

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**Curso de Mestrado
em
Engenharia do Solo e da Água**

**ECOFISIOLOGIA DA OPORTUNIDADE DA REGA NO MILHO
Princípios Biofísicos**

Júlio César Lima
Engenheiro-Agrícola
Ramo Científico-Tecnológico

**Évora
1996**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia do Solo e da Água
pela Universidade de Évora.



*A meio milhão de
Desempregados*

PREFÁCIO

Este trabalho foi especificamente concebido e escrito para responder à exigência legal de uma Dissertação para obter o grau de Mestre. Não obstante isso, o documento reflecte a filosofia do autor no âmbito da abordagem técnico-científica de princípios biofísicos ligados à rega e à produtividade de sistemas agrícolas, de regadio, em particular, e, *mutatis mutandis*, a fito-ecossistemas naturais. A filosofia referida é, em parte, enformada pela natureza das matérias a tratar e, em parte, influenciada pela experiência ganha em dois ecossistemas diferentes: semi-árido e mediterrânico.

Elaborar uma síntese numa área tão rica e apaixonante é, em si, difícil, num curto período, dificuldade esta acrescida, quando nos acompanha a intranquilidade que o vazio financeiro acarreta. Resta, então, responder ao próprio Ego e à oxigenação oferecida pela Persistência pois que “a Vida não se gasta” a trabalhar.

Não obstante, as actividades experimentais decorreram, no Verão de 1995, sem sobressaltos, e a jorna, às vezes, ia até se encontrar com o manto da noite que envolvia os campos espriados na planície.

A boa vontade surgiu de vários quadrantes e, assim, endereço os meus profundos agradecimentos a:

Professor Francisco Lúcio Santos, Departamento de Engenharia Rural da Universidade de Évora, por ter aceite ser meu Orientador Científico e pelo apoio logístico e coordenação;

Aos Eng. técnicos-agrários: Srs. Manuel Bica (Chefe da Secção de Culturas Regadas de Alvalade-Sado) e Sra. Gina Bica, pela hospitalidade e apoio logístico;

Professor Alexandre Bettencourt (Departamento de Ecologia da Universidade de Évora) pela oportunidade concedida;

Professora Alexandra Costa (Departamento de Biologia da Universidade de Évora), pelo apoio muito oportuno e empréstimo de porómetros;

Professora Ermelinda Lourenço (Departamento de Fitotecnica U. É.), pela sua abertura e empréstimo do multímetro de Infravermelho (AG-510B);

Engenheiro agrónomo Pedro Clímaco (E.V.N; Dois-Portos), pela tele-informação muito útil e prática.

Aos meus amigos muito especiais, Eng. Shakib Shahidian, Arq. Neda Shahidian e a pequena Anissa, “me faltan las palabras”.

Ao meu amigo sempre presente, cujo lema é “a sublimação na amizade”, Professor Tomaz Moreira;

Ao Professor Ricardo Serralheiro e Professora Maria do Rosário;

À Doutora Maria do Céu Matos e Doutora Maria Antunieta Nunes, Investigadoras do Departamento de Fisiologia Vegetal da Estação Agronómica Nacional, pelas oportunidades de discutir alguns tópicos sobre trocas gasosas e empréstimo de materiais;

Aos meus prezados colegas de curso e amigos Eng.s: André Ramos, Manuel Viseu, Pedro Quartim, Rita Guimarães, José Miguel Alves, Jean-Marie Lopez, Alexandra, Maria, Filomena Miguens; e aos amigos de Alvalade-Sado Srs. Ricardo Valentim e Filipe Alves, pelo convívio e todo o apoio.

Os meus votos são para que se torne realidade permanente a colaboração interdisciplinar entre ecólogos, biólogos, modeladores e informáticos, agrónomos, agrometeorologistas, geofísicos, no âmbito da actividade agrícola como ramo particular da Física Ambiental.

A pacata Vila de Alvalade-Sado, merece uma palavra de preocupação e de apreço. Terra de gente simpática, que, de importância reinol se despromoveu à condição de trabalho precário e sazonal. Agora, as recordações de um passado risonho são o terreno fértil do bem-estar, porque, na era do telefone celular, de viagens rotineiras ao espaço, das estradas electrónicas da *Internet* e *realidade virtual*, a rota do Desenvolvimento não colidiu com a *realidade real* do Alentejo.

Alvalade-Sado, Setembro de 1996

RESUMO

Em programas de rega, a identificação da oportunidade da rega das culturas persiste como uma questão actual dado que os critérios são tão variados quanto os parâmetros existentes para esse objectivo. A oportunidade da rega é entendida como o momento em que o estado hídrico da planta, ou do solo, atinge um valor crítico, a partir do qual se deve regar.

O material vegetal foi a variedade LG 26.88, Índice FAO-600, de milho (*Zea mays* L.), regada por sulcos e instalada num aluviossil moderno, no microclima de Alvalade-Sado (37 [°] N, 8 [°] 24' W, 62 [m]; SW Portugal.) de elevada concentração térmica estival e elevado índice de aridez.

Neste estudo, é proposta e explorada a possibilidade do critério de rega se basear na igualdade entre a temperatura da cultura (T_c) e a temperatura do ar (T_a), *i.e.* $T_c - T_a = 0$ [°C]. A escolha deste critério justifica-se pela evidência empírica de T_c ser consistentemente inferior a T_a ($T_c - T_a < 0$), em condições de intensa irradiância, acentuado défice de pressão vapor (DPV) de água no ar e regime de vento moderado a calmo, associados a regimes de boa disponibilidade hídrica na rizosfera. Após uma rega o teor de água no solo diminui devido à evapotranspiração da cultura e T_c aumenta em relação a T_a ($T_c - T_a$ tende para valores nulos os positivos). A explicação concisa do facto de $T_c - T_a$ assumir valores com sinais algébricos diferentes, consoante as condições hídricas, é enquadrada no âmbito da micrometeorologia agrícola em que as relações entre T_c e T_a definem as condições de estabilidade atmosférica para o fluxo de quantidade de movimento: $T_c - T_a < 0$ exprime estabilidade, $T_c - T_a = 0$, neutralidade e, $T_c - T_a > 0$, instabilidade atmosférica.

A condição de regar a $T_c - T_a = 0$ e a validação do critério proposto significou assumir, *a priori*, três condições: 1) $T_c - T_a = 0$ deveria ocorrer num lapso de tempo (após a última rega) compatível com um regime hídrico que evitasse a ocorrência de carência hídrica para a cultura, 2) que, também, não redundasse na intensificação da rega e 3) que não provocasse a diminuição do índice de colheita (IC). Os resultados mostram que as condições iniciais, para a aceitação do critério de rega, segundo $T_c - T_a = 0$ (tratamento R_{tiv}), foram satisfeitas! No tratamento testemunha, a rega acumulada $RA = 600$ [mm] ($R600$), o intervalo (I_r) entre regas, de 7 [dia], foram fixados *a priori*; resultou o regime médio de $T_c - T_a = -3.9$ [°C], entre duas regas consecutivas; em R_{tiv} , a ocorrência de $T_c - T_a = 0$ teve periodicidade dinâmica (dependendo de T_a) e o valor médio $T_c - T_a = 0.4$ [°C], foi observado imediatamente antes da rega, com $T_c - T_a = -1.9$ [°C], entre duas regas consecutivas; em média verificou-se $I_r = 8$ [dia] associado a $RA = 500$ [mm]. Isto representa uma diminuição da frequência de rega em 14.3 % e um aumento da eficiência de aplicação da água igual a 16.7 %, em relação a $R600$. Em relação a $R600$, a produção de grão em R_{tiv} diminuiu mas não significativamente ($LSD_{0.05} = 4.54$ [t ha⁻¹]). Estes resultados validam o critério proposto. Esta validação foi corroborada pelos balanços de energia e de água no fitossistema e no âmbito de uma detalhada análise de crescimento.

Palavras-chaves: Crop Water Stress Index, evapotranspiração, milho, rega, resistência da cultura, termometria de infravermelho.

ÍNDICE

	Página
Prefácio.....	iv
Lista de símbolos.....	viii
Capítulo 1	
INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2	
MATERIAIS E MÉTODOS	
2.1 Introdução.....	6
Caracterização da atmosfera.....	6
Caracterização do coberto vegetal.....	7
Caracterização da planta.....	8
Caracterização do solo.....	8
Caracterização do sistema solo-planta-atmosfera.....	9
Técnicas e critérios de estudo.....	11
2.2 Regimes e Critérios de Rega.....	12
2.3 Detecção Remota da Temperatura da Cultura.....	13
2.4 Descrição do Ensaio.....	16
2.5 Balanço Energético do Coberto.....	21
Balanço da radiação de longo comprimento de onda.....	22
Termos de resistência.....	23
Ordem de grandeza da resistência da cultura.....	26
Expressão de $T_c - T_a$	28
2.6 Necessidades hídricas das Culturas.....	
Evapotranspiração de referência (ET_0).....	29
2.7 Expressão de Resultados.....	32
Capítulo 3	
RESULTADOS: ANÁLISE E DISCUSSÃO	
3.1 Sobre a Integração dos Resultados no Bioclima Cultural.....	33
3.1.1 Parâmetros microclimáticos.....	34
3.1.2 Regas e regimes hídricos.....	36
3.1.2.1 Balanço hídrico do solo. Gastos hídricos do milho.....	38
a) Balanço hídrico do solo.....	39
b) Evapotranspiração e coeficiente cultural.....	40
c) Componentes de ET_c	42
3.1.2.2 Efeito da rega sobre o balanço energético.....	42
a) Balanço de R_n dos regimes R_{500} e R_{600}	42
b) Medições ao meio-dia solar e integração fotoperiódica e diária.....	44
3.1.3 Modelo para Cômputo do Índice Cultural do Déficit Hídrico (CWSI).....	47
a) Limite inferior.....	47

b) Limite superior	49
c) Cálculo de CWSI.....	50
3.1.4 Efeito dos tratamentos de rega nos níveis de CWSI.....	52
3.1.4.1 Níveis médios de CWSI.....	52
3.1.4.2 Efeito da rega sobre a resistência da cultura	56
3.1.4.3 CWSI, Razão de Bowen e Transferência de Escala	58
3.2 Relação CWSI-Evapotranspiração-Biomassa	61
3.2.1 Relação CWSI-Biomassa	62
a) Eficiência da água.....	63
b) Índice de colheita	64
3.3 Estados Fenológicos e Unidades Térmicas de Crescimento	70
3.4 Análise de Crescimento.....	72
3.4.1 Evolução do índice de área foliar (LAI)	74
3.4.2 Evolução da altura (Hc)	78
3.4.3 Evolução da biomassa (BM)	80
3.4.4 Correlações entre Formas de Expressão de Crescimento	83
3.4.4.1 Biomassa vs. LAI	84
3.4.4.2 LAI vs. Altura.	85
3.4.4.3 Biomassa vs. (LAI * Hc)	85
3.4.4.4 Massa específica foliar (MEF) e Área específica foliar (AEF)	86
3.4.4.5 Síntese de parâmetros de análise de crescimento	88
a) Taxa de assimilação líquida (NAR)	89
b) Taxa relativa de crescimento (RGR)	90
c) Razão área foliar e biomassa	90
3.5 Conversões Energia -Biomassa e Energia-Evapotranspiração	97

Capítulo 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	101
--	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
-----------------------------------	-----

ANEXOS	xii
---------------	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

Nesta lista, as unidades S.I. estão apresentadas entre parêntesis recto;

[] designa um adimensional

Símbolo	Descrição e unidades
a, b, c	Parâmetros de ajustamentos estatísticos
A _f	Área foliar; [m ²]
AEF	Área específica foliar; [m ² kg ⁻¹]
BM	Biomassa; A= acumulada
CC	Capacidade de campo: teor volumétrico de água no solo a -0.03 MPa; [%]
CE	Coefficiente de emurchecimento: teor de água no solo, a -1.5 MPa; [%]
CGR	“Crop Growth Rate” ou taxa relativa de crescimento da cultura, []
CU	Capacidade de água útil (CC-CE): [%]
C _p	Capacidade calorífica do ar, a pressão constante; [e.g., J (kg °C) ⁻¹]
d	Altura de deslocamento do plano de origem do perfil do vento, [m]
DAS	Dia após sementeira
DGC	Dias-graus de crescimento; [°C dia]
DLAI _{max}	Duração de LAI máximo; [dia]
DPV	Défice higrométrico do ar ; [kPa]
DPVFA	Défice de pressão de vapor de água folhagem-ar; [kPa]
Dr	Dotação de rega, [mm]
e _a	Pressão ctual de vapor água no ar; [kPa]
e _s (T _a)	Pressão saturante de vapor de água no ar a temperatura T _a ; [kPa]
E	Einstein: unidade quântica. 1E = Número de Avogadro (A) de ftons. A = 6.02 10 ²³ [mol ⁻¹]. Mais comumente usa-se [μE m ⁻² s ⁻¹] = [μmol m ⁻² s ⁻¹]
E _s	Evaporação directa da água à superfície do solo, [mm]; [mm dia ⁻¹]
ET	Evapotranspiração da cultura: e, actual; m, máxima; o, referência; [mm], [mm dia ⁻¹], [mm h ⁻¹]; λ (aposto), densidade de fluxo de calor latente de vaporização da água, [W m ⁻²]
f(...)	Função genérica
f _α	Factor de absorção da radiação pela folhagem, []
f _i	Factor de intercepção da radiação pela cultura, []
f _r	Frequência de rega, [dia ⁻¹]
F	Estatística de comparação de variâncias
F _c	Grau de cobertura da cultura, []
G	Densidade de fluxo líquido da radiação para o solo [W m ⁻²]
g	Condutância ao fluxo de vapor de água: e, estomática; l, da camada limite; c, da cultura; m, medida; p, ponderada; [mmol m ⁻² s ⁻¹]; aceleração do campo gravítico, [s m ⁻²];

[] designa um adimensional

Símbolo	Descrição e unidades
ge _v	Condutância ao fluxo de vapor de água com dimensões $L T^{-1}$
H	Densidade de fluxo de calor sensível, $[W m^{-2}]$
H _c	Altura média da cultura; [m]
Ir	Intervalo (periodicidade) de rega, [dia]
k	constante de von Kármán (0.41) para fluxo turbulento do ar; coeficiente de extinção da luz no copado, []
K _y	Factor de resposta do rendimento (<i>i.e.</i> grão) ao défice relativo de água, []
LAI	Índice de área foliar: max; máximo; dec; no início do declínio; $[m^2 m^{-2}]$
LAR	“Leaf area ratio” $[m^2$ (área foliar) kg^{-1} (BM da planta)]
LWR	“Leaf weight ratio” $[kg$ (massa foliar) kg^{-1} (BM da planta)]
MEF	Massa específica foliar; $[kg m^{-2}]$
Mf	Massa foliar, [kg]
MS	Matéria seca; <i>e.g</i> $[kg m^{-2}]$
n	Tempo actual do período de luz, [h]; adimensional
N	Tempo máximo do período de luz, [h]
n/N	Número relativo de horas de Sol, dito insolação relativa []
NAR	Taxa de Assimilação Líquida, $[kg m^{-2} dia^{-1}]$
neb	Nebulosidade: % do céu coberto de nuvens
P(H ₂ O)	Produção primária actual da água $[kg m^{-2}]$, $[t ha^{-1}]$
Pm	Produção primária potencial da água $[kg m^{-2}]$, $[t ha^{-1}]$
PAR	“Photosynthetically Active Radiation” ou radiação fotossinteticamente activa, $[W m^{-2}]$
Pb	Pressão atmosférica; [Pa] (1 hPa = 1 mbar).
r	Resistência ao fluxo: a, aerodinâmica; c, da cultura; H calor sensível; $[s m^{-1}]$
R	Constante dos gases, $[8.314 Pa m^3 mol^{-1} K^{-1}]$ ou $[J mol^{-1} K^{-1}]$; Radiação: n, líquida; s; directa de curto c.d.o.; i, interceptada, $[W m^{-2}]$; o, incidente ao nível do topo da canópia; z, a altura z no interior da folhagem
RA	Rega acumulada, [mm]
RGR	“Relative growth rate” ou taxa relativa de crescimento; <i>e.g.</i> $[mg g^{-1} dia^{-1}]$
SLA	“Specific leaf area” ou área foliar específica (ver MEF)
SLM	“Specific leaf mass” ou massa específica foliar (ver MEF)
t	Tempo absoluto; [s], [h], [dia]
T	Temperatura; a, ar; b, base de crescimento, c, cultura; e, equivalente do ar húmido $(T_a + e/\gamma)$; o, céu; $[^{\circ}C]$, [K]
T*	Semi-soma entre T _a e T _c ; $[^{\circ}C]$, [K]
TLAI _{max}	Tempo necessário para atingir LAI _{max} ou tempo de realização; [dia]
UTN	Unidades térmicas normalizadas $(= (\sum GDC_i)/UTP)$; []

[] designa um adimensional

Símbolo	Descrição e unidades
UTP	Unidades térmicas potenciais da cultura; [$^{\circ}\text{C dia}$]
Uz	Água do solo utilizável pela cultura na camada de espessura z; [], [mm]
$v\text{H}_2\text{O}$	designa vapor de água
V*	Velocidade de fricção a nível da superfície rugosa; [m s^{-1}]
Vz	Velocidade do vento à cota, [m s^{-1}]
WUE	“Water use efficiency” ou Eficiência do Uso da Água; [$\text{g (MS) kg}^{-1} (\text{H}_2\text{O})$]
$y(\text{H}_2\text{O})$	Rendimento em função da água; [kg m^{-2}], [t ha^{-1}]
Y	Produção (rendimento): a, actual; m, potencial máximo; [kg m^{-2}], [t ha^{-1}]
Z	Altura, cota; [m]
Z _m	Altura de medição da velocidade do vento; [m]
Z _o	Altura de rugosidade aerodinâmica da superfície para fluxo de: h, calor sensível; m, quantidade de movimento do ar; [m]
Z _{om}	Altura de rugosidade para o fluxo de quantidade de movimento, [m]
Z _h	Altura de medição da humidade e da temperatura, [m]
α	Coefficiente de reflexão (albedo) da radiação pela cultura; []
$\alpha(t)$	Altura angular do Sol ao longo do dia; [rad]
β	Razão “calor sensível/calor latente de vaporização” ou razão de Bowen; []; campo de visão (âng. sól.) do termómetro de I.V.
γ	Constante psicrométrica do ar ($C_p P / 0.622 \lambda$); [kPa K^{-1}]
γ^*	Constante psicrométrica efectiva da cultura; [kPa K^{-1}]. $\gamma^* = \gamma (1 + rc/ra)$
Γ	Adimensional; ponto de compensação da transpiração para R _n ; [W m^{-2}]
δ	Variação instantânea de um parâmetro
Δ	Variação média de um parâmetro; Derivada da curva de “pressão de vapor de água x temperatura”; [kPa K^{-1}]
ϵ	Emissividade da superfície: e, cultura; o, do céu; []
Φ	Taxa absoluta de crescimento da(o): H, altura; [m dia^{-1}]; M, biomassa, [$\text{kg m}^{-2} \text{dia}^{-1}$]; L, índice de área foliar (LAI); [dia^{-1}] ou [$\text{m}^2 \text{m}^{-2} \text{dia}^{-1}$]
λ	Calor latente de vaporização da água; [MJ kg^{-1}]
μ	Taxa relativa de crescimento da(o): H, altura; M, biomassa; L, índice de área foliar (LAI); []
θ	Ângulo diedro formado entre a bissectriz de β e a superfície da folhagem
ρ	Densidade do ar, [kg m^{-3}]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $5.67 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$]
Σ	Somatório de uma série
ω	Ângulo de declinação solar; [rad]
φ	Altura zenital do Sol, [rad]

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Na prática agrícola recorre-se à rega para estimular ou garantir a produção vegetal, em particular nas regiões onde, sazonal ou permanentemente, a chuva é escassa. Como a instalação e manutenção de um sistema de rega envolvem custos relativamente elevados é imprescindível que, com a tecnologia de rega escolhida, se obtenha uma boa eficiência de aplicação, esta entendida como a relação entre a quantidade de água infiltrada e armazenada no solo até à profundidade das raízes e a quantidade de água aplicada. Perante o cenário actual de escassez da água, do avanço do deserto e do aquecimento global, a preocupação cada vez maior dos fabricantes, investigadores e utilizadores com a melhoria do desempenho dos sistemas de rega é elucidativa do interesse generalizado em aumentar a eficiência do uso da água no regadio. Neste contexto, integra-se também a eficiência com que a água é convertida em matéria seca. A escassez e a limitação progressiva do recurso água como factor de produção impõe maior rigor à condução das regas, ao cálculo das dotações e das frequências de aplicação de água ao longo do ciclo cultural. Concretamente, impõe determinar-se com o maior rigor possível a oportunidade de rega, entendida como o momento em que o estado hídrico da planta, ou do solo, atinge um valor mínimo crítico, a partir do qual se deve regar.

A determinação da oportunidade da rega é facilitada pelo recurso a técnicas modernas de controlo em que algumas se prestam a medições directas, como a da câmara de pressão para a medição do potencial hídrico no xilema, ou, indirectas, como a da termometria de infravermelho para a detecção remota da temperatura da folhagem. Outras técnicas permitem o registo automático de parâmetros ligados ao estado hídrico da planta, com o objectivo de melhorar a gestão da água de rega e a economia da água (*cf.* Jones, 1990).

O presente estudo aborda o controlo da oportunidade da rega no milho, controlo que é baseado na temperatura da folhagem, mais precisamente na diferença entre esta

temperatura e a do ar (T_a), possibilitado pelo uso dum termo-radiómetro, vulgarmente denominado termómetro de infravermelho.

A temperatura da cultura (T_c) e a diferença entre T_c e T_a (*i.e.*, $T_c - T_a$) funcionam na monitorização do estado hídrico do coberto vegetal porque se relaciona com o teor de água no solo e com a taxa da evapotranspiração (Idso *et al.*, 1977; Jackson, 1982; Lima *et al.*, 1992b). Os elevados calor específico e calor latente de vaporização da água são responsáveis pelo arrefecimento da superfície evapotranspirante, pelo que a água surge, neste contexto, como um regulador biofísico da temperatura da folhagem, facto tanto mais notório quanto mais intensa é a irradiância e maior a velocidade do vento, numa cultura bem regada. Considerando uma folha exposta a tais condições ambientais, a magnitude do endotermismo referido é influenciada por parâmetros de geometria foliar como o comprimento característico da folha segundo a direcção do vento, a área da superfície foliar e a velocidade do vento (Monteith & Answorth, 1990). Contudo, numa cultura, o auto-ensombramento e o ângulo de inserção foliares, o efeito de grupo que origina cavidades na folhagem e gradientes das variáveis microagrometeorológicas e condiciona o perfil do vento sobre o campo, imposto pelo coberto, introduz diferenças significativas em relação à folha isolada, no mesmo ambiente.

A experiência mostra (*cf.*, *e.g.*, Idso *et al.*, 1981b, Jackson, 1982, Idso *et al.*, 1990), que a cultura bem regada é, consistentemente, mais fresca que o ar, *i.e.*, $T_c - T_a < 0$ (entre certos limites de água no solo) em condições ambientais caracterizadas por elevada irradiância, acentuado défice de vapor de água no ar e vento moderado a calmo, como as do Verão mediterrânico. Este padrão de $T_c - T_a$ já foi observado na cultura do milho (Fontes, 1992) e na do trevo mediterrâneo (Lima, 1992). O intervalo de variação de $T_c - T_a$ apresenta extremos que vão de -10 [°C] a $+15$ [°C], de acordo com Jackson (1982). Fontes (*ibid*) mediu -8 [°C] na cultura do milho e Lima (*ibid*) registou -6 [°C] na cultura do trevo, como valores mínimos. No entanto, nas condições atmosféricas especificadas, mas com a diminuição da água no solo, o padrão do perfil temporal de $T_c - T_a$ exhibe um aumento tendencial nos dias imediatos à rega, comportamento que reflecte um incremento absoluto de T_c e, também, em relação a T_a com a depleção da água

disponível. Caso se não proceda à rega, $T_c - T_a$ alcança e ultrapassa o zero (Lima *et al.*, 1995b) e atinge um nível crítico, a partir do qual a taxa da fotossíntese líquida é drasticamente reduzida pelo efeito conjugado da termo-inibição associada à carência hídrica (Lima, 1992) e, certamente, por foto-inibição também (Long *et al.*, 1994). Com o comportamento típico de $T_c - T_a$ face à disponibilidade de água e a implicação ecofisiológica da sua aproximação ao zero, é legítimo estabelecer-se a hipótese se o momento da inversão do sinal algébrico de $T_c - T_a$, de negativo para positivo, poderá servir como critério ecofisiológico de controlo da oportunidade da rega. A exploração desta possibilidade para a cultura do milho constitui o objectivo central deste trabalho.

