

DÉFICIT DE IRRIGAÇÃO EM AMENDOEIRAS (*Prunus dulcis* L.):
DIFERENTES ESTRATÉGIAS FISIOLÓGICAS PARA AVALIAR O
ESTADO HÍDRICO DA CULTURA.

LUCIENE SOUZA FERREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2018

DÉFICIT DE IRRIGAÇÃO EM AMENDOEIRAS (*Prunus dulcis* L.):
DIFERENTES ESTRATÉGIAS FISIOLÓGICAS PARA AVALIAR O
ESTADO HÍDRICO DA CULTURA.

LUCIENE SOUZA FERREIRA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutorado em Produção Vegetal”.

Orientador: Prof. Eliemar Campostrini

Coorientador: Prof. Ivan Francisco García Tejero

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

MARÇO – 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCH / UENF**

068/2018

F383 Ferreira, Luciene Souza.

Déficit de irrigação em amendoeiras (*Prunus dulcis* L.) : diferentes estratégias fisiológicas para avaliar o estado hídrico da cultura / Luciene Souza Ferreira. – Campos dos Goytacazes, RJ, 2018.

86 f. : il.

Bibliografia: 64 – 86.

Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2018.

Orientador: Eliemar Campostrini.

Coorientador: Ivan Francisco García Tejero.

1. Estresse Híbrido. 2. Potencial Hídrico da Folha. 3. Temperatura Foliar. 4. Amendoeira - Tolerância à Seca. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD – 634.55

DÉFICIT DE IRRIGAÇÃO EM AMENDOEIRAS (*Prunus dulcis* L.):
DIFERENTES ESTRATÉGIAS FISIOLÓGICAS PARA AVALIAR O
ESTADO HÍDRICO DA CULTURA.

LUCIENE SOUZA FERREIRA

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutorado em Produção Vegetal”.

Aprovada em 23 de março de 2018
Comissão Examinadora

Dr. Weverton Pereira Rodrigues (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF

Dr. Jefferson Rangel da Silva (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF

Professor Ivan Francisco García Tejero (D.Sc, Biología) – IFAPA (Coorientador)

Professor Eliemar Campostrini (D.Sc., Produção Vegetal) – UENF (Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela dom da vida, por toda sabedoria, discernimento, força, e por me permitir chegar até aqui.

A toda minha família que é o meu porto seguro e alicerce, em especial aos meus pais Sebastião e Maria de Fátima pela formação, pelo amor, pelas orações, pela confiança, pela educação, pelo exemplo, pela amizade, e por acreditarem em mim e perseverarem nos meus objetivos, me apoiando e incentivando sempre, pelo estímulo e pela compreensão em todos os momentos, mesmo na distância. Às minhas irmãs Lígia e Luciana, por serem sempre tão companheiras e amigas. Agradeço por sempre me apoiarem e incentivarem, a buscar minha realização profissional e pessoal, pela alegria de compartilhar momentos, por me ouvirem quando estes foram difíceis, por todo amor, todo apoio, todo carinho, toda preocupação, enfim por tudo; Aos meus sobrinhos Gabriel e Heitor por tornarem a minha vida mais colorida, alegre e divertida; Aos meus cunhados José Amilton e Guido por nunca medirem esforços para me ajudar quando precisei. Família muito obrigada, amo vocês!

Minha gratidão a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela oportunidade de aprendizado e realização do curso. A CAPES, pelos 4 anos de bolsa de doutorado e pela oportunidade de realizar o doutorado sanduíche no IFAPA, na cidade de Sevilha na Espanha. Minha sincera gratidão ao meu orientador Eliemar

Campostrini pela orientação, pela confiança, pela oportunidade, pelo incentivo e pelos ensinamentos, bem como ao meu coorientador Ivan por ser peça fundamental nesta tese e pela participação ativa no trabalho, orientação, motivação e oportunidade de trabalharmos juntos no IFAPA (Sevilha/Espanha).

Aos amigos do laboratório com quem tive o prazer de trabalhar dividindo dificuldades e somando aprendizado; Weverton, Jefferson, Wallace, José Altino, Katherine, Emile, Jéssica, Deivison, Tiago Massi, Fábio Figueiredo, Ivanice, Bruna, Luan, Letícia, Juan Cabrera, Professor Ricardo Bressan e Professora Mara Gomes, obrigada pelo companheirismo em tantos momentos de alegria e tristeza, trabalhos, colaborações científicas e incentivo durante estes anos de convívio.

Aos amigos que fiz na Espanha: Iván Francisco, Manuel Iglesias, José Manuel, Carlos José, Carmen, Almudena e Víctor Hugo; obrigada por toda parceria, amizade e contribuição nas avaliações do experimento, pelo aprendizado, pelas conversas e ajuda na adaptação em outro país. Ao IFAPA, Instituto de Pesquisa onde trabalhei e coletei dados para tese, minha gratidão pela disponibilidade de infraestrutura física para a realização do trabalho, pela oportunidade e por todo apoio no decorrer dos trabalhos; Aos amigos e colegas conquistados no período que morei em Campos durante esses seis anos, em especial a Andressa Leal por me apoiar em tantos momentos difíceis e pela amizade. A todos estes e aos que não foram citados, eu agradeço por terem contribuído direta ou indiretamente para esta conquista!

SUMARIO

	Pág.
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
1-INTRODUÇÃO.....	1
2-REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1- A cultura da amendoeira	5
2.1.1 Origem e condições ambientais de cultivo.....	5
2.1.2 Aspectos econômicos.....	6
2.1.3- Características das amendoeiras.....	7
2.2 Diferentes ferramentas para avaliar o estado hídrico das amendoeiras	10
2.2.1. Potencial hídrico da planta.....	11
2.2.2.Temperatura do dossel.....	13
2.2.3. Condutância estomática foliar (gs)	14
2.3. Estratégias de déficit de irrigação para condições de escassez de água.....	15
2.3.1 Resposta fisiológica do estresse da amêndoa à água.....	16
2.3.2. Produção de amêndoas e respostas de qualidade ao estresse hídrico.....	18
3- CAPÍTULO 1.....	21
RESUMO.....	21
ABSTRACT.....	22
INTRODUÇÃO.....	23

MATERIAL E METODOS.....	26
<i>Local do experimento</i>	26
<i>Tratamentos de irrigação</i>	26
<i>Desenho experimental e medições das plantas</i>	27
<i>Análise estatística</i>	30
RESULTADOS.....	30
DISCUSSÃO	37
CONCLUSÃO.....	42
4- CAPÍTULO 2.....	43
RESUMO.....	43
ABSTRACT.....	44
INTRODUÇÃO.....	45
MATERIAL E MÉTODOS.....	47
<i>Local do experimento</i>	47
<i>Descrição dos tratamentos de irrigação</i>	48
<i>Características avaliadas</i>	49
<i>Desenho experimental e análises estatísticas</i>	50
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
CONCLUSÃO.....	61
5- CONCLUSÕES FINAIS.....	62
6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

RESUMO

FERREIRA, Luciene Souza; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março 2018. Déficit de irrigação em amendoeiras (*Prunus dulcis* L.): diferentes estratégias fisiológicas para avaliar o estado hídrico da cultura. Orientador: Prof. Eliemar Campostrini. Coorientador: Prof. Ivan Francisco García Tejero.

A agricultura irrigada é fundamental para o desenvolvimento rural, especialmente em áreas semiáridas com poucas oportunidades e alternativas econômicas. As condições climáticas no sul da Europa são caracterizadas pela escassez e irregularidade das chuvas. Além disso, as últimas previsões em termos de exigências de água para irrigação antecipam um desequilíbrio entre a demanda de água da irrigação e os recursos disponíveis. Em áreas irrigadas, esta situação exigirá a introdução de culturas alternativas capazes de maximizar a rentabilidade dos agroecossistemas, bem como estratégias inovadoras para melhorar o manejo da água agrícola. A amendoeira é cultivada em condições altamente variáveis (regada pela água da chuva ou por sistemas totalmente irrigados), evidenciando a tolerância à seca desta espécie. O objetivo deste trabalho é estudar o cultivo da amendoeira em áreas caracterizadas pela escassez de água e a implementação de diferentes estratégias de irrigação por déficit, avaliar por meio de ferramentas fisiológicas o estado hídrico da cultura em situações de estresse hídrico, bem como oferecer diferentes opções e

abordagens para resolver restrições atuais e futuras da água para o cultivo da amendoeira. Este trabalho está dividido em dois capítulos em que foram avaliados diferentes tratamentos de irrigação em dois pomares de plantas de amêndoas maduras (*Prunus dulcis* Mill.) No primeiro capítulo, as informações térmicas foram obtidas pela câmera de imagem térmica Flir One e por uma câmera térmica convencional (Flir SC660) com alta resolução e, posteriormente, os dados obtidos por estes equipamentos foram confrontados com algumas características fisiológicas da planta [potencial hídrico da folha (Ψ_{folha}) e condutância estomática, g_s]. A câmera de imagem térmica conectada ao smartphone (Flirone) forneceu informações úteis para estimar o estado hídrico da cultura de amendoeiras, o que se pode considerar uma ferramenta potencialmente promissora para acelerar o processo de monitoramento, e assim melhorar a gestão do estresse hídrico de pomares de amendoeiras. No segundo capítulo, o Ψ_{folha} foi avaliado em tratamentos com diferentes regimes hídricos em três variedades de amendoeiras (cvs Guara, Marta e Lauranne) com o objetivo de se determinar valores de referência para o controle da irrigação em função do potencial hídrico foliar e a partir dos valores finais da produção obtidos. Os resultados encontrados não-somente permitiram determinar as funções para o planejamento da irrigação em situações de limitação de água, como permitiram a definição dos limiares de estresse que garantam uma produção similar àqueles obtidos em condições de não-limitação de água, o que permite economias próximas a 2.000 m³/ha. Assim sendo, o uso de valores ou equações de referência relacionadas ao estado hídrico da cultura permitiu estabelecer melhorias em estratégias e programações de irrigação nas plantações de amendoeiras.

Palavras-chave: estresse hídrico, tolerância à seca, condição de estresse hídrico, potencial hídrico da folha, temperatura foliar, restrição máxima diária.

ABSTRACT

FERREIRA, Luciene Souza; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March 2018. Irrigation deficit in almond trees (*Prunus dulcis* L.): different physiological strategies to evaluate the water status of the crop. Advisor: Prof. Eliemar Campostrini. Co-Advisor: Prof. Ivan Francisco García Tejero.

Irrigated agriculture is central to rural development, especially in semiarid areas with few economic opportunities and alternatives. The climatic conditions in southern Europe are characterized by scarce and irregular rainfall. In addition, the latest predictions in terms of water requirements for irrigation anticipate an imbalance between irrigation water demand and available resources. In irrigated areas, this will require the introduction of alternative crops capable of maximizing the profitability of agroecosystems as well as innovative strategies to improve agricultural water management. The almond tree is cultivated in highly variable conditions (irrigated by rainwater or by totally irrigated systems), evidencing the drought tolerance of this species. The objective of this work is to show an overview under the cultivation of the almond tree in areas characterized by water scarcity and the implementation of different deficit irrigation strategies, evaluating by means of physiological tools the water status of the crop in situations of water stress, offering different options and

approaches to solve current and future water restrictions for the cultivation of the almond tree. The thesis is divided into two chapters where different irrigation treatments were evaluated in two orchards of mature almond plants (*Prunus dulcis* Mill.). In the first chapter, the thermal information was obtained by the Flir One camera and also by a conventional Thermal Camera SC660 with high resolution and later, they were confronted with other physiological parameters related to the plant (leaf water potential, leaf and stomatal conductance, g_s). The thermal imaging camera connected to the smartphone provided useful information to estimate the water status of almond crops and is a potentially promising tool to accelerate the monitoring process and thus improve the water stress management of almond orchards. In the second chapter, leaf water potential was evaluated in treatments with different water resources in three varieties of almond trees (cvs Guara, Marta and Lauranne) in order to determine reference values for irrigation control as a function of leaf water potential and from the final production values obtained. The results obtained not only allowed to determine the functions for the planning of irrigation in situations of water limitation, but also allowed the definition of these thresholds of stress that guarantee a production similar to those obtained in conditions of non-limitation of water, allowing economies close to 2,000 m³ / ha. Therefore, the use of reference values or equations related to the water status of the crop, allowed to establish improvements in strategies and schedules of irrigation in the almond plantations.

Keywords: water stress, drought tolerance, water stress condition, leaf water potential, leaf temperature, maximum daily restriction.

1. INTRODUÇÃO

Mundialmente, a agricultura é responsável pelo consumo de aproximadamente 70% do total da água “doce” do planeta e, na maioria dos países subdesenvolvidos, esse índice chega a 90% (UNESCO, 2016). Não havendo melhoras na eficiência hídrica, estima-se que o consumo mundial da agricultura aumentará em 20% até 2050 (UNESCO, 2016). As expectativas do aumento dos gastos hídricos com agricultura atingiram dimensões preocupantes. Dessa forma, torna-se importante o interesse e a preocupação com a economia da água, em especial na agricultura irrigada, onde a eficiência do uso da água ainda se encontra com valores muito baixos. Diante deste cenário, é de fundamental importância estudar formas de reduzir os gastos com a água na irrigação, promovendo um desenvolvimento sustentável da agricultura irrigada, melhorando a eficiência da aplicação com ganhos de produtividade e reduzindo as perdas (Paz et al., 2000).

A racionalização no uso da água é uma questão atual e prioritária, e tema de debate em diferentes esferas do âmbito social, político e econômico. Uma visão geral das condições atuais e futuras indica que é crucial estabelecer métodos mais lucrativos para aumentar a produtividade da água, definindo as melhores estratégias para uma gestão eficiente e sustentável em toda a sociedade, sendo ainda mais determinante na agricultura irrigada (García-Tejero et al., 2011a).

O setor agrícola não pode ser alheio a esta problemática e deve buscar estratégias para reduzir o consumo deste recurso limitado. Dentre algumas opções, a

introdução de culturas alternativas que possam maximizar a rentabilidade da agricultura de irrigação, e a implementação de diferentes estratégias para melhorar o manejo da água agrícola seriam os principais fatores para alcançar o equilíbrio entre a agricultura e os recursos hídricos disponíveis (COM 2012). Neste contexto, é vital considerar que os cenários futuros das mudanças climáticas exigirão grandes restrições do uso da água que prejudicarão a irrigação das culturas tradicionais, tornando necessário considerar não apenas uma mudança na distribuição regional das culturas, mas também aumentar eficiência de uso da água na irrigação, como exemplo programas de irrigação deficitária (ID) (Fererres e Soriano 2007; García-Tejero et al. 2011b), especialmente em áreas áridas e semiáridas como as regiões do sul da Europa (Trnka et al., 2009) e no nordeste brasileiro.

Na região semiárida do Nordeste brasileiro a disponibilidade hídrica é o principal recurso limitante, tanto pela variação na distribuição das chuvas, quanto pela restrição do período chuvoso concentrado entre três e cinco meses durante o ano (Sampaio, 1995). A irregularidade na distribuição das chuvas torna-se evidente pelo fato de que mesmo no período chuvoso, podem ocorrer estiagens. Adicionalmente, as altas temperaturas e luminosidade intensa, relativamente constantes ao longo do ano, também podem acarretar estresse para as espécies vegetais (Barros e Soares, 2013). Além disso, predominantemente no semiárido do Nordeste brasileiro, ainda não se realiza o correto manejo da irrigação. Como resultado, além das produtividades das culturas estarem abaixo do seu potencial, normalmente se aplica mais água do que as culturas necessitam, ocasionando o desperdício dos escassos recursos hídricos da região. Esses fatores são agravados em decorrência da má conservação e da utilização irracional dos recursos naturais (Hernandez, 2008), sendo esta uma realidade de muitas regiões brasileiras, não só do nordeste.

A agricultura irrigada no sul da Europa e, mais especificamente, nas áreas áridas e semiáridas, é essencial para o desenvolvimento econômico, especialmente em regiões rurais com menor potencial de renda. Para o caso de Andaluzia, as culturas irrigadas geram mais de 60% do emprego rural e representam 64% da produção agrícola. A área que esta sob irrigação é de aproximadamente 1.176.000 ha, o que representa 24% da superfície total de Andaluzia e constitui 33% da terra irrigada na Espanha (ARA 2011). Esses dados, no que diz respeito à agricultura irrigada, são fundamentais para o setor agrícola, o desenvolvimento econômico e social de regiões como Andaluzia. (García-Tejero et al., 2014). O clima do sul da Europa caracteriza-se pela escassez e irregularidade das chuvas, o período seco

coincide com a estação de maior evapotranspiração. Além disso, os últimos estudos sobre os países mediterrânicos europeus preveem uma redução significativa dos recursos hídricos; com grande queda nas reservas solo-água e períodos mais severos de baixa quantidade de chuva durante a época mais úmida (IPCC 2014). Além disso, diferentes modelos de mudanças climáticas preveem um esgotamento significativo das reservas de águas subterrâneas para as bacias hidrográficas dos países mediterrâneos e, além das fortes reduções nas chuvas anuais, as temperaturas médias deverão aumentar. Além disso, espera-se que a demanda de recursos hídricos cresça (30% em relação ao consumo atual), causando um desequilíbrio entre a demanda de água de irrigação e os recursos disponíveis (IPCC 2014). Este novo paradigma compromete a rentabilidade dos sistemas agrícolas alimentados com chuva e prejudicará a oferta de água necessária para as culturas irrigadas (Trnka et al., 2011; Daccache et al., 2012; Savé et al., 2012).

A amendoeira (*Prunus dulcis* Mill.) é a segunda cultura em termos de área superficial na Espanha, o que representa quase 40% da área cultivada em geral, e 84% da cultura de amêndoas na europa (FAOSTAT 2016). Os altos preços pagos pelas amêndoas nos últimos anos são os motivos pelos quais muitos agricultores se interessam por esta cultura, sem relatar na vantagem da tolerância da amendoeira ao déficit hídrico durante a fase de enchimento da semente, que coincide com os meses de alta demanda evaporativa (junho-agosto) e quando as condições de escassez de recursos hídricos se agravam no clima mediterrâneo (CAPDR, 2016). Assim, a amendoeira pode ser considerada uma planta de cultivo ideal para aplicações em estratégias de irrigação deficitária (ID), o que pode contribuir para um desenvolvimento sustentável agrário necessário.

Muitos trabalhos demonstram a boa adaptação da amendoeira a estratégias de ID (Goldhamer e Shackel, 1989; Torrecillas et al., 1989; Girona e Marsal, 1995; Romero et al., 2004; Girona et al., 2005; Goldhamer et al., 2006). Além disso, a amendoeira é considerada uma cultura tolerante à seca devido às suas propriedades xeromórficas, em que as plantas vivem em regiões com pouca água, adaptadas ao clima seco (Torrecillas et al., 1996) Os efeitos das estratégias de ID aplicadas a esta cultura, têm como objetivo melhorar o gerenciamento da escassez de água e minimizar os efeitos em termos de rendimento e qualidade de amêndoas (Fererres et al., 1981; Romero et al. 2004; 2006; Girona et al., 2005; Goldhamer et al., 2006; Egea et al. 2010).

Devido à escassez de recursos hídricos em Andaluzia, fazem-se necessários maiores estudos sobre o crescimento e o desenvolvimento das árvores de amendoeiras sob estresse hídrico. O conhecimento de cada resposta da planta às condições que esta está submetida é a chave para programação e otimização da irrigação. Comumente, têm sido utilizadas medidas baseadas em técnicas de avaliações do status hídrico da planta, ao integrar a influência do ambiente (clima e solo) e método de irrigação. O potencial hídrico foliar, a condutância estomática e a temperatura foliar são indicadores tradicionais do estado energético da água na planta. Estas características foram utilizadas como ferramenta avaliadora por muitos autores de maneira a testar a alta sensibilidade destas características nos regimes de irrigação, e a relação destas com a resposta produtiva. Tal fato permitiu buscar a identificação de novos indicadores do estado hídrico da planta, e de valores de referência seguros antes de aplicar os protocolos de programação de irrigação (Romero et al. 2004; 2006; Girona et al., 2005; Goldhamer et al., 2006; Egea et al. 2010, García-Tejero et al. 2016, 2017).

Dadas as taxas máximas de irrigação exigidas pelas amendoeiras, a consideração desta espécie como uma cultura alternativa nas áreas áridas e semiáridas dos países mediterrânicos, seria justificada em termos de desenvolvimento, somente se as estratégias associadas à ID forem consideradas com base em um equilíbrio entre o meio ambiente e a agricultura sustentável (García-Tejero et al., 2014). Com o objetivo de melhorar a produtividade das amendoeiras em condições de escassez de água, a irrigação desta cultura requer conhecimentos adequados sobre o desenvolvimento fenológico, bem como a resposta agrônômica e fisiológica em diferentes graus de estresse hídrico e estratégias de ID (Spinelli et al., 2016), especialmente quando o estresse hídrico pode ser aplicado em diferentes estádios de cultivo.

Diante destas informações supracitadas, o objetivo do presente trabalho foi estabelecido em três itens assim relatados: i) avaliar o estado hídrico da cultura por meio das respostas fisiológicas das amendoeiras à implementação de diferentes estratégias de irrigação por déficit, utilizando algumas características fisiológicas; ii) avaliar a utilidade e aplicação de ferramentas e índices fisiológicos para determinação do estado hídrico de amendoeiras, submetidas ao regime de irrigação deficitário, e iii) determinar funções e definir valores de referência para o potencial hídrico, na aplicação de estratégias de irrigação deficitária em amendoeiras comparada com tratamentos bem irrigados.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1- A cultura da amendoeira

2.1.1 Origem e condições ambientais de cultivo

A amendoeira *Prunus dulcis* (Miller) D.A.Webb é a uma espécie cultivada comercialmente (Felipe, 2000), pertence à família das rosáceas, à subfamília Prunoidea. A origem desta espécie se deu por processos de hibridações naturais que ocorreram na Ásia Central (Grasselly e Crossa-Raynaud, 1984). As amendoeiras podem ser cultivadas em climas temperados, quentes e subtropicais, com latitude entre 30° e 45°. (López Ritas, 1972). A adaptação à seca permite às plantas sobreviverem em climas semiáridos, onde a precipitação não excede 150 mm por ano. Nessas condições e sem o necessário complemento de água de irrigação, geralmente esta espécie não atinge produções agrônomicas lucrativas médias (El-Sharkawi e El-Monayeri, 1976).

A amendoeira tem uma grande capacidade de adaptação edáfica, e se desenvolve em solos pobres e secos sem matéria orgânica; desde que sejam profundos e permeáveis (Felipe, 1999). As plantas desta espécie têm característica xerofítica, é rústica, e adaptada a ecossistemas de valor agrícola reduzido. A amendoeira é uma cultura tipicamente mediterrânea, mas apresenta condições de adaptação em muitos ambientes (Martin e Kester, 1978, Grasselly e Crossa-Raynaud,

1984). Altitudes entre 200 e 400 m são ideais para obter uma boa colheita (Felipe, 1999).

