, to 9, the exceptional quality, was lastly applied to attribute a single classification score to each oil simple analyzed. This final average score results from blending the quality attributes and weaknesses of the analyzed oil, allowing it to be classified as extra virgin when the overall grading is equal to or higher than 6.5, as virgin if graded 5.5–6.5, or lampant, if classified between 3.5 and 5.5.

### 2.6. Statistical analysis

The software SPSS version 15 was used for statistical data analysis. When a significant effect of factors in the study or the interaction between them is supported by the analysis of variance, the Tukey test with a level of signification  $\alpha = 0.05$  was used for



identification of differences between mean values. The experimental effect of the two trial years was separately analyzed.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Climatic characterization

For the period in study the average total rainfall was 521.8 and 333.7 mm in 2006 and 2007 respectively, with the wet season spanning from October to April and a long and dry summer season lasting from May to September. Worthwhile noticing the impact of 2007 low rainfall on yield and produced oil. The dry season is the period for irrigation when trees need water to balance the high evapotranspiration rates resulting from the long and dry days, of intense net radiation (Fig. 1a and b), high vapour pressure deficit and low soil moisture content. Daily atmospheric water demand is high during the period, with potential evapotranspiration (ETO) rates reaching values as high as  $8 \text{ mm day}^{-1}$  in the months of July and August (Fig. 1a and b), and the stored winter rainfall in the soil is unavailable for remobilization, being long used during the dry spells of early Spring (Santos et al., 2007).

#### 3.2. Soil water dynamics

Seasonal evolution of relative extractable water (REW) in the soil during 2006 and 2007 irrigation periods is presented in Fig. 2. With REW values for treatment A between 0.89 and 0.98 throughout the 2006 irrigation season (Fig. 2a) indicating well-watered trees, predawn leaf water potential readings,  $\psi_b$  were kept high, of less or equal  $-1 \text{ MPa}$  (Fig. 3a), a threshold value for plant water stress according to Muñoz-Cobo (2005). Concerning treatment B, REW were at all times in-between 0.74 and 0.92, slightly lower than the values recorded for treatment A, as only 60% of tree evapotranspiration (ETc) was been replaced by irrigation.

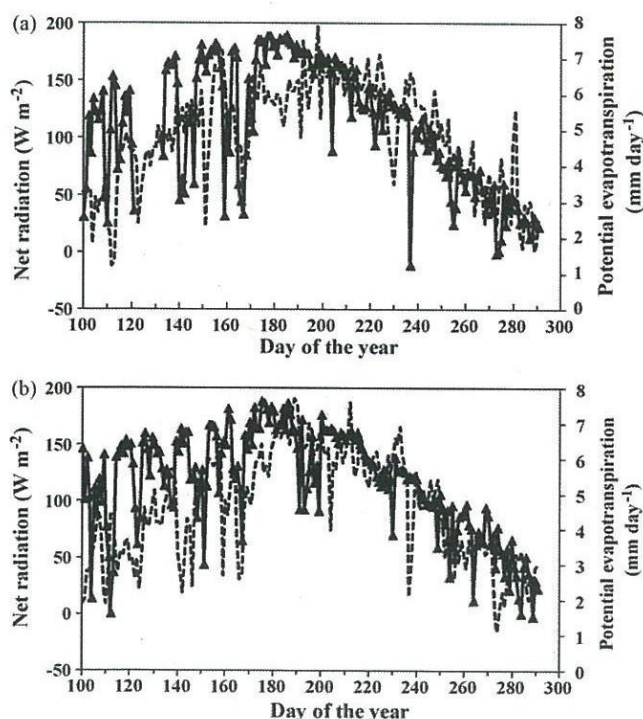


Fig. 1. Potential evapotranspiration calculated following Penman-Monteith equation and values from class A pan evaporation measured in a meteorological station located near at the experiment site and net radiation measured above the canopy throughout 2006 (a) and 2007 (b).  $\blacktriangle$  net radiation; - - - potential evapotranspiration.

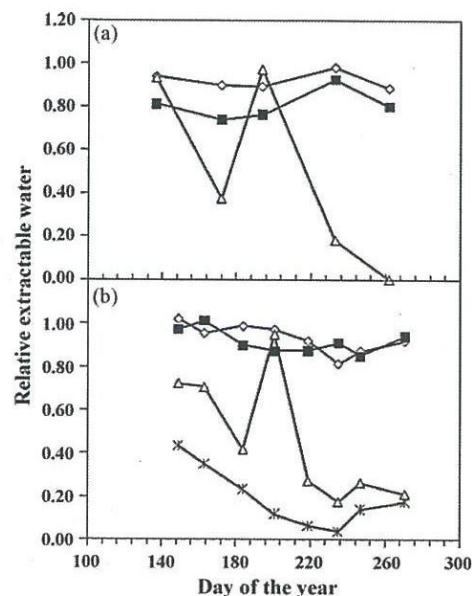


Fig. 2. Relative extractable water under treatments A, B, C and D. Estimating were made during the irrigation season of 2006 (a) and 2007(b).  $\diamond$ , treatment A;  $\blacksquare$ , treatment B;  $\triangle$ , treatment C;  $\times$ , treatment D.

Predawn leaf water potential readings reflected such fact with values slightly below  $-1 \text{ MPa}$ . The regulated deficit irrigation regime imposed to treatment C, with water applied at periods more sensitive to water deficit (before flowering, at pit hardening and about 15 days before harvest), justifies the erratic behaviour of REW presented in Fig. 2a. Until the day of year (DOY) 172, a period without irrigation, REW gradually decreased to values close to 0.37. Following irrigation in DOY 194, REW climbed to a maximum of 0.97, when soil water content was  $0.34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  but after DOY 194 they gradually declined to their lowest value in DOY 262, when volumetric soil water content was of  $0.11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

During the 2007 irrigation season, treatment A presented values of REW in-between 0.87 and 1.0, except around DOY 235 when they dipped lower due to a week failure in the irrigation system. Fig. 2b presents such results. With 40% less water applied to treatment B, the REW values stayed in-between 0.85 and 1.0 and

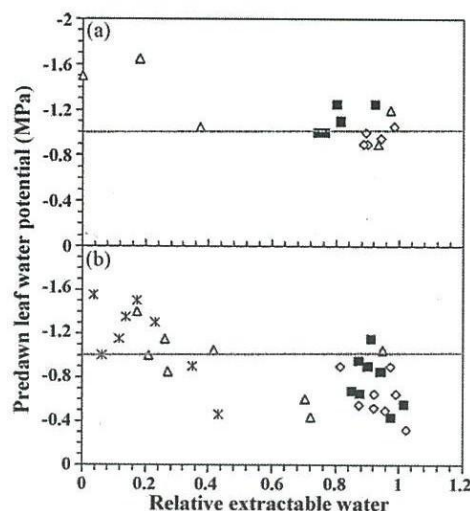


Fig. 3. Relationship between relative extractable water and predawn leaf water potential under treatments A, B, C and D in the experimental olive orchard during 2006 (a) and 2007 (b). Dotted line represents the predawn value, considered the threshold value for plant water stress.  $\diamond$ , treatment A;  $\blacksquare$ , treatment B;  $\triangle$ , treatment C;  $\times$ , treatment D.



close to the ones observed for treatment A, indicating that soil water stayed near field capacity. Predawn leaf water potential,  $\psi_b$  were slightly lower than  $-1$  MPa (Fig. 3b), also indicating that well irrigated trees. For treatment C and during half of the period in evaluation, volumetric soil water content stayed low, of around  $0.18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  with REW values alternating in-between 0.17 and 0.27. The former was recorded in mid August (DOY 235) when most of the soil moisture had been depleted. After irrigation, in DOY 201, REW recovered to 0.95, as did happen in 2006 (Fig. 3b). In the eight days of measurements, treatment D volumetric soil water content was below wilting point and REW values stayed in-between 0.04 and 0.43. However, when the soil moisture was replenished with 20.8 mm of rainfall, REW values quickly bounced back, between DOY 247 and 271 (Fig. 2b). In general, REW values remained always below 0.4 in this treatment and  $\psi_b$  (Fig. 3b) also reflected such fact with low values of  $\psi_b$  recorded during the period. Higher moisture in the soil throughout the summer irrigation cycle and consequent high leaf water potential confirm the importance of irrigating olive trees in Alentejo, a Mediterranean region denied of meaningful summer rainfall and where olive trees are conditioned to thrive in shallow soils of restrictive layer that limit deep soil water storage and remobilization by roots.

### 3.3. Midday stomatal leaf conductance and midday leaf water potential

During the irrigation season of 2006 the evolution of midday leaf water potential ( $\Psi_{\text{min}}$ ) readings (Fig. 4a) was distinct for trees receiving the full irrigation (treatment A) and trees submitted to partial water stress (treatments B and C). The larger differential was observed at beginning of September, on DOY 233, of around  $-0.60$  and  $-1.05$  MPa respectively, reflecting the effect of the lower soil water content of treatments B and C, respectively on leaf water status. Treatment A, as expected, was the one presenting the

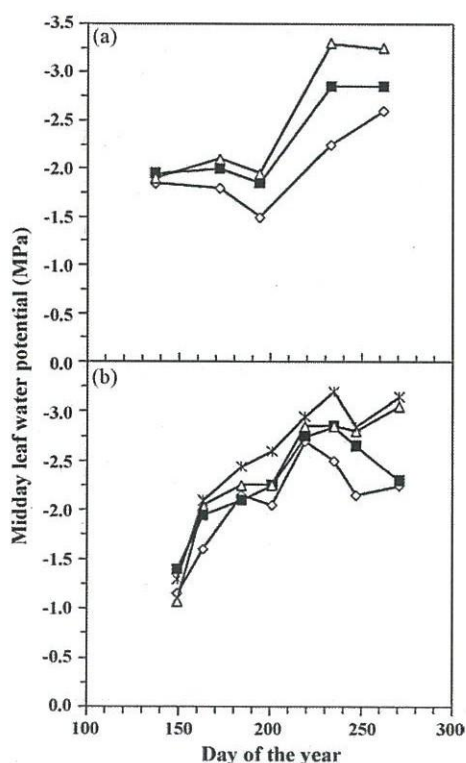


Fig. 4. Values of midday leaf water potential obtained with the pressure chamber in different days of 2006 (a) and 2007 (b).  $\diamond$ , treatment A;  $\blacksquare$ , treatment B;  $\triangle$ , treatment C;  $\times$ , treatment D.

highest  $\Psi_{\text{min}}$  readings throughout the season. The deficit irrigation treatments B and C recorded  $\Psi_{\text{min}}$  values that remained very close to  $-2$  MPa in the first three periods of measurements (DOY 137, 172 and 194) and not far from the readings of treatment A. However into the summer, they decreased in the fourth day of measurements (DOY 233) when readings were the lowest, of  $-2.85$  and  $-3.3$  MPa respectively for treatments B and C. On the third day of measurements, DOY 194, even though trees of treatment C were being supplied with irrigation water and the volumetric soil water was very close to field capacity, of about  $0.34 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , the recovery of  $\Psi_{\text{min}}$  was not complete and stayed slightly below the readings of treatment B.

In 2007 the status of leaf water was at its highest level for the different treatments on DOY 149 (Fig. 4b), coincident with the period under analysis in which volumetric soil water was at its highest for all treatments, except for treatment C. From DOY 149 onward they slowly declined for all treatments, as seen in Fig. 4b, due to non favorable summer net radiation which up to the fifth day of measurement, at DOY 219, presented high values of around  $600 \text{ W m}^{-2}$  (Fig. 6), to decline to values close to  $500 \text{ W m}^{-2}$  afterward. Vapour pressure deficit (VPD) was also high in the period, resulting that both variables were important factors influencing the transfer of water into the atmosphere and promoting the decline in  $\Psi_{\text{min}}$  readings. Overall, trees of fully irrigated treatment A presented the highest values of  $\Psi_{\text{min}}$ , closely followed by treatment B values. Here,  $\Psi_{\text{min}}$  values were at their lowest level on DOY 235, of  $-2.85$  MPa. As for treatment C, in five of the eight days of measurement  $\Psi_{\text{min}}$  readings were lower than treatment B. Likewise in 2006, on DOY 219 and due to irrigation  $\Psi_{\text{min}}$  readings of treatment C showed slight recovery, but never a complete one, since  $\Psi_{\text{min}}$  remained quite apart from treatments A and B readings. It is conspicuous from Fig. 4 that for treatment C as the moisture content declined so did  $\Psi_{\text{min}}$ , with lower and lower values, up to  $-3.05$  MPa in the end of the summer, on DOY 271.

The evolution of  $\Psi_{\text{min}}$  in 2006 and 2007 showing distinct differences among irrigation regimes confirm that the SDI regime of continuous water stress imposed by treatment B as more beneficial to trees than the regulated deficit regime of treatment C. In the latter, the irrigation scheduling applied to trees deprived them of needed water in crucial periods of the growing cycle, depicted by the progressive decline in their leaf potential values. Furthermore, with the imposed stress their recovery was slow and never fully achieved. For treatment D,  $\Psi_{\text{min}}$  readings quickly decreased from early mid June ( $-2$  MPa) until DOY 235 when  $\Psi_{\text{min}}$  was the lowest, of around  $-3.2$  MPa. Between DOY 235 and DOY 247 there was a slight recovery of  $\Psi_{\text{min}}$  readings with the replenishment of moisture to the soil resulting from the 17.5 mm rainfall (data not shown).

Midday stomatal leaf conductance (gs) was also influenced by the different irrigation regimes (Fig. 5). In 2006 (Fig. 5a), trees of treatment A presented the lowest levels of gs in the spring, on DOY 137, of about  $0.079 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . In this particular day, the volumetric soil water was however high, of  $0.35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . The day was cloudy and net radiation at solar midday was of  $431.2 \text{ W m}^{-2}$  (Fig. 6). On DOY 194, gs again decreased noticeably, to  $0.085 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . With high water content in the soil, the decline in gs suggests stomata closure due to the relatively VPD, of around  $5.53 \text{ kPa}$  (Fig. 6). Connor (2005) mentioned decreasing stomatal conductance rates and low leaf water potential values reflecting leaf responses to adverse climatic variables and a mechanism to maintain transpiration efficiency. In the two last days of measurements (DOY 233 and DOY 262), gs values increased to value as high as  $0.176 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . In general, trees of treatment B showed a gs trend very similar to the one observed for treatment A but with slightly lower values. Concerning treatment C, on the first three days in which measurements were carried out (DOY



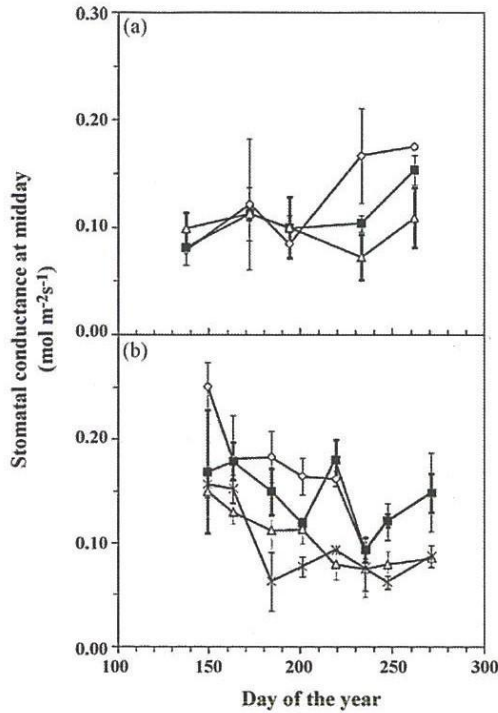


Fig. 5. Values of midday stomatal leaf conductance ( $g_s$ ) obtained with a porometer in different days of 2006 (a) and 2007 (b). Each point is the average of 3 measurements and vertical bars represent one standard deviation.  $\circ$ , treatment A;  $\blacksquare$ , treatment B;  $\triangle$ , treatment C;  $\times$ , treatment D.