Utilizar a condição de se regar quando $T_c - T_a = 0$ significa optar por um sinal de necessidade da rega proveniente da planta. A assumpção básica é a de que $T_c - T_a = 0$ venha a ocorrer num lapso de tempo compatível com um regime hídrico que evite a ocorrência de carência hídrica para a cultura e que, também, não aumente a intensificação da rega. Por outras palavras, que a eficiência de aplicação não diminua. As relações entre T_c e T_a têm significados precisos, no âmbito da micrometeorologia agrícola; as relações $T_c < T_a$, $T_c = T_a$ e $T_c > T_a$ caracterizam as condições de estabilidade, neutralidade e instabilidade atmosférica, respectivamente (Kreis & Raffy, 1992). Logo, regar a $T_c - T_a = 0$, impõe a condição de neutralidade atmosférica e quando isto acontece, a radiação líquida, se o fluxo líquido de radiação para o solo é nulo, passa apenas a alimentar o fluxo de calor latente, ou seja o fluxo de calor sensível cultura-ar anula-se. O mesmo acontece ao quociente entre o fluxo de calor latente e o de calor sensível, conhecido como razão de Bowen. Estas entidades físicas caracterizam o balanço energético, condicionam a taxa de evapotranspiração da cultura e, consequentemente, o balanço hídrico e a frequência das regas.

O termómetro de infravermelho (TIV), na sua versão mais actual dá grande apoio à determinação do balanço energético da folhagem. Fornece, entre outros parâmetros, a radiação solar incidente e a diferença $T_c - T_a$, necessário ao cálculo do calor sensível. Além disso, o TIV é teleactuante, com um campo de visão que permite ao operador controlar a dimensão da área observada e, assim, obter amostras mais representativas do

campo e em menos tempo do que outras técnicas de amostragem que, normalmente, requerem contacto com a folhagem, como é o caso dos termopares.

Do ponto de vista mais geral do controlo do estado hídrico da cultura e da oportunidade da rega, o uso da termometria de infravermelho permitiu a Idso *et al.*, (1981a) e a Jackson *et al.* (1981) o desenvolvimento do índice de carência hídrica da cultura, simbolizado por CWSI ("Crop Water Stress Index"), que se tem mostrado prático na medição do grau de carência hídrica da cultura e que se relaciona com a elevação de $T_c - T_a$ com a falta de água. Aliás, CWSI foi, originalmente, expresso por Jackson *et al.* (1981) como um défice relativo da evapotranspiração, com base na evapotranspiração potencial, e Garrot *et al.* (1994) apresentaram, baseados nesse conceito, vários valores de CWSI para regar o trigo, estabelecendo a sua relação com a produção de grão, com a eficiência do uso da água e com a água no solo.

Uma exigência que emerge da adopção do critério de se regar a $T_c - T_a = 0$ é a do regime hídrico dele resultante dever pertencer à classe dos tratamentos que possam ser considerados bem regados, isto é, que não afectem significativamente o produto comercializável, num dado bioclima. Isto justifica uma análise do crescimento da cultura baseada na evolução do índice de área foliar, da altura da cultura e da biomassa, na taxa relativa de crescimento, na massa específica foliar, no índice de colheita, comparando três tratamentos de rega. Esta análise de crescimento é, também, efectuada neste trabalho com o objectivo de averiguar se a abordagem estritamente biofísica da taxa relativa de crescimento, taxa de assimilação líquida e biomassa acumulada dos diferentes regimes de rega conduzem a conclusões compatíveis, entre si, em termos ecofisiológicos, sustentada pela massa específica foliar e pela área específica foliar e pela taxa relativa de crescimento.

Outra exigência importante é a de se conhecer a correspondência entre o regime térmico da cultura, o regime de água no solo e o balanço de energia do coberto vegetal. Isto exige o controlo sistemático do teor hídrico volumétrico de água no solo, a medição da temperatura da folhagem para cálculo do fluxo de calor sensível (H) e do calor latente de

vaporização (λET), isto é, do equivalente energético do fluxo de água cultura-ar. O troço aéreo, até 2 [m] acima da cultura é, então, caracterizado pela temperatura do ar, pela radiação solar incidente, pela velocidade do vento e pelo défice higrométrico do ar. Contudo, essa caracterização requer, ainda, a determinação da resistência da cultura (r_c) e da resistência aerodinâmica (r_a).

Para a abordagem biofísica do controlo da oportunidade da rega baseada no critério de regar quando $T_c - T_a = 0$, objectivo principal deste estudo, procede-se, assim, à caracterização agrometeorológica do período de ensaio e à investigação da operacionalidade do critério proposto bem como inferir um $T_c - T_a$ crítico para regar. Para tal, ajustou-se a relação entre $T_c - T_a$ e o défice de pressão de vapor de água no ar para dois regimes de rega e calcula-se o índice de carência hídrica (CWSI).

É certo que a temperatura da folhagem em que se baseia o estudo, só será uma boa indicadora da necessidade de rega, e indicadora da oportunidade da rega, na medida em que o fecho estomático o fôr. A carência hídrica conduz ao encerramento, parcial ou total, dos estomas, mas, estes, por serem muito sensíveis a uma série de estímulos internos e externos, trazem, nessa medida uma certa dose de ambiguidade no seu comportamento que o operador deve superar. Por exemplo, as medições, a longo termo, de um mesmo parâmetro relacionado com o grau de abertura estomática, devem fazer-se sempre nas mesmas condições de luz e de água no solo e à mesma hora do dia, condicionalismo imposto por ritmos circadianos da actividade biológica, em ambiente constante. Também, os estímulos externos provêm da interacção cultura-ambiente. Neste aspecto, variações ambientais são simplesmente registados e confrontadas com índices de comportamento das plantas.

Capítulo 2

MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se o dispositivo experimental, os critérios do seu delineamento e de medição dos parâmetros, assim como os modelos de base a que se recorre para a caracterização agrometeorológica do local de ensaio ao longo do período vegetativo da cultura. O ensaio de campo foi instalado num Aluviossolo moderno, nas Folhas B3 e B4 da Secção de Culturas Regadas do INIA, Alvalade-Sado (37°5'N, 8°24'W, 62 m). O campo experimental tem as dimensões e geometria constantes da Fig.2.1, na qual está, também, representado o sistema de distribuição de água. Os parâmetros medidos e calculados caracterizam a atmosfera, a cultura e o solo.

Caracterização da atmosfera

Para a caracterização da atmosfera, recorreu-se à estação meteorológica clássica, com o código INMG-13213, instalada pelo Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, e localizada a escassos metros do ensaio. As grandezas temperatura do ar (T_a) e a humidade relativa (HR), foram medidas no termo-hidrógrafo, a temperatura do bolbo seco (T_s) e do bolbo molhado (T_w), no psicrómetro, para, a partir deles, calcular a pressão actual (e_a), a pressão saturante ($e_s(T_a)$) e o défice de pressão do vapor de água do ar (DPV); a radiação solar incidente (R_s) máxima, ao meio-dia solar, foi medida com um sensor de radiação global (Telatemp, Inc., USA) posicionado na horizontal, enquanto que a sua média diária foi estimada a partir da duração (n ou insolação) do dia, o número de horas de Sol de céu descoberto, dado por um heliógrafo, da duração máximo do dia (N) e da radiação estraterrestre obtida dada por tabelas (Doorenbos & Pruitt, 1977); a velocidade do vento (V), com o objectivo de se conhecer o seu perfil vertical, sobre o campo experimental, foi medida a três níveis, acima do solo, a 0.5, 2 e 4 m de altura, por anemómetros totalizadores. O valor médio de V foi utilizado no cálculo da resistência aerodinâmica (r_a), ao fluxo de vapor de água (vH_2O) e ao de calor sensível entre a cultura e o ar.

Caracterização do coberto vegetal

Para a caracterização do coberto vegetal, foram medidos ou calculados a temperatura da cultura (T_c) e a diferença da temperatura cultura-ar ($T_c - T_a$), este para se determinar a densidade do fluxo de energia do calor sensível (H). $T_c - T_a$ foi medido por um termorradiómetro (vulgarmente dito termómetro de infravermelho) que converte a radiação própria de longo comprimento de onda, radiada pela folhagem, em temperatura. O suporte teórico desta tecnologia é a Lei de Stefan-Boltzmann (Monteith & Answorth, 1990) que traduz a relação directa entre o fluxo da radiação própria de um corpo natural com a quarta potência da sua temperatura absoluta. No mecanismo referido, a radiação infravermelha é detectada e a lei invertida por um microprocessador para exprimir a temperatura da superfície radiante. H , por sua vez, foi obtido por conversão do gradiente térmico, $T_c - T_a$, em densidade de fluxo energético. H é um termo do balanço energético da cultura, a partir do qual se obtém a expressão concisa de $T_c - T_a$, conhecidos que sejam R_n , DPV , r_c e r_a , o que traduz uma multidependência de $T_c - T_a$ em relação às condições microclimáticas. Técnicas de correlação estatística (mínimos quadrados) foram aplicadas para se determinar qual destas variáveis que, a longo prazo, melhor explicava a variação de $T_c - T_a$, à medida que a cultura se desenvolvia. $T_c - T_a$ mínimo foi medido em condições de máxima e, $T_c - T_a$ máximo, estimado para as condições de mínima disponibilidade hídrica no solo, com a finalidade de se estabelecer os dois limites correspondentes da taxa evapotranspiratória e do índice de carência hídrica da cultura (CWSI: "Crop Water Stress Index") estabelecido por Idso *et al.* (1981a) e Jackson *et al.* (1981). Ou seja, baseado em $T_c - T_a$, o índice CWSI serviu para caracterizar o regime hídrico sazonal da cultura do milho submetida a três tratamentos diferentes de rega.

O balanço energético, ou da radiação líquida (R_n) de curto comprimento de onda (c.d.o.), sobre a cultura, foi baseado em R_s e na fixação do coeficiente de reflexão (albedo, α []) espectral médio da folhagem (verde) do milho; outro termo, o calor latente de vaporização (λET) da água, *i.e.*, o equivalente energético do fluxo de vH_2O , devido à evapotranspiração, foi obtido pela diferença $R_n - H$, procedimento que atribui valor nulo ao fluxo líquido de radiação para o solo (G), por condução (Monteith & Answorth, 1990). Aliás é do conhecimento empírico que o material de origem vegetal

é mau condutor de calor. No balanço da radiação, R_n e G são ganhos líquidos do sistema (em que G é considerado nulo); λET e H são perdas líquidas, em condições gerais. A equação de R_n , considerada na sua forma mais simplificada, foi, por conseguinte, $R_n = \lambda ET + H$. Além de calculado pela diferença $R_n - H$, λET foi, determinado, alternativamente, por mais dois processos, *i.e.*, pelo modelo de Penman-Monteith (Smith *et al.*, 1990), que simula as necessidades hídricas da cultura, e através do balanço hídrico no solo, considerando neste que a evapotranspiração da cultura foi a única fonte de variação da água armazenada no volume de solo ocupado pelas raízes (rizosfera).

Caracterização da planta

Na planta, a necessidade da análise de crescimento, justificada na Introdução, conduziu a medições periódicas da área foliar (A_f), da altura (H_c) e da biomassa (BM) da cultura. A medição de A_f e da sua evolução, destinou-se à determinação do índice de área foliar (LAI: “Leaf Area Index”, sigla internacional) em que A_f foi referida à área da quadrícula da superfície do solo correspondente à secção, na linha, de 8 plantas, com o espaçamento médio, entre elas, de 12.5 cm e espaçamento, entre linhas, de 75 cm. O material vegetal, colhido para a medição de A_f , também, serviu para a determinação do peso fresco e, após desidratação em estufa, a 60 °C, o peso seco estabilizado, o que aconteceu após 48 horas; a massa vegetal, expressa por unidade de área do solo e por unidade de tempo, constitui a biomassa (BM), neste caso, biomassa seca (BMS); quando referida a um dado período, tem-se BMS acumulada (BMA, *e.g.* [$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$]). A evolução de H_c destinou-se, por um lado, ao cálculo dos elementos da geometria da cultura, como a altura (d) de deslocamento do perfil do vento, imposta pelo coberto vegetal, e a altura de rugosidade (Z_o) do mesmo coberto, os quais entram no cálculo de r_a . Por outro lado, H_c serviu para se estabelecer correlações com LAI e BM , todos parâmetros intrínsecos ao crescimento da cultura.

Caracterização do solo

Ao nível do solo, a atenção foi centrada na observação da variação da água armazenada (ΔA), entre duas regas consecutivas. A variação do armazenamento da água no solo foi seguida com uma sonda de neutrões, previamente calibrada com

determinações gravimétricas, entre as camadas 0 a 10 cm e 150 a 160 cm do perfil do solo. As leituras da sonda foram traduzidas e tratadas ora como teores volumétricos de água no solo e, estes, em altura equivalente de coluna de água, ora como teor hídrico relativo no solo, de acordo com o tipo de análise pretendida. No balanço hídrico do solo foi assumido que não houve percolação profunda (P), para além da profundidade máxima das raízes, que o escoamento (S) à superfície do solo (armada em sulcos fechados nas extremidades) foi nulo e que, por isso, a única fonte de variação de água no solo foi a evapotranspiração da cultura (ET_c).

Caracterização do sistema solo-planta-atmosfera

A sigla ET_c foi utilizada para exprimir quer o processo, em si, a que se refere, quer o fluxo integral de água (*e.g.* mm) quer a sua taxa (*e.g.* mm dia⁻¹) no sistema solo-planta-atmosfera. Nos conceitos afins a ET_c , *i.e.*, evapotranspiração de referência (ET_o) e evapotranspiração máxima (ET_m) da cultura (Smith *et al.*, 1990) o critério foi o mesmo. ET_m e ET_o relacionam-se através do conceito de coeficiente cultural (K_c) de redução de ET_o em ET_m . ET_o e ET_m foram calculados segundo o modelo de Penman-Monteith (P&M) (Monteith & Answorth, 1990) usando dados climáticos medidos *in situ*, de acordo com o procedimento descrito por Smith *et al.* (1990). A evapotranspiração traduz-se no fluxo de água do solo para a atmosfera, directamente, através da evaporação a partir da superfície do solo (E_s), quando húmido, e através do sistema condutor da planta, constituindo a transpiração (Tr). Por isso, existem sempre resistências ao dito fluxo e, a nível da planta, é dita resistência da planta (ou da cultura) e corresponde ao percurso da água desde a raiz até à sua evaporação na cavidade subestomática (*cf.*, *e.g.*, Moreira, 1981). Cremos que os estomas constituem, senão o mais, pelo menos um dos mais reactivos sistemas de auto-regulação no Reino Vegetal, facto que poderá sustentar a aceitação de que as trocas gasosas entre a planta e a atmosfera são essencialmente controladas aí.

De facto, quando se refere à resistência da planta ao fluxo de água, por exemplo, destaca-se a resistência estomática-cuticular (r_{ec}) trazendo-a para o primeiro plano. Este controlo é tanto mais acentuado quanto mais o fôr o grau de carência hídrica (*e.g.* Kramer, 1983; Lima *et al.*, 1995b). O comportamento dos estomas, através da regulação do grau de abertura do poro estomático (ostíolo), ou seja, da resistência

estomática, responde, essencialmente, à variação da taxa de alimentação hídrica (Nunes & Correia, 1983; Saugier & Katerji; Baille *et al.*, 1994), desde que o vento não seja forte, a luz não seja intermitente e a temperatura seja biofísicamente sustentável. É que os estomas reagem a estímulos vários (Hsiao, 1985). Se há deficiência hídrica (tenha esta origem que tiver), a nível das folhas, a planta reage através da variação de r_{ec} que, nas plantas bem regadas (pelo menos nas higrófitas e mesófitas), é a resistência mais activa (Moreira, 1981). A cutícula, por ser descontínua, intervém, conjuntamente com os estomas, no processo de evapotranspiração e, por se sobrepôr à epiderme, o rigor impõe que sejam, ambas, unidas unicamente na resistência estomática-cuticular (Moreira, 1981) porque estão associadas em paralelo (Monteith & Answorth, 1990). Pragmaticamente pode referir-se apenas à resistência estomática para exprimir r_{ec} . Com efeito, em plantas mesófitas (grupo a que pertencem a maior parte das plantas cultivadas), r_{ec} apresenta valores mínimos tipicamente entre 50 e 100 [$s\ m^{-1}$], enquanto a resistência da cutícula varia entre 2×10^3 e 6×10^3 [$s\ m^{-1}$], uma a duas ordens de grandeza superior (ver Monteith & Answorth, 1990), noção traduzida pela relação de uma ordem de grandeza entre a evapotranspiração diurna e a nocturna, neste grupo ecológico.

Neste trabalho, r_{ec} foi associada à densidade da folhagem, expressa por LAI, para se calcular a resistência da cultura (r_c). A necessidade de se conhecer r_c (mínima se se trata de ET_o) foi a razão que conduziu à determinação de r_{ec} , a nível foliar, feita com um porómetro. Apurar r_{ec} médio, para uma planta e para uma amostra de plantas, é um procedimento moroso porque são precisas várias medições em cada folha, numa planta, e repetidas no número de plantas pretendidas. É, por isso, que a determinação de r_c se afigura difícil, facto que não será alheio à raridade de informação bibliográfica relativa a este parâmetro. Neste estudo foi posto em prática um protocolo para se apurar um valor médio de r_c mínimo, um valor médio de r_c entre duas regas consecutivas e, ainda, o valor médio de r_{ec} que representasse a situação de fecho estomático como sintoma de carência hídrica, em dias sem nebulosidade. Com a medição de r_c mínimo, pretendeu-se obter um valor de r_c que servisse de referência para o milho, vegetando nas condições microclimáticas genéricas do ensaio, nomeadamente, intensa irradiância, acentuado défice higrométrico do ar, vento

moderado, cultura bem regada e não clorótica, activamente evapotranspirante e oferecendo alto grau de cobertura ao solo, durante os três primeiros dias após a rega; o valor médio de r_c teve o objectivo de representar o período entre duas regas consecutivas, num regime com ET_m satisfeito.

Quanto à evapotranspiração, ET_o e ET_m , calculados sob a forma de taxa (*e.g.*, [mm dia^{-1}]) foram convertidos nos seus equivalentes energéticos (*e.g.*, [W m^{-2}]) para comparação com λET_c ($[\text{W m}^{-2}]$). O equivalente deste, ET_c ($[\text{mm dia}^{-1}]$), por outro lado, foi estimado por vários critérios, com o intuito de os aferir, entre si, ou seja, pela diferença $R_n - H$, pelo balanço hídrico do solo e pela rega acumulada (RA), no ciclo. Ao longo do período de luz foi ensaiada outra técnica que, baseada no balanço energético, ao meio-dia solar, fornece λET_c máximo e recorre a uma equação de fase do movimento aparente do Sol, para a integração de λET_c , no fotoperíodo. Das duas componentes de λET_c , E_s tem origem na superfície do solo e Tr na superfície foliar. Tr está relacionado com a fracção (f_i) da radiação solar incidente interceptada pela folhagem e E_s com o seu complementar, $1 - f_i$. Desde que o grau de cobertura (GC) oferecida ao solo pela cultura corresponda a LAI superior a 2.7-3.0, ET_c predomina sobre E_s (Tanner & Sinclair, 1983; Monteith, 1993; Richards *et. al.*, 1993). O aumento de uma unidade de GC, ou de LAI, tem um efeito mais que proporcional sobre a diminuição de E_s , porquanto a luz é atenuada ao longo do seu percurso descendente através da folhagem por uma lei de extinção hiperbólica, cuja assíntota é zero, e que depende de LAI acumulado ao longo do percurso de propagação e do coeficiente de extinção (k) médio da folhagem (*e.g.* Majeed, 1994). Para estimar k médio, medimos R_s e determinámos R_n , ao nível do topo da copa e do solo. Para a estima de GC, com o objectivo de discriminar E_s e Tr , recorreu-se a uma fórmula com base em LAI, k e f_i e na altura zenital do Sol.

Técnicas e critérios de estudo

Justificado o conteúdo deste capítulo, passamos a descrever o dispositivo experimental e técnicas e critérios de estudos adoptados. Recordar-se que o objectivo do trabalho foi o controlo da oportunidade de rega da cultura do milho feito por termometria de infravermelho (TIV), baseado no critério de rega quando $T_c - T_a = 0$ e utilizando um

termo-radiómetro portátil. Este critério originou o tratamento de rega R_{div} . O facto de se desconhecer, à partida, se o referido critério de rega conduziria, ou não, a uma intensificação da rega, esteve na base da introdução de mais dois tratamentos de rega, para estudos comparativos, e cujas formas de condução da rega se estabeleceram inicialmente: um, destinado a satisfazer a evapotranspiração máxima (ET_m) da cultura, durante o ciclo vegetativo, constituiu o total máximo de rega acumulada (RA) no ciclo; outro, com o objectivo específico de impôr um défice hídrico relativo igual a $1/3$, em relação a RA máximo, constituiu o limite inferior de RA. O estudo comparativo entre os três tratamentos foi feito, essencialmente, com base na análise de crescimento, do regime térmico e do teor de água no solo imediatamente antes da rega, a partir de uma condução da rega em que a água aplicada por rega (D_r) foi constante e igual para todos os tratamentos. Nos itens seguintes, explicamos os regimes de rega e os critérios da sua determinação, bem como o delineamento experimental.

2.2 Regimes e Critérios de Rega

Um tratamento de rega é caracterizado pelo regime hídrico imposto ao solo, na prática do regadio. Identificamos um regime pelo total de água recebido no ciclo. Há variantes, todavia. Estudámos três regimes. O total máximo de rega acumulada (RA), no ciclo, foi admitido, “a priori”, para ser igual à evapotranspiração máxima acumulada (ΣET_m), no ciclo. Este é o limite superior de RA. Para calcular o montante de água correspondente, procedeu-se, como descrito anteriormente, à determinação da evapotranspiração máxima (ET_m) através da simulação feita com o programa CropWat (vers. 5.7), baseado na série de 10 anos (1983-1992) de dados climáticos mensais médios, referentes a Alvalade-Sado. Para o período correspondente ao ciclo vegetativo do milho (Maio a Setembro) a necessidade hídrica média importou em 4.6 mm dia^{-1} . Ao mesmo tempo, foi considerada uma condução prática da rega baseada na dotação de rega ($D_r \text{ real}$) de 48 [mm] a aplicar em cada rega e durante todo o ciclo vegetativo, segundo uma periodicidade fixa de 7 dias. Neste regime, RA foi igual a 604 [mm] e o tratamento designado R_{600} . O limite inferior de RA foi obtido após a fixação arbitrária de um défice hídrico relativo a R_{600} igual a $1/3$. Assim, se obteve o tratamento R_{400} , que correspondeu a 402 [mm] de água aplicada no ciclo.

Mas, para aplicar a mesma condução prática de rega a R₄₀₀, foi preciso alargar o número de dias entre regas (Ir) e, logo, diminuir a frequência das regas. Então, assumiu-se como premissa que a similaridade entre os dias do Verão, durante o ciclo vegetativo, era suficiente para que o atraso da rega, durante *i* dias, correspondesse ao somatório de ET_m médio, já conhecido, durante, *i* dias, também. Isto equivaleria a adiar a rega de R₆₀₀ em 3 dias. Deste modo, Ir de R₄₀₀ obtém-se pela multiplicação do inverso da satisfação relativa de rega de R₄₀₀ (i.e. 2/3), em relação a R₆₀₀, por Ir de R₆₀₀, ou seja $(3/2) * 7 = 10.5$ dias; escolhemos 10, este o número de dias que decorreu entre duas regas consecutivas no regime R₄₀₀. O outro tratamento é identificado por R_{tiv} por ser a termometria de infravermelho a tecnologia de suporte da sua monitorização. R_{tiv}, era o único tratamento de rega acumulada (RA) desconhecida no início porque o critério de rega T_c-T_a = 0 tem natureza dinâmica e requer controlo em tempo real, contudo, a dotação de rega foi fixada nos mesmos 48 [mm], tal como se procedeu em relação a R₄₀₀ e a R₆₀₀. A escolha de R_{tiv} como objecto central de estudo surgiu na sequência de ensaios de controlo da rega levados a cabo com a termometria de infravermelho, com a espécie C₃, de trevo branco (*Trifolium repens* L. var. Olwen), de porte baixo (25-30 cm) e com elevado coeficiente de extinção para a luz (Lima, 1992), logo ecofisiologicamente diferente do milho, segundo critério similar de rega a R_{tiv}, no microclima mais húmido de Oeiras (Lima, 1992)..