Para frutíferas temperadas, como é a amendoeira, a faixa de temperatura ótima para a atividade fotossintética está entre 25-30 °C, tendo uma forte redução em temperaturas inferiores a 15 °C ou acima de 35 °C. Para que se inicie o período vegetativo, algumas espécies necessitam de um período de frio do inverno. Para quantificar as necessidades do frio, é utilizado o conceito de horas frias (HF), que é o número de horas que a árvore deve ter com temperaturas abaixo de 7,2 °C. A amêndoa apresenta baixas necessidades em HF (entre 100-400, de acordo com a variedade), sendo semelhante às de outras árvores frutíferas tipicamente mediterrâneas, como a figueira ou a oliveira. A amendoeira é uma das espécies de frutos mais resistentes ao frio, podendo suportar no período vegetativo temperaturas abaixo de -15 °C. Temperaturas elevadas podem causar sérios danos às plantas, acima de 35 °C, a atividade fotossintética é seriamente reduzida (Arquero, 2013).

A principal limitação produtiva nas áreas do clima mediterrâneo é a água. Além de ser reduzida em volume, a chuva não é bem distribuída durante todo o ano, e há um período de grande déficit de água no verão e parte da primavera e outono. Nas regiões produtoras são frequentes as séries de anos secos consecutivos, em que a precipitação diminui drasticamente. As culturas mediterrâneas, como amêndoas e azeitonas, se adaptam bem às condições de chuva, embora os rendimentos sejam grandemente aumentados com a irrigação (Arquero, 2013).

2.1.2 Aspectos econômicos

A amêndoa (*Prunus dulcis* Mill), depois das oliveiras é a segunda espécie em termos de área superficial na Espanha. Esta planta representa quase 40% da área cultivada em geral da Espanha, e 84% da cultura de amêndoas na União Europeia, embora em termos de produção, apenas 5% da produção mundial. Os Estados Unidos (EUA), e mais especificamente a Califórnia, são os maiores produtores mundiais dessa cultura, representando os 80% do mercado mundial, sendo os líderes absolutos da produção mundial de amêndoas. A uma grande distância estão a Austrália (8%) e Espanha (5%). Os três países representam 93% da produção mundial. (FAOSTAT 2016).

Notavelmente, os EUA, com 350 mil hectares de colheita de amêndoas produzem mais de 800 000 t, enquanto a Espanha, com uma superfície total de 530 mil

ha, tem uma produção média de aproximadamente 211 000 t por ano (FAOSTAT 2016). Esta baixa produção (em termos de rendimento por unidade de área) faz parte da razão pela qual tradicionalmente esta cultura foi associada a áreas marginais, sendo cultivada em condições muito limitantes como seca, incidência de geadas, baixa fertilidade, baixa precipitação, pouco cuidado na poda, trabalho e tratamentos fitossanitários, entre outros fatores que afetam a floração e como consequência, o fruto. Desta maneira, são produzidos apenas ~ 150 kg ha⁻¹, enquanto em outros países esta cultura é cultivada sob o requisito máximo de água na irrigação, como nos EUA (~ 2600 kg ha⁻¹) ou Austrália (~ 2200 kg ha⁻¹). Portanto, a margem de lucro é relativamente baixa na Espanha em comparação com países mais produtivos (Almond Board of California 2015; CAPDR, 2016).

A produção de amêndoas australianas e europeias tem como tendência aumentar, enquanto a previsão de crescimento na Califórnia para os próximos anos deverá ser mínima devido à seca e ao aumento das plantações de outras nozes, como o pistache (CAPDR, 2016).

Com uma área plantada de 149,693 ha, Andaluzia é a região espanhola que possui maior implantação de amendoeiras. As províncias de Granada, Almeria e Málaga concentram 96% da área superficial de amêndoas andaluza, mas é em Córdoba, Huelva e Sevilha, onde a área plantada com amêndoas está crescendo, sendo as novas fazendas implantadas principalmente em terras irrigadas (CAPDR, 2016).

2.1.3- Características das amendoeiras

A cultura da amendoeira pode ser caracterizada por diferentes estádios fenológicos (dormentes, floração, desenvolvimento de frutos, colheita e pós-colheita), que englobam o desenvolvimento de brotos, floração, polinização, crescimento vegetativo (folhas e rebentos) e crescimento da semente, período de enchimento (acúmulo de matéria seca), a colheita e o período pós-colheita, com acúmulo de reservas antes da queda das folhas e diferenciação dos brotos (Doll 2009).

Como em outras frutas de semente, o desenvolvimento fenológico na amêndoa é determinado pelas temperaturas frias, embora a cultura da amendoeira não exija longas horas de resfriamento, esta condição é determinante para o desenvolvimento dos brotos. Portanto, o desenvolvimento das amêndoas (crescimento vegetativo e floração) começa muito cedo (do final de janeiro a março, dependendo da variedade da

cultura) e termina em meados de agosto a setembro com o período de colheita (Goldhamer e Girona 2012).

O florescimento e o crescimento das folhas são os primeiros processos e ocorrem quase que simultaneamente (dependendo da cultivar, esses processos podem ocorrer ao mesmo tempo ou com poucos dias de diferença), quando as horas de frio necessárias foram alcançadas e as temperaturas começam a aumentar para o meio ou fim do inverno. Esses processos, conhecidos como o estágio de "floração", dependem fortemente das reservas de carboidratos acumuladas pela árvore durante a estação anterior. Por isso, após a colheita, alguns processos importantes determinam o desenvolvimento da cultura e o rendimento final para as estações seguintes. Nesse sentido, após a colheita, o processo de acúmulo de reservas de carboidratos continua sendo reforçando e exercendo um impacto a longo prazo sobre os componentes de produção das amêndoas (Esparza et al., 2001a).

Neste contexto, o acúmulo de carboidratos durante o período de enchimento da semente e após a colheita, antes da queda das folhas, pode determinar o crescimento da fruta nos anos seguintes (Esparza et al., 2001b). Girona et al. (2005) mostraram em uma experiência a longo prazo, em que diferentes graus de estresse hídrico foram aplicados durante o período de enchimento da semente, e que a massa seca da semente diminuiu com a limitação hídrica imposta. Assim, o transporte de carboidratos e a disponibilidade destes para as seguintes estações podem ser afetados por diferentes manejos de água (por exemplo, restrições) aplicados durante os diferentes períodos fenológicos.

Dependendo da cultivar, após as horas de frio necessárias, os brotos começam a se desenvolver (período de floração) desde um estágio inicial (esporão adormecido) até o amadurecimento do fruto, quando começa o período de rápido crescimento do fruto. Antes deste ponto, os diferentes estágios de floração incluem: i) estágio de ponta verde, quando o cálice começa a ser visível; ii) estágio rosa-broto, quando a corola começa a ser visível, iii) estágio da pipoca, quando os estames são visíveis; iv) floração total; v) queda de pétala; vi) e conjunto de frutos (Doll 2009).

De acordo com Arquero (2013), no sul da Espanha, o período de floração depende da cultivar e das condições climáticas. Assim, para uma mesma cultivar, esse período varia de acordo com a área e as características climáticas. Sem que o efeito climático seja levado em conta, e em termos de desenvolvimento da floração, as cultivares de amêndoas podem ser classificadas em três grupos: variedades muito precoces (por exemplo, Desmayo largueta ou Garrigues); cultivares iniciais (por

exemplo, Marcona, Cartayera ou Pajarera); e cultivares tardias (Guara, Marta, Masbovera, Antoñeta, Ferragnès, Ferraduel ou Lauranne).

Considerando que o desenvolvimento adequado associado à floração é diretamente afetado pelo manejo das culturas durante a estação anterior (uma vez que tanto o acúmulo de reservas quanto a diferenciação do broto para a próxima estação são determinados no ano anterior), para esta segunda etapa, a cultura começa a produzir novos metabolitos, sendo isso determinante para o crescimento vegetativo e frutífero saudável (Doll 2009).

Após o conjunto de frutos, podem ser definidas três fases diferentes de crescimento do fruto: crescimento rápido, durante o qual o casco, a concha e os tegumentos se desenvolvem e o fruto atinge o tamanho final. Durante este estágio, tanto o casco como a casca são facilmente distinguidos, mas o tegumento é um recinto branco que se forma em torno do embrião (Doll 2013). Durante esta primeira etapa (8-10 semanas após o conjunto de frutas), há uma fase de divisão celular rápida e depois a expansão. No final deste período (de abril a maio, dependendo da cultivar, manejo de culturas e clima), há um desenvolvimento inicial da semente, sendo esta uma estrutura macia, com consistência de gel, mesmo que o casco, concha e a semente tenham atingido seu tamanho final (Goldhamer e Girona 2012). Uma vez que o fruto atinge o tamanho final, começam os processos de endurecimento do invólucro e crescimento do núcleo (Fase II). No final desta etapa (um mês depois de terminar o estágio I, final de maio a meados de junho), a casca completará o processo de endurecimento, e o crescimento do embrião provoca mudanças na semente, mudando de um tecido aquoso para um branco opaco com uma textura gelatinosa (Doll 2013). Após este estágio, começa o terceiro período, com o ganho no peso seco da semente. Durante esta fase, a matéria seca se acumula na semente até o final do período de maturidade. Nesta fase, o desenvolvimento de células de casco, concha e acabamento de grão e o peso seco não mudam. Durante este período, os carboidratos do núcleo armazenados na fruta mudam para gorduras e proteínas e começa o período de amadurecimento. Neste processo, duas mudanças ocorrem no final do desenvolvimento do fruto: deiscência endocarpada e a formação de uma camada de abscisão entre a fruta e o pedúnculo. Embora, uma vez que o desenvolvimento do fruto tenha terminado, o estágio de divisão do casco limita o processamento de amêndoas pelo agricultor, sendo este um parâmetro de qualidade (a facilidade de separação do casco). Assim, uma situação severa de estresse hídrico durante esta etapa promoveria a formação de cascos considerados “apertados” (Goldhamer e Girona 2012).

A exigência de água pelas amendoeiras diz respeito à quantidade de água necessária para compensar as perdas da evapotranspiração de um pomar de amêndoa em condições padrão, que de acordo com o artigo da FAO I&D Nº 56, são árvores isentas de doenças e fertilizadas sob o melhor teor de solo, condições de água e que alcancem a produção total nas condições climáticas locais (Allen et al., 1998).

Em termos de rendimento e qualidade de amêndoa, a irrigação pode ser considerada o principal fator limitante dessa cultura (Goldhamer e Fereres 2016). Em trabalhos relatando a demanda anual de água pelas culturas, autores como a Goldhamer e Girona (2012) relataram exigência de água entre 900 e 1.350 mm, dependendo da cultivar, do porta-enxerto ou da densidade de árvores, dentre outros fatores. Goldhamer e Fereres (2016) relataram diferentes funções de produção para a colheita de amêndoas, atingindo os valores máximos de produção de 4.000 kg ha⁻¹ (dependendo da estação), para taxas de irrigação de 1.250 mm. Já quando essas taxas foram reduzidas para 1000 mm, os valores de produção caíram 14% em relação ao rendimento máximo. No entanto, esses autores não conseguiram definir o valor limite máximo para o peso da unidade da semente, aumentando progressivamente de 1,0 a 1,2 g entre quantidades de irrigação de 1.000 e 1.350 mm, respectivamente.

2.2 Diferentes ferramentas para avaliar o estado hídrico das amendoeiras

Em um mundo em que os suprimentos de água para irrigação estão cada vez mais escassos, é essencial que os agricultores adotem tecnologias de irrigação e práticas de manejo que contribuam para produzir mais rendimentos com menos água. Isto é especialmente relevante para os produtores de amêndoas devido às altas exigências de água desta cultura (Goldhamer e Fereres, 2016). A otimização do agendamento de irrigação, e especialmente o ID, demonstrou melhorar substancialmente a colheita enquanto se economiza água (Fereres e Soriano 2007). Nesse sentido, vários estudos sobre amendoeiras cultivadas em campo avaliaram a adequação de várias técnicas de detecção do estado hídrico das plantas.

2.2.1. Potencial hídrico da planta

A capacidade de se estimar o estresse hídrico das plantas por meio do potencial hídrico, encontra-se no efeito integrativo desta variável fisiológica com as condições do solo, planta e atmosfera na medida da disponibilidade de água dentro da própria planta (Shackel 2011). O potencial hídrico da folha (Ψ_{folha}) é uma das características fisiológicas mais usadas para definir o estado hídrico das plantas (Klepper et al., 1971, Goode e Higgs, 1973) e determinar o tempo de irrigação (Peretz et al., 1984). Como indicador do estado da água das árvores frutíferas, que pode ser comumente usado e é afetado por fatores ambientais e endógenos (Jones, 1990). O efeito dos fatores ambientais sobre o Ψ_{folha} provoca variações em níveis com base na hora do dia (Elfving et al., 1972), estação de crescimento (Winkel e Rambal, 1993), idade da folha (Knipling, 1967) e a orientação e posição das folhas nas árvores. Esta situação pode restringir o uso do Ψ_{folha} por indicar apenas a direção do fluxo de água na árvore, sendo questionado como indicador do estado da água (Garnier e Berger, 1985). No entanto, a medida é universalmente aceita, como uma maneira rápida, confiável e econômica de avaliar o estado da água das plantas (Elfving et al., 1972, Garnier e Berger, 1985, Ameglio et al., 1998, McCutchan e Shackel, 1992, Lampinen et al., 2001, Girona et al., 2006).

A medida do potencial de água foliar antemanhã (Ψ_{Lam}), fornece informações indiretas sobre o nível de energia da água no solo, bem como o grau de estresse com o qual a planta começa o dia (Aussenac e Valette, 1982). Isso ocorre porque a transpiração é mínima durante a noite, de modo que a planta atingirá, teoricamente, o equilíbrio com o solo no momento da medida (Slatyer, 1967). O instrumento utilizado para a medição de potencial no campo é a câmara de pressão (Scholander et al., 1965). O potencial de água das folhas ao meio-dia (Ψ_{folha}) e o potencial de água foliar antemanhã (Ψ_{am}) são utilizados como indicadores do estado da água da planta. Os valores de Ψ_{folha} são muito variáveis, uma vez que dependem das condições climáticas prevalentes no momento da medição, enquanto Ψ_{am} é mais estável, mas com a limitação de que não é indicativo do estado que a planta atinge no momento da demanda máxima (Nortes et al., 2005).

O potencial hídrico de folhas totalmente expostas tem sido a medida típica do potencial hídrico da planta durante décadas. Contudo, esta variável provou ser pouco confiável como um indicador de estresse hídrico em condições de campo (Nortes et al., 2005), principalmente devido ao efeito que o microclima da folha exerce na Ψ_{folha} por

meio da interação com a condutância estomática. A descoberta de que o potencial hídrico do caule (Ψ_{caule}) poderia indicar melhor as diferenças entre os regimes de irrigação nas espécies de Prunus (Garnier e Berger 1985) abriu a possibilidade de ampliar o uso deste indicador de estado hídrico para o controle de irrigação de amendoeiras e outras espécies (Mirás -Avalos et al., 2016; Shackel et al., 1997). O Ψ_{caule} é medido indiretamente por meio de folhas que foram impedidas de transpirar por estarem envolvidas em uma bolsa de plástico escurecida, às vezes coberta com papel rateado (papel alumínio) (Fereres e Goldhamer 2003), para permitir o equilíbrio com Ψ_{caule} (Shackel et al., 1997).

O tempo necessário para que a folha coberta se equilibre com Ψ_{caule} antes da medição é um pouco incerto, uma vez que os tempos relatados variam de períodos breves como 10 min (Shackel et al., 1997) a períodos de até duas horas (Fereres e Goldhamer 2003). Às vezes, até as folhas descobertas são usadas como substitutas do Ψ_{caule} (Goldhamer e Fereres 2016). Goldhamer e Fereres (2001) demonstraram que o potencial hídrico das folhas sombreadas ($\Psi_{\text{sombreada}}$) cobertas com um pano úmido imediatamente antes de ser retiradas da árvore e rapidamente transportadas para a câmara de pressão foi bem correlacionado com Ψ_{caule} em amêndoas [$\Psi_{\text{sombreada}}$ (MPa) = $0.902 \cdot \text{SWP}$ (MPa) - 0.112; $R_2 = 0,942$].

Quanto à melhor hora durante o dia para a medição, há um consenso geral de que a medida ao meio-dia sob a máxima demanda evapotranspirativa é uma medida confiável e consistente para estresse hídrico das amendoeiras no controle da irrigação (Fereres e Goldhamer, 2003; Shackel, 2011; Shackel et al., 1997). Para determinar se um respectivo valor indica condições bem irrigadas ou estressadas por água, deve ser usado um padrão de referência que represente condições bem irrigadas. Esses valores de referência não são constantes, mas variam com a demanda evaporativa. McCutchan e Shackel (1992), estudando árvores de ameixa bem irrigadas, encontraram uma forte relação entre o Ψ_{caule} (Eq. 3) ao meio-dia e o déficit de pressão de vapor do ar ao meio-dia (DPV_{ar}).

$$\Psi_{\text{caule}} \text{ (MPa)} = - 0,12 \cdot \text{DPV} \text{ (kPa)} - 0,41 \text{ (R2} = 0,81) \text{ Eq. 3}$$

Essa relação provou também ser um bom indicador de Ψ_{caule} de amendoeiras bem irrigadas (Dhillon et al., 2014; Shackel, 2011; Shackel et al., 1997).

2.2.2. Temperatura do dossel

O uso da temperatura do dossel para monitorar o estado hídrico na planta foi proposto na década de 60, e desde então, sabe-se que as medidas da temperatura da folha são um método confiável para avaliar o estado hídrico da planta (Fuchs e Tanner, 1966, Idso et al., 1981, Jackson, 1982). Tal variável tem sido amplamente utilizada desde então para a tomada de decisões de doses de irrigação em várias culturas. Com o surgimento das câmeras térmicas modernas de alta resolução e veículos aéreos não tripulados, a técnica está ressurgindo hoje, devido ao potencial para ser usada em aplicações de sensoriamento remoto que permitem, por exemplo, mapear a variabilidade espacial do estado hídrico da cultura (Bellvert et al 2016).

A temperatura foliar pode estar submetida à interferência de fatores ambientais (incidência de radiação solar, umidade do ar, quantidade e velocidade do vento entre outros fatores) e à taxa transpiratória (transpiração). As modificações do estado hídrico de uma planta podem causar mudanças na transpiração foliar, em função da ativa regulação da condutância estomática. Os resultados dos estudos desenvolvidos por Jones (1990) apontam o potencial da utilização da termografia por infravermelho, até mesmo como ferramenta de estimativa da condutância estomática. Segundo o mesmo autor, a grande maioria das aplicações da termometria por infravermelho depende da sensibilidade da temperatura foliar e da taxa de evaporação; portanto, da abertura estomática.

A técnica da termografia tem sido utilizada em estudos relacionados à resposta estomática de plantas sob estresse hídrico (Jones, 2004; Leinonen e Jones, 2004; Grant et al., 2007). As reduções na absorção de água provocam fechamento estomático, o que reduz a transpiração e aumenta a temperatura da folha. A temperatura da folha ou copa tem sido utilizada para fazer uma estimativa empírica sobre o estresse hídrico da planta. A termografia por infravermelho é um método não-destrutivo. Em relação aos métodos normalmente utilizados na detecção de estresses, uma vantagem da termometria é a capacidade de detecção precoce do estresse hídrico ou patogênico em plantas (Bajons, 2005).

A maioria dos métodos térmicos baseia-se no cálculo de um índice de estresse (Idso et al., 1981), com base no fato de que as diferenças entre as superfícies no nível da cobertura vegetal e na taxa de transpiração resultam em diferenças de temperatura (do índice de estresse) induzidas pelo processo de resfriamento evaporativo. Sem condições de estresse, a água que transpira da planta evapora, ajudando a esfriar as

folhas. Sob condições de restrição de água, a taxa de transpiração diminui e a temperatura da folha aumenta. No entanto, a dificuldade em medir a temperatura da vegetação quando não alcança um nível de cobertura próximo de 100% limita a aplicação a determinados casos. O cálculo do "*Índice de Stress da Água de Cultivo*" ou CWSI baseia-se na equação de Penman-Monteith e no balanço de energia (Penman, 1948; Monteith, 1965; 1973) para estimar as temperaturas teóricas máxima e mínima de uma cobertura vegetal, associadas às condições mínimas e máximas de transpiração, respectivamente. Estes valores extremos, juntamente com a medição da temperatura foliar da vegetação e dos dados climáticos, dão acesso para avaliar o índice CWSI, função da taxa atual de evapotranspiração e potencial de cultivo, que têm importantes aplicações na agricultura, entre as quais o gerenciamento da frequência de irrigação.

Em amendoeiras, a técnica para medidas de temperatura do dossel foi avaliada em três níveis: medindo a temperatura de folhas soltas com um termômetro infravermelho (Dhillon et al., 2014); medindo a temperatura do dossel com câmeras térmicas de alta resolução colocadas nas distâncias proximais do dossel (sensação proximal) (García-Tejero et al., 2012); e medindo a temperatura do dossel com câmeras térmicas a bordo de aeronaves (sensor remoto) (Gonzalez-Dugo et al., 2012). Em todos os casos, os resultados do controle da irrigação foram promissores. Dhillon et al. (2014) classificaram as árvores sob estresse hídrico e árvores não estressadas usando as medidas da temperatura da folha juntamente com variáveis microclimáticas. García-Tejero et al. (2012) desenvolveram um protocolo metodológico para análise de imagens térmicas e relações sólidas, foram estabelecidas entre as diferenças de temperatura do dossel-ar com a condutância estomática. González-Dugo et al. (2012) descobriram que a variação (desvio-padrão) da temperatura na copa de uma árvore pode ser um indicador útil do início do estresse hídrico das árvores, uma vez que aumentou em árvores completamente irrigadas para níveis intermediários de irrigação, diminuindo posteriormente nos tratamentos com estresse severo.

2.2.3. Condutância estomática foliar (gs)

A condutância estomática foliar (gs) é um índice do grau de abertura dos estômatos. Estes, são estruturas foliares que desempenham um papel essencial na fisiologia da planta ao regularem as trocas gasosas. Como o potencial da água, a gs segue um ritmo circadiano e é influenciado pela intensidade luminosa, temperatura, o

aumento absoluto da umidade entre a folha e o ar, a idade da folha, a concentração de CO₂ e o próprio potencial hídrico. O déficit de pressão de vapor do ar tem grande influência sobre gs. Assim, na maioria das espécies, o aumento do déficit de pressão de vapor do ar no ambiente da folha ou planta é traduzido em fechamento estomático. (Taiz e Zeiger, 2017)

Dada a influência do estresse hídrico em gs, este pode ser considerado um bom indicador do estado da água na planta. Além disso, gs é bem correlacionado com a taxa de fotossíntese (Farquhar e Sharkey, 1982, Wong et al., 1985, Torrecillas et al., 1999), que também depende do estado da água no ar, no solo, e na planta. À medida que o estômato responde a outros fatores ambientais e fisiológicos (Hsiao, 1973), é necessário realizar uma amostragem contínua de gs para separar o efeito do estresse hídrico daqueles devido a outras variáveis. A medida do gs é útil para avaliar a recuperação das plantas após o estresse hídrico (Gebre e Kuhns, 1993). Por outro lado, a grande variabilidade entre as folhas da mesma árvore (Leverenz et al., 1982), a diferença na abertura estomática entre certas áreas da folha (Pospisilova e Santrucek, 1994), entre outras limitações, tornam difícil determinar a transpiração da árvore, dependendo das medidas de gs. No entanto, existem modelos mais ou menos complexos para estimar a transpiração com base em um pequeno número de medidas de condutância foliar (Williams et al., 1996).