137 172 and 194),  $g_s$  stayed close to  $0.10 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . On DOY 194, when trees were being irrigated  $g_s$  values were still low, of about  $0.101 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , consequence of the previous days of water stress, and despite the already high soil water content, close to field capacity. Trees of treatment C presented on DOY 233 the lowest  $g_s$  values, of around  $0.073 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  when soil water content was low ( $0.155 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), suggesting stomata closure due to the low soil moisture. By the end of the summer, DOY 262, the value of  $g_s$  had increased only slightly.

The set of  $g_s$  values obtained in 2007 (Fig. 5b) shows that leaves of treatment A recorded the largest  $g_s$  value,  $0.251 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , in the spring, on DOY 149. Between DOY 163 and DOY 219,  $g_s$  values had declined to  $0.17 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . On DOY 235 soil water content had decreased quite considerably and through the defensive mechanism stomata closure,  $g_s$  readings of  $0.094 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  were observed. From that day onward, there was a slight recovery in  $g_s$  values, matching those of treatment B. In spite of the high water content in the soil, treatment A had only a partial departure from the observed low  $g_s$  values in the last two days of measurement, when VPD and net radiation declined considerably by the end of summer. For treatment B, the highest  $g_s$  reading was observed on DOY 219, of about  $0.180 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , and the lowest on DOY 235, as did observed in the same day for treatment A. Early into spring, on DOY 149, treatment C  $g_s$  readings did present values close to those of treatment D, of about  $0.157 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . On DOY 201 the recorded values were close to those of treatment B, of  $0.114 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  due to the added irrigation water, and on DOY 219 they were again very low and close to  $0.080 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . They remained low until the end of the summer. The evolution of  $\Psi_{\min}$  and  $g_s$  in 2006 and 2007 showing distinct differences among irrigation regimes confirm that the SDI regime of a constant deficit imposed to treatment B as more beneficial to trees than the regulated deficit regime of treatment C. In the latter, the applied irrigation scheduling and lack of late summer rainfall in 2007

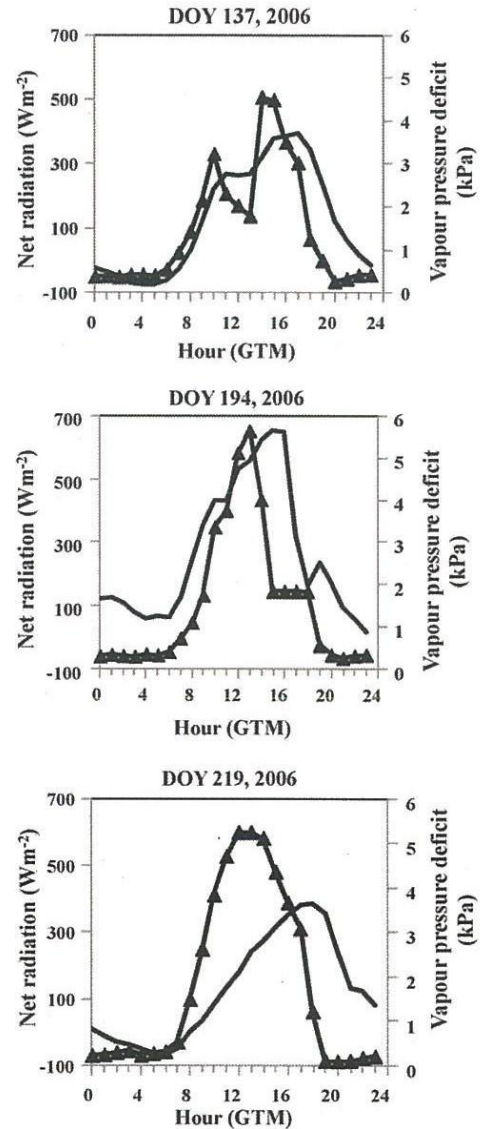


Fig. 6. Daily trend in net radiation and vapour pressure deficit in the experimental site on three different dates throughout the irrigation seasons of 2006 and 2007.  $\blacktriangle$ , net radiation; —, vapour pressure deficit.

deprived trees of needed water in crucial periods of the growing cycle, depicted by the progressive decline of leaf water potential and stomatal closure. Furthermore, with the imposed stress their recovery was slow and never fully achieved. Such fact agrees with Fernández et al. (1996) observation of delays in olive trees recovery after a period of severe water stress, probably due to xylem vessels cavitation. Moriana et al. (2003) also point out such delay in leaf water status recovery in olive trees. For treatment D,  $\Psi_{\min}$  readings quickly decreased from early in the spring  $g_s$  values of treatment D were high in the first two days of measurements ( $0.155 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) but declined quickly throughout summer ( $0.062 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) due to stomatal closure related to the ever decreasing level of moisture in the soil.

Both in 2006 and in 2007,  $\Psi_{\min}$  and  $g_s$  values of dry-farming treatment D were very low throughout summer, confirming that soil water profile was deprived of stored water for remobilization by the root system to fully complement trees water requirements. The results also corroborate the need to irrigate the traditional low-density olive trees in Alentejo, to alleviate summer water stress and help boost final yield.



### 3.4. Olive oil yield and characteristics

Table 1 indicates that olive yield varied considerably in the two years under study due to the effect of the biennial variation of fruit production that is a typical characteristic of this species. In 2006 “on year” of high yield, there were no significant differences in fruit yield between the irrigated treatments. Production varied between 4800.9 and 3741.3 kg ha<sup>-1</sup>, with the higher and lower production rates assigned to between B and A respectively. Treatment C was the second most productive, showing a reduction in yield of 769.8 kg ha<sup>-1</sup> when compared to treatment B. Fruit yield of treatment A, that had received the most water, was 1059.6 kg ha<sup>-1</sup> less than treatment B. Even in the rain-fed conditions of treatment D yield were high, of 2875.0 kg ha<sup>-1</sup>. In 2007 “off year” of poor harvest, there was no significant difference in fruit yield between irrigated and non-irrigated treatments. In general, yield suffered a severe decline when compared to 2006, of 86.5% and 83.7% for treatments A and B, respectively. Concerning treatments C and D, the decline was even more pronounced, of 95.9% and 96.2%, respectively. This fact suggests that trees under irrigation regimes that are particularly stressful to them, such as in the case of treatments C and D, suffer more drastic yield reductions in “off years”. Deficit irrigation programmes such as the “regulated deficit irrigation” end up suffering more from a net accumulation of leaves and fewer flowers which tend to limit production in the subsequent year (Alegre et al., 2002). A similar widespread loss of production such as occurred in 2007 had been reported by Serrano (1998). They state that olive trees in “off years” are prone to yield drop as low as 90% of obtained in “on years”. Sibbett (2002) discussed a range of possible factors that can lead to such phenomena including, among others, the level of irrigation and time of harvest. It is worth mentioning that nationally year 2007 was allegedly a “off year”, with recorded average drop in olive tree yield of around 50% Anonymous (2007), jointly attributed to high temperatures that occurred in the ten first days of May, during flowering, immediately followed by days of very low and below average temperatures.

In 2006 the impact of irrigation treatments on olive oil yield per hectare was more evident than on fruit yield per hectare. Treatments B and D had the highest and lowest olive oil yield, of 966.3 and 564 kg ha<sup>-1</sup>, respectively, in harmony with the results of Muñoz-Cobo (2005). Treatments A and C produced slightly higher olive oil yield per hectare than treatment D (Table 1). Even though there were no statistical differences in yield per hectare among irrigation treatments in 2006, treatment B yield was considerably higher than the other treatments. In 2007 it was once again the treatments B and D that produced the highest and lowest olive oil yield, again with no significant statistical differences among treatments. However, despite of the 2007 evident decrease in olive oil production compared to 2006, it is worth noticing that treatment B produced the highest olive oil yield per ha on both years while treatment D had the lowest yield. The 2006 reduction in fruit quantity between treatments B and A was of around 22.0% and, in-between treatments B and C it was around 16.0%, causing a reduction of olive oil for the same treatments of 32.5% and 23.9%, respectively. Similarly, in 2007 the drop in fruit and olive oil production between treatments B and A was of 35.6% and 40.1% respectively, and in-between treatments B and C of 78.9% and 78.8%. These results contrast with those obtained by Lavee et al. (2007) that in a test carried out in Israel reported average yield drop over a period of four consecutive years higher for fruit than for olive oil. Treatment B emerges as the one carrying the highest fruit and olive oil yield during the two years of trial. Using less 431.3 mm of water in 2006 than treatment A, it produced 313.7 kg per ha more olive oil and in 2007, despite the widespread drop in yield, it produced again more 79.4 kg of

olive oil per ha than treatment A, using less 363.3 mm of irrigation water.

The percentage of fruit moisture during the extraction of the olive oil was higher in treatments receiving the highest rates of irrigation water (Table 4). Treatments A and D recorded the highest and lowest percentage of pulp moisture on both years under study. Compared to 2006, olive fruits from the different irrigation treatments presented a lower percent of moisture in 2007, probably due to the smaller amounts of water applied that year (Table 1). The difference in fruit moisture levels from treatments A and D was 8.8% and 16.5% in 2006 and 2007, respectively.

Concerning oil acidity, in 2006 treatment A that received the largest amount of water was the one that had the highest level of acidity (Table 2) of 0.77%, very close to the threshold value defined by European Regulation EC 1989/03 for extra virgin olive oil (<0.8%). All other treatments had lower acidity levels and the olive oil from treatment D had the lowest level, with 0.53% of acidity. There were no significant differences between treatments C and D, the ones with the lowest levels of acidity and also which received the lowest levels of irrigation water. In 2007 the behaviour was statistically identical to the 2006 results, with treatment A showing 0.73% of acidity, slightly higher than the other treatments. It is worth noticing that all treatments, with the exception of treatment A, showed a lower percentage of acidity in 2007, suggesting that the lower amount of water applied across all treatments (except A), could have been the reason for such a drop. The effects of irrigation on the acidity levels in olive oil are consistent with the results obtained by Berenguer et al. (2006). They found in a study carried out on cv. Arbequina over a 2 years period that olive oil from well-watered trees always had a higher percentage of acidity in the following year, despite reductions in water applications. Similarly, Muñoz-Cobo (2005) obtained higher levels of acidity in olive oil of well-watered olive trees. However, a different point of view is presented by Dettori et al. (1989) and Tovar et al. (2002) who conclude that olive oil acidity is not influenced by the amount of irrigation. Over the two-year study period olive oil from all irrigation treatments presented peroxide values which were below the official limit set by law, of 20 meq O<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup>. In 2006, peroxide count was higher in treatment D followed by treatments A and C. The lowest level was obtained for treatment B, as seen in Table 2. In 2007 the peroxide count of treatment B was still low, and the highest values were obtained for

**Table 2**  
Quality index of cv. Cordovil olive oil obtained with the four irrigation treatments (mean ± standard deviation).

Oil analyses	Irrigation treatment	Crop season	
		2006	2007
Acid content (%)	A	0.767 ± 0.058a <sup>a</sup>	0.733 ± 0.058a
	B	0.667 ± 0.058ab	0.567 ± 0.058ab
	C	0.533 ± 0.058b	0.533 ± 0.058b
	D	0.533 ± 0.058b	0.50 ± 0.100b
Peroxide value (meq O <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> )	A	9.433 ± 0.115b	6.033 ± 0.153d
	B	6.600 ± 0.100c	6.933 ± 0.153c
	C	9.067 ± 0.058b	13.033 ± 0.153a
	D	10.267 ± 0.251a	10.000 ± 0.200b
K <sub>270</sub>	A	0.144 ± 0.004c	0.123 ± 0.004b
	B	0.157 ± 0.004b	0.122 ± 0.004b
	C	0.177 ± 0.003a	0.156 ± 0.003a
	D	0.180 ± 0.004a	0.121 ± 0.004b
K <sub>232</sub>	A	1.792 ± 0.004a	1.630 ± 0.030a
	B	1.838 ± 0.004a	1.549 ± 0.026ab
	C	1.789 ± 0.003a	1.620 ± 0.056a
	D	1.552 ± 0.004b	1.450 ± 0.05b

<sup>a</sup> Treatments with the same letter in the same column are not significantly different by Tukey test at  $P \leq 0.05$ .



treatments C and D. In general, over the two-year period the highest peroxide counts were recorded for olive oils of irrigation treatments C and D subjected to more water restrictions. In contrast, Salas et al. (1997) and Tovar et al. (2002) observed highest concentration of peroxides in well irrigated treatments, while Berenguer et al. (2006) obtained inconclusive results. Patumi et al. (1999) and Gómez-Rico et al. (2009) reported no relationship between irrigation water levels and peroxide counts.

Table 2 presents the UV absorbance values at 270 nm ( $K_{270}$ ) obtained in 2006 and 2007. The highest values in 2006 were obtained in olive oils of treatments C and D that received the least amount of water and the lowest levels from well-watered trees (treatments A and B). In 2007 the highest values were obtained in olive oils from treatment C and no significant differences were observed between the others treatments. This observation is in agreement with the observation in Berenguer et al. (2006) that in years when all treatments receive less water, as in 2007, the statistics differences in the values of  $K_{270}$  between treatments are less marked. Tovar et al. (2002) and Gómez-Rico et al. (2009) found also no significant differences between irrigation treatments in respect to  $K_{270}$  absorbance levels. Concerning the UV absorbance at 232 nm ( $K_{232}$ ), they were lower in the rain-fed treatment D, but presented no significant difference between the irrigated treatments (Table 2). These results contradict those of Muñoz-Cobo (2005), who obtained the highest  $K_{232}$  in olive oils produced in dry conditions. Both  $K_{232}$  and  $K_{270}$  absorbance levels for all treatments were however lower than the limits defined by legislation ( $\leq 0.22-2.50$  for  $K_{270}$  and  $K_{232}$ ).

