

Avaliação do Coeficiente Cultural pelo Método do Balanço Hídrico

Estudo em cultura do tomate no Vale do Tejo

Maria Catarina Ataíde Afra Rosa

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Agronómica

Orientador: Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira

Júri:

Presidente: Doutor José Luís Monteiro Teixeira, Professor Associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa

Vogais: Doutora Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira, Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa, orientadora;

Doutor João Rui Rolim Fernandes Machado Lopes, Professor Auxiliar Convidado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus por todas as oportunidades que me deu, ao longo da minha vida.

Gostaria de agradecer à minha família, aos meus irmãos, avó, à Sofia e, principalmente, aos meus pais, que sempre me incentivaram a dar o melhor de mim, em todas as coisas que faço, e por me terem ajudado naquilo que podiam, sempre que podiam.

Agradeço à Prof.^a Dr.^a Maria Isabel Ferreira, por todo o apoio e orientação nesta dissertação, por ter proposto soluções em todos os problemas, e por ter despertado o desejo de tornar este trabalho interessante, estimulante e cativante. Agradeço também ao Senhor Professor Nuno Cortez por todos os esclarecimentos que me permitiram realizar o meu trabalho e ensaios de campo.

Agradeço ao Senhor Engenheiro Pedro Pinho por se ter disponibilizado de todas as formas para ajudarem, de forma especial agradeço ao Senhor Engenheiro António Wemans, pela sua incansável preocupação e dedicação, durante muitos meses de trabalho prático.

Não posso deixar de agradecer à técnica Raquel Costa, da empresa Hidrosoph que incansavelmente respondeu a todas as minhas questões.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos do ISA que me ajudaram e acompanharam nestes últimos anos, que me levaram a este último trabalho, principalmente ao António, à Mariana e ao Guilherme.

RESUMO

Com o aumento da população e as alterações climáticas, a tendência é que a competição pela água aumente. Sendo a região do Vale do Tejo, em Portugal, uma região de clima mediterrânico, de Verão quente e seco, torna-se indispensável regar culturas hortícolas como é o caso da cultura do tomate de indústria, *Lycopersicon esculentum*, regada pelo sistema de rega gota-a-gota. O objectivo deste trabalho foi estimar em quatro locais de uma exploração, o teor de água no solo pelo método do balanço hídrico, comparando esses valores e os fornecidos por uma empresa de gestão de rega com os medidos em campo pelo método gravimétrico, na tentativa de, no final, poder ajustar o parâmetro coeficiente cultural simples. Foi ainda submetida uma pequena parte da parcela a um ciclo de stress durante nove dias para avaliar a resposta da cultura ao stress hídrico, e modelar o coeficiente de stress tendo em conta estudos feitos para a mesma região. Esse coeficiente permitiu prever uma maior profundidade radicular que a assumida. Os valores de teor de água no solo fornecidos pela empresa, diferiram muito entre si, não podendo ser utilizados para o balanço hídrico, apenas para estudo da dinâmica da água no solo. Os valores do teor de água no solo medidos permitiram observar que este se encontrava normalmente, e sem grandes variações sazonais, acima da capacidade de campo. Observou-se, pela comparação dos valores medidos de teor de água no solo com os valores obtidos pelo método do balanço hídrico, modelado para dois valores do coeficiente cultural, K_{c1} , segundo Allen et al. (1998) e K_{c2} , segundo Ferreira Gama (1987), que a aproximação foi maior utilizando o coeficiente cultural mais baixo obtido para a região estudada, K_{c2} . Porém a incerteza da variável drenagem não permitiu tirar conclusões seguras para o ajustamento do coeficiente cultural.

Palavras chave: Evapotranspiração; *Lycopersicon esculentum*; Rega; Eficiência.

ABSTRACT

With the increasing population and climate change it is expected the competition for water to increase. Since the region of Vale do Tejo in Portugal has Mediterranean climate, with hot and dry summers, it becomes necessary to irrigate vegetable crops such as the industrial tomato crop, *Lycopersicon esculentum*, irrigated by a drip system, in this study. The main purpose of this study was to estimate the soil water content by the method of the soil water balance in four places of a plot and compare these values with those measured in the field and the ones provided by a private service giving support to irrigation management, in the attempt to adjust the single crop coefficient parameter. A small part of the plot was submitted to a nine-day stress cycle, with the aim of evaluating the crop response to water stress, and model the stress coefficient, considering studies made for the same region. The modeled stress coefficient allowed to predict a deeper root system than the one first assumed. The values of the soil water status provided by the service differed greatly among themselves and could not be used for the soil water balance, but the soil water dynamics. The soil water content observed had little seasonal variability and was usually above water content at field capacity. By comparing these measured values with the ones modeled for two values of the crop coefficient, K_{c1} , according to Allen et al. (1998) and K_{c2} , as measured by Ferreira Gama (1987), the approximation was greater for the crop coefficient adjusted for the region, K_{c2} . However, due to excessive drainage, the uncertainty of this variable did not allow drawing reliable conclusions for the adjustment of the crop coefficient.

Keywords: Evapotranspiration; *Lycopersicon esculentum*; Irrigation; Efficiency.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
Lista de Quadros	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Símbolos e Abreviaturas	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância da água na Agricultura	1
1.2. A rega e a rega na Agricultura Portuguesa	1
1.2.1. O Regadio em Portugal Continental	2
1.2.2. Contexto climático de Portugal e situações de escassez	3
1.2.3. Metodologia adotada	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Planeamento e gestão da rega	6
2.2. A sustentabilidade na Agricultura e o uso eficiente da rega	7
2.2.1. A medida 7.5.	8
2.3. A escolha da cultura do tomate e a sua importância sócio-económica em Portugal	9
2.4. Breve introdução às necessidades hídricas da cultura do tomate	12
2.5. O sistema de rega utilizado na cultura do tomate	14
2.6. A rega nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura do tomate	15
2.7. Evapotranspiração	16
2.7.1. A evapotranspiração de referência	17
2.7.2. A evapotranspiração cultural	21
2.8. Balanço hídrico no solo	23
2.9. Avaliação do estado hídrico da planta	24
2.10. Bases biofísicas para a programação da rega	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1. Caracterização do local de estudo	29
3.1.1. Localização geográfica	29
3.1.2. Caracterização dos solos	29
3.1.3. Caracterização da cultura	30
3.1.4. Caracterização do clima	31
3.1.4.1. Precipitação e temperatura	32

3.1.4.2. Humidade do ar	33
3.2. Calendarização de trabalhos	34
3.3. Medições	35
3.3.1. Medição do estado hídrico do solo	35
3.3.2. Dotações de rega	37
3.3.3. Determinação da massa volúmica aparente do solo	38
3.3.4. Determinação da capacidade de campo	39
3.3.5. Distribuição espacial das raízes no solo	40
3.3.6. Ciclo de stress – indicadores de estado hídrico e coeficiente de stress	42
3.3.6.1. Medição do estado hídrico do solo	43
3.3.6.2. Medições do potencial foliar e do ramo	43
3.3.6.3. Medição da condutância estomática	45
3.3.6.4. Estimar o coeficiente de stress K_s	45
3.4. A equação de Penman-Monteith para determinar ET_o	46
3.5. Balanço hídrico no solo	46
3.5.1. ET_c estimada	46
3.7. Delineamento experimental	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1. Massa volúmica aparente do solo	48
4.2. Capacidade de campo	48
4.3. Estado hídrico do solo	49
4.4. Dotações de rega	50
4.5. Distribuição espacial das raízes no solo	52
4.6. Ciclo de stress – indicadores de estado hídrico e coeficiente de stress	54
4.6.1. Estado hídrico do solo durante o ciclo de stress	55
4.6.2. Potencial foliar e do ramo	56
4.6.3. Condutância estomática	58
4.6.4. Modelação do coeficiente de stress	58
4.7. Balanço hídrico no solo durante o ciclo vegetativo	60
4.7.1. ET_o diário	60
4.7.2. Ajustamento do coeficiente cultural, K_c	64
5. CONCLUSÕES	65
BIBLIOGRAFIA	67

ANEXOS	71
Anexo 1 - Valores médios do teor de água no solo registados pela sonda S113, no local 2 (a), pela sonda S114, no local 5 (b), pela sonda S110, local 6-1 (c) e pela sonda Apave S02, no local 6-2 (d).	71
Anexo 2 – Valores medidos para o teor de água no solo para o local 2, 5, 6-1 e 6-2 às profundidades 0-15 cm, 15-25 cm, 25-35 cm e 35-45 cm.	72
Anexo 3 – Resultados do cálculo de ET_o pelo método modificado de Penman Monteith	73
Anexo 4 – Parâmetros usados para o cálculo de ET_o pela equação modificada de Penman-Monteith	74
Anexo 5 - Parâmetros utilizados para o método no balanço hídrico do solo	75
Anexo 6 - Valores medidos para o teor de água no solo para as plantas em stress e em conforto às profundidades 0-15 cm, 15-25 cm, 25-35 cm e 35-45 cm	76
Anexo 7 – Cálculo do coeficiente de stress e da percentagem de reserva útil do solo	77
Anexo 8 - Medições do potencial hídrico no ramo e na folha medidos em tomate em stress e em conforto	78

Lista de Quadros

Quadro 1 – Superfície irrigável e regada em Portugal Continental em 2016. Fonte: INE (2017)	2
Quadro 2 -Área Regada por cultura em Portugal Continental em 2009. Fonte: INE (2011) ..	13
Quadro 3 - Informações e parâmetros relativos à cultura do tomate necessárias à avaliação das necessidades de água. Fonte: Allen et al. (1998). ..	22
Quadro 4 - Calendarização dos trabalhos realizados.	34
Quadro 5 - Localização no espaço da recolha de seis amostras de raízes no solo no Tomateiro 1 e sete amostras de raízes no Tomateiro 2.....	41
Quadro 6 - Recolha de amostras para posterior medição do potencial hídrico em tomate regado e em tomate submetido a stress hídrico	44
Quadro 7 - Resultados da determinação da massa volúmica aparente dos solos do local de estudo	48
Quadro 8 - Resultados da determinação da capacidade de campo dos solos do local de estudo, com base na recolha de quatro amostras	48
Quadro 9 - Percentagem da massa radicular de cada amostra face à massa total radicular recolhida em cada tomateiro, nos diversos pontos de recolha.....	52
Quadro 10 - Resultados das condutâncias registadas no porómetro LI-1600 em tomateiros sob stress (n=7) e em conforto (n=6), no dia 19 de Julho de 2017, oitavo dia do ciclo de stress.	58

Lista de Figuras

Figura 1 – Precipitação Média Acumulada anual entre o período 1971-2000 em Portugal Continental. Fonte: Portal do Clima (2017).....	4
Figura 2 - Precipitação mensal média no período de 1971-2000 em Portugal Continental. Fonte: Portal do Clima (2017).....	4
Figura 3 - Área de tomate para Indústria (em Portugal). Fonte: INE (2016).....	10
Figura 4 - Produção de tomate para indústria (em Portugal). Fonte: INE (2016).	11
Figura 5 - Principais regiões produtoras de tomate de Indústria em Portugal. Fonte: Silva (2016).....	11
Figura 6 - Partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração (em percentagem) ao longo do período de desenvolvimento de uma cultura anual, desde a sementeira à colheita, variando com o índice de área foliar (IAF). Adaptado: Allen et. al (1998)	17
Figura 7 - Evolução do coeficiente cultural (K_c) de uma cultura ao longo do tempo e do desenvolvimento vegetativo das plantas, da sementeira à colheita. Destacam-se três fases nos valores de K_c , $K_{c\text{ ini}}$ (inicial), $K_{c\text{ med}}$ (médio) e $K_{c\text{ final}}$ (final). Adaptado: Allen et al. (1998).22	22
Figura 8 - Balanço hídrico no solo na zona radicular. Fonte: Allen et. al (1998)	23
Figura 9 - Comportamento da água no solo, em diferentes tipos de solos.....	27
Figura 10 - Características típicas da água no solo em diferentes tipos de solo. Fonte: Allen et al. (1998).....	28
Figura 11 - Herdade Ramadão das Ovelhas, em Muge, Salvaterra de Magos. Adaptado: Google Instituto Geográfico Nacional (2017)	29
Figura 12 - Classificação da textura dos solos do local 2 (a), local 5 (b) e local 6 (c) segundo a classificação USDA. Fonte: Laboratório Agrama, S.L. (2017).....	30
Figura 13 - Esquema do compasso das plantas de tomateiro na exploração Ramadão das Ovelhas na Campanha de 2017.	31
Figura 14 - Climograma com histórico de 30 anos de precipitação e temperatura médias (1981 a 2010) da estação meteorológica de Santarém (IPMA, 2018), e dados para o ano de estudo de 2017, da precipitação mensal da estação meteorológica de Santarém (IPMA, 2018) e temperatura média da estação meteorológica da Barragem de Magos (SNIRH, 2018).	32
Figura 15 - Valores médios anuais de humidade relativa da estação meteorológica de Santarém (IPMA, 2018), referentes ao período de 1987/1988 a 2016/2017 e do ano 2017 da estação meteorológica da Barragem de Magos (SNIRH, 2018).	33
Figura 16 - Distribuição e localização das sondas de solo pela área de estudo. Adaptado: Google Maps (2017).....	36
Figura 17 - Secagem em estufa e pesagem de pesa-filtros com amostras de solo para cálculo do teor de água no solo.....	36
Figura 18 - Gráfico da plataforma Irristrat™, que demonstra as diferentes dotações ao longo do tempo.	38
Figura 19 - Recolha de amostras para futura medição do solo pelo método do cilindro de volume conhecido, no local do ensaio.	39
Figura 20 - Ensaio de medição da capacidade de campo - limpeza da vegetação prévia ao encharcamento.....	39
Figura 21 - Ensaio de medição da capacidade de campo - encharcamento e isolamento do local.....	40
Figura 22 - Solo arenoso que foi objeto de estudo para a determinação da capacidade de campo, um dia depois de encharcado. Amostras recolhidas nas zonas numeradas a vermelho.	40
Figura 23 - Amostras de raízes retiradas do local em estudo, selecionadas para pesagem. 42	42

Figura 24 - Representação do ensaio de Stress Hídrico efetuado sobre 3 linhas de tomateiros em Salvaterra.....	42
Figura 25 - Teor de água no solo médio para cada profundidade de recolha, no local 2 (a), local 5 (b), local 6-1 (c) e local 6-2 (d) ao longo do período de estudo, de 29 de Maio de 2017 a 20 de Julho de 2017. Cada ponto corresponde à média de três repetições.....	50
Figura 26 - Dotação diária nos locais: 2, 5, 6-1 e 6-2.	51
Figura 27 - Valores médios de dotação diária (n=4) e média ondulante (n=11) dos locais 2, 5, 6-1, 6-2.....	51
Figura 28 - Distribuição espacial das raízes no solo.....	52
Figura 29 - Percentagem das amostras recolhidas no sistema radicular a x:0-10 cm (a), x:10-20 cm (b), x:20-30 cm (c), x:30-40 cm (d), x:40-50 cm (e).	54
Figura 30 - Fotografias tirada a 14-07-2017, no 3º dia do ciclo de stress (a) e no dia 17-07-2017, no 6º dia do ciclo de stress (b), numa linha de 3 metros sob stress durante 9 dias, em Muge, Salvaterra de Magos.....	55
Figura 31 - Teor de água no solo médio, para cada profundidade de recolha, durante o período do ciclo de stress, e comparação com o teor de água no solo médio para cada profundidade, medido em conforto hídrico.	56
Figura 32 - Comparação do potencial hídrico médio (n=2) medido nos dias 19 e 20 de Julho de 2017, na folha e no ramo, em tomateiros em conforto hídrico vs tomateiros em stress. ..	56
Figura 33 - Percentagem da reserva útil disponível nas profundidades 0-25 cm (a) e 25-45 cm (b) no período de 8 a 20 de Julho de 2017 (os valores de 8 a 11 de Julho são estimados por extrapolação, ver texto).	57
Figura 34 - Valores de Ks obtidos pelas equações apresentadas para as várias percentagens da reserva útil disponível até 45 cm de profundidade, para o período de 8 a 20 de Julho na parcela submetida a stress hídrico.	59
Figura 35 - Comparação dos dados meteorológicos para as variáveis utilizadas na estimativa de ETo, temperatura média diária (a), humidade do ar média diária (b), velocidade do vento (c) e radiação solar diária (d) entre os dados da rede do SNIRH e os dados da empresa de rega, Hidrosoph, para o período de 29 de Maio a 17 de Julho.	61
Figura 36 - Valores da evapotranspiração de referência, obtidos pela equação de Penman-Monteith para o período de estudo de 29 de Maio de 2017 a 20 de Julho de 2017.....	62
Figura 37 - Comparação dos cenários de ET _c , para os dois valores de K _c , K _{c1} e K _{c2} , e da dotação de rega, para o período de 29 de Maio a 20 de Julho de 2017.	62
Figura 38 - Comparação entre o teor de água médio medido nos locais 2, 5 6-1 e 6-2 e o teor de água 1 e teor de água 2, estimado pelo método do balanço hídrico, tendo em conta K _{c1} =1,15 e K _{c2} = 0,90, para o período de estudo de 29 de Maio de 2017 a 20 de Julho de 2017.	63
Figura 39 - Valores estimados para a drenagem, tendo em conta K _{c1} =1,15 e K _{c2} =0,90, para o período de estudo de 1 de Junho de 2017 a 20 de Julho de 2017.	64

Lista de Símbolos e Abreviaturas

a	albedo [0,23]
AC	ascensão capilar no solo [mm dia ⁻¹]
atm	unidade atmosfera [101 325 Pa]
A _z	armazenamento da água no solo [mm dia ⁻¹]
CC	capacidade de campo
CE	coeficiente de emurchecimento
cp	capacidade térmica a pressão constante [MJ kg ⁻¹ °C ⁻¹]
d _{ap}	densidade aparente do solo
DP	percolação profunda [mm dia ⁻¹]
Dpl	depleção de água no solo [mm]
DGADR	Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural
d _r	distância relativa da terra ao sol
e _a	pressão de vapor atual do ar [kPa]
e _s	pressão de vapor de saturação [kPa]
es-ea	pressão do deficit de pressão do ar [kPa]
ET	evapotranspiração [mm dia ⁻¹]
ET _a	Evapotranspiração actual [mm dia ⁻¹]
ET _c	evapotranspiração cultural [mm dia ⁻¹]
ET _o	evapotranspiração de referência [mm dia ⁻¹]
FAO 56	FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56
g	aceleração gravítica [9,8 m s ⁻²]
G	fluxo de calor para o solo [MJ m ⁻² dia ⁻¹]
G _{sc}	constante solar [0,0820 MJm ⁻² min ⁻¹]
g _s	condutância estomática [mmol m ⁻² s ⁻¹]
ha	hectare [10 000 m ²]
HR	humidade relativa [%]
I	dotação de rega [mm dia ⁻¹]
IAF	índice de área foliar [m ² (área foliar) m ⁻² (superfície do solo)]
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
INE	Instituto Nacional de Estatística
J	dia juliano
K _c	coeficiente cultural
K _{CB}	coeficiente cultural basal
K _{c ini}	coeficiente cultural inicial

$K_{c\ mid}$	coeficiente cultural médio
$K_{c\ fin}$	coeficiente cultural final
$K_{CB} + K_e$	coeficiente cultural dual
K_e	coeficiente de evaporação do solo
K_s	coeficiente de stress
L_{rfu}	Limite da reserva facilmente utilizável [mm]
M_{ag}	massa de água perdida por secagem em estufa a 105° C [g]
M_s	massa de solo seco em estufa a 105° C [g]
$M_{v_{ap}}$	massa volúmica aparente do solo [g cm ⁻³]
P	precipitação [mm dia ⁻¹]
p	défice permissível (fracção da reserva utilizável); Pressão atmosférica [kPa]
R	constante universal dos gases perfeitos (8,314 J mol ⁻¹)
R_a	radiação solar no topo da atmosfera [MJ m ⁻² dia ⁻¹]
RFU	reserva facilmente utilizável [mm]
R_n	balanço da radiação [MJ m ⁻² dia ⁻¹]
R_{nl}	balanço da radiação de longo comprimento de onda [MJ m ⁻² dia ⁻¹]
R_{ns}	balanço da radiação de curto comprimento de onda [MJ m ⁻² dia ⁻¹]
RO	escoamento superficial [mm dia ⁻¹]
R_s	radiação solar efetiva [MJ m ⁻² dia ⁻¹]
R_s/R_{so}	radiação relativa de curto comprimento de onda
R_{so}	radiação solar com céu limpo [MJ m ⁻² dia ⁻¹]
RU	reserva útil [mm]
SAU	superfície agrícola utilizável [ha]
SF	escoamento subsuperficial [mm dia ⁻¹]
SF_{in}	escoamento subsuperficial para dentro da zona radicular [mm dia ⁻¹]
SF_{out}	escoamento subsuperficial para fora da zona radicular [mm dia ⁻¹]
t	tonelada
T	temperatura [°C]
T_d	temperatura média diária [°C]
T_{max}	temperatura máxima absoluta de cada dia
T_{min}	temperatura mínima absoluta de cada dia
u_2	velocidade do vento a 2 metros de altura [m s ⁻¹]
V_{ag}	volume de água [m ³]
V_s	volume de solo [m ³]
Z_r	profundidade radicular (m)

Δ	declive da curva da pressão do vapor saturante [kPa °C ⁻¹]
ΔA_z	variação do armazenamento da água no solo [mm dia ⁻¹]
δ	declinação solar [rad]
Υ	constante psicométrica [kPa °C ⁻¹]
θ_{CC}	teor de água à capacidade de campo [m ³ água m ⁻³ solo]
θ_{CE}	teor de água no ponto de emurchecimento [m ³ água m ⁻³ solo]
θ_m	teor de água no solo [g g ⁻¹]
θ_v	teor de água no solo [m ³ m ⁻³]
θ_{vc}	teor de água observado na parcela em conforto [m ³ m ⁻³]
θ_{vs}	teor de água observado durante o ciclo de stress [m ³ m ⁻³]
λ	calor latente de evaporação [KJ kg ⁻¹]
σ	constante de Stefan Boltzmann [4,903x10 ⁻⁹ MJ K ⁻⁴ m ⁻² dia ⁻¹]
Φ	latitude do local de estudo [39,087° N]
Ψ_b	potencial de base [MPa]
Ψ_f	potencial hídrico foliar [MPa]
Ψ_s	potencial de água no solo [MPa]
ρ_a	massa volúmica do ar a pressão constante [kg m ⁻³]
ρ_{ag}	massa volúmica da água [1000 kg m ⁻³]
$\rho_{ap,s}$	massa volúmica aparente do solo [k _{gsolo} m ⁻³ _{solo}]
ω_s	ângulo ao ocaso do sol [rad]

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância da água na Agricultura

A água é o *input* de maior importância na produtividade de uma cultura, sendo um fator de competitividade determinante no sector agrícola. A gestão adequada deste escasso recurso é, assim, fator de distinção entre agricultores, tanto no que toca à diminuição dos custos da sua exploração, como, cada vez, mais na sua capacidade de lidar com as alterações meteorológicas. A necessidade desta gestão numa agricultura eficiente e sustentável é um desafio que esta e futuras gerações terão que assumir como rotina diária nas suas tomadas de decisão.

Segundo o Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral [GPP] (2014), são as atividades agrícola e florestal aquelas que, face às outras atividades económicas, são mais suscetíveis ao risco, situação esta que tem vindo a agravar-se devido às alterações meteorológicas (entre outras razões), especialmente pela ocorrência de secas e eventos meteorológicos extremos, cujo impacto cada vez mais grave prejudica o rendimento destas atividades, tanto em perdas de produtividade como em perdas por vezes totais, como é caso dos incêndios. Isto faz da água um recurso ainda mais valioso, que deverá ser bem utilizado.

1.2. A rega e a rega na Agricultura Portuguesa

A rega tem muitas funções, das quais se destaca a passagem da situação de stress para conforto hídrico, e são elas:

- humedecimento do solo;
- proteção contra geadas, baixas e altas temperaturas;
- fertilização mineral orgânica;
- veículo para tratamentos fitossanitários e aplicação de herbicidas;
- lavagem de solos halomórficos;
- controlo da temperatura foliar.

O stress hídrico aumenta em situações de menor disponibilidade hídrica, ou em culturas onde o sistema radicular tem maior dificuldade em captar a água disponível. No entanto, mesmo em culturas cujo sistema radicular permite procurar água em profundidade – como é o caso dos pomares e da vinha – verifica-se o benefício da rega, porque esta permite obter: uma regularização inter-anual da produção e/ou um aumento da mesma, possível melhoramento da qualidade do produto, maior resistência à cultura contra-ataques de doenças e pragas (deixando a planta de estar em stress, esta torna-se menos suscetível a este tipo de ataques). A necessidade de regar é ainda mais importante em culturas que necessitem de elevados

valores de temperaturas e radiação. No caso de Portugal, estas condições conseguem-se no Verão, mas, como esta altura do ano não coincide com a época de precipitação intensa, é indispensável a rega, assim como é necessária, na maioria das culturas, em zonas que registem períodos secos prolongados.

1.2.1. O Regadio em Portugal Continental

Optar pelo sistema de produção de regadio pode ou não ser uma opção para os agricultores, principalmente no que toca à disponibilidade de zonas irrigáveis (zonas que poderiam, se necessário, ser regadas, por meio de instalações adequadas e havendo disponibilidade de água) (Instituto Nacional de Estatística [INE], 2017).

De acordo com o INE (2017), em 2016, as 126,5 mil explorações que regaram, representam 48,9% do total de explorações. A superfície regada correspondeu a 13% da superfície agrícola utilizável (SAU) e a 86,5% da superfície irrigável, isto é, equipadas para a rega.

Quadro 1 – Superfície irrigável e regada em Portugal Continental em 2016. Fonte: INE (2017)

Regiões	SAU (ha)	Superfície Irrigável (ha)	Superfície regada (ha)
Norte	653 134	134 891	115 078
Centro	585 904	126 979	98 743
Lezíria Vale do Tejo	77 639	25 778	23 016
Alentejo	2 100 762	238 941	216 781
Algarve	95 570	17 158	16 690
Total	3 513 009	543 757	470 308

O regadio em Portugal Continental, segundo a Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural [DGADR] (2014), caracteriza-se do seguinte modo:

- estima-se que as disponibilidades hídricas médias em Portugal (superficiais e subterrâneas) rondem os 46 000 hm³/ano;
- a utilização média anual hídrica é de, aproximadamente, 5183 hm³, de onde o sector agrícola utiliza 4200 hm³, ou seja 80% da utilização média anual e 9% das disponibilidades médias anuais, fazendo deste sector o principal consumidor de água.

A agricultura de regadio transporta para a gestão dos recursos hídricos algumas dificuldades, das quais se destacam:

1. O facto de cerca de 56% da área de regadio em Portugal pertencer a regadios individuais e apenas 9% a regadios coletivos privados (INE,2011);
2. Relação indeterminada entre consumos e fontes de origem da água regada, e o não registo dos mesmos;
3. A atividade de regadio intensivo em zonas de elevada vulnerabilidade de aquíferos e as adubações igualmente elevadas nessas zonas;
4. As necessidades de água para rega não corresponderem às disponibilidades nos sistemas hídricos;
5. O reduzido conhecimento das dotações acertadas e do tipo de sistema mais eficiente para cada situação.

A aumento área irrigável e regada desde 2013 (INE, 2017), o facto de o sector agrícola ser aquele que detém maior peso na utilização de água e os constrangimentos que deles advêm, levantam a necessidade de adotar estratégias e comportamentos de utilização da água responsáveis, e que tenham em vista o impacto do sector no meio ambiente.

1.2.2. Contexto climático de Portugal e situações de escassez

Num país de clima mediterrânico, ou seja, de “clima temperado, com o Verão quente e seco, chuvas na estação fria e um Inverno moderado” (Instituto Português do Mar e da Atmosfera [IPMA], 2017), o conhecimento do clima e das suas variáveis é vital na gestão de uma cultura e na tomada de decisão. Portugal continental divide-se, segundo a classificação de Koppen, em duas regiões:

- **Csa**: região de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente;
- **Csb**: região de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente. (IPMA, 2017).