2.3. Estratégias de déficit de irrigação para condições de escassez de água

Os principais estádios fenológicos da amendoeira como já falado são a floração, o desenvolvimento do fruto, a formação de brotos e a diferenciação e, finalmente, o acúmulo de reservas. A irrigação é considerada o fator mais importante em termos de rendimento e qualidade do fruto (Egea et al., 2009), porém, a amendoeira tem uma capacidade conhecida para suportar o estresse hídrico (Fereres e Goldhamer, 1990, Hutmacher et al., 1994). Neste sentido, esta espécie é considerada resistente à seca (Castel e Fereres 1982) e salinidade (Franco et al., 2000) e, portanto, embora a amêndoa seja cultivada em terras irrigadas, também é cultivada mundialmente sob condições de chuva. Assim, as estratégias ID oferecem uma oportunidade adequada para obter bons resultados comerciais, com economias significativas de água e sem comprometer o rendimento ou a qualidade do fruto aumentando a eficiência e a economia da água. (Fereres e Soriano, 2007).

A ID baseia-se na redução da água nos períodos fenológicos considerados não críticos para a produção e qualidade da cultura, e cobrem completamente a demanda da planta durante o resto do ciclo da safra (Torrecillas et al., 1996). Para a elaboração de estratégias ID, deve-se considerar os fatores que podem afetar significativamente a viabilidade desta técnica. Torna-se essencial o conhecimento dos períodos críticos da cultura, o nível de coincidência entre o crescimento vegetativo e o do fruto, as características do solo, o sistema de irrigação, o clima, o material vegetal, os mecanismos de resistência à seca, entre outros (Domingo, 1994, Torrecillas et al., 1996). Em termos de demanda de fotoassimilados, existe uma clara separação entre os períodos de crescimento vegetativo e dos frutos em muitas culturas arbóreas. Isso favorece a aplicação de estratégias ID, uma vez que permite controlar o crescimento vegetativo sem reduzir o tamanho do fruto (Chalmers et al., 1981, Goldhamer e Shackel, 1989, Domingo, 1994, Torrecillas et al., 1996).

Como em outras culturas arbóreas, uma estratégia moderada de estresse hídrico pode ser imposta com impacto positivo, ou seja, para controlar um crescimento vegetativo excessivo, para economizar água ou para facilitar a colheita e reduzir doenças fúngicas (Chalmers et al., 1981, Goldhamer et al. 2006). Neste contexto, é necessário distinguir entre a necessidade de definir uma estratégia ID apropriada, que estará intimamente relacionada com a fenologia, bem como com a fisiologia de uma determinada cultura. Ou seja, é necessário o conhecimento sobre as características fisiológicas que tornam esta cultura uma boa alternativa para áreas áridas e semiáridas com condições de limitação de água (Spinelli et al., 2016).

2.3.1 Resposta fisiológica do estresse da amêndoa à água

Em termos fisiológicos, quando uma cultura esta submetida a um estresse hídrico leve a moderado, a primeira resposta dependendo da cultura, está relacionada à redução da condutância g_s (Hsiao 1990; Torrecillas et al., 1996), minimizando a perda de água através dos estômatos. No caso da amêndoa, esta não é considerada uma cultura isohídrica; ou seja, a capacidade da planta em regular g_s quando esta está submetida a um estresse hídrico, e esta característica é limitada, e fortemente dependente da cultivar, como discutido pelos autores Wartinger et al. (1990), Egea et al. (2011) ou Eichi (2013).

Em síntese, as respostas de seca das amendoeiras envolvem diferentes processos de resistência para evitar o estresse hídrico. Assim, antes de uma redução

significativa em gs, esta cultura responde com diminuições acentuadas em Ψ_{caule} ou Ψ_{folha} . No entanto, quando o estresse hídrico é severo por um longo período, a amendoeira geralmente inicia a senescência foliar, promovendo a redução da área foliar e, portanto, a condutância do dossel (Spinelli et al., 2016). Nessa situação, a cultura da amendoeira pode manter níveis aceitáveis de gs (promovendo reduções significativas no potencial hídrico da cultura), mantendo os melhores valores de assimilação de carbono, taxa de fotossíntese e, portanto, aumentando a eficiência intrínseca de uso da água (EUA) (McCutchan e Shackel 1992, Rouhi et al., 2007).

No tratamento mais severo de irrigação pré-colheita, Goldhamer e Viveros (2000) relataram valores mínimos de potencial antemanhã em cerca de -4,0 Mpa. Esses valores foram associados a reduções altamente significativas em termos de produtividade durante os estudos e no ano seguinte.

Em condições totalmente irrigadas, o ciclo diário de troca gasosa é quase constante quando a radiação não é limitada (Torrecillas et al 1988, Klein et al 2001, Romero e Botia 2006) e o déficit de pressão de vapor não é superior a 2 kPa (Romero e Botia 2006). Os valores da condutância foliar variaram ao longo da estação de acordo com o estágio fenológico, produzindo respostas com variações de correlação máxima e mínima entre o potencial hídrico e a condutância estomática com valores máximos em torno de maio (Torrecillas et al., 1988) e a máxima fotossíntese líquida durante a primavera (Nortes et al., 2009). A diminuição da fotossíntese líquida, mesmo sob irrigação total, foi relatada como significativa a partir da segunda parte do estágio de enchimento da semente (Nortes et al., 2009).

As condições de estresse hídrico desencadeiam o fechamento estomático parcial no ciclo diário (Torrecillas et al., 1988), tornando-se mais intenso ao meio-dia do que pela manhã (Klein et al., 2001) e reduzindo a sensibilidade da planta à demanda evaporativa do ar (Romero e Botia 2006). A taxa fotossintética líquida é limitada ao estresse hídrico moderado devido ao fechamento estomático, mas o efeito sobre o sistema fotossintético foi relatado quando o Ψ_{am} foi inferior a -1,5 MPa (Romero et al., 2004). Embora a sensibilidade da fotossíntese líquida ao déficit hídrico ocorra entre as cultivares, a redução em 50% foi relatada quando os valores de Ψ_{folha} estavam entre -2,5 e -3,5 MPa (Gomes-Laranjo et al., 2006).

As estratégias ID são baseadas em uma grande capacidade de recuperação após um período de estresse hídrico. As amendoeiras rapidamente recuperam o potencial hídrico, mas nos valores de trocas gasosas (Torrecillas et al., 1996; Romero et al., 2004; Nortes et al., 2013), ocorre um atraso que pode se tornar persistente com

tratamentos de déficit repetidos (Nortes et al. 2013). No entanto, embora tenha sido relatada uma recuperação significativa, as condições de estresse hídrico antes da colheita são comumente relacionadas à maior abscisão da folha (Klein et al., 2001; Romero et al., 2004) e às maiores porcentagens de separação completa do casco (Goldhamer e Viveros, 2000), indicando uma resposta de prevenção da seca.

2.3.2. Produção de amêndoas e respostas de qualidade ao estresse hídrico

Os resultados da programação ID em termos de rendimento e qualidade são afetados principalmente pela intensidade do estresse hídrico e pelo período fenológico quando o déficit hídrico é aplicado. Nortes et al. (2013) sugeriram seis períodos fenológicos de floração para pós-colheita. Até o momento, as principais experiências baseadas em estratégias ID em amendoeiras são concentradas exclusivamente durante os períodos de enchimento da semente e pós-colheita. Contudo, o período de estresse hídrico determina se os efeitos sobre o rendimento ocorrem na estação atual ou na próxima. Vários estudos de irrigação realizados ao menos em três estações foram relatados durante o período de enchimento da semente (Hutmachel et al., 1994; Goldhamer e Viveros 2000; Girona et al., 2005; Egea et al., 2013; Alcón et al., 2013; Mañas et al., 2014). Por outro lado, outros trabalhos não relataram diferenças significativas no rendimento quando o estresse hídrico ocorreu neste estágio fenológico (Goldhamer e Fereres 2004, Romero et al 2004, Egea et al 2009 e 2010, Cornacchia et al., 2010, Puerto et al. 2013). Essa controvérsia poderia estar relacionada ao tempo, mas também ao nível de estresse hídrico imposto durante o estágio fenológico, sugerindo valores limiares para a programação da irrigação.

Girona et al. (2005) sugeriram que a variação do peso da semente foi o principal fator envolvido na redução do rendimento quando ID foi imposta durante o enchimento da semente. De acordo com isso, com base na ID regulada durante o enchimento da semente, trabalhos indicam que durante esta etapa a amêndoa é mais resistente à seca do que em outros estágios, como o crescimento vegetativo (Girona et al., 2005; Egea et al., 2013).

Um déficit hídrico pós-colheita diminui a carga de frutos no próximo ciclo (Goldhamer e Viveros 2000, Esparza et al., 2001a, Girona et al., 2005, Goldhamer et al., 2006). Os poucos trabalhos que compõem o enchimento da semente e o estresse hídrico pós-colheita concluem que o último é mais sensível do que o anterior (Goldhamer e Viveros 2000, Girona et al., 2005, Goldhamer et al., 2006). A redução do

rendimento na próxima estação parece estar relacionada ao declínio dos carboidratos (Esparza et al., 2001b) e provavelmente nas reservas de nitrogênio (Nortes et al., 2009) em toda a árvore.

A qualidade da semente geralmente não é considerada em trabalhos de horticultura, sendo a divisão do casco e o peso da semente os indicadores comuns para avaliar a qualidade do rendimento. O maior corte do casco em uma determinada data indicaria uma estratégia de evasão da amêndoa. Entretanto, essa resposta não é comumente relatada e apenas apresentam esses resultados com níveis moderados de estresse hídrico (Goldhamer e Fereres, 2004; Puerto et al., 2013). A maioria dos trabalhos conclui que o déficit hídrico reduz a divisão do casco (Goldhamer e Viveros 2000, Romero et al., 2004, Goldhamer et al., 2006, Egea et al., 2009). Outros efeitos, como a podridão do casco (Goldhamer e Viveros, 2000) e vedação destes (Goldhamer et al., 2006), foram menos notáveis em níveis mais severos de déficit hídrico. Não foi encontrado efeito claro na porcentagem de sementes vazias e duplas (Egea et al., 2009).

A composição das amêndoas tem sido estudada em relação ao manejo da irrigação, embora tais características sejam mais afetadas pela cultivar do que pela gestão da água (Sánchez-Bel et al., 2008). As principais mudanças na composição da amêndoa ocorrem até 100 dias após o conjunto da fruta, e mudanças posteriores estão relacionadas à variação na umidade da semente (Sánchez-Bel., 2008). Egea et al. (2009) em seu trabalho, não encontraram nenhum efeito entre os tratamentos de irrigação na quantidade e composição de carboidratos e ácidos orgânicos, lipídios e teor de proteínas, tanto durante a maturação quanto na colheita (Egea et al., 2009). No entanto, em comparações entre pomares irrigados e não irrigados em experimentos em que o estado hídrico não foi relatado, a irrigação não afetou a quantidade de lipídios ou carboidratos, mas alterou a composição (Nanos et al., 2002; Sánchez-Bel et al., 2008). Outros trabalhos já relatam que a irrigação aumentou o ácido oleico e a sacarose, mas diminuiu o ácido palmítico e linoleico (Nanos et al., 2002; Sánchez-Bel et al., 2008). Cornacchica et al. (2010) em um experimento de armazenamento à temperatura ambiente, concluíram que a irrigação total e a irrigação por déficit não afetaram a composição das nozes e apenas as amêndoas não irrigadas reduziram o teor de antioxidantes e fenol e aumentaram os valores de açúcar (principalmente sacarose).

A adoção de modernas tecnologias de economia de água e estratégias de gerenciamento da irrigação (por exemplo, ID) que mantêm, ou apenas reduzem ligeiramente, os níveis de produção, ao mesmo tempo em que reduzem os requisitos

de insumos, podem ser fundamentais para garantir a sustentabilidade da irrigação em áreas áridas e propensas à seca. Mas, apesar de um grande número de experimentos ID terem sido realizados em várias culturas herbáceas e arbóreas, muito poucos estudos analisaram a viabilidade econômica de adotar estratégias de ID pelos produtores, o que representa uma desvantagem importante em termos de acelerar a adoção de produtos agrícolas e práticas ambientalmente mais adequadas.

García et al. (2004), realizaram uma análise custo-benefício para avaliar o impacto econômico da implementação de ID em um pomar de amendoeiras de 13 anos. Os autores demonstraram que o lucro foi maior em ID e os custos de produção mais baixos do que sob irrigação total. Dois anos depois, Romero et al. (2006) avaliaram a viabilidade econômica de implementar conjuntamente ID e irrigação por gotejamento subterrânea em um pomar de amendoeiras adultas. Os dados revelaram que uma estratégia de ID baseada na redução de 80% do ETc durante o enchimento da semente, e 50% durante a pós-colheita sob condições de irrigação por gotejamento sub-superficial, poderia ser ainda mais rentável do que a irrigação total em regiões onde o preço da água é alto. Recentemente, Alcón et al. (2013) avaliaram a viabilidade econômica em longo prazo (6 anos) de implementar várias estratégias ID em pomares de amendoeiras. Eles estabeleceram quatro tratamentos de irrigação: irrigação total (IT), IDR (economia média de água de cerca de 45%), ID sustentado com estresse hídrico moderado, IDSm (economia média de água de cerca de 35%), ID sustentado com estresse hídrico moderado a grave, IDSs (economia média de água de cerca de 63%). Alcón et al. (2013) apontaram que IDR e IDSm foram os tratamentos mais economicamente viáveis a longo prazo, enquanto que ID e IDSs apresentaram menor rentabilidade econômica similar.

3. CAPÍTULO 1

AVALIAÇÃO DO ESTADO HÍDRICO DA AMENDOEIRA (*PRUNUS DULCIS* MILL.) POR MEIO DA TERMOGRAFIA

RESUMO

Em áreas agrícolas irrigadas em ambientes semiáridos, vêm sendo implementadas diferentes ferramentas para melhorar a gestão da água. A termografia tem sido gradativamente introduzida como uma técnica promissora para o planejamento da irrigação e a avaliação do estado hídrico da cultura, especialmente quando a irrigação por déficit está sendo implementada. Todavia, existe uma limitação em relação ao atual custo das câmeras, sendo esta uma limitação severa ao uso prático por fazendeiros e técnicos. Este trabalho avalia o potencial e a capacidade de uma câmera de imagem térmica conectada ao smartphone (Flir One) recentemente desenvolvida pela Flir Systems Inc. como um primeiro passo para avaliar o estado hídrico das cultura da amendoeira (*Prunus dulcis* Mill.). O ensaio foi realizado em árvores maduras, submetidas a diferentes tratamentos de irrigação. As informações térmicas foram obtidas pela câmera Flir One e também por uma câmera térmica convencional (Flir SC660) com alta resolução e, posteriormente, confrontadas com outras características fisiológicas relacionadas com a planta (potencial hídrico da folha, Ψ_{folha} e condutância estomática, g_s). A câmera de imagem térmica conectada ao

smartphone forneceu informações úteis para estimar o estado hídrico da cultura de amendoeiras, sendo uma ferramenta potencialmente promissora para acelerar o processo de monitoramento e, assim, melhorar a gestão do estresse hídrico de pomares de amendoeiras.

Palavras-chave: Leituras térmicas, planejamento de irrigação, aquisição de dados, índices térmicos, linhas sem estresse hídrico.

ABSTRACT

Different tools have been implemented in order to improve water management in agricultural irrigated areas of semiarid environments. Thermography has been progressively introduced as a promising technique for irrigation scheduling and the assessing of crop-water status, especially when deficit irrigation is implemented. However, an important limitation is related to the cost of the actual cameras, this being a severe limitation to its practical usage by farmers and technicians. This work evaluates the potential and robustness of a thermal imaging camera connected to smartphone (Flir One) recently developed by Flir Systems Inc. as a first step to assess crop water status. The trial was developed in mature almond (*Prunus dulcis* Mill.) trees subjected to different irrigation treatments. Thermal information obtained by the Flir One camera was deal with the thermal information obtained with a conventional Thermal Camera (Flir SC660) with a high resolution, and subsequently, confronted with other related plant physiological parameters (leaf water potential, Ψ_{leaf} ; and stomatal conductance, g_s). Thermal imaging camera connected to smartphone provided useful information in estimating the crop-water status in almond trees, being a potential promising tool to accelerate the monitoring process and thereby enhance water-stress management of almond orchards.

Keywords: Thermal readings, irrigation scheduling, data acquisition, thermal indexes, non-water stressed baselines.

INTRODUÇÃO

Em ambientes semiáridos, como exemplo a região do mediterrâneo, a agricultura irrigada é seriamente afetada pela escassez e irregularidade da disponibilidade de água. Além disto, há uma problemática cada vez mais crescente em relação às mudanças climáticas globais (Iglesias et al. 2011; García-Tejero e Durán 2017). De acordo com o Painel Intergovernamental sobre mudanças Climáticas (IPCC 2014), estas mudanças no clima são promotoras de cenários com grande alteração na oferta/demanda dos recursos hídricos. Esta alteração dos recursos hídricos está associada com intensos períodos de reduzida quantidade de chuvas, e períodos com elevadas precipitações pluviométricas, bem como uma quantidade maior de ondas de calor bem pronunciadas, em associação com períodos de máxima demanda evapotranspiratória. Deste modo, espera-se que a demanda de água pela cultura se intensifique (30% em relação ao consumo atual) o que pode promover um desequilíbrio acentuado entre a demanda de água pela planta e a oferta deste recurso por meio de irrigação/precipitação pluviométrica (García-Tejero et al. 2014a). Nesta condição, é crucial adaptar diferentes estratégias e metodologias para aumentar a produtividade com a água da irrigação, estabelecendo as melhores estratégias para um controle eficiente e sustentável da água (García-Tejero et al. 2011a; COM 2012).

O uso de técnicas de irrigação como o déficit de irrigação controlado (DIC) tem sido tradicionalmente muito importante em várias áreas áridas e semiáridas dos países mediterrâneos. Nestas áreas, os recursos hídricos disponíveis não são suficientes para dar suporte à demanda de água das culturas, embora nem sempre esta técnica tenha sido devidamente aplicada. Por esse motivo, um grande número de estratégias relacionadas ao DIC em diferentes culturas foram usadas com o objetivo de aumentar a eficiência do uso da água da irrigação, e assim tentar manter os valores do rendimento finais da cultura e alcançar economias significativas na aplicação e uso de água pelas plantas (García-Tejero et al. 2011b). No entanto, a aplicação dessa estratégia exige avaliar adequadamente o estado hídrico da cultura, para garantir o desenvolvimento adequado das plantas sem comprometer o rendimento, especialmente quando o estresse hídrico é aplicado em diferentes estádios fenológicos das culturas (Spinelli et al. 2016).

Tradicionalmente, o monitoramento de água nas plantas tem sido desenvolvido por meio de medidas pontuais do potencial hídrico da folha e do caule (Ψ_{folha} ou Ψ_{caule}) ao meio-dia ou antemanhã (Shackel 2011; Nortes et al. 2005) ou monitorando

as características relacionadas às trocas de gasosas, como a transpiração (E), a condutância estomática (g_s), a concentração de CO_2 no interior do mesófilo foliar (C_i) e/ou taxa fotossintética líquida (A) (Gomes-Laranjo et al. 2006)

Por outro lado, as imagens térmicas no infravermelho estão sendo progressivamente introduzidas para monitorar o estado hídrico em plantas lenhosas (García-Tejero et al. 2016). Assim, muitos trabalhos foram realizados, relacionando mudanças na temperatura do dossel (T_C) e a condição de estresse hídrico da planta, em que, esta técnica foi devidamente descrita como uma metodologia promissora para o monitoramento do estado hídrico em diferentes plantas, como cítricos (García-Tejero et al. 2011c; Gonzalez-Dugo et al. 2014), amêndoas jovens (García-Tejero et al. 2012), videiras (García-Tejero et al. 2016), papaya (Lima et al 2016) e azeitonas (García-Tejero et al. 2017a). Além disso, a T_C pode ser considerada um bom indicador na estimativa do estado hídrico da planta (Jones 2014; Berni et al. 2009), embora as relações entre a temperatura da folha/dossel e algumas características fisiológicas da cultura, especialmente no campo, nem sempre sejam diretas. A baixa relação destas variáveis nesta condição é devido à grande alteração das variáveis climáticas como a temperatura do ar, radiação solar, ângulo de radiação incidente, velocidade do vento, e o déficit de pressão de vapor (García-Tejero et al. 2012; Jones 2014).

Com o objetivo de minimizar os efeitos dos fatores ambientais, bem como normalizar a variação destes fatores e estabelecer uma metodologia simples para quantificar o estado hídrico das culturas, existem diferentes índices térmicos que podem ser estimados e implementados para uma adequada relação entre a temperatura da folha/dossel e algumas características fisiológicas da cultura. Nesse sentido, Idso et al. (1981) evidenciaram significativas diferenças nos valores entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar ($\Delta T_{\text{dossel-ar}}$) em plantas sob estresse hídrico, em que essas diferenças eram muito baixas (mesmo negativas) em plantas irrigadas, e assim os autores definiram a diferença entre a temperatura do dossel e do ar como um simples índice térmico. Em cítricos, amêndoas, videiras, azeitonas, entre outros, García-Tejero et al. (2011c, 2012, 2016, 2017a) encontraram relações significativas entre este índice térmico e alguns parâmetros fisiológicos tais como Ψ_{folha} ou g_s . Ainda, outros índices térmicos relacionaram a temperatura atual do dossel com a temperatura das superfícies de referência selecionadas na planta. Geralmente utilizam-se referências "secas" (aplicação de vaselina na superfície da folha) e "molhadas" (aplicam água sobre a superfície foliar); as quais imitam as temperaturas

do dossel quando os estômatos estão completamente fechados e abertos, respectivamente. Os índices de estresse térmico obtidos a partir desta simulação entre a folha com os estômatos completamente fechados e abertos foram aplicados com sucesso em muitos trabalhos para monitorar o estado hídrico de várias culturas em sistemas de irrigação deficitária (García-Tejero et al. 2016, 2017a, Berni 2009).

Apesar disso, existem duas principais restrições a esta técnica em que utiliza imagens no infravermelho: a primeira é focada na interpretação correta da informação térmica no infravermelho, bem como o momento conveniente da obtenção da imagem e a estratégia para associar as leituras/índice térmico e o estado hídrico da cultura. A segunda se refere ao preço das câmaras que obtêm as imagens térmicas, as quais são de acesso muito difícil para a maioria dos técnicos e dos fazendeiros.