In terms of olive oil quality parameters, on both years (2006 and 2007) they were for all treatments within the limits established in the European Regulation EC 1989/03, allowing them to be classified as oils of high quality. Treatment B, which we had elected as the most favorable irrigation scheme to maximize olive yield, also produced the highest quality of olive oil. Generally known as having a slightly bitter and sharp flavor, the olive oils from cv. Cordovil obtained in our trial treatments in 2006 and 2007 (Table 3) were slightly bitter (0.5) or had no bitterness (0.0), mild, as preferred by Portuguese consumers. As for sharpness, they were slightly sharp (1) for the two years of the study. Oils from treatments C and D had a fruity flavor of 3, slightly better than treatments A and B that scored in level 2. However, the quality and flavor of the olive oils were greatly influenced by the ripeness index (RI), an indicator to be taken into account when producing oils of specific sensory and chemical characteristics.

The RI was only determined in 2007 on two different dates (Table 4). The first samples tested in November for RI showed no significant differences between treatments C and D. It showed that treatment A was maturing at a slower rate than the others and had a significantly lower level of RI, of 2.73. With the second sample taken a month later, in December, olive from treatment D had the highest RI of 4.85 and no significant differences were observed between the irrigated treatments that had RI values of around 4. However, treatments A and B had the lowest rates of ripeness, probably due to the type of irrigation they were

**Table 3**

Sensorial attributes of cv. Cordovil olive oil obtained with the four irrigation treatments.

Sensorial attributes	Treatment	Crop season	
		2006	2007
Fruity <sup>a</sup>	A	2	2
	B	2	2
	C	3	3
	D	3	3
Bitterness	A	0.5	0
	B	0.5	0
	C	0.5	0
	D	0.5	0
Pungency	A	1	1
	B	1	1
	C	1	1
	D	1	1
Overall grading <sup>b</sup>	A	7.5	7
	B	7.5	7.5
	C	8	7.5
	D	7.5	7.5

<sup>a</sup> Flavour description measured in a scale of 0–5 being 0 an imperceptible flavour and 5 extreme.

<sup>b</sup> Overall grading measured in a scale of nine points being 1 the lowest quality and 9 exceptional.

receiving. Worth pointing out that in-between the first and second sampling for ripeness, a rainfall of approximately 30.6 mm might have caused fruits of treatments C and D also to ripen at a slower rate (Grattan et al., 2006; Motilva et al., 2000).

On a general assessment of the olive oils produced in 2006, treatment C oils scored with the highest organoleptic value of 8 (Table 3) on a scale of 1–9. However, all oils scored 7.5 points and above. In 2007, a year of less water applied to trees, the olive oils from treatments B, C and D had the highest organoleptic values of 7.5 and treatment A that received the most water, scored only 7. In general, all samples scored above 6.5 which according to European Regulation EC 1989/03 classify them as olive oils of superior quality and therefore “extra virgin”.

### 3.5. Water productivity

Ranking the irrigated treatments in terms of oil yield per unit water, treatment C, despite the concentration of irrigation only in critical phases of growing cycle, had high water use efficiency in 2006, of 11.8 kg of oil per mm of applied water (Table 1). Treatment B was the second most productive, with 2.2 kg of oil per mm of water applied. The least productive treatment was treatment A which shows a clear decline in yield with the amount of water applied. In 2007, an “off year” of drastic reduction in yield, treatment B was the most productive with 0.42 kg of oil per mm of water applied, followed by treatment C. Treatment A trailed behind with 0.12 kg of oil per mm of applied water. It seems that in years of sharp reduction of water availability for irrigation, as in 2007,

**Table 4**

Influence of irrigation treatments on ripeness index, water content and oil extraction with the Abencor system in 2006 and 2007.

Treatment	Ripeness index		Water content (%)		Oil extraction–Abencor (%)	
	18-11-2007	27-12-2007	2006	2007	2006	2007
A	2.73 ± 0.271 <sup>a</sup>	4.14 ± 0.07 <sup>b</sup>	53.21 ± 0.319 <sup>a</sup>	45.99 ± 0.587 <sup>a</sup>	17.41 ± 0.203 <sup>d</sup>	23.34 ± 0.415 <sup>c</sup>
B	3.24 ± 0.187 <sup>b</sup>	4.27 ± 0.16 <sup>b</sup>	49.42 ± 0.730 <sup>b</sup>	36.71 ± 0.487 <sup>c</sup>	18.25 ± 0.093 <sup>c</sup>	25.26 ± 0.06 <sup>b</sup>
C	3.65 ± 0.107 <sup>a</sup>	4.39 ± 0.057 <sup>b</sup>	47.18 ± 0.235 <sup>c</sup>	40.03 ± 0.105 <sup>b</sup>	19.61 ± 0.056 <sup>b</sup>	25.33 ± 0.393 <sup>b</sup>
D	3.57 ± 0.632 <sup>a</sup>	4.85 ± 0.216 <sup>a</sup>	44.37 ± 1.036 <sup>d</sup>	29.47 ± 1.586 <sup>d</sup>	20.12 ± 0.127 <sup>a</sup>	28.17 ± 0.809 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Treatments with the same letter in the same column are not significantly different by Tukey test at  $P \leq 0.05$ .



**Table 5**  
Water supplied (irrigations and rainfall) and transpiration during 2006 and 2007.

Treatment	Rainfall (mm) <sup>b</sup>		Irrigation (mm) <sup>a</sup>		Total water applied in the period (mm)		Transpiration from sap flow (mm)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
A	336.2	139.2	880.1	616.2	1216.3	755.4	764.3	690.8
B	336.2	139.2	448.8	314.2	785.0	453.4	789.7	736.4
C	336.2	139.2	68.9	67.8	405.1	207.0	848.2	666.4
D	292.9	139.2	0.0	0.0	292.9	139.2	446.5	349.7

<sup>a</sup> Water fraction (rainfall and irrigation) applied to the soil during the period from installation of sap flow sensors in trees: 2006, from March 2 to November 16, except for treatment D where sap flow sensors were installed in March 22.

<sup>b</sup> Water fraction (rainfall and irrigation) applied to the soil during the period from installation of sap flow sensors in trees: 2007, from March 29 to September 29. Total rainfall in 2006 was 521.8 and 333.7 mm in 2007.

treatment B is the best option for scheduling irrigation of olive trees of cv. Cordovil in southern Portugal.

Table 5 shows that during the period in which sap sensors were installed, the fraction of water applied to the soil both in terms of irrigation and rainfall that contributed to the production of biomass was different among the irrigation treatments. Trees of treatment A made the least use of applied water and had water productivity between 62.8% and 91.4% in 2006 and 2007, respectively. In 2006 about 37.2% of the water applied had been lost through evaporation or drainage and, in 2007 it was of 8.6% as the water applied had been reduced by 37.9% compared to 2006. Contrastingly, in 2007 trees of treatment B in addition of the water supplied by rainfall and irrigation, during the period of installation of sap flow sensors they also were able to harvest stored water from previous rainfall to provide for tree transpiration.

#### 4. Conclusion

Results show that trees responded differently to summer rainfall and irrigation water. The sustained, SDI and regulated deficit irrigation, RDI scheduling regimes applied to treatments B and C respectively led to reduced applications of irrigation water and higher yield. However, over the two-year period the sustained deficit irrigation regime proved to be the most favorable irrigation strategy for use in the “on” and “off” years of olive oil production, leading to appreciable water resource savings and yields. Full irrigation of olive trees as assigned to treatment A led to waste of irrigation water, as olive trees from beginning of pit hardening until mid September slow down their vegetative growth and use less water despite of the amount applied. Results also support the hypothesis that irrigation of low-density olive orchards is needed as it increases yields and the amount of olive extracted oil. They also confirm that irrigation treatments has no influence on the commercial value of produced oils, being all of superior quality and classified as “extra virgin”. Being the cultivar Cordovil highly appreciated for its high fruit free fatty acid and the fine sensory properties of its extracted oil, responsible for the seal of quality “Protected Designation of Origin (PDO)” conferred to the region, such findings are of vital importance to farmers for they allow them freedom to tackle the re-structuring and irrigation of their traditional low-density orchards confident of higher yields and fearless of losing quality and the PDO entitlement.

#### Acknowledgements

This work was possible due to partial funding from the Integrated Development of the Alqueva Area Program (PEDIZA II) and by the Agricultural and Rural Development Operational Program AGRO (Medida 8, Acção 8.1, projecto AGRO 728). The senior author acknowledges the sabbatical leave scholarship provided by the Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

#### References

- Alegre, S., Marsal, J., Mata, M., Arbones, A., Girona, J., Tovar, M.J., 2002. Regulated deficit irrigation in olive trees (*Olea europaea* L., cv. Arbequina) for oil production. *Acta Hort.* 586, 259–262.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO, Rome, Irrigation and Drainage Paper, 56.
- Anonymous, 2007. Produção de azeitona na região de Elvas «muito baixa» este ano. <http://www.confagri.pt/NR/exeres/>.
- Berenguer, M.J., Vossen, P.M., Grattan, S.R., Connell, J.H., Polito, V.S., 2006. Tree irrigation levels for optimum chemical and sensory properties of olive oil. *Hort. Sci.* 41, 427–432.
- Bergonci, J.I., Bergamaschi, H., Berlato, M.A., Santos, A.O., 2000. Potencial da água na folha como indicador de deficit hídrico em milho. *Pesq. Agropec. Bras.* 35, 1531–1540.
- Carbot, K., 2007. Efect del consume del aceite de olive sobre la composición de las lipoproteínas de baja densidade en individuos de diferentes países europeos. Tesis doctoral, Univ. de Barcelona, Espana.
- CE, 2006. Regulamento (CE) n.º 509/2006 do Conselho. J. Oficial União Eur. [Off. J. Eur. Union]. [http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/pt/oj/2006/L\\_093/L\\_09320060331pt00010011.pdf](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/pt/oj/2006/L_093/L_09320060331pt00010011.pdf) (accessed 31.08.08).
- Connor, D.J., 2005. Adaptation of olive (*Olea europaea* L.) to water-limited environments. *Aust. J. Agric. Res.* 56, 1181–1189.
- d'Andria, R., Lavini, A., Morelli, G., Patumi, M., Terenziani, S., Calandrelli, D., Fragnito, F., 2004. Effect of water regime on five picking and double aptitude olive cultivars (*Olea europaea* L.). *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 78 (1), 15–23.
- d'Andria, R., 2008. Olive Responses to Different Irrigation Management in the Mediterranean Environment. IV. Jornadas de actualizacion en riego y fertirriego. Mendoza, Argentina.
- Dettoni, S., Filigheddu, M.R., Schirra, M., 1989. Risposta quanti-qualitativa dell'olio a differenti regime idrici. *Irrig. Dren.* 36, 183–186.
- European Union Regulation EEC 2568/91 on the characteristics of olive oils and their analytical methods. *Off. J. Eur. Commun.*
- European Union Regulation EC 1989/03 amending regulation EEC 2568/91 on the characteristics of olive oil and olive-pomace oil and on the relevant methods of analysis. *Off. J. Eur. Union.*
- Fernández, J.E., Moreno, F., Clothier, B.E., Green, S.R., 1996. Aplicación de la técnica de compensación de pulso de calor a la medida del flujo de savia en olivo. In: *Proc. Del XIV Congreso Nacional de Riegos, Aguadulce, Almería*, 11–13 Junio, pp. 1–7.
- Fernández, J.E., Moreno, F., Girón, I.F., Blázquez, O.M., 1997. Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant Soil* 190, 179–192.
- Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* 3, 309–320.
- Grattan, S.R., Berenguer, M.J., Connell, J.H., Polito, V.S., Vossen, P.M., 2006. Olive oil production as influenced by different quantities of applied water. *Agric. Water Manage.* 85, 133–140.
- Green, S.R., Clothier, B.E., Jardine, B., 2003. Theory and practical application of heat-pulse to measure sap flow. *Agronom. J.* 95, 1371–1379.
- Goldhamer, D.A., Dunai, J., Ferguson, L., 1994. Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Hort.* 356, 172–175.
- Goldhamer, D.A., 1999. Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Hort.* 474 (1), 369–372.
- Goldhamer, D.A., Salinas Fereres, E., 2001. Simplified tree water status measurements can aid almond irrigation. *Calif. Agric.* 55 (3), 32–37.
- Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Moriana, A., Pérez-López, D., Olmedilla, N., Ribas, F., Fregapane, G., 2005. Influence of different irrigation strategies in a cornicabra cv. Olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *J. Food Chem.* 100 (2), 568–575.
- Gómez-Rico, A., Salvador, M.D., Fregapane, G., 2009. Virgin olive oil and olive fruit minor constituents as affected by irrigation management based on SWP and TDF as compared to ETC in medium-density young olive orchards (*Olea europaea* L. cv. Cornicabra and Morisca). *Food Res. Int.* 42, 1067–1076.
- Hermoso, M., Uceda, M., Frias, L., Beltran, G., 1999. In: Barranco, D. (Ed.), *Maduración. International Olive Oil Council (IOOC)*. <http://www.internationaloliveoil.org/>.