A aparente riqueza hídrica do nosso país, cujas disponibilidades anuais médias excedem as necessidades de água, não impede as muitas situações de escassez hídrica localizada (IPMA, 2017).

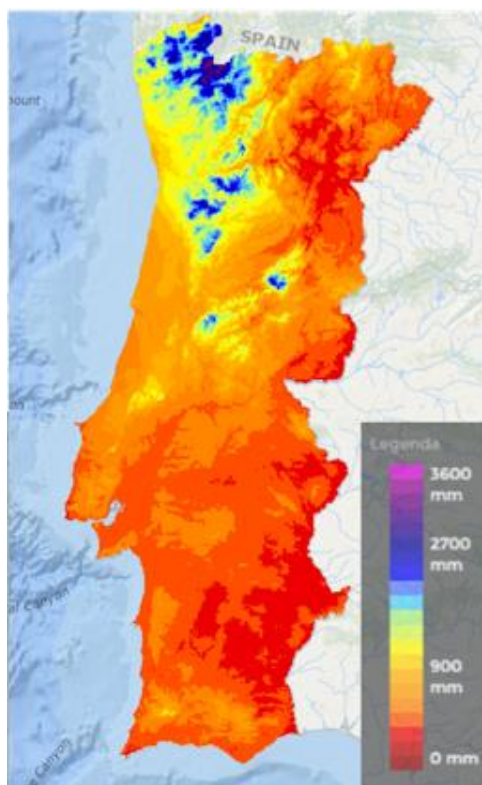


Figura 1 – Precipitação Média Acumulada anual entre o período 1971-2000 em Portugal Continental. Fonte: Portal do Clima (2017)

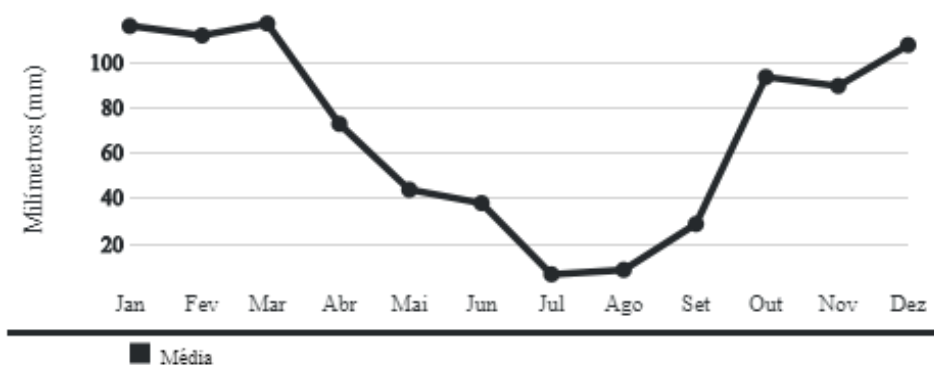


Figura 2 - Precipitação mensal média no período de 1971-2000 em Portugal Continental. Fonte: Portal do Clima (2017)

Verificamos, ao observar a Figura 1, que existe uma grande variabilidade espacial no que toca à precipitação média anual acumulada e, na Figura 2, que esta variação é também temporal, resultando também ser nas zonas onde a precipitação é mais baixa que a evapotranspiração é mais alta (IPMA, 2017).

1.2.3. Metodologia adotada

Por ser uma das culturas hortícolas com maior importância a nível mundial, e a principal cultura horto-industrial em Portugal (Almeida, 2006), onde a rega tem um peso importante nos custos de produção, escolhi o tomate de indústria como objeto de estudo na minha dissertação.

O objetivo deste trabalho foi comparar valores de teor de água no solo, em quatro locais, medidos no campo, através do método gravimétrico, com os valores estimados pelo método do balanço hídrico, na tentativa de avaliar e ajustar o parâmetro coeficiente cultural simples da cultura em questão.

Tendo por propósito avaliar a resposta da cultura ao stress hídrico, e analisar resultados do coeficiente de stress em relação a valores modelados (tendo em conta estudos feitos para a mesma região), foi ainda submetida uma parte da parcela a um ciclo de stress de nove dias.

Ao longo deste trabalho, a metodologia adotada de modo a atingir os objetivos propostos, foi:

- a) estimativa da evapotranspiração cultural tendo em conta variáveis meteorológicas, e coeficientes culturais estudados para a cultura, de modo a poder estimar o teor de água no solo pelo método do balanço hídrico;
- b) medição do teor de água no solo, durante a campanha em diferentes locais da exploração;
- c) comparação das duas séries de valores estimados e medidos entre si, e compará-las, ainda, se possível, com a dinâmica do solo analisada por quatro sondas de solo de uma empresa de rega;
- d) ajuste dos parâmetros da estimativa (neste caso apenas se abordou o coeficiente cultural).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Planeamento e gestão da rega

Sendo as perdas de eficiência no uso dos fatores de produção agrícola, um dos principais fatores que levaram ao decréscimo do produto agrícola bruto português desde os anos 90, podemos verificar que é imperioso a adoção de soluções que visem melhorar o recurso a inputs agrícolas como a água, energia, químicos, entre outros. (Avillez, 2014).

Uma rega adequada deve responder às questões: “*Quanto devo regar?*”, “*Quando?*”, “*Porquê?*” e “*Como?*”, sendo que neste trabalho me debruçarei, mais especificamente, na questão de “*Quanto devo regar?*”. Segundo Ferreira Gama (1987):

1. Quanto devo regar, isto é, qual a quantidade de água a aplicar? É necessário conhecer a quantidade necessária para regar uma determinada área e a gestão dos recursos hídricos em geral.
2. Quando, inquire sobre qual o momento indicado para a rega, a partir de que ponto é que estas necessitam de ser regadas.
3. Porquê essa necessidade, porque precisa a planta de água e qual a relação entre esse facto e a diminuição de produção?
4. Como, quais as técnicas que garantem maior eficiência de aplicação, como o sistema de rega adotado (Ferreira Gama, 1987)

Os parâmetros a ter em conta para proceder ao **planeamento da rega** de uma qualquer cultura, e que ajudam a responder a estas questões, são:

- necessidades hídricas das culturas;
- as disponibilidades hídricas – que dependem da situação hídrica do país e região;
- rentabilidade económica da rega;
- taxa de infiltração, possibilidade de escoamento superficial, necessidade de lavagem de sais (Coelho, 2016).

A gestão da rega deverá ainda ter em consideração vários parâmetros, a saber:

- o ciclo da cultura e a influência do défice nos vários estados fenológicos;
- o conhecimento da capacidade de armazenamento de água dos solos;
- informação agrometeorológica e sistemas de monitorização da disponibilidade de água no solo.

Como afirmado anteriormente, algumas destas questões, designadamente o nível de stress hídrico a aplicar, deverão ser respondidas tendo em conta a situação hídrica do local. A

Agricultura Portuguesa é, no quadro dos recursos hídricos, a principal atividade consumidora, e por isso, a gestão da rega ganha importância para além da gestão da cultura e da exploração, entrando na dimensão da gestão hídrica do país. Acrescem, para a tomada de decisão aos fatores anteriormente referidos, os seguintes:

- a escassez de recursos;
- os riscos de erosão e salinização;
- a conservação da qualidade da água e a conservação do solo.

E esta gestão só é possível se o agricultor/gestor tiver um pleno conhecimento da sua exploração, da cultura e das suas necessidades.

Para o planeamento da rega, ao nível da exploração, é necessário perceber:

- as necessidades de água das culturas – recorrendo a modelos de simulação;
- o dimensionamento do sistema de rega.

Neste trabalho debruçar-nos-emos, mais especificamente, no primeiro destes pontos, isto é, nas necessidades hídricas das plantas, para manter o seu funcionamento ou para que se consiga cumprir o propósito de produção a que estão destinadas (no caso do tomate, a produção de fruto). A quantidade de água que a planta usa depende de:

- condições meteorológicas do momento;
- estado fenológico;
- área foliar (quantidade de folhas e arranjo espacial das mesmas).

Como veremos mais à frente, a rega deverá ser feita de forma eficiente, não só por representar um custo para o produtor, mas por fazer uso de um recurso valioso e limitado. O ajuste do sistema e da condução da rega à situação particular da cultura e da exploração é a chave da rega sustentável.

2.2. A sustentabilidade na Agricultura e o uso eficiente da rega

Com o crescimento da população e os impactos ambientais é provável que, no futuro, por causa da competição por este recurso, as fontes de água para a agricultura fiquem limitadas. Torna-se, por isso, prioritário usar a água de modo mais eficiente e aumentar a sua produtividade principalmente em áreas de grande uso de água para rega, como é a região mediterrânica (Paredes et al., 2018).

Define-se por eficiência do uso da água o rácio entre produção e unidade de água utilizada, isto é, aquilo que se produz por cada unidade de água que se utiliza para tal efeito (Davies et al., 2002). Assim sendo, quanto maior a quantidade de água utilizada para uma produção fixa, menor a eficiência, e quanto maior a produção para uma determinada quantidade de água

fixa utilizada, maior a eficiência. O uso eficiente da água varia bastante com as cultivares, climas e solos (Zhang et al., 2017).

A regularização da produção conseguida com a rega é decisiva para diminuir a vulnerabilidade dos sistemas de produção, já que apenas 15,4% da área é irrigável (INE, 2017).

O sector agrícola teve entre 2002 e 2009 uma redução da procura de água (de 87 para 82% do total) (DGADR, 2014). Esta deveu-se sobretudo à redução da área regada e ao aumento da eficiência do uso da água (redução das perdas devido à melhoria dos sistemas de armazenamento de transporte e distribuição – redução da ineficiência de 40 para 37,5%, devida a melhoria das práticas de rega nas explorações) (DGADR, 2014). Há que ter em conta, porém, que na ocorrência de um ano seco, a procura deste recurso para o setor vai aumentar, porque passarão, em maior ou menor número, também, a depender dele as explorações de sequeiro, que, por ausência de precipitação, poderão optar por regar.

A eficiência do uso da água depende de:

- sistema de captação e condução da água;
- sistema de distribuição;
- sistema de aplicação (método de rega);
- dotações de rega corretas e oportunas.

Segundo DGADR (2014), a eficiência global de utilização da água no regadio é de cerca de 60-65%, mas o resto da água (não utilizada, cerca de 35-40%) volta ao ecossistema sem qualquer alteração.

A adoção de um sistema de gestão da rega que rega de maneira diferente uma cultura no tempo e no espaço, conforme as suas necessidades e propriedades do solo é uma das possíveis respostas ao desafio de uma rega mais eficiente, embora a discriminação espacial fina seja muito difícil de implementar.

2.2.1. A medida 7.5.

A eficiência do uso da água não remete apenas à redução dos custos em rega por parte dos produtores, mas também à preocupação ambiental e da conservação deste recurso, do solo e dos ecossistemas que, como acima referido, intervêm na produção. Por isso, cada vez mais, são incentivadas práticas que visem a adoção de uma condução da rega das culturas que tenha em conta tudo isso.

Entre estas formas de incentivo está a medida 7.5. do PDR2020 - Programa de Desenvolvimento Rural 2014-2020 (GPP, 2014) - um programa que apoia o investimento em explorações agrícolas e florestais, em empresas agroindustriais, entre outras. Esta tem como

objetivo incentivar os agricultores na adoção de práticas que assegurem condições para um uso mais eficiente e sustentável do recurso água, dos quais destacámos (Portaria n.º 50/15, de 25 de fevereiro):

1. “Promover a adoção de práticas ambientais benéficas;
2. Melhorar a gestão da água, dos adubos e dos pesticidas;
3. Melhorar a eficiência na utilização da água pelo sector agrícola”.

A operação 7.5.1 dá um apoio anual que é atribuído por hectare de superfície agrícola de culturas temporárias (onde o tomate de indústria está incluído), frutos frescos, frutos secos, e olival que utilizem os seguintes sistemas de rega: aspersão, localizada (micro-aspersão ou gota-a-gota) ou subterrânea (GPP, 2014).

Os beneficiários do apoio previsto pelo uso eficiente da água são obrigados a:

- Manter os critérios de elegibilidade, em cada ano do compromisso, que dizem que pode beneficiar do apoio 7.5. quem, numa superfície irrigada mínima de 1 ha, utilize um sistema de rega por aspersão, localizada ou subterrânea, e quem tenha um contador que afira consumo efetivo de água nessa superfície.
- “Monitorizar a quantidade de água consumida na área irrigada, que permite evidenciar uma poupança mínima de 7,5% nos consumos anuais de rega face à situação de referência definida em tabela de dotações de rega” (Portaria n.º 50/15, de 25 de fevereiro).

2.3. A escolha da cultura do tomate e a sua importância sócio-económica em Portugal

O tomate, (*Lycopersicon esculentum*), é uma cultura da família das Solanáceas, família de plantas hortícolas de maior importância a nível mundial (Coelho, 2016). As principais regiões produtoras de tomate são de clima mediterrânico e de savana tropical (Almeida, 2006).

Esta é uma cultura de estação quente, mesotérmica, prefere temperaturas altas, mas é sensível à geada. A taxa de crescimento diminui para temperaturas inferiores a 16°C, e a síntese do licopeno e a qualidade do fruto são prejudicadas a temperaturas acima de 30°C (as temperaturas ótimas para a maturação do fruto estão entre os 15 e 22°C). Humidades relativas muito elevadas (superiores a 90%) favorecem o aparecimento de doenças e a incidência de pragas. O vingamento do fruto é comprometido pela precipitação, vento e temperaturas abaixo de 10°C e acima de 32°C (Almeida, 2006).

Segundo Coelho (2016) trata-se de uma espécie pouco exigente quanto ao tipo de solos, sendo que obtém uma melhor performance em textura franco-argilosa. Não tolera o encharcamento do solo, exigindo solos bem drenados e de elevada espessura efetiva (> 70 cm), devido à sua sensibilidade à asfixia radicular. O pH ótimo está entre 5,5 e 6. O solo deve

estar isento de infestantes indesejáveis. Devem-se evitar terrenos com muitas pedras ou cascalho, porque dificultam a colheita mecânica. A sua resistência à salinidade é moderada, sendo mais sensível na germinação e fases iniciais do desenvolvimento. Os solos mais favoráveis são aqueles que têm como características:

- uniformidade;
- boa drenagem;
- bom arejamento;
- sem salinidade e sem alcalinidade;
- rico em matéria orgânica;
- profundidade.

As plantas têm um sistema radicular apumado profundo e muito desenvolvido. Cerca de 75% das raízes encontram-se nos primeiros 45 cm do solo e 90% das raízes finais nos 30 cm superficiais (Almeida, 2006) e uma grande concentração de raízes adventícias na zona superior da raiz (Ferreira Gama, 1987). Estas plantas têm, geralmente, um desenvolvimento radicular horizontal entre linhas superior ao desenvolvimento em profundidade (Portas, 1970,1973).

O tomate de indústria é a cultura horto-industrial de maior importância económica em Portugal, sendo que 95% do concentrado produzido é exportado, fazendo do nosso país o 8º produtor mundial e o 3º a nível europeu. Segundo INE (2016), tanto a superfície utilizada para a produção de tomate de indústria, como a produção têm vindo a aumentar deste 2012 (Figuras 3 e 4), tendo, em 2016 (ano marcado por chuvas prejudiciais à plantação e produção) atingido 19 479 ha e 1 598 398 t em Portugal, bastante acima da média das outras culturas hortícolas, (1389 ha e 38 989 t).

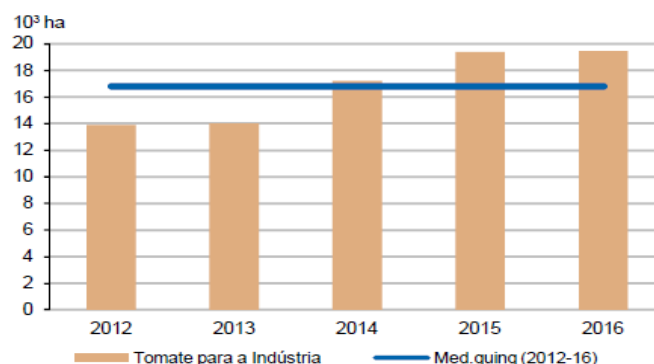


Figura 3 - Área de tomate para Indústria (em Portugal). Fonte: INE (2016).

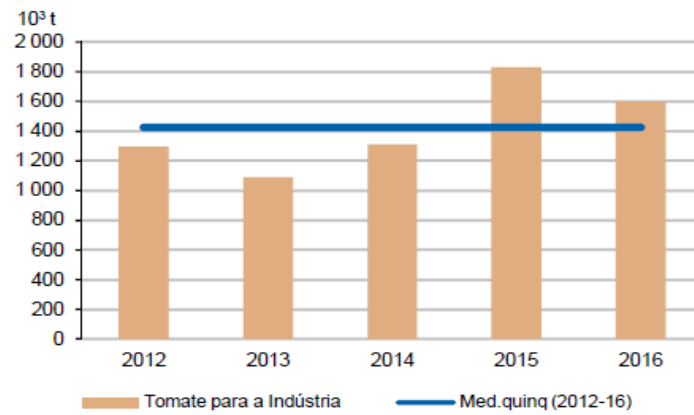


Figura 4 - Produção de tomate para indústria (em Portugal). Fonte: INE (2016).

As excelentes condições que Portugal tem para a produção desta cultura, assim como o aperfeiçoamento técnico e eficiência dos produtores que se tem vindo a verificar, levam a que se tenha conseguido um crescimento de 57% da produção da cultura do tomate de indústria, mesmo com menos de 32% dos produtores de tomate relativamente aos que existiam em 2000 (INE, 2016).

Na Figura 5 é possível observar as principais regiões portuguesas produtoras de tomate de indústria.

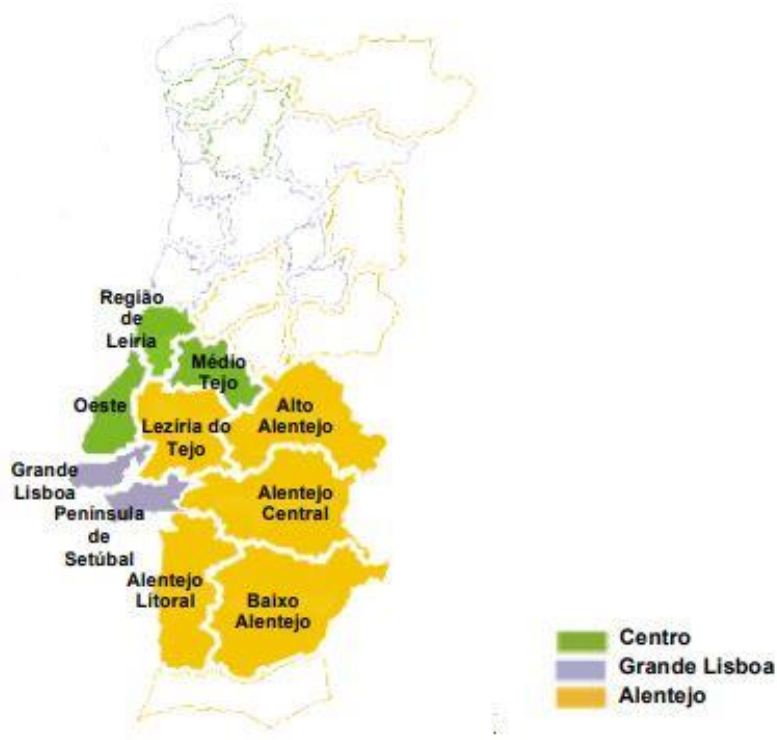


Figura 5 - Principais regiões produtoras de tomate de Indústria em Portugal. Fonte: Silva (2016)

2.4. Breve introdução às necessidades hídricas da cultura do tomate

A rega nas culturas hortícolas deve ser feita de forma racional e equilibrada porque as plantas reagem rapidamente a excessos ou défices, que levam a perdas na qualidade e produção das culturas (Almeida, 2016).

Como na maioria das plantas herbáceas, a quantidade de água que entra na planta por unidade de tempo (maioritariamente via absorção radicular da água do solo) é aproximadamente igual à taxa da transpiração (Costa, 2008).

A quantidade de água presente no solo não é igual à água do solo disponível para a planta, a água tem que ser acessível à absorção radicular. Esta vai diminuindo à medida que a planta a consome, porque os espaços intersticiais, anteriormente preenchidos pela água que a planta absorveu, se esvaziam, sendo necessário a planta usar muita energia para retirar a água retida. Em solos onde a disponibilidade de água não é um problema – solos encharcados –, a quantidade de oxigénio disponível é baixa, prejudicando, também a absorção radicular (Allen et al., 1998).

O tomate é uma das culturas cuja produção ocupa maior área regada em Portugal (Quadro 2). A necessidade de conhecer a melhor forma como esta cultura deve ser regada torna-se, portanto, relevante, ao nível de cada produtor e ao nível da competitividade do sector, sendo a água, segundo Almeida (2006) o principal fator limitante da produtividade nestas culturas. A capacidade de utilizar bem este recurso dá uma vantagem competitiva a quem a utiliza.

Quadro 2 -Área Regada por cultura em Portugal Continental em 2009. Fonte: INE (2011)

Culturas	Área (ha)
Culturas temporárias	279 345
Milho	81 217
Arroz	29 250
Trigo	5 770
Outros cereais para grão	8 416
Leguminosas para grão	3 037
Prados temporários	9 192
Culturas forrageiras	78 658
Batata	12 330
Culturas industriais	5 329
Tomate indústria	17 943
Outras hortícolas	25 818
Flores e ornamentais	1 427
Áreas de propagação	239
Outras culturas temporárias	719
Pastagens permanentes	52 033
Culturas permanentes:	137 360
Frutos frescos	23 891
Citrinos	15 146
Frutos sub-tropicais	2 595
Frutos pequenos de bagas	204
Frutos secos	2 933
Olival	65 887
Vinha	26 097
Áreas de propagação cult. lenhosas	502
Outras culturas lenhosas	105
TOTAL	468 738

A produção de tomate necessita de grande quantidade de água durante a fase d desenvolvimento da cultura (Zhang et al., 2017).

O défice hídrico, segundo Steponkus (1990) e Singh-Sangwan et al. (1994) afecta processos bioquímicos e fisiológicos na planta, e está na origem de respostas metabólicas e fisiológicas tais como:

- fecho estomático – sobretudo para plantas isohídricas como algumas variedades de tomate;

- declínio na taxa de crescimento;
- acumulação de solutos, substâncias antioxidantes e expressão de genes específicos de stress.
- diminuição do número de frutos e redução do seu peso unitário (Almeida, 2006).

O excesso de água, no final da maturação pode aumentar o rendimento, mas diminui a concentração de sólidos solúveis (necessários à qualidade do tomate).

Segundo Larcher (2006) um organismo vegetal passa pelas seguintes fases em resposta a condições de stress hídrico:

- **fase de alarme:** nesta fase a planta perde estabilidade das estruturas que mantêm as funções vitais, devido aos processos bioquímicos ligados ao mecanismo fotossintético;
- **fase de resistência:** a planta entra num processo de rusticidade, onde responde adaptando-se ao stress (por exemplo através do controlo da abertura dos estomas);
- **fase de exaustão:** esta ocorre quando a planta está em stress durante um período prolongado ou intenso, causando diminuição das suas defesas, tornando-a mais suscetível a ataques exteriores, por exemplo, de doenças e pragas.

O nível de stress pode ser quantificado recorrendo a indicadores fisiológicos, dos quais se destacam a temperatura foliar, o potencial hídrico na folha e no solo e ainda a condutância estomática (Morales, 2012).

2.5. O sistema de rega utilizado na cultura do tomate

O sistema de rega utilizado para a cultura de tomate de indústria é o sistema de rega localizada gota-a-gota. O sistema é composto, normalmente, por uma fonte de água, uma bomba de captação, elementos de filtração e elementos adutores de repartição da água (tubagem), e por rampas com gotejadores.

As vantagens deste sistema perante outros, numa cultura como o tomate de indústria, segundo Coelho (2008) traduzem-se em:

- **fácil instalação** – não são necessárias infraestruturas para a sua implementação;
- **economia e ecologia** - redução do desperdício de água, sendo por isso um sistema mais ecológico;
- **eficiência** de, aproximadamente, 90% no consumo de água – a água, por ser distribuída em pontos selecionados, torna este sistema mais eficaz em relação aos outros sistemas.

A rega gota-a-gota é uma maneira mais eficaz de disponibilizar água à planta e diminuir as perdas de água, podendo ainda aumentar a produtividade na cultura do tomate (Ozbahce e Tari, 2010).

Não sendo o sistema de rega perfeito, este pode não conseguir cumprir o seu propósito por entupimento dos gotejadores, exigindo, portanto, uma boa filtração da água.

Neste sistema de rega, na cultura do tomate de indústria, a rega deverá ser frequente e com pequenos volumes de água, porque as raízes responsáveis pelo abastecimento de água estão próximas dos gotejadores, e porque o solo explorado pelas raízes é reduzido, assim como a sua capacidade para utilizar água, mesmo em solos com maior retenção (Machado e Oliveira, 2007).

2.6. A rega nas diferentes fases de desenvolvimento da cultura do tomate

Embora seja uma cultura de elevadas necessidades hídricas, o tomate de indústria é também muito sensível a dotações mal geridas, nas suas fases de crescimento, destacando-se a floração, o vingamento e maturação, que por sua vez se traduzem em perdas de produção.

A maior necessidade em água, na planta do tomate, ocorre durante a floração e o crescimento dos frutos (Ozbahce e Tari, 2010), ao contrário da fase de maturação daqueles, onde a rega é conduzida de forma diferente, porque não interessa tanto o vigor vegetativo da planta, mas sim já a qualidade do fruto.

Segundo Srinivasa et al. (2001), uma grande heterogeneidade e variabilidade na disponibilidade de água causa distúrbios fisiológicos à planta do tomate, por stress hídrico, que, segundo Ozbahce e Tari (2010) podem causar:

- frutos rachados;
- podridão apical;
- queda de flores;
- ocorrência de frutos ocos;
- redução do vingamento dos frutos.

A todos estes pontos se pode acrescentar ainda (Almeida, 2006):

- escalonamento da maturação;
- menor resistência;
- baixo °brix.

A estas perdas acrescenta-se, aquando de uma rega inadequada, a maior incidência de doenças e pragas (Lopes et al., 2006) e o maior uso e gasto de energia. A maneira de combater estas perdas passa por uma gestão de rega que visa colmatar as necessidades da

planta, separadamente, em cada fase do desenvolvimento, com o propósito de obter um produto final de qualidade.

Segundo Coelho (2016) a interrupção da rega (cut-off) na cultura do tomate para indústria é feita durante o período de maturação, porque favorece o aumento do conteúdo de sólidos solúveis nos frutos do tomate. A resistência à deficiência hídrica, durante a maturação, não provoca quebras acentuadas na produção, mas aumenta significativamente o °brix. Assim, a estratégia para melhorar os sólidos solúveis (°brix) passa pela redução da quantidade de água aplicada durante a maturação dos frutos. Consegue-se um compromisso entre rendimento (produtividade) e qualidade do fruto com um ligeiro déficit hídrico, minimizando a quantidade de água aplicada a partir do início da maturação e antecipando a data da última rega, suspendendo a rega vários dias antes da colheita. Esta estratégia minimiza também o apodrecimento de frutos devido à menor incidência de doenças. Segundo Almeida (2006) a interrupção da rega deverá ser feita 10 a 20 dias antes da data da colheita. Embora exista um consenso quanto ao seu papel na maior produção de sólidos solúveis (Gregório, 2014), a altura em que a interrupção da rega deve ser feita não é consensual entre os autores, pois depende do tipo de solo, clima e cultivar.