Neste trabalho, a hipótese é de que a imagem termográfica fornecida por uma câmera térmica de baixo custo ("Flir One") conectada a um smartphone pode ser viável para avaliar o estado hídrico em amendoeiras. Assim, o objetivo do presente experimento foi avaliar e comparar a viabilidade em leituras de campo com câmeras térmicas de baixo custo (T_{SPH}) em relação a uma câmera de imagem térmica convencional (T_{TIC}) (Mod. ThermaCam Flir SC660) em um experimento com amendoeiras (*Prunus dulcis* Mill.) submetidas ao regime de irrigação deficitário. Além disso, foram definidas as linhas de referência para o $\Delta T_{dossel-ar}$ nesta cultura em função do déficit de pressão de vapor, e as relações dos parâmetros térmicos com as principais variáveis fisiológicas (Ψ_{folha} e g_s) das plantas em estudo.

MATERIAL E MÉTODOS

Local do experimento

O experimento foi realizado durante o ano de 2017, de 152 a 212 dias do ano (DDA) em um pomar experimental de amêndoas (*Prunus dulcis* Mill. DA Webb cv. Guara, enxertado em GF677), localizado na bacia do rio Guadalquivir (37° 30' 47" N; 5° 58' 2" O) (Sevilha, SW Espanha). As árvores foram plantadas em 2009, espaçadas 6 x 7 m, e irrigadas por gotejamento usando duas linhas de canalização com emissores de 2,3 L h⁻¹ e 14 emissores por árvore.

O solo é um fluvisol típico (USDA, 2010), composto por 300, 310 e 390 g kg⁻¹ de areia, argila e silte respectivamente; uma profundidade de 2,5 m e um conteúdo de matéria orgânica em torno de 15.0 g kg⁻¹. As raízes estão localizadas

predominantemente nos primeiros 50 cm de solo, correspondendo à profundidade de irrigação pretendida, embora estes excedam mais de um metro de profundidade. Os valores do teor de água do solo na capacidade do campo (-0.033 MPa) e o ponto de murcha permanente (-1.5 MPa) foram 0,35 e 0,12 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, respectivamente, com um nível de perda de água do solo admissível de 0.27 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. As plantas foram fertilizadas no mesmo ponto que eram irrigadas com uma dose anual de 245 - 96 - 224 nitrogênio, fósforo e potássio, respectivamente.

O clima na área de estudo é do tipo meso-mediterrâneo atenuado, com uma taxa de evapotranspiração de referência (ET_0) anual de 1.400 mm e precipitação acumulada de 540 mm, distribuída principalmente de outubro a abril.

A precipitação total e a evapotranspiração registradas durante o período experimental foram de 0,4 e 387 mm, respectivamente. As temperaturas máximas diárias variaram entre 28,7 e 48,7 °C, enquanto a temperatura média diária variou entre 22,2 e 32 °C. Em relação à umidade relativa média diária, esses valores variaram entre 32,2 e 67,3%.

Tratamentos de irrigação

Três tratamentos de irrigação foram definidos: i) um irrigado por completo como tratamento controle (FI), que recebeu 100% da evapotranspiração da cultura (ET_C) durante o período de irrigação, ii) um irrigado com déficit sustentado (SDI_{50}), que recebeu 100% de ET_C , exceto durante o período de enchimento da semente e pré-colheita, quando este tratamento foi irrigado com ~ 50% de ET_C ; iii) e uma irrigação deficitária de baixa frequência (LFDI) que recebeu o ET_C 100% durante o período de irrigação, exceto durante o estágio de enchimento da semente e pré-colheita; quando este tratamento foi irrigado de acordo com os valores registrados de Ψ_{folha} medidos em folhas sombreadas (a 1,5 m de altura, aproximadamente). Isto é, durante o período de enchimento da semente, este tratamento foi submetido a ciclos de irrigação-restrição com a seguinte dinâmica de irrigação: uma vez iniciado o período de enchimento da semente, a irrigação foi suprimida até atingir valores de Ψ_{folha} perto de -2,0 MPa. Em seguida, as árvores foram reirrigadas com a mesma periodicidade e quantidade de água como FI (aproximadamente durante 7 a 10 dias) no horário de meio-dia até atingir valores semelhantes de Ψ_{folha} aos registrados no FI (~ -1,5 MPa). Uma vez que este valor de limiar foi atingido, este tratamento foi submetido a um novo período de restrição até que o limiar de Ψ_{folha} (~ -2,0 MPa) fosse novamente superado.

Esta dinâmica de ciclos de irrigação e restrição foi mantida durante todo o estágio do período de enchimento da semente até a colheita.

As doses de irrigação foram calculadas de acordo com a metodologia proposta por Allen et al. (1998), obtendo os valores de evapotranspiração de referência (ET_0) usando uma estação meteorológica instalada no mesmo pomar experimental. Os coeficientes de colheita locais utilizados durante o período de irrigação variaram entre 1,0 e 1,2, de acordo com os resultados obtidos por García-Tejero et al. (2014b).

Desenho experimental e medições das plantas

O desenho experimental foi em blocos casualizados, com quatro parcelas por tratamento de irrigação. Cada parcela tinha 15 árvores (3 linhas e 5 árvores por linha), sendo monitoradas as três árvores centrais para cada repetição ($n = 12$).

Durante o período de enchimento da semente, quando as restrições de água foram aplicadas, o monitoramento das culturas foi efetuado do início ao fim por medidas de potencial hídrico foliar (Ψ_{folha}), condutância estomática por vapor de água (g_s) e a temperatura do dossel (T_C). Estas leituras foram realizadas entre 12:00 e 13:30 GTM, em 12 árvores por tratamento de irrigação e com periodicidade de 7 a 10 dias.

Estas medições foram feitas nos dias 1, 9, 14, 19, e 30 de junho; 10, 17, 31 de Julho; e finalmente no dia 17 de Agosto (correspondendo com os dias do ano 152, 160, 165, 170, 177, 187, 194, 208 e 225).

As medições de Ψ_{folha} foram realizadas por meio de uma câmara de pressão (Soil Moisture Equipment Corp., Sta. Barbara, CA, EUA), monitorando 12 árvores por tratamento de irrigação (uma folha por árvore), localizado no lado norte da árvore e sendo totalmente madura, e sombreada, a 1,5 m de altura, aproximadamente. Além disso, nessas mesmas árvores, mediu-se a condutância estomática ao vapor de água (g_s), usando um porômetro SC-1 (Decagon Devices, INC, WA, EUA), e essas medidas foram feitas em uma folha por árvore monitorada completamente exposta ao sol, a 1,5 m de altura.

A T_C foi medida por imagens térmicas. As medições foram feitas ao mesmo tempo das medidas restantes, usando duas câmeras diferentes: i) uma ThermaCam (Flir SC660, Flir Systems, USA, 7-13 μm , 640x480 pixels), usando uma emissividade (ϵ) ajustada em 0,95 (T_{TIC}); e ii) uma ThermaCam de baixo custo (Flir One, Flir Systems, USA). Esta última câmera usa um sensor térmico (8-14 μm , 80x60 pixels) e um

sensor digital (1440 x 1080 pixels) conectado a um smartphone (T_{SPH}). Esse fato permite a sobreposição de duas imagens (uma falsa cor com uma imagem digital), o que possibilita a análise subsequente. Para esta câmera, utilizou-se uma emissividade de 0,95. Mais detalhes sobre esta câmera térmica podem ser encontrados na página oficial do fabricante (<http://www.flir.es/flirone/ios-android/>). Em ambas as câmeras, cada pixel corresponde a uma leitura efetiva de temperatura. As imagens foram capturadas no lado iluminado pelo sol das árvores, com a câmara colocada a 2 m do dossel.

Quanto às análises das imagens, estas foram feitas usando dois softwares diferentes: para o caso das imagens obtidas com a câmera térmica Flir SC660, estas foram analisadas usando o Flir Research Pro, que permite selecionar diferentes áreas da imagem (no nosso caso 3-4 áreas iluminadas pelo sol dentro da mesma imagem) (Figura 1). Para o caso das imagens capturadas com a câmera Flir One, estas foram obtidas usando o software livre "Flir One" para o sistema; e posteriormente, foram analisadas usando o aplicativo Flir Tools, para smartphone Android (Figura 1). Esta aplicação permite ao operador selecionar diferentes áreas da mesma imagem e analisá-las, sobrepondo-se à imagem digital e falso-colorido, o que facilita a seleção das áreas mais iluminadas pelo sol, embora a precisão seja menor do que a pela Flir SC660 (Precisão: $T_{TIC} = 0,2$; $T_{SPH} = 0,5$).

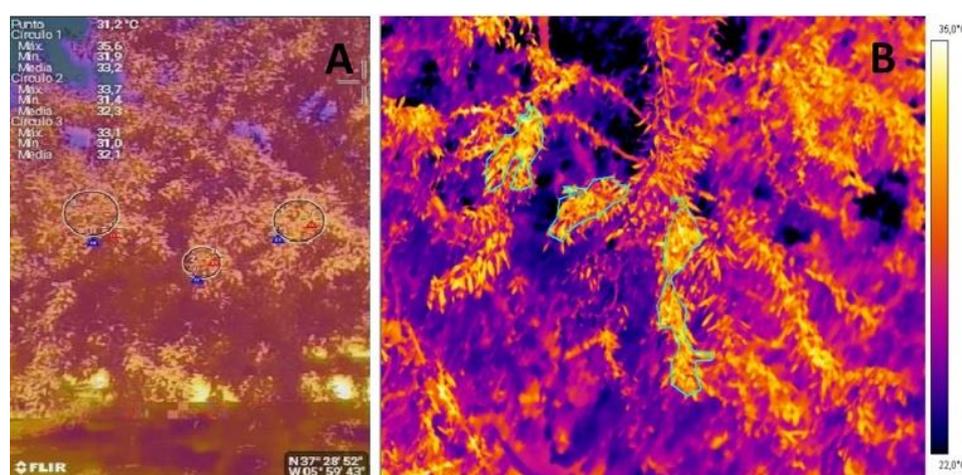


Figura 1. Imagens coloridas usando uma ThermaCam (Flir One, Flir Systems, EUA) conectada a um smartphone (A) e a uma ThermaCam convencional (Flir SC660, Flir Systems, EUA) (B).

A partir dos valores de T_C obtidos nas plantas, foram calculados dois índices térmicos diferentes: a diferença entre o dossel e o ar circundante ($\Delta T_{\text{dossel-ar}}$) e o índice

de estresse hídrico da cultura (CWSI), sendo estes índices calculados de acordo com Costa et al. (2013) da seguinte forma:

$$\Delta T_{\text{dossel-ar}} = T_C - T_{\text{ar}} \quad (1)$$

$$CWSI = \frac{\Delta T_{\text{dossel-ar}} - \Delta T_{\text{fresca}}}{\Delta T_{\text{seca}} - \Delta T_{\text{fresca}}} \quad (2)$$

Em que $\Delta T_{\text{dossel-ar}}$, ΔT_{seca} e ΔT_{fresca} são as diferenças entre a temperatura do dossel e do ar para a cultura no momento da medição, quando a planta tem os estômatos totalmente fechados e quando está completamente transpirando, respectivamente. T_C é a temperatura do dossel e T_{ar} a temperatura do ar circundante.

Para obter os valores de referência de ΔT_{fresca} , estima-se a linha base das plantas que não estavam sob estresse hídrico ($\Delta T_{\text{dossel-ar}} = a + b * DPV_{\text{ar}}$) de acordo com Idso et al. (1981), usando um valor ΔT_{seca} igual a 5 °C, como foi proposto por Jackson et al. (1981). Os valores de referência das plantas que não estavam sob estresse hídrico foram definidos usando as leituras de temperatura do dossel obtidas a partir de árvores irrigadas completamente.

Além disso, T_{ar} e UR (ambos necessários para estimar o DPV_{ar} para cada ponto de monitoramento) foram obtidos usando um sensor de temperatura-umidade (H560 Dewpoint Pro, Alemanha).

Análise estatística

Para cada dia de medição, foi feita uma análise exploratória descritiva dos dados (Ψ_{folha} , g_s e T_C), aplicando o teste de Levene para verificar a homogeneidade da variância das variáveis estudadas. As diferenças significativas entre os tratamentos de irrigação ($p \leq 0,05$) nas variáveis estudadas foram analisadas pela aplicação de uma ANOVA unidirecional e um teste de Tukey para a separação do tratamento, com o software estatístico SPSS (SPSS Inc., 15.0 Pacote estatístico, Chicago, IL, EUA).

Para avaliar a precisão das medidas tomadas pelo sensor Flir One, foi realizada uma análise de correlação linear entre T_{TIC} e T_{SPH} ($n = 108$).

Uma vez definida a precisão das medidas utilizando o sensor Flir One, foram obtidos os dados de referência para plantas não submetidas a estresse hídrico para ambas as fontes de informação térmica. As funções obtidas foram comparadas entre elas (inclinação e interceptação) utilizando uma análise de covariância em um nível de confiança de 95%. Finalmente, foram obtidas as diferentes relações dos índices

térmicos a partir das medidas fornecidas pelo sensor Flir One e as variáveis fisiológicas monitoradas, ao longo de uma análise de correlação linear ($p < 0,05$).

RESULTADOS

A Figura 2 mostra os valores da ET_C acumulados e a irrigação aplicada para cada tratamento durante o período estudado. A este respeito, o tratamento controle (FI), e durante o período de enchimento da semente, este recebeu 355 mm, enquanto a SDI_{50} e o LFDI receberam 148 mm, o que representou 58% menos de água do que as plantas do tratamento controle (FI).

Parâmetros fisiológicos do clima e da planta

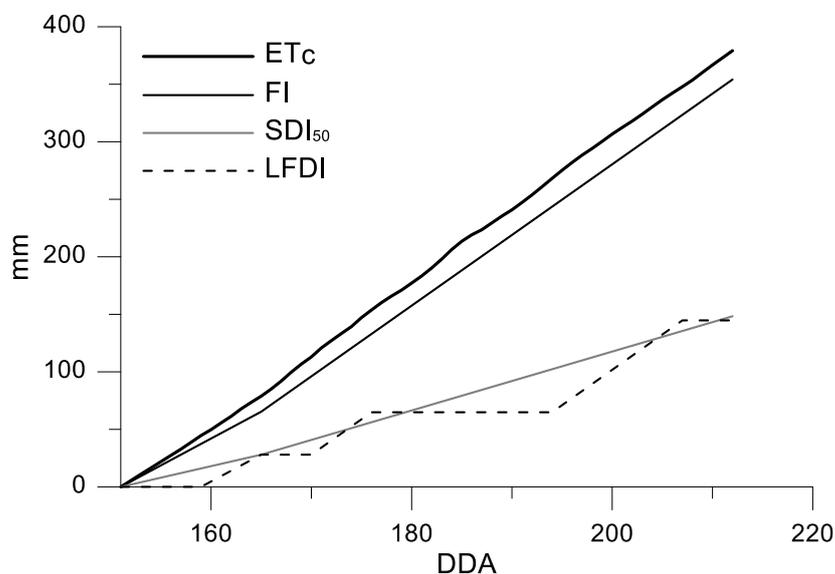


Figure 2. Evapotranspiração de colheita acumulada (ET_C) e doses de irrigação aplicada. FI: irrigado em 100% ET_C (controle); SDI_{50} : irrigação deficitária sustentada em 50% do ET_C ; LFDI: irrigação por déficit de baixa frequência.

A dinâmica das condições meteorológicas médias durante o período de monitoramento é mostrada na Figura 3. O T_{ar} e UR tiveram uma tendência inversa, portanto, aqueles dias em que foram atingidos os valores máximos de T_{ar} , estes coincidiram com valores mais baixos de UR. Além disso, durante estes dias, atingiram os valores elevados de ET_0 e DPV_{ar} . Ou seja, alguns dias foram atingidos valores de ET_0 superiores a 7 mm dia^{-1} com DPV_{ar} médio de até 2,5 kPa.

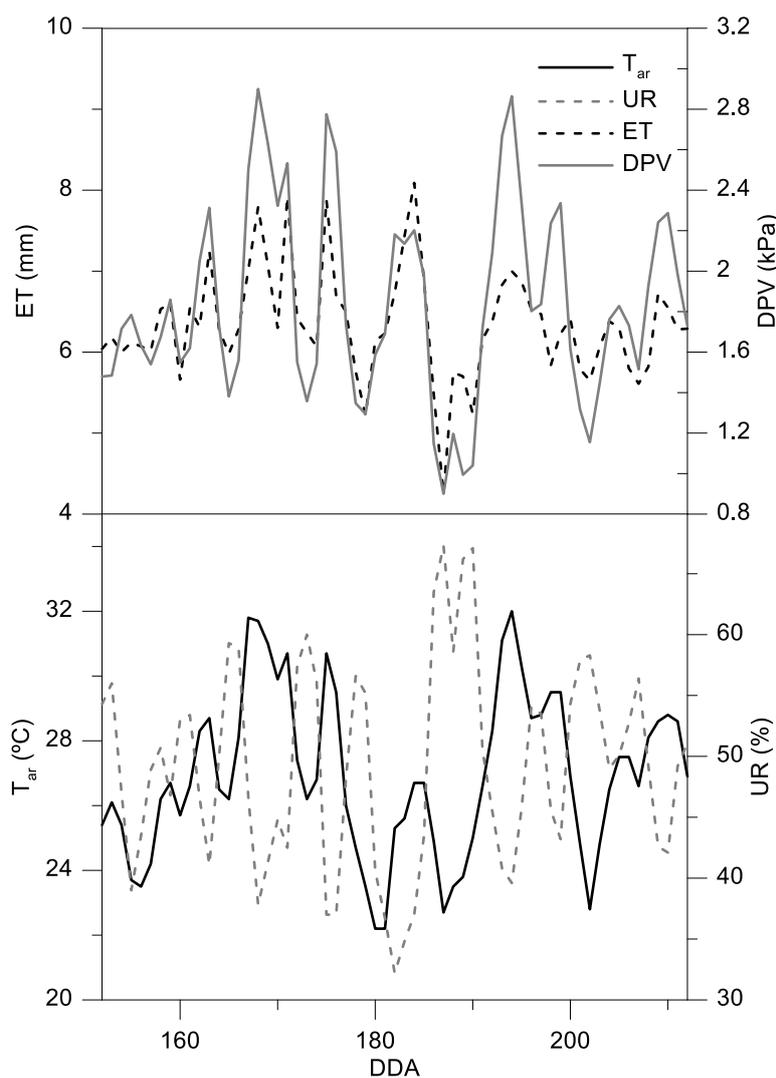


Figura 3. Condições climáticas durante o período experimental. T_{ar} : temperatura média do ar; UR: umidade relativa; ET: Evapotranspiração; DPV: déficit de pressão de vapor do ar.

Durante os dias de medição, foram monitoradas as variáveis para acompanhar o estado hídrico da cultura (Ψ_{folha} e g_s), e estas duas variáveis alteram o valor de acordo com as estratégias de irrigação aplicadas. No início do experimento, todas as plantas monitoradas tiveram valores das variáveis Ψ_{folha} e g_s semelhantes, com valores de Ψ_{folha} em torno de -1,3 MPa e g_s em torno de $170 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4). Uma vez estabelecidas as estratégias de aplicação dos tratamentos com déficit, os valores mostrados nas variáveis estudadas (Ψ_{folha} , g_s , T_{TIC} e T_{SPH}) alteraram de acordo com a quantidade de água aplicada em cada tratamento. A variável FI apresentou valores de Ψ_{folha} variando entre -1,0 e -1,6 MPa, enquanto que o SDI_{50} mostrou uma tendência decrescente, atingindo os valores mais negativos entre -1,8 e -2,0 MPa (Figura 4).

Finalmente, o tratamento com LFDI teve uma tendência muito interessante, atingindo os valores mais negativos (em torno de -2,0 MPa) nos dias em que o tratamento LFDI estava com 7-10 dias de suspensão da irrigação; e uma vez irrigado durante 7-10 dias com a mesma estratégia de irrigação que FI, os valores de Ψ_{folha} foram semelhantes aos do tratamento FI (Figura 4).

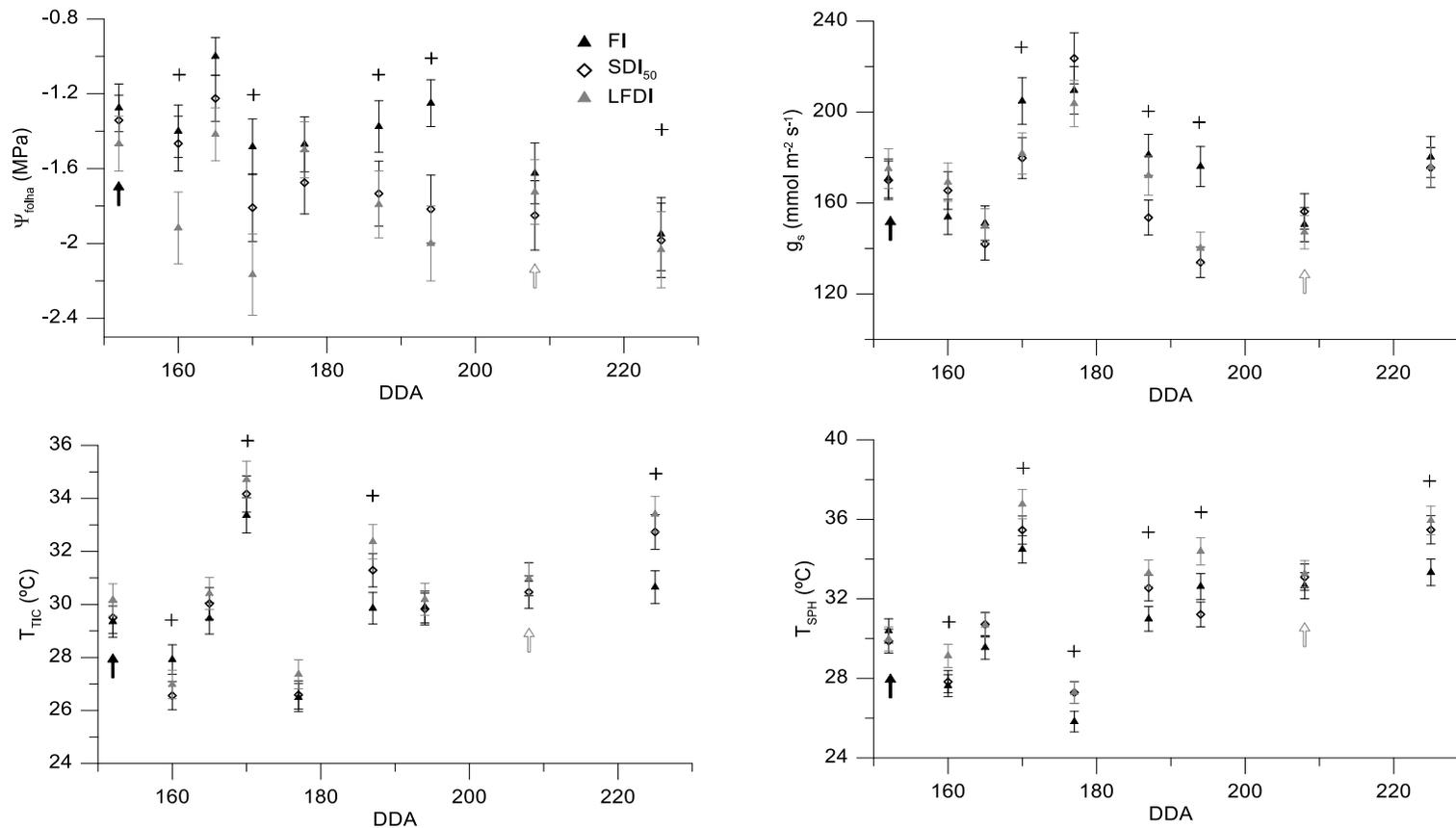


Figura 4. Dinâmica temporal do potencial hídrico da folha (Ψ_{folha}); condutância estomática (g_s), leituras de temperatura do dossel com uma câmera Flir SC660 (T_{TIC}); e com uma câmera Flir One conectada a um smartphone (T_{SPH}). FI, tratamento integral irrigado em 100% ET_C (controle); SDI₅₀, tratamento de irrigação deficitária sustentada em ET_C de 50%; LFDI, irrigação por déficit de baixa frequência, irrigada em termos de valores de Ψ_{folha} . As setas pretas correspondem ao início do período de estresse hídrico, setas brancas até o momento em que a irrigação é suspensa em todos os tratamentos (sete dias antes da colheita). Os sinais em forma de cruz (+) mostram os momentos em que foram alcançadas as diferenças significativas entre FI e os tratamentos estressados.