- INE, 1999. Recenseamento geral da agricultura. (General Agricultural Survey). Instituto Nacional de Estatística, Portugal.
- Lavee, S., Nashef, M., Wodner, M., Harshemesh, H., 1990. The effect of complementary irrigation added to old trees (*Olea europaea* L.) cv. "Souri" on fruit characteristics, yield and oil production. *Adv. Hort. Sci.* 4, 135–138.
- Lavee, S., Wodner, M., 1991. Factors affecting the nature of oil accumulation in fruit of olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *J. Hort. Sci.* 66, 583–591.
- Lavee, S., Hanoch, E., Wodner, M., Abramowich, H., 2007. The effect of predetermined deficit irrigation on the performance of cv. Muhasan olives (*Olea europaea* L.) in the eastern coastal plain of Israel. *Sci. Hort.* 112, 156–163.
- Moriana, A., Orgaz, F., Fereres, E., Pastor, M., 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 128, 425–431.
- Moriana, A., Pérez-López, D., Gómez-Rico, A., Salvador, M., Olmedilla, N., Riba, F., Fregapane, G., 2007. Irrigation scheduling for traditional, low-density olive orchards: water relations and influence on oil characteristics. *Agric. Water Manage.* 87, 1171–1179.
- Motilva, M.J., Tovar, M.J., Romero, M.P., Alegre, S., Girona, J., 2000. Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (Arbequina cultivar) on oil yield and oil composition during the fruit ripening period. *J. Sci. Food Agric.* 80, 2037–2043.
- Muñoz-Cobo, M., 2005. Cultivo del olivo con riego localizado. Mundi-Prensa-Junta de Andalucía, Madrid.
- Parkinson, K.J., 1985. In: Marshall, B., Woodward, F.I. (Eds.), *Porometry. Instrumentation for Environmental Physiology*. Cambridge University Press, pp. 171–186.
- Pastor, M., Castro, J., Mariscal, M.J., Vega, V., Orgaz, F., Fereres, E., Hildalgo, J., 1999. Repuesta del olivar tradicional a diferentes estrategias y dosis de agua de riego. *Invest. Agric.* 14, 393–404.
- Patumi, M., d'Andria, R., Fontanazza, G., Morelli, G., Giorio, P., Sorrentino, G., 1999. Yield and oil quality of intensively trained trees of three cultivars of olive (*olea europaea* L.) under different irrigation regimes. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 74, 729–737.
- Patumi, M., d'Andria, R., Marsilio, V., Fontanazza, G., Morelli, G., Lanza, B., 2002. Olive and Olive oil quality after intensive monocone olive growing (*Olea europaea* L., cv. Kalamata) in different irrigation regimes. *Food Chem.* 77, 27–34.
- Salas, J., Pastor, M., Castro, J., Vega, V., 1997. Influencia del riego sobre la composición y características del aceite de oliva. *Grasas Aceites* 48, 74–82.
- Serrano, F.J.F., 1998. Yield and physiological response of "Azeiteira" table olive variety to drip irrigation at different water use level. *Olivae* 74, 50–53.
- Santos, F.L., Valverde, P.C., Ramos, A.F., Reis, J.L., Castanheira, N.L., 2007. Water use and response of a dry-farmed olive orchard recently converted to irrigation. *Biosyst. Eng.* 98 (1), 102–114.
- Sanz-Cortés, F., Martínez-Calvo, J., Badenes, M.L., Bleiholder, H., Hack, H., Llacer, G., Meier, U., 2002. Phenological growth stages of olive trees (*Olea europaea*). *Ann. Appl. Biol.* 140 (2), 151–157.
- Sibbett, S., 2002. Orchard management. *Aust. Olive Grower* 29, 7–9.
- Swanson, R.H., Whitfield, D.W.A., 1981. A numerical analysis of heat pulse velocity and practice. *J. Exp. Bot.* 32, 221–239.
- Tognetti, R., d'Andria, R., Morelli, G., Alvino, A., 2005. The effect of deficit irrigation on seasonal variations of plant water use in *Olea europaea* L. *Plant Soil* 273, 139–155.
- Tovar, M.J., Romero, M.P., Alegre, S., Girona, J., Motilva, M.J., 2002. Composition and organoleptic characteristics of oil from Arbequina olive (*Olea europaea* L.) trees under deficit irrigation. *J. Sci. Food Agric.* 82, 1755–1763.

## 4.6. Referências Bibliográficas

- Angerosa, F. & Basti C. (2003). The volatile composition of samples from the blend of monovarietal olive oils and from the processing of mixtures of olive fruits. *European journal of lipid science and technology*, 105 (7):327-332
- Alegre, S., Marsal, J., Mata, M., Arbonés, A., Girona, J. & Tovar, M. (2000). Regulated deficit irrigation in olive trees (*Olea europaea* L. cv. Arbequina) for oil production. In: *IV International Symposium on Olive Growing*, volume 586, pp. 259–262.
- Al-Shdiefat ,S.M & Qrunfleh M. M. (2008).Alternate Bearing of the Olive ( *Olea europaea* L.) as Related to Endogenous Hormonal Content. *Jordan Journal of Agricultural Sciences*, 4(1): 12-25.
- Ben-Gal, A., Dag, A., Basheer, L., Yermiyahu, U., Zipori, I. & Kerem, Z. (2011). The influence of bearing cycles on olive oil quality response to irrigation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59 (21): 11667-11675.
- Ben-Gal, A., Kool, D., Agam, N., Halsema, C. E. V., Yermiyahu, U., Yafe, A., Presnov, E., Erel, R., Majdop, A., Zipori, I., Segal, E., Rüger, S., Zimmermann, U., Cohen, Y., Alchanatis, V. & Dag, A. (2010).Whole-tree water balance and indicators for short-term drought stress in non-bearing ‘Barnea’ olives. *Agricultural Water Management*, 98: 124-133.
- Berenguer, M. J., Vossen, P. M., Grattan, S. R., Connell, J. H. & Polito, V. S. (2006). Tree irrigation levels for optimum chemical and sensory properties of olive oil. *HortScience*, 41: 427–432.
- Boland, A. M., Mitchell, P. D., Jerie, P. H. & Goodwin, I., (1993). The effect of regulated deficit irrigation on tree water-use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science*, 68: 261–274.
- Bosabalidis, A. M. & Kofidis, G. (2002). Comparative effects of drought stress on leaf anatomy of two olive cultivars. *Plant Science*, 163:375–379.
- Chartzoulakis. K., Michelakis, N. & Tzompanakis, K. (1992). Effect of water amount and application date on yield and water utilization efficiency of

'Koroneiki' olives under drip irrigation. *Advances in Horticultural Science*, 6: 82-4.

Chartzoulakis, K., Patakas, A. & Bosabalidis, A. M., (1999a). *Changes in water relations, photosynthesis and leaf anatomy induced by intermittent drought in two olive cultivars. Environmental and Experimental Botany*, 42:113–120.

Conner, D. J. & Fereres, E. (2005). The physiology of adaptation and yield expression in olive. *Horticultural Reviews*, 31: 155–229.

Custódio, M. T. A .S. (2009). *Azeites extra-virgem comerciais: composição em compostos voláteis e relação com parâmetros químicos de qualidade*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto. Faculdade de Farmácia.

Dabbou, S., Chehab, H., Faten, B., Dabbou, S., Esposto, S., Selvaggini, R., Taticchi, A., Servilli, M., Montedoro, F. G. & Hammami, M. (2010). Effect of three irrigation regimes on Arbequina olive oil produced under Tunisian growing conditions. *Agricultural Water Management*, 97: 763-768.

d'Andria, R., (2008). Olive Responses to Different Irrigation Management in the Mediterranean Environment. *IV. Jornadas de actualizacion en riego y fertirriego*. Mendoza, Argentina.

d' Andria, R.; Lavini, A.; Morelli, G.; Sebastiani, L. & Tognetti, R. (2009). Physiological and productive responses of *Olea europaea* L. cultivars Frantoio and Leccino to a regulated deficit irrigation regime. *Plant Biosystems*, 143: 222–231.

Dettori, S., Filigheddu, M. R. & Schirra, M. (1989). Risposta quanti-qualitativa dell'olio a differenti regimi idrici. *Irrigazione e Drenaggio*, 36:183-186.

Dichio, B., A. Sofo & C. Xiloyannis, (2004). Drought resistance mechanism in olive trees. *5th International Symposium on Olive Growing*. P: 193. Izmir, Turkey. Abstract.

European Union Regulation EEC 2568/91 on the characteristics of olive oils and their analytical methods. *Official Journal of European communitie*.

European Union Regulation EC 1989/03 amending regulation EEC 2568/91 on the characteristics of olive oil and olive-pomace oil and on the relevant methods of analysis. *Official Journal of European communitie*.

Fereres, E. (1996). Irrigation scheduling of horticultural crops. *Acta Horticulturae*, 449: 253-258.

Fereres, E. & Soriana, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2): 147–159.

Fernández, J. E., Moreno, F., Giron, I. F. & Blasquez, O. M. (1997). Stomatal control of water use in olive tree leaves. *Plant Soil*, 190: 179–192.

Girona, J., Luna, M., Arbones, A., Mata, M., Rufat, J. & Marsal, J. (2000). Young olive trees responses (*Olea europaea*, cv “Arbequina”) to different water supplies. Water function determination. In: Vitagliano, C., Martelli, G.P. (Eds.), *4th International Symposium on Olive Growing*. Valenzano, Italy, pp. 277–280.

Girona, J., Marsal, J., Alegre, S., Mata, M. and Arbones, A. (2000). Olive tree responses to water deficit of different severity during peak evaporative demand. Final Scientific Report, *Biosensors for tree irrigation*. Participant 06, IRTA-ATF, 19 pp.

Goldhamer, D.A. (1999). Regulated deficit irrigation for California canning olives. *Acta Horticulturae*, 474: 369–372.

Goldhamer, D. A., Dunai, J. & Ferguson, L. F. (1994). Irrigation requirements of olive trees and responses to sustained deficit irrigation. *Acta Horticulturae*, 356: 172–175.

Goldhamer, D. A. & Salinas Fereres, E. (2001). Simplified tree water status measurements can aid almond irrigation. *California Agricultural*, 55 (3): 32–37.

Gómez-Rico, A., Salvador, M. D., Fregapane, G. (2009). Virgin olive oil and olive fruit minor constituents as affected by irrigation management based on SWP and TDF as compared to ET in medium-density young olive orchards (*Olea europaea* L. cv. Cornicabra and Morisca). *Food Research International*, 42:1067–1076.



Gómez-Rico, A., Salvador, M. D., Moriana, A., Pérez, D., Olmedilla, N., Ribas, F., Fregapane, G., (2007). Influence of different irrigation strategies in a traditional Cornicabra cv. olive orchard on virgin olive oil composition and quality. *Food Chemistry*, 100:568-578.

Grattan, S. R., Berenguer, M. J., Connell, J. H., Polito, V. S. & Vossen, P. M. (2006). Olive oil production as influenced by different quantities of applied water. *Agricultural Water Management*, 85: 133–140.

Henar (2002). *Gestión de plantaciones*. Report prepared for the Jornadas de Investigación y transferencia de Tecnología al Sector Oleícola, Córdoba 20-21.

Hermoso, M., Uceda, M., Garcia, A., Morales, B., Frias, M. L. & Fernandez, A. (1991). Elaboracion de aceite de calidad. *Consejería de Agricultura y Pesca*, Serie Apuntes5/92, Sevilla.

Inglese, P., Gullo, G. & Pace, L. S. (1999). Summer drought effects on fruit growth, ripening and accumulation and composition of ‘Carolea’ olive oil. *Acta Horticulturae*, 474:269-73.

Iniesta, F., Testi, L., Orgaz, F. & Villalobos, F. J. (2009). The effects of regulated and continuous deficit irrigation on the water use, growth and yield of olive trees. *European Journal of Agronomy*, 30: 258–265.

Lavee, S., Nashef, M., Wodner, M. & Harshemesh, H. (1990). The effect of complementary irrigation added to old trees (*Olea europaea* L.) cv. “Souri” on fruit characteristics, yield and oil production. *Advances in Horticultural Science*, 4: 135–138.

Lavee, S., Hanoch, E., Wodner M. & Abramowich, H. (2007). The effect of predetermined deficit irrigation on the performance of cv. Muhasan olives (*Olea europaea* L.) in the eastern coastal plain of Israel. *Scientia Horticulturae*, 112: 156–163.

Lavee, S. & Wodner, M. (1991). Factors affecting the nature of oil accumulation in fruit of olive (*Olea europaea* L.) cultivars. *Journal of Horticultural Science*, 66: 583–591.

Lotti, G., Izzo, R. & Riu, R. (1982). Influenza del clima sulla composizione acidica e sterolica degli oli di oliva. *Rivista della Societa Italiana di Scienza dell'Alimentazione* 2,115-126.

Mariscal, M. J., Orgaz, F. & Villalobos, F. J. (2000a). Modelling and measurement of radiation interception by olives canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100: 183-197.

Matthews, M. A. & Boyer, J. S. (1984). Acclimation of photosynthesis to low water potentials. *Plant Physiology* 74: 161–6.

Martin- Vertedor, A. I., Rodriguez, J. M. P., Losada, H. P. & Castiel, E. F. (2011). Interactive responses to water deficits and crop load in olive (*Olea europaea* L., cv. Morisca). II: Water use, fruit and oil yield. *Agricultural Water Management*, 98: 950-958.

Melgar, J. C., Mohamed, Y., Navarro, C., Parra, M. A., Benlloch, M. & Fernández-Escobar, R. (2008). Long-term growth and yield responses of olive trees to different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 95:968-972.

Monteith J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 281: 277–294.

Moriana, A., Orgaz, F., Fereres, E. & Pastor, M. (2003). Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128: 425–431.

Moriana, A., Perez-Lopez, D., Gomez-Rico, A., Salvador, M., Olmedilla, N., Riba, F. & Fregapane, G. (2007). Irrigation scheduling for traditional, low-density oliveorchards: water relations and influence on oil characteristics. *Agricultural. Water Management*, 87: 1171–1179.

Motilva, M. J., Tovar, M. J., Romero, M. P., Alegre, S. & Girona, J. (2000). Influence of regulated deficit irrigation strategies applied to olive trees (Arbequina cultivar) on oil yield and oil composition during the fruit ripening period. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80: 2037–2043.

Muñoz-Cobo, M. (2005). *Cultivo del olivo con riego localizado*. Mundi-Prensa-Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca, Madrid.

Orgaz, F., Villalobos, F. J., Testi, L. & Fereres, E. (2007). A model of daily mean canopy conductance for calculating transpiration of olive canopies. *Functional Plant Biology*, 34: 178-188.

Paços, T.A (2003). *Modelação da evapotranspiração em cobertos descontínuos – programação da rega em pomar de pessegueiros*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.

Palese, A. M, Nuzzo V., Favati F., Pietrafese, A., Celano, G. & Cristos X. (2010). Effects of water deficit on the vegetative response, yield and oil quality of olive trees (*Olea europaea* L., cv Coratina) grown under intensive cultivation. *Scientia Horticulturae*, 125(3): 222-229.

Parkinson, K. J., (1985). Porometry. In: Marshall, B. & Woodward, F. I. (Eds), *Instrumentation for Environmental Physiology*, Cambridge University Press, pp. 171–186.

Pastor, M., Castro, J., Manrique, T. & Gómez, L. (1996). Crecimiento del fruto, formación de aceite y producción del olivar regado con diferentes programas de riego por goteo en Andalucía. *Fruticultura Profesional*, 76: 6-23.

Pastor, M., Castro, J., Mariscal, M. J., Veja, V., Orgaz, F., Fereres, E. & Hidalgo, J. (1999). Repuesta del olivar tradicional a diferentes estratégias y dosis de agua de riego. Investigación agraria. *Producción y Protección Vegetales*, 14 (3): 393-404.

Patumi, M., d’Andria, R., Fontanazza, G., Morelli, G., Giorio, P. & Sorrentino, G. (1999). Yield and oil quality of intensively trained trees of three cultivars of olive (*Olea europaea* L.) under different irrigation regimes. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 74: 729–737.

Patumi, M., d’Andria, R., Marsilio, V., Fontanazza, G., Morelli, G. & Lanza, B., (2002). Olive and Olive oil quality after intensive monocone olive growing (*Olea europaea* L., cv. Kalamata) in different irrigation regimes. *Food Chemistry*, 77: 27–34.