2.7. Evapotranspiração

A evaporação é processo pelo qual a água no estado líquido se converte em vapor (vaporização) e se liberta da superfície evaporante. A radiação solar e o calor armazenado no ar, no coberto e suas vizinhanças são responsáveis por fornecer a energia necessária ao processo de evaporação. A força motora que retira o vapor de água da superfície evaporativa é a diferença de pressão existente entre o vapor de água dessa superfície e da atmosfera.

A transpiração é a vaporização da água que se encontra nos tecidos da planta, e que passa sob a forma de vapor para a atmosfera, através dos estomas, cuja abertura e fecho controlam este processo.

A evapotranspiração (ET) é a combinação da perda de água por evaporação pela superfície do solo e por transpiração da cultura, que ocorrem simultaneamente. A taxa de evapotranspiração é expressa para finalidades práticas em mm por unidade de tempo, normalmente por dia.

A evaporação a partir do coberto (directamente do solo ou vegetação ou pela transpiração) de uma forma geral depende da radiação solar, temperatura do ar, humidade do ar, velocidade do vento, de factores relacionados com a penetração da radiação e vento no coberto, da resistência da superfície ao transporte do vapor de água e da quantidade de água disponível na superfície do solo.

Para a elaboração deste trabalho recorri, entre outros trabalhos, à publicação da FAO 56 (Allen et al., 1998), sobre as necessidades hídricas das culturas para o tipo de região em que se inserem, que apresenta todos os conceitos práticos necessários ao cálculo destas necessidades baseando-se em estudos que permitiram definir parâmetros base para esse cálculo.

Embora a transpiração e evaporação directa ocorram simultaneamente, a partição da evapotranspiração (Figura 6) varia ao longo da fase de desenvolvimento da cultura, da seguinte forma:

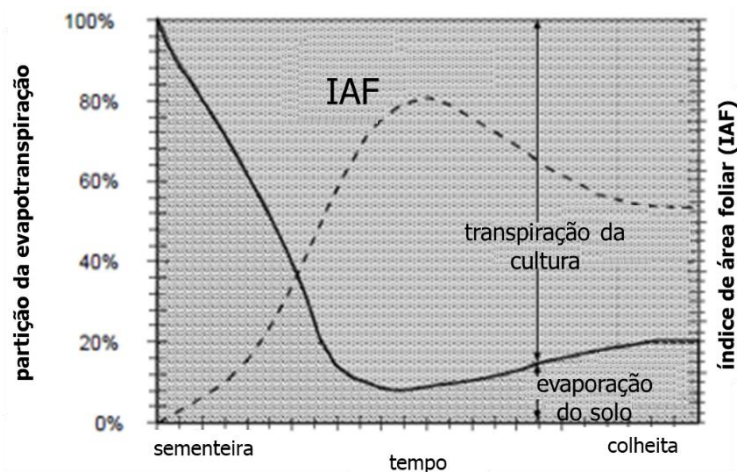


Figura 6 - Partição da evapotranspiração em evaporação e transpiração (em percentagem) ao longo do período de desenvolvimento de uma cultura anual, desde a sementeira à colheita, variando com o índice de área foliar (IAF). Adaptado: Allen et. al (1998)

Como podemos ver na figura acima, esta partição depende da área foliar por unidade de solo, sendo que na sementeira 100% da evapotranspiração provém da evaporação, valor que irá diminuir dando lugar à transpiração que vai aumentar até chegar a um valor superior ao da evaporação, quando a cultura está bem desenvolvida, atingindo um pico de 90% na cobertura total.

A evapotranspiração é, segundo Allen et al. (1998), afetada por inúmeros fatores, dos quais se destacam as variáveis meteorológicas (radiação, temperatura e humidade do ar, velocidade do vento), de cultura (tipo de cultura e variedade, estado de desenvolvimento altura, cobertura do solo e enraizamento, resistência à transpiração, rugosidade, reflexão) e de gestão e condições ambientais (salinidade e fertilidade do solo, limitações na aplicação de fertilização, presença de solos com horizontes impenetráveis ou compactos, presença de doenças, pragas ou infestantes, tipo de cultivo e tipo de rega).

2.7.1. A evapotranspiração de referência

Chama-se de evapotranspiração de referência (ET_0) à evapotranspiração de uma superfície com a cultura de referência, mais especificamente, de um relvado uniforme de crescimento

ativo e bem regado, que cobre completamente o solo, e que segundo o proposto por Allen et al. (1998) teria uma altura de 0,12 m, uma resistência superficial de 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23.

A evapotranspiração de referência é um dado necessário ao planeamento de projetos de rega, e calendarização das regas para as diferentes culturas.

Entre os vários métodos para o cálculo da evapotranspiração de referência, destaca-se, o método de Penman-Monteith aplicado com os parâmetros da relva acima descritos para períodos diários, de 10 dias, semanais ou mensais e que segundo Allen et. al. (1998) permite calcular valores consistentes de ET_0 para todo o tipo de regiões e climas. O facto de se ter em conta uma cultura de referência permite calcular, posteriormente, também a evapotranspiração de uma outra cultura específica, comparar evapotranspirações em diferentes períodos de tempo e regiões, e entre diferentes culturas.

A equação geral de Penman-Monteith (Monteith, 1965) é a seguinte:

$$\lambda ET = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (1)$$

onde:

ET representa a evapotranspiração, R_n o balanço da radiação, G o fluxo de calor para o solo, $(e_s - e_a)$ o deficit de pressão de vapor do ar, ρ_a a massa volúmica do ar a pressão constante, c_p a capacidade térmica mássica a pressão constante, Δ o declive da curva da pressão do vapor saturante, γ a dita constante psicométrica, r_s a resistência da superfície, r_a a resistência aerodinâmica e λ o calor latente de evaporação.

Tem-se em conta a cultura de referência com os parâmetros acima referidos, e as equações de resistência superficial, r_s , e resistência aerodinâmica, r_a , simplificadas.

Admitindo essas equações como aproximações razoáveis, Allen et al. (1998) incorporam os parâmetros da relva e modificam a aparência da equação para vir em mm/dia como:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (2)$$

onde as variáveis são as mesmas que a equação 1 sendo as variáveis igualmente medidas a uma altura de 2 metros (excepto as do termo $R_n - G$).

A equação de Penman-Monteith, na versão de Allen et al. (1998) é válida para períodos na escala diária a mensal com o valor médio das variáveis.

Para a utilização desta equação, é necessário calcular:

- o declive da curva de pressão de vapor saturante em função da temperatura, Δ :

$$\Delta = \frac{4088 e_s (T_a)}{(T + 237,3)^2} \quad (3)$$

- o balanço total das trocas por radiação, R_n :

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} = R_s \times (1 - a) - R_{nl} \quad (4)$$

onde:

- R_{ns} – balanço da radiação de curto comprimento de onda,
- R_{nl} – balanço da radiação de longo comprimento de onda, que foi calculado pela equação:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] (0,34 - 0,17 \times \sqrt{e_a}) (1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (5)$$

onde:

- σ é a constante de Stefan Boltzmann ($4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
- T_{\max} , é a temperatura máxima absoluta de cada dia em K
- T_{\min} , é a temperatura mínima absoluta de cada dia em K
- e_a é a pressão de vapor atual do ar
- R_s/R_{so} é a radiação relativa de curto comprimento de onda (limitada a $\leq 1,0$)
- R_s é a radiação solar efetiva.
- R_{so} é a radiação solar com céu limpo:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{(-5)} \times z) \times R_a \quad (6)$$

onde z é a altitude do local acima do nível médio da água do mar, neste caso:

$$z = 25 \text{ m}$$

- R_a radiação solar no topo da atmosfera:

$$R_a = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (7)$$

- δ é a declinação solar:

$$\delta = 0,409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (8)$$

- ϕ latitude do local de estudo, $\phi = 39,087^\circ \text{ N}$
- G_{sc} é a constante solar [$0,0820 \text{ MJm}^{-2}\text{min}^{-1}$]

- d_r é a distância relativa da terra ao sol:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \frac{2 \pi J}{365} \quad (9)$$

- J é o dia juliano

- ω_s é o ângulo ao acaso do sol $\omega_s = \arccos(-\tan \phi) + \tan \delta$

- a - albedo cujo valor é cerca de 0,23 para um relvado que cobre bem o solo em crescimento ativo.

- o fluxo de calor por condução para o solo, foi dado pela equação:

$$G = 0,1 \times (T_{\text{dia } i} - T_{\text{dia } i-1}) \quad (10)$$

onde:

- $T_{\text{dia } i}$ – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), para o dia i ;
- $T_{\text{dia } i-1}$ – temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$) do dia anterior a i .

- a constante psicométrica, Υ determinada pela equação:

$$\Upsilon = \left(\frac{c_p \times P}{0,622 \times \lambda} \right) / 1000 \quad (11)$$

onde:

- c_p – capacidade térmica mássica a pressão constante, $1,01 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{\circ}$.
- λ – calor latente de evaporação [KJ kg^{-1}], de onde:

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times T \times 1000 \quad (12),$$

multiplicou-se esta equação por 1000 para converter MJ (SI) em kJ [T em $^{\circ}\text{C}$].

- p – pressão atmosférica, de onde:

$$p(z) = 1,013 \times \left[\frac{(T + 273,16 - 0,0065 \times z)}{(T + 273,16)} \right]^{\left(g \times \frac{29 \times 10^{-3}}{0,0065 \times R} \right)} \quad (13)$$

- R – constante universal dos gases perfeitos, de onde $R=8,314 \text{ J mol}^{-1}$;
- g – aceleração gravítica, de onde $g = 9,8 \text{ m s}^{-2}$.

- a pressão de vapor de saturação, $e_s(T_d)$, determinada pela equação:

$$e_s(T_d) = 610,8 \times e^{\left[\frac{17,27 \times T}{T+237,3} \right]} \quad (14),$$

onde:

- T_d – temperatura média diária;

- a pressão de vapor atual do ar, e_a , determinado pela equação:

$$e_a = e_s(T_d) \times \text{HR} \quad (15),$$

onde HR é a humidade relativa.

2.7.2. A evapotranspiração cultural

A evapotranspiração cultural (ET_c) representa as necessidades hídricas de uma cultura sob condições de referência, isto é, cultivada em grandes parcelas, em conforto hídrico, com excelente gestão (sem doenças, bem fertilizadas, em condições ambientais adequadas, nas quais atinge o máximo de produção). Quando as condições de campo não correspondem às condições de referência, é necessário corrigir ET_c , através de um ajustamento que reflita o peso as diferenças do clima, ambiente e gestão das culturas, que estão integradas no coeficiente cultural (K_c). Assim, ET_c é produto de ET_o e de K_c (equação 16):

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (16)$$

Como afirmado anteriormente, a evapotranspiração é a combinação das perdas por evaporação do solo e por transpiração das plantas. Estas componentes podem ser combinadas no coeficiente cultural simples (K_c) ou num coeficiente cultural dual onde são separadas num coeficiente cultural basal (K_{CB}) e um coeficiente de evaporação do solo (K_e), de onde $K_c = K_{CB} + K_e$. O coeficiente K_{CB} está associado à transpiração da planta, e, por isso, está associado a condições de disponibilidade hídrica no solo suficiente para garantir que não há limitação da transpiração e crescimento das plantas. O valor de K_e , por sua vez, irá corresponder à evaporação do solo.

O coeficiente cultural simples é utilizado em aplicações como planeamento de rega, projetos e gestão da rega, enquanto o coeficiente dual é por sua vez utilizado em situações em que é necessário estimar separadamente a evaporação da água do solo.

Segundo Allen et. al (1998), o valor de K_c varia ao longo do desenvolvimento da cultura, da sementeira à colheita, como pode ser observado na Figura 7, dependendo do estado fenológico da cultura e da arquitetura da copa. Destacam-se três fases do comportamento do coeficiente K_c ao longo do desenvolvimento vegetativo:

- $K_{c\ ini}$ – coeficiente cultural inicial – valor de $\overline{K_{CB} + K_e}$ durante o período inicial, que, em culturas anuais como a cultura do tomate, corresponde ao período da sementeira ou plantação até cerca de 10% da cobertura do solo;
- $K_{c\ med}$ – coeficiente cultural médio – valor de $\overline{K_{CB} + K_e}$ durante o período intermédio, que, em culturas anuais como a cultura do tomate, corresponde ao período desde que se estabelece a cobertura total do solo até ao início da maturação ou senescência.
- $K_{c\ final}$ – coeficiente cultural final – em culturas anuais como a cultura do tomate corresponde ao valor de $\overline{K_{CB} + K_e}$ na data de colheita.

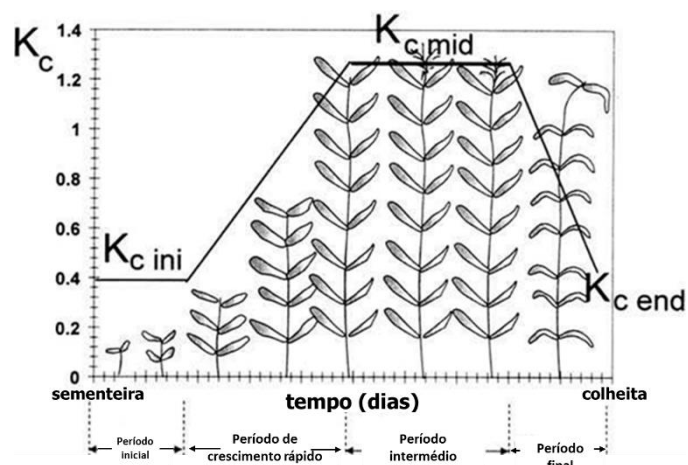


Figura 7 - Evolução do coeficiente cultural (K_c) de uma cultura ao longo do tempo e do desenvolvimento vegetativo das plantas, da sementeira à colheita. Destacam-se três fases nos valores de K_c , K_c ini (inicial), K_c med (médio) e K_c final (final). Adaptado: Allen et al. (1998)

No Quadro 3 são apresentados os valores destes parâmetros apresentados pelo boletim 56 da FAO (Allen et. al, 1998).

Quadro 3 - Informações e parâmetros relativos à cultura do tomate necessárias à avaliação das necessidades de água. Fonte: Allen et al. (1998).

K_c ini	0,7
K_c mid	1,15
K_c end	0,70-0,90
Fração p (défice permissível)	0,40 ¹
Profundida radicular máxima (m) ¹	0,7-1,5

¹ Para $ET \approx 5$ mm/dia)

Quando as culturas não crescem sob uma gestão e condições ambientais standard, porque submetidas a, por exemplo, pragas, doenças, salinidade do solo, baixa fertilidade, stress hídrico ou alagamento, a evapotranspiração, passa, por esta razão, segundo Ferreira (2017), a ser calculada a partir de um coeficiente de stress, da seguinte forma:

$$ET_a = ET_0 \times K_s \times K_c \quad (17)$$

onde: ET_a é a evapotranspiração actual e K_s é o coeficiente de stress.

O coeficiente de stress pode estimar-se grosseiramente através da depleção, que corresponde ao défice hídrico do solo relativamente à capacidade de campo (Allen et al., 1998). No caso do estudo feito na presente dissertação, o coeficiente de stress foi estimado através da metodologia do boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998) (equação 18) e pela equação experimental de Ferreira Gama (1987) (equação 22):

$$k_{s\text{FAO}} = \frac{RU - Dpl}{RU - RFU} \quad (18)$$

onde:

- RU é a reserva útil do solo, calculada da seguinte forma:

$$RU = (\theta_{CC} - \theta_{CE}) \times z_r \quad (19)$$

- RFU é a reserva facilmente utilizável do solo, calculada da seguinte forma:

$$RFU = RU \times p \quad (20)$$

- onde p, déficit permissível, foi calculado, segundo Allen et al. (1998):

$$p = p_{\text{tabelado FAO}} + 0,04 \times (5 - ET_{c\text{médio}}) \quad (21)$$

onde $ET_{c\text{médio}}$ corresponde à média dos valores de ET_c durante o período de stress.

- Dpl é a depleção de água no solo:

$$k_{s\text{FG}} = 1 - 0,025 \times (Dpl - 4) \quad (22)$$

2.8. Balanço hídrico no solo

Define-se por necessidade hídrica da cultura a quantidade de água que compensa as perdas por evapotranspiração que uma cultura sofre, que difere da necessidade de água em rega, que é o resultado da diferença entre as necessidades hídricas, a precipitação efetiva, perdas para a ineficiência e fração de lavagem, entre outros. A água presente no solo depende das entradas e saídas de água do mesmo. Estes fluxos de água integrados no tempo são dados de entrada para o balanço hídrico no solo (Figura 8), que avalia as entradas e saídas da zona radicular durante um determinado intervalo de tempo.

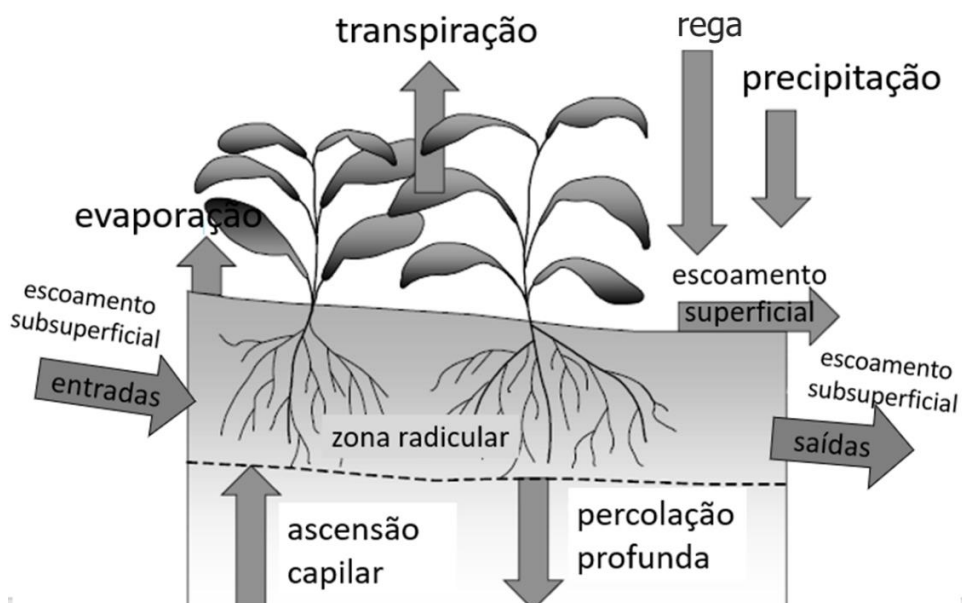


Figura 8 - Balanço hídrico no solo na zona radicular. Fonte: Allen et. al (1998)

Uma parte da rega (I) e da precipitação (P) pode perder-se por escoamento superficial (RO) ou por percolação profunda (DP), para um lençol freático (de onde a água pode também subir, por ascensão capilar (AC) de um lençol superficial para a zona radicular) ou ser transportada lateralmente por escoamento subsuperficial (SF) para dentro (SF_{in}) ou para fora (SF_{out}) da zona radicular. A variação do armazenamento do solo [ΔA_z em mm] pode então ser deduzida através da equação do balanço hídrico no solo (equação 23), com acesso às entradas e saídas de água acima referidas:

$$\Delta A_z = I + P - RO - DP \pm \Delta SF - ET_c \quad (23)$$

Frequentemente assumem-se nulos o escoamento subsuperficial, o escoamento superficial, a percolação profunda e a ascensão capilar. Assim, tendo isto em conta:

$$\Delta A_z = I + P - ET_c \quad (24)$$

A comparação entre os resultados da aplicação do balanço hídrico e as medições de campo relativamente à água no solo nem sempre leva a resultados satisfatórios. As principais causas de erros no seu cálculo devem-se a (Ferreira, 2017):

- medições *in loco* não representativas do teor de água no solo – devido a fatores como heterogeneidade espacial e de aplicação de água;
- falta de adequação dos limites da reserva útil – capacidade de campo e/ou coeficiente de emurchecimento;
- falta de representatividade dos valores de ET_o no local para obter ΔA_z e erros na medição das outras variáveis de entrada (I, P e RO).

2.9. Avaliação do estado hídrico da planta

A determinação da evapotranspiração das plantas permite, através do balanço hídrico, inferir as necessidades que a planta terá em água, e, posteriormente, colmatar essas necessidades, regando, caso a precipitação não tenha sido suficiente para devolver à planta a água que perdeu.

Sabemos que, para perceber quanto regar, precisamos de quantificar a quantidade de água que a planta perdeu. No entanto, a medição da evapotranspiração é morosa e cara e por isso chegamos a este valor através de modelos, como os anteriormente mencionados (equação 2). Porém, a incerteza destes modelos leva a que seja necessário acompanhá-los por medições do estado hídrico do solo.

Os modelos permitem apenas prever o comportamento do complexo solo-planta, sendo importante ter sempre em conta fatores externos que possam afetar a forma como a água chega ao solo, e deste chega à planta. Muitos destes fatores só são perceptíveis depois de a

planta manifestar sintomas de stress hídrico, sendo, por isso, essencial perceber estes sintomas, isto é, as respostas da planta à falta de água.

Exemplos de respostas da planta ao stress hídrico, segundo Ozbahce e Tari (2010), em diferentes escalas temporais:

- fecho dos estomas – em períodos de temperatura elevada, ambiente seco ou em falta de água absorvida, evitam o stress a partir de um controlo estomático mais eficiente, diminuindo a transpiração;
- produção de folhas de tamanho reduzido;
- redução da área foliar;
- desenvolvimento das raízes em profundidade.

A **medição direta** do estado hídrico da planta ou solo, segundo Blanco-Cipollone et al. (2017), pode ser feita no solo e na planta, através de:

- potencial hídrico foliar (Ψ_f) – corresponde à pressão a que a água esta sujeita na folha. O potencial de base (Ψ_b), potencial hídrico foliar, que é medido de madrugada, é considerado – pressupondo um equilíbrio entre o potencial da planta e o potencial do solo durante a noite - ser menos suscetível às condições ambientais do que Ψ_f medidos noutras horas do dia – sendo por isso uma boa indicação do que se passa na zona das raízes. O potencial mínimo, Ψ_{min} é medido próximo do meio dia solar. O seu valor depende muito da evapotranspiração;
- teor de água no solo (θ_s), por exemplo, volume de água por unidade de volume do solo;
- potencial de água no solo (Ψ_s) – corresponde à força de retenção do solo para a água.

As plantas, quando sujeitas a stress hídrico podem ter um comportamento:

- **isohídrico**: mantêm um certo grau de hidratação, pois evitam o stress hídrico fechando os estomas (controlo estomático mais eficiente). Por isso a transpiração diminui e o potencial hídrico não desce muito. Nestas plantas é preferível utilizar o potencial Ψ_b como indicador ao invés de Ψ_{min} porque o valor do último aproxima-se para plantas em conforto e em stress. A cultura do tomate é um dos muitos exemplos de culturas que têm este tipo de comportamento;
- **anisohídrico**: apresentam uma menor hidratação porque não a evitam. A sua resposta é tolerar o stress hídrico, mantendo o teor de água baixo suficiente para as funções

vitais. Aqui Ψ_{min} pode ser um bom indicador porque tem uma diferença maior entre plantas em conforto e plantas em stress (Blanco-Cipollone et al., 2017).

A **medição indireta** do estado hídrico da planta baseia-se na reação da planta ao estado hídrico em que se encontra. É possível, segundo Ferreira et al. (2008), através da medição de:

- abertura estomática – descreve a condutância estomática, g_s , indicador do controlo estomático, reação importante da planta, na qual esta limita as suas perdas de água (McDermitt, 1990). O valor máximo de g_s mede-se durante a manhã e o valor mínimo diurno a seguir ao meio-dia;
- cavitação do xilema;
- temperatura das folhas – resultado do fecho dos estomas das plantas em stress hídrico;
- transpiração relativa.

2.10. Bases biofísicas para a programação da rega

A disponibilidade de água no solo corresponde à capacidade que o solo tem em reter água que seja disponível para a planta.

O teor de água no solo (θ_s) é, a fração mássica ou volúmica de água no solo. Através deste é possível inferir indiretamente o ponto crítico a partir do qual é necessário regar, determinar quanta água foi consumida, para saber quanta deve ser aplicada, etc.

O teor de água à saturação corresponde à situação em que a água preenche todos os macroporos e o solo não contém ar (Costa, 1975).

O teor de água à capacidade de campo (θ_{cc}) considera-se ser o valor de teor de água observado quando se escoia praticamente toda a água gravitacional do volume de solo ocupado pelas raízes da planta. A água restante ocupa os microporos. Depois de uma rega ou precipitação intensa o solo drenará até à capacidade de campo.

À medida que a planta evapotranspira, vai absorvendo a água disponível no solo. Caso não haja regas ou precipitação o teor de água junto das raízes diminui e, à medida que a planta vai absorvendo água, a água que permanece poderá ficar retida com tanta força que a planta tem dificuldade em extraí-la, até determinado ponto em que não conseguirá mais fazê-lo, chegando ao ponto de emurchecimento permanente. O teor de água do coeficiente de emurchecimento (θ_{ce}) é o teor de água abaixo do qual a planta sofre danos irreversíveis. Considerava-se, para efeitos práticos e muito grosseiramente, como correspondendo ao teor de água para o qual a força de sucção é aproximadamente igual a 15 atm (Allen et al., 1998).

Dado que acima da capacidade de campo, a água aplicada drena, e abaixo do coeficiente de emurchecimento a água não consegue ser extraída, a quantidade de água disponível será a diferença entre o teor de água à capacidade de campo e o teor de água no ponto de emurchecimento. (Allen et al., 1998). A esta quantidade de água chama-se reserva útil (RU). Esta dependerá do tipo de textura do solo e da profundidade radicular.

Embora a água esteja, teoricamente, disponível para a planta até ao ponto de emurchecimento, esta, à medida que o teor de água no solo vai diminuindo, vai-se tornando cada vez mais difícil de extrair (Allen et al., 1998). Assim, apenas uma fração da reserva útil (p), que depende do tipo de cultura, é de facto extraída pelas raízes da planta sem que ela entre em stress hídrico (por redução de ET), e a esta quantidade de água chama-se reserva facilmente utilizável (RFU), estimada pela equação:

$$RFU = RU \times p \leftrightarrow RFU = (CC - CE) \times p \quad (25)$$

Assim sendo, o teor da água no solo, obviamente, é insuficiente para diagnosticar o conforto hídrico das plantas. É preciso conhecer também o tipo de solo (Figuras 9 e 10) (por exemplo, θ_s de 15% é muito baixo num solo argiloso e muito elevado num solo arenoso) e relacioná-lo com a percentagem da reserva útil consumida.

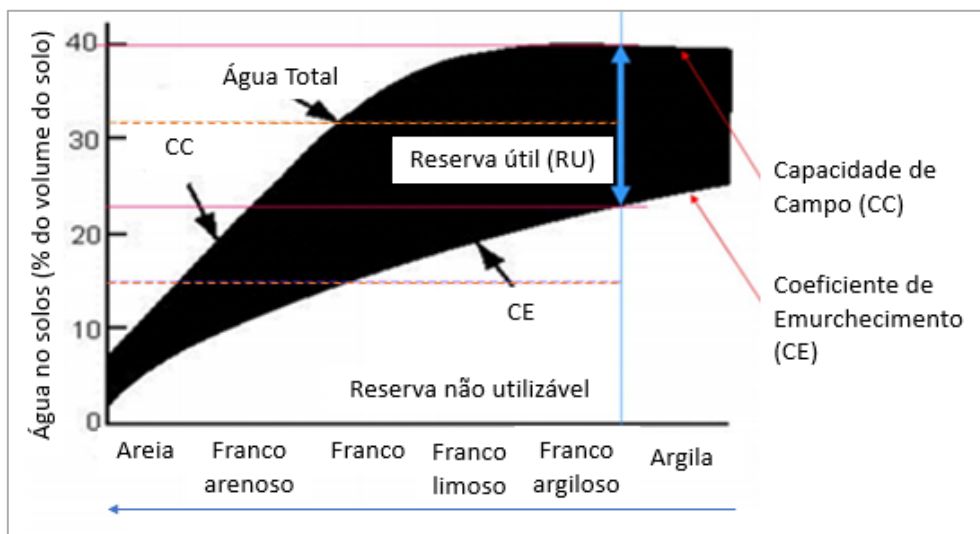


Figura 9 - Comportamento da água no solo, em diferentes tipos de solos.