2.3 Detecção Remota da Temperatura da Cultura

A medição remota da temperatura da cultura (T_c) foi efectuada por um termo-radiómetro (ou termómetro de infravermelho, TIV), integrado num aparelho designado INFRA-RED MULTIMETER AG-510B patenteada por EVEREST (USA), aqui abreviado para TIV. O instrumento é um sistema integrado de leitura e processamento, munido de acessórios de “software” e interface. Além do termo-radiómetro, propriamente dito, o TIV inclui uma série de complementos que o fazem funcionar, ainda, como um computador e uma estação meteorológica, portáteis. As informações que debita resumem-se no quadro 2.3.

O princípio de medição é baseado na aplicação da Lei de Stefan-Boltzmann segundo a qual a potência energética radiada (R_l [W m⁻²]) de longo comprimento de onda é

Quadro 2.3 Resumo das especificações do Multimeter AG-510B (Everest, Inc., USA)

Parâmetro	Especificação	Resolução
a) Funções e parâmetros		
Temperatura do ar	0 a +50 [°C]	0.2 [°C]
Temperatura da cultura	-10 a +70 [°C]	0.5 [°C]
Temperatura do bolbo molhado	2 a 50 [°C]	1 [°C]
Diferença de temperatura	-10 a + 20 [°C]	
Humidade relativa	5 a 95 %	5 %
Défice de pressão de vapor	1 a 10 [kPa]	0.5 [kPa]
Radiação solar	300 a 1000 [W m ⁻²]	
Crop water stress index	0 a 1.0	
b) Datalogger		
capacidade	8000 [byte]	
c) Termometria de infravermelho		
Amplitude de temperatura	-30 a + 100 [°C]	1 [°C]
Tempo de resposta	< 1 s	
Campo de visão (ângulo sólido)	15 ° padrão	
Alcance	2 cm a infinito	
Emissividade	fixada a 0.98	
Banda espectral de resposta	8 a 14 [µm]	
d) Ambiente		
Temperatura do ar	0 a 50 [°C]	
Humidade relativa	até 95 %	
e) outros		
Repetibilidade	0.3 %	
Ruído da temperatura	< 0.05 [°C]	

directamente proporcional à quarta potência da temperatura (T_c) de um corpo radiante, ou seja:

$$Rl = \epsilon_c \sigma T_c^4 \quad (2.1)$$

em que ϵ_c [] é a emissividade do corpo e σ ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W m}^{-2} \text{ K}^{-4}\text{]}$) a constante de Stefan-Boltzmann (Monteih & Answorth, 1990) e $T_c > 0$ [K]. Para calcular T_c , esta equação é invertida pela rotina do microprocessador do instrumento.

O Modelo AG-510B funciona em dois modos alternativos. O modo REAL TIME e o modo DATALOGGER. Para programas intensivos que envolvem muitos bytes de

informação, o segundo modo é mais prático. As opções de medição declaram-se via através de três teclas viradas para o utilizador quando o aparelho está apontado a um alvo: INDEX, E, ENTER, complementadas por duas teclas direccionais e opções SIM ou NÃO. Cada opção é executada teclando ENTER e a alternância do modo DATALOGGER para o de REAL TIME é feita através da tecla E. O aparelho, anatomicamente concebido, tem a forma de uma pistola e é accionado logo que segurado pelo operador.

Para fazer uma leitura, aponta-se, espera-se um instante e aperta-se o “gatilho”. Para armazenar as leituras no datalogger, é preciso que a função SAFETY, acedida através da tecla E, esteja no modo OFF. Nesta opção, a gravação é feita sempre que se prima o “gatilho”; se SAFETY tem o valor ON, a leitura não é gravada. Em qualquer dos modos da função SAFETY, o valor de cada parâmetro é visualizado no ecran digital alfanumérico. Outra função especial é a SOL (do estado da radiação solar e acedido por E) que assume igualmente dois valores lógicos: LOCKED e UNLOCKED. Se seleccionado UNLOCKED, a radiação solar é continuamente actualizada; se estiver em LOCKED, é fixado um valor durante a medição.. As nossas medições a radiação solar era fixada para cada série de leituras (relativa a cada talhão), opção prática na referenciação posterior das ditas séries em cada ficheiro bruto. De qualquer modo, a cada gravação é atribuído, por defeito, um número de ordem. A fixação dos valores da radiação solar foi feita com o aparelho na horizontal, sendo o operador apoiado por uma bolha localizada na parte superior do corpo do instrumento.

As funções e as subrotinas para o operador programar o esquema de leituras, são os campos\funções FARM, FIELD, PLOT, CROP. A cada um é atribuído um número de identificação, mas o esquema hierarquizado desta estrutura permite, por exemplo, para o mesmo FARM, vários FIELD's, para cada FIELD, vários PLOT's e, para cada PLOT, vários CROP's, tudo isto em vários níveis. O nosso esquema foi simples porque tínhamos um CROP, um FARM e um FIELD. No “módulo” CROP foi referenciado o modelo-padrão do *limite inferior* da relação $T_c - T_a$ vs. DPV, definida pelos parâmetros “Intercept” (I) e “Slope” (S), da cultura, para o cálculo instantâneo do CWSI. Neste esquema simples, e operando no modo LOCKED da função SOL, a ordem pela qual os talhões foram medidos foi anotada. O operador pode introduzir até

8 pares (I, S), sendo, a cada um, atribuído, por defeito, um número de identificação, a partir do 9 já que o instrumento traz 8 de origem. Alternar de um CROP para outro requer a utilização da subrotina RECALL\CROP, ramificada em FARM, FIELD, CROP, RECORDS, tendo este as opções de extracção (DOWNLOAD), por hora de gravação, ou por FARM. A capacidade de armazenamento do datalogger era preenchida com 400 gravações. Para a transferência de dados, a interface é assegurada por um PC, IBM compatível e estabelecida com o apoio do “software” (sintaxe MS-DOS) de origem, através duma porta RS-232 convencional.

Montar um dispositivo de recolha de dados fiáveis pressupõe ajustar a geometria do mesmo, em conformidade com as dimensões do alvo e com as especificações ópticas do TIV, essencialmente o campo de visão ($CV = \beta$), ângulo sólido. Usámos $\beta = 15$ [°], o que, à distância de 1.21 m do alvo, “vê” um círculo de 0.0730 [m²], 1.2 vezes superior a uma folha de formato A4, numa focagem vertical. Se houver um rebatimento de θ ° da superfície-alvo, a cónica definida será uma elipse. Isto corresponde a leituras, no campo, segundo o ângulo θ definido pela bissetriz de β e pela superfície da folhagem. Para leituras obtidas a 1.5 [m] acima da folhagem, e $\theta = 30$ [°], a distância entre a projecção horizontal da frente do TIV e o ponto de intercepção entre a bissetriz e a superfície é $L = 1.5 \cotg 30 = 2.59$ [m]. L é proporcional à altura de leitura. Fixada esta, a diminuição de θ para 20°, determina $L = 1.5 \times 2.75 = 4.13$ [m], o que gera uma elipse maior. O uso do TIV faculta a amostragem segundo áreas de cónicas de dimensões perfeitamente controláveis. Esta é uma vantagem em relação aos métodos de amostragem por contacto, como o termopar. A dimensão da amostra, para caracterizar o estado térmico de uma cultura, torna-se consideravelmente menor. Por outro lado, a informação passa a independer do *locus* de medição para passar a traduzir o valor médio referente à área medida, contando, mesmo, com as cavidades inerentes à estrutura da folhagem.

2.4 Descrição do Ensaio

A Fig. 2.1 representa a geometria e as dimensões do campo experimental, bem como o sistema de distribuição de água. Os números árabes, de 1 a 6 representam seis

modalidades de rega presentes. Em termos de rega acumulada (RA) os tratamentos são: 1 (R_{tiv}; RA = 498 mm ou R₅₀₀), regado quando $T_c - T_a = 0$; 2, repetição de R_{tiv} (i.e. 500 mm), regado ao ciclo de 7 dias; 3, RA igual a 400 mm (i.e. R₄₀₀), regado ao ciclo de 10 dias; 4, tratamento R₆₀₀; regado ao ciclo de 7 dias; 5 repetição de R₄₀₀, regada ao ciclo de 10 dias; 6 “Sequeiro”, uma rega de 69 mm (30 de Junho), apenas. Do nosso ensaio só fizeram parte os tratamentos 1 (R_{tiv}), 4 (R₆₀₀) e 5 (R₄₀₀). Todos os tratamentos, com excepção do “Sequeiro” receberam uma dotação de rega única de 48 mm/regada.

Os seis tratamentos presentes no campo totalizaram 18 talhões, em três blocos (I, II, III) que ocuparam duas folhas de terreno. A distribuição dos talhões, por bloco, em ordem a responder à variabilidade espacial de factores não controlados experimentalmente, foi obtida por sequências de números aleatórios. Cada talhão albergou 12 linhas de plantas. A área útil de cada folha foi de 2156 m² e, de cada talhão, 225 [m²]. A distância de 0.75 m entre dois talhões consecutivos correspondeu ao espaçamento entre linhas de plantas, cujo comprimento foi de 25 [m]. As bordaduras laterais, com 4.75 [m] de largura e 25 m de comprimento, confinaram com os talhões 5 e 6, num extremo, e com os talhões 4 e 2, no extremo oposto, foram semeadas com milho (*Zea mays* L.).

A variedade de milho estudada foi a LG 26.88, Índice FAO-600. A densidade média dos talhões foi de 92 10³ [ha⁻¹], medida 25 dias após a sementeira (DAS). O milho é uma mesófita megatérmica, o que significa que a sua ecofisiologia se associa à temperatura base (T_b) de germinação e crescimento de 10 °C, desenvolvimento óptimo à temperatura elevada (20-30 [°C]) e água disponível próxima da capacidade de campo.

Para a instalação e condução do ensaio, as operações culturais de mobilização, adubação de fundo e aplicação de fitofármacos, obedeceram à sequência constante do quadro 2.1. A gradagem a 27 de Março teve como objectivo destruir o restolho da cultura anterior (mesma variedade de milho). A profundidade da lavoura foi de 40 [cm]

A frezagem teve por finalidade a destruição de torrões. Seguiu-se-lhes a segunda gradagem para incorporar o adubo de fundo (7-21-21) entre 15 e 20 [cm], à razão de 886 [kg ha⁻¹], o que equivale a 62.02 [kg ha⁻¹] de N, 186.06 [kg ha⁻¹] de P e 186.06 [kg ha⁻¹] K. No mesmo dia 4 de Maio, efectuou-se a sementeira à razão de 22.58 [kg ha⁻¹], com o semeador regulado para gerar um compasso de 0.75 m x 0.162 [m]. (*i.e.* distância entre linhas x distância na linha). O herbicida (controlo de espécies de folha larga) foi aplicado em pré-sementeira, a 5 [cm] de profundidade, tendo sido incorporado com a freza. A profundidade de sementeira foi de 5 [cm].

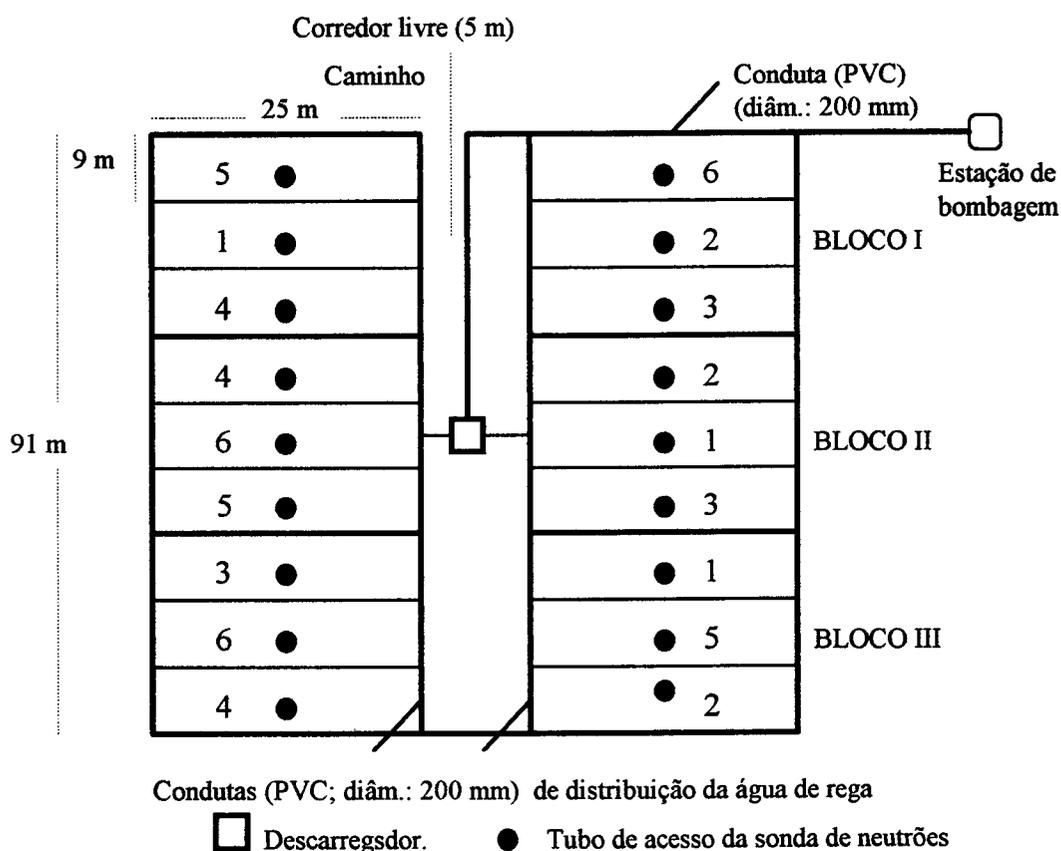


Fig. 2.1. Blocos não casualizados, de 6 tratamentos e 3 repetições. Cada bloco tem duas metades, separadas por um corredor central, com 5 m de largura, no centro do qual foi instalado um descarregador de secção triangular. A ligação entre o descarregador e as condutas laterais fez-se com mangas plásticas. O ensaio era enquadrado por outras culturas de milho e girassol. Escala ignorada.

Quadro 2.1 Calendário fitotécnico comum a todos os tratamentos.
Cultura: milho (*Zea mays* L: LG 26.88, Índice FAO-600).

Datas	Mobilização Adubo	Fitofármacos	Observações
27 Março	Gradagem		

2 Maio	Lavoura			
2 Maio	Gradagem			
4 Maio	Gradagem	886 [kg ha ⁻¹]	6 [kg ha ⁻¹]	Dyfonate 5g
4 Maio	Frezagem		6 [l ha ⁻¹]	Herb. Primextra
4 Maio	Gradagem			
Datas	Mobilização	Adubo	fitofármaco	Observações

Quadro 2.1. Continuação

Adicionalmente, o campo foi sujeito a uma rega de homogeneização, de pré-sementeira, com o objectivo de levar o solo ao estado de sazão aquando da sementeira (12 dias mais tarde) e evitar a formação de torrões aquando das mobilizações. A 17 de Junho procedeu-se à abertura de sulcos, porque método de aplicação de água à cultura foi o da armação do terreno em sulcos fechados na cabeceira, paralelos entre si e orientados segundo o maior comprimento do talhão (*i.e.* 25 [m]). Para isso usou-se um sistema combinado de escarificação (sacha), aplicação do adubo de cobertura e abertura dos sulcos para a rega. A 20 e 21 de Junho, aplicou-se uma rega geral de 64 mm (Folha B3, da Carta de Afolhamento da Estação) e de 80 [mm] (Folha B4) para evitar a ocorrência precoce de carência hídrica.

As características físicas e hidrológicas do solo estão resumidas no quadro 2.2. A textura do solo é franco-argilo-limosa, conferindo ao solo baixa condutividade hidráulica, quando saturado, mas com grande capacidade de armazenamento de água. Dos 10 aos 160 cm de profundidade, o teor volumétrico de água, à capacidade de campo (CC), varia de 0.29 a 0.36 [cm³ cm⁻³] e o coeficiente de emurchecimento (CE) corresponde ao teor de 0.12 a 0.19 [cm³ cm⁻³]. A capacidade utilizável (CU) média potencial à produção vegetal, é 0.17 [cm³ cm⁻³].

A disponibilidade hídrica do solo foi avaliada, com uma sonda de neutrões, previamente calibrada, com determinações gravimétricas ao longo do ensaio. A sonda de neutrões possui uma fonte radioactiva que emana electrões de alta frequência. Estes, ao embaterem contra os núcleos dos átomos de hidrogénio da água do solo perdem energia e são reflectidos. Os electrões reflectidos de baixa frequência são detectados por um sensor e o seu número visualizado no ecrã digital (Ruprecht & Schofield, 1990). Como o teor de água no solo é, em regra, variável, a utilização da sonda para controlo da oportunidade da rega requer leituras-padrões. Estas foram feitas em amostras da água de rega, para se fixar um valor médio de referência. A

curva de calibração obtida é $2.46 + 51.9(n/N)$, em que n é a leitura actual da sonda e N (= 553), a leitura-padrão média e n/N é a contagem relativa.

Os tubos de acesso da sonda foram localizados aproximadamente ao centro de cada talhão, por assumirmos que aí estariam suficientemente afastados do efeito da bordadura e que, portanto, a variação de água armazenada no perfil seria devido apenas à evapotranspiração da cultura; nesta localização os efeitos do escoamento lateral subsuperficial são compensados. O teor hídrico actual (THA) do solo é, em geral e por conveniência de análise, expresso em termos relativos, ou seja, teor hídrico relativo (THR) do solo ($[cm^3 cm^{-3}]$), dado pela equação (2.2):

$$THR = (THA - CE) / (CC - CE) \quad (2.2)$$

THR é representado por um adimensional. THR [] tem variação contínua entre 0.0 e 1.0.

Quadro 2.2 Características físicas e hidrológicas do solo (aluviossolo moderno).

Profundidade	0-30	30-60	60-80	80-120
Areia grossa (%)	7.3	11.0	9.8	8.1
Areia fina (%)	47.2	39.3	34.8	32.0
limo (%)	32.0	27.1	32.6	35.0
Argila (%)	13.5	22.6	22.8	24.9
Condut.Hid. (cm/h)	0.55	1.82	0.82	0.70
Densidade aparente	1.45	1.53	1.60	1.70
Porosidade total (%)	44.7	42.0	40.1	32.2
pH-KCL	6.10	6.15	6.20	5.95

Fonte: Santos *et al.* (1995).

A água de rega foi bombeada, a partir de um poço, e conduzida em condutas de PVC, fechadas, de 200 [mm] de diâmetro, até à entrada do sulco. As condutas, expostas perpendicularmente aos sulcos, tinham válvulas corredeiras (janelas) espaçadas de maneira a coincidirem com as extremidades, a montante, dos mesmos. As condutas foram niveladas, com um sistema “laser”, para evitar gradientes de carga hidráulica total no seu interior e garantir o mesmo débito por sulco. Isto exigiu a calibração individual do débito de cada janela baseada na cronometragem do tempo de enchimento de um balde de capacidade igual a 5 litros. Este procedimento permitiu conhecer o tempo de rega necessário para se atingir a dotação de rega de 48 [mm],

comum a todos os talhões. Antes, à saída da conduta principal, o caudal a entrar nas mangas plásticas, foi controlado a nível do descarregador, de secção triangular, cujo hidrograma fora previamente ajustado pela relação caudal ($Q [l s^{-1}]$)-altura ($h [m]$), em laboratório. A equação de calibração do descarregador é $Q = 1701.1 h^{2.4942}$. A dotação (única) de rega igual a 48 [mm] foi obtida com a altura geométrica da água no descarregador igual a 10.6 [cm], correspondente ao caudal de 5.5 [$l s^{-1}$]. Uma contra-calibração do descarregador foi feita no campo para o ajustar ao débito do sistema de bombagem e grau de abertura das "janelas" de rega.

2.5 | Balanço Energético do Coberto

Em termos de trocas energéticas com o ambiente circundante, a cultura é um sistema húmido e não adiabático, ou seja, o balanço de radiação líquida (R_n) é não nulo. Em primeira aproximação, R_n é considerado a alimentar apenas o fluxo de calor sensível (H) e de calor latente (λET) de vaporização da água porque são estes os termos de maior peso e acedidos sem ambiguidades com as tecnologias que usámos. O fluxo líquido de calor por condução para o solo (G) é geralmente negligível (Smith *at al.*, 1990) pelo facto de o material vegetal ser mau condutor de calor. Tem-se pois, $R_n [W m^{-2}]$:

$$R_n = \lambda ET + H \quad (2.3)$$

Na equação (2.3) $R_n = R_s (1-\alpha)$, em que α (albedo) é igual a 0.23 [] para a cultura do milho (Monteith & Answorth, 1990). A equação (2.3) é geral mas no presente caso o balanço fez-se ao meio-dia solar, altura em que se procedeu às medições de R_s .

Assumindo a convenção segundo a qual os fluxos cultura-ar são inerentemente positivos, a taxa de calor sensível entre o coberto e o ar sobre ele é traduzida pela equação (2.4), seja, então:

$$H = \rho C_p (T_c - T_a) / r_H \quad (2.4)$$

onde ρC_p é a capacidade calorífica volumétrica do ar, a pressão constante (e.g. $[J m^{-3} K^{-1}]$); ρ $[kg m^{-3}]$ é a densidade do ar e C_p $[J (kg K)^{-1}]$, capacidade calorífica do ar, a pressão constante, $T_c - T_a$ $[K]$, e r_h $[s m^{-1}]$ é a resistência aerodinâmica ao fluxo de calor sensível.

Para resolver a equação (2.4) foi medido $T_c - T_a$ com o termómetro de infravermelho, posicionado entre 1.5 m a 2.0 m acima da cultura, segundo um ângulo horizontal de aproximadamente 30° , ao meio-dia solar, com vento calmo a moderado, durante todo o ciclo vegetativo; r_h foi aproximada pela resistência aerodinâmica (r_a) de acordo com a sugestão de Monteith & Answorth (1990) porque no campo prevaleceram as situações de turbulências. r_a , por sua vez, foi obtido do perfil do vento ajustado para o campo. Para isso, a velocidade média do vento (V) foi registada em simultâneo com $T_c - T_a$ e R_n . A taxa de perda de calor latente é dada, por sua vez, pela equação (2.5):

$$\lambda ET = [e_s(T_a) - e_a(T_a)] \rho C_p r_{av}^{-1} / [\Delta + \gamma(1 + r_c/r_{av})] \quad (2.5)$$

com $r_{av} = r_a$ $[s m^{-1}]$ por razões já justificadas; Δ $[kPa K^{-1}]$ é a derivada da curva de pressão saturante/temperatura; γ $[kPa K^{-1}]$ (gama) é a “constante” psicrométrica do ar; $e_s(T_a) - e_a(T_a)$ $[kPa]$ é o défice de pressão de vapor de água (DPV) no ar; λ (lambda) é o calor latente de vaporização da água (fixado em $2.45 [MJ kg^{-1}]$) para a conversão, em equivalente energético, de ET com dimensões LT^{-1} ($1 [mm dia^{-1}] = 2.45 [MJ m^{-2} dia^{-1}]$). Em rigor $e_s(T_a)$ deve ser substituído por $e_s(T_c)$ para indicar que a superfície evaporante é a folhagem da cultura e falar-se, então, em défice de pressão de vapor folhagem-ar (DPVFA), mas transigimos neste facto porque DPV e DPVFA têm a mesma ordem de grandeza (cf., Lima, *et al.*, 1995b); $e_s(T_a)$ é a pressão de vapor de água saturante à temperatura T_a e $e_a(T_a)$ é a pressão actual, no ar.