- Pérez-López, D., Ribas, F., Moriana, A., Olmedilla, N. & de Juan, A. (2007). The effect of irrigation schedules on the water relations and growth of a young olive (*Olea europaea* L.) orchard. *Agricultural Water Management*, 89 (3):297-304.
- Rodrigues, M. A. & Correia, C. M. (2009). *Manual da safra e contra safra do olival*. Instituto Politécnico de Bragança.
- Salas, J., Pastor, M., Castro, J., & Vega, V. (1997). Influencia del riego sobre la composición y características organolépticas del aceite de oliva. *Grasas y Aceites*, 48: 74–82.
- Samish, R. M.; Speigel, P. (1961). The use of irrigation in growing olives for oil production. *Israel Journal of Agricultural Reserch* (Ktavim), 11: 87–95.
- Schölander, P. F., Hammel, H. T., Branstreet, E. D. & Hemmingsen, E. A. (1965). Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148: 339-346.
- Sepaskhah A.R. Ahmadi S.H. (2010). A review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production*, 4:241-258.
- Serrano, F. J. F. (1998). Yield and physiological response of “Azeiteira” table olive variety to drip irrigation at different water use level. *Olivae*, 74: 50–53.
- Sibbett, S. (2002). Orchard management. *Australian Olive Grower*, 29: 7–9.
- Silva, A. A. F. (2008). *Necessidades hídricas e resposta da oliveira (Olea europaea L.) ao défice hídrico na região terre quente*. Tese de Doutoramento, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro – Vila Real.
- Tognetti, R., d’Andria, R., Acchi, R., Lavini, A., Morelli, G. & Alvino, A. (2007). Deficit irrigation affects seasonal changes in leaf physiology and oil quality of *Olea europaea* (cultivars Frantoio and Leccino). *Annals of Applied Biology*, 150: 169–186.
- Tognetti, R., d’Andria, R., Morelli, G., Alvino & A. (2005). The effect of deficit irrigation on seasonal variations of plant water use in *Olea europaea* L. *Plant Soil*, 273: 139–155.
- Tovar, M. J., Romero, M. P., Alegre, S., Girona, J. & Motilva, M. J. (2002). Composition and organoleptic characteristics of oil from Arbequina olive (*Olea*

*europaea* L.) trees under deficit irrigation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82: 1755–1763.

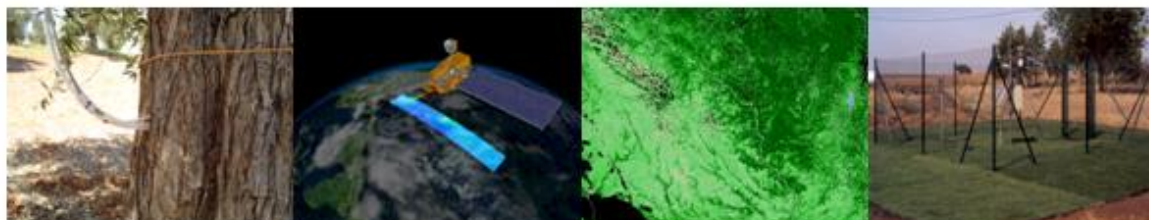
Villalobos, F. J., Testi, L., Hidalgo, J., Pastor, M. & Orgaz, F. (2006). Modelling potential growth and yield of olive (*Olea europaea* L.) canopies. *European Journal of Agronomy*, 24: 296-303.

Confederação Nacional das Cooperativas Agrícolas e do Crédito Agrícola de Portugal CCLR, disponível na: <http://www.confagri.pt/>, acedido em 18-08-2011.

Ministério da Agricultura do Desenvolvimento Rural e das Pescas, disponível na: [www: http://www.gppaa.min-agricultura.pt/valor/pqual/?id=849](http://www.gppaa.min-agricultura.pt/valor/pqual/?id=849), acedido em 18-08-2011.

## CAPÍTULO 5

# MODELAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO E ESTIMATIVA DE COEFICIENTES CULTURAIS COM RECURSO À DETEÇÃO REMOTA E PARÂMETROS MICROMETEOROLÓGICOS



*Neste capítulo, procede-se à modelação da transpiração e utiliza-se uma metodologia que envolve dados provenientes da deteção remota. As imagens capturadas pelo sensor Terra MODIS, nomeadamente as provenientes do produto MOD 13, são usadas em composição de 16 dias e transformadas em índices de vegetação (NDVI E EVI). Posteriormente, procede-se à aplicação de modelos de natureza empírica que correlacionam a transpiração, avaliada em oliveiras com recurso à técnica do impulso de calor, como variável dependente das características da vegetação e de parâmetros micrometeorológicos. Objetiva-se a validade do modelo usado por comparação com dados independentes de transpiração, também avaliada em oliveiras com recurso à mesma técnica de heat pulse.*

**Os objetivos estabelecidos são:**

- (i) Usar os índices de vegetação na estimativa da transpiração numa escala alargada;*
- (ii) Desenvolver um modelo que permita estimar a transpiração de oliveiras regadas, concertando dados provenientes da deteção remota e parâmetros micrometeorológicos, podendo ser facilmente usado por técnicos e agricultores;*
- (iii) Validar as equações estimada pelo modelo com valores de transpiração avaliados pela técnica de heat pulse;*



***(iv) Obter e comparar valores de coeficiente cultural  $K_c$  estimados pelo modelo proposto com os obtidos através dos valores de transpiração estimados com os dados de fluxo de seiva.***

## 5. MODELAÇÃO DA TRANSPIRAÇÃO E ESTIMATIVA DE COEFICIENTES CULTURAIS COM RECURSO À DETEÇÃO REMOTA E PARÂMETROS MICROMETEOROLÓGICOS

### 5.1. Introdução

A natureza global do trabalho experimental realizado teve como objetivo aglutinador o estudo das relações hídricas da oliveira no Alentejo, tendo a evapotranspiração cultural como conceito chave a conhecer, para melhor gerir e planear os sistemas de rega e as dotações a aplicar. A evapotranspiração cultural como processo fisiológico tem um papel determinante nas trocas de energia, e massa entre a hidrosfera, atmosfera e biosfera, variando espacial e sazonalmente, de acordo com a cobertura vegetativa e as condições meteorológicas prevalentes (Sellers *et al.*, 1996). Neste capítulo inicia-se, e deixa-se em aberto, uma linha de trabalho que se crê complementar o que se apresentou mais atrás, nos outros capítulos, com importância e atualidade comprovadas na literatura. Esta linha de trabalho refere-se ao uso de informação proveniente de sensores instalados em satélites, que orbitam o planeta terra, para o melhor entendimento do estado hídrico das culturas, entre outros.

Nas últimas décadas, substanciais avanços foram feitos no sentido da melhor compreensão dos factores que controlam a  $ET_c$  nas zonas com limitações hídricas, com um largo número de técnicas propostas para avaliar a evapotranspiração e as suas componentes. No capítulo 2 fez-se uma revisão das técnicas de medição da evapotranspiração, avaliou-se os resultados obtidos com o uso do método do balanço de água no solo para a estimativa de  $ET_c$  e, simultaneamente, avaliou-se os resultados obtidos com o uso do método de impulso de calor para essa mesma estimativa. Estas técnicas, algumas delas mais sofisticadas que outras, pela natureza pontual das próprias medições, fornecem essencialmente valores ou estimativas pontuais de fenómenos que se desejam avaliados à maior escala. Na tentativa de estender essa informação a áreas maiores, por exemplo ao nível do aglomerado das

culturas, no capítulo 3 descreveu-se e aplicou-se um modelo para transformar da transpiração estimada localmente para a escala do coberto, um processo conhecido como “*scaling-up*”.

O uso de modelos associados a registos provenientes da deteção remota para monitorizar as necessidades hídricas das culturas e espécies endémicas são hoje muito recomendados (Verstraeten *et al.*, 2005). A escolha desta linha de trabalho resulta da sua complementaridade com o que se apresentou e do facto de estar associada a técnicas modernas e inovadoras que poderão ser exploradas e desenvolvidas de futuro, abrindo novos percursos de investigação, como cabe aqui evidenciar, possibilitando a extrapolação de resultados para grandes áreas ou mesmo para uma dada região.

Ruhoff (2011) refere que os métodos que recorrem à deteção remota para estimarem a  $ET_c$  podem dividir-se em três categorias a saber: os métodos empíricos e estatísticos que utilizam a informação proveniente da banda espectral dos infravermelhos térmicos para gerar modelos empíricos (Nagler *et al.*, 2005a e b; Glenn *et al.*, 2008; Jung *et al.*, 2010 citado em Ruhoff 2011); os métodos baseados no balanço de energia e que combinam algumas relações empíricas com modelos físicos, utilizando os dados espectrais de deteção remota para estimarem parâmetros de entrada de modelos físicos (Allen *et al.*, 2007; Kustas e Anderson, 2009 citado em Ruhoff 2011); os que utilizam a lógica da equação de Penman-Monteith (Cleugh *et al.*, 2007 e Fischer 2009 citados em Ruhoff 2011).

São muitos os sensores que adquirem imagens e informação espectral a partir de satélites, e que permitem ter informação sobre a dinâmica do sistema terra-atmosfera e interfaces. De entre esses, destacam-se os satélites Landsat lançados no espaço nos anos 70. A utilização de imagens geradas pela série Landsat possibilitou o estudo da superfície da terra, de forma periódica, contínua e adequada a estudos multi-temporal e multi-espectral. Atualmente existem ativos o Landsat 5 e o Landsat 7, o Landsat 5 apresenta 7 faixas espectrais com resoluções espaciais que variam de 30 a 120 m e o Landsat 7 incorpora uma versão mais avançada, composta por 8 bandas espectrais e resoluções que variam entre 15 a 60 m.

Em 1991 a NASA lançou o programa Earth Science Enterprise com o desafio de desenvolver satélites e outras ferramentas para o estudo intensivo do planeta. Em 1999 criou e lançou o sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) que é o principal instrumento a bordo do satélite Terra (EOS AM-1) e Aqua.

O uso da detecção remota fornece uma forma indireta de avaliar a transpiração havendo, de acordo com Er-Raki *et al.* (2010), uma similaridade entre as características sazonais da vegetação, quantificadas pelos índices de vegetação e pela transpiração. Os índices de vegetação são produtos gerados pelas técnicas de detecção remota, que fornecem informação sobre a biomassa verde e demais parâmetros de crescimento e desenvolvimento da vegetação. O sensor MODIS disponibiliza composições de imagens de 16 dias referentes ao índice de vegetação por diferenças normalizadas (*NDVI, normalized difference vegetation index* na terminologia anglo-saxónica) e ao índice de realce da vegetação (*EVI, enhanced vegetation index* na terminologia anglo-saxónica).

O *NDVI* é calculado tendo em conta que as plantas verdes em crescimento ativo absorvem radiação na região visível do espectro (radiação fotossinteticamente ativa) e que refletem a radiação na região do infravermelho próximo. Este índice é, assim, sensível à presença de clorofila e a outros pigmentos responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho. Uma particularidade do *NDVI* é a sua rápida saturação, o que o torna pouco sensível à detecção de variações no aumento da biomassa vegetal a partir de uma determinada fase de crescimento das plantas (Asrar *et al.*, 1984).

A radiação solar incidente na superfície da terra interage de forma diferente com o solo e a vegetação pelo que, cada um destes alvos tem a sua própria assinatura espectral (Figura 5.1). A vegetação tem na região da radiação visível um pico de absorção que está relacionada com os processos de fotossíntese. Outra característica do comportamento espectral da vegetação é a existência de uma região de elevada reflectância na banda do infravermelho próximo, e de um pico de absorção na região do infravermelho médio, devido à presença de água nas folhas. Em contrapartida, o solo nudo é caracterizado por um aumento contínuo da reflectância com o aumento do comprimento de onda.

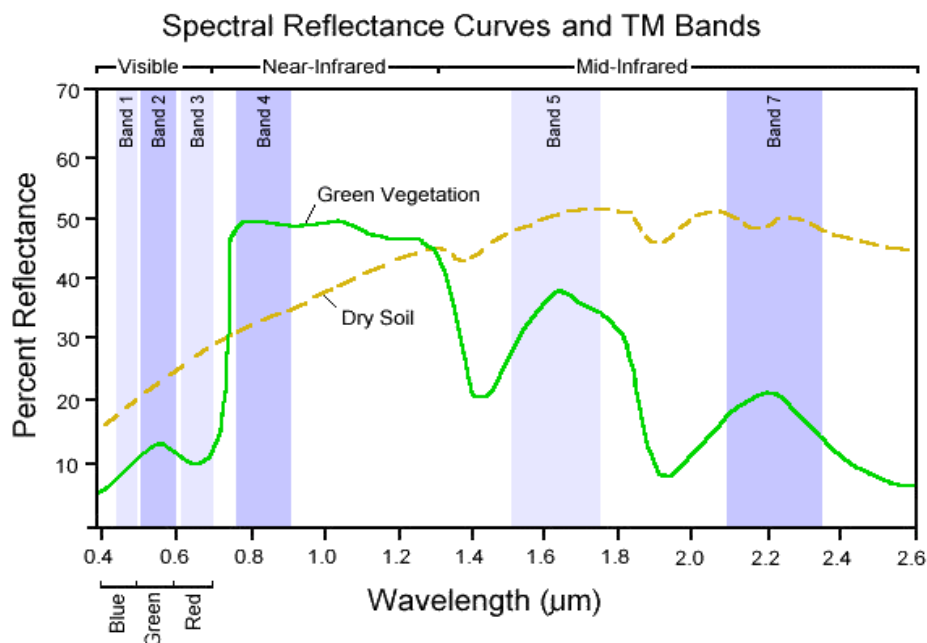


Figura 5.1 - Curvas de reflectância espectral média de vegetação e solo.

O índice de vegetação *NDVI* é calculado pela diferença de reflectância entre a faixa de infravermelho próximo (*NIR*) e a do vermelho (*red*). Neste índice, a faixa do vermelho substitui toda a região do visível devido à sua maior absorção pela clorofila e à menor interferência da atmosfera para esse comprimento de onda. A expressão que permite calcular o *NDVI* é dada pela Eq. [5.1].

$$NDVI = \frac{(NIR-red)}{(NIR+red)} \quad [5.1]$$

O índice *EVI* é mais sensível à variação da estrutura do coberto vegetal incluindo os índices de área foliar, à fisionomia da planta e à arquitetura da copa (Gao *et al.*, 2000 e Huete *et al.*, 2002 citados em Risso *et al.*, 2009). Este índice foi desenvolvido para atenuar as influências atmosféricas e do solo na monitorização da dinâmica da vegetação e apresenta uma maior sensibilidade do que *NDVI* na captura de informação relevante em áreas com maior densidade de biomassa.