Soil type (USA Soil Texture Classification)	Soil water characteristics			Evaporation parameters	
	θ_{FC}	θ_{WP}	$(\theta_{FC}-\theta_{WP})$	Amount of water that can be depleted by evaporation	
				stage 1 REW	stages 1 and 2 TEW* ($Z_e = 0.10$ m)
	m^3/m^3	m^3/m^3	m^3/m^3	mm	mm
Sand	0.07 - 0.17	0.02 - 0.07	0.05 - 0.11	2 - 7	6 - 12
Loamy sand	0.11 - 0.19	0.03 - 0.10	0.06 - 0.12	4 - 8	9 - 14
Sandy loam	0.18 - 0.28	0.06 - 0.16	0.11 - 0.15	6 - 10	15 - 20
Loam	0.20 - 0.30	0.07 - 0.17	0.13 - 0.18	8 - 10	16 - 22
Silt loam	0.22 - 0.36	0.09 - 0.21	0.13 - 0.19	8 - 11	18 - 25
Silt	0.28 - 0.36	0.12 - 0.22	0.16 - 0.20	8 - 11	22 - 26
Silt clay loam	0.30 - 0.37	0.17 - 0.24	0.13 - 0.18	8 - 11	22 - 27
Silty clay	0.30 - 0.42	0.17 - 0.29	0.13 - 0.19	8 - 12	22 - 28
Clay	0.32 - 0.40	0.20 - 0.24	0.12 - 0.20	8 - 12	22 - 29

$$*TEW = (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e$$

Figura 10 - Características típicas da água no solo em diferentes tipos de solo. Fonte: Allen et al. (1998)

O efeito que o stress hídrico tem na evapotranspiração é descrito pelo coeficiente de stress, K_s , que representa a percentagem da evapotranspiração cultural que a cultura está a evapotranspirar, tomando-se o valor de $K_s = 1$ quando não existe stress hídrico e decrescendo para 0 à medida que o stress aumenta (Ferreira, 1979; Ferreira, 2017). O coeficiente de stress é, em certos autores americanos, erradamente incorporado em K_c . K_s acaba por representar o decréscimo relativo de ET_c (Ferreira e Valancogne, 1997).

O cálculo de K_s depende da percentagem da depleção de água no solo (Allen et al., 1998) e de outros factores (Ferreira Gama, 1987).

A gestão da rega, pode ser feita em conforto ou em rega deficitária: no caso concreto deste caso de estudo, fez-se rega em conforto. A rega em conforto faz-se, idealmente, de modo a que a água no solo se mantenha sempre na zona de conforto hídrico, isto é, entre a capacidade de campo e o limite da reserva facilmente utilizável, L_{rfu} (valor mínimo de RU, abaixo do qual a planta entra em situação de carência hídrica).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Caracterização do local de estudo

3.1.1. Localização geográfica

O ensaio foi realizado na herdade Ramadão das Ovelhas, localizada em Muge, Salvaterra de Magos (Figura 11). A escolha do local deveu-se à enorme relevância que esta zona tem na produção do tomate industrial, no que toca a área e número de produtores. A exploração tem uma área de 308,72 ha, dos quais 205,80 ha são regados. A altitude do local é de 25 m, com uma latitude de 39, 087° N e uma longitude de 8,696° W.



Figura 11 - Herdade Ramadão das Ovelhas, em Muge, Salvaterra de Magos. Adaptado: Google Instituto Geográfico Nacional (2017)

3.1.2. Caracterização dos solos

Na região da Lezíria do Tejo, onde a produção de tomate para indústria se destaca, nos concelhos de Almeirim, Alpiarça, Benavente e Salvaterra de Magos, predominam os regossolos, solos incipientes, litólicos ou calcários, sendo, assim, solos pouco evoluídos, constituídos por material originário (Madeira e Ricardo, 2013), com uma granulometria entre 250-500 µm, areia média, segundo a escala de diâmetro da USDA (Madeira, 2013).

Os solos de todos os locais foram classificados como sendo solos de textura arenosa, segundo a classificação USDA (Figura 12 a, b, c, d). Os solos de textura arenosa (grosseira) são caracterizados por terem uma menor porosidade total, mas maior porosidade drenável, maior taxa de infiltração, menor reserva útil e serem de drenagem rápida por comparação a solos de textura mais fina. São também, estes solos, tipicamente muito pouco plásticos, não se verificando quase nenhuma adesividade (Madeira e Ricardo, 2013),

Textura		
* Arcilla según clasificación USDA	3	%
* Arena según clasificación USDA	88	%
* Limo según clasificación USDA	9	%
* Textura según normas USDA	Arenoso	

Textura		
* Arcilla según clasificación USDA	2	%
* Arena según clasificación USDA	93	%
* Limo según clasificación USDA	5	%
* Textura según normas USDA	Arenoso	

Textura		
* Arcilla según clasificación USDA	2	%
* Arena según clasificación USDA	91	%
* Limo según clasificación USDA	7	%
* Textura según normas USDA	Arenoso	

Figura 12 - Classificação da textura dos solos do local 2 (a), local 5 (b) e local 6 (c) segundo a classificação USDA. Fonte: Laboratório Agrama, S.L. (2017)

3.1.3. Caracterização da cultura

A cultura que serviu de objeto de estudo para este trabalho foi a cultura do tomate para indústria, *Lycopersicum esculentum*, da variedade UG 124. Esta variedade, segundo Unigen Seeds (2017), é um híbrido com um ciclo de 98 dias, vigorosa, com boa capacidade de cobertura do solo e um potencial de produtividade alto.

O compasso utilizado foi de 1,52 m x 0,205 m (Figura 13), ou seja 1,52 m de distância entre linhas e 0,205 m (20,5 cm) de distância entre plantas na linha.

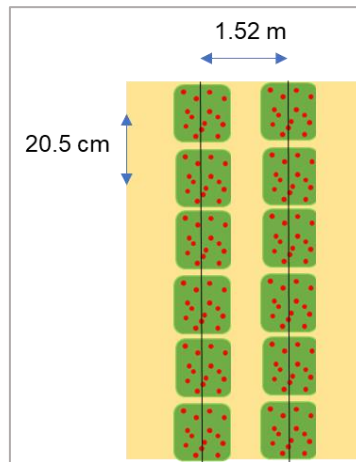


Figura 13 - Esquema do compasso das plantas de tomateiro na exploração Ramadão das Ovelhas na Campanha de 2017.

3.1.4. Caracterização do clima

O clima de Portugal Continental é considerado temperado no que toca à temperatura média anual, moderado quanto à amplitude média da variação anual, moderadamente chuvoso relativamente à precipitação e seco face à humidade relativa do ar (Portal do Clima, 2017).

Segundo a classificação de Köppen, Portugal Continental está dividido em duas regiões de clima temperado, como já descrito (IPMA, 2017). O local de estudo localiza-se na região Csa.

Para a caracterização do clima da exploração e cumprimento dos objetivos propostos neste trabalho, foram utilizados dados disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, SNIRH (2018), da estação meteorológica da Barragem de Salvaterra a cerca de 13,1 km do local de estudo (para o ano de 2017), dados fornecidos pelo IPMA (2018) da estação meteorológica de Santarém a cerca de 10,6 km do local de estudo (referentes a um período de 30 anos, de Outubro de 1981 a Setembro de 2010), e dados de uma estação meteorológica em Valada do Ribatejo, a 7 km da exploração, fornecidos pela empresa de apoio à gestão da rega (para o período de 29 de Maio a 20 Julho). Os dados utilizados referiam-se às seguintes variáveis:

- Precipitação diária;
- Temperatura do ar média diária;
- Temperatura do ar horária (que inclui dados da temperatura máxima diária e mínima diária);
- Velocidade do vento média diária;
- Humidade relativa média diária;
- Humidade relativa horária (que inclui dados da humidade relativa máxima diária e mínima diária);

- Radiação solar diária.

3.1.4.1. Precipitação e temperatura

O climograma (Figura 14) comprova o tipo de clima mediterrânico temperado característico de Portugal Continental, sendo a estação quente (de Junho a Setembro) aquela em que se verifica menor precipitação. O contrário acontece nos meses da estação fria (Novembro a Janeiro) onde se verificam os valores mais altos de precipitação.

Para o período de 30 anos analisado entre os anos hidrológicos 1981 e 2010 (Figura 14), segundo os dados facultados pela estação meteorológica de Santarém (IPMA, 2018), foram registados valores máximos para precipitação média anual no mês de Novembro, com 106,8 mm e valores mínimos para o mês de Julho com 4,2 mm. No ano 2017 (ano de estudo), na estação meteorológica da Barragem de Magos, foi no mês de Janeiro onde se verificou maior precipitação (93,5 mm), aproximadamente 10 mm mais alta que a da média dos 30 anos. O mesmo não acontece com a precipitação que ocorreu nos meses de Verão, Junho, Julho e Setembro do ano de estudo, onde a precipitação foi sempre mais baixa que a média dos 30 anos.

A temperatura média mensal varia de forma inversa para o período de 30 anos analisado entre os anos hidrológicos de 1981 a 2010, sendo verificados valores menores no mês de Janeiro, 10,4°C e valores máximos no mês de Agosto, 20,4°C. As temperaturas médias mensais para o ano de estudo, fornecidas pela estação meteorológica da Barragem de Magos, são apresentadas também na Figura 14.

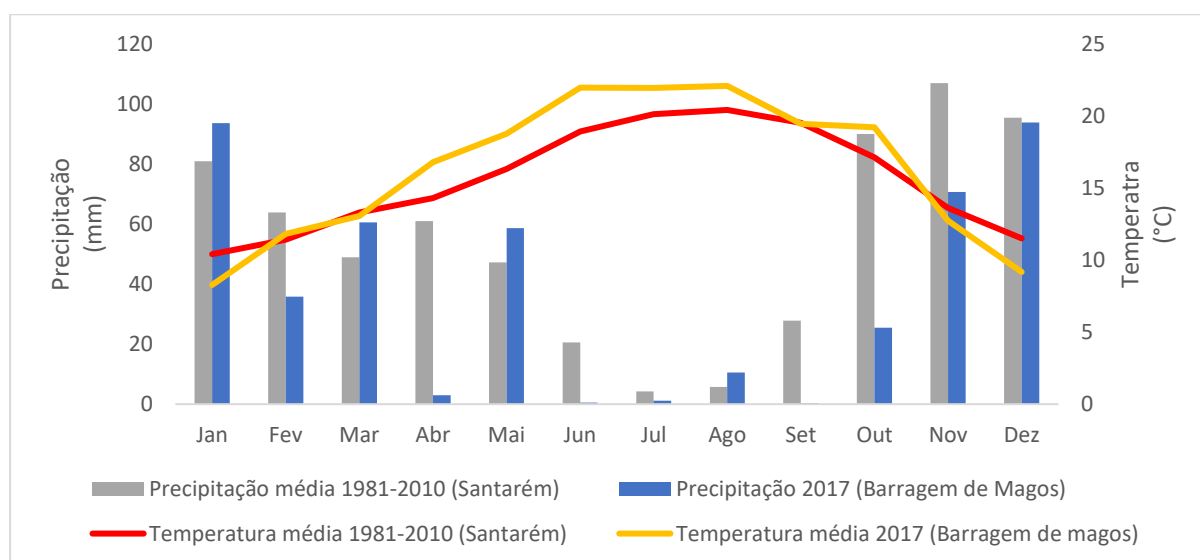


Figura 14 - Climograma com histórico de 30 anos de precipitação e temperatura médias (1981 a 2010) da estação meteorológica de Santarém (IPMA, 2018), e dados para o ano de estudo de 2017, da precipitação mensal da estação meteorológica de Santarém (IPMA, 2018) e temperatura média da estação meteorológica da Barragem de Magos (SNIRH, 2018).

3.1.4.2. Humidade do ar

A humidade do ar é descrita pela variável humidade relativa (HR). No período de 30 anos analisado entre os anos hidrológicos 1987/1988 a 2016/2017 (dados da estação meteorológica de Santarém), os meses de humidade relativa mais baixos são, como seria de esperar, os meses da estação quente e seca, Junho, Julho e Agosto; por sua vez os meses mais húmidos são os da estação fria, Novembro, Dezembro e Janeiro (Figura 15). Os valores de humidade do ar para o ano de estudo são os da estação meteorológica da Barragem de Magos (SNIRH, 2018). O ano de 2017 foi um ano que acompanhou esta tendência, com a exceção dos meses de Outubro e Abril, que foram significativamente menos húmidos.

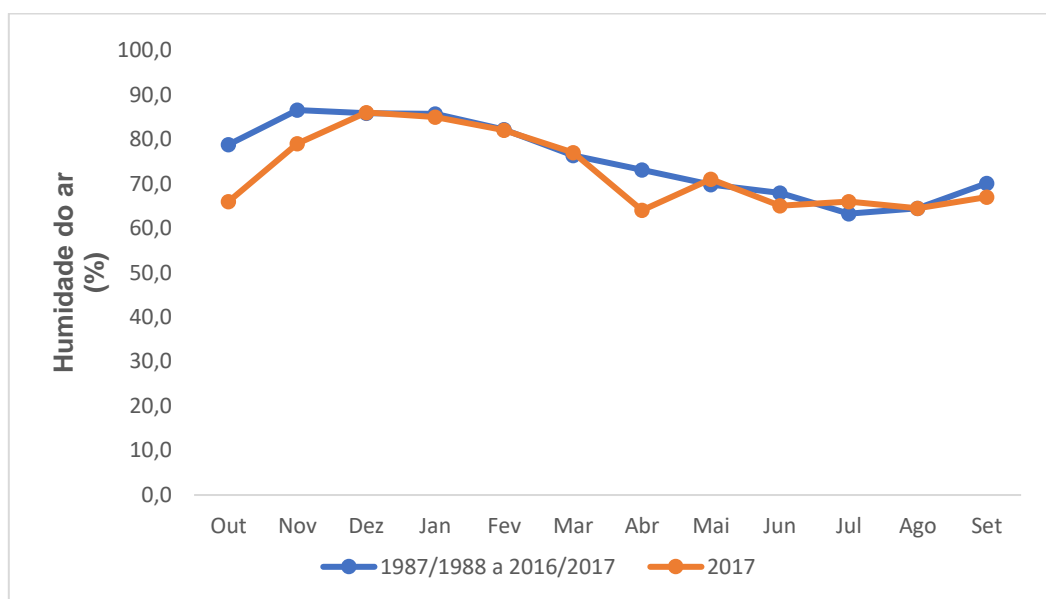


Figura 15 - Valores médios anuais de humidade relativa da estação meteorológica de Santarém (IPMA, 2018), referentes ao período de 1987/1988 a 2016/2017 e do ano 2017 da estação meteorológica da Barragem de Magos (SNIRH, 2018).

A humidade relativa média anual (ano hidrológico), para o período analisado, em Santarém, é de 74,8%, tendo sido registados valores máximos de humidade relativa média mensal para o mês de Novembro, com 86,5 %, e valores mínimos para o mês de Julho com 63,3%.

3.2. Calendarização de trabalhos

A ordem de trabalhos foi descrita através do calendário de tarefas seguinte:

Quadro 4 - Calendarização dos trabalhos realizados.

Maio 2017	
3	Visita de campo com a empresa Hidrosoph - orientação e manutenção das sondas
29	Recolha de amostras de solo para análise do teor de água a diferentes profundidades nas sondas S113, S114, S110 e S02.
Junho 2017	
12	Recolha de amostras de solo para análise do teor de água a diferentes profundidades nas sondas S113, S114, S110 e S02.
29	Recolha de amostras de solo para análise do teor de água a diferentes profundidades nas sondas S113, S114, S110 e S02.
Julho 2017	
5	Recolha de amostras de solo para o cálculo da densidade aparente. Recolha de amostras de solo em diferentes pontos do espaço para demonstração da distribuição das raízes no espaço. Recolha de amostras de solo para análise do teor de água a diferentes profundidades nas sondas S113, S114, S110 e S02.
12	Início do Ciclo de Stress dia 1 - recolha de amostras de solo para análise na zona do Ciclo de Stress.
13	Recolha de amostras de solo para análise do teor de água a diferentes profundidades nas sondas S113, S114, S110 e S02. Ciclo de Stress dia 2 - recolha de amostras de solo para análise na zona do Ciclo de Stress.
14	Ciclo de Stress dia 3 - recolha de amostras de solo para análise na zona do Ciclo de Stress.
17	Ciclo de Stress dia 6 - recolha de amostras de solo para análise na zona do Ciclo de Stress.
18	Ciclo de Stress dia 7 - recolha de amostras de solo para análise na zona do Ciclo de Stress.
19	Ciclo de Stress dia 8 - recolha de amostras de solo para análise na zona do Ciclo de Stress. Análise do potencial da folha e do ramo do tomateiro regado e sob stress com a câmara de pressão. Análise da condutância estomática em tomateiro regado e sob stress com porómetro.
20	Recolha de amostras de solo para análise do teor de água a diferentes profundidades nas sondas S113, S114, S110 e S02. Fim do Ciclo de Stress dia 9 - recolha de amostras de solo para análise na zona do Ciclo de Stress. Análise do potencial da folha e do ramo do tomateiro regado e sob stress com a câmara de pressão.
Fevereiro 2018	
24	Início do ensaio para a determinação do teor de água à capacidade de campo, com encharcamento de uma zona limpa de vegetação e isolamento com plástico.
25	Recolha de amostras de solo da zona de amostragem encharcada no dia anterior.

3.3. Medições

Todas as medições foram feitas dentro do período de estudo que decorreu na exploração de 29 de Maio de 2017, até 20 de Julho de 2017, dia que antecedeu a colheita da cultura em estudo. É exceção a recolha de amostras para a medição do teor de água à capacidade de campo, que foi efetuada em Fevereiro de 2018.

3.3.1. Medição do estado hídrico do solo

Foram recolhidas amostras de solo, nos dias 29 de Maio, 12 e 19 de Junho e 5, 13 e 20 de Julho, em quatro locais junto a cada uma das quatro sondas designadas por – S110, Apave S02, S114, S113 – instaladas por uma empresa de aconselhamento de rega (Figura 16). Em cada local foram tiradas amostras de solo, recorrendo a uma sonda de solo graduada, à profundidade de 0-15 cm, 15-25 cm, 25-35 cm e 35-45 cm, num total de 3 repetições em cada um dos 4 locais, ou seja, 48 amostras em cada dia de recolha.

Os resultados mostraram que havia raízes até 45 cm, sendo esta a profundidade limite para a recolha de amostras que foi possível efetuar. Assumiu-se, por isso, uma profundidade radicular de 0,45 m. A sonda de solo, embora graduada de 0 a 40 cm, recolhia sempre mais 5 cm de profundidade que o previsto (por o solo da camada superficial ter dificuldade em ficar retido), pelo que o armazenamento para a camada superficial graduada de 0-10 cm de cada recolha correspondeu, na realidade, à camada superficial de 0-15 cm. A medição da profundidade radicular para profundidades maiores que 45 cm foi impossível de ser medida, por falta de recursos (profundidades normais das raízes de tomateiro, que segundo Allen et al. (1998), podem ser de 0,70-1,50 m).

Estas amostras foram condicionadas em sacos de plástico próprios para a conservação das amostras, devidamente identificados e fechados, e guardadas numa geleira, de forma a diminuir as perdas de água por evaporação.



Figura 16 - Distribuição e localização das sondas de solo pela área de estudo. Adaptado: Google Maps (2017)

Também com o objetivo de manter a humidade mais próxima daquela que as amostras tinham na altura em que foram recolhidas, a recolha foi efetuada de manhã cedo, altura do dia de menor temperatura e que permitia levar as amostras, no mesmo dia, para o laboratório.

No laboratório, as 48 amostras foram, em cada dia de cada recolha, colocadas em pesa-filtros de alumínio, que haviam sido pesados vazios, e que, depois de pesados novamente com cada amostra, foram colocados numa estufa de secagem Memmert © 2200 W a 105°C onde permaneceram durante 24 horas. Após as 24 horas, tempo necessário para a evaporação de praticamente toda a água existente na amostra de solo, procedeu-se a uma nova pesagem (Figura 17).



Figura 17 - Secagem em estufa e pesagem de pesa-filtros com amostras de solo para cálculo do teor de água no solo.

Cada amostra permitiu determinar a expressão ponderal do teor de água do solo, θ_m , [g g^{-1}] através da avaliação do peso de uma amostra antes e depois da sua secagem em estufa, pela fórmula:

$$\theta_m = \frac{M_{ag}}{M_s} \quad (26)$$

onde:

M_{ag} – massa de água perdida por secagem em estufa a 105° C;

M_s – massa de solo seco em estufa a 105° C.

Foram utilizadas também medições facultadas por quatro sondas de solo, uma em cada local de amostragem – local 2, 5, 6-1 e 6-2, pertencentes à empresa de rega, Hidrosoph, que se responsabilizou pela instalação das mesmas no terreno, manutenção e do processamento dos seus dados, disponíveis na plataforma da própria empresa, uma plataforma de gestão de rega inteligente, que, para além de apresentar os resultados, faz aconselhamento de rega, tendo em conta a cultura, o local, o clima e as preferências do produtor.

Segundo esta empresa, o aconselhamento tem como objetivo proporcionar o aumento da produtividade da produção, a redução dos custos de energia e de 40% da água utilizada em rega, a otimização do uso de fertilizantes e fitossanitários, e, conseqüentemente fazer uso de práticas menos prejudiciais ao ambiente. O registo de dados permite, alegadamente, o controlo qualitativo da água no solo, o controlo da água que se rega (através do uso complementar de contadores), e da água que as plantas utilizam. Seria então possível conhecer melhor tanto os solos com que o agricultor trabalha, como a fisiologia da planta em questão, permitindo àquele perceber se existem problemas na absorção de água pela planta ou com o sistema de rega, pela observação de valores de humidade do solo fora dos esperados.

3.3.2. Dotações de rega

A rega e as conseqüentes dotações aplicadas, são decididas pelo produtor. A água que é debitada na parcela é medida e disponibilizada pela plataforma de rega através da informação dos caudalímetros (contadores) instalados nas tubagens secundárias. Os caudalímetros permitem não só saber a quantidade de água disponibilizada pela rega, como também dar informações ao produtor, entre outros sobre erros e, entupimentos.

Os dados fornecidos pela plataforma (Figura 18), para a dotação diária, foram analisados ponto a ponto, a cada quarto de hora, e para cada local, durante o período analisado, a partir dos gráficos apresentados, da seguinte forma:

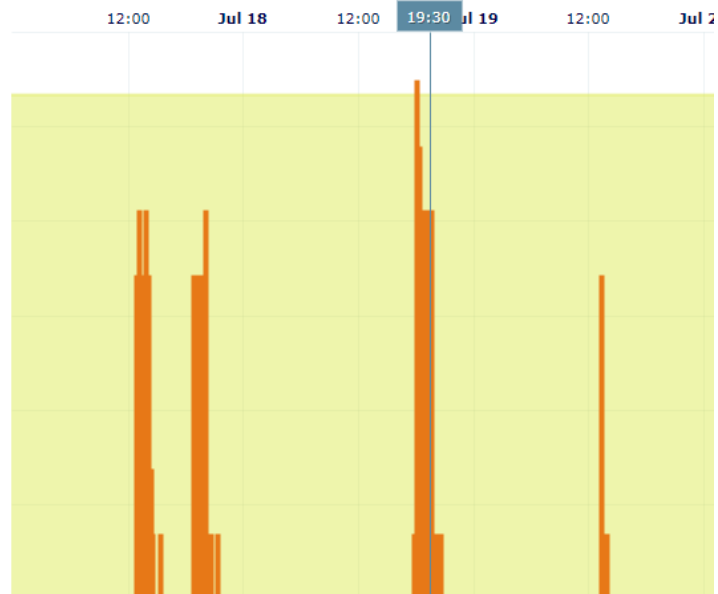


Figura 18 - Gráfico da plataforma Irristrat™, que demonstra as diferentes dotações ao longo do tempo.

3.3.3. Determinação da massa volúmica aparente do solo

Para se conhecer o teor de água do solo, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, é necessário medir a massa volúmica aparente do solo, $\rho_{\text{ap,s}}$. A massa volúmica aparente do solo é o quociente entre a massa das partículas sólidas do mesmo e volume de solo (Madeira e Ricardo, 2013).

A medição da massa volúmica aparente do solo fez-se, a 5 de Julho de 2017, usando quatro cilindros de volume conhecido:

1. Determinou-se o volume e pesou-se cada cilindro vazio;
2. No campo, os cilindros foram enterrados no solo. De modo a não alterar a estrutura que a amostra tinha no solo e a preencher o volume total do cilindro, foram tapados primeiro por cima, e depois, escavando, por baixo, sempre tentando não perturbar a amostra (Figura 19);
3. Os cilindros ficaram cerca de 24 horas numa estufa de secagem Memmert © de 2200 W a 105°C , e foram novamente pesados.

Definindo-se θ_v como o volume de água (V_{ag}) contido na unidade de volume de solo (V_s), pode-se converter as massas de água e de solo em volume, através dos valores da massa volúmica da água ($\rho_{\text{ag}} \approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$) e da massa volúmica aparente do solo ($\rho_{\text{ap,s}}$) em $\text{kg}_{\text{solo}} \text{ m}^{-3}_{\text{solo}}$:

$$\theta_v = \frac{V_{ag}}{V_s} = \frac{\frac{M_{ag}}{\rho_{ag}}}{\frac{M_s}{\rho_{ap,s}}} = \frac{M_{ag}}{M_s} \times \frac{\rho_{ap,s}}{\rho_{ag}} = \theta_m \times d_{ap,s} \quad (27)$$



Figura 19 - Recolha de amostras para futura medição do solo pelo método do cilindro de volume conhecido, no local do ensaio.

3.3.4. Determinação da capacidade de campo

A determinação da capacidade de campo foi feita segundo Walker (1989), no dia 24 de Fevereiro de 2018, de madrugada, da seguinte forma:

1. Limpou-se uma zona do solo de 30 cm x 50 cm de toda a vegetação (para evitar a transpiração e conseqüente retirada de água do solo) (Figura 20);



Figura 20 - Ensaio de medição da capacidade de campo - limpeza da vegetação prévia ao encharcamento.

2. Encharcou-se o solo abundantemente, tapando-o com um plástico aderente (Figura 21) para evitar a evaporação. O plástico foi enterrado nas bordas de modo a não deixar entrar vapor de água.



Figura 21 - Ensaio de medição da capacidade de campo - encharcamento e isolamento do local.

3. Esperou-se apenas 24 horas (por se tratar de um solo de textura grosseira, arenoso), 25 de Fevereiro de 2018, para garantir que se daria a drenagem do excesso de água;
4. Recolheram-se 4 amostras de solo (Figura 22), que foram acondicionadas em sacos de plástico com um nó, seladas e guardadas numa geleira, de forma a diminuir as perdas de água por evaporação.



Figura 22 - Solo arenoso que foi objeto de estudo para a determinação da capacidade de campo, um dia depois de encharcado. Amostras recolhidas nas zonas numeradas a vermelho.

5. No laboratório, as amostras foram colocadas em pesa-filtros de alumínio, que haviam sido pesados vazios, e que, depois de pesados novamente com cada amostra, foram colocados numa estufa de secagem (Memmert © 2200 W) a 105°C durante 24 horas.

3.3.5. Distribuição espacial das raízes no solo

A distribuição espacial das raízes no solo foi feita no dia 5 de Julho de 2017, recorrendo à recolha de várias amostras no espaço em dois tomateiros, de linhas diferentes, em cubos distribuídos aleatoriamente.