Entretanto, em função dos tratamentos aplicados, os valores de g_s foram mais estáveis do que Ψ_{folha} . Neste caso, as diferenças entre os tratamentos não foram tão claras quanto ao caso de Ψ_{folha} , sendo muito difícil definir a faixa adequada de g_s para usar essa variável para definir um valor ótimo.

Características associadas às imagens térmicas no infravermelho: T_{TIC} vs. T_{SPH}

As leituras da temperatura do dossel usando o ThermaCam Flir SC660 (T_{TIC}) e com a câmera Flir One (T_{SPH}) mostraram tendências muito similares, embora os valores de T_{SPH} tenham sido entre 0,5 e 2 °C acima dos obtidos com T_{TIC} , especialmente para os mais altos valores de T_{TIC} (Figura 5). No entanto, as diferenças entre tratamentos foram mais evidentes para os valores de T_{SPH} , em comparação com T_{TIC} (Figura 4). Além disso, nos dias nos quais as diferenças significativas entre os tratamentos foram alcançadas em termos de Ψ_{folha} , diferenças semelhantes foram observadas para o caso da temperatura do dossel (Figura 4).

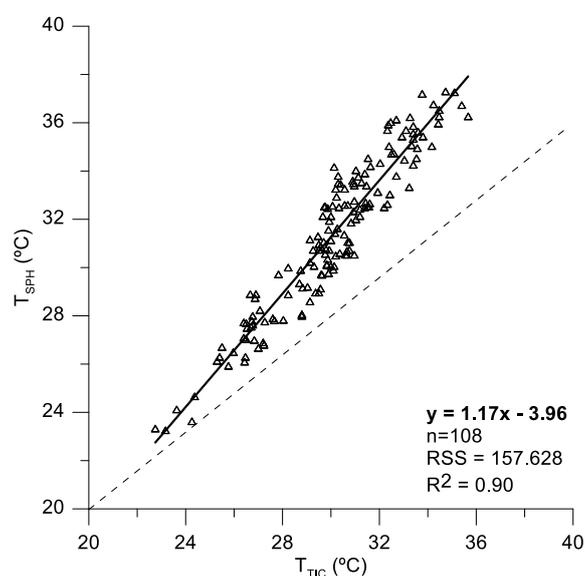


Figura 5. Relação linear entre os valores de temperatura do dossel obtidos usando uma câmera Flir SC660 (T_{TIC}); uma câmera Flir One conectada a um smartphone (T_{SPH}). A linha pontilhada corresponde à função $y = x$.

Apesar das diferenças em termos de valores absolutos das leituras de temperatura do dossel obtidas com ambas as câmeras, observou-se uma relação muito significativa entre T_{TIC} e T_{SPH} ($R_2 = 0,90$) (Figura 5), sugerindo que a informação

obtida entre os dois sensores seria adequada para monitorar o estado hídrico da cultura.

A partir das temperaturas do dossel e da temperatura do ar, obtiveram-se valores de referência das plantas não submetidas ao estresse hídrico, que definem as relações entre os valores de DPV_{ar} no momento da leitura e a diferença entre a temperatura do dossel e a temperatura do ar (Figura 6).

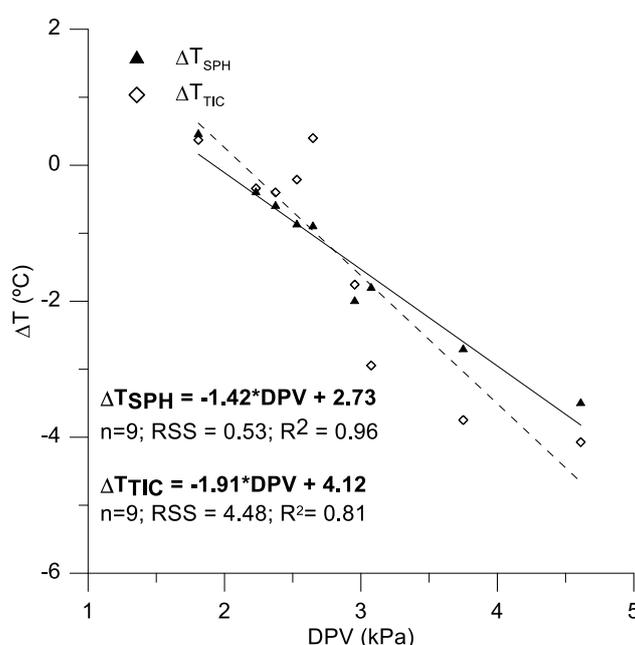


Figura 6. Valores de referência em plantas não submetidas ao estresse hídrico entre o déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e a diferença entre a temperatura do dossel e do ar para ambas as câmeras: Câmera térmica Flir One conectada ao smartphone (ΔT_{SPH}) e uma câmera Flir SC660 (ΔT_{TIC}).

As relações obtidas foram significativas ($p < 0,95$) com R^2 de 0,96 para o caso das diferenças relacionadas aos valores de T_{SPH} (ΔT_{SPH}) e $R^2 = 0,81$ para o caso das diferenças relacionadas aos valores de T_{TIC} . Contudo, a análise de covariância evidenciou diferença entre essas funções lineares, sendo necessário um uso diferencial dependendo da câmera térmica.

Os valores obtidos da temperatura do dossel com o sensor térmico de baixo custo foram bastante confiáveis e representativos do estado hídrico da cultura, à semelhança com os valores obtidos com a ThermaCam SC660. Ainda foi possível ter uma ótima relação entre os valores de ΔT_{SPH} e DPV . Desta maneira, foram definidas as relações entre os diferentes indicadores térmicos (T_{SPH} ; ΔT_{SPH}) e o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI), com as demais variáveis relacionadas ao estado

hídrico (Ψ_{leaf} e g_s). Estas definições permitiram definir a variável mais representativa das três variáveis estudadas, e a possibilidade de estimar o estado hídrico da cultura exclusivamente usando informações térmicas (Figura 7).

Neste caso, não foi observada relação significativa entre os índices térmicos considerados e g_s (dados não mostrados), devido a alta variabilidade dos valores de g_s e a ausência de maiores diferenças entre os tratamentos. No entanto, foram obtidas relações significativas ($p < 0,05$) para o Ψ_{folha} e os índices térmicos (T_{SPH} ; ΔT_{SPH} , CWSI). Além do mais, é notável que os melhores resultados foram obtidos para a variável T_{SPH} em comparação com ΔT_{SPH} e CWSI; embora entre eles, o CWSI demonstrou melhor resultado em relação a ΔT_{SPH} e DPV.

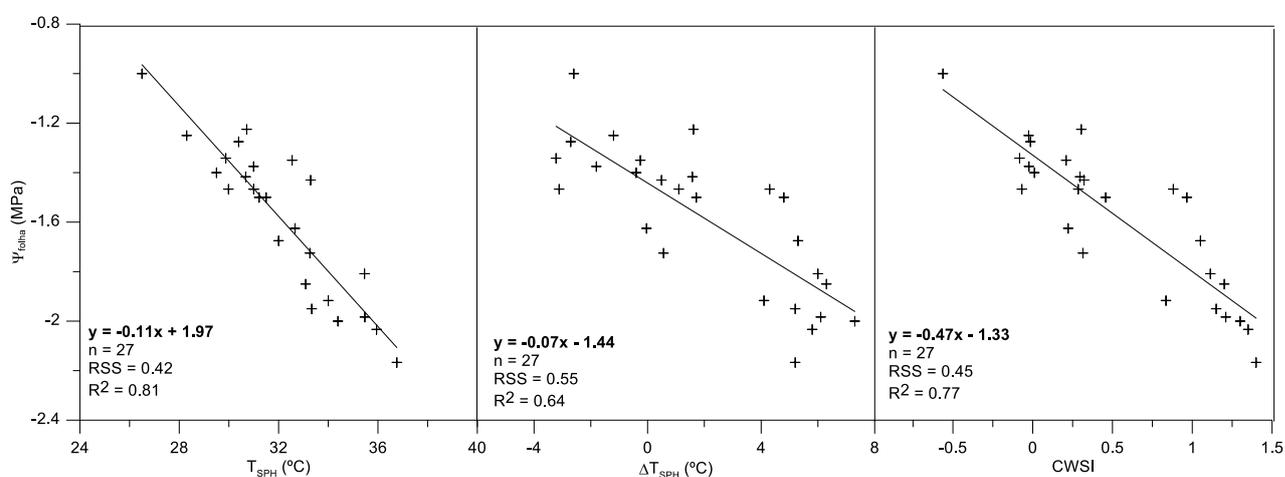


Figura 7. Relação entre o potencial hídrico da folha (Ψ_{folha}), e as variáveis térmicas (T_{SPH} ; ΔT_{SPH}) obtidas com a câmera térmica Flir One conectada ao smartphone, e o índice de estresse hídrico da cultura (CWSI).

DISCUSSÃO

Nos últimos anos, novas ferramentas e diferentes estratégias para melhorar o manejo da água na irrigação estão sendo exigidas. Neste contexto, há um interesse crescente no uso de técnicas de sensoriamento remoto para monitorar o estado hídrico da cultura, visando melhorar o planejamento de irrigação.

Trabalhos foram realizados para testar diferentes estratégias de análise e captura de imagens, que resultaram no desenvolvimento de protocolos efetivos para medições de campo com base no uso de diferentes índices térmicos (García-Tejero et al. 2017ab, Bellvert et al. 2014) e a forte relação entre as informações térmicas e algumas características fisiológicas da planta.

Contudo, uma das principais limitações ligadas a esta técnica é a necessidade de comparar as medidas obtidas com outras variáveis fisiológicas, a fim de confirmar se a informação relatada em termos de dados térmicos está de acordo com o estado hídrico da cultura. Ou seja, as relações entre os dados térmicos e fisiológicos foram definidas com o objetivo de corroborar se a informação térmica pode ser usada para avaliar o estado hídrico da cultura e conseqüentemente otimizar o planejamento da irrigação. No geral, tendo em conta as variáveis fisiológicas monitoradas neste trabalho, pode-se supor que Ψ_{folha} foi a característica que refletiu as maiores diferenças entre os tratamentos, seguido pela T_C medida com ambas as câmaras térmicas.

O potencial hídrico da cultura representa a medida fisiológica capaz de integrar o estado hídrico do sistema contínuo solo-planta-atmosfera (Shackel 2011). Neste caso, esta variável fisiológica é mais utilizada, embora dependendo da cultura, os valores desta variável associada ao estado hídrico da planta devem ser interpretados de maneira diferente. Levando em consideração a capacidade da amendoeira para responder ao estresse hídrico, muitas vezes é possível alcançar valores de potencial hídrico que representariam uma hipotética situação de estresse hídrico, mas que não corresponde com a resposta em termos de g_s , como foi observado neste trabalho. Nesta presente pesquisa, não houve uma resposta semelhante em termos de dinâmica do potencial hídrico das folhas (Ψ_{folha}) e condutância estomática (g_s) (Figura 4). Assim sendo, e tendo em conta os resultados obtidos no presente trabalho, as diferenças observadas entre tratamentos em termos de Ψ_{folha} foram mais evidentes do que para o caso de g_s , mostrando que, às vezes ao longo do período de monitoramento, as diferenças significativas entre os tratamentos em termos de Ψ_{folha} não foram acompanhados com efeitos semelhantes em termos de g_s . A este respeito, como já foi relatado anteriormente por García-Tejero et al. (2017b), em situações de estresse hídrico leve a moderado, a primeira resposta está relacionada ao potencial hídrico da cultura, sem reduções significativas nas g_s , sendo esta relacionada com a escassa capacidade dessa cultura para regular g_s sob situações de estresse hídrico.

Neste contexto, para diferentes cultivares de amendoeiras, Gomes-Laranjo et al. (2006), relataram valores iniciais diferentes de Ψ_{folha} e g_s ao meio-dia, evidenciando que há um efeito importante nestes termos, e sendo necessário definir esses valores. Esses autores relataram valores-limite de Ψ_{folha} entre -1,7 e -2,4 MPa, quando não foram detectadas reduções em termos de g_s . Na mesma linha, em amendoeiras

completamente irrigadas (cv. Guara) durante o estágio de enchimento da semente (o mesmo período em que foi desenvolvido este trabalho), García-Tejero et al. (2017b) relataram valores de Ψ_{folha} medidos em folhas de sombra entre -0,9 e 1-5 MPa, e esses valores relatados por estes autores estavam de acordo com os obtidos no presente trabalho (Figura 5).

Outra questão importante para ser levada em consideração, está relacionada à maior variabilidade em termos de valores g_s . Este fato foi discutido por Eichi (2013), informando que g_s é uma variável fisiológica mais afetada por condições climáticas do que outras, como exemplo, o Ψ_{folha} . Por esse motivo, encontrar as relações significativas entre os indicadores térmicos e característica não foi possível, e algo semelhante foi relatado em amendoeiras maduras, em medições realizadas ao meio-dia, por García-Tejero et al. (2017b). Quando esta cultura é submetida a situações de estresse hídrico, não se tem uma boa relação entre g_s e índices térmicos e esta resposta pode estar relacionada ao padrão anisohídrico de amendoeiras. Outros autores, como Klein et al. (2001) e Romero et al. (2004), informaram que, sob condições de estresse que não seja hídrico, os valores de g_s ficam mais estáveis em condições particulares de alto índice de radiação e de valores de déficit de pressão de vapor abaixo de -2 KPa. No entanto, durante o período experimental, os valores maiores de DPV_{ar} foram detectados e, portanto, isso teria promovido uma maior instabilidade nos valores de g_s , não tendo assim uma boa relação com os índices térmicos estudados neste presente trabalho.

Em relação à dinâmica de T_C mostrada na Figura 4, e de acordo com García-Tejero et al. (2016), existem muitas variáveis que devem ser consideradas, como a temperatura do ar, o déficit de pressão de vapor, o nível de radiação ou o ângulo de incidência da radiação solar sobre a superfície da folha, as quais influenciarão decisivamente o valor absoluto de T_C . García-Tejero et al. (2016, 2017b) relataram que os valores absolutos de T_C seriam um indicador adequado do estado fisiológico da cultura, se as leituras térmicas fossem tomadas em condições semelhantes, ou seja, ao meio-dia, tomando estas medidas em folhas expostas totalmente ao sol e durante o período de demanda da evapotranspiração máxima (como foi feito neste trabalho). Apesar disso, o uso de temperatura absoluta para monitorar o estado hídrico da cultura pode dificultar a tomada de decisões adequadas se o objetivo é manejar a irrigação. A este respeito, juntamente com este indicador térmico, foram avaliados dois índices térmicos, comparando os valores destes índices com os

valores de Ψ_{folha} ou g_s (Figura 6), sendo necessário definir previamente os valores de referência para plantas não estressadas (Figura 5).

Trabalhos anteriores demonstraram que a termografia pode ser usada para avaliar o estado hídrico da cultura, embora, para um bom gerenciamento de estratégias de irrigação deficitária, seja necessário definir o melhor índice térmico para obter a informação mais robusta possível. Neste contexto, muitos trabalhos mostraram que a melhor hora do dia para realizar as leituras de temperaturas mais confiáveis e significativas em relação às variáveis fisiológicas foi ao meio-dia (Bellvert et al. 2014, Pou et al. 2014). Considerando a simplicidade e os aspectos demorados, o valor absoluto da temperatura do dossel seria recomendável porque é fácil de calcular, como foi relatado neste trabalho, e pode ser obtida alta correlação significativa com Ψ_{folha} . Neste sentido, este valor foi utilizado com sucesso no monitoramento do estresse hídrico de culturas relevantes com plantas lenhosas como citrus, amendoeiras, videiras e oliveiras (García-Tejero et al. 2011c, 2016, 2017ac). Esses trabalhos relataram correlações significativas entre T_C e Ψ_{folha} , quando as medições foram feitas ao meio-dia, o que também enfatiza a relevância fisiológica deste índice "mais simples".

Um estágio anterior para transformar os valores absolutos de T_C em um índice térmico normalizado (como ΔT ou CWSI), é a necessidade de medir algumas variáveis climáticas como T_{ar} e UR. Estas variáveis são determinantes, sendo necessário estimar os valores destas nas mesmas condições em que as medidas térmicas estão sendo realizadas. Neste contexto, García-Tejero et al. (2016) relataram que, se essas variáveis não são monitoradas próximas às plantas que estão sendo controladas, não é possível obter boas relações entre os índices térmicos normalizados e os obtidos para o valor de T_C absoluto. Neste trabalho as relações significativas ($p < 0,99$) foram obtidas para ambas as funções (Figura 6), embora o resultado obtido para o sensor Flir One resultou em dados melhores que o anterior. Comparando essas funções (Figura 6) com outras relatadas para esta mesma cultura, García-Tejero et al. (2017c) relataram inclinações semelhantes (-1,88; -1,84; e -1,85), para a função definida das medições realizadas com o ThermaCam Flir SC660. A principal diferença é que as medidas foram realizadas ao longo do dia (das 8:00 às 20:00), enquanto que, neste trabalho, essa relação foi obtida usando medidas tomadas exclusivamente ao meio-dia. Da mesma forma, esses trabalhos implicam em

um avanço no uso desta técnica para monitorar o estado hídrico de amendoeiras, não tendo evidências de outros trabalhos relacionados para essa mesma cultura.

Além disso, Berni et al. (2009), argumentaram que os valores de inclinação para diferentes curvas poderiam ser afetados por erros na estimativa de T_C e a medida de T_{ar} , embora mais interessantes fossem as conclusões derivadas desses autores quando compararam o efeito da radiação e da velocidade do vento no ponto de intercepção. Neste caso, sugerindo que as maiores variações foram observadas no ponto de intercepção e não na inclinação da curva. Nesse sentido, a inclinação obtida neste presente trabalho (-1.91) foi muito semelhante à relatada por García-Tejero et al. (2017c) (como já foi discutido anteriormente), sendo as maiores diferenças no ponto de intercepção. Resultados semelhantes foram relatados por Testi et al. (2008) em plantas de pistache, o que se pode evidenciar que as variações diárias na radiação líquida resultaram em valores de referência paralelos, não sendo afetados pelas inclinações.

Um ponto importante a ser observado neste presente trabalho foi a verificação das diferenças obtidas entre os valores de referência definidos sem o estresse hídrico em leituras realizadas com a ThermaCam Flir SC660 e Flir One. Nesta condição, essas funções foram muito diferentes em termos de inclinação e ponto de intercepção (Figura 6). Essas diferenças observadas estão em acordo com as obtidas para os valores absolutos de T_{TIC} e T_{SPH} (Figura 4) e, portanto, dependendo do sensor térmico, uma função diferente deve ser usada. Seja como for, houve uma relação clara e significativa ($p < 0,01$) entre os valores de T_{TIC} e T_{SPH} , e considerando o objetivo principal deste trabalho, os diferentes índices térmicos foram definidos de acordo com as informações fornecidas pelo sensor Flir One.

Portanto, as diferenças entre T_{TIC} e T_{SPH} estarão relacionadas com três questões principais: i) uso de diferentes cameras térmicas, com diferentes características inerentes; a área de monitoramento para uma mesma planta é diferente (o ângulo de cada sensor é diferente e a mesma distância da planta de monitoramento, a área monitorada usando o sensor Flir One é maior do que para o caso do Flir SC600); ii) o operador para capturar as imagens era diferente; iii) e o software de análise não era o mesmo. Todas essas questões podem explicar as pequenas diferenças entre as leituras realizadas com ambas as câmeras térmicas utilizadas neste presente trabalho.

Apesar disso, uma vez definidos os índices térmicos para o caso da T_{SPH} , foram obtidas altas correlações significativas quanto a T_{SPH} , como para ΔT_{SPH} e CWSI (Figura 7). Essas relações foram especialmente representativas para o caso de T_{SPH} e CWSI vs. Ψ_{folha} (0,81 e 0,73, respectivamente).

Para um controle adequado das estratégias de irrigação deficitária, é essencial identificar o índice térmico mais apropriado e robusto, bem como o melhor momento do dia para realizar as leituras térmicas no infravermelho. No nosso caso, a leitura térmica foi realizada ao meio-dia, como sugeriu García-Tejero et al. (2017c) para a época de produção em estudo. As diferenças mais significativas em termos de T_{SPH} , ΔT_{SPH} e CWSI e Ψ_{folha} foram detectadas, especialmente para o caso de T_{SPH} e CWSI. Se considerar o aspecto relacionado ao tempo de obtenção dos dados, o valor absoluto da T_{SPH} seria o mais recomendável porque é fácil de calcular. A simplicidade deste indicador poderia favorecer o uso deste índice como um indicador preliminar do estresse. No entanto, pode-se ter grandes limitações para a detecção remota do estado hídrico da cultura, enquanto a CWSI seria uma variável mais robusta, especialmente em condições ambientais mais variáveis ao longo do dia.

CONCLUSÃO

A imagem térmica supõe uma técnica não-invasiva que pode ser utilizada no manejo irrigação, o que pode facilitar o controle na aplicação da água, no planejamento da irrigação e o monitoramento para a escolha do melhor momento em aplicar o estresse hídrico. De acordo com os resultados obtidos do presente trabalho, o sensor Flir One permite obter informações confiáveis, sendo isso muito semelhante ao obtido com outros sensores térmicos previamente avaliados em vários trabalhos.