Estudos experimentais vêm demonstrando que, os índices de vegetação podem ser relacionados com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida

pelo coberto vegetal e com a fotossíntese (Nagler *et al.*, 2005a; Glenn *et al.*, 2008) e que podem também ser usados para estimar a evapotranspiração cultural (Wylie *et al.*, 2003; Nagler *et al.*, 2005a). Combinando valores de *EVI*, obtidos com recurso às imagens adquiridas pelo sensor MODIS, a temperatura do ar e da radiação líquida Wang *et al.* (2007) foram capazes de estimar a evapotranspiração com recurso a um método semi-empírico. De forma similar, Nagler *et al.* (2005a e b) demonstraram a existência de uma forte correlação entre a transpiração de espécies autóctones no Novo México, USA e o índice de vegetação *EVI* obtido através das imagens do MODIS. Mostraram ainda, que a integração em composição de 16 dias dos valores de temperatura máxima do ar melhorou a estimativa dos valores de  $ET_c$  à escala regional.

O objetivo deste capítulo é usar informação espectral da plataforma MODIS, dados de fluxo de seiva e micrometeorológicos recolhidos *in situ*, para construir e propor um modelo empírico que permita estimar a transpiração de olivais regados no Alentejo, à semelhança do desenvolvido por Nagler *et al.* (2005a) para a região do Novo México. A validação é efetuada com dados de transpiração a partir de leituras independentes de fluxo de seiva. Trata-se de uma primeira abordagem, ainda incipiente, que deverá ser complementada com outras observações e validada com mais dados e por outras vias, como o balanço de energia (modelo METRIC) e uso de informação espectral de maior resolução. Pretende-se, ainda, identificar valores de  $K_c$  obtidos através da transpiração estimada por deteção remota, que possam ser usados localmente na gestão da rega e extrapolados para a gestão de olivais regados em larga escala, já que os olivais no Alentejo tendem a ser plantados em sistemas super-intensivos, ocupando extensas áreas de regadio.

## 5.2. Metodologia

### 5.2.1. Descrição do local em estudo

O ensaio experimental decorreu num olival de variedade Cordovil, localizado na Herdade dos Lameirões (lat. 38° 04' 57" N, long. 07° 16' 27" W, alt. 75 m) e pertencente à freguesia de Safara (v.d. capítulo 2, secção 2.2.1).



Os dados de transpiração utilizados na elaboração do modelo foram os obtidos através da monitorização do tratamento B, descrito anteriormente, e que recebeu 60% da água aplicada ao tratamento A, mas garantiu taxas de transpiração muito similares às obtidas no tratamento conduzido em conforto hídrico (tratamento A). Garantiu ainda esse tratamento, uma boa gestão da rega, com conteúdos de água no solo elevados ao longo do período de rega de 2006 e 2007 (v.d. Quadro 2.9). Não se elegeram tratamentos sujeitos a limitações hídricas acentuadas, como é o caso dos tratamentos C e D, porque o efeito do stress hídrico adiciona incerteza na estimativa da transpiração (Nangler *et al.*, 2005a).

### 5.2.2. Fonte de dados

Na elaboração dos índices de vegetação *NDVI* e *EVI* foram usadas imagens adquiridas pelo MODIS/Terra referentes ao produto MOD13, através do sítio <https://wist.echo.nasa.gov/api/>, sem custos para o utilizador e sem necessidade de correção atmosférica ou normalizações. Para aquisição das imagens foi necessário proceder à referenciação geográfica do local onde foi instalado o tratamento B, com o auxílio de um GPS e visualmente confirmada através das imagens geo-referenciadas pelo MODIS.

Nas proximidades do tratamento B estava instalada uma estação meteorológica automática, onde eram monitorizados os parâmetros climáticos: temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ); radiação solar global ( $\text{kJ m}^{-2}$ ); velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ); precipitação (mm); pressão parcial do vapor de água no ar (kPa). A monitorização temporal e registo dos diferentes sensores eram feitos em intervalos de 10 s e integrados em períodos de tempo correspondentes à hora. A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foi calculada pelo método de FAO-Penman-Monteith cujos procedimentos estão descritos em Allen *et al.* (1998), e já referidos no capítulo 2, secção 2.3.2.1.

### 5.2.3. Base de dados e métodos estatísticos

A transpiração foi avaliada pela técnica do impulso de calor, entre 22 de março e 16 de outubro de 2006 e entre 26 de março e 18 de outubro de 2007. Posteriormente, procedeu-se ao agrupamento dos valores de transpiração em composições de 16 dias e calculados o seu valor médio. De forma similar, as variáveis micrometeorológicas radiação líquida, temperaturas máxima e média, déficit de pressão de vapor e também a evapotranspiração de referência foram preparadas para o período em estudo e calculadas as médias correspondentes a períodos de 16 dias correspondentes aos usados para agregar a transpiração. Para esses períodos de 16 dias foram também calculados índices de vegetação (*NDVI* e *EVI*) e os índices normalizados (*NDVI\** e *EVI\**). Choudhury *et al.* (1994) e Nagler *et al.* (2005b) recomendam o uso da Eq. [5.2] para a normalização dos índices de vegetação (*NDVI* e *EVI*), numa escala de 0 a 1.

$$VI^* = 1 - (VI_{max} - VI)/(VI_{max} - VI_{min}) \quad [5.2]$$

onde,

*VI\** - índice de vegetação normalizado;

*VI<sub>max</sub>* - valor máximo do índice de vegetação;

*VI<sub>min</sub>* - valor mínimo do índice de vegetação.

Foi então, estabelecida correlação entre os valores de transpiração, das variáveis micrometeorológicas supracitadas e dos índices de vegetação, tendo sido a variável temperatura máxima do ar (*t<sub>a</sub>*) identificada como sendo a que melhor se correlacionava com a transpiração. O Quadro 5.1 apresenta os coeficientes de determinação entre as diversas variáveis em causa.

Quadro 5.1 - Média e matriz de correlação entre a transpiração  $T$ , temperatura máxima do ar,  $t_a$ , radiação líquida,  $Rn$ , déficit de pressão de vapor de água na atmosfera,  $D_a$ , evapotranspiração de referência,  $ET_0$ , índices de vegetação,  $EVI$  e  $NDVI$ , índices de vegetação normalizados,  $EVI^*$  e  $NDVI^*$ , para o ano de 2006 na Herdade dos Lameirões.

	Média	$T$	$t_a$	$Rn$	$D_a$	$ET_0$	$EVI$	$NDVI$	$EVI^*$	$NDVI^*$
$T$	3.0 mm dia <sup>-1</sup>	1.00	0.78	0.42ns	0.79	0.56	-0.79	-0.77	-0.79	-0.77
$t_a$	29.5 °C		1.00	0.60	0.99	0.92	-0.67	-0.87	-0.67	-0.87
$Rn$	110.5 W m <sup>-2</sup>			1.00	0.57	0.83	-0.28ns	-0.51	-0.28	-0.51
$D_a$	2.4 kPa				1.00	0.89	-0.66	-0.84	-0.66	-0.84
$ET_0$	4.2 mm dia <sup>-1</sup>					1.00	-0.51	-0.81	-0.51	-0.81
$EVI$	0.22						1.00	0.90	1.00	0.90
$NDVI$	0.36							1.00	0.90	1.00
$EVI^*$	0.27								1.00	0.90
$NDVI^*$	0.31									1.00

Coeficientes de determinação com ns indicam que não foram significativos ( $P > 0.05$ ); os restantes foram significativos,  $P \leq 0.05$ .

O modelo proposto para estimar  $T$  baseado nos índices de vegetação e na temperatura máxima do ar segue os seguintes pressupostos:

- Relação entre o índice de área foliar ( $LAI$ ) e a absorção de luz pelo coberto ( $fIR_s$ ) definida pela Eq. [5.3] – princípio da extinção exponencial da radiação, lei de Beer;

$$fIR_s = (1 - e^{-bLAI}) \quad [5.3]$$

- Transpiração linearmente relacionada com  $fIR_s$  e  $(1 - e^{-bLAI})$ ;
- Índices de vegetação ( $NDVI$  e  $EVI$ ) linearmente relacionados com  $LAI$ , substituindo  $bLAI$  na equação 5.3, tal que  $fIR_s = (1 - e^{-VI^*})$

Este tipo de modelo relaciona a transpiração ( $T$ ) com a luz interceptada pelo coberto e representa uma modificação, proposta por Nagler *et al.* (2005b), à relação original apresentada por Monteith e Unsworth (1990), onde os índices de vegetação normalizados substituem o índice de área foliar ( $LAI$ ), tendo-se.

$$T = a(1 - e^{-bVI^*}) \quad [5.4]$$

onde,

$T$ - transpiração ( $\text{mm dia}^{-1}$ );

$a$  - constante gerada pelo modelo;

$VI^*$  - índice de vegetação normalizado ( $EVI^*$  e  $NDVI^*$ ).

A Figura 5.2 mostra a relação entre a  $T$  e a  $EVI^*$  para a situação do ensaio.

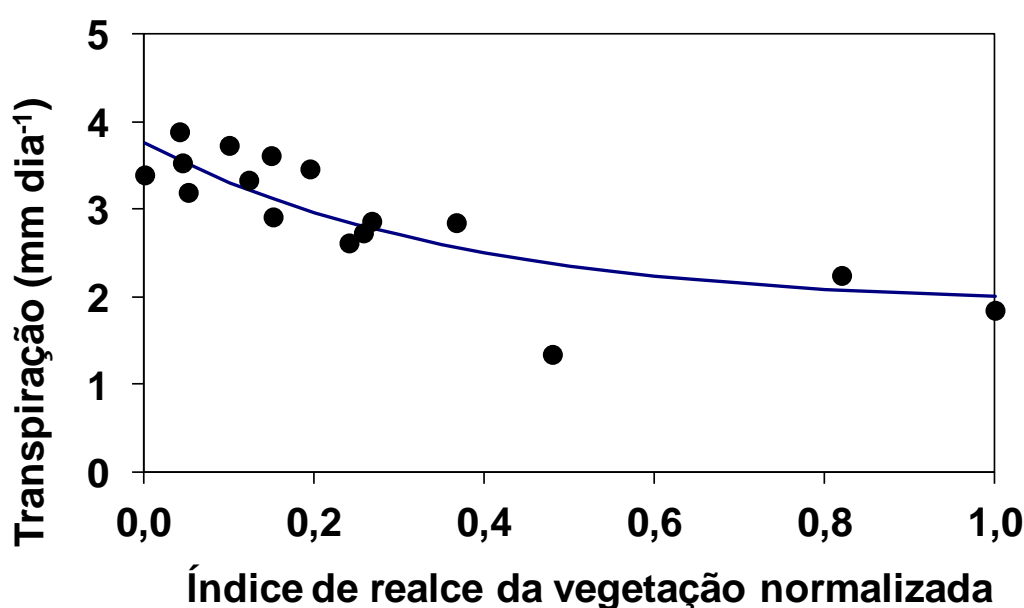


Figura 5.2 - Relação entre a transpiração obtida experimentalmente e o índice de realce da vegetação normalizado ( $EVI^*$ ). Os valores da transpiração foram avaliados pela técnica do impulso de calor. Os valores de  $EVI$  foram obtidos da plataforma MODIS e referentes à Herdade dos Lameirões durante o período experimental de 2006, ( $T = 1.88 (1 + e^{-2.76EVI^*})$ ;  $r^2=0.66$ ).

A Figura 5.3 apresenta a relação entre a transpiração normalizada ( $T^*$ ) e a  $t_a$  para a situação do ensaio, com um ajustamento da regressão ( $T^*$  vs.  $t_a$ ) à curva do tipo sigmóide com a seguinte expressão:

$$T^* = c / \left( 1 + e^{-\frac{(t_a-d)}{e}} \right) \quad [5.5]$$

onde,

$T^*$  – transpiração normalizada;

$t_a$  – temperatura máxima do ar (°C);

a, b, c, d, e - constantes geradas pela regressão.

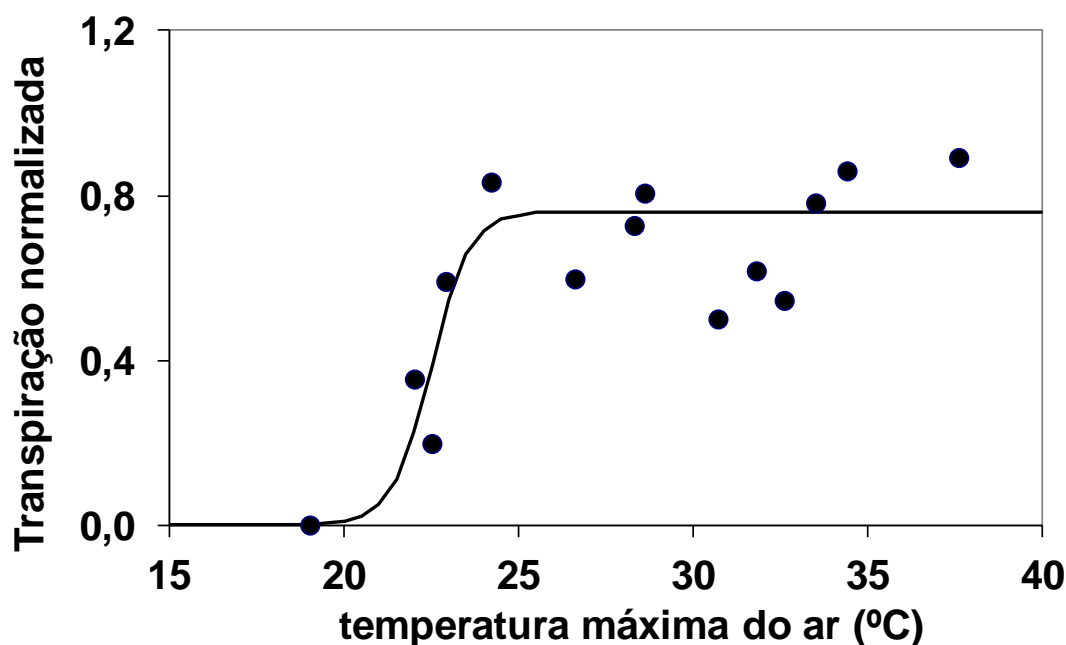


Figura 5.3 - Relação entre a transpiração normalizada, obtida experimentalmente, e a temperatura máxima do ar. Os valores da transpiração foram avaliados pela técnica do impulso de calor e os seus valores foram normalizados. Os valores de  $t_a$  foram registados na estação meteorológica da Herdade dos Lameirões durante o período experimental de 2006. ( $T^* = 0.761 / \left( 1 + e^{-\frac{(t_a-22.49)}{0.55}} \right)$ ;  $r^2=0.70$ ).