Foram recolhidas amostras de solo na zona ocupada pelo sistema radicular de cada tomateiro nos seguintes pontos (onde o eixo do XX' é a distância na linha, o eixo de YY' é a distância na entre-linha e o eixo de ZZ' é a profundidade):

Quadro 5 - Localização no espaço da recolha de seis amostras de raízes no solo no Tomateiro 1 e sete amostras de raízes no Tomateiro 2

Tomateiro 1			
Amostra	XX'	YY'	ZZ'
1	0-10cm	0-10cm	0-10cm
2	10-20cm	40-50cm	0-10cm
3	10-20cm	0-10cm	10-20cm
4	30-40cm	40-50cm	20-30cm
5	40-50cm	40-50cm	20-30cm
Tomateiro 2			
Amostra	XX'	YY'	ZZ'
1	0-10cm	0-10cm	0-10cm
2	10-20cm	40-50cm	0-10cm
3	10-20cm	40-50cm	0-10cm
4	20-30cm	40-50cm	20-30cm
5	40-50cm	40-50cm	20-30cm

1. As amostras de solo (previamente pesadas) com as raízes foram colocadas em recipientes de vidro pyrex (Figura 23) e deixadas 24 horas na estufa de secagem (Memmert © 2200 W) a 65°C, temperatura à qual a matéria orgânica, neste caso, das raízes, não é degradada.
2. Depois de esperadas as 24 horas, os recipientes foram novamente pesados;
3. Foram separadas e pesadas, para cada amostra, as raízes de cada, aferindo qual a percentagem de raízes do total das raízes para aquelas coordenadas.



Figura 23 - Amostras de raízes retiradas do local em estudo, selecionadas para pesagem.

3.3.6. Ciclo de stress – indicadores de estado hídrico e coeficiente de stress

Com o objetivo de verificar se as plantas teriam uma resposta ao stress semelhante à obtida em estudos anteriores na mesma região (Ferreira Gama, 1987), e de avaliar a dependência de água dada pelo sistema de rega gota-a-gota, foi colocada, durante 9 dias (de 12 a 20 de Julho de 2017), uma linha no comprimento de 3 m sob stress hídrico, cortando a rega para esse espaço (a zona sob stress parte do local de corte até à cabeceira da linha), na parcela do local 2. Para garantir que não havia absorção radicular das plantas a serem analisadas, foram também colocadas sob stress as linhas laterais à linha em análise (Figura 24).

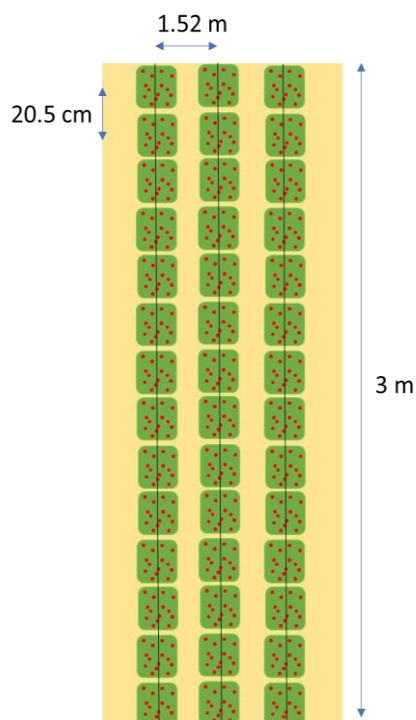


Figura 24 - Representação do ensaio de Stress Hídrico efetuado sobre 3 linhas de tomateiros em Salvaterra

Para poder acompanhar visualmente a resposta das plantas ao stress a que haviam sido submetidas, e para mostrar que as plantas estavam, efetivamente, em stress, foram tiradas fotografias, para mostrar a evolução da reação da planta, e foram ainda feitas medições de indicadores de stress hídrico, como descrito nos pontos seguintes.

3.3.6.1. Medição do estado hídrico do solo

Foram feitas sete recolhas de amostras de solo com sonda de solo durante nove dias seguidos (interrompendo apenas no fim-de-semana por ser impossível, para as condições necessárias à análise, ir a um laboratório), junto à linha do meio. Em cada dia de recolha, foram tiradas amostras, com uma sonda de solo graduada, três repetições por local nas profundidades das camadas 0-15 cm, 15-25 cm, 25-35 cm e 35-45 cm. Foram então analisadas 12 amostras por dia, e 84 amostras no final do período de stress.

Estas amostras foram condicionadas em sacos de plástico próprios para a conservação das amostras, devidamente identificados e fechados, e guardadas numa geleira, de forma a diminuir as perdas de água por evaporação. Por esta mesma razão a recolha foi efetuada de manhã, altura do dia de menor temperatura e que permitia levar as amostras, no mesmo dia, para o laboratório.

Foram também recolhidas três amostras numa parcela regada, pelo mesmo método, no último dia do ciclo (dia em que se esperava encontrar valores mais baixos do teor de água no solo sob stress, θ_{vs}), para aí poder determinar o teor de água no solo em conforto, θ_{vc} , e o poder comparar com θ_{vs} .

3.3.6.2. Medições do potencial foliar e do ramo

Na linha central colocada sobre stress hídrico, foram feitas medições do potencial hídrico no ramo e na folha recorrendo a uma câmara de pressão de Scholander, que segundo Boyer (1967) permite avaliar o potencial da água através da pressão da seiva no xilema, aquando submetida a folha a uma pressão variável. As medições foram feitas nos dias 19 e 20 de Julho de 2017 (últimos dias do ciclo de stress).

As medições da câmara de pressão foram feitas ao meio-dia solar, correspondente às 13h45 (na impossibilidade logística de medir o potencial de base). A câmara foi colocada por cima de um escadote estável, à sombra, com a botija de gás (azoto) estavelmente ao lado. O procedimento utilizado foi o descrito seguidamente:

1. Preparação das amostras para a medição do potencial no ramo: foram envoltas em folha de alumínio e colocadas dentro de um saco folhas do tomateiro em stress, e folhas de tomateiro regado, uma hora antes do meio-dia solar. Estas folhas

deveriam ser adultas e saudáveis, não apresentando necroses ou recortes no limbo. As folhas ficaram, assim, durante uma hora sem qualquer interferência.

2. Ligou-se o tubo da câmara à garrafa enroscando; e a outra ponta do mesmo à câmara de pressão; fechou-se a válvula da purga (de modo a evitar a libertação do gás) e abriu-se a válvula da botija de gás.
3. Recolha das amostras: para além das folhas envoltas em papel de alumínio, foram também recolhidas folhas para a medição do potencial hídrico na folha, na mesma linha de stress e em tomateiro regado, acabou por não ser utilizado o mesmo número de amostras para cada caso por ser impossível recolher amostras em condições para serem avaliadas. Foi então recolhido o seguinte número de amostras para cada caso:

Quadro 6 - Recolha de amostras para posterior medição do potencial hídrico em tomate regado e em tomate submetido a stress hídrico

Variável a analisar	Data de recolha	Nº de amostras	Estado hídrico
Potencial ramo	19/07/2017	8 folhas	Tomate em stress
	20/07/2017	6 folhas	
	20/07/2017	6 folhas	Tomate regado
Potencial folha	19/07/2017	6 folhas	Tomate em stress
	20/07/2017	6 folhas	
	19/07/2017	6 folhas	Tomate regado
	20/07/2017	6 folhas	

4. Cada folha escolhida foi cortada do tomateiro pelo pecíolo num corte transversal feito com uma lâmina, assegurando que este tinha o tamanho suficiente à observação da reação da planta ao aumento de pressão. Quando tal não acontecia, rasgou-se a folha com a lâmina até conseguir o comprimento de pecíolo desejado.
5. Medições e leitura: assim que cortada, a folha foi colocada de imediato na rolha, vedando com terostato (massa plástica vedante), de modo que não deixar escapar ar, e a rolha colocada de seguida na tampa da câmara de pressão com o corte do pecíolo do lado de fora da tampa, à vista. Fechou-se a tampa e deixou-se admitir o gás. A taxa de admissão de azoto foi regulada, permitindo uma observação mais

precisa dos valores marcados pelo manómetro quando observado que no pecíolo, no local do corte, aparecia uma gota – altura em que registou a leitura do potencial. No momento em que tal foi verificado, fechou-se o botão de admissão, registou-se o valor marcado pelo manómetro, e, posteriormente, deixou-se libertar o gás. Tendo sido removida tanto a tampa como a folha da rolha, o processo foi então repetido as vezes necessárias. Todas as medições foram efetuadas diminuindo a taxa de admissão de gás, assim que os valores do manómetro se aproximavam da média de valores habituais/já verificados, de modo a conseguir uma melhor precisão nos valores observados

6. No final das medições retirou-se o tubo da câmara, desligou-se a válvula da botija de gás, e ligou-se a válvula da purga (de modo a libertar o gás que existia ainda na mangueira).

3.3.6.3. Medição da condutância estomática

Do mesmo modo que foram feitas medições do potencial hídrico da folha, foram também feitas medições da condutância estomática das folhas – indicador da resposta da planta ao stress hídrico (McDermitt, 1990) - no dia 19 de Julho, penúltimo dia do ciclo de stress a que a planta foi submetida. Não foram feitas novas medições no dia seguinte, por se ter percebido que as medições não eram passíveis de ser utilizadas, como será explicado no capítulo IV.

As medições, foram feitas utilizando um porómetro “steady-state”, LI-COR 1600, de medição direta da condutância estomática, da transpiração, a radiação solar, a humidade relativa, a temperatura da folha, a temperatura da cuvete e o fluxo de vapor de água (LI-COR Inc., 1989).

As medições foram realizadas ao meio dia solar, isto é, às 13h45, altura de pico da radiação solar. O dia escolhido foi um dia de céu limpo sem nuvens, para que o comportamento da abertura estomática pudesse corresponder ao comportamento normal da cultura.

3.3.6.4. Estimar o coeficiente de stress K_s

De modo a poder perceber como o stress hídrico afetou a evapotranspiração das plantas que foram submetidas a stress hídrico, foi calculado o coeficiente de stress – e feita uma comparação tendo em conta as amostras de solo recolhidas durante o ciclo de stress, e os valores de ET_0 obtido pela equação de Penman-Monteith – por duas metodologias, a do boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998) (equação 18) e pela equação experimental obtida por Ferreira Gama (1987) (equação 22).

3.4. A equação de Penman-Monteith para determinar ET_o.

Calculou-se ET_o, a partir da equação de Penman-Monteith (equação 2), para uma cultura de referência (com altura de 0,12 m, resistência de superfície de 70 s/m e albedo igual a 0,23).

3.5. Balanço hídrico no solo

O balanço hídrico é o balanço de massa ou volume de água entre as saídas e entradas de água no solo. Assim, é possível prever a variação do armazenamento de água no solo sabendo as entradas (precipitação e rega) e as saídas de água (evapotranspiração, drenagem e escoamento superficial) no mesmo.

Para aplicar a equação do balanço hídrico no sentido de estimar o teor de água no solo, cujo valor extraímos de A_z, e comparar com as observações diretas é necessário conhecer ou estimar os restantes termos da equação 24.

Obtém-se $\theta_{\text{vestimado}}$ pela equação:
$$\theta_{\text{vestimado}} = \frac{A_z}{z_r} \quad (28)$$

onde z_r é a profundidade radicular.

As diferenças entre o valor de $\theta_{\text{vestimado}}$ e θ_{vmedido} permitirão, posteriormente, ajustar um valor de K_c - principal objetivo desta dissertação - que melhor represente a realidade, partindo de valores estudados para a cultura e regiões em causa, isto é, um valor para o qual se consiga uma menor diferença entre os valores de $\theta_{\text{vestimado}}$ e θ_{vmedido} .

Os caudalímetros forneceram os dados das dotações diárias aplicadas no solo, ou seja, forneceram os dados da rega que entram na equação do balanço hídrico.

Os dados da precipitação foram facultados pela Estação meteorológica da Barragem de Magos.

ET_c foi determinada como descrito no ponto seguinte, 3.5.1.

A determinação da capacidade de campo permitiu inferir um limite a partir do qual toda a água que entra no solo é perdida sob a forma de drenagem.

Analisando o comportamento do teor de água no solo durante os últimos dias de stress e tendo também em conta os valores estabelecidos na literatura, assumiu-se o valor de 2% para o coeficiente de emurchecimento (vide Figura 10).

3.5.1. ET_c estimada

Dado que uma das entradas no balanço hídrico é a evapotranspiração cultural, foi necessário conhecer ET_o, para depois, usando K_c se chegar a ET_c, como demonstrado na equação 16.

O cálculo da evapotranspiração de referência pela equação de Penman-Monteith (equação 2) é feito tendo em conta variáveis meteorológicas como referido em 2.6.1.

Para estimar a evapotranspiração cultural, foram utilizados dois valores K_c , para a cultura do tomate, o valor tabelado em Allen et. al (1998), $K_{c1}=1,15$, e o valor medido pelo método aerodinâmico simplificado durante 143 dias em dois anos de medição por Ferreira Gama (1987), para a mesma região e cultura - K_{c2} , que serviram para o cálculo de Az_1 e Az_2 , isto é, a água acumulada no solo para cada dia, tendo em conta a precipitação, rega e evapotranspiração do próprio dia, a água acumulada e a drenagem do dia anterior, e um escoamento nulo. Destes valores de Az_1 e Az_2 , posteriormente chegou-se a dois valores para o teor de água estimado $\theta_{v\ est1}$ e $\theta_{v\ est2}$, para serem depois comparados com $\theta_{v\ medido}$ na tentativa de tirar conclusões sobre o valor de K_c que mais se ajusta.

3.7. Delineamento experimental

Em síntese, começou-se por se escolher uma exploração que tivesse sondas de solo instaladas, que permitem perceber a dinâmica da água no solo a determinadas profundidades contribuindo para um aconselhamento de rega (dotações de rega e variáveis meteorológicas).

Escolhidas as sondas a serem analisadas, foram feitas recolhas de amostras de solo desde o dia 29 de Maio até ao dia 20 de Julho, início da colheita, periodicamente, junto de cada um destes sensores, para depois se determinar o teor de água no solo. Recorreu-se a medições de massa volúmica aparente do solo (necessária à determinação do teor de água no solo em unidades de volume), e capacidade de campo (para, juntamente com o ponto de emurchecimento permanente poder conhecer a reserva útil do solo). Foi assim possível obter determinação do teor de água no solo pelas duas metodologias: a que teve como base a recolha de amostras, e a do método do balanço hídrico. Foram recolhidas ainda amostras de solo para analisar a continuidade da distribuição das raízes.

Adicionalmente, no final da campanha, foi submetida uma parte da parcela a um ciclo de stress, para poder, dentro do possível, comparar a resposta das plantas a estudos prévios feitos na mesma região por Ferreira Gama (1987).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Massa volúmica aparente do solo

O ensaio da massa volúmica aparente do solo, com base em quatro amostras (Quadro 7), permitiu chegar a uma massa volúmica aparente do solo de $1,50 \pm 0,10 \text{ g/cm}^3$, que vai corresponder a um valor de 1,5 para o que tradicionalmente se designava de densidade aparente (adimensional).

Quadro 7 - Resultados da determinação da massa volúmica aparente dos solos do local de estudo

Amostra	M_{cilindro} (g)	$M_{\text{cilindro + solo}}$ (g)	Massa volúmica relativa	ρ aparente (g/cm^3)
A1	302,55	749,64	1,46	1,46
A2	346,71	807,47	1,64	1,64
A3	352,91	737,43	1,36	1,36
A4	305,02	756,91	1,55	1,55
			Média	1,50
			Desvio Padrão	0,10

Os valores calculados encontram-se dentro dos valores previstos por Vermeiren e Jobling (1997) e por Madeira e Ricardo (2013) para solos arenosos.

4.2. Capacidade de campo

O ensaio para a determinação da capacidade de campo, com base em quatro amostras (Quadro 8), permitiu chegar a um teor de água à capacidade de campo de $0,13 \pm 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Quadro 8 - Resultados da determinação da capacidade de campo dos solos do local de estudo, com base na recolha de quatro amostras

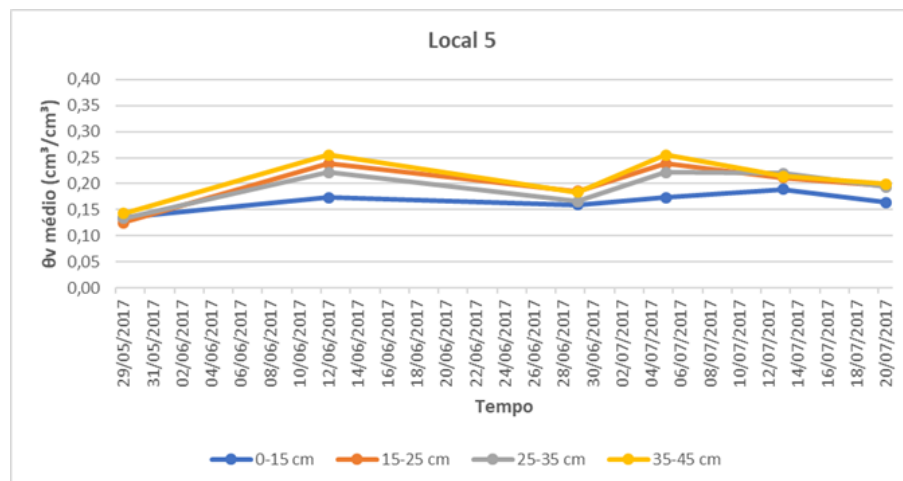
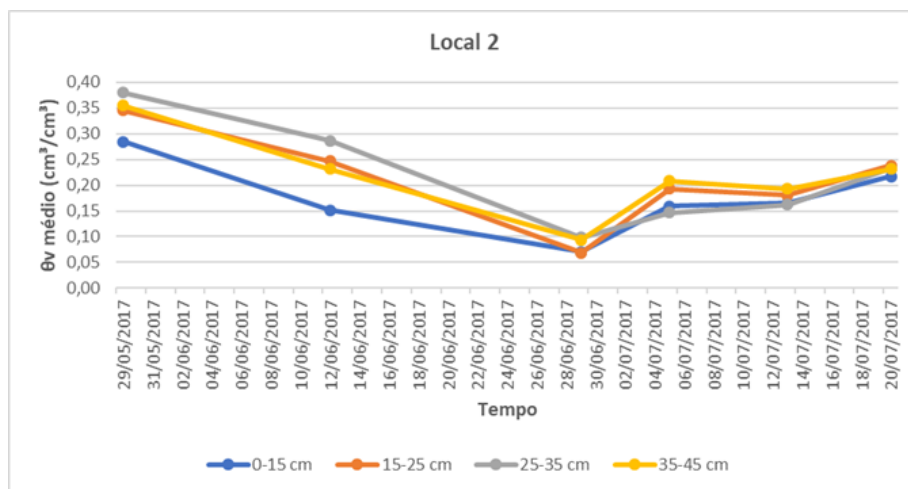
Amostra	$M_{\text{pesa filtro}}$ (g)	$M_{\text{pesa filtro + solo húmido}}$ (g)	$M_{\text{solo húmido}}$ (g)	$M_{\text{pesa filtro + solo seco}}$ (g)	$M_{\text{solo seco}}$ (g)	$M_{\text{água}}$ (g)	θ_m (g/g)	θ_{cc} (cm^3/cm^3)
A1	52,12	193,99	141,87	180,72	128,6	13,27	0,10	0,15
A2	29,7	117,49	87,79	111,04	81,34	6,45	0,08	0,12
A3	34,97	167,9	132,93	158,59	123,62	9,31	0,08	0,11
A4	30,39	191,61	161,22	178,98	148,59	12,63	0,08	0,13
							Média	0,13
							Desvio Padrão	0,02

Os valores determinados são coerentes com os referidos por Allen et al. (1998), que, para solos de textura arenosa, sugerem que o teor à capacidade de campo se encontra entre 0,07 e 0,17 m³/m³.

4.3. Estado hídrico do solo

Os dados relacionados com o teor de água do solo, medidos pelas sondas pertencentes à empresa de rega consultada (Anexo 1), apresentaram uma dinâmica de difícil análise, resultado de uma origem da calibração dos sensores por nós desconhecida e que, por sua vez, não nos permite explicar os valores absolutos do teor de água ou da relação com os teores de água no solo na saturação, tendo um valor meramente indicativo em termos de dinâmica.

Pela observação do teor de água no solo obtido com base nas amostras de solo recolhidas ao longo do período de estudo, nos quatro locais (Figuras 25 a,b,c e d) é possível afirmar que o teor de água no solo é bastante alto, face ao teor à capacidade de campo, para estes solos, o que permite deduzir que, após rega, o solo se mantém regularmente acima da capacidade de campo, sendo grande parte da água aplicada perdida por drenagem.



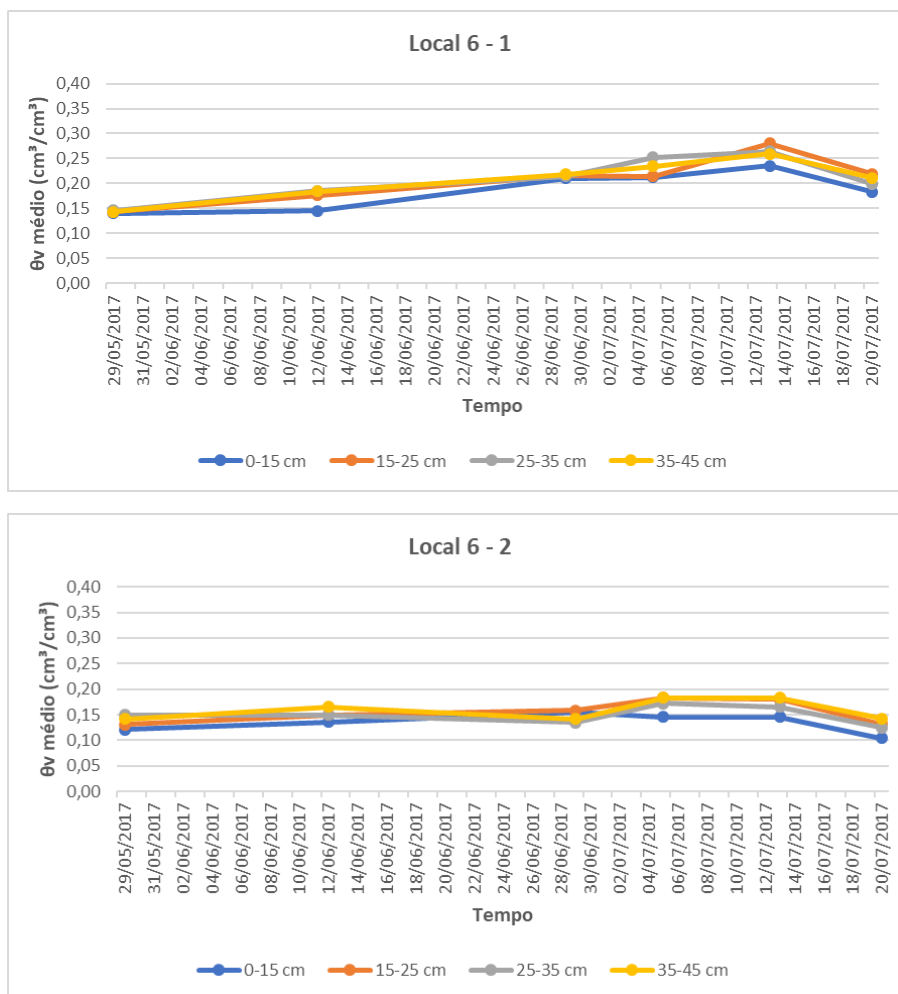


Figura 25 - Teor de água no solo médio para cada profundidade de recolha, no local 2 (a), local 5 (b), local 6-1 (c) e local 6-2 (d) ao longo do período de estudo, de 29 de Maio de 2017 a 20 de Julho de 2017. Cada ponto corresponde à média de três repetições.

4.4. Dotações de rega

Verificou-se uma grande dispersão nas dotações de rega medidas para os diferentes locais, como pode ser observado na Figura 26. Esta dispersão é observada (ainda que em menor escala relativamente aos outros locais) mesmo nos locais 6-1 e 6-2. A admitir que os caudais estão reportados a uma área unitária e que os valores são comparáveis, as dinâmicas seriam semelhantes nestes dois locais, e as diferenças podem ser devidas, à existência de fuga entre os dois locais de medição ou diferenças apreciáveis de pressão nas tubagens. O local 2 distingue-se dos outros por aparentes faltas de rega ou falhas no registo.

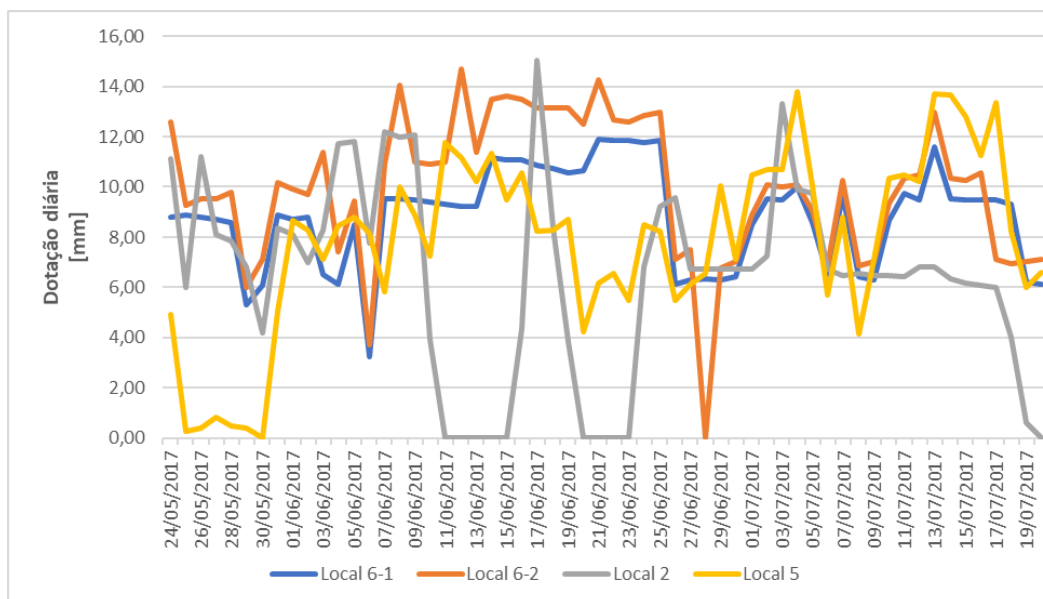


Figura 26 - Dotação diária nos locais: 2, 5, 6-1 e 6-2.

Os valores médios de dotação para os quatro locais (Figura 27) situam-se à volta de 8 mm por dia com variações entre cerca de 4 a 12 mm por dia. Esta mesma figura permite observar que não se notam grandes variações sazonais, não se tendo identificado em média (exceção do local 2) nenhuma redução como as tipicamente observadas nas últimas semanas prévias à colheita (a 20 de Julho) para o aumento do teor de sólidos solúveis no fruto.