Considerando a relação obtida, o CWSI pode ser considerado o índice térmico mais apropriado para monitorar o estado hídrico de amendoeiras. Além do mais, em condições climáticas semelhantes, os valores absolutos da temperatura do dossel podem oferecer informações prévias sobre o estado hídrico desta espécie.

4. CAPÍTULO 2

REGIMES HÍDRICOS NO SOLO: EFEITOS SOBRE O POTENCIAL HÍDRICO FOLIAR E PRODUÇÃO EM AMENDOEIRAS (*PRUNUS DULCIS* MILL.)

RESUMO

Nos últimos anos, têm sido realizados numerosos esforços para melhorar o controle da irrigação em situações de escassez de água, especialmente em cultivos com a agricultura irrigada no sul da península espanhola. Tradicionalmente, a amendoeira está associada a zonas marginais e com escassez de disponibilidade de água. O cultivo desta espécie tem ganhado importância nos últimos anos a ponto de se converter em uma das plantações mais promissoras para a agricultura da região de Andaluzia Ocidental (SW, Espanha). A valorização do preço pago por kg de semente está provocando uma crescente demanda de conhecimentos relacionada às técnicas de manejo desta espécie *Prunus dulcis* Mill, principalmente no que se refere à adequada irrigação. Este trabalho objetiva oferecer uma informação inovadora, com valores considerados de referência para o controle da irrigação, em função do potencial hídrico foliar, e dos valores finais da produção obtidos em tratamentos com diferentes quantidades de água aplicadas em três variedades de amendoeiras (cvs Guara, Marta e Lauranne). Os resultados obtidos não só permitiram determinar as

funções para a orientação/condução/gerenciamento da irrigação em situações de limitação de água, como também permitiram a definição desses limiares de estresse que garantem uma produção similar àsquelas obtidas em condições de não limitação de água. Tal ação tem potencial de economia de água em torno de 2.000 m³/ha. Consequentemente, o uso de valores ou equações de referência relacionadas ao estado hídrico da cultura permitiram estabelecer melhorias em estratégias e programações de irrigação nas plantações de amendoeiras.

Palavras-chave: estresse hídrico, irrigação deficitária, programação de irrigação.

ABSTRACT

In recent years, numerous efforts have been made to improve irrigation control in water scarcity situations, especially in crops with irrigated agriculture in the south of the Spanish peninsula. Traditionally, the almond tree is associated with marginal areas and scarce availability of water. The cultivation of this species has gained importance in recent years to the point of becoming one of the most promising plantations for agriculture in the region of Western Andalusia (SW, Spain). The valuation of the price paid per kg of seed is provoking an increasing demand of knowledge related to the management techniques of this species *Prunus dulcis* Mill, mainly with respect to the adequate irrigation. This work aims to offer innovative information, with values considered as reference for irrigation control, as a function of leaf water potential, and final production values obtained in treatments with different amounts of water applied in three varieties of almond trees (cvs Guara, Marta and Lauranne). The results obtained not only allowed to determine the functions for the orientation / conduction / management of the irrigation in situations of water limitation, but also allowed the definition of these thresholds of stress that guarantee a production similar to those obtained in conditions of no water limitation. Such action has the potential to save water around 2,000 m³ / ha. Consequently, the use of reference values or equations related to the water status of the crop allowed to establish improvements in strategies and irrigation schedules in the almond plantations.

Keywords: water stress, deficit irrigation, irrigation scheduling.

INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais limitante nos agroecossistemas, especialmente em áreas áridas e semiáridas de muitos países de clima mediterrâneo, como é o caso da Andaluzia ocidental (SW, Espanha). Essa intensa limitação na oferta deste essencial recurso é causada por altas taxas de evapotranspiração potencial, maior que 1.200 mm/ano; e precipitações que raramente excedem 600 mm (García-Tejero et al., 2011). Este déficit é agravado por um alto nível de irregularidade na distribuição inter e intra-anual dessas precipitações, o que na maioria dos casos torna difícil ter recursos hídricos suficientes para atender às demandas do setor agrícola. Nos últimos anos, esta situação de déficit foi agravada devido ao cenário cada vez mais incerto das mudanças climáticas, o que complica ainda mais a viabilidade de inúmeras culturas irrigadas que apresentam necessidades de água bem acima das que se têm disponível para ofertar (García-Tejero et al., 2014).

Neste sentido, o cultivo das amendoeirais (*Prunus dulcis* Mill.) tem sido tradicionalmente associado a áreas marginais e com escassos recursos hídricos em muitas partes da Península Ibérica. Apesar da excelente capacidade de resposta a situações com limitação de água desta cultura, esta espécie pode ser uma alternativa viável na região comparada a outras culturas tradicionais para a agricultura irrigada, e com uma margem de lucro maior. Assim, nos últimos anos, a amendoeira se tornou uma das culturas com maior rentabilidade, tendo atingido para determinadas variedades, valores próximos a 9.0 € kg⁻¹. Nos últimos 5 anos, este elevado valor pago foi causado pela seca na Califórnia/USA, bem como o aumento da demanda de amêndoas contribuiu para este acentuado valor pago por kg do produto. Este conjunto de circunstâncias fez com que a cultura da amendoeira se tornasse muito atraente para o setor agrícola, o que levou a um grande crescimento da extensão territorial plantada de amendoeirais, especialmente em áreas tradicionalmente associadas à agricultura irrigada. De acordo com o Ministério da Agricultura, Pesca e Desenvolvimento Rural (CAPDR), o preço das amêndoas, em termos gerais, manteve-se bastante elevado nas duas últimas estações, variando entre 6,0 - 8,0 € kg de amêndoas, dependendo da época do ano e da variedade considerada. Por outro lado, de acordo com o relatório elaborado pelo CAPDR da Junta de Andaluzia sobre a evolução do setor das amendoeirais nesta comunidade, nos últimos anos teve um crescimento exponencial em torno das áreas destinadas a esta cultura em condições

irrigadas, sendo as províncias de Sevilha, Huelva e Córdoba, onde esse aumento foi maior (Figura 1). A Andaluzia é a comunidade autônoma com uma maior área dedicada ao cultivo das amendoeiras, embora devido à administração da maioria das fazendas (sob condições de chuva e uma topografia muito complexa do solo), o rendimento é muito mais baixo, quando comparado ao potencialmente realizável (CAPDR, 2016).

Portanto, as expectativas mostram que, nos próximos anos, a produção de amêndoas em Andaluzia crescerá significativamente, principalmente devido ao grande número de propriedades agrícolas que foram estabelecidas nos últimos anos com áreas irrigadas. Este fato levou a inúmeras questões e demanda de conhecimento do setor, que exige informações para gerenciar de forma mais eficiente possível os recursos hídricos neste cultivo.



Figura 1. Localização de Andaluzia.

Embora haja uma convicção por parte da maioria dos produtores sobre a resistência deste cultivo à escassez de água, os resultados apresentados pelos autores como Goldhamer e Girona (2012) e Goldhamer e Fereres (2016), mostraram que os recursos hídricos máximos para este cultivo estão em cerca de 12.500 - 13.000 m³ ha⁻¹, indicando que, embora esta cultura possa responder satisfatoriamente a certas situações de irrigação com déficit controlado (IDC), o desempenho em nível produtivo associado às situações de não-limitação de água é muito notável, atingindo produções próximas de 4.000 kg ha⁻¹ de amêndoas (Goldhamer e Fereres 2016).

Torna-se importante questionar se existem ferramentas que poderiam ajudar os técnicos e agricultores, a administrar adequadamente a água das amendoeiras e se, em certas situações de escassez de água, funções e/ou valores de referências podem ser definidos para certas variáveis fisiológicas que permitam assegurar uma resposta produtiva satisfatória junto com uma economia substancial de água.

As linhas base do potencial são uma ferramenta que permitem estimar os valores ótimos para o potencial hídrico (Ψ_{folha}) em função dos valores do déficit de pressão do vapor (DPV), e então estabelecer uma ótima programação de irrigação, especialmente em um contexto de escassez de água, ou quando estão para se implementar estratégias de irrigação deficitária.

O objetivo do presente trabalho foi determinar as funções de referência para o potencial hídrico (Ψ_{folha}) da amendoeira em função dos valores do déficit de pressão do vapor do ar, em três variedades submetidas a três diferentes regimes hídricos. Com base nessas funções e tendo em conta a existência, ou não de efeitos em termos produtivos das estratégias de irrigação propostas, pode definir valores de referência do Ψ_{folha} que permitam controlar de forma eficiente o fornecimento de água abaixo da demanda normal da cultura.

MATERIAL E MÉTODOS

Local do experimento

O ensaio experimental foi realizado em 2017 (153 - 224 DDA, dias do ano) em uma área comercial de amendoeiras adultas (*Prunus dulcis* Mill. DA Webb cvs. Guara, Marta e Lauranne enxertado em GN15) e localizadas no Município de La Rinconada (Sevilha) (37° 29' 3.19" N; 5° 59' 55.1" O) (Figura 2).



Figura 2. Imagens da parcela experimental em diferentes momentos do ensaio.

As amendoeiras foram plantadas no ano de 2007, com uma estrutura de plantio de 8 x 7 m, com irrigação localizada usando duas linhas de canalização com gotejadores autocompensantes de 2,3 L h⁻¹ e 0,75 m de distância entre gotejadores. O solo tem uma textura franco-siltosa (USDA, 2010), com uma profundidade de 2,5 m e um teor de matéria orgânica <15,0 g kg⁻¹. As raízes das plantas estão localizadas nos primeiros 50 cm de solo, correspondendo à área de maior influência da umidade sobre o perfil do solo. Os valores do teor de água no solo na capacidade do campo (-0.033 MPa) e o ponto de murcha permanente (-1.5 MPa) são 0,42 e 0,17 m³ m⁻³, respectivamente, com um nível de exaustão permitido de 0,35 m³ m⁻³.

Na área de estudo, o clima é tipicamente mediterrâneo, com uma taxa anual de evapotranspiração potencial (ET₀) de 1.400 mm e precipitação anual acumulada de 540 mm, distribuída principalmente nos meses de outubro a abril. A precipitação total e a evapotranspiração potencial registrada durante o período experimental foram 1,2 e 526 mm, respectivamente, com temperaturas durante os momentos da coleta de dados que oscilaram entre 24,8 e 36,0 °C e valores de umidade relativa entre 22,1 e 61,0%.

Descrição dos tratamentos de irrigação

Três tratamentos de irrigação foram definidos em cada uma das variedades testadas:

i) Um tratamento irrigado a 100% da evapotranspiração da cultura (ET_c) durante todo o período de irrigação (controle), de acordo com a produção comercial de frutos realizada pelo produtor;

ii) Um tratamento de irrigação em excesso (150-ET_c), que recebeu abastecimento de água em torno de 150% do ET_c, de acordo com a quantidade de água aplicada pelo agricultor no tratamento controle;

iii) Um tratamento de irrigação de déficit controlado (IDC-65), que recebeu 100% do ET_c durante todo o período de irrigação, exceto durante a fase de enchimento da semente, quando o referido tratamento foi irrigado a 65% do ET_c. Uma vez que a colheita foi concluída, este tratamento foi novamente irrigado em 100% do ET_c, com a mesma quantidade e frequência que o tratamento controle.

A quantidade de água aplicada na irrigação foi calculada de acordo com a metodologia proposta por Allen et al. (1998), obtendo os valores de evapotranspiração de referência usando uma estação meteorológica instalada no local do experimento. Os coeficientes das culturas locais utilizadas durante o período de irrigação variaram entre 0,5 e 1,2, de acordo com os resultados obtidos por García-Tejero et al. (2014a, 2014b). No final do experimento, a quantidade de água aplicada no tratamento controle, 150-ET_c e IDC-65 foi 8.200 (100%), 12.100 (150%) e 6.250 m³ ha⁻¹ (65%), respectivamente.

Características avaliadas

As leituras de potencial hídrico foliar (Ψ_{folha}) foram feitas em intervalos de 7 a 10 dias, entre às 12:00 e às 13:30 h, durante o período de enchimento das sementes. A caracterização do estado hídrico das plantas foi realizada por meio de medidas em folhas sombreadas, utilizando uma câmara de pressão foliar (Soil Moisture Equipment Corp., Sta. Barbara, CA, EUA). Oito árvores por tratamento de irrigação e variedade foram monitoradas, sempre utilizando as folhas no lado norte da planta, maduras e sombreadas, a uma altura de aproximadamente 1,5 metros (Figura 3A).



Figura 3. Avaliação do potencial hídrico em folha sombreada por meio da câmara de pressão (Schlander et al, 1965) (A). Umidade relativa/temperatura do ar por meio do termohigrômetro portátil (B).

Uma vez conhecidos os valores do Ψ_{folha} , se calculou os valores de referência que relacionam o déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) no momento das medidas com os dados obtidos para uma dada variável fisiológica, de acordo com a metodologia proposta por Idso et al. (1981).

No momento das avaliações do Ψ_{folha} , por meio de termohigrômetro portátil, as medidas da temperatura (T) e umidade relativa (UR) do ar foram realizadas em torno da copa das árvores. Estas variáveis T e UR foram utilizadas para estimativa dos valores de DPV_{ar} (Figura 3B).

Desenho experimental e análises estatísticas

O desenho experimental foi montado em blocos casualizados, com 4 repetições por tratamento de irrigação. Cada repetição tinha 12 árvores (3 linhas e 4 árvores por linha), sendo que as medidas foram feitas nas 2 árvores centrais de cada repetição ($n = 8$).

Para cada dia de medição, foi realizada uma análise descritiva dos dados, realizando um teste de Levene para verificar a homogeneidade das variâncias. As diferenças significativas entre os tratamentos de irrigação ($p \leq 0,05$) foram identificadas aplicando uma ANOVA unidirecional e um teste de Tukey para a separação de medidas, utilizando o software estatístico SPSS (SPSS Inc., 15.0, Chicago, IL, EUA).

Com os valores de DPV e de Ψ_{folha} , obtiveram os valores de referência mediante uma análise de correlação linear.

Por fim, foram estudadas as diferenças significativas entre os tratamentos nas principais características de produção estudadas (produção da casca e semente de amêndoas; peso unitário da semente e rendimento).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 mostra os valores das variáveis climáticas registradas durante a fase experimental relacionada aos mesmos horários das avaliações do Ψ_{folha} . Durante o período de avaliação das variáveis climatológicas (UR e T), os valores de temperatura oscilaram entre 24,8 e 36°C, coincidindo com os dias de temperatura mais alta com os valores mais baixos de umidade relativa. Por outro lado, os valores de déficit de pressão de vapor variaram entre 1,5 e 4,4 kPa, com uma média de aproximadamente 3,0 kPa.

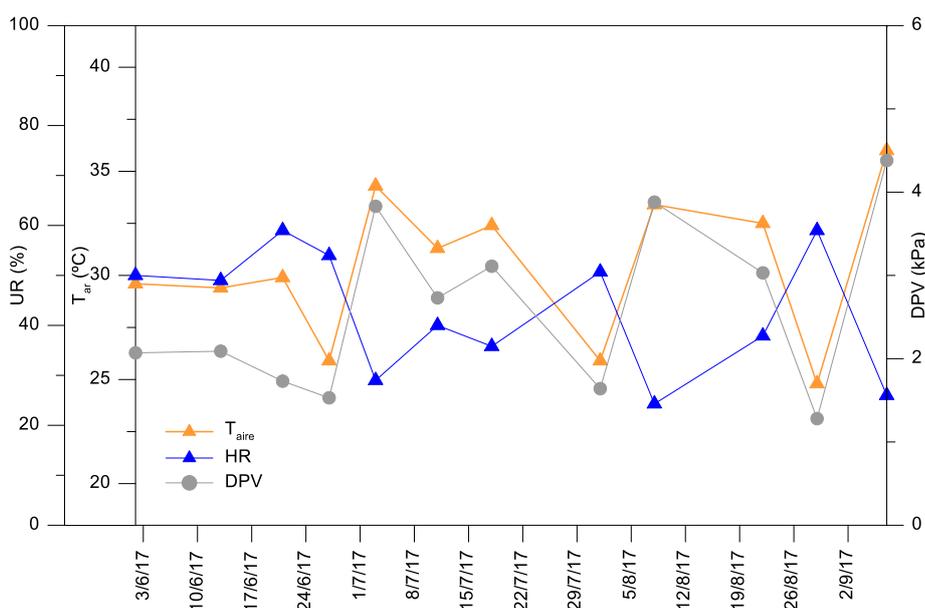


Figura 4. Condições climáticas durante a coleta de dados

Em relação aos valores do Ψ_{folha} monitorados nas três variedades de amendoeirias estudadas, observaram-se diferenças importantes entre os tratamentos testados (Figura 5). Nesse caso, o tratamento com 150-ET_c apresentou valores significativamente maiores do que os registrados no controle e IDC-65, com apenas uma diminuição muito significativa observada nos dias 8 de agosto e 7 de setembro. Este fato coincidiu com os registros mais altos em relação ao DPV durante o período

das medições. Em relação às diferenças entre os tratamentos controle e IDC-65, durante o período de estresse aplicado (enchimento das sementes), o tratamento IDC-65 mostrou, em geral, valores significativamente mais baixos do que os observados no controle, sendo especialmente notável essa diferença na variedade Marta; e durante o mês de julho e a primeira metade de agosto nas três variedades estudadas (Tabela 1, Figura 5). No período de enchimento da semente a média dos valores de Ψ_{folha} no tratamento IDC-65 foi aproximadamente 12% menor em relação ao controle na variedade Guara e Lauranne, já na variedade Marta observou-se um maior efeito do estresse nesta variável com uma redução de 20% em relação ao controle. A Figura 6 mostra em detalhes o estado das amêndoas no início do período de estresse hídrico aplicado.

De qualquer maneira, com o tempo, e nas três variedades estudadas, a resposta dos valores do Ψ_{folha} foi semelhante. Contudo, houve diferenças significativas entre as variedades nos dias de avaliação (Tabela1, Figura 5).

Tabela 1. Diferenças significativas nos valores do potencial da folha entre os tratamentos.

	Guara			Marta			Lauranne		
	150-ETc vs. Control	Contro l vs. IDC-65	150-ETc vs. IDC-65	150-ETc vs. Control	Contro l vs. IDC-65	150-ETc vs. IDC-65	150-ETc vs. Control	Control vs. IDC-65	150-ETc vs. IDC-65
06/06	**	ns	**	**	ns	**	**	ns	**
13/06	**	ns	**	**	ns	**	**	ns	**
21/06	**	ns	**	ns	**	**	**	ns	**
27/06	**	ns	**	**	*	**	**	ns	**
03/07	**	*	**	**	*	**	**	ns	**
11/07	**	**	**	**	**	**	**	ns	**
18/07	**	**	**	**	**	**	*	ns	**
01/08	**	ns	**	**	**	**	*	*	**
08/08	ns	*	**	ns	**	**	ns	*	**
22/08	*	*	ns	*	ns	ns	*	*	*
29/08	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

(ns: Não há diferença estatística entre os tratamentos; * e ** : existe diferença estatística a nível de 5% de significância.)

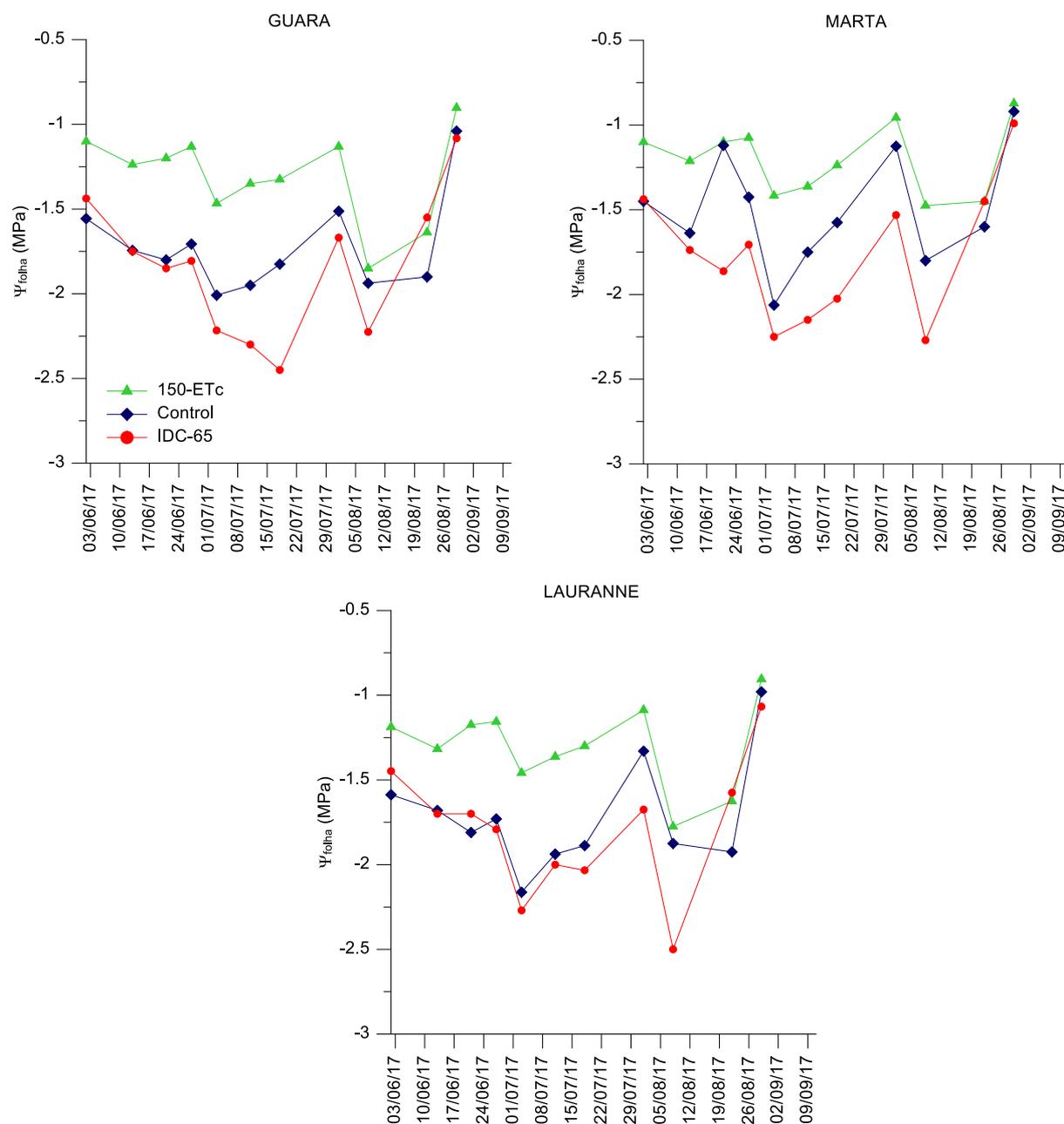


Figura 5. Variação do potencial hídrico foliar (Ψ_{folha} , 12h) com o tempo em folhas sombreadas em 3 variedades de amendoieiras (Guara, Marta e Lauranne) e 3 regimes de irrigação. 150-ET_c: tratamento irrigado em 150% ET_c durante todo o experimento; Controle: tratamento irrigado em 100% ET_c; IDC-65: tratamento de irrigação deficitário controlado, com uma aplicação hídrica de 65% da ET_c. Todos os tratamentos foram aplicados durante o período de enchimento da semente.