A análise da figura deixa perceber que existe uma temperatura mínima, inferior a 20°C para a qual o processo transpirativo é mínimo. Os valores de  $T^*$

têm uma evolução ascendente e rápida para uma variação de  $t_a$  de aproximadamente 5° C. Para valores de  $t_a$  superiores a 25° C, a transpiração praticamente não sofre alterações o que sugere que, as limitações de natureza fisiológica e ambiental, fundamentalmente o déficit de pressão de vapor, restringem o crescimento da transpiração. As duas equações foram multiplicadas e posteriormente sujeitas a regressão linear, de modo a obter a equação pretendida a qual relaciona a transpiração  $T$  (mm dia<sup>-1</sup>) com os índices de vegetação, VI e com a temperatura máxima do ar,  $t_a$  (°C) Eq. [5.6].

$$T = a(1 + e^{-bVI^*}) \left( c / (1 + e^{-(t_a-d)/e}) \right) + f \quad [5.6]$$

onde os coeficientes a, b, c, d, e, f são as constantes geradas pela regressão, de modo a produzir o melhor ajustamento entre  $T$  e as variáveis independentes. Todas as análises de regressão foram calculadas com o auxílio do software NLREG Nonlinear Analysis Program (Sherrod, 2008).

### 5.3. Resultados e discussão

A figura 5.4 mostra a evolução temporal dos índices de vegetação ( $NDVI$  e  $EVI$ ) e da transpiração normalizada, considerando valores médios para composições de 16 dias numa escala temporal que teve início no dia 1 de janeiro de 2006. Os valores máximos de  $EVI$  e  $NDVI$  foram de 0.415 e 0.588 e ocorreram no dia 1 de abril com um declínio que atingiu um mínimo no dia 30 de setembro. A evolução temporal dos valores dos índices de vegetação reflete o comportamento fenológico da oliveira com um período de crescimento intenso durante a primavera e início do verão, um abrandamento do crescimento que se tornou praticamente nulo durante o verão, para voltar a ganhar visibilidade no outono. No que diz respeito à transpiração normalizada, os seus valores aumentam e atingem o máximo no dia 13 de agosto a partir desta data declinam para atingir os menores valores por volta do dia 17 de novembro.



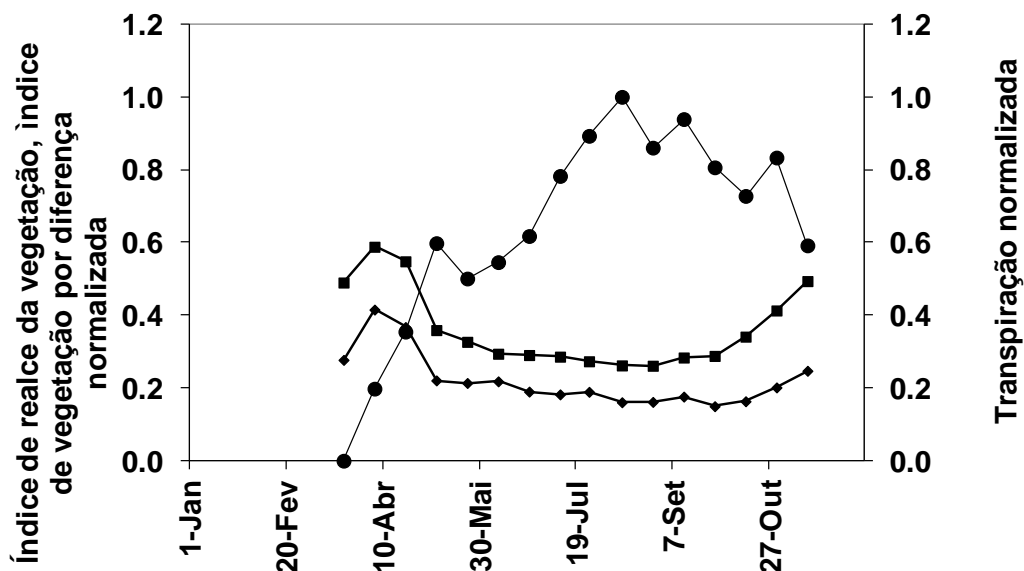


Figura 5.4 - Evolução temporal da transpiração (●) e índices de vegetação, NDVI (◆) e EVI (■). Os valores das três variáveis foram medidos na Herdade dos Lameirões e correspondem a médias de 16 dias e numa escala temporal que teve início no dia 1 de janeiro.

Usando o modelo definido pela Eq. [5.6] obteve-se a equação para  $T$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) dependente de  $EVI^*$  e de  $t_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), conforme a expressão [5.7] ( $r^2 = 0.79$  e  $\text{RMSE} = 0.331 \text{ mm dia}^{-1}$ ).

$$T = 1.35(1 + e^{-2.76EVI^*}) \left( 0.761 / (1 + e^{-(t_a - 22.5)/0.55}) \right) + 1.55 \quad [5.7]$$

Baseado na prévia análise dos factores correlacionados com a transpiração, estabeleceu-se também a Eq. [5.8] que combina  $NDVI^*$  e  $t_a$  ( $r^2=0.73$  e  $\text{RMSE}=0.325 \text{ mm dia}^{-1}$ ). Estes valores são semelhantes aos obtidos com a equação [5.7] sugerindo que a transpiração pode ser estimada por qualquer das relações.

$$T = 1.22(1 + e^{-1.77NDVI^*}) \left( 0.761 / (1 + e^{-(t_a - 22.5)/0.55}) \right) + 1.62 \quad [5.8]$$

A Figura 5.5 apresenta os valores de  $T$  avaliados experimentalmente e os valores da transpiração estimados a partir da Eq. [5.7], com uma boa concordância entre os valores da transpiração avaliados *in situ* e os estimados pelo modelo.

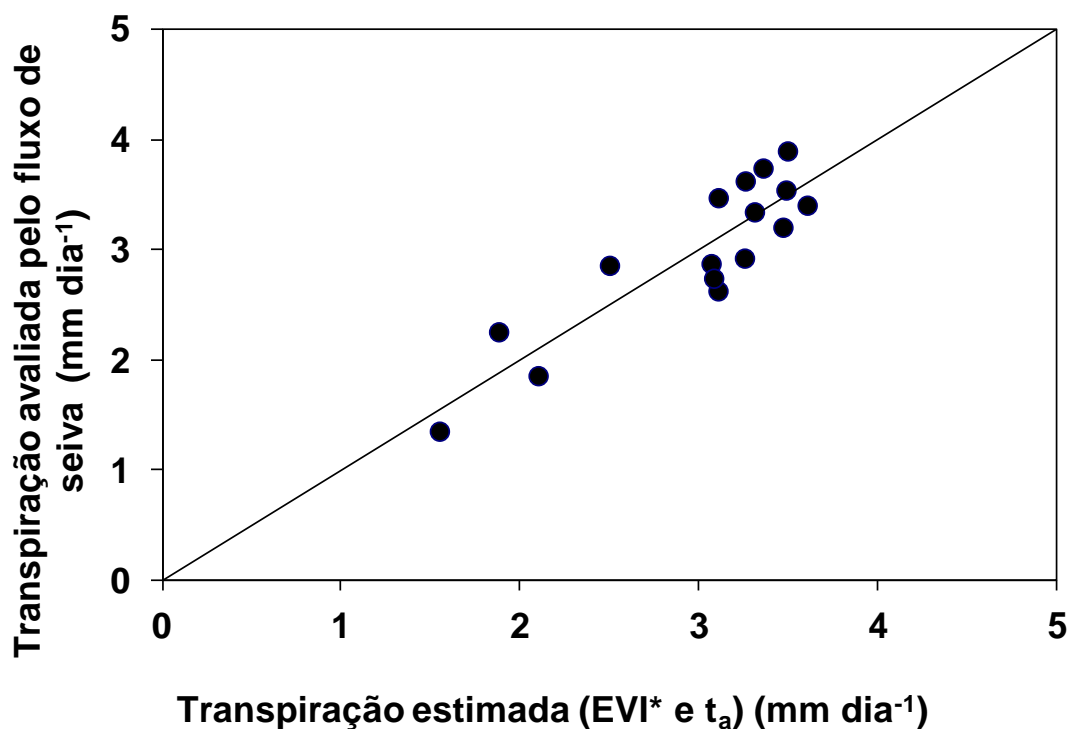


Figura 5.5 - Valores de  $T$  avaliados experimentalmente e estimados com base no índice de vegetação  $EVI^*$  e  $t_a$  ( $^{\circ}C$ ). Os valores referem-se ao ano de 2006 e foram avaliados e estimados na Herdade dos Lameirões. ( $r^2 = 0.95$ ;  $RMSE = 0.147 \text{ mm dia}^{-1}$ ).

Quando se observa a evolução sazonal dos valores da transpiração avaliados experimentalmente e os valores da transpiração estimados pela Eq. [5.6] constata-se que, existe uma quase sobreposição entre os valores da transpiração avaliados e estimados (Figura 5.6), o que vem reforçar o já observado na Figura 5.5.

Para a validação do modelo usaram-se os resultados experimentais de transpiração obtidos de dados de fluxo de seiva avaliados durante o ano de 2007 no mesmo local e ensaio (tratamento B). A Figura 5.7. apresenta os

valores avaliados e estimados da transpiração normalizada para esse ano, com uma correlação bastante aceitável, porém com um declive ligeiramente diferente do obtido em 2006 e com um maior afastamento à reta 1:1, sugerindo que, pode ter havido no ano de 2007 uma sobrestimativa da transpiração avaliada com os sensores de fluxo de seiva. Com os valores de transpiração de 2006 usados para a calibração do modelo (Figura 5.5), e os de 2007 usados para os validar (Figura 5.7) constata-se que, o modelo deverá poder ser aplicados noutros anos para estimar a transpiração, com base em dados de temperatura máxima do ar e de *NDVI* e *EVI*.

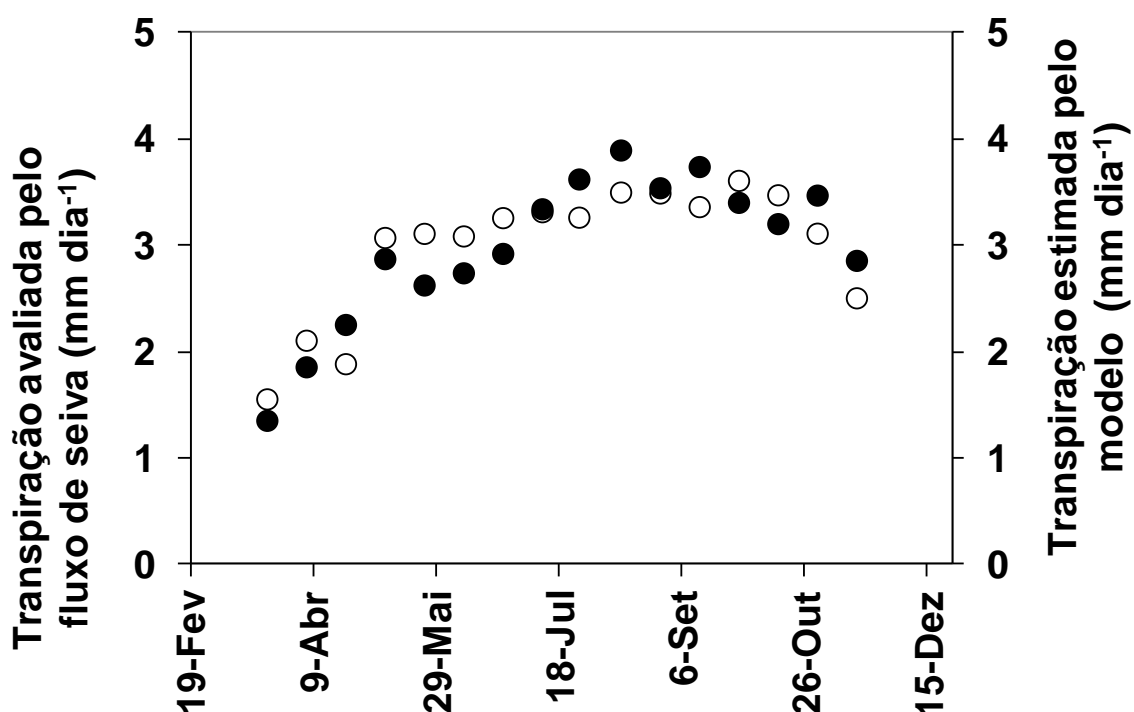


Figura 5.6 - Evolução sazonal da transpiração avaliada (●) e da transpiração estimada (○) através de *EVI*\* e  $t_a$  (°C). Valores referentes ao período experimental de 2006 e registados na Herdade dos Lameirões.

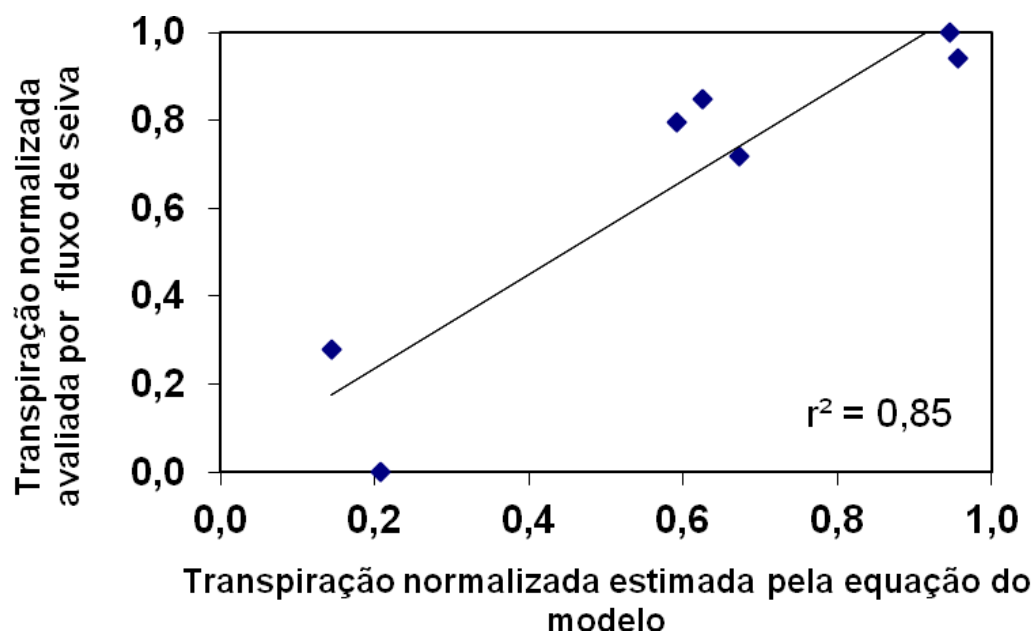


Figura 5.7 - Valores de transpiração  $T$  normalizados, avaliados experimentalmente e estimados com base no índice de vegetação  $EVI^*$  e  $t_a$  ( $^{\circ}C$ ). Os valores referem-se ao ano de 2007 e foram avaliados e estimados na Herdade dos Lameirões.