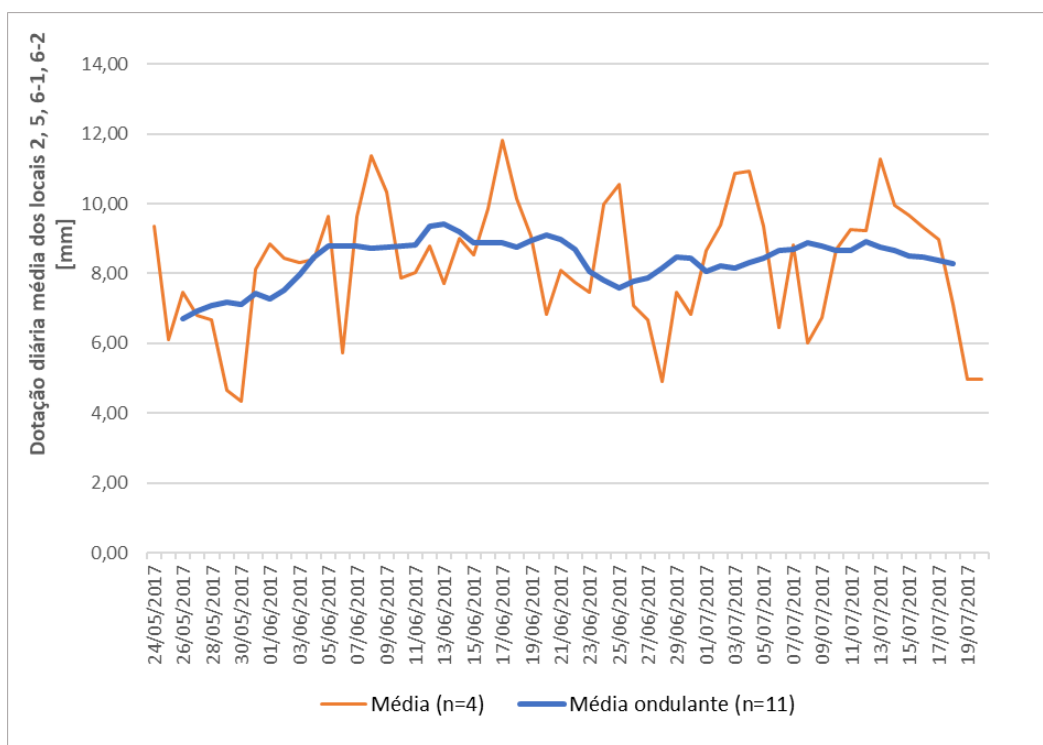


Figura 27 - Valores médios de dotação diária (n=4) e média ondulante (n=11) dos locais 2, 5, 6-1, 6-2

4.5. Distribuição espacial das raízes no solo

Admitiu-se o sistema de eixos para os pontos de amostragem demonstrado na Figura 28.

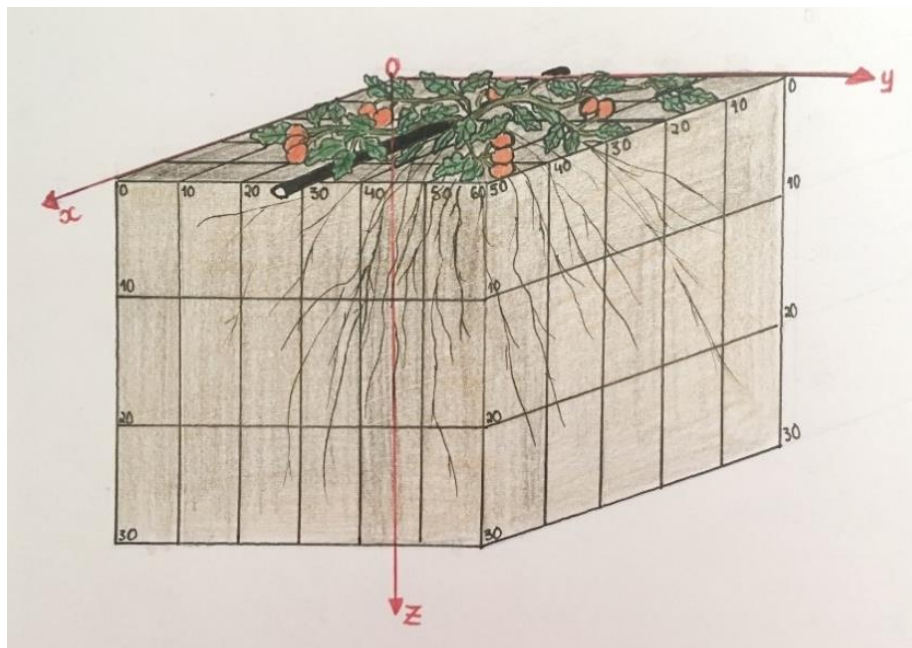


Figura 28 - Distribuição espacial das raízes no solo

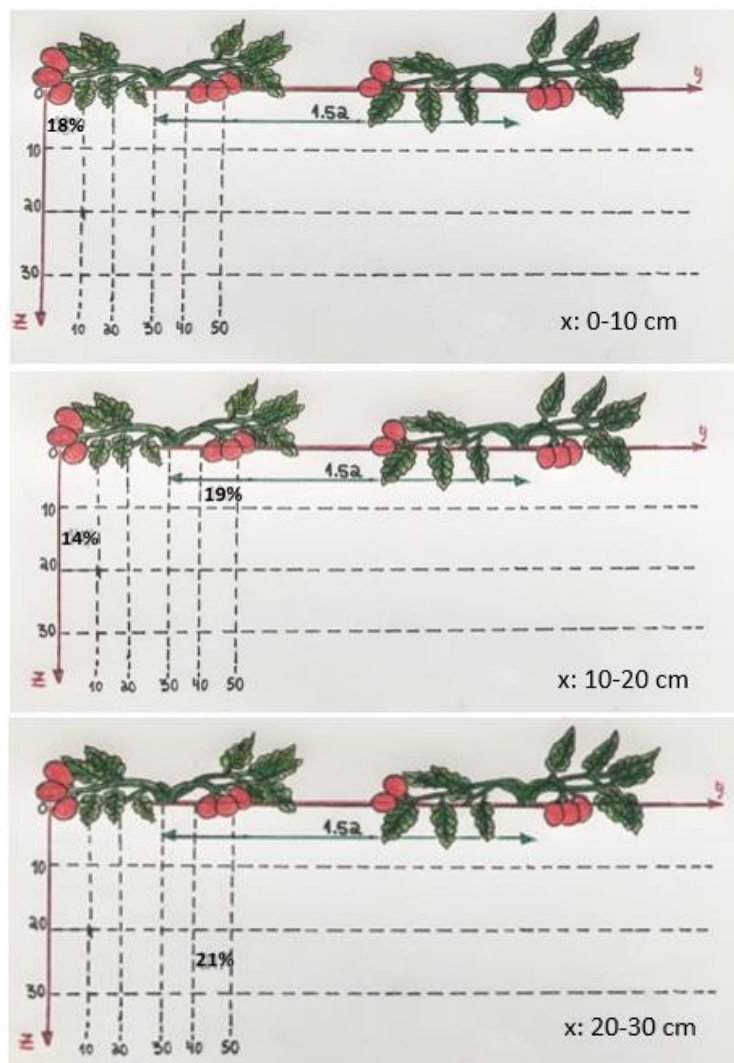
Os resultados da distribuição espacial da massa de raízes nas várias posições em relação à planta foram expressos em percentagem de raízes em cada amostra face à massa total de raízes recolhidas para cada tomateiro e encontram-se descritos no Quadro 9.

Quadro 9 - Percentagem da massa radicular de cada amostra face à massa total radicular recolhida em cada tomateiro, nos diversos pontos de recolha

Tomateiro 1							
xx	yy	zz	mpirex (g)	mpirex+solo (g)	msolo seco (g)	mraízes (g)	%
0-10cm	0-10cm	0-10cm	68,44	318,02	249,58	69,13	18%
10-20cm	0-10cm	10-20cm	62,48	356,76	294,28	62,66	16%
10-20cm	40-50cm	0-10cm	74,43	239,05	164,62	74,6	20%
30-40cm	40-50cm	20-30cm	72,21	241,82	169,61	72,36	19%
40-50cm	40-50cm	20-30cm	101,02	414,83	313,81	101,32	27%
Total						380,07	100%
Tomateiro 2							
xx	yy	zz	mpirex (g)	mpirex+solo (g)	msolo seco (g)	mraízes (g)	%
0-10cm	0-10cm	0-10cm	73,48	197,16	123,68	73,58	21%
10-20cm	40-50cm	0-10cm	73,72	259,02	185,3	74	21%
10-20cm	40-50cm	0-10cm	68,13	229,44	161,31	70,32	20%
20-30cm	40-50cm	20-30cm	73,89	279,46	205,57	74	21%
40-50cm	40-50cm	20-30cm	101,02	296,83	195,81	61,84	17%
Total						353,74	100%

Embora não se esperasse grande variação na distribuição radicular na linha, optou-se mesmo assim por observar a distribuição radicular ao longo do eixo XX' (na linha das plantas e gotejadores, estes a 25 cm da linha das plantas), tendo em conta o tipo de sistema de rega gota-a-gota. Observou-se também a distribuição em relação à distância à linha (YY') e na vertical (ZZ') até onde foi viável. Representou-se, a várias profundidades, a distribuição radicular nas distâncias y : 0-10 cm e y :40-50 cm (Figura 29 a, b, c, d, e), sendo possível prever que, dado que não há grandes variações da mesma ao longo dos 30 cm que separam estes dois pontos de amostragem e a densidade até aumenta a 40-50 cm, não haverá também grandes diferenças nos outros 30 cm que se afastam do ponto y : 40-50 cm e se aproximam do eixo central.

Pode-se, assim, inferir que existe uma distribuição relativamente uniforme das raízes na entre-linha (eixo YY') até à profundidade analisada.



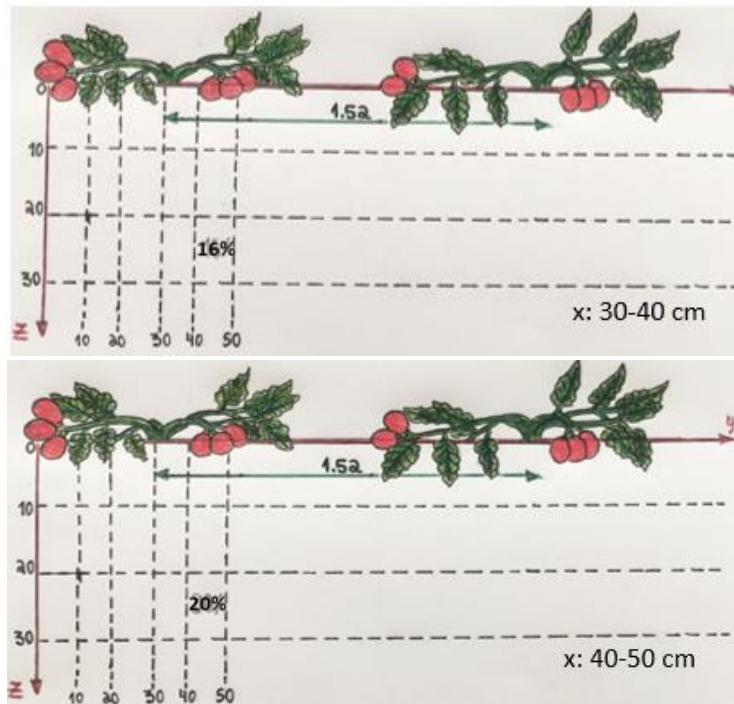
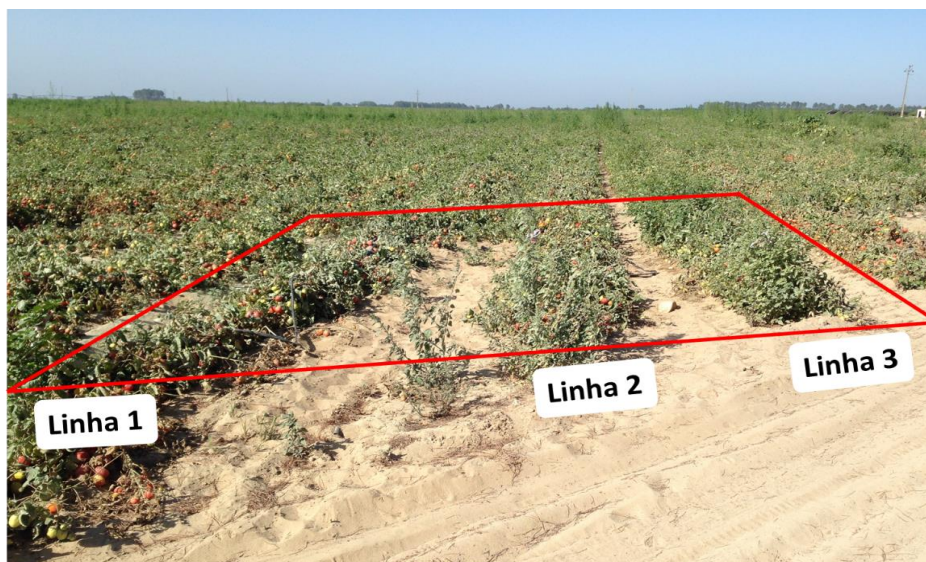


Figura 29 - Percentagem das amostras recolhidas no sistema radicular a x:0-10 cm (a), x:10-20 cm (b), x:20-30 cm (c), x:30-40 cm (d), x:40-50 cm (e).

4.6. Ciclo de stress – indicadores de estado hídrico e coeficiente de stress

Para poder avaliar a resposta das plantas ao stress, para além das medições cujos resultados serão analisados nos pontos que se seguirão, foram também tiradas fotografias ao longo do ciclo de stress (9 dias):



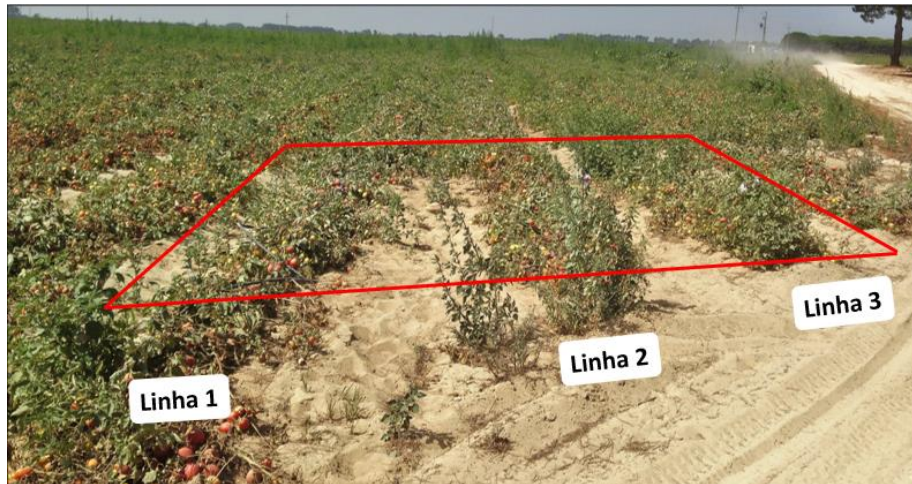


Figura 30 - Fotografias tirada a 14-07-2017, no 3º dia do ciclo de stress (a) e no dia 17-07-2017, no 6º dia do ciclo de stress (b), numa linha de 3 metros sob stress durante 9 dias, em Muge, Salvaterra de Magos.

A resposta fisiológica da planta foi visível, mas muito discretamente, logo no 3º dia do ciclo de stress (Figura 30 a), e também no 6º dia (Figura 30 b), sobretudo ao nível das folhas, que apresentam um tom mais acastanhado e acinzentado que as de fora do perímetro vermelho, que delimita a zona que foi colocada sob stress. A linha que apresenta uma resposta mais acentuada é, como seria de esperar, a linha 2, porque as raízes não conseguem absorver água proveniente da rega lateral, das fitas de rega 1 e 3, em que a rega foi também cortada naquela zona.

4.6.1. Estado hídrico do solo durante o ciclo de stress

Verificou-se uma diminuição do teor de água no solo ao longo do ciclo de stress hídrico (Figura 31), chegando este, no dia 20 de Julho, a um teor mínimo de $0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, que assumimos ser o teor no coeficiente de emurchecimento θ_{CE} , por ser o valor mínimo da gama de valores de θ_{CE} segundo Allen et. al (1998) para solos arenosos e o valor mínimo aceitável segundo Pacheco (2018), para um $\theta_{CC}=0,13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Observa-se também uma diferença de aproximadamente $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, por comparação, deste valor com o obtido no mesmo dia, numa linha de tomateiros que foram sempre mantidos em conforto hídrico (Figura 31).

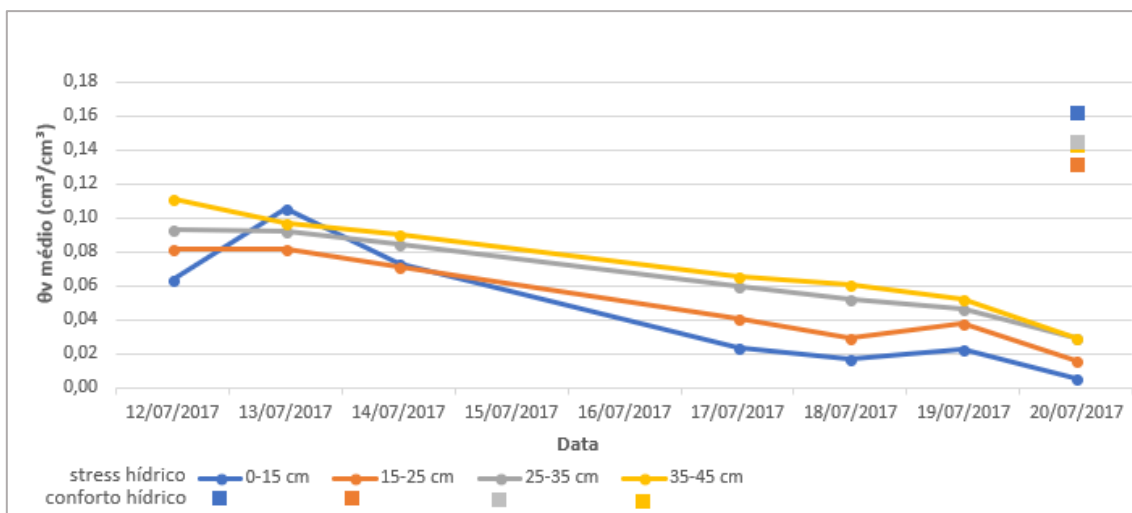


Figura 31 - Teor de água no solo médio, para cada profundidade de recolha, durante o período do ciclo de stress, e comparação com o teor de água no solo médio para cada profundidade, medido em conforto hídrico.

4.6.2. Potencial foliar e do ramo

A Figura 32 resume os resultados da medição do potencial hídrico médio medido em folhas e raminhos de tomateiros em conforto hídrico e tomateiros submetidos em stress nos últimos dias do ciclo, na tentativa de observar se haveriam diferenças significativas entre os dois e relacionar estas variáveis com outros indicadores.

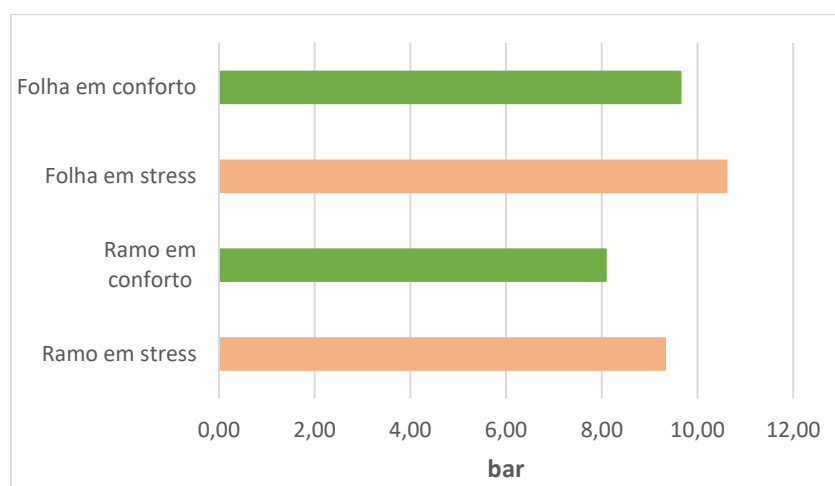


Figura 32 - Comparação do potencial hídrico médio (n=2) medido nos dias 19 e 20 de Julho de 2017, na folha e no ramo, em tomateiros em conforto hídrico vs tomateiros em stress.

O gráfico mostra uma pequena diferença entre a situação em conforto e em stress, o que sugere que esta variedade de tomate tem um comportamento isohídrico, pelo que a variável potencial hídrico medido ao meio dia solar, quer no ramo quer na folha, não é recomendada para avaliar os efeitos de stress hídrico. Por outro lado, a diferença entre as medições na folha e ramo sugerem uma ligeira vantagem na medição no ramo, uma vez que a diferença entre os dois tomateiros é maior no ramo.

Considerando a dinâmica entre os dois dias, houve um decréscimo do potencial no ramo de $9,25 \pm 1,62$ para $9,32 \pm 1,33$ bar. Esta é uma variação pouco significativa entre os dois dias observados no final do ciclo. Para comparação com estes valores, observou-se, na parcela regada, um potencial hídrico, no ramo, no dia 20 de $8,08 \pm 0,98$ bar. O potencial da folha e no tomateiro em conforto apresentou um valor muito semelhante ao do tomateiro submetido a stress no dia 20 de Julho: 11,04 versus 11,79.

A percentagem de reserva útil, RU, foi calculada tendo em conta o valor da capacidade de campo medido, 13%, e o valor estimado do coeficiente de emurchecimento de 2%. Obtiveram-se os resultados apresentados nas Figuras 33 (a) e (b). Os valores entre 8 a 11 de Julho foram estimados por extrapolação admitindo um declive constante desde a primeira fase do ciclo (corte total de rega) até ao pleno preenchimento da RU. Admite-se assim o dia 8 como o início virtual do ciclo para efeitos de cálculo (para poder considerar que o défice de água no solo fique numericamente igual ao consumo acumulado desde essa mesma data).

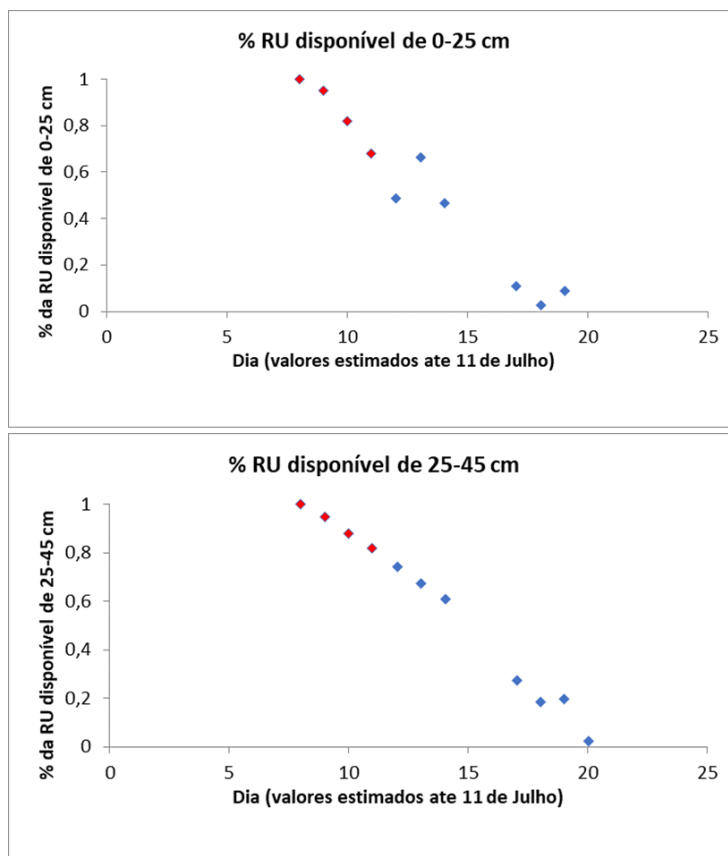


Figura 33 - Percentagem da reserva útil disponível nas profundidades 0-25 cm (a) e 25-45 cm (b) no período de 8 a 20 de Julho de 2017 (os valores de 8 a 11 de Julho são estimados por extrapolação, ver texto).

Observou-se que a variabilidade espacial é demasiado elevada e que o número de pontos amostrados ($n=4$) é demasiado baixo para tal heterogeneidade (deveria ter havido mais repetições), o que limita a análise em valores absolutos, mas permite uma compreensão da

dinâmica da água no solo. Note-se que estes valores, podendo não ser inteiramente representativos da parcela, fazem sentido e dentro de restrições à sua interpretação, permitem a comparação com um coeficiente de stress K_s estimado (*vide* ponto 4.6.4).

4.6.3. Condutância estomática

Tal como indicado em 3.3.7.3., devido às aplicações de caulino na cultura, de modo a evitar o escaldão do fruto, as folhas das plantas apresentaram condutâncias estomáticas muito difíceis de interpretar (Quadros), com dispersões muito elevadas. Por exemplo, nas folhas dos tomateiros em conforto hídrico observou-se uma condutância estomática de $337 \pm 255 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e nas folhas de tomateiros submetidos a stress observaram-se valores de $270 \pm 235 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Estes valores elevados de desvio padrão não sugerem diferenças significativas entre os dois tipos de tomateiro, pelo que não são conclusivos. Os valores elevados de desvio padrão poderão dever-se a uma maior presença de caulino numas folhas comparadas com outras.

Quadro 10 - Resultados das condutâncias registadas no porómetro LI-1600 em tomateiros sob stress (n=7) e em conforto (n=6), no dia 19 de Julho de 2017, oitavo dia do ciclo de stress.

Folhas em tomateiro sob stress		Folhas em tomateiro em conforto hídrico	
Medição 19/07/2017	Condutância ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Medição 19/07/2017	Condutância ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
1	369	1	99
2	108	2	435
3	50,4	3	122
4	58,6	4	122
5	610	5	807
6	94	6	437
7	603	Média	337,00
Média	270,43	Desv. padrão	254,82
Desv. padrão	234,95		

4.6.4. Modelação do coeficiente de stress

Procedeu-se à modelação de K_s pela equação 29 (Ferreira Gama,1987), Ferreira e Valancogne (1997) e 30 (Allen et al, 1998). O primeiro método de cálculo de K_s , $K_{s \text{ exp}}$, corresponde à seguinte equação, determinada experimentalmente para uma cultura de tomate regada por gravidade, na mesma região (Coruche):

$$\begin{cases} \text{se } 1 - 0,025 \times (Dpl - 4) < 1, & K_{FG} = 1 - 0,025 \times (Dpl - 4) \\ \text{se } 1 - 0,025 \times (Dpl - 4) \geq 1, & K_{FG} = 1 \end{cases} \quad (29)$$

Para usar o segundo método, proposto posteriormente para uma cultura qualquer, assumiu-se um valor de p, déficit permissível de 0,33 para tomate, ajustado em função de ET_c (Allen et al., 1998), valores médios do período de 8 a 11 de Julho, permitindo chegar a um valor de RFU de 16,20 mm.

$$\begin{cases} \text{se } \frac{RU - Dpl}{RU - RFU} < 1, & K_{s\text{FAO}} = \frac{RU - Dpl}{RU - RFU} \\ \text{se } \frac{RU - Dpl}{RU - RFU} \geq 1, & K_{s\text{FAO}} = 1 \end{cases} \quad (30)$$

Onde Dpl, depleção de água no solo sem rega, foi calculada da seguinte forma:

$$Dpl = ET_{a\text{ estimada dia } i} + \Sigma ET_{a\text{ corrigida dia } i-1} \quad (31)$$

onde: $ET_{a\text{ estimada dia } i} = ET_{c\text{ dia } i} \times K_{s\text{FAO dia } i-1} \quad (32)$

$$\Sigma ET_{a\text{ corrigida dia } i-1} = ET_{a\text{ corrigida dia } i-1} + \Sigma ET_{a\text{ corrigida dia } i-2} \quad (33)$$

$$ET_{a\text{ corrigida dia } i-1} = K_{s\text{FAO dia } i-1} \times ET_{a\text{ estimada dia } i-1} \quad (34)$$

Isto é, para evitar um cálculo iterativo, calcula-se o valor de K_s dia i usando o valor de K_s dia $i-1$. Nos cálculos usou-se o valor de K_c mais baixo, de entre os dois referidos (3.5.1), selecionado na secção seguinte (4.7.2).