Balanço da radiação de longo comprimento de onda

O balanço energético da cultura contém uma componente referente à radiação de longo c.d.o. (R_{nl}), que consideramos, aqui, numa segunda aproximação. O balanço de longo c.d.o. é dado, também, por um fluxo ascendente, que tomámos aqui com origem na folhagem da cultura, e por outro descendente, com origem no céu, e calculados de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, já referida. Atenta-se, então a:

$$R_{nI} = \epsilon_o \sigma T_o^4 - \epsilon_c \sigma T_c^4 \quad (2.6)$$

R_{nI} está em densidade de fluxo ($[W m^{-2}]$); ϵ_o e T_o são a emissividade e a temperatura absoluta do céu e ϵ_c e T_c são a emissividade e a temperatura absoluta do coberto vegetal, respectivamente; sendo ϵ_o dependente de e_a (Smith *et al.*, 1990); σ é a constante de Stefan-Boltzmann, para a conversão de unidades. A emissividade (ϵ) varia entre zero e a unidade. Para corpos negros é $\epsilon = 1$, para corpos cinzentos é $\epsilon < 1$. A maior parte dos corpos naturais comporta-se como corpos do último tipo (Monteith & Answorth (1990), concretamente, o material vegetal que apresentam valores de ϵ superiores a 0.95, na banda electromagnética de máxima emissão térmica (3 a 100 μm) (Monteith & Answorth, 1990). Smith *et al.* (1990) recomendam um valor médio único $\epsilon = 0.98$, para a generalidade das culturas. Experimentalmente, foram obtidos valores de ϵ_c iguais a 0.98 para uma cultura de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) sob diferentes regimes hídricos e de 0.96 e 0.97 para um solo limo-argilo-arenoso seco e húmido, respectivamente, por Bartholic *et al.* (1972); 0.97 para o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.; Blad & Rosenberg, 1976); 0.94 para folhas de milho (*Zea mays* L.; Monteith & Answorth, 1990). Para o presente estudo fixámos a emissividade em 0.98. A temperatura do céu foi considerada $T_o [^{\circ}C] = T_a - 20$ (Monteith & Answorth, 1990), em dias de céu limpo, não se tendo efectuado medições em dias de céu totalmente nublado em que $T_o [^{\circ}C] = T_a - 2$ (*Idem, Ibid*).

A equação (2.6) prevê $R_{nI} < 0$, ou seja, que a cultura tenha perdas líquidas de radiação de longo c.d.o., mesmo no amplo intervalo biofísico de $T_c - T_a$ entre -10 e +15 $^{\circ}C$ apresentado por Jackson (1982) para a temperatura média normal do Verão. Entretanto, R_{nI} pode ser corrigido, por um factor f , para a nebulosidade (neb) relativa, de acordo com Doorenbos & Pruitt (1977). Esta correcção foi feita por defeito e apenas, pelo suporte informático que usámos para o cálculo de ET_o . f é, com efeito, a razão entre o valor actual de R_{nI} e o seu valor em condições de céu limpo (R_{nI_o}) (Smith *et al.*, 1990).

Termos de resistência

As equações (2.4) e (2.5) requerem a determinação das resistências r_a e r_c . A resistência aerodinâmica entre a cultura e o ar é uma função de diversas variáveis e

pode representar-se simbolicamente essa dependência pela expressão $r_a = f(Z_o, d, H_c, V, T_a, T_c)$ (cf. Kreis & Raffy, 1992). T_c e T_a já são conhecidos e Z_o e d são parâmetros da geometria do coberto relacionados com a altura (H_c) deste. Portanto, f é uma expressão bastante complexa que exprime as características geométricas do coberto e a interação térmica deste com o ar.

Para determinar r_a , utilizámos a relação logarítmica de Allen *et al.* (1989), também recomendada por Smith *et al.* (1990), mas corrigida pelo termo da estratificação térmica $\Gamma = \{1 - n(Z_m - d) g (T_c - T_a) / T^* V^2\}$ de acordo com Monteith & Answorth (1990), ou seja:

$$r_a = (\ln\{(Z_m - d)/Z_{om}\}) \ln\{(Z_h - d)/Z_{oh}\} / k^2 V_z \Gamma \quad (2.7)$$

onde:

- r_a : resistência aerodinâmica [$m^{-1} s$]
- Z_m : altura de medição da velocidade da vento [m]
- Z_h : altura de medição da temperatura e da humidade [m]
- Z_{om} : altura de rugosidade para o fluxo de quantidade de movimento (M)
- Z_{oh} : altura de rugosidade para o fluxo de calor sensível (H)
- V_z : velocidade do vento à altura de medição Z_m .
- k : constante de von Kármán (0.41 [])
- Z_o : rugosidade aerodinâmica do coberto
- d : deslocamento da origem do perfil devido ao coberto.

Em Γ [], $n = 5$ []; g [$m s^{-2}$], aceleração devida à gravidade; T^* , semi-soma entre T_c e T_a . De acordo com Abtew *et al.* (1989), $Z_o = 0.13(H_c - d)$ e $d = 0.75 H_c$, para a cultura do milho, em que H_c é a altura do coberto, aqui, referida a uma superfície maior à do ensaio porque a área envolvente ao local de ensaio tem relevo heterogéneo e se elevam elementos de alturas diversas. Para obviar esta heterogeneidade, delimitámos, na Carta Agrícola do Departamento de Regadio (1995, Alvalade-Sado), uma área de 4.230 [ha] após o que procedemos ao cálculo da média ponderada de H_c . Calculou-se $H_c = 1.09$ m, após ponderação pelas áreas relativas de cada cultura (estado adulto) presente durante a campanha de 1995, da sebe verde de amoreira compacta (altura, 4 [m]) e de

0.114 [ha] de solo nú (*i.e.*, 2.7%) que corresponde ao caminho confinante com o ensaio (*i.e.*, 14.8%)

Da equação (2.7), é evidente que r_a varia inversamente com a velocidade do vento. No cálculo de r_a , fizemos $Z_{om} = Z_{oh}$, dada a turbulência do ar prevalecente; $Z_h = 1.5$ [m] e Z_m foi obtido por otimização, em folha de cálculo, segundo o critério $0.8 < Z-d < 1.2$ [m], sobre a cultura, para mantermos os critérios comuns a estudos de perfis de vento. Z_m foi, então, calculado por inversão da equação (2.8) do perfil do vento sobre uma superfície rugosa apresentada por Abtew *et al.* (1989):

$$V_z = (V^*/k) \ln[(Z_m - d)/Z_o] \quad (2.8)$$

onde V^* [$m \ s^{-1}$] é a velocidade de fricção sobre o coberto. Depreende-se Z_m se determina uma vez conhecidas as características da superfície e da velocidade do vento (a um único nível Z_m). V^* foi calculado para $Z = 2$ [m] acima do solo, fixando o valor obtido para o cálculo de $Z_m - d$.

Por sua vez, a resistência da cultura (r_c) depende da resistência estomática-cuticular (r_{ec}) e do índice de área foliar da cultura (LAI, na sigla internacional), sendo r_{ec} informação obtida a nível da folha. A resistência estomática da planta é o inverso da sua condutância estomática (g_e); a resistência da cultura (r_c), referida a uma amostra de plantas, é o inverso da sua condutância (g_c), e isto porque se considera que o tipo de associação das resistências em cada nível de integração é em paralelo, isto é existe independência de funcionamento entre elementos (*i.e.*, estomas, folhas, plantas) pertencentes ao mesmo nível.

Para formarmos uma ideia da ordem de grandeza de g_c e de r_c , e da sua variação com o teor de água no solo, entre duas regas consecutivas, numa modalidade bem regada de milho (*i.e.*, R600), as suas determinações tiveram lugar em três ocasiões, 2, 4 e 7 dias depois duma rega, entre 21 e 28 de Julho, em que a última medição foi obtida 2 horas antes da nova rega. Durante esse período, de dias sem nuvens, LAI foi superior a 3, valor geralmente aceite como de plena cobertura ao solo (Monteith, 1993; Richards, 1993); então, LAI médio foi igual a 5.5. O procedimento baseou-se em considerar a planta dividida em níveis horizontais, sendo cada nível identificado com o da inserção

de cada folha. Cada folha, por sua vez, foi “sectorizada” em três zonas, apical, média e basal, com uma medição em cada página. Isto fez 6 leituras por folha e, numa planta típica, com 15 folhas, uma amostra de 90 elementos. Dez plantas foram marcadas ao acaso, num talhão do tratamento R₆₀₀, atingindo a série de dados a dimensão de 540.

Ordem de grandeza da resistência da cultura

Para efectuar as medições usámos um porómetro, Modelo AP4 (Delta-T Devices, Inc., 1990, UK) previamente calibrado com uma folha de papel de filtro humedecida com água destilada, interposta entre uma placa de calibração de origem, contendo seis séries de orifícios circulares, de diâmetro constante por série, mas crescente entre séries. A curva de calibração é um ajustamento, por minimização da variância, entre a resistência do orifício (abscissa) e o tempo de percurso (“transit time”) do vapor de água, desde a sua fonte até ao sensor de humidade da câmara de medição, num percurso real de 8 mm. O porómetro, descrito por Monteith *et al.* (1988), opera em regime “steady state” e é autocompensante em relação à variação da temperatura no seu interior. Como acessório, traz um *software* para extracção de dados. Este aparelho mede ainda a radiação fotossinteticamente activa (dito PAR), a temperatura do ar e da folha (T_f) e a pressão barométrica na câmara.

É praticamente impossível evitar erros de medição devido à alteração do ambiente de luz, em folhas de difícil acesso, pelo que assegurar a orientação natural da folha foi a regra. Além disso, a intensidade da radiação diminui do topo para base da copa o que leva as folhas mais jovens a estarem expostas a regimes de luz mais intensos do que as mais velhas em níveis de inserção inferiores. Outro aspecto, de natureza intrínseca, associado à diferença de comportamento estomático com o nível de inserção é o chamado efeito ontogénico que associa a densidade estomática à idade da folha (Hodánová, in Sesták, 1985). No presente estudo, o objectivo do protocolo de medição da condutância estomática foi o de obter um valor médio representativo para cada planta e para a amostra que elas constituíram. Feitas as leituras, em cada folha, o valor médio de g_m obteve-se pela soma das médias relativas às duas páginas

A variação de g_m com a luz levou-nos a adoptar o critério de correcção recomendado por Abtew *et al.* (1995), traduzido pela equação (2.9), como forma de reduzir a variância através da ponderação da condutância por um factor de luz associado ao efeito da extinção da luz e de erros experimentais no grau de abertura estomática

$$g_{mp} = PAR_m g_m / PAR_{méd} \quad (2.9)$$

onde g_{mp} é a condutância ponderada, PAR_m é a radiação fotossinteticamente activa no ponto de medição e $PAR_{méd}$ é a sua média em toda a sessão. Para fins algébricos, as unidades originais de g_e [$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$] foram convertidos em unidades LT^{-1} , de velocidade. Basta recorrer à lei dos gases:

$$g_{ev} = R g_{mp} (T_f + 273.2) / P_b \quad (2.10)$$

em que g_{ev} está em [$mm\ s^{-1}$]; R é a constante dos gases ($8.314\ [Pa\ m^3\ mol^{-1}\ K^{-1}]$); T_f [$^{\circ}C$], a temperatura média da folha; P_b [Pa], a pressão barométrica média. T_f , T_a , P_b e PAR [$W\ m^{-2}$] são simultaneamente medidos pelo porómetro para a caracterização do ambiente de medição. g_{ev} é convertida r_{ec} através da sua relação de reciprocidade, $1/g_m = r_{ec}$. Uma vez conhecidos g_{mp} por planta (doravante g_e), estes são somados para se obter a condutância do coberto, *i.e.* $g_c = \Sigma g_{mp} (I)$. Prosseguimos o cálculo com a equação desenvolvida por Allen *et al.* (1989) e recomendada por Smith *et al.* (1990) para a estima de r_c , em função de r_{ec} e de LAI efectivo, ou seja:

$$r_c = (2 r_{ec}) / LAI \quad (2.11)$$

A equação (2.11) presta-se a cálculo ao cálculo de r_{ec} para qualquer estado hídrico do solo e de r_c , para qualquer estado fenológico. Estamos a tomar r_{ec} médio da planta independentemente da idade da folha, apesar do efeito ontogénico foliar sobre r_{ec} (Hodánová, 1985).

Para cálculo de ET_o , Allen *et al.* (1989) apresentam r_{ec} como a resistência estomática-cuticular média de uma folha no período diário (24 h). Isto obriga a que a medição se faça numa folha bem exposta à luz, para se obter dela valores mínimo e, durante a noite, para se obter valores máximos, para o mesmo teor de água no solo. Do mesmo modo, quando a planta vegeta em condições de capacidade de campo, r_{ec} é mínimo e, em condições de coeficiente de emurchecimento, r_{ec} é máximo, daí o teor hídrico no

solo poder ser identificado por um valor de r_{ec} , logo r_c , crítico. No presente caso, como as medições em todas as folhas originaram um perfil de r_{ec} ao longo da planta (resposta à luz) e porque folhas situadas próximas da base da planta têm r_{ec} pelo menos uma ordem de grandeza superior ao daquelas bem iluminadas e superiormente localizadas, o valor escolhido para servir de referência foi o de r_{ec} medido ao meio-dia solar, entre 1 e 3 dias depois da rega, para se derivar o valor mínimo de r_c , correspondente à capacidade de campo. O valor médio de r_c obtido, também, ao meio-dia solar, ao longo de um ciclo de rega, foi considerado como suficiente para o cálculo da evapotranspiração actual (ET_c), com base no modelo de Penman-Monteith. Geralmente, o valor proposto para r_{ec} mínimo médio, é de 100 s m^{-1} (determinado para a luzerna e relva) (cf. Smith *et al.* (1990)), o que padroniza o numerador da equação (2.10) no valor de $200 \text{ [s m}^{-1}]$ no cálculo de ET_0 . O coeficiente 2 é para reflectir a participação das duas páginas da folha (Allen *et al.* (1989), *i.e.* a folha anfiestomatosa (caso do milho) verdade para uma série de assumpções, tal como terem a mesma densidade estomática.

O índice de área foliar (LAI) é um índice biofísico adimensional (com origem $[\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$) que se obtém fazendo a razão entre a área foliar acumulada, durante um certo período, e a área da superfície do solo considerada como a quadrícula de referência. Para o compasso de sementeira $0.125 \text{ m} \times 0.75 \text{ m}$, a quadrícula foi de $1 \text{ [m}^2]$, no presente estudo.

Expressão de T_c-T_a

O fluxo de calor sensível, dado por $H = R_n - \lambda ET$, conduz à expressão de T_c-T_a em função dos outros termos do balanço energético. Da equação (2.4), quando expressa em função das equações (2.3) e (2.5), obtém-se a expressão de T_c-T_a , de acordo com

$$T_c-T_a = [R_n(\gamma^* r_h / \rho C_p) / (\Delta + \gamma^*)] - [DPV / (\Delta + \gamma^*)] \quad (2.12)$$

$\gamma^* = \gamma(1 + r_c/r_h)$, com $r_h = r_a$. Este é o aspecto formal da equação de T_c-T_a que mostra a relação biofísicamente concisa da temperatura da cultura com as outras variáveis bioclimáticas. A múltipla dependência de T_c-T_a traduz-se no efeito da resistência aerodinâmica, radiação disponível, défice de pressão de vapor e resistência da cultura.

A equação (2.12) permite-nos obter a temperatura da cultura, conhecida a do ar, ou vice versa, estimar T_a se medida T_c , num dado bioclima. Permite, ainda, verificar que $T_c - T_a$ pode ser positivo, negativo ou zero, consoante o termo radiativo é maior, menor ou igual ao termo advectivo, respectivamente. Em estudos anteriores (e.g. Idso *et al.*, 1977) foi mostrado que, DPV tem uma elevada covariância negativa com $T_c - T_a$, quer a nível diurno (Idso *et al.*, 1981a), quer no longo termo (e.g. Jackson 1982; Lima *et al.*, 1995b), em que DPV é a variável independente e $T_c - T_a$ a dependente. Com base nesta informação, os pares ordenados (DPV, $T_c - T_a$) referentes às situações de maior disponibilidade hídrica no solo, ao meio-dia solar, foram obtidos com este propósito. A razão para a recomendação de se proceder a medições ao meio-dia solar (e.g. Jackson, 1982) para avaliar a resposta de $T_c - T_a$ em função de DPV ao longo do dia, é explicado algures (e.g., Lima, 1992). Esta relação permitiu elaborar o modelo de cálculo do índice CWSI para da cultura. O modelo de Idso *et al* (1981a), para calcular CWSI requer o cálculo de $T_c - T_a$ máximo que se determina para $R_n = H$, quando r_{∞} (e r_c) tende para infinito e ET_c se nula. Calcula-se, então:

$$[T_c - T_a]_{\max} = r_a R_{n\max} / \rho C_p \quad (2.13)$$

$R_{n\max}$ é a média da radiação máxima; o limite superior de $T_c - T_a$ depende claramente da interacção entre o regime aerodinâmico e o da radiação líquida, para dado valor da temperatura do ar. Se medido durante o dia, $[T_c - T_a]_{\max}$ é claramente positivo com a cultura, naturalmente, em estado de sobreaquecimento em relação ao ar.

2.6 | Necessidades Hídricas da Cultura Evapotranspiração de referência (ET_o)

Determinado R_n (equação (2.3)) e calculado H (equação (2.4)) a partir de medições de $T_c - T_a$, o objectivo, agora, é obter λET em função dos outros termos do balanço energético, como solução do sistema formado pelas equações (2.3) a (2.5). A solução é:

$$\lambda ET = [e_s(T_c) - e_a(T_a)] \rho C_p r_H^{-1} / (\Delta + \gamma^*) + \Delta R_n / (\Delta + \gamma^*) \quad (2.14)$$

onde o termo $\gamma^* = \gamma(1 + r_c/r_H)$ com $r_H = r_a$, a constante psicrométrica corrigida (Monteith & Answorth, 1990; Smith *et al.* 1990) responde pela diferença entre a

realidade da cultura evapotranspirante exposta à radiação e a do condicionamento do psicrómetro no abrigo climatológico, ainda que sob o efeito de ventilação natural. A solução é conhecida por equação de Penman-Monteith (P&M) do fluxo de calor latente e põe em evidência que este tem uma origem combinada num termo da radiação e noutro advectivo, com a participação da resistência aerodinâmica r_a e da cultura r_c . A presente equação tem sido muito utilizada no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0) e, recentemente foi classificada como sendo a mais exacta entre os métodos combinados, na sequência do trabalho de Allen *et al.* (1989) e, por isso, recomendada por Smith *et al.*, (1990), sob a égide da FAO.

ET_0 é definida por Smith *et al.* (1990) como sendo a taxa evapotranspiratória de uma cultura hipotética, com 12 cm de altura, com uma resistência de coberto fixa de 70 s m^{-1} e albedo de 0.23, assemelhando-se muito com a evapotranspiração de um relvado verde, de altura uniforme, e suficientemente extenso, em crescimento activo, oferecendo completa cobertura ao solo e sujeita à plena disponibilidade de água. Esta definição altera o conceito de ET_0 , tal como fora apresentado por Doorenbos & Pruitt (1997), ao substituir a função do vento por termos de resistência e, em particular, por fixar o valor-padrão da resistência da cultura. Como corolário, ET_0 corresponde ao valor de LAI igual a 2.9 (*cf.* equação 2.11).

ET_0 foram calculados com o programa informático CropWat (Smith, 1992) que usa o modelo de P&M (Monteith & Answorth, 1990; Smith *et al.*, 1990) e requer, para tal, dados climáticos, neste caso medidos *in situ*. Utilizámos valores climáticos médios mensais de temperatura, humidade relativa, duração do fotoperíodo, e velocidade do vento medidos e assumindo o valor por defeito da relação entre a velocidade média do vento durante o dia e durante a noite, e, ainda os dados da chuva, para determinar a precipitação efectiva. Após fazer o balanço da radiação, λET [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] é convertido em ET_0 [mm dia^{-1}], o seu equivalente em altura de água, o que equivale a dividir a equação (2.14) por λ , ou seja, $\lambda ET / \lambda = ET_0$.

As necessidades hídricas (máximas) específicas da cultura (ET_m) são relacionadas com ET_0 mediante a relação (Doorenbos & Pruitt, 1977):

$$ET_m = ET_0 k_c \quad (2.15)$$

em que k_c [] é coeficiente cultural de redução de ET_o para ET_m e denota o ajustamento ecofisiológico da cultura (através de r_c) a cada situação bioclimática, ao longo do ciclo cultural. Curvas de k_c são experimentalmente obtidas e apresentam fases distintas, relacionadas com a fenologia da cultura; tipicamente, existe um ramo ascendente (juventude), um patamar relativamente longo (maturidade) e um ramo descendente (senescência). Quando a evapotranspiração actual (ET_c) (i.e., regime de rega RA_c) é significativamente inferior a ET_m , (i.e., RA_m) tem-se a relação

$$ET_c = f ET_o k_c \quad (2.16)$$

em que $f = (RA_c / RA_m)$ é a fracção correspondente ao nível de rega RA_c relativamente ao regime RA_m que garante ET_m .

A escolha de um modelo para a determinação da evapotranspiração de referência depende da informação climática disponível. Porque nos foi possível dispor de dados relativos a todos os elementos climáticos, a equação de P&M foi escolhida, por ser a que melhor se prestava com o âmbito biofísico da abordagem proposta. Além disso, entre vinte modelos comparados, Allen *et al.* (1989) concluíram que o mais universal para o cálculo das necessidades hídricas das culturas é o de Penman-Monteith, tendo conduzido a uma economia de água de cerca de 30 %, em comparação, por exemplo, com o de Penman modificado (Doorenbos & Pruitt, 1977). Outro aspecto da vantagem da equação de P&M é que responde às variações das suas variáveis em qualquer escala temporal, atributo relevante na investigação ligada à rega.

Para discriminar ET_c em E_s (evaporação directa a partir do solo) e em Tr (transpiração) estimámos o grau de cobertura do solo (GC) pela a partir da fracção (f_i) da radiação interceptada pela copa dada por $f_i = 1 - e^{-k \cdot LAI}$ (Majeed, *et al.*, 1994). Para isso, afectámos f_i do co-seno do ângulo complementar à altura zenital do Sol (ϕ), porque GC corresponde à projecção horizontal da copa, de acordo com:

$$GC = \cos(90 - \phi) (1 - e^{-k \cdot LAI}) \quad (2.17)$$

$GC = 0$ se $LAI = 0$ e $GC = 1$ se $\phi = 90$ [°]. Como a altura máxima do Sol nas Zonas Temperadas nunca atinge 90 [°], nas culturas em linha não se espera $GC = 1$, embora

possa ficar muito próximo disso; k [] é o coeficiente de extinção da luz calculado por $\ln (R_o/R_z) / LAI$, em que R_o é a radiação no cimo da copa e R_z a radiação ao nível do solo; 1 é o limite superior de f_i .

2.7 Expressão dos Resultados

Os resultados são expressos em unidades S.I. (*Système International*). Para facilitar a dactilografia, a “Lista de Símbolos” no início do documento apresenta, identifica e exprime as unidades de cada parâmetro ou variável entre parêntesis recto (*e.g.* [°C]). Entretanto, ao logo do texto, o mesmo é feito, sempre que fôr pertinente. Os adimensionais são identificados com o símbolo [] mas, antes, são referenciados à sua origem. Por exemplo, $x [^{\circ}C^{\circ}] = x$ [], para denotar a origem térmica do adimensional a que se refere.

Capítulo 3

RESULTADOS: ANÁLISE E DISCUSSÃO

3.1 | Sobre a Integração dos Resultados no Bioclima Cultural

Os resultados experimentais são analisados, por um lado, no âmbito da biofísica associada à evapotranspiração, ao uso da radiação disponível, ao regime térmico ou entálpico e à rugosidade aerodinâmica da cultura que influencia o fluxo de calor latente de vaporização da água e a actividade cinética do vento. Por um lado, o estudo do comportamento da cultura é feito na óptica da Análise de Crescimento, em que a variável tempo tem um papel central na explicação da evolução de um sistema biológico. É considerado quer o tempo físico quer o tempo biológico.