A Figura 5.8 mostra a evolução média da curva que estima os valores de  $K_c$  ( $T/ET_0$ ) baseados nos valores de  $T$  obtidos com recurso à Eq.[5.6] e os valores de  $T$  avaliados experimentalmente. As curvas têm um desenvolvimento similar, com valores muito idênticos aos obtidos por Fernández *et al.* (2006) para um olival situado no sul de Espanha.

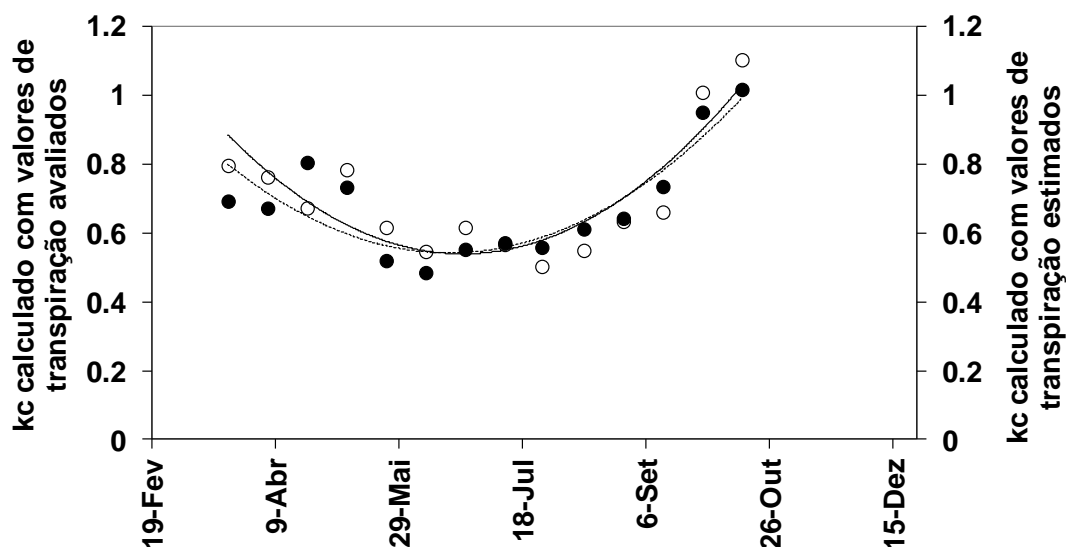


Figura 5.8 - Evolução sazonal dos valores de  $K_c (T/ET_0)$  obtidos com base na estimativa de  $T$  a partir de  $EVI^*$  e  $t_a$  (○) e os obtidos com base nos valores de  $T$  avaliados experimentalmente (●). Os valores referem-se ao ano de 2006 e foram obtidos na Herdade dos Lameirões (----- $y = 0.00003x^2 - 0.0109x + 1.4727$ ;  $r^2=0.77$  e —  $y = 0.00004x^2 - 0.0135x + 1.7231$ ;  $r^2=0.77$ ).

## 5.4. Conclusão

Ao longo deste capítulo analisou-se a capacidade dos índices de vegetação, produtos provenientes da deteção remota, modelarem a transpiração das oliveiras regadas no Alentejo, com base em informação da transpiração obtida por sensores de fluxo de seiva e dados micrometeorológicos do local do ensaio. Construíram-se equações que permitiram estimar essa transpiração apenas com base no conhecimento dos índices de vegetação e da temperatura máxima do ar. Através da análise dos resultados podem retirar-se as seguintes conclusões:

- (1) Os índices de vegetação (NDVI e EVI), combinados com a variável meteorológica temperatura máxima do ar, originaram modelos

válidos para obter e eventualmente extrapolar a transpiração para olivais regados no Baixo Alentejo;

- (2) A comparação entre aos valores de transpiração avaliados experimentalmente e os estimados com o modelo deixa antever um erro médio de 11%, que exige mais dados e ensaios para confirmar a validade do modelo apresentado, e a sua aplicabilidade a outras zonas e olivais;
- (3) A boa concordância entre os valores de  $K_c$  estimados com recurso à transpiração obtida a partir de deteção remota, e os avaliados com recurso à transpiração obtida experimentalmente permite concluir que os  $K_c$  estimados poderão vir a ser utilizados com confiança como ferramenta de gestão e programação da rega em olivais no Alentejo;
- (4) O modelo empírico apresentado deve ser validado noutros olivais e também confrontado com modelos semelhantes, mas de base física, alicerçados no balanço de energia, como o modelo METRIC (Allen *et al.*, 2007, Santos *et al.*, 2008), que usa informação térmica espectral com base de análise de trocas de calor e energia entre a vegetação e a atmosfera. A validação do modelo noutros olivais garante uma maior confiança na extrapolação da transpiração à escala alargada.



## 5.5. Referências Bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements* – FAO. Irrigation and drainage, paper 56. Rome, Italy.

Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration METRIC-Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (4): 380-394.

Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T. & Hatfield, J. L. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agronomy Journal*, 76:300-306.

Choudhury, B., Ahmed, N., Idso, S., Reginato, R., & Daughtry, C. (1994). Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment*, 50: 1 –17.

Er-Raki, S., Chehbouni, A. & Duchemin, B. (2010). Combining satellite sensing data the FAO-56 dual approach for water use mapping in irrigation wheat fields of a semi-arid region. *Remote sensing*, 2(1): 375-387.

Fernández, J.E. (2006). Irrigation management in olive. In: Caruso, T., Motisi, A. & Sebastiani L. (Eds.), *Biotechnology and Quality in Olive: Recent Advances in Olive Industry*, 295-305, Marsala, Italy, pp. 295-272.

Glenn E. P., Huete A. R., Nagler P. L., & Nelson, S.G. (2008). *Sensors*, 8: 2136-2160.

Monteith, J. L. & Unsworth, M. H. (1990). *Principles of Environmental Physics*, 2<sup>nd</sup> Ed., Edward Arnold, New York (p 53-54).

Nagler P. L., Cleverly J., Glenn E., Lampkin D., Huete A., & Zhengming, W. (2005a). Predicting riparian evapotranspiration from MODIS vegetation indices and meteorological data. *Remote Sensing of the Environment*, 94: 17-30.

Nagler P. L., Scott R. L., Westenburg C., Cleverly J. R., Glenn E. P. & Huete, A. R. (2005b). Evapotranspiration of western U.S. rivers estimated using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sensing of the Environment*, 97: 337-351.

Risso, J., Rizzi, R., Epiphanyo, R. D. V., Rudorff, B. F. T., Formaggio, A. R., Shimabukuro, Y. E. & Fernandes, S. L. (2009). Potencialidade dos índices de vegetação EVI e NDVI dos produtos MODIS na separabilidade espectral de áreas de soja. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, INPE: 379-386.

Ruhoff, A. L. (2011). *Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais*. Tese submetida ao programa de pós graduação em Recursos hídricos e saneamento. Universidade Federal do Rio Grande do sul. Brasil.

Santos, C., Lorite, I. J., Tasumi, M., Allen, R. G. & Fereres E. (2008) Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrigation Science*, 26: 277-288.

Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, G. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., et al. (1996). A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 9: 676–705.

Sherrod, P.H. (2008). *Users Guide for NLREG, Nonlinear Regression Analysis Program, Version 6.4*. Phillip H. Sherrod, Nashville, TN.

Verstraeten, W. W., Veroustraete, F. & Feyen, J. (2005). Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time: towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products. *Remote Sensing of Environment*, 30: 256–276.

Wang K., Wang P., Li, Z., Cribb M., & Sparrow, M. (2007). A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 12: Art. No. D15107.

Wylie, B., Johnson, D., Laca, E., Saliendra, N., Gilmanov, T., Reed, B., Tieszen, L. & Worstell, B. (2003). Calibration of remotely sensed, coarse resolution NDVI to CO<sub>2</sub> fluxes in a sagebrush-steppe ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 85: 243-255.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

---



*Neste capítulo faz-se uma síntese das conclusões que se foram tecendo ao longo dos restantes capítulos apresenta-se ainda algumas perspetivas de trabalhos futuros.*



## 6. CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

### 6.1. Conclusões Gerais

Esta tese é o resultado de um trabalho de investigação desenvolvido durante 3 anos num olival tradicional (cv. Cordovil) que apenas beneficiou da rega a partir de 2005. Foram objetivos principais desta linha de trabalho a quantificação das necessidades hídricas deste tipo de olival, quando regado, a monitorização dos parâmetros ecofisiológicos (potencial hídrico, condutância e transpiração) e o impacto comparativo da rega deficitária e plena na produção de fruto e na qualidade química e sensorial do azeite. De modo a clarificar o impacto da rega na qualidade química e sensorial do azeite, tendo em conta as exigências comerciais, procedeu-se a determinação das referidas características seguindo as normas regulamentadas. Foram usadas na avaliação da transpiração das árvores a técnica do impulso de calor bem como metodologias de extrapolação da transpiração para a parcela com recurso a técnicas e dados provenientes da deteção remota. De seguida apresentam-se as conclusões gerais por capítulo.

#### *Capítulo 2: Estimativa da evapotranspiração e das suas componentes em espécies lenhosas*

Deu-se início a esta linha de trabalho pela avaliação das necessidades hídricas do olival através da estimativa da  $ET_c$ , com recurso ao balanço de água no solo e procedeu-se à estimativa da transpiração e da evaporação do solo. Ficou demonstrado que a metodologia do balanço de água no solo é pouco adequada na avaliação da evapotranspiração devido fundamentalmente à incerteza no conhecimento do volume real de solo explorado pelas raízes das oliveiras, apesar da monitorização do balanço de água a diferentes distâncias do tronco das árvores quer na linha, quer na entrelinha. A técnica do impulso de calor mostrou-se capaz de registar adequadamente a dinâmica da transpiração e tem robustez e fiabilidade para ser usada em condições de campo durante longos períodos de tempo e com baixa manutenção. Com



capacidade para detetar as alterações do comportamento hidráulico das árvores, esta técnica mostrou-se ferramenta útil e capaz de otimizar o uso da água aplicada pelas regas. Quanto à evaporação de água no solo os resultados mostram que é uma fração importante de  $ET_c$  com valores médios até  $4 \text{ mm dia}^{-1}$  o que corresponde a cerca de 30 a 50% de  $ET_c$ .

Face ao anteriormente exposto é preferível a avaliação da  $ET_c$  a partir da partição e determinação da transpiração e da evaporação do solo, em vez da sua determinação agregada.

### *Capítulo 3: extrapolação da transpiração para a parcela, modelação da condutância estomática e coeficientes culturais*

Após avaliação da transpiração pela técnica do impulso de calor extrapolou-se a transpiração para a parcela em estudo e modelou-se a condutância estomática da copa. Mediante a razão  $T/ET_0$  estimou-se os valores de coeficiente cultural,  $K_c$  e determinou-se os valores do coeficiente de stress,  $K_s$  para as situações de rega deficitária e sequeiro.

A estimativa da transpiração para a parcela foi superior para o tratamento B, com mais elevada razão  $T/ET_0$  e menos 40% da água aplicada do que o tratamento A e maior eficiência no uso da água, revelando-se a melhor estratégia de rega para a cv. Cordovil na região de Moura. Relativamente à razão  $T/ET_0$ , que define  $K_c$ , constata-se que independentemente da disponibilidade de água no solo à disposição das plantas há uma acentuada redução dos valores de  $K_c$  durante o verão, sendo uma adaptação fisiológica da própria espécie às temperaturas elevadas e ao elevado poder evaporativo da atmosfera. Este comportamento reforça a necessidade de abandono da estratégia de rega plena a favor da rega deficitária sustentada, conduzindo a rega plena a dotações excessivas. Os diferentes níveis de aplicação de água pela rega, para além de serem determinantes no conteúdo de água no solo, influenciaram também a condutância estomática. O comportamento da condutância estomática face à variável déficit de pressão de vapor confirma a associação entre as duas variáveis sendo o controlo de abertura e fecho estomático um mecanismo de defesa da árvore em condições de stress ambiental e hídrica. No tratamento D,

em regime de sequeiro, os valores da condutância estomática relativa foram decaindo ao longo do verão e estabilizaram para valores da ordem dos 0.5, denotando a capacidade de resistência desta espécie a condições de humidade do solo adversas.

#### *Capítulo 4: Quantificação da produção obtida nas diferentes estratégias de rega-correlação com a composição química, odor e sabor do azeite*

A rega condicionou a produção nos tratamentos A, B e C. Ao longo dos dois anos em que se monitorizou a produção os regimes de rega deficitária, tratamento B e C, provaram ser as melhores estratégias de rega com reduções pouco significativas na produção de fruto e azeite e com substanciais poupanças nas dotações de água. Contudo, a qualidade comercial do azeite não foi afetada pelos diferentes regimes hídricos aplicados (estratégias de rega) sendo o azeite produzido de qualidade superior e mantendo as características sensoriais e químicas do azeite DOP da região de Moura.

#### *Capítulo 5: Modelação da transpiração e estimativa de coeficientes culturais com recurso à deteção remota e parâmetros micrometeorológicos*

Recorreu-se a métodos de deteção remota e dados provenientes do satélite MODIS para estimar a transpiração na parcela. Esta metodologia mostrou-se capaz de adequadamente estimar a transpiração do olival (por comparação com os resultados de fluxo de seiva do tratamento B), com a vantagem de baixo custo e a possibilidade de extrapolação de resultados para a parcela. Resta a sua validação para outros olivais e outras circunstâncias de rega.

## **6.2. Sugestões para trabalhos futuros**

Os resultados apresentados e as conclusões deixam em aberto algumas linhas de investigação:

Aplicação do algoritmo METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration), uma variação do modelo Surface

Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL), para descrever a variação espacial dos componentes do balanço de energia à superfície da área coberta pelo olival. O modelo, desenvolvido por Allen *et al.* (2007), utiliza o método residual da equação do balanço de energia para estimar a evapotranspiração à escala da parcela, com auxílio de dados espectrais de imagens de satélite e de dados meteorológicos;

Aplicação e estudo do efeito de mulches em olivais regados, para controlar ou minimizar a evaporação do solo, uma fração importante na avaliação de  $ET_c$  e que constitui uma perda substancial de água de rega, bem como analisar o custo-benefício com a poupança de água obtida;

Aprofundamento do estudo e análise do efeito da rega na qualidade química e sensorial do azeite. Sugere-se uma análise multifactorial que analise o efeito da água de rega, estado de maturação e laboração do azeite nas características sensoriais e químicas do azeite.

### 6.3. Referências Bibliográficas

Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) — Applications. *Journal of Irrigation and Drainage engineering*, 133(4): 395–406.













---

**Contactos:**

Universidade de Évora  
**Instituto de Investigação e Formação Avançada - IIFA**  
Palácio do Vimioso | Largo Marquês de Marialva, Apart. 94  
7002-554 Évora | Portugal  
Tel: (+351) 266 706 581  
Fax: (+351) 266 744 677  
email: [iifa@uevora.pt](mailto:iifa@uevora.pt)