Tendo sido calculados os vários valores de K_s por estes dois métodos (Anexo 8), obtiveram-se os seguintes resultados para o coeficiente de stress, que foram relacionados com os valores de água disponível expressos em percentagem da RU:

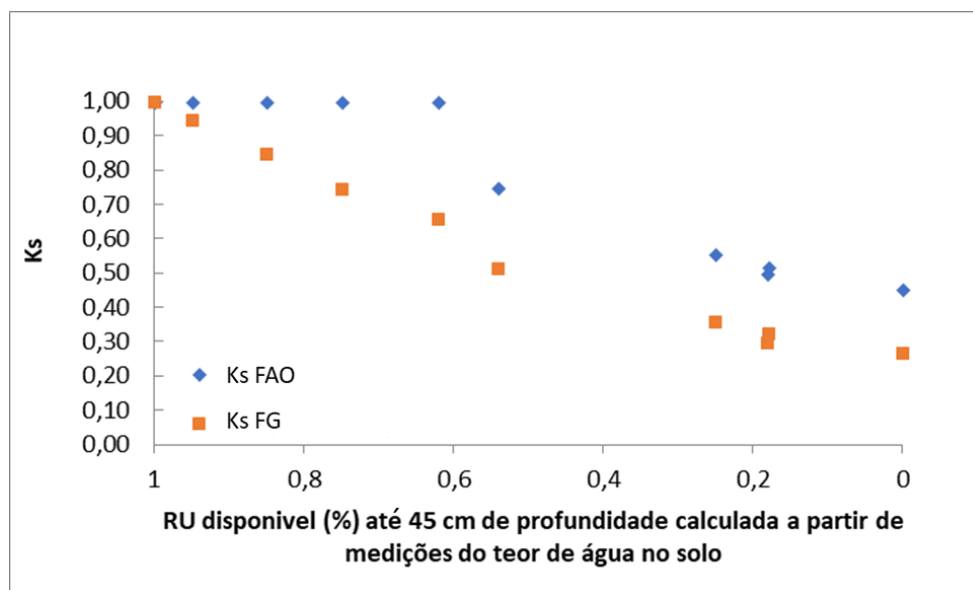


Figura 34 - Valores de K_s obtidos pelas equações apresentadas para as várias percentagens da reserva útil disponível até 45 cm de profundidade, para o período de 8 a 20 de Julho na parcela submetida a stress hídrico.

Pelo gráfico apresentado na Figura 34 podemos inferir que a planta continua a transpirar acima de 20% do máximo de ET_c em qualquer dos modelos apresentados, apesar de a RU estar aparentemente esgotada na camada onde se fizeram medições. Tais resultados demonstram que há raízes muito mais fundas a explorar o solo, apesar da condição quase permanente de solo em drenagem. Verifica-se também que os resultados tendo em conta apenas estes 45 cm, sendo semelhantes no final do ciclo, apresentam clara divergência na fase inicial, podendo a realidade situar-se entre estes limites de valores de K_s .

4.7. Balanço hídrico no solo durante o ciclo vegetativo

4.7.1. ET_o diário

Os dados de ET_o obtidos pela equação de Penman-Monteith (equação 2), baseados na Estação Meteorológica da rede do SNIRH (2018) tinham uma relação $y = 0,6127 x$, $R^2=0,17$, com uma série a que se teve acesso, facultada pela empresa de rega, baseada em dados meteorológicos. A grande dispersão e a grande diferença entre estes valores (40%) devem-se à incerteza nos dados das estações meteorológicas. Para tentar compreender esta diferença fez-se uma comparação dos dados meteorológicos para as quatro variáveis utilizadas na estimativa de ET_o , tendo-se verificado (Figura 35) haver alguma semelhança nas variáveis temperatura e humidade relativa do ar, mas bastante discrepância nas variáveis radiação solar e velocidade do vento.

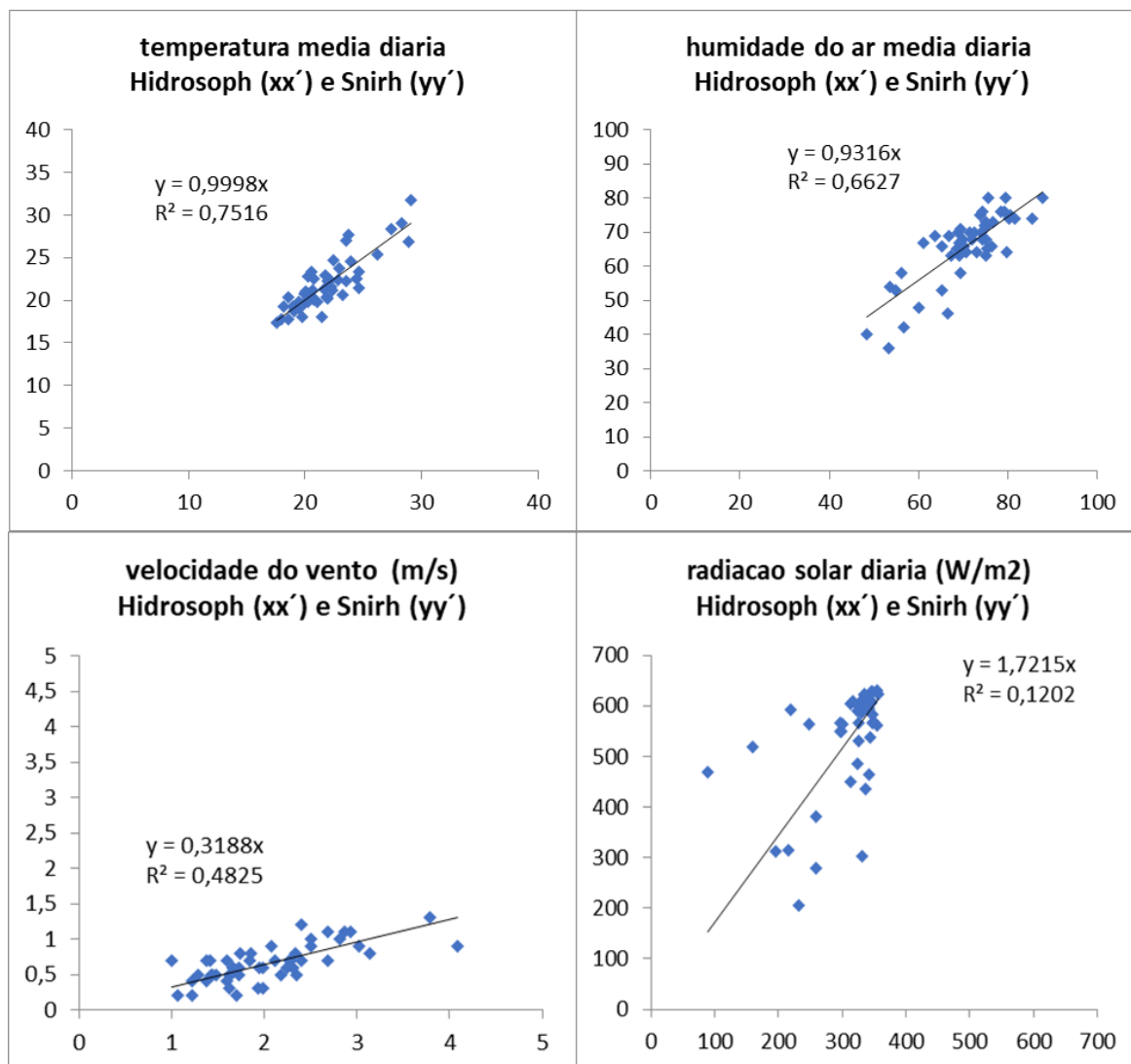


Figura 35 - Comparação dos dados meteorológicos para as variáveis utilizadas na estimativa de ETo, temperatura média diária (a), humidade do ar média diária (b), velocidade do vento (c) e radiação solar diária (d) entre os dados da rede do SNIRH e os dados da empresa de rega, Hidrosoph, para o período de 29 de Maio a 17 de Julho.

Não tendo sido totalmente clara a origem dos erros, mas tendo-se verificado que os dados da série SNIRH para a radiação não são possíveis (radiação medida acima da radiação máxima teórica à altitude de 25 m), optámos por considerar a série dos dados da empresa. Após essa diligência, os nossos resultados aproximaram-se dos da empresa, cujo algoritmo em pormenor desconhecemos. Os nossos cálculos originaram dados 7% superiores ($R^2 = 0,8$) pelo que os considerámos satisfatórios para as finalidades deste exercício.

Este problema serve para colocar em destaque a incerteza ligada à qualidade dos dados meteorológicos e à correcta manutenção dos equipamentos e condições de validade destes dados e, ainda, a necessidade de escolher uma localização adequada.

Com os dados de ET_o (Figura 36) foi então possível fazer o balanço hídrico no solo, em que a ET_c é um dos termos do balanço hídrico, permitindo estimar as variações totais no armazenamento de água no solo, depois convertidas em teor de água.

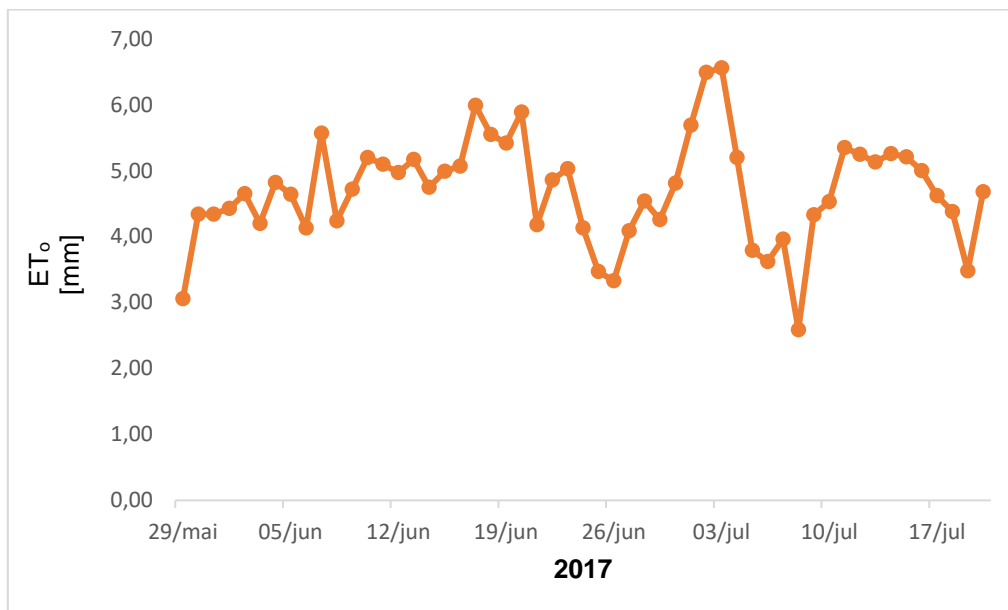


Figura 36 - Valores da evapotranspiração de referência, obtidos pela equação de Penman-Monteith para o período de estudo de 29 de Maio de 2017 a 20 de Julho de 2017

Assumiram-se dois coeficientes culturais, o tabelado em Allen et al. (1998), $K_{c1}=1,15$ e o medido por Ferreira-Gama (1987) $K_{c2}=0,9$, dando origem a dois cenários (1 e 2) que vamos comparar (Figura 37).

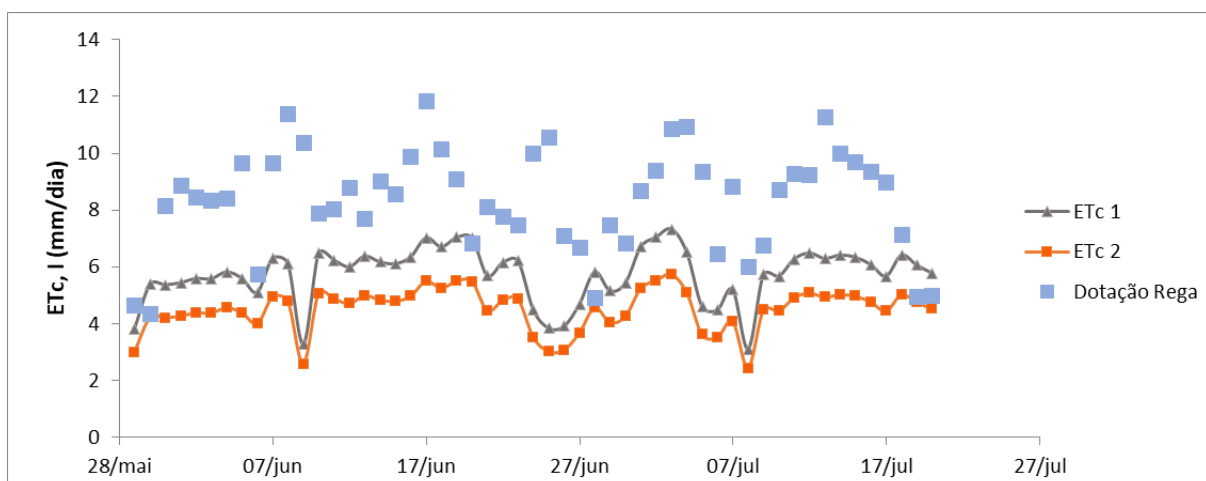


Figura 37 - Comparação dos cenários de ET_c , para os dois valores de K_c , K_{c1} e K_{c2} , e da dotação de rega, para o período de 29 de Maio a 20 de Julho de 2017.

Como se pode observar ainda (Figura 37) as dotações de rega foram muito superiores aos valores estimados para ET_c , em qualquer dos cenários escolhidos, o que pressupõe elevadas perdas por drenagem. Os valores médios de ET_c média diária para o período analisado foram

de 5,79 e 4,49 mm/dia, para os cenários 1 e 2, respectivamente. A dotação média de rega foi de 8,36 mm/dia.

Calculou-se o armazenamento médio para cada local, para uma profundidade radicular de 45 cm em função do valor medido para a capacidade de campo $\theta_{CC} = 0,13 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ e o teor mínimo observado nos quatro locais $\theta_{CE} = 0,02 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

Considerou-se, numa simplificação, que toda a água acumulada no solo (Az) acima do armazenamento à capacidade de campo é perdida sob a forma de drenagem. Tendo em conta os dois valores de K_c , é possível chegar a dois valores para a drenagem, Dr_1 e Dr_2 , ambos calculados pela função:

$$\begin{cases} \text{se } Az_x - Az_{CC} > 0, & Dr_x = Az_x - Az_{CC} \\ \text{se } Az_x - Az_{CC} \leq 0, & Dr_x = 0 \end{cases} \quad (35)$$

A água acumulada no solo teve como valor inicial (para o dia 29 de Maio), o correspondente ao valor médio do armazenamento dos locais 2, 5, 6-1 e 6-2, tendo este sido calculado a partir do teor de água no solo medido das amostras recolhidas, nesse dia. Partindo desse valor inicial, esta foi calculada da seguinte forma, no início dos restantes dias:

$$Az_{x \text{ dia } i} = Az_{x \text{ dia } i-1} - ET_{cx \text{ dia } i-1} + Rega_{\text{dia } i-1} - Dr_{x i-1} + P_{\text{dia } i} \quad (36)$$

Assim, para cada dia existem dois valores da água acumulada no solo: Az_1 e Az_2 , que por sua vez, deram origem a dois valores de teor de água no solo estimado (pela equação do balanço hídrico): $\theta_{v1 \text{ est}}$ e $\theta_{v2 \text{ est}}$. Estes foram comparados com o teor de água no solo médio para os quatro locais medido, $\theta_{v \text{ medido}}$ (Figura 38), admitindo, por simplificação, que toda a água a acima da capacidade de campo seria drenada totalmente no próprio dia.

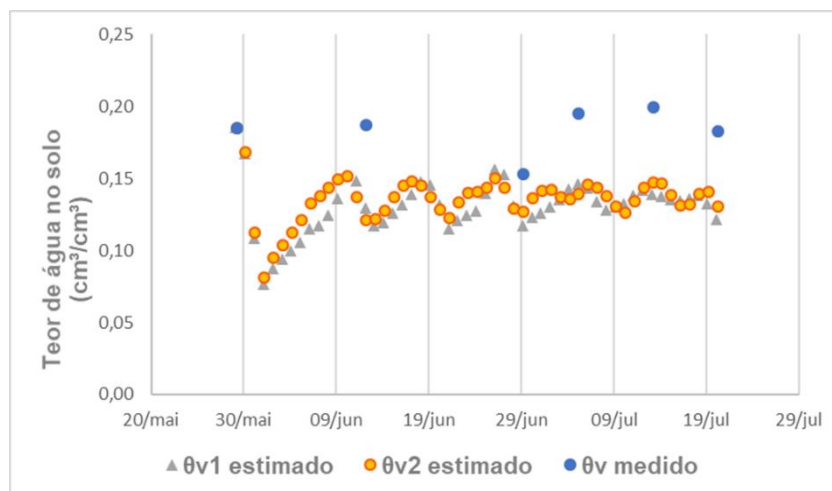


Figura 38 - Comparação entre o teor de água médio medido nos locais 2, 5 6-1 e 6-2 e o teor de água 1 e teor de água 2, estimado pelo método do balanço hídrico, tendo em conta $K_{c1}=1,15$ e $K_{c2}=0,90$, para o período de estudo de 29 de Maio de 2017 a 20 de Julho de 2017.

A comparação entre as duas séries de valores de teor de água no solo estimado *versus* medido, sugere que o valor de K_{c1} tabelado no boletim 56 da FAO (Allen et al., 1998) poderá estar bastante sobrestimado, dado que existem maiores diferenças entre θ_{v1} est e θ_v medido (Figura 38), enquanto se observa uma ligeira maior proximidade para a série dos valores mais baixos de ET_c (K_{c2} - experimental).

No entanto, além de haver sempre um afastamento, não se podem tirar conclusões seguras sobre os valores de K_c devido à incerteza da segunda variável, a drenagem. A Figura 39 apresenta os valores de drenagem para os dois cenários de K_c . Nestes pressupostos, a drenagem estimada tem um valor médio diário entre 3,45 e 4,66 mm, respectivamente para os cenários 1 e 2, isto é, entre 31% e 46% da água de rega é perdida, correspondendo a uma bastante baixa eficiência de aplicação na parcela (cerca de 60%).

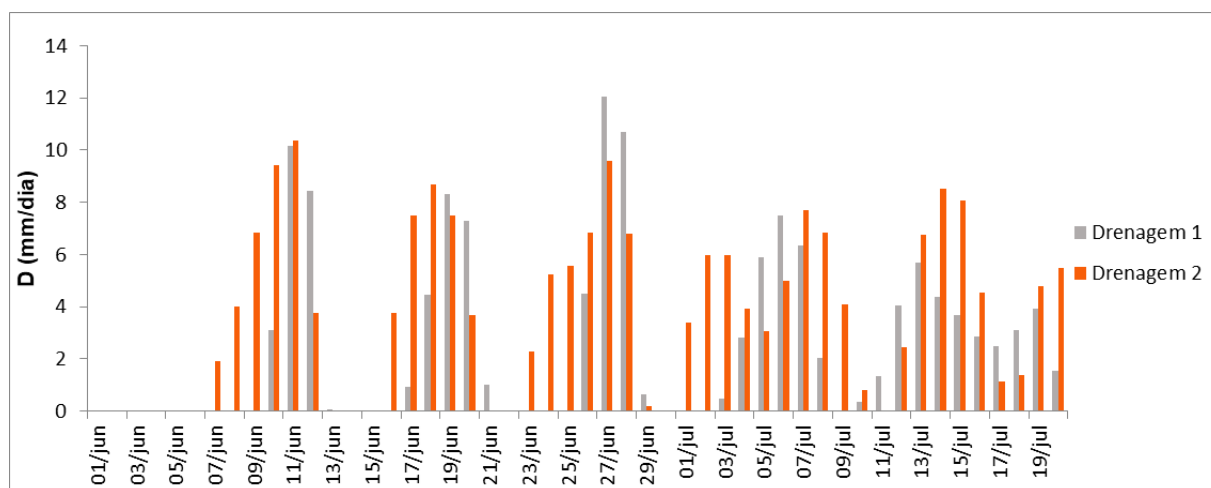


Figura 39 - Valores estimados para a drenagem, tendo em conta $K_{c1}=1,15$ e $K_{c2}=0,90$, para o período de estudo de 1 de Junho de 2017 a 20 de Julho de 2017.

4.7.2. Ajustamento do coeficiente cultural, K_c

Verificámos por simulações diversas que nos pressupostos simplificadores de estimativa do balanço hídrico, os resultados não são sensíveis à variação de K_c , devido à grande incerteza na estimativa da drenagem, à qual a equação é sensível. Isto é, temos duas incógnitas e não é possível, em consequência, fazer julgamentos sobre o valor de K_c .

De qualquer forma, tendo em conta os dois coeficientes culturais analisados, $K_{c1}=1,15$ e $K_{c2}=0,9$, é o coeficiente cultural do cenário 2 o que parece melhor caracterizar a cultura do tomate industrial analisada. As menores diferenças entre o teor de água estimado e o medido poderão dever-se, sobretudo, às condições em que $K_{c2}=0,9$ foi medido, mais especificamente no que toca à região, que é a mesma que a da cultura a ser estudada, a região do Ribatejo.

5. CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado representou um estudo das muitas variáveis que intervêm na gestão da rega, nomeadamente o estado hídrico do solo, as variáveis utilizadas na estimativa da evapotranspiração e a resposta da cultura do tomate, *Lycopersicon esculentum*, ao stress hídrico.

Um aspecto interessante do trabalho foi poder observar a variabilidade que existiu entre os valores medidos em campo, os valores analisados e os modelados, permitindo concluir a importância do conjunto de todas estas abordagens para uma melhor avaliação da dinâmica de água no solo e das necessidades das culturas.

Parece possível concluir que, tendo sido submetida a um ciclo de stress hídrico de nove dias, a planta demonstrou sinais visíveis deste stress, tendo o teor de água no solo diminuído ao longo do ciclo até chegar ao ponto de emurchecimento previsto pela bibliografia para este tipo de solos, no final do ciclo. Apesar disto, é de salientar que, pela comparação dos valores de potencial hídrico medidos no ramo em plantas em stress e em conforto, constatou-se que, tendo em conta as variações baixas entre os valores, a variedade da cultura apresenta um comportamento isohídrico, pelo que as medições do potencial hídrico ao meio-dia solar não foram muito significativas, não sendo, por isso, este recomendado como indicador de stress hídrico, para estas condições.

Tendo sido modelados dois cenários, para a estimativa de K_s : $K_{s\text{ FAO}}$ e $K_{s\text{ exp}}$, foi possível observar que a planta, em ambos os modelos, mesmo estando a reserva útil aparentemente esgotada para a camada onde se fizeram as medições, continua a transpirar, para valores superiores a 40% do máximo de ET_c , demonstrando a existência de raízes a maior profundidade que o valor assumido de 0,45 m. Apesar disso, a divergência observada entre estes limites permite prever que definem um intervalo onde a realidade se inscreve.

No que toca ao caso concreto do teor de água no solo, os resultados das sondas apresentaram uma dinâmica de difícil análise, pelo que serviram apenas para a avaliação da dinâmica do solo. No conjunto das medições efetuadas, foi possível concluir que o teor de água no solo durante o período analisado foi muito elevado, face à capacidade de campo medida. Tal pode ser explicado pelas dotações de rega dispersas para os vários locais (mesmo nos dois pontos de medição para o mesmo local) e muito superiores à evapotranspiração cultural calculada para os dois cenários avaliados no balanço hídrico no solo. Em ambos os casos, nos valores medidos em campo e pelas sondas, é possível concluir que grande parte da água é perdida sob a forma de drenagem.

A incerteza em muitos dos dados disponibilizados permitiu concluir que devem ser comparadas, se possível, séries de dados de estações meteorológicas diferentes, fiáveis e de localização adequada. A aproximação destes dados à realidade concreta do local é indispensável para a utilização de modelos para estimar as necessidades hídricas da planta.

A análise dos dois valores de K_c , $K_{c1}=1,15$ (Allen et al., 1998) e $K_{c2}=0,9$ (Ferreira Gama, 1987) permitiu concluir que é possível, dada a diferença dos valores do teor de água no solo medidos e estimados para cada cenário, que K_{c1} esteja sobrestimado, o que é previsível tendo em conta que o Boletim da FAO 56 (Allen et al., 1998) se trata de um manual de apoio, que não considera os casos concretos das regiões; por sua vez, foi verificada uma ligeira maior proximidade entre os valores para o K_{c2} experimental, que pode ser justificada pelo ajustamento deste ter sido feito para a mesma região do Vale do Tejo.

No entanto, a incerteza da variável drenagem leva a que, não sendo os resultados sensíveis ao coeficiente de stress, não possam ser tiradas conclusões seguras para o ajustamento do coeficiente cultural.

Apesar disto, a análise de todos os parâmetros avaliados permitiu perceber a importância das medições em campo serem feitas nas mesmas condições e em número suficiente para serem representativas, das condições de calibração das sondas para o tipo de solo e cultura serem conhecidas, e dos dados das estações meteorológicas que entram nos modelos serem fiáveis.

BIBLIOGRAFIA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. e Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO. (FAO. Irrigation and drainage paper, 56).

Almeida, D. (2006). *Manual de Culturas Hortícolas - Volume II*. (1ª edição), Lisboa: Editorial Presença.

Avillez, F. (2014). *A agricultura portuguesa: Caminhos para um crescimento sustentável*. Cascais: Agro.Ges

Blanco-Cipollone, F., Lourenço, S., Silvestre, J., Conceição, N., Moñino, M., Vivas, A. Ferreira, M. I. (2017). Plant Water Status Indicators for Irrigation Scheduling Associated with Iso- and Anisohydric Behaviour: Vine and Plum Trees. *Horticulturae* 3 (3): 47-64.

Boyer, J.S. (1967). Leaf Water Potentials measured with a pressure chamber. *Plant Physiology* 42: 133-137.

Coelho, J.C. (2016). *Apontamentos das aulas*. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia – Universidade de Lisboa.

Costa, J. (1975). *Caracterização e Constituição do Solo*. Lisboa: Fund. Calouste Gulbenkian.

Costa, R. (2008). *Interações entre Solo – Planta – Atmosfera*. Coimbra: Editora da Universidade de Coimbra.

Davies, W.J., Wilkinson, S., Loveys, B. (2002). Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist*.153: 449-460.

Direção Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural [DGADR] (2014). *Estratégia para o regadio público 2014-2020*. Acedido a 20 de maio de 2017. Disponível em <http://www.dgadr.gov.pt/7-dgadr/397-estrategia-para-o-regadio-publico-2014-2020>

Ferreira Gama, M.I. (1987). *Evapotranspiração real. Estudo realizado na cultura do tomate em região de clima mediterrânico*. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia, UTL, Lisboa, 168 pp.

Ferreira, M.I. (1979). *Determinação das necessidades em água das culturas*. Dissertação de fim de curso. Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.

Ferreira, M.I. (2017). Stress Coefficients for Soil Water Balance Combined with Water Stress Indicators for Irrigation Scheduling of Woody Crops. *Horticulturae*. 3,38: 1-33.

Ferreira, M.I. e Valancogne C. (1997). Experimental Study of a Stress Coefficient: Application on a Simple Model for Irrigation Scheduling and Daily Evapotranspiration Estimation. *IFAC Proceedings Volumes*. 30, nº5: 33-38.

Ferreira, M.I., Paço, T.A., Silvestre, J., Silva, R.M. (2008). Evapotranspiration estimates and water stress indicators for irrigation scheduling in woody plants. *Agricultural Water Management Research Trends*. Ed. Magnus L. Sorensen. Nova Science Publishers, Inc., New York, USA. Disponível em: https://www.novapublishers.com/catalog/product_info.php?products_id=6658

Gabinete de Planeamento, Políticas e Administração Geral [GPP] (2014). *Programa de Desenvolvimento Rural do Continente para 2014-2020*. Acedido a 19 de maio de 2017. Disponível em https://www.portugal2020.pt/Portal2020/Media/Default/Docs/Programas%20operacionais/VERSOES%20CONSULTA/PDR%202020_integral.pdf

Google Maps (2017). Disponível na Internet via: <https://www.google.com/maps>. Arquivo captura do a 31 de Outubro de 2017.

Gregório, J.P.C. (2014). *Avaliação do Efeito do Regime Hídrico na Produtividade e Qualidade do Tomate de Indústria*. Dissertação de Mestrado em Agricultura Sustentável. Escola Superior Agrária de Santarém - Instituto Politécnico de Santarém, Santarém.