As escalas temporais consideradas são ao nível do dia, do decêndio e do mês, no ciclo cultural do milho, compreendido entre Maio e Setembro de 1995; a escala espacial é a dos talhões experimentais da Fig. 2.1. A análise subsequente é sustentada pelos modelos de base apresentados no Capítulo 2 e por outros que, entretanto, se derivaram no decurso da discussão, nomeadamente relativo à integração fotoperiódica da evapotranspiração e à análise de crescimento, secção em que procurámos relações funcionais entre parâmetros característicos do par desenvolvimento/crescimento da cultura, nos vários subdomínios da discussão, para uma melhor compreensão das inter-relações envolvidas na formação da parte aérea e do papel biofísico das entidades contempladas.

Quanto à gestão biológica da água, por parte da cultura, sob efeito de vários regimes de rega, foi medida com frequência a taxa do calor latente evapotranspiratório e avaliada no âmbito do balanço energético do coberto. A cumulante da evapotranspiração foi relacionada com a acumulação da biomassa. Na essência, procuram-se respostas sobre a eficiência dos dois principais intervenientes na elaboração da biomassa, a água e a energia radiante, e quais os padrões de carácter estruturais que a cultura exhibe, em resposta aos seus regimes, ao longo do ciclo.

No que toca à energia radiante torna-se cada vez mais importante a noção de, eufemisticamente, se não deixar um metro quadrado de solo a descoberto, em nenhum dia do ano, por duas razões centrais: *a*) a terra é um recurso cuja produtividade convém rentabilizar e *b*) quanto maior o grau de coberto, mais eficiente é o sistema de produção agrícola na intercepção quer da luz quer da chuva. No último caso, minimizam-se os riscos de erosão hídrica. Um coberto vegetal também protege o solo contra a erosão eólica por duas razões adicionais: *i*) o deslocamento do plano zero do perfil do vento anula o vento abaixo desse nível o que *ii*) impõe uma taxa de evaporação directa da água da superfície do solo muito mais baixa, em contraste com a sua enexistência.

3.1.1 Parâmetros microclimáticos

O microclima do ambiente experimental é caracterizado pelos parâmetros que correspondem às equações apresentadas no Capítulo 2. No quadro 3.1 (p. 34), apresentam-se os valores médios mensais das variáveis climáticas, destacando médias, máximos e mínimos, no qual se vê que a temperatura média da ar (T_{med}) oscila entre 19.47 °C em Maio e 24.5 [°C] em Agosto. Este intervalo sobrepõe-se, em geral, ao do desenvolvimento óptimo do milho que varia entre 20 e 25 [°C]. Entretanto, as temperaturas máximas, de uma forma geral, são um tanto inibitórias ao bom desenvolvimento da cultura, mas a sua frequência diária é baixa, no fotoperíodo. O ciclo cultural deu-se, portanto, no regime térmico mínimo/máximo de 13.4/29.8 [°C] entre Maio e Setembro. O mês de Outubro figura porque a colheita se fez nesse mês mas o ciclo cultural decorreu entre 4/5 a 14/9.

O estado higrométrico do ar é dado pelo défice de pressão de vapor de água (DPV [kPa]) e os níveis médios mensais presentes caracterizam-no como medianamente seco, indo de 2.0 [kPa] (Maio-Jun) a 3.58 [kPa] (Agosto). Ou seja. DPV quase duplica entre a sementeira e emergência e a fase de frutificação. A média dos máximos de DPV (ao meio-dia solar) foi de 4.10 (\pm) [kPa] e o valor mais elevado que registámos foi de 8 [kPa].

A radiação solar (R_s) incidente, de curto de comprimento de onda, variou entre 13.5 (Mai-Jun) e 25.0 [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] (Jun-Ago.). A disponibilidade líquida da radiação é $R_n = 0.77 * R_s$ (eq. 2.18), sendo 0.77 o complementar do albedo médio ($\alpha = 0.23$) de uma cultura de milho (Monteith & Answorth, 1990). A maior parte de R_n é destinada a alimentar a evapotranspiração (ET). A evapotranspiração de referência (ET_0) foi

Quadro 3.1 Médias mensais de variáveis climáticas em Alvalade-Sado (37.5° N, 8.24° WG, 62 m). Período do ensaio. Ano: 1995.

Variável	Mês					
	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro
T _{méd} [°C]	19.47	21.02	23.64	24.49	19.72	19.40
T _{min} [°C]	12.50	13.36	14.80	15.11	11.11	11.53
T _{max} [°C]	26.44	28.19	32.47	33.87	27.94	27.28
DPV [kPa]	1.98	1.95	3.27	3.58	2.48	1.60
DPV (15 h) [kPa]						
n [h]	8.8	8.8	9.9	10.2	9.0	6.5
n/N [h h ⁻¹]						
R _s [$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]	13.48	13.48	24.26	24.99	22.05	15.93
R _n [$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$]	10.38	10.38	18.68	19.24	16.98	12.27
V(2) [m s ⁻¹]	2.22	1.98	2.39	3.06	2.76	2.17
ET ₀ [mm dia ⁻¹]	4.5	4.8	5.8	6.2	4.5	2.8
Chuva [mm mês ⁻¹]	17.5	7.8	2.5	1.0	1.4	12.6

Nota: Unidades de fluxo com dimensões LT^{-1} são convertidas em densidade de fluxo energético por multiplicação com λ (calor latente de vaporização 2.45 [MJ kg^{-1}]); 1 [mm] = 1 [MJ m^{-2}]; n/N []: insolação relativa; calculado de N [] no Anexo xviii.

calculada no programa informático CropWat (vers. 5.7; Smith, 1992), mediante entrada dos dados climáticos constantes no quadro 3.1.

O facto de, nalguns casos (*e.g.* Maio Junho), a energia equivalente à coluna de água evapotranspirada superar R_n , isto significa que há estratificação térmica entre o coberto e a atmosfera, com a fonte de calor sensível localizada na atmosfera. R_n aumenta em 85% de Maio a Agosto e ET_0 apenas 38%, o que explica a crescente importância do termo aerodinâmico (adiabático) no total de ET_0 , nos meses mais quentes. Isto está de acordo com a acentuação da secura higrométrica (*i.e.* DPV) do ar que importou em 81%, no mesmo período.

O regime do vento, a 2 [m] a cima do solo, foi moderado, segundo a classificação de Doorenbos & Pruitt (1977), com a velocidade média a variar entre 2 e 3 [m s⁻¹]. O regime aerodinâmico sobre a cultura é estratificado, o que mostra existir variação da componente horizontal da velocidade do vento com a cota (Fig. 3.1). Tal estratificação assegura a existência de gradientes de quantidade de movimento (M) que, por sua vez, facilitam a difusão de gases, como vH_2O e CO_2 , e as trocas de calor sensível, entre a cultura e a atmosfera.

Na figura 3.1, apresenta-se o perfil médio referente ao meio-dia solar; dispondo do valor V médio diário, podemos usar o referido perfil, caso necessário. Os parâmetros característicos são o deslocamento do plano de origem (d) do perfil, a rugosidade aerodinâmica (Z_0) do coberto, a velocidade de fricção (V^*), respectivamente, 0.75 [m], 0.04 m e 0.35 [m s⁻¹]. Note-se que, das equações (2.6) e (2.7), basta conhecer-se d e Z_0 para se obter V^* , a partir da medição de V a um nível z , por exemplo, a 2 [m].

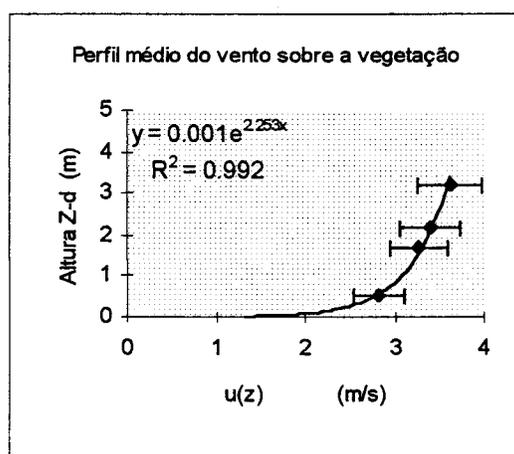


Fig.3.1 Perfil médio do vento ($u(z)$) sobre a cultura, ao meio-dia solar: deslocamento do plano de origem: $d = 0.75$ [m]; altura de rugosidade aerodinâmica: $Z_0 = 0.04$ [m]; velocidade de fricção: $V^* = 0.35$ [m s⁻¹]; altura do coberto vegetal: $H_c = 1.09$ [m]

3.1.2 Regas e Regimes Hídricos

Os regimes hídricos de todos os tratamentos, durante o ensaio, constam no quadro 3.2 (p. 31). A rega acumulada (RA), no ciclo, foi atingida por controlo do intervalo (Ir), entre duas regas consecutivas e dotação de rega (Dr) constante.

Calculado ET_0 (quadro 3.1) as modalidades são, também, identificadas pela razão $RA/\Sigma ET_0$, em que ΣET_0 é a cumulante no ciclo, aqui 615 [mm]. Os tratamentos são, por conseguinte, $0.98*ET_0$ (R600), $0.81*ET_0$ (R500) e $0.65*ET_0$ (R400) (quadro 3.2), o que significa que o tratamento R600 tem as necessidades hídricas plenamente satisfeitas, enquanto R500 e R400 têm défices de rega de 19 % e 35 %, respectivamente. R600 funciona como testemunha. Entretanto, a chuva totalizou 30 [mm], pelo que os coeficientes de ET_0 são 1.03, 0.86 e 0.70 para R600, R500 e R400, respectivamente.

A chuva totalizou 5 % de ΣET_0 . A maior parte da chuva (58.3 %) ocorreu em Maio, mas representou apenas 13 % de ET_0 desse mês, decrescendo em importância nos meses seguintes; o extremo inferior de 1 % refere-se a Setembro. Estas quantidades de chuva ter-se-ão evaporado directamente da superfície do solo (*i.e.* Maio) ou a partir da superfície foliar de interceptação, nos outros casos. Por exemplo, no fim de Maio (26 dias após sementeira, DAS), o grau de coberto (GC) era muito baixo e a cultura interceptava apenas 22 % da radiação incidente (quadro 3.4) para $LAI < 1$ (Fig.3.5; p.74). Baixos valores de GC, favorecem a evaporação directa (E_s) em relação à transpiração da cultura. A componente E_s pode atingir 80 % de ET_0 , nos primeiros quinze dias após sementeira, e 30 % aos vinte, na cultura de alface, de acordo com Gallardo *et al.* (1996).

Quadro 3.2. Rega acumulada (RA) no ciclo vegetativo por tratamento (R600, ...). Dr: dotação de rega única, 47.6 mm; Ir: intervalo de rega (dia); N_r : número de regas; ET_0 : evapotranspiração de referência.

Parâmetros	R600	R500	R400
N_r	12	10	8
Ir	7	8	10
RA (mm)	603.6	497.7	402.5
$RA/\Sigma ET_0$	0.98	0.81	0.65

O efeito da rega é obtido pela diferença entre dois estados de água no solo: o teor mínimo foi medido imediatamente antes da rega (*i.e.* R₅₀₀) ou um dia antes da rega (restantes) e, o máximo, dois a três dias depois da rega. As médias dos teores hídricos relativos (THR) e absolutos (THA) do solo, avaliados um dia antes da rega e dois dias após a rega (2 DDR), representam-se no quadro 3.3, para cada tratamento, onde THR é uma percentagem da capacidade útil (CU; 25.0 [mm m⁻¹]) na camada referência. Assim, a diferença média entre THR_d (depois da rega) -THR_a (antes da rega) é igual a 20.4, 16.8 e 12.7 %, respectivamente, para R₄₀₀, R₅₀₀ e R₆₀₀. Estes valores mostram uma oscilação em torno de $U_z = U(0.80) = 16.7 \%$, variação que pode estar associada

Quadro 3.3 Teor hídrico relativo (THR) e absoluto (THA) do solo em situações-tipo, no ciclo cultural, por tratamento. Média de 4 regas (Jun-Ago.). Camada de solo referência: 0-80 [cm]. CE = 15%; CC = 31.7 %. CU = 25 [mm m⁻¹]. DAR: dias antes da rega, DDR: dias depois da rega.

Parâmetro	R ₆₀₀	R ₅₀₀	R ₄₀₀
1 DAR			
THA (%)	20.4	17.9	17.2
THR (%)	32.4	17.0	13.3
2-3 DDR			
THA [mm]	22.5	22.5	20.6
THR (%)	92	90	91

à variabilidade hidrológica do solo, à natureza estatística da amostragem ou a ambos os efeitos. Contudo, a média destes valores é 16.6 %, prova de que a espessura-referência de 0.80 [m] é acertada, pois, as regas, em média, repunham a CC nessa camada de solo. Da análise do quadro 3.3, conclui-se que R₅₀₀ foi regado com teor médio de a água no solo igual a 17.0 % de $U(0.8)$, contra os 12.7 % (R₆₀₀) e 20.4 % (R₄₀₀) de U_z , qualquer deles bem inferior ao clássico $0.5 \cdot U_z$. O consumo de água pela cultura, traduzida por ETC, foi determinada pela variação (ΔA) de água na camada referência da rizosfera.

3.1.2.1 | Balanço hídrico do solo Gastos hídricos do milho

É usual que um plano de rega satisfaça as necessidades hídricas da cultura, de modo a que a produção seja a máxima possível. As necessidades hídricas de uma cultura são dadas pela sua evapotranspiração máxima (ET_m). O consumo hídrico efectivo (ET_c) de uma cultura é medido adequadamente, entre certos condicionalismos, pela variação da água armazenada no solo (ΔA), na zona das raízes, durante um certo período, variação esta que pode atingir ou ficar aquém de ET_m . Apesar do conceito de ET_m ser claro, o seu total e a sua taxa dependem da espécie e do clima. O que se segue pretende quantificar (ΔA) e averiguar se os seus valores descrevem, em relação aos diferentes tratamentos de rega, diferenças significativas na taxa média de ET_c , tal como acontece com os totais das regas.

a) Balanço hídrico do solo

O balanço de água que analisámos foi:

$$\Delta A = E_{ap} * D_r - ET_c - P - S + C \quad (3.1)$$

onde ΔA é a variação da água na rizosfera; E_{ap} , eficiência de aplicação, tomado igual a 0.7, o valor por defeito do módulo de simulação de rega do CropWat; infiltração: $I = E_{ap} * D_r = 33.6$ [mm]; P , percolação profunda, para além da rizosfera; S , escoamento superficial e C denota a ascensão capilar. Na camada de solo de espessura 80 [cm], P e C são nulos (anexo xv a xvii) e o sistema de rega (sulcos fechados nas extremidades) assegurou $S = 0$. D_r e ET_c já foram identificados. A equação (3.1) pode ser lida quer em fluxo de massa ou altura equivalente de água, quer em fluxo de energia, na forma integral temporal (*e.g.*, [kg m⁻²], [mm], [MJ m⁻²]) ou na forma derivada (*i.e.*, taxa) (*e.g.*, [kg m⁻² dia⁻¹], [mm dia⁻¹], [MJ m⁻² dia⁻¹]). Entretanto, ET_c pode ser decomposto nos seus dois termos: evaporação (E_s) à superfície do solo e transpiração da cultura (Tr), relevante enquanto $LAI < 2.7$ [].

A equação (3.1) aplica-se a um dado volume de solo. A condição de fronteira para o volume do solo ocupado pelo raizame é dada por $\Delta A = 0$. Isto significa: a) existem raízes e mantém-se um equilíbrio dinâmico entre a infiltração e a absorção radical que alimenta a corrente transpiratória; b) existem raízes, mas estão ou mortas ou

disfuncionais (o que pode acontecer se houver suberização provocada por um calo de lavoura, se existir, claro, contudo, improvável em condições normais!) ou c) simplesmente a água infiltrada não atinge essa fronteira. O argumento c), sendo mais provável, tem que ser comprovado. De acordo com a variação de água no perfil (Anexo xv), ΔA iguala ET_c na camada de solo referência, *i.e.* 0 a 80 [cm]. É nesta base que o balanço hídrico do solo é efectuado para cômputo das necessidades hídricas efectivas da cultura sob os diferentes regimes de rega, acabados de citar. Os resultados estão resumidos no quadro 3.4 (alínea seguinte).

b) Evapotranspiração e coeficiente cultural

Quando a cultura se desenvolve com plena disponibilidade de água, ET_m é satisfeita. ET_m é o limite superior de ET_c (designação genérica da evapotranspiração da cultura) e, em regra, tem-se $ET_o \geq ET_m \geq ET_c$. ET_c é determinado através da equação (3.1) e, para as condições descritas, valores representativos de cada regime estão patentes no quadro 3.4, nos períodos de 22/06 a 4/09 (R_{400}), 14/07 a 28/08 (R_{500}) e 3/07 a 26/08 (R_{600}). Pela mesma ordem, as amplitudes de ET_c são 2.3-5.4, 3.0-5.2 e 2.9-4.2 [mm dia⁻¹], respectivamente, ou 3.9, 4.1 e 3.6 [mm dia⁻¹]. Conclui-se que as taxas médias de ET_c não foram significativamente diferentes entre os três tratamentos de rega, verificando-se diferença apenas nos totais.

O cálculo de ET_m (equação 2.14) é feito em dois passos como descrito em § 2.6. Primeiro é calculado ET_o , o que foi feito com os dados micrometeorológicos do quadro 3.1; depois, identificam-se os coeficientes culturais (k_c []) da cultura. Valores de k_c da cultura do milho são tabelados por Doorenbos & Pruitt (1977) e são, ainda, “output” do programa CropWat (Smith, 1992), presentes no quadro 3.4.

A média simples de ET_m , no ciclo, foi de 4.6 [mm dia⁻¹] no regime R_{600} , a referência, que corresponde a um regime de ET_m com um máximo. Os extremos foram 2.5 (Maio) e 6.4 (Julho) [mm dia⁻¹]. k_c é dependente da fenologia e, por isso, está ligada ao índice de área foliar (LAI). Por esta razão, ET_m cresce com LAI. O quadro 3.4 resume a informação de interesse, sobre esta matéria: k_c inicial foi 0.5 e o seu máximo

(1.1) ocorreu em Julho, entre 54 e 86 DAS, na fase reprodutiva; f_i é a fracção da radiação solar interceptada pela cultura, definida em §2.6, e tem interesse na discriminação das componentes de ET_c , em E_s e Tr . kc médio foi 0.78 e $\Sigma ET_o = 615$ [mm], donde $ET_m = 537$ [mm]. Deste modo, os tratamentos de rega representam $1.12*ET_m$ (R_{600}), $0.89*ET_m$ (R_{500}) e $0.75*ET_m$ (R_{400}).

Quadro 3.4 Parâmetros para cálculo das necessidades de água da cultura. Ver texto.

Parâmetro	MAI	JUN	JUL	AGO	SET.
ET_o [mm dia ⁻¹]	4.5	4.8	5.8	6.2	4.5
kc []	0.54	1.02	1.1	1.01	0.60
ET_m [mm dia ⁻¹]	2.45	4.90	6.38	6.28	2.79
LAI []	0.50	3.00	5.50	6.00	2.50
f_i []	0.22	0.78	0.94	0.95	0.71
Tr [mm dia ⁻¹]	0.54	3.80	5.95	5.97	1.99
E_s [mm dia ⁻¹]	1.90	1.09	0.41	0.31	0.80

Tratamento	ET_c (eq. 3.1)				
R500	14/7 a 20/7	7/8 a 14/8	16/8 a 21/8	23/8 a 28/8	Média (e.p.)
[mm]	31.1	25.8	15.1	21.8	23.5 (6.7)
[mm dia ⁻¹]	5.18	3.7	3.0	4.4	4.1 (0.9)
R600	3/7 a 7/7	24/7 a 28/7	5/8 a 12/8	21/8 a 26/8	Média (e.p.)
[mm]	16.6	15.4	22.9	14.5	17.4 (3.8)
[mm dia ⁻¹]	4.2	3.9	3.3	2.9	3.6 (0.6)
R400	22/6 a 4/7	17/7 a 24/7	5/8 a 14/8	26/8 a 4/9	Média (e.p.)
[mm]	32.7	37.6	35.7	21	31.8 (7.4)
[mm dia ⁻¹]	2.7	5.4	4.0	2.3	3.6 (1.4)

Analisadas pela via de RA, as taxas de ET_c foram 3.1 (R_{400}), 3.9 (R_{500}) e 4.7 (R_{600}) [mm dia⁻¹], o que é comparável às taxas obtidas por balanço hídrico segundo a equação (3.1). Ao afectarmos à média de ET_m (4.6 [mm dia⁻¹]) dos coeficientes $RA/\Sigma ET_o$, por tratamento, a taxa média de ET_c , recalcula-se em 4.5 (*i.e* R_{600}), 3.7 (R_{500}) e 3.0 (R_{400}) [mm dia⁻¹]. O desvio médio absoluto entre esta última série e as com base em RA e na equação (3.1), é negligível, reflexo de concordância entre os métodos, desde que se não discrimine as componentes de ET_c . As taxas diurnas de ET_c , apuradas pelos três métodos, são, ainda, compatíveis com a energia líquida disponível (*cf.* quadro 3.1). Por ordem decrescente de RA (de R_{400} a R_{600}), os fluxos de calor latente de vaporização, equivalentes ao balanço de água, foram 9.6, 10.0 e 8.2 [MJ m⁻² dia⁻¹].

c) componentes de ET_c

A evaporação directa (E_s) da água a partir da superfície do solo e a transpiração (Tr) da cultura (ver quadro 3.4) são deduzidos a partir do modelo de desenvolvimento da parte aérea da cultura, já que as evoluções de Tr e de E_s dependem do grau de coberto (equação 2.16), de LAI e de f_i , a fracção da radiação incidente que é interceptada pela cultura. A média ponderada de f_i , no ciclo, foi igual a 0.72 [], donde o seu complementar $1 - f_i = 0.28$. Deste modo, e de acordo com os quadros 3.2 e 3.4, E_s total importou em 112.4 (R_{400}), 140.1 (R_{500}) e 168.2 (R_{600}) [mm] por ciclo e Tr (e I) deduziu-se em 287.9, 359.9 e 431.8 [mm] por ciclo, respectivamente. E_s cresce com a rega acumulada, logo com a água no solo, como observaram Gallardo *et al.* (1996).

Na equação (3.1), a eficiência de aplicação média foi assumida igual a 0.70, muito próximo de $f_i = 0.72$.

3.1.2.2 Efeito da rega sobre o balanço energético

a) Balanço de R_n dos regimes R_{500} e R_{600}

Começamos por manter a condição da equação (2.2), do balanço energético, a propósito da fotossíntese (F_n) e do fluxo de calor (G) para o solo. O leitor mais exigente é remetido para a secção § 3.5 na qual é discutido o peso da participação biológica na conversão fotossintética da energia disponível.

Por agora, e por força de consistência, as condições iniciais impõem a G e a F_n valor nulo. O modelo do coberto vegetal é o duma “folha gigante” com LAI = 3.5 e que não extingue a luz. LAI = 3.5 corresponde a $f_i = 0.82$. Posto isto, a equação (2.2) reduz-se à equação (3.2) na qual surge o termo R_{nl} , de longo comprimento de onda:

$$R_n = \lambda ET + H + R_{nl} \quad (3.2)$$

R_n foi calculado de acordo com a Lei de Stefan-Boltzmann, com as emissividades ϵ_o , do céu, e ϵ_c , da cultura, iguais a 0.80 e a 0.98, respectivamente. O quadro 3.6 resume os balanços para R_{500} e R_{600} .

Da análise da equação (3.2) e do quadro 3.6, é aperceptível a influência da rega na diminuição da energia disponível (R_n) do coberto vegetal devido, essencialmente, ao sinal negativo de H e de R_n . Isto explica que, quanto mais fresca a cultura, maiores os fluxos de calor sensível do ar para a cultura e radiativo da cultura para o ar. Por isso, λET , o calor latente evapotranspiratório, excede R_n em valores que variam, normalmente, entre 100 e 200 [$W m^{-2}$] (*i.e.*, $H + R_n$), quantidades que dependem de $T_c - T_a$.