Figura 6. Condição do fruto no início da aplicação dos tratamentos: fase de enchimento da semente nas 3 variedades estudadas (Marta, Lauranne e Guara).

Com base nos valores registrados das variáveis de T e da UR em torno do dossel das plantas de cada variedade estudada, e nos tratamentos de irrigação aplicados, observou-se que na variedade Guara, o tratamento com 150-ET_c não apresentou muitos valores de Ψ_{folha} inferiores a -1,5 MPa. Apenas foram observados dois valores os quais foram obtidos nas últimas medidas registradas no início e em meados de agosto de 2017 (Figura 5, Tabela 1). Estes valores inferiores a -1.5MPa coincidiram com o DPV_{ar} superior a 4,5 kPa (Figura 4). Nesta fase o cultivo já se encontrava no período de pós-colheita, momento a partir do qual as mudanças importantes ocorrem em nível fisiológico da planta, o que pode causar entre outras modificações, uma menor capacidade de regulação estomática (Egea et al., 2013; Espadafor et al., 2015).

Em relação ao tratamento controle da variedade Guara, os valores oscilaram em quase todas medidas entre -1,5 e -2,0 MPa, com exceção dos resultados obtidos na última medição em 09/09/2017. Por fim, o tratamento que mais reduziu o potencial hídrico foliar (estresse severo) não excedeu o limiar de -2,5 MPa em nenhuma das avaliações, embora as diferenças com o tratamento controle fossem especialmente evidentes durante as medidas desenvolvidas no mês de julho e na primeira quinzena de agosto (Figura 5, Tabela 1).

Com relação aos valores observados na variedade Marta, em geral mantiveram-se ligeiramente superiores aos obtidos na variedade Guara, o que se pode especular que seja devido a uma diferenciação varietal em termos do ajustamento estomático

quando a variedade Marta é comparada à variedade Guara. Observou-se uma situação intermediária na variedade Lauranne, embora, neste caso, as diferenças entre os tratamentos Controle e IDC-65 não tenham sido tão marcadas quanto as outras duas variedades estudadas (Figura 5, Tabela 1).

Uma vez obtidos os valores de Ψ_{folha} e DPV_{ar} , os valores de referência que relacionam ambas as variáveis foram definidos para poder estabelecer limiares de potencial hídrico que permitam a posteriori uma programação adequada de irrigação com base nos recursos hídricos disponíveis do agricultor (Figura 7, Tabela 2).

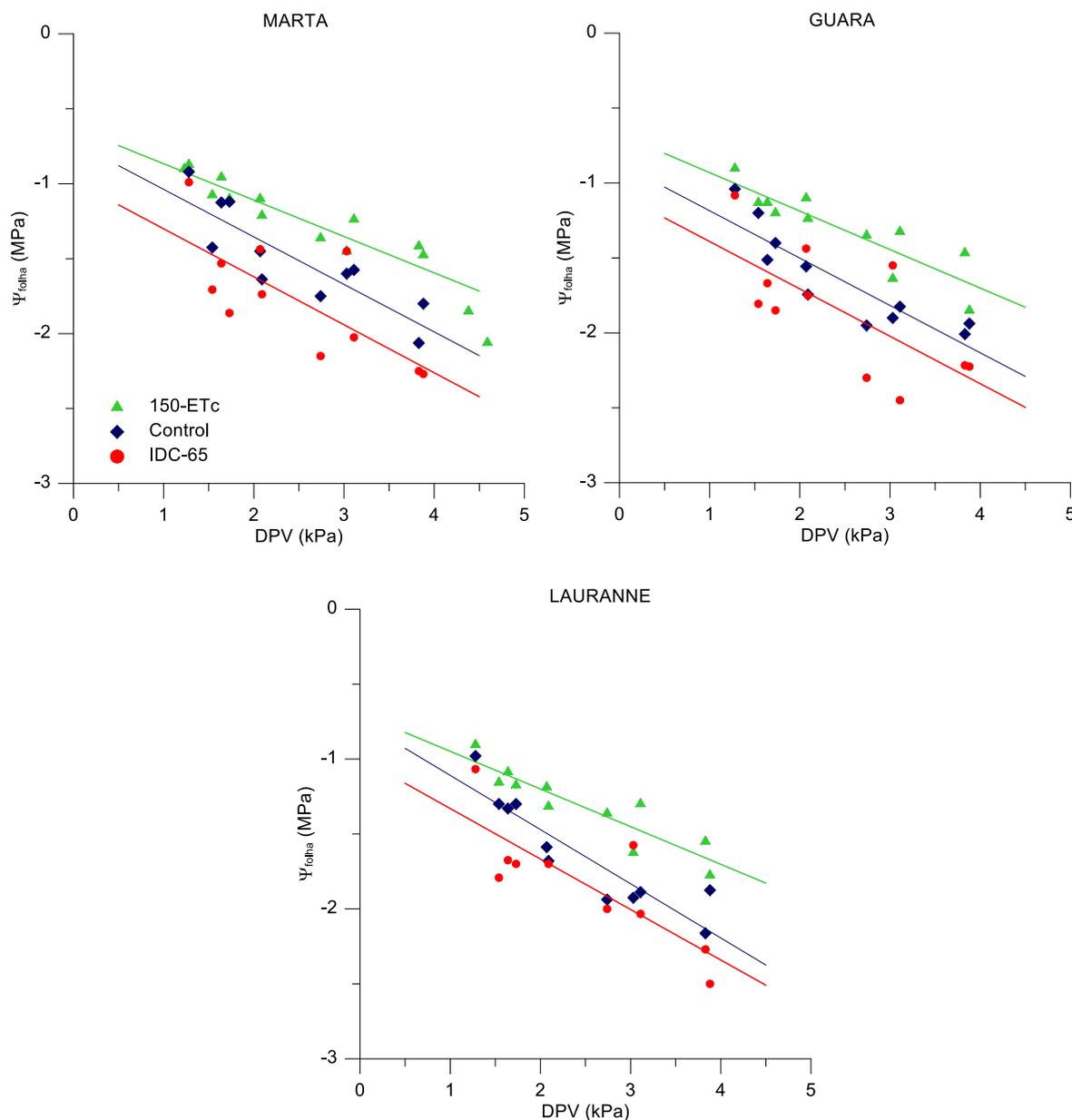


Figura 7 Relação entre o déficit de pressão de vapor do ar (DPV_{ar}) e os valores de potencial hídrico foliar (Ψ_{folha}) (folhas sombreadas), ambos avaliados ao meio-dia, nas 3 variedades de amendoeiras (Guara, Marta e Lauranne) e tratamentos de irrigação estudados aplicados. 150-ET_c: tratamento irrigado em 150% ET_c durante todo o experimento; Controle: tratamento irrigado em 100% ET_c; IDC-65: tratamento de irrigação deficitário controlado, com uma aplicação hídrica de 65% da ET_c. Todos os tratamentos foram aplicados durante o período de enchimento da semente.

Tabela 2. Valores de referência para o potencial hídrico em diferentes variedades de amendoeiras e sob diferentes recursos hídricos. “x” equivale ao DPV; “y” ao Ψ_{folha} .

	Guara	Marta	Lauranne
150-ETc	$y = - 0,33 x - 0,51$ $r^2 = 0,88$	$y = - 0,29x - 0,55$ $r^2 = 0,88$	$y = - 0,30x - 0,60$ $r^2 = 0,90$
Control	$y = - 0,32x - 0,87$ $r^2 = 0,79$	$y = - 0,32x - 0,72$ $r^2 = 0,75$	$y = - 0,36x - 0,75$ $r^2 = 0,83$
IDC-65	$y = - 0,32x - 1,07$ $r^2 = 0,49$	$y = - 0,32x - 0,98$ $r^2 = 0,55$	$y = - 0,33x - 0,99$ $r^2 = 0,66$

Vale ressaltar que, por um lado, as funções obtidas para cada variedade e tratamento mostraram uma separação muito significativa entre as variedades estudadas, devido principalmente aos valores do termo independente de cada uma das funções obtidas e não tanto ao valor da inclinação que, na maioria dos casos, foi muito semelhante em cada uma das variedades estudadas (Tabela 2).

Nesse sentido, os termos independentes mais próximos de zero foram obtidos nas funções pertencentes ao tratamento com 150-ET_c, seguidas pelas linhas de tratamento controle e IDC-65, respectivamente (Tabela 2). Por outro lado, chama a atenção as fortes relações obtidas, especialmente nas funções correspondentes aos tratamentos de 150-ET_c, e como a redução desse ajuste (valor de r^2) diminuiu para os outros tratamentos. Por outro lado, o valor da inclinação das diferentes funções obtidas é especialmente significativo, variando entre -0,29 e -0,36, sendo especialmente similar às das variedades Guara e Marta.

O Ψ_{folha} é um reflexo do estado fisiológico das culturas em termos de disponibilidade de água, sendo também muito influenciado pelas variáveis climáticas (Shackel, 2011). Apesar das limitações desta medida, ainda é a mais utilizada e provavelmente a mais confiável para determinar o estado hídrico das plantas (Nortes et al., 2005). Considerando a capacidade da amendoeira para responder ao estresse hídrico, por vezes pode encontrar situações em que os valores do Ψ_{folha} estejam refletindo uma situação hipotética de estresse, mas que em nível das trocas gasosas, a cultura está dentro dos parâmetros considerados normais (Spinelli et al., 2016).

Em relação ao protocolo mais conveniente para monitorar o estado hídrico da cultura, Goldhamer e Fereres (2001, 2016) mostraram que o Ψ_{folha} descoberta e sombreada (como foi feito neste trabalho) e coberta com um pano úmido

imediatamente após a coleta e rapidamente transportados para a câmara de pressão, permite obter valores de potencial bastante estáveis e bem correlacionados com outros tipos de medidas, como o potencial hídrico do caule. Quanto ao tempo para o desenvolvimento dessas medidas, Goldhamer e Fereres (2004) argumentaram que o momento ideal foi em torno do meio-dia, no momento da máxima demanda evapotranspiratória do ar em torno da planta. No caso deste trabalho, observando os valores de potencial hídrico foliar e a relação desta variável com os valores de DPV_{ar} , as funções definidas foram obtidas a partir de valores registrados no horário de meio-dia, sendo conveniente a realização das medidas referidas dentro desse intervalo, para garantir uma interpretação correta dos dados obtidos.

Chegando a este ponto, a questão fundamental seria qual dessas funções deve ser tomada como referência ao realizar a programação de irrigação? Nesse sentido, é importante levar em consideração os valores de produção obtidos em cada uma das variedades e tratamentos de irrigação.

Assim, foi possível observar que a resposta produtiva foi diferente em cada uma das variedades estudadas e como esta produção manteve uma relação importante com a resposta observada em nível fisiológico. Nesse sentido, no caso da variedade Guara (Tabela 2), não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos em nenhuma das características produtivas estudadas, embora tenha demonstrado uma certa melhora nos valores de produção global (cascas e sementes), mesmo que a produção de sementes no tratamento com 150- ET_c em relação ao controle; tenha sido elevada. Em relação ao controle, esta diferença na produção do tratamento 150-ET foi inferior a 200 kg ha^{-1} .

Com relação aos efeitos causados pelos diferentes tratamentos de irrigação sobre a variedade Marta, neste caso, foram observadas diferenças significativas tanto na produtividade de amêndoas (semente+cascas), quanto na produtividade de sementes e no peso unitário da semente de amêndoas, sendo superior no tratamento de 150- ET_c , quando este foi comparado com o tratamento controle e com o tratamento IDC-65 (Tabela 2). Este resultado está de acordo com a resposta fisiológica observada nesta variedade Marta, o que evidencia que nesta variedade houve um maior controle de transpiração no tratamento de 150- ET_c , como pode ser observado nos valores de potencial hídrico foliar observados nesta referida variedade (Figuras 5).

Assim, ao contrário dos resultados obtidos na variedade Guara, ao se observar os valores da variedade Marta, pode-se mostrar que um aumento substancial na

quantidade de água (50%) causou melhorias significativas características relacionadas à produção; embora observando os valores obtidos entre os outros dois tratamentos de irrigação aplicados (Controle e IDC-65), não foram observadas diferenças entre o Controle e o tratamento IDC-65 (Tabela 3).

Por fim, em relação aos resultados relacionados às características de produção observados na variedade Lauranne (Tabela 3), uma melhoria substancial nestas características foi novamente observada nos valores correspondentes ao tratamento de 150-ET_c, embora neste caso as diferenças entre este tratamento e o controle não foram significativas.

Tabela 3. Produtividade relacionada à casca+semente e a produtividade relacionada apenas a quantidade de semente produzida, o peso de cada semente e o rendimento das variedades Guara, Marta e Lauranne submetidas a diferentes aplicações de água no solo.

Variedade	Tratamento	Produtividade (casca+semente) g/ha)	Produtividade (semente) /ha)	Produção (peso de semente) (g)	Rendimento (semente/casca+semente)
Guara	150-ET _c	6030.9a	2329.0a	1.14a	0.386a
	Controle	5595.8a	2144.3a	1.07a	0.382a
	IDC-65	5856.5a	2249.9a	1.19a	0.384a
Marta	150-ET _c	6733.7a	2394.7a	1.19a	0.341a
	Controle	5232.8b	1797.1b	1.18a	0.340a
	IDC-65	5105.8b	1736.9b	1.10b	0.340a
Lauranne	150-ET _c	7166.4a	2599.7a	1.06a	0.362b
	Controle	6720.6ab	2481.9a	0.90a	0.370ab
	IDC-65	5904.1b	2239.6b	0.92a	0.378a

Diferentes letras dentro de uma coluna e para uma única variedade mostram diferenças significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$).

Considerando os dados relacionados à produção (Tabela 3) e as equações ajustadas para cada variedade (Tabela 2), a irrigação da variedade Guara pode ser manejada a partir da função definida para o tratamento com IDC-65, especialmente para situações com abastecimento de água abaixo das exigidas pela cultura. Por outro lado, as variedades Marta e Lauranne devem ser manejadas a partir da equação IDC-65 (Tabela 2 e 3) no início do experimento, momento este que as

variedades melhor se adaptam à disponibilidade hídrica. Deve-se levar em consideração que o uso das equações ajustadas para Marta e Lauranne obtidas no tratamento IDC-65 pode provocar perdas significativas na produção (Tabelas 2 e 3). Contudo, a partir da análise destes dados, pode-se obter uma estimativa das perdas em produção, caso a irrigação for ajustada com base nos tratamentos a partir destas equações mostradas na Tabela 2. Neste caso, é importante relatar que estas equações foram definidas para os três regimes de irrigação (150, 100 e 65% ET_c). Portanto, a seleção de uma ou outra equação vai depender não somente da necessidade da água das variedades, como também pela disponibilidade deste importante recurso agrícola.

Segundo Franco et al. (2000) e Egea et al. (2009, 2010), o *Prunus dulcis* é uma espécie tolerante para situações de estresse abiótico, como exemplo a falta de água ou a salinidade, o que mostra que esta espécie pode apresentar economias significativas de água sob certas estratégias de irrigação deficitária. Neste sentido, é essencial levar em consideração dois aspectos fundamentais como a intensidade do estresse hídrico e o período fenológico em que a restrição de irrigação será aplicada. Nortes et al. (2009) mostraram que as melhores fases para aplicar a estratégia de déficit controlado foram durante o enchimento da semente, e na fase final da colheita. No entanto, nesta espécie e em vários experimentos relacionados à irrigação, existem controvérsias quanto aos resultados obtidos. Como exemplo, durante o enchimento das sementes, diferentes níveis de estresse hídrico foram aplicados. A partir destes níveis, Hutmacher et al. (1994) e Goldhamer e Viveros (2000) concluíram que houve efeitos significativos quando a aplicação do estresse hídrico foi feita durante o período de enchimento da semente. Outros autores como Goldhamer e Fereres, 2004 e Egea et al., 2009 e Cornacchia et al., 2010 não encontraram resultados significativos sobre a produção, quando a irrigação por déficit foi aplicada durante esta fase fenológica (enchimento das sementes). Neste contexto, essas controvérsias podem ser causadas pelo nível de estresse hídrico aplicado em cada experimento.

Com relação a uma análise no nível de estresse hídrico foliar, bem como para uma situação de estresse hídrico durante o período de enchimento da semente, Romero et al. (2004) sugeriram um limite de -2,0 MPa em valores de Ψ_{folha} ao meio-dia, enquanto outros autores como Hutmacher et al. (1994) e Puerto et al. (2013) indicaram um valor de -2,5 MPa. No caso deste presente trabalho, em nenhum caso os valores Ψ_{folha} observados foram inferiores a -2,5 MPa, o que se pode relatar que

este valor pode ser considerado como um limite para evitar efeitos significativos nos valores das características de produção. Contudo, deve-se ter em mente que a resposta da cultura depende não somente do limite alcançado, mas também do tempo durante o qual a situação de estresse foi mantida, bem como os níveis de déficit de pressão de vapor registrados no momento da medição.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e nas equações ajustadas entre o potencial hídrico foliar e o DPVar, os valores de referência definidos para cada uma das variedades e tratamentos de irrigação permitiram estabelecer um cronograma de riscos e uma tomada de decisão correta, tendo como ponto de partida os valores de potencial hídrico da cultura.

Com base na resposta produtiva dessas variedades e a partir dos tratamentos aplicados, seria possível realizar uma redução na aplicação de água em situações em que este recurso está abaixo do exigido pela espécie em estudo.

Por fim, uma diferenciação na resposta ao déficit hídrico pode ser observada de acordo com a variedade. As variedades Guara e Lauranne podem ser consideradas as que a priori ofereceriam uma resposta mais interessante no caso de se ter que aplicar uma estratégia de irrigação deficitária durante o período de enchimento da semente.

Embora esses dados correspondam a um único experimento de estudo, os resultados obtidos podem estabelecer um protocolo de irrigação com base no uso de valores de referência, o que se pode ter perdas de produção, as quais não sejam representativas, ou até mesmo estas perdas podem nem acontecer.

5. CONCLUSÕES FINAIS

Este trabalho demonstrou que a irrigação deficitária pode ser usada em cultivos de amendoeiras e utilizada como estratégia para impulsionar a produtividade e eficiência do uso da água em pomares de amêndoas em zonas com recursos hídricos reduzidos.

A imagem térmica tirada da câmera Flir One, assim como os dados de potencial hídrico e as imagens térmicas tiradas com uma ThermaCam, Flir SC660, podem ser utilizados como ferramenta para avaliar o estado hídrico das amendoeiras e contribuir para um planejamento e monitoramento da escolha mais adequada para o manejo da irrigação (Capítulo 1).

Devido ao comportamento anisohídrico apresentado pela amendoeira quando foram aplicadas técnicas de irrigação deficitária, não foram observados efeitos significativos em gs, indicando que o potencial hídrico e as imagens termográficas, no presente trabalho, representam melhor o estado hídrico da planta do que gs; (Capítulo 1).

O CWSI pode ser considerado o índice térmico mais apropriado para monitorar o estado hídrico das amendoeiras (Capítulo 1).

As equações ajustadas entre o potencial hídrico foliar e o DPV_{ar}, e os valores de referência definidos podem contribuir para a programação adequada, em termos de

tempo e quantidade de água de irrigação aplicada em relação às condições ambientais para cada uma das variedades e tratamentos estudados (Capítulo 2).

De acordo com a resposta produtiva das variedades e tendo em vista os tratamentos aplicados, pode-se reduzir a quantidade de água aplicada na irrigação das amendoeiras sem que isso prejudique consideravelmente a produção final e qualidade da amêndoa (Capítulo 2).

O conhecimento do comportamento fisiológico da cultura, os limiares de tolerância e informação de base são essenciais para gerenciar o estresse hídrico, evitando o déficit excessivo que pode provocar danos irreversíveis.

Levando em consideração que os dados apresentados neste trabalho correspondem a um único experimento de estudo para cada capítulo, e que a irrigação deficitária é uma ferramenta de manejo da irrigação muito útil, recomenda-se investigações adicionais que conduzam a um controle operacional do déficit hídrico mais confiável de forma que possa ser levado em nível de exploração comercial. Para isso, é fundamental poder contar com indicadores de estresse hídrico robustos e sensíveis a mudança de estado da planta e do solo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcón, F., Egea, G., Nortes, P.A. 2013. Financial feasibility of implementing regulated and sustained deficit irrigation in almond orchards, *Irrigation Science*, 31, 931–941.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requeriments-* FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO: Rome, Italy.

Almond Board of California. 2015. Almond Industry Position Report. 41. Disponível em:http://www.almonds.com/sites/default/files/content/attachments/2015_almanac.pdf . Acessado em 29 de janeiro de 2018.

Ameglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F.A., Dayau, S. y Cruiziat, P. 1998. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*, 207, 155-167.

ARA. 2011. *Agenda del Regadío Andaluz, Horizonte 2015*, Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía, 127.

Arquero, A. 2013. *Manual del Almendro*, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía, 78.

Aussenac, G., Valette, J.C. 1982. Summer water status of *cedrus-atlantica manetti*, *quercus-ilex* and *quercus-pubescens* willd and of some pinetrees on the Mont-Ventoux. *Annales des Sciences Forestieres*, 39, 41-62.

Bajons, P., Klinger, G., Schlosser, V. 2005 Determination of stomatal conductance by means of infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 46, 429-439.

Barros, I.O., Soares A.A., 2013. Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro e velame da caatinga brasileira. *Revista Ciência Agronômica*, 44, 1, 192-198.

Bellvert, J., Marsal, J., Girona, J., Gonzalez-Dugo, V., Fereres, E., Ustin, S.L. & Zarco-Tejada, P.J. 2016, 'Airborne thermal imagery to detect the seasonal evolution of crop water status in peach, nectarine and Saturn peach orchards', *Remote Sensing*, 8, 1–17.

Bellvert, J., Zarco-Tejada, P.J., Fereres, E., Girona, J. 2014. Mapping crop water stress index in a 'Pinot-noir' vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agric. J.* 15, 361-376.

Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Canto, G., Fereres, E., Villalobos, F., 2009 Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sens Environ.* 113, 2380–2388.

CAPDR 2016, Caracterización del sector de la almendra en Andalucía. Secretaría General de Agricultura y Alimentación, Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. 34.

Castel, J.R., Fereres, E. 1982. Responses of young almond trees to two drought periods in the field. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 57, 175–187.

Chalmers, D.J., Mitchell, P.D., Van Heek, L. 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 106, 307-12.

COM 2012, Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo sobre la cooperación de innovación europea. 'Productividad y sostenibilidad agrícolas, Bruselas. Disponible em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/es/TXT/?uri=CELEX%3A52012DC0079> Acessado em: 2 de fevereiro de 2018.