Instituto Nacional de Estatística (2011). *Recenseamento Agrícola 2009 – Dados definitivos*. Acedido a 20 de dezembro, 2017. Disponível em https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=78833499&att_display=n&att_download=y

Instituto Nacional de Estatística (2016). *Estatísticas Agrícolas 2016*. Acedido a 2 de outubro, 2017. Disponível em https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=ine&xpgid=ine_publicacoes&publicacoespub_boui=277047595&publicacoesmodo=2

Instituto Nacional de Estatística (2017). *Inquérito à Estrutura das Explorações Agrícolas*. Acedido a 1 de fevereiro de 2018. Disponível em https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=277088793&PUBLICACOESmod=2

Instituto Português Mar e da Atmosfera (2017). *Clima de Portugal Continental*. Acedido a 20 de dezembro, 2017. Disponível em <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima>

Instituto Português Mar e da Atmosfera (2018). *Normais Climatológicas - 1981-2010 (provisórias) – Santarém*. Acedido em 4 de março de 2018. Disponível em <http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1981-2010/018/>

Laboratorio Agrama, S.L. (2017) – Informe Analítico nº 000202968 – A01-001. Sevilha: AGRAMA

Larcher, W. (2006). *Physiological Plant Ecology*, Berlim: Springer.

LI-COR, Inc. (1989). LI_1600 Steady State Porometer Instruction Manual. Nebraska: LI-COR, Inc. Disponível em <https://www.licor.com/documents/auoxn0ewmmka5r5inwcf>

Lopes, C.A., Marouelli W.A. e Café A.C.F. (2006). Associação da irrigação com doenças de hortaliças. *Revisão Anual de Patologia de Plantas*. 14: 151-179.

Machado, R.M.A. Oliveira, M.R.G. (2007) Influência da profundidade de colocação do tubo de rega gota-a-gota na uniformidade de rega e na eficiência do uso da água em tomate de indústria. *Revista de Ciências Agrárias*. 30: 162-171.

Madeira, M.A.V. e Ricardo, R.P. (2013). *Constituição e Propriedades do Solo*. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia – Universidade de Lisboa.

Manuel A.V. M. (2013a). *Módulo Constituição e Propriedades do Solo - Noções Gerais sobre o solo*. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia – Universidade de Lisboa.

McDermitt, D.K. (1990). Sources of Error in the Estimation of Stomatal Conductance and Transpiration from Porometer Data. *HortoScience*, Vol. 25(12): 1538-1547.

Monteith, J.L. (1965). Evaporation and Environment. *19th Symposia of the Society for Experimental Biology*. (pp. 205-234). Cambridge

Morales, R. (2012). *Resistência ao déficit hídrico em famílias de tomateiro derivados de Solanum pennellii*. Dissertação de Mestrado em Agronomia. Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Ozbahce, A. e Tari A. (2010). Effects of different emitter space and water stress on yield and quality of processing tomato under semi-arid climate conditions. *Agricultural Water Management*, 97, nº1: 1405-1410.

Pacheco, C.M. (2018). Declaração oral. (M.I. Ferreira, Entrevistador)

Paredes, P., D'Agostino, D., Assif, M., Todorovic, M. e Pereira, L.S. (2018). Assessing potato transpiration, yield and water productivity under various water regimes and planting dates using the FAO dual Kc approach. *Agricultural Water Management*, 195.

Portal do Clima (2017). *Normais climatológicas*. Acedido em 23 de dezembro, 2017. Disponível em <http://portaldoclima.pt/pt/>

Portaria nº 50/15 de 25 de fevereiro. *Diário da República, n.º 39/15- I série*. Ministério da Agricultura e do Mar. Lisboa.

Portas, C.M. (1970). Acerca do sistema radical de algumas culturas hortícolas. Tese Doutoramento. Univers. Luanda, Luanda;

Portas, C.M. (1973). Development of root systems during the growth of some vegetable crops. *Plant and soil*, 39:507-518.

Silva, M.M. (2016). *Estudo e quantificação dos resíduos da rega da cultura do tomate*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Instituto Superior de Agronomia – Universidade de Lisboa, Lisboa.

Singh-Sangwan, N., Farooqi, A.H.A e Singh-sangwan, R. (1994). Effect of drought stress on growth and essential oil metabolism in lemongrasses. *New Phytologist*. 128: 173-179.

Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos [SNIR] (2018). Acedido em 2 de março, 2018. Disponível em <http://snirh.apambiente.pt>

Srinivasa, R., Bhatt, R. e Sadashiva. A.T. (2001). Tolerance to water stress in tomato cultivars. *Photosynthetica*. 38, n.3: 465-467.

Steponkus, P. L. (1990). Cold acclimation and freezing injury from a perspective of the plasma membrane. *Environmental injury to plants*.1:1-15.

United Seeds. (2017). *Processing Tomato*. Parma: United Genetics Italia. Disponível em <http://unigenseedsitaly.com/en/wp-content/uploads/sites/3/2017/09/Catalogo-PROCESSING-TOMATO.pdf>

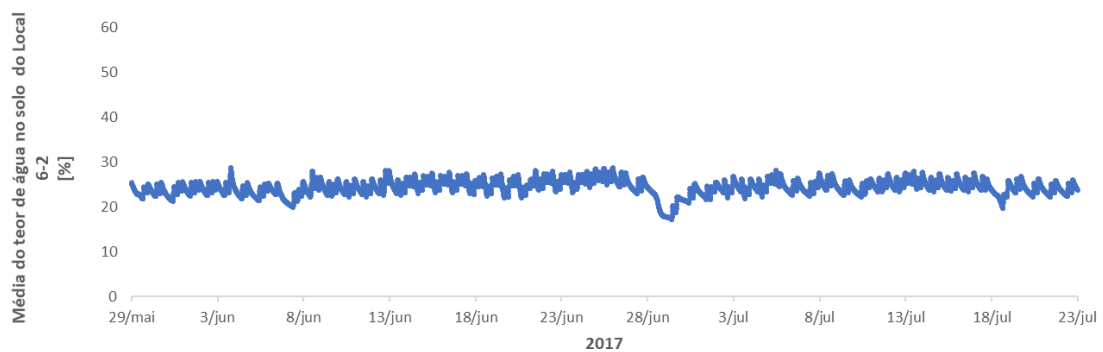
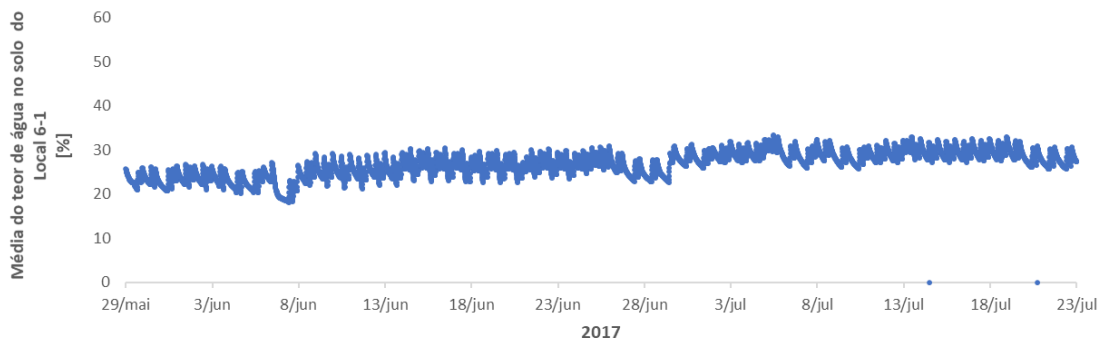
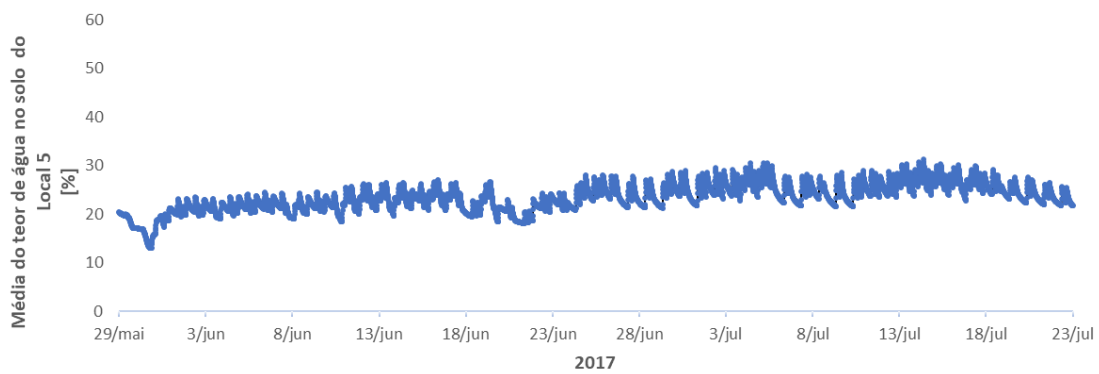
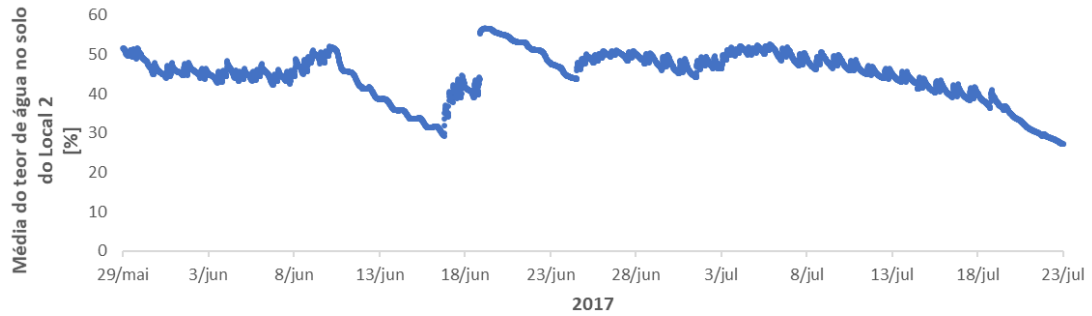
Vermeiren, L. e Jobling, G.A. (1997). *Irrigação localizada*. Roma: FAO. (FAO. Irrigation and drainage paper, 36).

Walker W.R. (1989). Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. Rome: FAO. (FAO. Irrigation and drainage paper, 45).

Zhang, H., Xiong, Y., Huang, G., Xu, X. e Huang, Q. (2017). Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*,179.

ANEXOS

Anexo 1 - Valores médios do teor de água no solo registados pela sonda S113, no local 2 (a), pela sonda S114, no local 5 (b), pela sonda S110, local 6-1 (c) e pela sonda Apave S02, no local 6-2 (d).



Anexo 2 – Valores medidos para o teor de água no solo para o local2, 5, 6-1 e 6-2 às profundidades 0-15 cm, 15-25 cm, 25-35 cm e 35-45 cm.

Local 2	θ_v médio (m^3/m^3)				água no solo acumulada: 0-45cm
	0-15 cm	15-25 cm	25-35 cm	35-45 cm	(mm)
29/05/2017	0,28	0,34	0,38	0,35	150,64
12/06/2017	0,15	0,25	0,29	0,23	99,11
29/06/2017	0,07	0,07	0,10	0,09	36,66
05/07/2017	0,16	0,19	0,15	0,21	78,64
13/07/2017	0,16	0,18	0,16	0,19	78,35
20/07/2017	0,22	0,24	0,23	0,23	102,66

Local 5	θ_v médio (cm^3/cm^3)				água no solo acumulada: 0-45cm
	0-15 cm	15-25 cm	25-35 cm	35-45 cm	(mm)
29/05/2017	0,13	0,13	0,13	0,14	60,42
12/06/2017	0,17	0,24	0,22	0,25	97,53
29/06/2017	0,16	0,19	0,17	0,18	77,48
05/07/2017	0,17	0,24	0,22	0,25	97,53
13/07/2017	0,19	0,21	0,22	0,21	93,03
20/07/2017	0,16	0,20	0,19	0,20	83,54

Local 6 - 1	θ_v médio (cm^3/cm^3)				água no solo acumulada: 0-45cm
	0-15 cm	15-25 cm	25-35 cm	35-45 cm	(mm)
29/05/2017	0,14	0,14	0,15	0,14	64,22
12/06/2017	0,15	0,18	0,19	0,18	76,47
29/06/2017	0,21	0,22	0,21	0,22	96,56
05/07/2017	0,21	0,21	0,25	0,23	102,02
13/07/2017	0,24	0,28	0,26	0,26	115,70
20/07/2017	0,18	0,22	0,20	0,21	90,63

Local 6_2	θ_v médio (cm^3/cm^3)				água no solo acumulada: 0-45cm
	0-15 cm	15-25 cm	25-35 cm	35-45 cm	(mm)
29/05/2017	0,12	0,13	0,15	0,14	60,30
12/06/2017	0,14	0,15	0,15	0,17	66,82
29/06/2017	0,16	0,16	0,14	0,14	66,78
05/07/2017	0,15	0,18	0,17	0,18	75,62
13/07/2017	0,15	0,18	0,17	0,18	74,60
20/07/2017	0,10	0,13	0,12	0,14	55,45

Anexo 3 – Resultados do cálculo de ET_o pelo método modificado de Penman Monteith

dia	Ano	J	T _{max}	T _{min}	T _{med}	h _{max}	h _{min}	u ₂	HR	esT ₁	es	esT ₂	esT ₃	A	L	P _a	P _g	ρ _a	ρ _w	λ	γ	γ _s	G	M _{ref}	g _s	R _s	R _n	W _{ref}	M _{ref}	R _n	M _{ref}	R _n	Re _o	δ	dr	us	R _a	LE	W _{ref}	mm dia	mm dia
29/04	2017	149	18,94	23,6	15,5	6,12	1,7	87,88	21,92	19,23	256,2	19,23	256,2	0,1386	245,623	100,004	1,21	245,23	0,688	-0,11	0,002	20	178,95	279	12,67	30,74	0,38	0,97	2,00	40,95	7,177	3,33	3,05	3,05							
30/04	2017	150	19,04	26	12,8	8,316	2,31	79,39	22,02	17,49	454	17,49	454	0,1410	245,493	100,005	1,21	245,05	0,688	0,05	0,011	30	263,72	5,11	17,86	30,86	0,38	0,97	1,99	41,04	9,427	4,67	4,34	4,34							
01/05	2017	151	19,52	28	13,8	7,632	2,12	81,65	22,67	18,53	416	18,53	416	0,1410	245,509	100,004	1,20	245,08	0,688	-0,01	0,028	29	262,87	5,27	17,50	30,92	0,39	0,97	1,99	41,20	9,158	4,73	4,43	4,43							
02/05	2017	152	19,45	27,4	13,9	8,648	2,68	78,41	22,98	17,72	488	17,72	488	0,1405	245,501	100,004	1,20	245,08	0,688	-0,01	0,038	29	262,63	5,39	17,30	30,97	0,39	0,97	1,99	41,27	9,279	4,86	4,65	4,65							
03/05	2017	153	19,47	27,4	13,9	10,332	2,97	75,11	22,92	16,99	553	16,99	553	0,1406	245,503	100,004	1,20	245,03	0,688	0,00	0,038	29	262,63	5,39	17,30	30,97	0,39	0,97	1,99	41,27	9,279	4,86	4,65	4,65							
04/05	2017	154	18,57	22,1	15,4	13,644	3,79	64,85	21,93	14,85	654	14,85	654	0,1393	245,716	100,004	1,21	245,17	0,687	-0,06	0,0182	27	244,37	5,09	16,02	31,02	0,39	0,97	1,98	41,33	8,716	4,83	4,20	4,20							
05/05	2017	155	17,93	22,7	14,3	14,724	4,09	69,5	20,94	14,08	647	14,08	647	0,1293	246,795	100,005	1,20	245,10	0,687	-0,06	0,0197	30	268,48	5,92	17,27	31,07	0,39	0,97	1,98	41,39	8,878	5,06	4,82	4,82							
06/05	2017	156	18,61	24,1	13	8,64	2,4	79,12	21,44	15,17	628	15,17	628	0,1342	245,702	100,004	1,21	245,06	0,688	0,07	0,015	29	261,62	5,51	17,09	31,11	0,39	0,97	1,98	41,45	9,786	4,64	4,84	4,84							
07/05	2017	157	19,5	25,2	14,9	8,172	2,27	74,28	22,65	16,94	583	16,94	583	0,1409	245,495	100,005	1,20	245,06	0,688	0,09	0,009	28	228,51	4,38	15,37	31,15	0,40	0,97	1,98	41,50	8,661	4,44	4,13	4,13							
08/05	2017	158	18,61	24,1	13	8,64	2,4	79,12	21,44	15,17	628	15,17	628	0,1342	245,702	100,004	1,21	245,06	0,688	0,07	0,015	29	261,62	5,51	17,09	31,11	0,39	0,97	1,98	41,45	9,786	4,64	4,84	4,84							
09/05	2017	159	20,61	26	14,4	5,328	1,48	56,82	24,80	13,80	1048	13,80	1048	0,1486	245,240	100,006	1,20	245,24	0,688	-0,09	0,0071	29	256,66	5,72	16,45	31,22	0,40	0,97	1,97	41,59	11,654	5,31	4,24	4,24							
10/05	2017	160	20,31	27,4	16	7,848	1,28	52,35	25,83	15,18	885	15,18	885	0,1472	245,308	100,007	1,19	245,05	0,688	-0,03	0,005	8	88,82	-0,10	6,05	31,25	0,40	0,97	1,97	41,64	5,785	2,85	4,72	4,72							
11/05	2017	161	21,93	30,1	13,2	8,46	2,35	67,3	26,32	17,72	861	17,72	861	0,1605	244,923	100,007	1,19	244,92	0,670	0,16	0,013	31	272,99	5,55	18,00	31,27	0,40	0,97	1,97	41,67	11,078	5,83	5,20	5,20							
12/05	2017	162	22,16	30,5	16,3	9,884	2,89	73,15	26,98	19,53	717	19,53	717	0,1625	244,830	100,007	1,19	244,88	0,670	0,02	0,029	30	266,47	5,16	17,86	31,30	0,40	0,97	1,97	41,70	10,292	5,42	5,10	5,10							
13/05	2017	163	22,28	33,6	14	7,02	1,95	74,18	26,94	19,95	684	19,95	684	0,1636	244,830	100,010	1,18	244,80	0,671	0,01	0,0094	28	257,38	4,89	17,35	31,32	0,40	0,97	1,97	41,73	10,04	5,21	4,97	4,97							
14/05	2017	164	24,65	33,5	17,7	5,076	1,41	65,38	31,02	20,28	1074	20,28	1074	0,1853	244,281	100,010	1,18	244,20	0,671	0,24	0,0068	28	252,74	4,81	17,03	31,34	0,40	0,97	1,96	41,76	12,051	5,54	5,17	5,17							
15/05	2017	165	22,41	29,2	17,2	5,904	1,64	75,07	27,02	20,35	676	20,35	676	0,1647	244,830	100,007	1,19	244,80	0,670	-0,22	0,0079	30	264,33	4,95	17,69	31,36	0,41	0,97	1,96	41,78	11,438	5,36	4,75	4,75							
16/05	2017	166	21,96	29,2	14,9	8,208	2,28	73,72	25,98	19,09	681	19,09	681	0,1583	245,286	100,014	1,17	244,95	0,688	-0,08	0,010	28	265,02	5,09	17,81	31,37	0,41	0,97	1,96	41,80	10,500	5,31	4,99	4,99							
17/05	2017	167	24,6	36,7	14,9	4,832	1,37	68,76	30,83	21,27	995	21,27	995	0,1848	244,219	100,010	1,18	244,22	0,671	0,29	0,0066	29	257,36	4,78	17,45	31,38	0,41	0,97	1,96	41,81	12,083	5,52	5,07	5,07							
18/05	2017	168	23,91	41,5	19,2	5,184	1,44	53,65	33,94	21,38	1847	21,38	1847	0,2024	243,274	100,014	1,17	243,24	0,674	0,43	0,0069	27	241,12	4,62	16,22	31,39	0,41	0,97	1,96	41,82	12,851	6,10	5,99	5,99							
19/05	2017	169	23,07	38	20,9	3,616	1,22	53,35	30,42	23,08	1536	23,08	1536	0,2233	243,206	100,014	1,17	243,21	0,674	0,02	0,0051	26	231,39	4,27	15,72	31,40	0,41	0,97	1,96	41,83	13,955	5,83	5,55	5,55							
20/05	2017	170	23,25	29,2	20,4	4,832	1,22	69,49	27,03	18,77	824	18,77	824	0,1642	243,832	100,007	1,19	243,80	0,670	0,04	0,0083	29	260,48	5,03	17,48	31,39	0,41	0,97	1,96	41,82	11,814	5,82	5,69	5,69							
21/05	2017	171	27,41	36,5	19,7	5,832	1,62	65,16	35,82	23,90	1272	23,90	1272	0,2136	243,625	100,012	1,17	243,57	0,673	-0,09	0,0078	28	230,08	3,69	16,19	31,40	0,41	0,97	1,96	41,84	12,021	6,04	5,89	5,89							
22/05	2017	172	23,95	28,3	19,6	7,664	1,99	79,8	28,00	21,9	587	21,9	587	0,1730	244,635	100,019	1,19	244,57	0,671	-0,39	0,0096	28	230,08	3,69	16,19	31,40	0,41	0,97	1,96	41,83	12,021	6,04	5,89	5,89							
23/05	2017	173	21,96	27,8	16	6,228	1,73	74,3	28,47	19,64	677	19,64	677	0,1610	244,915	100,007	1,19	244,91	0,670	-0,16	0,0083	30	265,32	4,98	17,94	31,39	0,41	0,97	1,96	41,83	11,284	5,34	4,86	4,86							
24/05	2017	174	22,35	29,9	14,2	6,192	1,62	69,49	27,03	18,77	824	18,77	824	0,1642	243,832	100,007	1,19	243,80	0,670	0,04	0,0083	29	260,48	5,03	17,48	31,39	0,41	0,97	1,96	41,82	11,814	5,82	5,69	5,69							
25/05	2017	175	20,72	25,6	15,2	5,976	1,66	76,45	24,48	16,97	747	16,97	747	0,1595	245,200	100,006	1,20	245,20	0,688	-0,16	0,0080	19	188,73	2,67	11,91	31,38	0,41	0,97	1,96	41,81	8,374	3,90	4,13	4,13							
26/05	2017	176	20,01	25,3	16,3	5,832	1,62	76,45	24,48	16,97	747	16,97	747	0,1595	245,200	100,006	1,20	245,20	0,688	-0,07	0,0078	17	150,92	2,10	10,86	31,38	0,41	0,97	1,96	41,79	7,228	3,84	3,47	3,47							
28/05	2017	177	19,75	25,2	14,5	3,6	1	79,21	23,02	16,24	479	16,24	479	0,1428	246,430	100,005	1,20	246,37	0,688	-0,03	0,0048	19	165,37	2,45	11,63	31,35	0,41	0,97	1,96	41,77	8,017	3,40	3,33	3,33							
27/05	2017	178	20,75	25,5	16,1	5,724	1,59	76,75	24,41	18,80	569	18,80	569	0,1507	245,209	100,006	1,20	245,21	0,688	0,10	0,0076	22	199,35	3,33	13,89	31,33	0,41	0,97	1,96	41,75	8,818	4,07	4,09	4,09							
28/05	2017	179	20,7	24,1	16,6	10,16	2,81	74,79	24,4	18,35	616	18,35	616	0,1593	245,217	100,006	1,20	245,23	0,688	-0,01	0,0135	29	258,90	4,96	17,41	31,31	0,41	0,97	1,96	41,72	9,673	5,06	4,54	4,54							
29/05	2017	180	18,13	22,3	15	8,64	2,4	70,03	28,03	14,57	604	14,57	604																												

Anexo 4 – Parâmetros usados para o cálculo de ET_0 pela equação modificada de Penman-Monteith

Parâmetros locais		
z	25,00	m
φ	0,682209	rad

Parâmetros físicos		
g	9,8	m/s ²
α	0,0065	°C/m
Ma	0,029	kg mol ⁻¹
Mv	0,018	Kg/mol
Cp	1010	J/(Kg °C)
R	8,314	J mol ⁻¹ °C ⁻¹
σ	4,903E-09	MJm ⁻² dia ⁻¹

Variáveis auxiliares					
gc	0,0145	m/s	δ	-0,49	rad
albedo	0,23		Gsc	0,082	MJ/(m ² dia)
π	3,1416		dr	1,033	

Anexo 5 - Parâmetros utilizados para o método no balanço hídrico do solo

θ_{CC} (m ³ /m ³)	0,13
θ_{CE} (m ³ /m ³)	0,05
CC (%)	13
CE (%)	2
z (m)	0,45
CC (mm)	58,5
CE (mm)	20

Teor de água das amostras	Local 6-1	Local 6-2	Local 5	Local 2	Az médio
	z = 0-45 cm	z = 0-45 cm	z = 0-45 cm	z = 0-45 cm	
Data	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	mm
29/mai	64,22	60,30	60,42	150,64	83,89
12/jun	76,47	66,82	97,53	99,11	84,98
29/jun	96,56	66,78	77,48	36,66	69,37
05/jul	102,02	75,62	97,53	78,64	88,45
13/jul	115,70	74,60	93,03	78,35	90,42
20/jul	90,63	55,45	83,54	102,66	83,07

Anexo 6 - Valores medidos para o teor de água no solo para a as plantas em stress e em conforto às profundidades 0-15 cm, 15-25 cm, 25-35 cm e 35-45 cm

	Evolução do Ciclo de Stress θ_v médio (cm^3/cm^3)				Média
	0-15 cm	15-25 cm	25-35 cm	35-45 cm	
12/07/2017	0,06	0,08	0,09	0,11	0,09
13/07/2017	0,11	0,08	0,09	0,10	0,09
14/07/2017	0,07	0,07	0,08	0,09	0,08
17/07/2017	0,02	0,04	0,06	0,07	0,05
18/07/2017	0,02	0,03	0,05	0,06	0,04
19/07/2017	0,02	0,04	0,05	0,05	0,04
20/07/2017	0,01	0,02	0,03	0,03	0,02

20/07/2017	Média 0-15 cm	Média 15-25 cm	Média 25-35 cm	Média 35-45 cm
Conforto				
Massa (g)	5,67	3,85	3,39	4,37
θ_m (g/g)	0,11	0,09	0,09	0,10
θ_v (cm^3/cm^3)	0,16	0,13	0,14	0,14

Anexo 8 - Medições do potencial hídrico no ramo e na folha medidos em tomate em stress e em conforto

Potencial ramo tomateiro em stress	
Medição	Pressão (bar)
19/07/2017	
1	8,5
2	8,5
3	11,5
4	10
5	8
6	8,5
7	9,5
8	9,5
Média	9,25
Desvio Padrão	1,06
20/07/2017	
1	11
2	9,5
3	6
4	10,5
5	10
6	9,5
Média	9,42
Desvio Padrão	1,62
Media Total	9,32
Desv. Padrao Tot	1,33
20/07/2017	
1	8,5
2	9
3	8
4	8,5
5	8,5
6	6
Média	8,08
Desvio Padrão	0,98
Potencial folha tomateiro regado	
Medição	Pressão (bar)
19/07/2017	
1	7
2	7,5
3	9,5
4	6
5	7,5
6	7,5
Média	7,50
Desvio Padrão	1,04
20/07/2017	
1	12,5
2	13,5
3	11,25
4	10
5	11
6	12,5
Média	11,79
Desvio Padrão	1,16
Média Total	9,65
Desv. Padrao Tot	2,41

Potencial folha tomateiro em stress	
Medição	Pressão (bar)
19/07/2017	
1	10
2	13
3	10,5
4	10
5	8,5
6	9
Média	10,17
Desvio Padrão	1,43
20/07/2017	
1	9,5
2	11
3	11,5
4	11,5
5	12
6	10,75
Média	11,04
Desvio Padrão	0,63
Media Total	10,60
Desv. Padrao Tot	1,24