Quadro 3.6 Termos do balanço energético ($[W m^{-2}]$) da folhagem (albedo: 0.23 []) do milho. R_n^* : irradiância líquida não corrigida; λET : fluxo energético devido ao calor latente de vaporização da água; H : calor sensível e R_n : componente radiativo. Condições médias ao meio-dia solar. $T_a = 30$ [$^{\circ}C$]; $r_a = 38$ [$s m^{-1}$]; $T_c (R_{500}) = 28$ [$^{\circ}C$] e $T_c (R_{600}) = 26$ [$^{\circ}C$]; $T_o(\text{céu}) = T_a - 20$ [$^{\circ}C$].

Tratamentos	R_n^*	λET	H	R_n
R_{500}	600	712	-30.3	-82.0
R_{600}	600	728	-64.5	-64.5

Quando, devido ao aquecimento, $T_c - T_a = 0$ (*i.e.*, $H = 0$), por incapacidade do sistema em manter $T_c < T_a$, devido à deficiência de água em dias típicos de Verão, o referido efeito da rega sobre a partição de R_n anula-se. Se R_n se mantiver constante e se T_c superar T_a , a cultura dissipará a energia extra através da inversão do sentido do fluxo de H . Nas situações em que se verificou $T_c - T_a = 0$ (para $T_a = T_c = 31$ [$^{\circ}C$], de média), no tratamento R_{500} , o efeito médio da rega, ao meio-dia solar, traduziu-se em $H = 0$, diminuição de R_n , para -154 [$W m^{-2}$] e elevação de λET para 754 [$W m^{-2}$] quando o teor médio de água no solo foi apenas 17.0 % de U_z no momento da rega.

O exemplo, acima, ilustra a teia de relações de “feed back” (FB) existentes entre os termos do balanço, por força da Lei de Conservação de Energia. Isto conduz à necessidade de soluções numéricas nas inter-relações entre os termos. Em termos experimentais, R_n , H e λET foram independentemente medidos ou calculados, mas

não são mutuamente exclusivos. Em regra, o regime de FB é negativo (FB⁻), conservativo, (Moreira, 1981) mas pode degenerar-se em FB⁺, destrutivo, quando a entalpia do sistema aumenta acima de um limiar crítico. É o hipertermismo. O sobreaquecimento, acima de $T_c - T_a = 0$, é a situação imediatamente anterior. Se o solo não dispõe de água suficiente, ou se a solicitação atmosférica é tal que se gere secura fisiológica, então, a cultura desidrata-se e perece. Conhecer esta situação extrema constitui o fundamento biofísico da razão da busca de $T_c - T_a$ crítico como indicador da oportunidade da rega que, no caso do tratamento R₅₀₀, oscilou entre 0.0 e 0.5 [°C], na cultura do milho.

b) Medições ao meio-dia solar e integração fotoperiódica e diária

Ao longo de um dia, no ambiente cultural, a variável de maior variação é a irradiância (*i.e.*, R_n). No Verão, e em dias claros, a diferença entre R_{nmax} e R_{nmin} supera os 1500 [$\mu E m^{-2} s^{-1}$] (cerca de 700 [$W m^{-2}$]). Quando se estudam tendências fotoperiódicas (diurnas) de parâmetros ecofisiológicos como R_n , g_e , g_c , T_c , T_r e F_n (taxa fotossintética) constata-se que todas as funções são do mesmo tipo: ramos ascendentes e descendentes em torno do máximo ao meio-dia solar, na ausência de carência hídrica. O principal factor subjacente a este comportamento é a irradiância e vamos tratar questão da integração diurna de λET , como função da irradiância relativa no mesmo período, embora o mesmo se possa fazer para os outros parâmetros indicados. Ou seja, a partir do balanço da radiação, ao meio-dia solar, pretende-se calcular a taxa horária média de λET e a sua integração no fotoperíodo, para explorar a possibilidade de reduzir substancialmente o tempo dedicado a medições da evolução diária de λET_c . A primeira questão a ser colocada é a dos limites de integração que, do ponto de vista agronómico, é definido pelos dois extremos de R_n igual ou acima do ponto de compensação da transpiração (Γ_0) para a luz. Este valor fixámo-lo em 60 [$W m^{-2}$] (*i.e.* trevo, *cf.* Lima, 1992), valor que está em conformidade com a definição que limita o dia à altura do Sol igual a 6 [°] acima do horizonte (*cf.*, *e.g.*, Monteith & Answoth, 1990; Forsythe *et al.*, 1995), o que foi verificado, em média, a 36 [min] depois da alvorada e antes do pôr do Sol em Alavalade-Sado, durante o ensaio.

Aplicação

No referencial $(y(t), t)$, a dispersão diurna das taxas instantâneas de λET (ou parâmetro relacionado com o grau de abertura estomática) pode descrever-se por um polinómio quadrático do tempo (t) , com um máximo ao meio-dia solar, ajustado estatisticamente, mas o seu grau de extrapolação espacial e temporal é limitado. Alternativamente, o problema pode ser abordado em bases numéricas. No caso em que só conhecemos o valor máximo (*e.g.*, R_{smax} ; λET_{max} ; ver quadro 3.6) e admitindo que o perfil diurno do parâmetro é devido à variação da irradiância (*i.e.*, R_s), vamos introduzir o factor de correcção devido ao movimento aparente do Sol, ou, o que é o mesmo, para a hora do dia, para estimar $R_s(t)$, em que t tem o incremento $dt = 1$ [h]. Para isso, a expressão analítica que relaciona $R_s(t)$ com R_{smax} escreve-se:

$$R_s(t) = R_{smax} \left[\text{sen} \left(\frac{t\pi}{n} \right) \right] \dots \dots \dots (3.4)$$

onde n é a duração do fotoperíodo; t é o tempo acumulado desde a origem, $t \in [0; n]$; define-se $\alpha(t) = \pi t/n$, o ângulo de fase da altura do Sol, $\alpha(t) \in [0; \pi]$, num fotoperíodo em que R_{smax} ocorre quando $t = n/2$, ou seja, centrado ao meio-dia solar, em torno do qual se admite simetria de $R_s(t)$; a função periódica $\text{sen} [\alpha(t)]$ traduz a percentagem do máximo a cada passo dt . Na equação (3.4), $R_s(t)$ expressa-se nas mesmas unidades que R_{smax} . A taxa instantânea $R_s(t)$ é, efectivamente, variável; calculando com percentagens de n , da equação (3.4) veja-se que $R_s(0) = 0.0$, no começo do dia, $R_s(0.10 n) = 0.31$, $R_s(0.25 n) = 0.71$, a meio da manhã, $R_s(0.50 n) = 1.0$, ao meio-dia solar, $R_s(0.75 n) = 0.71$, $R_s(0.90 n) = 0.31$ e $R_s(n) = 0$, no fim do dia. A média aritmética desta série tende para $2/\pi$ e, logo, a irradiância média diurna tende para $(2/\pi) * R_{smax}$ ($[W m^{-2}]$ ou $[mm h^{-1}]$). O factor $2/\pi$ não se aplica, de imediato, a $\lambda ET(t)$ porque este não é independente de $R_s(t)$. Com efeito, representados na mesma escala, é preciso proceder-se à correcção do factor $2/\pi$ de modo a evidenciar que $\lambda ET(t)$ é uma fracção de $R_s(t)$. Esta relação é calculada pelo quociente entre os máximos, *i.e.*, $\lambda ET(t)/R_s(t) \approx \lambda ET_{max}/R_{smax}$. Para $R_{smax} = 1000 [W m^{-2}]$ (anexo xix) e $\lambda ET_{max} \approx 700 [W m^{-2}]$ (quadro 3.6), $(\lambda ET_{max}/R_{smax}) = 0.70 \approx (2/\pi)$. Logo, no hemeroperíodo, a taxa média de $\lambda ET(t)$ obtém-se pelo integral:

$$\lambda ET_{\text{hemero}} = (2/\pi)^2 \lambda ET_{\text{max}} n \quad (3.5)$$

n é medido pelo método heliográfico ou, em estações climatológicas de registo automático, mediante condições de fronteira convenientes, para calcular o período de luz. A equação (3.5) é a consequência de $\lambda ET(t)$ ter o período de $R_s(t)$, sim, mas a nível mais baixo, traduzido por uma razão de grandeza inferior à unidade. Em rigor, a equação (3.5) integra o efeito da nebulosidade (neb), dado por $1-neb$. Até aqui, considerou-se céu limpo ($neb = 0$); no caso de haver nebulosidade parcial, a correcção faz-se pelo complementar $1-neb$. Para céu completamente nublado ($neb = 1$), a forma sinozoidal de $\lambda ET(t)$ mantém-se, o máximo é menor e a curva é mais suave. O procedimento analítico descrito generaliza-se a qualquer outro do parâmetro afim a λET , referidos, com andamento sinozoidal pelo facto do factor de fase $sen[\alpha(t)]$ ser universal. A única alteração é a do máximo da grandeza adequadamente identificado em cada caso.

O fotoperíodo médio foi igual a 9.3 [h], no ciclo, e 9.6 [h], entre Junho e Agosto (quadro 3.1), meses com k_c médio igual a 1.0 [] (quadro 3.4). Por seu lado, $\lambda ET_{\text{max}} = 700 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ é equivalente a $ET_{\text{max}} = 1.0 \text{ [mm h}^{-1}\text{]}$. Concretizando na equação (3.5), obém-se $ET_{\text{hemero}} = (2/\pi)^2(1.0)(9.3) = 3.8 \text{ [mm dia}^{-1}\text{]}$ e $3.9 \text{ [mm dia}^{-1}\text{]}$, respectivamente. Para testar o modelo, o resultado é comparado com a taxa média de ET_c no ciclo, obtida por método independente, neste caso, a partir do balanço de água no solo (equação 3.1), referente a 4 regas (anexos xv a xvii) que formam uma amostra representativa dos totais de 10 a 12 regas, em que $n = 10.1 \text{ [h]}$ (quadro 3.1), e ET_c igual a $3.6 (\pm 1.4)$, $4.1 (\pm 0.9)$, $3.6 (\pm 0.6) \text{ [mm dia}^{-1}\text{]}$ (*i.e.*, 24 horas) para os tratamentos R_{400} , R_{500} e R_{600} , respectivamente, (quadro 3.4); os intervalos de confiança, associados a 95% de probabilidade de sucesso, destas médias de ET_c são, pela mesma ordem, $[2.3, 4.9]$, $[3.2, 5.0]$ e $[3.0, 4.5] \text{ [mm dia}^{-1}\text{]}$, intervalos não significativamente diferentes, entre si, portanto, para o nível de teste igual a 0.05, e todos contendo o valor médio calculado pelo modelo. O modelo está, por conseguinte, testado e validado. Repare-se que a média de ET_m , no ciclo, foi igual a

4.3 (± 1.0) [mm dia⁻¹], contra a taxa média de ET_o igual a 4.7 (± 0.5) [mm dia⁻¹], com intervalos de confiança [1.7, 6.9] e [4.4, 5.0] [mm dia⁻¹], respectivamente.

Como foi estimada, a taxa média da evapotranspiração diurna, de acordo com a equação (3.5) e com $n = 9.3$ [h], sobrepõe-se à taxa média da evapotranspiração, no período de 24 horas apenas aparentemente. Sucede que os verdadeiros limites de integração de ET_{hemero} são 0+36 [min] e $n-36$ [min], como se disse inicialmente, e não 0.0 e n , usados no cálculo. Assim, a sobrestimativa equivale a 2(36) [min], ou 0.49 [mm] que, subtraído dos valores calculados para R₄₀₀, R₅₀₀ e R₆₀₀, dá 3.1, 3.6 e 3.1 [mm fotoperíodo⁻¹], respectivamente. Tomando estes valores, pela mesma ordem, 0.49 [mm] corresponde às percentagens 0.16, 0.14 e 0.16 das taxas no fotoperíodo, que identificamos com as taxas nocturnas medidas (não apresentadas) em lisímetro volumétrico de relva, durante uma semana de Agosto, no local do ensaio, que se cifraram entre 15 e 20%, portanto superiores ao que se espera em meses menos quentes. É certo que a taxa da evapotranspiração nocturna vai depender da espécie e do clima mas, pelo menos nas culturas arvenses (tipo não CAM), é de uma ordem de grandeza inferior que a taxa fotoperiódica; Witfield (1990) calculou essa relação em 9.8%. Assim, a integração diária fica bem aproximada se, na integração pela equação (3.5), usarmos n .

3.1.3 Modelo para Cômputo de CWSI

O modelo para o cálculo do índice de défice hídrico da cultura é baseado no parâmetro CWSI (Jackson *et al.*, 1981; Idso *et al.*, 1981b; e *cf.* Jackson;1982; Idso *et al.*, 1990). CWSI é estabelecido com base na relação T_c-T_a vs. DPV (ver § 2.5, equações (2.11) e (3.2)), para duas situações extremas de U_z, assumidas nas alíneas a) e b) a seguir.

a) Limite inferior

O limite inferior (LI) é obtido segundo os procedimentos experimental e analítico descritos em “Materiais e Métodos”. Resume-se ao ajustamento de uma recta de regressão entre T_c-T_a (variável independente) e DPV (argumento) que, em regra,

apresenta grau de determinação (r^2) superior a 0.90. Para este estudo, e no âmbito das comparações entre tratamentos, as rectas de regressão têm as equações anexas aos gráficos a) e b) da Fig. 3.2.

De entre as três modalidades analisadas, a equação apurada para LI geral do ensaio refere-se ao regime de rega R₆₀₀ O declive é -1.07 [$^{\circ}\text{C kPa}^{-1}$] e o termo independente é 0.86 [$^{\circ}\text{C}$]; o erro padrão do modelo é 0.47 [$^{\circ}\text{C}$] (quadro 3.8). O modelo prevê que $T_c - T_a = 0$ quando $\text{DPV} = 1.2$ kPa, mesmo com plena disponibilidade de água; nos restantes, isto dá-se a 1.4 [kPa]. A consequência prática imediata é que esta limitação evidencia a inviabilidade operacional da termometria de infravermelho em climas quentes muito húmidos como técnica de detecção do aquecimento foliar diferenciado entre diferentes tratamentos de rega.

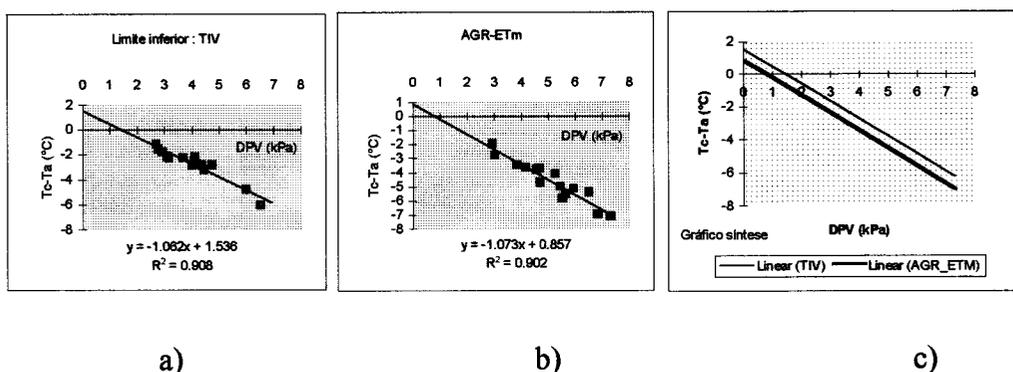


Fig. 3.2 Limite inferior da cultura do milho com rega acumulada: a) 500 [mm] (TIV=R500); b) 600 [mm] (AGR.ETm =R600); c) gráfico síntese enfatizando a translação positiva de R500 por ter experimentado défice hídrico relativo a R600 de 17%. Ambiente: dias claros de Verão.

É de notar que a recta referente ao tratamento R₅₀₀ (*i.e.*, TIV) sofreu uma translação de cerca de $+1$ [$^{\circ}\text{C}$] e isto é atribuído ao facto de ter sido regado a 83 % em relação a R₆₀₀. Em caso de perfeito controlo sobre as variáveis, não se esperam rectas paralelas, como neste caso, mas sim rectas convergentes num “ponto de convergência universal”, no domínio de $\text{DPV} < 0$ (ar hipersaturado), se as diferenças de regime hídrico se traduzirem apenas na variação da resistência da cultura imposta pela resistência estomática (Lima, 1992). A consequência imediata é a geração de um sistema de projecção central, o que muito facilita a interpretação da variante geométrica do modelo de CWSI. De qualquer modo, a tendência de uma translação

positiva, associada a menor declive, é levemente perceptível no quadro 3.7, pela comparação dos declives -1.06 e -1.07 [$^{\circ}\text{C kPa}^{-1}$]. Os dois modelos de regressão linear, referentes aos tratamentos R₆₀₀ e R₅₀₀, não apresentam diferenças significativas ao nível de significância de 5%, conforme se conclui dos testes ANOVA e resumidos no quadro 3.7.

Quadro 3.7 Parâmetros de regressão T_c-T_a vs. DPV para dois regimes de rega: 500 (R₅₀₀) e 600 (R₆₀₀) mm . b : coeficiente; a : termo independente; erro-padrão do modelo; r^2 : grau de determinação; $g.l.$: graus de liberdade; F, teste de Snedecor, α : nível de significância do teste

Tratamentos	b [$^{\circ}\text{C kPa}^{-1}$]	a [$^{\circ}\text{C}$]	Erro-pad. do modelo [$^{\circ}\text{C}$]	r^2	F ; $g.l.$	α
R500	-1.06	1.54	0.40	0.908	118.60; 13	1.41E-07
R600	-1.07	0.86	0.47	0.895	120.30; 14	0.61E-07

b) Limite Superior

O critério empírico de Idso *et al.* (1981a) para o cálculo de CWSI exige a determinação do limite superior (LS) da relação T_c-T_a vs. DPV. Por definição, LS independe de DPV e, por isso, é uma recta horizontal. LS depende, essencialmente, do produto $r_a \cdot R_n$ (equação 2.12), ou seja, LS é o limite biofísico máximo do sobreaquecimento da folhagem em relação ao ar e independe da participação biológica da cultura; esta participa apenas com a sua impedância mecânica ao fluxo do ar traduzida pela resistência aerodinâmica (r_a).

O pressuposto chave para a determinação de LS é o de que, na ausência de transpiração, a folhagem aquece até um valor crítico (Idso, *et al.*, 1977, Idso *et al.*, 1981a; Jackson, 1982); o patamar de T_c-T_a tem significado biofísico e, por isso, deve estar em conformidade com o calor específico dos tecidos foliares e com o produto $r_a R_n$, como já foi asseverado. No presente estudo, o valor de LS é derivado para as condições agrometeorológicas médias, ao meio-dia solar, de $R_n = 475$ [W m^{-2}], $V(2) = 3$ [m s^{-1}] (a 1 m acima do coberto), $T_a = 30$ [$^{\circ}\text{C}$], e $r_a = 37.8$ [s m^{-1}]. Este valor pode ser enquadrado pelo sobreaquecimento do solo seco e nú em relação ao ar (T_s-T_a), no mesmo ambiente, que se cifrou em 20-22 [$^{\circ}\text{C}$], o que tem que ser significativamente superior a T_c-T_a por razões óbvias. O cálculo prévio de LS é imperativo no método

de Idso *et al.* (1981a), mas torna-se irrelevante nos métodos analíticos de cálculo de CWSI, tratados a seguir.

Embora o método de Idso *et al.* (*ibid.*) recorra às equações de LI e de LS, pensamos que não basta apurar r_a e R_{nmax} , ao meio-dia solar, para se ter o valor de LS. Este procedimento ignora a estrutura das plantas e a consequência desta no balanço da radiação e sabe-se que as há erectófilas, planófilas, dia-heliotróficas, etc., influenciando, diferentemente, a transmissão da luz no coberto. Neste aspecto, a planta do milho apresenta folhas, em geral, em arco pendente para o solo, numa estrutura relativamente aberta, com tendência para maximizar a sua exposição, por exemplo à radiação. Mesmo em comunidade, a cultura apresenta coeficiente de extinção (k) inferior a plantas com folhas horizontais, independentemente da rectangularidade. Quanto mais próximas da horizontal são as folhas, maior R_n efectivo. O valor consistente de R_n efectivo para a cultura do milho, com LAI entre 5 e 6, foi obtido a partir de $R_{nmax} = 600 [W m^{-2}]$ corrigido para $0.79(600) = 475 [W m^{-2}]$, em que 0.79 representa $\pi/4$, o factor de forma que responde pela concepção, aqui assumida, de que a planta do milho tem silhueta elipsoidal. Logo, o limite superior é $15.5 [^{\circ}C]$.

c) Cálculo de CWSI

Quando o modelo ajustado é apresentado com equações para LI e LS, permite calcular o CWSI para cada modalidade, em qualquer instante ou período, conhecidos que sejam pares do tipo (DPV, $T_c - T_a$) instantâneos ou médios. Este é o algoritmo original desenvolvido por Idso *et al.* (1981a) em que a unidade de CWSI é $[^{\circ}C^0]$ (*i.e.* []). O CWSI calculado por este método é, aqui, identificado por CWSI(I). Outro método é proposto por Jackson (1982), *i.e.* CWSI(J), baseado na observação de que o complementar da evapotranspiração relativa (*i.e.*, $ET_a/ET_p = (\Delta + \gamma^*) / \{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)\}$), obtida a partir da equação de Penman-Monteith, é igual a CWSI, tendo apresentado a equação (3.6):

$$CWSI(J) = 1 - ET_a/ET_p = \{\gamma(1 + r_c/r_a) - \gamma^*\} / \Delta + \gamma(1 + r_c/r_a) \quad (3.6)$$

com $\gamma^* = \gamma(1 + r_{cp}/r_a)$, em que r_{cp} é a resistência da canópi a taxa evapotranspiratória potencial e r_c o seu valor actual, à taxa inferior. O valor de CWSI (J) compara r_c

actual com r_{cp} mínima e quando $CWSI(J) = 0$, prova-se que $r_c = r_{cp}$. Como ET_a/ET_p varia de 0 a 1, o mesmo acontece com o seu complementar e CWSI. Como diz Jackson (*ob. cit.*, p.71) “[...] it is esthetically pleasing for a stress index to go from 0 to 1”. Por consequência foi definida a equação (3.6). Há, claro, fundamento no procedimento de Jackson (1982). Em trabalho anterior, Lima (1992; p.240-255) ao estudar a invariância do CWSI para cenários simulados de R_n , r_c , r_a , T_a , T_c e DPV, fez a dedução de CWSI e mostrou a consistência dos seus limites inferior (0.0) e superior (1.0). O índice, assim deduzido, é um adimensional com a mesma origem que o resultante da equação (3.6), (*e.g.*, $[kPa \text{ } ^\circ C^{-1}]^0$) mas a equação (3.7), tem uma apresentação diferente:

$$CWSI = \{\gamma^*/(\Delta+\gamma^*)\}/\{1-\gamma/(\Delta+\gamma)\} \quad (3.7)$$

$\gamma^* = \gamma(1 + r_c/r_a)$; r_c é, *agora*, a resistência actual da cultura (que pode ser igual a r_{cp}) e γ^* expressa-se em relação a r_a , como na equação (3.6). Para clarificar, os valores obtidos pela equação (3.7) são referidos como CWSI(L) ou como CWSI (se não houver perigo de confusão) e comparam a taxa evapotranspiratória da cultura com a taxa de evaporação livre numa extensa superfície de água. Como r_{cp} é um dado, CWSI(J) e CWSI(L) são comparados do seguinte modo: resolve-se a equação (3.7) para, digamos r_c (L) actual (dado) igual a r_{cp} e obtém-se CWSI(L); este é igualado à equação (3.6) que fornece um valor de r_c (J) actual que deve ser sensivelmente igual ao r_c médio obtido experimentalmente entre duas regas consecutivas ou à resistência da cultura padronizada e pertencente ao intervalo 70-100 $[s \text{ m}^{-1}]$ (Smith *et al.*, 1990) de entrada na equação (3.7). Quando o fizemos com r_c (L) = 31 $[s \text{ m}^{-1}]$, $r_a = 38 [s \text{ m}^{-1}]$, obteve-se $CWSI(J) = 0.30$; com $r_c(J) = r_{cp} = 31 [s \text{ m}^{-1}]$, o resultado foi r_c (J) = 98.8 $[s \text{ m}^{-1}]$, nas condições médias de temperatura do quadro 3.6. Ou seja, o mesmo valor de CWSI corresponde a duas resistências actuais significativamente diferentes dada a natureza diferente entre uma cultura plenamente evapotranspirante e uma superfície livre de água; a solução óptima deve obter-se por iteração. Entretanto, sabemos que r_c tem sempre um valor mínimo mensurável que corresponde a valores da resistência estomática mínima realista superior a 50 $[s \text{ m}^{-1}]$ (Monteith & Answorth, 1990). No caso do tratamento R600, tal valor corresponderia a $r_c = 18 [s \text{ m}^{-1}]$ para

LAI = 5.5 []. O valor mínimo que medimos foi igual a 31 [s m⁻¹] como já foi indicado. Importante realçar é a grande dispersão associada a parâmetros de comportamento estomático.