Cornacchia, R., Amodio, M.L., Colelli, G., Tortosa, P.A.N. 2010. Effect of irrigation water reduction strategies on quality at harvest and during storage of in-shell almonds. *Acta Horticulturae*, 887, 251-260.

Costa, J.M., Grant, O.M., Chaves, M.M., 2013. Thermography to explore plantenvironment interactions. *J Exp Bot.* 64, 3937 -3949.

Daccache, A., Keay, C., Jones, R.J.A., Weatherhead, E.K., Stalham, M.A., Knox, J.W. 2012. Climate change and land suitability for potato production in England and Wales: impacts and adaptation, *Journal of Agricultural Science*, 150, 161-177.

Dhillon, R., Udompetaikul, V., Rojo, F., Roach, J. 2014. Detection of Plant Water Stress Using Leaf Temperature and Microclimatic Measurements in Almond, Walnut, and Grape Crops, *Trans ASABE*, 57, 297–304.

Doll, D. 2009. The seasonal patterns of almond production. University of California Cooperative Extension. Disponível em: <http://thealmonddoctor.com/2009/06/22/the-seasonal-patterns-of-almond-production/> Acessado em 1 de março de 2018.

Doll, D. 2013. Many factors can affect almond size and quality. In: *Growing Produce*. Disponível em: <http://www.growingproduce.com/nuts/many-factors-can-affect-almond-size-and-quality/> . Acessado em 1 de março de 2018.

Domingo, R. 1994. Respuesta del limonero Fino al riego deficitario controlado. Aspectos fisiológicos. Tese de doutorado. Universidade de Murcia. 237.

Egea, G, Dodd, IC, González-Real, MM, Domingo, R & Baile, A, 2011, 'Partial rootzone drying improves almond tree leaf-level water use efficiency and afternoon water status compared with regulated deficit irrigation', *Functional Plant Biology*, vol. 38, pp. 372-385.

Egea, G., González-Real, M.M., Baille, A., Nortes, P.A., Sánchez-Bel, P., Domingo, R. 2009. The effects of contrasted deficit irrigation strategies on the fruit growth and kernel quality of mature almond trees. *Agricultural Water Management* 96, 1605-1614.

Egea, G., Nortes, P.A., Domingo, R., Baille, A., Pérez-Pastor, A., González-Real, M.M. 2013. Almond agronomic response to long term deficit irrigation applied since orchard establishment. *Irrigation Science*, 31, 445-454.

Egea, G., Nortes, P.A., Gonzalez-Real, M.M., Baille, A., Domingo, R. 2010. Agronomic response and water productivity of almond trees under contrasted deficit irrigation regimes. *Agricultural Water Management*, 97, 171–181.

Eichi, V.R. 2013. Water use efficiency in almonds (*Prunus dulcis* (mill) D.A. Web). Dissertação. School of Agriculture, Food and wine. Faculty of Science. Univ. of Adelaide. 77.

Elfving, D.C., Kaufman, M.R., Hall, A.E. 1972. Interpreting leaf water potential measurements with a model of the soil-plant-atmosphere continuum. *Physiologia Plantarum*, Copenhagen, 27, 161- 168.

El-Sharkawi, H.M., El-Monayeri, M. 1976. Response of olive and almond orchards to partial irrigation under dry-farming practices in semiarid regions. 3. Plant-soil water relations in almond during growing season. *Plant and Soil*, 44,113-128.

Espadafor, M., Orgaz, F., Testi, L., Lorite, I.J., Villalobos, F.J., 2015. Transpiration of young almond trees in relation to intercepted radiation. *Irrigation Science* 33, 265–275.

Esparza, G., DeJong, T.M., Weinbaum, S.A. 2001b. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on nonstructural carbohydrate and nitrogen contents of dormant, mature almond trees. *Tree Physiology*, 21, 1081–1086.

Esparza, G., DeJong, T.M., Weinbaum, S.A., Klein, I. 2001a. Effects of irrigation deprivation during harvest period on yield determinants in mature almond trees. *Tree Physiology*, vol.21, 1073–1079.

FAOSTAT 2016. Food and Agriculture Organisation of the United Nations. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acessado em: 03 dezembro de 2017.

Farquhar, G.D., Sharkey, T.D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 33, 317-345.

Felipe, A.J. 1999. El cultivo del almendro. SECH Boletín Informativo, XII, Nº 1.

Felipe, AJ. 2000. El almendro. I. El material vegetal. Editorial Mira.

Fereres, E., Aldrich, T.M., Schulbach, H., Martinich, D.A. 1981. Responses of young almond trees to late season drought, *California Agriculture*, 35, 11–12.

Fereres, E., Goldhamer, D.A. 1990. Deciduous fruits and nuts, in: *Irrigation of Agricultural Crops*. Ed. Stewart, BA & Nielsen DR, ASA Monograph, 30, Madison, WI, 987–1017.

Fereres, E., Goldhamer, D.A. 2003. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees, *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 78, 139–144.

Fereres, E., Soriano, M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use', *Journal of Experimental Botany*, 58, 147–159.

Franco, J.A., Abrisqueta, J.M., Hernansaez, A., Moreno, F. 2000. Water balance in a young almond orchard under drip irrigation with water of low quality. *Agricultural Water Management*, 43, 75–98.

Fuchs, M., Tanner, C.B. 1966. Infrared Thermometry of Vegetation, *Agronomy Journal*, 58, 597-601.

García, J., Romero, P., Botía, P., García, F. 2004. Cost-benefit analysis of almond orchard under regulated deficit irrigation (RDI) in SE Spain, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2, 157-165.

García-Tejero I.F., Rubio, A.E., Viñuela, I., Hernández, A., Rodríguez-Pleguezuelo, C.R., Durán-Zuazo V.H. 2017b. Infrared thermal imaging to assess the crop-water status in almond trees (cv. Guara) under deficit irrigation strategies. *Agric. Water Manage* (Under review).

García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Arriaga, J., Hernández, A., Vélez, L.M., Muriel-Fernández, J.L. 2012. Approach to assess infrared thermal imaging of almond trees under water-stress conditions. *Fruits* 67, 463-474.

García-Tejero, I.F., Costa, J.M., Egipto, R., Durán-Zuazo, V.H., Lima, R.S.N. 2016. Thermal data to monitor crop-water status in irrigated Mediterranean viticulture. *Agricultural Water Management*. 176, 80-90.

García-Tejero, I.F., Durán, Z.V.H. 2017. *Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment: Tools, Strategies and Challenges for Woody Crops*. ISBN: 978-01-281-3164-0 Academic Press-Elsevier. Amsterdam, Netherlands. 624. (In Press)

García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Jiménez-Bocanegra, J.A., Muriel, J.L. 2011b, Improved water use efficiency by deficit irrigation programs: Implications for saving water in citrus orchards, *Scientia Horticulturae*, 124, 278-282.

García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L. 2014a. Towards sustainable irrigated Mediterranean agriculture: implications for Water conservation in semiarid environments. *Water Int.* 39, 635-648.

García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L., Jiménez-Bocanegra, J.A. 2011c. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. *Funct. Plant Biol.* 38, 106-117.

García-Tejero, I.F., Durán-Zuazo, V.H., Muriel-Fernández, J.L., Rodríguez-Pleguezuelo, S.R. 2011a. *Water and sustainable agriculture*. Springer, Springerbriefs, 94.

García-Tejero, I.F., Hernández, A., Iglesias-Contreras, M., Moreno, J.M., Ortega-Arévalo, C.J., Souza, L., Rodríguez Pleguezuelo, C.R., Durán Zuazo, V.H. 2017c. Fostering sustainable water use in almond (*Prunus dulcis* Mill.) orchards in a semiarid Mediterranean environment. *Archives of Agronomy and Soil Sci.* (Under review).

García-Tejero, I.F., Hernández, A., Padilla-Díaz, C.M., Díaz-Espejo A., Fernández, J.E. 2017a. Assessing plant water status in a hedgerow olive orchard from thermography at plant level. *Agric. Water Manage.* 188, 50-60.

García-Tejero, I.F., Hernández, A., Viñuela, I., Apolo, O.E., Montes, C., Muriel, J.L., Durán-Zuazo, V.H., 2014b. Gestión sostenible de los recursos hídricos en el cultivo del almendro: determinación de los coeficientes de cultivo y efectos del riego deficitario. *Fruticultura*, 36, 2-11.

Garnier, E., Berger, A. 1985. Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress, *Journal of Horticultural Science*, 60, 47–56.

Gebre, G.M., Kuhns, M.R. 1993. Effects of water-stress preconditioning on gas-exchange and water relations of *Populus-Deltoides* clones. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne de Recherche Forestiere* 23, 1291-1297.

Girona, J. 2006. La respuesta del cultivo del almendro al riego, *Vida Rural*, 234, 12–16.

Girona, J., Marsal, J. 1995. Estrategias de RDC en almendro. En: *Riego Deficitario Controlado*. Zapata M. y Segura P., (ed.). España: Mundi Prensa, 97-118.

Girona, J., Mata, M., Marsal, J. 2005. Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond, *Agricultural Water Management*. 75, 152–167

Goldhamer, D., Fereres, E. 2001. Simplified tree water status measurements can aid almond irrigation, *California Agriculture*, 55, 32–37.

Goldhamer, D.A., Shackel, K. 1989. Irrigation cutoff and drought irrigation strategy effects on almond. 17th Annual Almond Research Conference, Modesto, CA, 7.

Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrig Sci*, 20, 115–125. doi:10.1007/s002710000034.

Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrig Sci*, 23, 11–19. doi:10.1007/s00271-003-0088-0.

Goldhamer, D.A., Fereres, E. 2016. Establishing an almond water production function for California using long-term yield response to variable irrigation, *Irrigation Science*, 1–11. doi:10.1007/s00271-016-0528-2

Goldhamer, D.A., Girona, J. 2012. Crop yield response to water: almond In: Steduto P, Hsiao TC, Fereres E, Raes D (eds) *FAO irrigation and drainage Paper No. 66*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 358–373

Goldhamer, D.A., Viveros, M. 2000. Effects of preharvest irrigation cutoff durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. *Irrigation Science*, 19, 125–131.

Goldhamer, D.A., Viveros, M., Salinas, M. 2006. Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variation in applied water and stress timing on yield and yield components, *Irrigation Science*, 24, 101–114

Gomes-Laranjo, J., Coutinho, J.P., Galhano, V., Cordeiro, V. 2006, Responses of five almond cultivars to irrigation: Photosynthesis and leaf water potential, *Agricultural Water Management*, 83, 261-265.

Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Berni, J.A.J., Suárez, L., Goldhamer, D., Fereres, E. 2012. Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that

is water stress-dependent, *Agriculture, Forest and Meteorology*, 154, 156–165. doi:10.1016/j.agrformet.2011.11.004.

Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Fereres, E. 2014. Applicability and limitations of using the crop water stress index as an indicator of water deficits in citrus orchards. *Agric. For. Meteorol.* 198-199, 94-104.

Goode, J.E. y Higgs, K.H. 1973. Water, osmotic and pressure potential relationships in apple leaves. *Journal of Horticultural Science.* 48, 203-215.

Grant, O.M., Tronina, Ł., Jones, H.G., Chaves, M.M. 2007 Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. *Journal of Experimental Botany*, 58:4, 815–825.

Grasselly, C., Crossa-Raynaud, P. 1984. *El almendro*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Hernandez, F.B.T. 2008. A gestão dos perímetros irrigados precisa ser repensada. Palestra realizada no Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação e o I Simpósio Brasileiro sobre o Uso Múltiplo da Água. Disponível em: <http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/opiniaio/a-gestao-dos-perimetros-irrigados-precisa-ser-repensada-1.102137>. Acessado em: 20 de abril de 2018.

Hsiao, T.C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24, 519-570.

Hsiao, T.C. 1990. Measurements of plant water status, In: Steward, B.A., Nielsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph No. 30. Am. Soc. Agro., Madison, WI, 243–279.

Hutmacher, R.B., Nightingale, H.I., Rolston, D.E., Biggar, J.W., Dale, F., Vail S.S., Peters, D. 1994. Growth and yield responses of almond (*Prunus amygdalus*) to trickle irrigation, *Irrigation Science*, 14, 117–126.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L.. 1981. Normalizing the stress- degree-day parameter for environmental variability. *Agric Meteorol.* 24, 45-55.

Iglesias, A., Garrote, L, Diz, A., Schlickenrieder, J., Martin-Carrasco, F. 2011 Re-thinking water policy priorities in the Mediterranean region in view of climate change. *Environmental Science & Policy*, 14, 744-757.

IPCC 2014. *Climate change 2014. Impacts, adaptations and vulnerabilities. Part B. Regional aspects*. Barros, V & Field CB (eds). Cambridge University Press, 688.

Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation*, 1, 43-85.

Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. 1981. Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resources Res.* 17, 1133-1138.

Jones, H.G. 1990. Physiological aspects of the control of water status in horticultural crops. *HortScience*, 25, 19-26

Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods, *Journal of Experimental Botany*, 55, 2427–2436.

Jones, H.G. 2014 Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods', *J. Exp. Bot.* 55, 2427–2436.

Klein, I, Esparza, G., Weinbaum, S.A., Dejong, T.M. 2001. Effects of irrigation deprivation during the harvest period on leaf persistence and function in mature almond trees. *Tree Physiol.* 21, 1063-1072

Klepper, B., Browing, U.D., Taylor, H.M. 1971. Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, 48, 683-685.

Knipling, E.B. 1967. Effect of leaf aging on water deficit-water potential relationships of dogwood leaves growing in two environments. *Physiologia Plantarum*, 20, 65-72.

Lampinen, B., Shackel, K.A., Southwick, S. y Olson, W. 2001. Deficit irrigation strategies using midday stem water potential in prune. *Irrigation Science*, 20, 47-54.

Leinonen, I., Jones, H.G. 2004. Combining thermal and visible imagery for estimating canopy temperature and identifying plant stress. *Journal of Experimental Botany*, 55:401, 1423-1431.

Leverenz, J., Deans, J.D., Ford, E.D., Jarvis, P.G., Milne, R., Whitehead, D. 1982. Systematic spatial variation of stomatal conductance in a sitka spruce plantation. *Journal of Applied Ecology*, 19, 835-851.

Lima, R.S.N., García-Tejero, I. F., Lopes, T.S., Costa, J.M., Vaz, M., Durán-Zuazo, V.H., Chaves, M., Glenn, D.M., Campostrini, E. 2016. Linking thermal imaging to physiological indicators in *Carica papaya* L. under different watering regimes. *Agricultural Water Management* 164, 148–157

López-Ritas, J. 1972. El almendro y su cultivo. Ministerio de Agricultura, 313.

Mañas, F., López-Fuster, P., López-Urrea, R. 2014. Effects of different regulated and sustained deficit irrigation strategies in almond production, *Acta Horticulturae*, 1028, 391-394.

Martin, G.C., Kester, D. 1978. Almond growth and development. En: *Almond orchard management*. Micke, W. y Kester, D., (ed.). California: División of Agricultural Science. University of California, 46-51.

McCutchan, H., Shackel, K.A. 1992. Stem-water Potential as a Sensitive Indicator of Water Stress in Prune Trees (*Prunus domestica* L. cv. French), *Journal of American Society of Horticultural Science*, 117, 607–611.

Mirás-Avalos J. M., Pérez-Sarmiento F., Alcobendas R., Alarcón J. J., Mounzer O., Nicolás E. 2016. Using midday stem water potential for scheduling deficit irrigation in mid-late maturing peach trees under Mediterranean conditions. *Irrig. Sci.* 34, 161–173. 10.1007/s00271-016-0493-9

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. En: *Proceedings of the 19th Symposium, Society of Experimental Biology*. London: Cambridge University Press, 205-234.

Monteith, J.L. 1973. Principles of environmental physics. En: *Contemporary Biology*. Arnold, E. (ed.), 241.

Nanos, G.D., Kazantzis, L., Kefalas, P., Petrakis, C., Stavroulakis, G.G. 2002. Irrigation and harvest time affect almond kernel quality and composition. *Scientia Horticulturae*, 96, 249-256.

Nortes, P., González-Real, M.M., Egea, G., Baille, A. 2009. Seasonal effects of deficit irrigation on leaf photosynthesis traits of fruiting and non-fruiting shoots in almond trees, *Tree Physiology*, 29, 375-388.

Nortes, P.A., Pérez, P.A., Egea, G., Conejero, W., Domingo, R. 2005. Comparison of changes in stem diameter and water potential values for detecting water stress in young almond trees. *Agric Water Manage*, 7, 296–307. doi:10.1016/j.agwat.2004.09.034.

Paz, V., Pedro, S., TEodoro, R. E F., Mendonça, F. C. 2000. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online], 4:3, 465-473. ISSN 1415-4366.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 193, 120-148.

Peretz, J., Evans, R.G., Proebsting, E.L. 1984. Leaf water potentials for management of high-frequency irrigation on apples. *Transactions of the Asae*, 27, 437-442.

Pospisilova, J., Santrucek, J. 1994. Stomatal patchiness. *Biologia Plantarum*, 36, 481-510.

Pou, A., Diago, M.P., Medrano, H., Baluja, J., Tardaguila, J. 2014. Validation of thermal indices for water stress status identification in grapevine. *Agric. Water Manage.* 134, 60-72.

Puerto, P., Domingo, R., Torres, R., Pérez-Pastor, A., García, R.M. 2013. Remote management of deficit irrigation in almond trees based on maximum daily trunk shrinkage. *Water relations and yield. Agric Water Manage*, 126, 33–45. doi:10.1016/j.agwat.2013.04.013

Romero, P., Botía, P., García, F. 2004. Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. *Plant and Soil*, 260, 169–181. doi:10.1023/B:PLSO.0000030193.23588.99

Romero, P., García, J., Botía, P. 2006. Cost–benefit analysis of a regulated deficit-irrigated almond orchard under subsurface drip irrigation conditions in Southeastern Spain, *Irrigation Science*, 24, 175–184.

Rouhi V., Samson R., Lemeur R., Damme P.V. 2007. Photosynthetic gas exchange characteristics in three different almond species during drought stress and subsequent recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 59, 117–129.

Sampaio, E. V. S. B. 1995. Overview of the Brazilian caatinga. In: Bullock, S. H.; Mooney, H. A.; Medina, E. (Ed.). *Seasonally dry tropical forest*. Cambridge: Cambridge University Press, 35-63.

Sánchez-Bel, P., Egea, I., Martínez-Madrid, M.C., Flores, B., Romojaro, F. 2008. Influence of irrigation and organic/inorganic fertilization on chemical quality of almond (*Prunus amygdalus* cv Guara), *Journal of Agricultural and Food chemistry*, 56, 10056-10062

Savé, R., Herralde, F., Aranda, X., Pla, E., Pascual, D., Funes, I., Biel, C. 2012. Potential changes in irrigation requirements and phenology of maize, apple trees and alfalfa under global change conditions in Fluvia watershed during XXI st century: results from a modeling approximation to watershed-level water balance', *Agricultural Water Management*, 114, 78-87.

Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D., Hemingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148, 339-346.

Shackel, K. 2011. A plant-based approach to deficit irrigation in trees and vines, *HortScience* 46, 173–177.

Shackel, K.A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., Hasey, J., Kester, D., Krueger, B., Lampinen, B., McGourty, G., Micke, W., Mitcham, E., Olson, B., Pelletrau, K., Philips, H., Ramos, D., Schwankl, L., Sibbett, S., Snyder, R., Southwick, S., Stevenson, M., Thorpe, M., Weinbaum, S., Yeager, J. 1997. Plant Water Status as an Index of Irrigation Need in Deciduous Fruit Tree, *Horttechnology*, 7, 23–29.

Slatyer, RO. 1967. *Plant water relationships*. London and New York: Academic Press.

Spinelli, G.M., Snyder, R.L., Sanden, B.L., Shackel, K.A. 2016. Water stress causes stomatal closure but does not reduce canopy evapotranspiration in almond. *Agric Water Manage*, 168, 11-22.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I., Murphy, A. 2017. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 888.

Testi, L., Goldhamer, D.A., Iniesta, F., Salinas, M. 2008. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrig Sci*. 26, 395-405

Torrecillas, A., Alarcón, J.J., Domingo, R., Planes, J., Sánchez-Blanco, M.J. 1996. Strategies for drought resistance in leaves of two almond cultivars, *Plant Science*, 118, 135–143.

Torrecillas, A., Galego, R., Pérez-Pastor, A., Ruiz-Sánchez, M.C. 1999. Gas exchange and water relations of young apricot plants under drought conditions. *Journal of Agricultural Science*, 132, 445-452.

Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C., León, A., Del Amor, F. 1989. The response of young almond trees to different drip-irrigated conditions - development and yield. *Journal of Horticultural Science*, 64, 1-7.

Torrecillas, A., Ruiz-Sánchez, M.C., León, A., García, A.L. 1988. Stomatal response to leaf water potential in almond trees under drip irrigated and non irrigated conditions. *Plant and Soil*, 112, 151-153.

Trnka, M., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rötter, R., Iglesias, A., Orlandini, S., Dubrovský, M., Hlavinka, P., Balek, J., Eckersten, H., Cloppet, E., Calanca, P., Gobin, A, Vučetić, V., Nejedlik, P., Kumar, S., Lalic, B., Mestre, A., Rossi, F., Kozyra, J., Alexandrov, V., Semerádová, D., & Žalud, Z. 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change, *Global Change Biology*, 17, 2298-2318.

Trnka, M., Eitzinger, J., Hlavinka, P., Dubrovska, M., Semerádová, D., Átapanek, P., Thaler, S., Ásalud, Z., Molna, M., Formayer H. 2009. Climate-driven changes of production regions in Central Europe. *Plant and Soil*, 521, 257-266.

UNESCO. 2016 Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016 - Água e Emprego Fatos e números. Perugia/Itália: UNESCO no Brasil (em Brasília) / Agência Nacional das Águas (ANA) do Brasil, 12.

Wartinger, A., Heilmeyer, H., Hartung, W., Schulze, E.D., 1990. Daily and seasonal courses of leaf conductance and abscisic acid in the xylem sap of almond trees (*Prunus dulcis* (Miller) D.A.Webb) under desert conditions. *New Phytologist*. 116, 581–587

Williams, M., Rastetter, E.B., Fernandes, D.N., Goulden, M.L., Wofsy S.C., Shaver G.R., Melillo J.M., Munger J.W., Fan S.M. y Nadelhoffer K.J. 1996. Modelling the soil-

plant-atmosphere continuum in a Quercus-Acer stand at Harvard forest: The regulation of stomatal conductance by light, nitrogen and soil/plant hydraulic properties. *Plant Cell and Environment*, 19, 911-927.

Winkel, T., Rambal, S. 1993. Influence of water-stress on grapevines growing in the field - from leaf to whole-plant response. *Australian Journal of Plant Physiology*, 20, 143-157.

Wong S.C., Cowan, I.R., Farquhar, G.D. 1985. Leaf Conductance in Relation to Rate of CO₂ Assimilation. 3. Influences of Water-Stress and Photoinhibition. *Plant Physiology*, 78, 830-834