O critério CWSI(L) traduz uma vantagem prática da propriedade da invariância absoluta do CWSI com o DPV (Lima, *ob. cit.*) e junta-se a CWSI(J) ao tornarem secundário o cálculo de LS. O cálculo manual pode simplificar-se com a graficação de CWSI em função de $r_c(T_a)$.

Finalmente, interessa, sobretudo, que os três métodos sejam comparáveis, interconvertíveis, mas esta comparação tem que ser feita sempre com o mesmos dados em estudos experimentais ou dedutivos

3.1.4 Efeito dos tratamentos nos níveis de CWSI

Nos condicionalismos ambientais descritos em § 3.1.1, em termos de resposta ao regime de água no solo, a resposta da cultura, reporta-se ao índice térmico, a diferença térmica cultura-ar ($T_c - T_a$). A análise dos resultados de $T_c - T_a$, enquadra-se no âmbito de R_n disponível para as trocas energéticas entre o coberto vegetal e a atmosfera.

3.1.4.1 Níveis médios de CWSI

Em termos médios, os valores da diferença de temperatura cultura-ar ($T_c - T_a$), por tratamento de rega, figuram no quadro 3.8. A temperatura da cultura (T_c) e o parâmetro ($T_c - T_a$) são medidos com o termo-radiómetro incorporado no TIV, como já foi referido. De acordo com o regime hídrico de cada tratamento, e tendo em conta o mesmo enquadramento bioclimático, o regime térmico surge como consequência do total de água de rega (RA) e da frequência de aplicação (f_r) no ciclo vegetativo. Todos os demais parâmetros que caracterizam um sistema de rega (*i.e.* os independentes da participação biológica) são tidos como comuns, nomeadamente, a eficiência de aplicação, como sugere a descrição feita em “Materiais e Métodos”.

A relação “regime térmico/regime hídrico” é sustentada pela interação “massa-energia” que envolve a mudança de estado da água num fito-sistema. A magnitude da última relação é ditada pelo elevado calor específico volumétrico da água (fixada em $4.18 \text{ [MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}]$) e pelo seu calor latente de vaporização típico $\lambda = 2.45 \text{ [MJ kg}^{-1}]$ para temperaturas ordinárias. O calor específico volumétrico do ar, a pressão constante, é $C_p = 1160 \cdot 10^{-3} \text{ [MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}]$ (a 293.2 [K]); os solos húmidos (com matéria orgânica) apresentam a mesma grandeza variando entre 2.0 e $2.5 \text{ [MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}]$ (Monteith & Answorth, 1990). Esta observação significa que, desde que exista água suficiente, na presença de R_n suficiente, o fito-sistema apresenta sempre um “atraso térmico” em relação ao ar (quadro 3.8) e este um “atraso higrométrico” (traduzido por um défice de pressão de vapor folhagem-ar (DPVFA positivo) em relação ao primeiro. Ou seja, a adição de água em qualquer dos subsistemas eleva consideravelmente a sua inércia térmica.

Os resultados das amostragens de $T_c - T_a$ denotam o comportamento médio dos tratamentos entre duas regas consecutivas. Assim, apurou-se que, para níveis de rega decrescentes, os valores médios (\pm erro-pad.: *s.*) foram $-3.53 (\pm 0.29)$, $-1.08 (\pm 1.27)$, e $-2.67 (\pm 1.01) \text{ [}^\circ\text{C]}$, valores que correspondem a dias após duas regas consecutivas (DDR) superiores a três. Quando se considera DDR superior ou igual a um (quadro 3.8), os valores são $-3.92 (\pm 1.48)$, $-1.93 (\pm 1.52)$ e $-2.23 (\pm 1.16) \text{ [}^\circ\text{C]}$, no intervalo médio entre duas regas (quadro 3.2), para os regimes R_{600} , R_{500} e R_{400} , respectivamente. Estes valores mostram que $T_c - T_a$ médio, no ciclo, entre duas regas consecutivas, variou nos intervalos $[-5.4, -2.4] \text{ (}R_{600}\text{)}$, $[-3.5, 0.4] \text{ (}R_{500}\text{)}$ e $[-3.1, -0.62] \text{ (}R_{400}\text{)}$ $[\text{ }^\circ\text{C}]$.

Há diferenças que devemos destacar: as taxas de aquecimento, por tratamento, entre duas regas são, pela mesma ordem, 0.43 , 0.39 , $0.11 \text{ [}^\circ\text{C dia}^{-1}]$. Isto indica que as modalidades com mais disponibilidade hídrica média aquecem mais rapidamente do que as restantes. Este aspecto não é contraditório! A explicação é: T_a é independente do tratamento e $T_c - T_a$ mais elevados representam uma r_a , para o calor sensível (H), inferior, ou seja, apesar de instantaneamente H ser maior, a sua dissipação é mais eficiente porque gera maior gradiente. Para ilustrar, nada como invocar a amplitude

térmica e a magnitude das trocas líquidas de calor sensível entre a superfície do solo (aqui, de preferência, húmido) e atmosfera, no Verão, no período de 24 horas, quando a temperatura do solo pode ser de 20 a 25 [°C] superior à da folhagem, como constatámos.

Da leitura do quadro 3.8, é-se tentado a concluir que o escalonamento, por ordem decrescente do total de água ao longo do ciclo, não conduziu, à primeira vista, a uma exacta sobreposição do escalonamento (no sentido inverso, note-se!) dos regimes de T_c-T_a . Com efeito, isto não acontece sempre, dado o carácter estatístico das séries de dados e à própria diferença entre regimes! Ou seja, a diferença entre RA deve ser suficiente para impôr regimes térmicos com diferença estatisticamente significativa. Ora, tal diferença crítica só pode ser conhecida *a posteriori*, sob pena de, na primeira abordagem, se inviabilizar o estudo nos tratamentos sujeitos a menor disponibilidade em água. Os dois regimes, R₅₀₀ e R₄₀₀, apresentam T_c-T_a médio sensivelmente igual. Estas demonstrações reclamam que uma diferença acumulada entre dotações de rega de 100 [mm] impõe regimes diferentes dos potenciais transpiratórios na faixa de RA entre 600 e 500 [mm]. Mas, na faixa 500-400 [mm], esta diferença não é suficiente para surtir tal efeito, na cultivar de milho estudada.

Quadro 3.8 Regime térmico (T_c-T_a) e CWSI dos tratamentos de rega ao longo do programa de rega; n : tamanho da amostra

T_c-T_a [°C]	R600	R500	R400
Média	-3.92	-1.93	-2.23
s	1.48	1.52	1.16
Extremos	-5.2; -2.4	-3.5; 0.4	-3.1; -0.62
CWSI []			
Média	0.03	0.13	0.12
n	14	16	10

Do acima exposto, o que sobressai é o facto de talhões com um consumo de água de 400 e 500 [mm] não apresentarem diferenças significativas entre T_c-T_a médios. Porém, os níveis térmicos da folhagem destes dois regimes de rega, já são mais altos do que -3.92 (± 1.48) [°C] relativo ao regime R₆₀₀ de ET_m. Os resultados põem em

evidência que a cultura está sempre mais fresca que o ar (quadro 3.8) por combinação do regime hídrico (quadro 3.4) e das condições médias de irradiância, regime aerodinâmico e estado higrométrico dominantes (quadro 3.1) sob que decorreram os ensaios, sendo a múltipla dependência de $T_c - T_a$ expressa pela equação (2.11). Concomitantemente, os tratamentos mais frescos são, tendencialmente, os de maiores RA. Este facto introduz a estabilidade atmosférica como cenário termodinâmico típico na interacção entre a cultura regada e o ar, em dias de céu limpo, no Verão. Por lado, as entidades climáticas que definem o estado atmosférico são fulcrais no estabelecimento dos níveis médios foram de CWSI correspondentes a um dao teor de água no solo, sejam, 0.03, 0.13 e 0.12 [], para R600, R500 e R400, respectivamente.

O quadro 3.9 resume os valores médios referentes a vários momentos do intervalo médio entre duas regas. Pretende-se pôr em destaque os níveis de CWSI e os regimes de rega. Para R400 não foi possível estabelecer uma LI. Confronta-se, ainda, a coerência dos valores de CWSI com o regime de rega, para cada caso, e, ao mesmo tempo dar a conhecer o nível médio de CWSI derivado do consumo da água de uma rega. Daqui resulta a pertinência da relação entre CWSI e ET_c a tratar mais tarde.

Quadro 3.9 Valores médios de CWSI, em diversas situações, nos três tratamentos de rega

Parâmetro	Tratamentos		
	R500	R600	R400
CWSI :			
1h AR*	0.27	0.10	n.d.
1-3 DDR	0.09	0.05	n.d.
>= 3 DDR	0.18	n.d.	n.d.
Ciclo	0.13	0.03	0.12

* 1[h] AR: 1 hora antes da rega. n.d.: não disponível. DDR: dias depois da rega.

Segundo o quadro 3.9, o tratamento R500, de condução dinâmica, atingiu 0.27 unidades de CWSI, imediatamente antes da rega, como consequência do critério de oportunidade de rega $T_c - T_a = 0$. Em R500, constata-se que este valor é o dobro do nível médio entre duas regas, 1.5 vezes do a meio do intervalo de rega (CWSI = 0.18) e o triplo das unidades de CWSI entre um e três dias após a rega (0.09). A níveis mais

baixos de CWSI, porque acumulou uma dotação maior, R₆₀₀ tem comportamento idêntico: entre duas regas, CWSI varia entre 0.03 e 0.10. Também, aqui, o “stress” hídrico, a meio do período, é metade do extremo superior e praticamente o dobro do limite inferior, mostrando consistência com R₅₀₀, e sugere que este padrão possa vigorar no milho. Para R₄₀₀ não dispomos da informação completa. Como índice de carência hídrica, a informação fornecida por CWSI pode ser estendida a escalas superiores à da parcela. A nossa proposta, nesse sentido, é tratada na secção seguinte, explorando a conciliação entre CWSI e a razão de Bowen da partição de R_n entre H e λET_c, também ela, em última análise, um índice de carência hídrica, aliás de grande utilidade macroclimática e claramente ligada ao grau de coberto vegetal.

3.1.4.2 Efeito da rega sobre a resistência da cultura

Ficou claro das equações (3.6) e (3.7) que o índice de estado hídrico, CWSI, interage com a resistência da cultura (r_c) e, para um dado valor do índice de área foliar (LAI), traduz, mesmo, o comportamento da resistência estomática (r_e) de acordo com a equação (2.8). Vamos ver o caso do tratamento R₆₀₀. O limite inferior de T_c-T_a vs. DPV define, por conseguinte, r_c mínimo (r_{cmin}) nas condições médias de medição (ver § 3.1.3). Da equação (2.11) de T_c-T_a, de carácter biofísico, calcula-se r_c , seja:

$$r_c = \{(1-b(\gamma+\Delta))/\{1-b(\Delta)\} * \{a\rho C_p\}/(-b\gamma R_n)\} \quad (3.8)$$

Deste modo, obtém-se r_c mínimo do modelo-base (*i.e.*, R₆₀₀) igual a 29.2 [s m⁻¹], com $a = 1.5$ [°C], $b = -1.07$ [°C kPa⁻¹] e $\rho C_p = 1065$ [kJ kg⁻¹ m⁻³], T_a = 30 [°C], $\gamma = 0.066$ [kPa °C⁻¹], $\Delta = 0.35$ [kPa °C⁻¹], R_n = 475 [W m⁻²], valor corrigido pela geometria do coberto (ver argumentos em § 3.1.3 b); $r_a = 38$ [s m⁻¹], todos valores médios ao meio-dia solar. Uma análise cuidada da equação (3.7) revela-nos que a solução satisfaz a condição $r_c/r_a \geq 0$; neste exemplo $r_c/r_a = 0.77$ [].

A condutância da canópia (g_c) determinada (*cf.*, § 2.5) entre 2 e 4 dias após a rega, variou entre 0.027 e 0.041 [m s⁻¹]. $g_c^{-1} = r_c$ donde r_c é igual a 36.6 e a 24.4 [s m⁻¹], respectivamente. A média é arredondada para 30 (± 0.5 %) [s m⁻¹], portanto, para

plena disponibilidade de água. A resistência estomática correspondente, medida com porómetro, variou entre 70.4 e 77.5 [$s\ m^{-1}$], intervalo que fica proposto para “input” da equação (2.10) e o resultado utilizado no modelo de Penman-Monteith (equação (2.13)) para determinar ET_0 , referência-milho. O valor por defeito de r_c recomendado por Smith *et al.* (1990) é 70 [$s\ m^{-1}$].

Na situação extrema, quando $THR = 0.17$ [], a resistência estomática (r_e) foi medida duas horas antes da rega. Medimos até 17 folhas por planta (6 leituras por folha, 3 em cada página) e obtivemos a média de 387.7 ± 188.0 [$s\ m^{-1}$] em dias sem nuvens. Este valor deve ser tomado como indicador ecofisiológico da oportunidade de rega no milho e pode ser arredondado para $400 (\pm 6\ %)$ [$s\ m^{-1}$], no tratamento R_{600} . No trevo, o valor de 300 [$s\ m^{-1}$] tem esta função (Lima, 1992); já na macieira o sinal é dado com $r_e = 200$ [$s\ m^{-1}$](Matos, 1990). Monteith & Answorth (1990) indicam o intervalo 300-500 [$s\ m^{-1}$] para o efeito, intervalo a que pertence 400 [$s\ m^{-1}$].

Por seu lado, o valor de r_c igual a 31 [$s\ m^{-1}$], obtida por medições directas com porómetro, calibra o valor calculado igual a 29.2 [$s\ m^{-1}$], baseado na informação obtida com o termómetro de I.V., neste caso em R_{600} . Nesta perspectiva, o termómetro de infravermelho pode ser visto como um porómetro (Lima *et al.* 1995a). Para o regime R_{500} , o limite inferior da relação $T_c - T_a$ vs. DPV (Fig. 3.2a) nas mesmas condições e critérios, tem subjacente $r_c = 57.1$ [$s\ m^{-1}$]. Como o nível de “stress” experimentado por R_{500} foi residual, o intervalo de r_c , digamos, entre 30 e 60 [$s\ m^{-1}$] pode ser tomado como uma referência para r_c mínimo do milho bem regado nas condições biofísicas do ensaio. Abteu *et al.* (1995) obteve $45 < r_c < 55$ [$s\ m^{-1}$] para uma espécie higrófito. r_e , r_c e LAI relacionam-se segundo a equação (2.10). Esta equação aplicada à luzerna (cultura-referência) o termo $2r_e = R = 200$ [$s\ m^{-1}$] com $LAI = 3.5$ [], à maturidade, (Smith *et al.* 1990), o que dá r_c (luzerna) igual a $200/3.5 = 57.1$ [$s\ m^{-1}$]. A equação (2.10) sustenta que $r_e > r_c$, uma vez que a planta é concebida como uma associação em paralelo da resistência estomática, resistência foliar e resistência da planta, o que pressupõe independência entre elementos em cada nível de

organização. Há interesse em comparar r_c do milho com r_c da luzerna porque esta costuma servir de referência no cálculo de ET_0 .

A confrontação citada tem mais realce para um intervalo comum de LAI, entre as duas culturas referidas. Admitindo que o milho e a luzerna têm LAI comum até 3.5 (máximo para luzerna), desenhámos o cenário constante no quadro 3.10, que coloca as duas espécies no mesmo ambiente e assumindo R mínimo constante. Isto tem interesse na comparação das resistências da cultura-referência e a da actual. O cenário confirma que g_c aumenta (r_c diminui) com LAI (até à maturidade), o que está de acordo com o máximo da assimilação fotossintética da cultura, próximo da ântese (ver § 3.4) em concordância com as observações de Gent (1994), no trigo. Informa, ainda, que o milho ($5 < LAI < 6$, à maturidade) tem taxa de evapotranspiração mais elevada do que a luzerna, mesmo com a limitação de LAI até 3.5, tendência que se acentua com o crescimento de LAI acima desse valor. Ao contrário, o regime R₅₀₀, idêntico à Luzerna, passa a transpirar menos do que esta para LAI > 3.5. É mais uma prova de que o critério de rega de R₅₀₀ funciona em todas as bases do nosso interesse: agronómica e biofísico.

Quadro 3.10 Evolução de r_c com LAI (equação. (2.10)) no milho (dois regimes de rega) e na luzerna (luzn). r_c é constante com plena disponibilidade hídrica: r_c [$s\ m^{-1}$]: 57 (R₅₀₀) e na luzerna, 30 (R₆₀₀). R = 200 [$s\ m^{-1}$] (luzn), 314 (R₅₀₀) e 148 (R₆₀₀).

LAI	0.5	1.5	2.5	3.5
R mil (R ₅₀₀)	298	99	59	42
R-mil (R ₆₀₀)	332	111	66	47
R-luzn	400	133	80	57

3.1.4.3 CWSI, Razão de Bowen e Transferência de Escala

A informação mais relevante do quadro 3.6 é o facto de H ser tipicamente negativo na cultura regada. Isto significa que a condição normal é ser a cultura um sumidouro de calor sensível com origem nos estratos atmosféricos suprajacentes à camada limite. Em regra, atribui-se a T_c o valor de T_a , o que anula H, sem fundamentar o critério. R_n/I , também, muitos vezes ignorado nos cálculos do balanço energético, está sempre presente e pode aproximar-se de -80 a -100 [$W\ m^{-2}$]. Nos casos em que há

sobreaquecimento da cultura, R_n tem sinal contrário ao de H e, por vezes, compensam-se mutuamente. A condição $H < 0$, prevalecente quando a cultura está activamente evapotranspirante, faz com que λET supere R_n . No exemplo do quadro 3.6, a razão $\lambda ET/R_n$ varia entre 1.19 (R_{500}) e 1.21 (R_{600}) e, se tivéssemos desprezado R_n , verificar-se-iam cifras inferiores a estas. $\lambda ET/R_n$ destas ordens traduz altas taxas transpiratórias máximas, equivalentes a 0.997 e 1.020 [mm h^{-1}], ao meio-dia solar, para R_{500} e R_{600} , respectivamente.

Uma implicação directa de regar a $T_c - T_a = 0$ (ou $H = 0$) é a sua tradução numa razão de Bowen (β), também ela, nula. $\beta = H/\lambda ET$ é um índice clássico que contabiliza a partição de energia entre as suas componentes principais. Por isso, e por definição de H , β é, também, um índice de aridez e, logo, de défice hídrico. No exemplo do quadro 3.6, β é -0.04 [] (*i.e.*, R_{500}) e -0.09 (*i.e.*, R_{600}). O conceito de β é a base de estudos da termodinâmica física do ar húmido, aplicada, por exemplo, ao psicrómetro. Com o devido enquadramento, esta mesma abordagem pode ser trazida para as culturas transpirantes que são sistemas húmidos. A analogia entre o psicrómetro, no abrigo de Stevenson, e o sistema “cultura transpirante - ar”, ou “superfície livre de água - ar”, cujas extensões sejam muito grandes em relação à espessura da camada limite convectiva, permite avaliar o seu efeito ambiental na diminuição de T_a e de DPV atmosférico à escala regional (Laureano *et. al.*, 1995), embora a isto estejam associadas as incertezas do comportamento dos estomas e da camada limite, porém quantificáveis. O que acabámos de frisar, constitui a informação de base para que a razão de Bowen seja conciliada com o CWSI.

Partindo da definição do conceito da razão de Bowen, facilmente se compreende que, numa cultura, durante o dia, β é regulado “reostaticamente” pela resistência estomática (mais evidente com regime intermitente de irradiância). Observando que β se pode escrever como $\beta = \{(T_c - T_a) * DPV^{-1}\} * \{\gamma (1 + r_c/r_a)\}$, com $DPV < > 0$ e $r_a > 0$, a expressão final é:

$$\beta = - b\gamma(1+r_c/r_a) \quad (3.9a)$$

ou

$$\beta = - b\gamma^* \quad (3.9b)$$

$(T_c - T_a)(DPV)^{-1}$ é o declive b [e.g., K kPa⁻¹] (de sinal negativo) do limite inferior da relação $T_c - T_a$ vs. DPV da cultura (Fig. 3.2). r_c e r_a são valores actuais das resistências da cultura e do ar; $\gamma = 0.066$ [kPa K⁻¹], exprime o facto físico da pressão, $e_a(T_a)$, do vapor de água no ar tender para zero quando a temperatura do sistema tende para a temperatura equivalente (T_e) segundo uma recta de declive igual a $-\gamma$ (cf. Monteith & Answorth, 1992; Smith *et al.*, 1992). O sistema constituído pela equação (3.7), de CWSI(L), e pelas equações (3.9a) e (3.9b) é resolvido em ordem a anular $(1+r_c/r_a)$ para se obter a relação seguinte, entre CWSI e β :

$$\beta = -b\Delta CWSI \quad (3.10)$$

Δ tem o significado usual e $0.0 \leq CWSI \leq 1.0$. O declive $-b\Delta$ [] é positivo já que CWSI e β são ambos índices com a mesma natureza. Na Fig. 3.3, apresentamos a curva ajustada para o regime R_{600} com o intervalo de confiança associado à probabilidade de 95% e ordenada na origem igual a zero, numa primeira abordagem. Mais rigorosamente, o modelo deve integrar o termo independente (a) da relação $T_c - T_a$ vs. DPV, mas como o efeito é da ordem de 3%, ignorámo-lo, por agora. No entanto, no caso de existir termo independente significativamente diferente de zero na equação (3.10) isto será devido ao ajustamento estatístico e ao erro experimental (ou ambos) ou, ainda, devido a dados experimentais obtidos por tecnologias diferentes que requerem intercalibração. Uma informação que julgamos basilar é a do grau de coberto e de LAI, imprescindível para possíveis comparações e conversões.

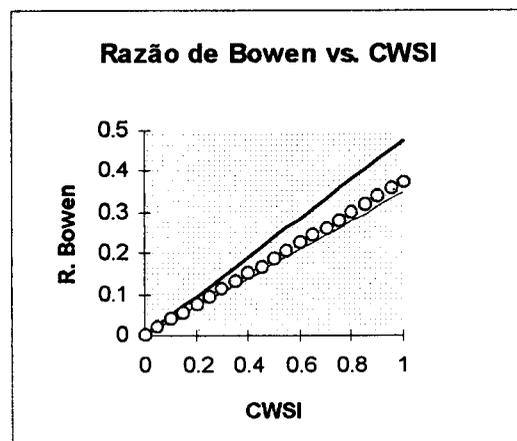


Fig. 3.3 Relação entre a razão de Bowen e CWSI: $-b\Delta = 0.38$ []. Linhas: limites de confiança (95%).

Em termos de utilidade prática do modelo proposto na equação (3.10), dizemos que a relação oferece uma base para a transferência de escalas, do talhão experimental para a regional, em estudos de variabilidade espacio-temporal da evapotranspiração. Esta informação é muito útil na análise do risco (estatística da variância) associada à rega com base numa evapotranspiração inferida, a partir, por exemplo, da informação da temperatura do ar e da vegetação. Estas duas informações podem obter-se por tratamento de dados obtidos via satélite para relacionar com b característico do coberto (monocultura ou miscelâneas vegetais); b , pode ser, ainda, tratado em classes, tal como os parâmetros climáticos cujas distribuições espaciais e temporais podem ser descritas por funções de densidade de probabilidade. Finalmente, a equação. (3.10) deve ser calibrada com o teor hídrico do solo e ajustar-se ao estado da superfície. As tecnologias de suporte existem.

3.2 | Relação CWSI - Evapotranspiração - Biomassa

Ao longo da secção § 3.1.4, ficou claro que CWSI é, primariamente, um descritor do estado térmico da cultura, essencialmente devido à tecnologia e metodologia usadas para o quantificar. Uma análise mais detalhada revela, contudo, que CWSI é, ainda, uma medida da resistência da cultura (equação (3.6)). r_c , por sua vez, é fortemente condicionada pela água disponível no solo (ver §3.1.5). Esta alimenta, a seu tempo, a evapotranspiração da cultura (ET_c), significativa se, e enquanto, houver acumulação de biomassa (BM).

A combinação entre CWSI e o estado hídrico da planta (EHP), num único modelo, pode ser feita através do potencial hídrico foliar (Sepaskhah & Kashefipour, 1994). É que, entre certos limites, ET_c determina o grau de hidratação dos tecidos, o qual pode ser medido directamente pelo potencial de água. O que se pretende com a relação CWSI - ET_c é uma forma expedita e bem fundamentada de estimar o consumo de água da cultura, com informação obtida a partir da sua parte aérea, de forma rápida e consistente, usando um termómetro de infravermelho. E como foi descrito, com este aparelho pode regular-se uma área considerável para fins operacionais, com a

vantagem intrínseca da detecção remota da temperatura. Se houver um campo heterogeneamente regado, isto será detectado sem que, antes, se note o efeito tardio e evitável da murcha.

Na relação CWSI - ET, a variante de evapotranspiração a utilizar-se pode ser ET_c (cultura) ou evapotranspiração relativa (ET_c/ET_o). Recordar-se que CWSI é identificado com $1-ET_c/ET_o$ (Jackson, 1982). Assim, o estudo da relação CWSI - ET_c , envolvendo cada modalidade de rega, é transferido para o da relação Biomassa - ET_c ; veja-se o quadro 3.11 e Fig. 3.4.

3.2.1 Relação entre CWSI e Biomassa

A restrição hídrica conduz ao sobreaquecimento da cultura e, se T_c ultrapassar um certo valor crítico, sobrevirá a terminação, devido ao hipertermismo. Então, a assimilação líquida e a produtividade vegetal são negativamente afectadas através do sistema fotossintético e da biossíntese de clorofila que, inclusive, podem ser bloqueados. Subsequentemente, dá-se a perda de pressão de turgescência (plasmólise incipiente) e, em caso extremo, a desidratação e morte da planta.

A produção final está sempre associada ao défice hídrico (Idso *et al.*, 1977; Doorenbos e Kassam, 1979; Williams *et al.*, 1989; Cabelguenne, *et al.*, 1995) e este, se for relativamente intensa, induz precocidade. Por este motivo, o conhecimento do efeito do nível de CWSI (ou de ET_c/ET_m), durante uma dada fase fenológica, sobre a biomassa acumulada (BMA), durante o mesmo período, pode sustentar a construção de modelos simples de previsão da produção e de avaliação de efeitos ambientais vários sobre a produção. Com esta finalidade, no quadro 3.9, discriminam-se valores de CWSI médio para diferentes períodos; no quadro 3.11 apresentam-se componentes da produção relativas às diferentes dotações de rega acumuladas e valores médios de CWSI, no ciclo. Os valores médios de CWSI são 0.03, 0.13 e 0.12 para R_{600} , R_{500} e R_{400} , sequencialmente. Pela mesma ordem, os pares do tipo (CWSI, BMA [kg m^{-2}]) são (0.03, 2.87), (0.13, 2.05) e (0.12, 2.22). Apesar das regas se terem efectuado com dotação fixa ao longo do ciclo, e serem mais frequente em R_{500} do que em R_{400} , este

apresenta CWSI médio igual a 0.12, 7.7 % inferior ao 0.13 de R500. Estas diferenças parecem traduzir-se nas suas biomassas, desta feita, 7.3 % superior em R400. Apesar de lógicas, estas diferenças acusaram-se não significativas, como é comprovado por outras abordagens mais adiante. O tratamento R600, com ET_m satisfeita, sofreu “stress” praticamente nulo, *i.e.* CWSI = 0.03.

Quadro 3.11 Relação entre CWSI médio, biomassa acumulada (BMA) e componentes em vários regimes de rega. BMA, biomassa acumulada; IC: índice de colheita; CWSI: crop water stress index. LSD_{0.05} (grão) = 0.454 [kg m⁻²] (Mét. Schéffe).

Parâmetro	R600	R500	R400
<i>Componentes</i>			
BMA [kg m ⁻²]	2.87	2.05	2.20
Grão [kg m ⁻²]	1.23	0.84	0.60
<i>Índices []:</i>			
IC	0.43	0.41	0.27
CWSI	0.03	0.13	0.12

Em sintonia com o nível mais baixo de CWSI, R600 teve a maior produção de BMA: 2.87 [kg m⁻²] (ou 28.7 [t ha⁻¹]). Os demais regimes não tiveram produções de BM significativamente diferentes, ou seja, 2.05 (R500) e 2.20 (R400) [kg m⁻²]. Ou seja, em relação a R600, houve uma produção relativa igual a 0.82 (R500) e 0.65 (R400) [kg m⁻²] ou uma quebra de 28.6 % e 23.3 %, respectivamente. Estas diferenças correspondem a sensibilidades médias da BM à oferta de água, de $-7.8 \cdot 10^{-3}$ [kg m⁻² mm⁻¹] (*i.e.*, de R600 para R500) e de $-7.0 \cdot 10^{-3}$ [kg m⁻² mm⁻¹](de R600 para R400). Mas pode falar-se no valor médio igual a $-7.4 \cdot 10^{-3}$ [kg m⁻² mm⁻¹] no intervalo 600-400 [mm]. A sensibilidade referida é um parâmetro afim à eficiência da água, tratada a seguir.

a) Eficiência da água

Uma forma de exprimir a eficiência do uso da água (EUA) é através da razão “biomassa seca (agora, M)-água aplicada” (RMA). Nos três tratamentos de rega, os valores obtidos são 54.7, 47.6 e 41.2 [kg ha⁻¹ mm⁻¹], pela ordem R400, R600 e R500, em clara expressão de que EUA variou em +0.15 e -0.15, com a diminuição da rega acumulada (RA) de 600 para 400 e de 600 para 500 [mm], respectivamente; a redução de RA de 500 para 400 [mm] provocou, ainda, um incremento de 32% na

EUA. É deste efeito que se pretende tirar partido em “déficit irrigation”. Esta designação é ambígua e não se deve tentar uma tradução do tipo “rega com défice”, o que é impreciso. A ideia é a de regar com dotação inferior à requerida para elevar à capacidade de campo toda a espessura da rizosfera (efectiva ou potencial), ficando parte do raizame permanentemente sob regime hídrico relativamente abaixo de CC.

Outra forma de exprimir EUA é através da razão “grão/água aplicada” (RGA). Para os regimes R₄₀₀, R₅₀₀ e R₆₀₀ os valores são 15.0, 16.8 e 21.4 [kg ha⁻¹ mm⁻¹], respectivamente, os quais atingiram níveis médios de CWSI transcritos no quadro 3.11. A diminuição de RGA, contrariamente à tendência de BMA, não pode ser imputada apenas ao défice relativo de água (DRA), pelo facto de as falhas de frutificação observadas poderem estar ligadas às elevadas temperaturas durante esta fase da cultura. Este facto afectou o índice de colheita. Algumas explicações são adiantadas mais adiante, baseadas na interpretação da Fig. 3.4.

b) Índice de colheita

A produção comercializável (grão) foi negativamente afectada, em todos os regimes, por algum evento agrometeorológico com intensidade atípica no período reprodutivo (quadro 3.11). R₅₀₀ e R₄₀₀ foram os regimes mais atingidos. A produção de grão é expressa sob a forma de um índice de utilidade, o índice de colheita (IC) definida como a razão entre os pesos secos de grão e da parte aérea (Hay, 1995).

Para constuirmos um referencial de IC, o valor potencial da cultivar estudada, é assumido, aqui, como sendo 0.50 [], para estarmos de acordo com os valores reportados por Santos *et al.* (1995), em ensaio similar. Por outro lado, as variedades de milho híbrido, cultivadas à escala global, apresentam IC entre 0.42 e 0.51 [], segundo Hay (1995). Isto dá um valor médio igual a 0.47 [] para o milho, em geral. Este intervalo de variação de IC pode ser atribuído a causas bioclimáticas discriminantes da produtividade vegetal

No presente caso, IC decresce no mesmo sentido de RA, em toda a sua escala, ao contrário de BMA, o que prova ter havido uma fonte de variação "estranha" de índole agrometeorológica. Mesmo IC = 0.43 [], referente a R₆₀₀, é inferior ao potencial, em

14% e em 8 % em relação à média! IC é menor nos outros casos e atinge 0.41 [] em R₅₀₀ e 0.27 [] em R₄₀₀. Mesmo nas réplicas de R₅₀₀ e de R₄₀₀, IC sofreu reduções relativas acentuadas, provando ser esta quebra de produção, indiferente ao regime hídrico. Faz-se, de seguida, a discussão apoiada na Fig. 3.4 e na função-padrão de Stewart (1972), conforme apresentada por Cao *et al.* (1995).

A sensibilidade típica da produção de grão ao défice relativo de água é de 1.25 no milho (Doorenbos & Kassam, 1979) e, segundo o modelo de Stewart (Vaux & Pruitt, 1983) os valores esperados são (primeira aproximação) 13.7 (*i.e* R₆₀₀), 9.7 (R₅₀₀) e 7.27 (R₄₀₀) [t ha⁻¹], equivalente a IC igual a 0.48, 0.47 e 0.33 [], respectivamente, na assumpção de que BMA não difere dos valores obtidos nas condições do ensaio. Deste modo, compensa claramente regar ao regime de R₅₀₀, sendo R₄₀₀ opção mais discutível no plano financeiro. Em comparação com o regime R₆₀₀, o défice relativo de água (DRA) e da produção relativa dos tratamentos R₅₀₀ e R₄₀₀ foram 0.17 e 0.67 e 0.33 e 0.48, respectivamente.

A este ponto, asseveramos que os regimes de rega acabam por não explicar a diminuição de IC ou, pelo menos, não são a principal fonte da sua variação. Numa primeira análise, atribuímos a diminuição de IC às elevadas temperaturas e acentuados défices higrométricos (baixas humidades relativas) do ar que ocorreram, por vários dias consecutivos, durante a fase reprodutiva, a partir de meados de Agosto (anexo xviii). A inviabilização de vingamento de cariopses foi notada, nas falhas que apresentavam as espigas, em todas as modalidades. Os grãos formados, entretanto, foram normais: não engelhados e de aspecto vítreo.

Na Fig. 3.4, a confrontação da equação de grau dois e a relação linear de Stewart ($y = 1.25x$) tenta explicar o efeito do défice relativo da água sobre a produção de grão (ver equações (3.11) a (3.12)) e outro efeito de origem independente da disponibilidade hídrica do solo. Cremos que este efeito é térmico, por razões já expostas. Na referida figura, as relações foram estabelecidas considerando a produção máxima de 14.5 [t ha⁻¹] (segunda aproximação), caso não tivesse ocorrido perturbações, na fase

reprodutiva, que não fossem as induzidas pelo regime de água, enquanto a necessidade óptima de rega foi igualada a 600 [mm] (quadro 3.2).

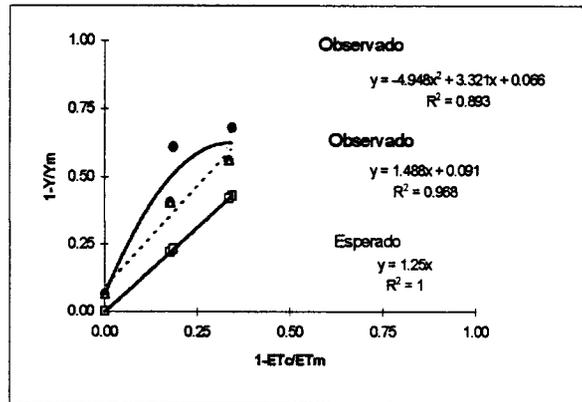


Fig. 3.4. Relação entre o déficit relativo de produção (grão) e o déficit relativo de evapotranspiração.

A relação de Stewart baseia-se no facto de que a água disponível no solo nem sempre preenche, cabalmente, as necessidades hídricas das plantas, sendo a produção negativamente afectada pelo déficit hídrico. A expressão do efeito da água $y(H_2O)$ na produção (Fig. 3.4) tal como apresentada por Doorenbos & Kassam (1979) é:

$$y(H_2O) = K_y (1 - ET_a / ET_m) \quad (3.11a)$$

$$y(H_2O) < 0 \quad ET_a > ET_m \quad (3.11b)$$

$$y(H_2O) = 0 \quad ET_a = ET_m \quad (3.11c)$$

$$y(H_2O) > 0 \quad ET_a < ET_m \quad (3.11d)$$

K_y é o factor de resposta da produção. $y(H_2O)$ pode ser negativo, zero ou positivo: se $ET_a > ET_m$, dá-se o caso em que $y(H_2O) < 0$ (*i.e.* alagamento), mas não estamos interessados neste caso. Sob carência hídrica, a produção é dada pela equação (3.12):

$$P(H_2O) = P_m * [1 - y(H_2O)] \quad (3.12)$$

$P(H_2O)$ é a produtividade primária (biomassa total) para o nível actual de água e P_m , a produtividade potencial. A equação (3.11a) traduz a produção em função da água. Os

factores luz e temperatura não são considerados numa função múltipla com $y(H_2O)$ porque ou não são limitantes ou não há gradientes dos seus regimes.

A relação de Stewart, como modelo de referência, infere a relação esperada, nesta análise, em 5/6 da informação recolhida durante o ensaio, *i.e.*, R_{400} , R_{500} , R_{600} , R_{400}^* R_{500}^* (R_{400}^* e R_{500}^* são variantes de R_{400} , R_{500}); a função quadrática, a seu tempo, resulta da dispersão observada nos 5/6 da informação referida, a qual inclui uma variante de R_{500} (dita R_{500}^*) e outra de R_{400} (R_{400}^*) que faziam parte do esquema experimental; essa função mostra, ainda, dois importantes factos, a saber: i) a dispersão “experimental” afasta-se da linearidade, quando se inclui todos os casos, o que prova que as condições de linearidade da relação da equação (3.12) deixaram de ser observadas; ii) possui ordenada na origem, o que sustenta a existência de uma fonte de variação da produção de grão independente da água, estimado em 6.6%, sobre o regime R_{600} , na origem. A maior quebra de produção é verificada em R_{400}^* , seguido de R_{500}^* . Entretanto, quando são ambos excluídos da dispersão, a nova relação retoma a linearidade mas o declive (*i.e.* 1.49) é superior ao característico (*i.e.* 1.25) em 19 %. Estes 19 % exprimem uma sensibilidade acrescida da cultura num ambiente em que o “stress” não é, ao que tudo indica, apenas a falta de água. Nesta relação, a ordenada na origem responde por 9.1% da variação independente da água na quebra de produção. Deste modo, tal efeito é contabilizado pela diferença entre os dois integrais, relativos às rectas, ou seja, $0.146 - 0.072 = 0.074$, entre 0 e 0.62 do défice relativo de grão (DRG) e entre 0 e 0.34 de DRA. Portanto, o efeito independente da água, na redução da produção variou entre 7.4 e 9.1%.

Na análise do quadro 3.11, a comparação entre os tratamentos R_{600} , R_{500} e R_{400} , no que diz respeito à produção, mostra-se consistente com os níveis de “stress” hídrico, com os dois últimos a diferirem do primeiro. Mesmo assim, os níveis de CWSI estão aquém de valores críticos, considerando os valores reportados por Garrot *et al.* (1994) na cultura do trigo, em condições bioclimáticas similares, embora hajam variações de IC. Uma explicação possível para esta aparente contradição pode residir na inviabilização do pólen, em condições de temperaturas superiores a 35 [°C], observadas. Outra é que, em condições de conforto hídrico no solo, quanto menor a

humidade relativa, menor $T_c - T_a$ e CWSI. A principal ilação a tirar desta observação é a de se dever garantir, na fase reprodutiva, plena disponibilidade hídrica à cultura do milho, como implicam os coeficientes culturais (quadro 3.4), como precaução, a menos que a cultura não consiga responder à solicitação atmosférica, o que parece ter sido o caso, naquela fase fenológica específica. A antecipação da data de sementeira é uma possibilidade de antecipar a ântese à ocorrência das temperaturas mais elevadas.

No quadro 3.11, vê-se que IC se mantém praticamente inalterável entre R_{600} e R_{500} , mesmo com a diferença de 100 [mm] de RA. Esta tendência parece manter-se mesmo que a produção de BM do milho seja relativamente baixa (*i.e.*, $< 5 \text{ [t ha}^{-1}\text{]}$), baseados na nossa experiência num clima semiárido tropical num ano com 300 [mm] de chuva), admitindo com Williams *et al.* (1989) que IC é, em geral, relativamente conservativo entre certos limites de regime hídrico no ciclo cultural. Com efeito, na ecologia das plantas podemos falar num “esforço reprodutivo” que determina a alocação de uma elevada proporção da matéria seca (*i.e.*, energia facilmente mobilizável) nos órgãos reprodutivos. Este é um aspecto familiar à adaptação das plantas superiores ao frio e à seca e, de acordo com Hay (1995), em condições normais de cultivo, IC do milho exhibe alta estabilidade e heritabilidade. Pelo contrário, se após a ântese as plantas são submetidas a regimes de elevadas temperaturas, o peso médio do grão (PMG) diminui, conforme os resultados obtidos por Wardlaw & Moncur (1995) em ambiente controlado. Segundo eles, quatro variedades de trigo (*T. aestivum* L.) foram mantidas no regime de 18 [°C] / 13 [°C] (dia/noite) até à ântese; depois, umas foram mantidas nas condições originais e outras transferidas para os regimes 24 [°C] / 19 [°C] e 30 [°C] / 25 [°C], durante o enchimento do grão, tendo verificado que a redução de PMG se cifrou entre 30 e 60%. O índice de colheita, decresceu 50% no regime 30 [°C] / 25 [°C].

Noutra experiência com diferentes regimes hídricos, ao ar livre, Garrot *et al.* (1994), ao regarem o trigo (*T. turgidum* L. var. *durum*) a 0.37 e 0.30 unidades de CWSI, obtiveram os maiores índices de colheita e razões “grão/água aplicada”, donde se conclui serem estes níveis de *stress* hídrico moderados; segundo eles, $\text{CWSI} > 0.37$

reduziu significativamente o índice de colheita, o que espelha a redução da eficiência do uso da água.

A equação (3.11a) foi usada, com $K_y = 1.25$, para estimar a produção de grão esperada; os resultados obtidos foram comparados experimentais, através do teste $\chi^2_{(4; 0.05)}$, resultou que redundou em não significativo (*i.e.*, $\chi^2 = 51.89$): não aceita a hipótese nula de igualdade de variâncias (*cf.* Yamane, 1973) entre as produções obtidas e as esperadas e, portanto. Esta discussão levou-nos a corrigir para 15 [t ha⁻¹] (terceira aproximação) a produção potencial de grão da cultivar estudada, com os níveis de adubação aplicada ao regime de regra R₆₀₀. Assim, considerando que BMA = 30 [t ha⁻¹], IC = 0.50, e 15 [t ha⁻¹] o limite superior da produção de grão esperada, donde se calcula o intervalo de confiança da produção média de grão, com 95% de probabilidade de sucesso, para a cultivar será, 13.5-15.0, 12.0-15.0, 10.4-15.0 e 9.0-15.0 [t ha⁻¹], para coeficientes de variação (V) de 0.05, 0.10, 0.15 e 0.20, respectivamente e colheita em três quadrados. Isto dá a média potencial de 13.1 ± 1.89 [t ha⁻¹] para 0.10 ≤ V ≤ 0.20. Em termos do potencial produtivo de linhas certificadas de milho, Cao *et al.* (1995) obtivera por simulação a produção de grão em 12.8 - 13.5 [t ha⁻¹] (em variedades de Verão) e 18.1 - 19.6 [t ha⁻¹] (em variedades de Primavera, de ciclo, mais longo) em zonas agroecológicas da China, inferindo que no regadio a produção média esperada é de 16.0 e 12 [t ha⁻¹], para as duas zonas, ou seja a média de 14.0 [t ha⁻¹], comparável à nossa estimativa.

A variação de IC com tratamentos de rega e de temperatura tem, naturalmente, interpretação fisiológica mas esta é, obviamente, complexa. IC é, com efeito, afectado por qualquer factor que actue sobre qualquer mecanismo da produção biológica, como a assimilação líquida. Além disso, certos efeitos instantâneos ambientais de fraca intensidade e não detectados podem acumular-se e terem expressão negativa sobre a produção final ou económica, ou sobre ambos, fazendo eco da opinião de Wardlaw & Moncur (1995). Retenha-se que, segundo a teoria de Tanner & Sinclair (1983), a temperatura média do ar e DPV são os factores ambientais discriminantes da eficiência vegetal do uso da água e, logo, de IC, enquanto que nos factores intrínsecos contam a resistência estomática e a resistência mesofílica à carboxilação

(e.g., Moreira, 1981; Tanner & Sinclair, 1983).

Com estes argumentos cremos ter explicado que a quebra da produção absoluta e a diminuição do índice de colheita, no bioclima cultural dado, não foi consequência única do regime de rega, argumento que valida a aplicação de regime R500, caracreado pela identificação da oportunidade de rega quando $T_c = T_a$. Uma estratégia de rega que conduza à quebra da produção é economicamente justificada, mas, já a diminuição de IC deve ser biologicamente sustentada.

3.3 | Estados Fenológicos e Unidades Térmicas de Crescimento

Em geral, do início do crescimento à maturidade, as plantas passam por diferentes fases vegetativas. A Fenologia, área da Agrometeorologia, ocupa-se do estudo das fases vegetativas e da sua relação com o tempo necessário à sua ocorrência, digamos o "tempo de realização", podendo este ser expresso em tempo físico ou em tempo biológico.

A importância agrometeorológica da Fenologia é que diferentes fases fenológicas apresentam susceptibilidades diferentes a diversos factores de crescimento bióticos ou abióticos; entre os últimos está a deficiência hídrica, traduzida para o plano do seu efeito sobre o crescimento e a acumulação de em órgãos de reserva (como o grão, no milho), no âmbito do presente estudo. No milho, e do ponto de vista da produção de grão, as fases de floração-fecundação e do enchimento do grão são as mais críticas, em termos da susceptibilidade da cultura a agentes externos, principalmente pela labilidade própria da ântese (uma vez ressalvado o estabelecimento da cultura). Do ponto de vista da rega, estas fases são, com efeito, as mais exigentes porque coincidem com o máximo do coeficiente cultural da evapotranspiração.

Na Fenologia, as fases de desenvolvimento têm como variável explicativa o tempo cronológico, ou físico, (t), expresso em dias após sementeira (DAS; [dia]), contado a partir da data de sementeira para as culturas arvenses, neste caso, 4 de Maio (1995). Mas, devido às diferenças climáticas sazonais, interanuais e entre zonas bioclimáticas, o

tempo térmico, ou tempo biológico, (τ) (Monteith, 1977; *cf.* Majeed *et al.* 1994), é o argumento mais criterioso para se exprimir o carácter termodinâmico do desenvolvimento/crescimento vegetal. τ é equivalente ao clássico conceito de Dia-Grau de Crescimento (DGC: [dia °C]), com a diferença de que τ se refere à temperatura meristemática (Monteith, 1972) e DGC à temperatura média do ar (T_a); a referência, a temperatura-base de crescimento (T_b) é a mesma. Porém, é costume transigir-se neste facto e considerar-se que a temperatura do vegetal é bem aproximada por T_a , para este propósito. Quer τ , quer DGC, podem ser reduzidos para o comprimento total do ciclo cultural, através do índice bioclimático designado Unidades Térmicas Normalizadas (UTN; [J]). A relação entre DAS e DGC (ou τ) é a média de T_a , aproximação da temperatura do organismo, menos T_b ; T_b do milho é igual a 10 [°C]. Como tal, o crescimento verifica-se apenas para $T_a > T_b$; a temperatura óptima do milho é cerca de 25 [°C] (Williams *et al.* 1989).

Para o local e período do ensaio (Alvalade-Sado, Mai-Set.,1995), obteve-se a relação $DGC = DAS * 11.8$ ($r^2 = 0.988$; $n = 130$), com o tempo a variar entre 122 e 250 DJ (Dia Juliano), enquanto UTN é dado por:

$$UTN = \sum_{i=0}^j DGC_j / UTP \quad (3.13)$$

onde o numerador é o somatório durante i ($i = 0$ a j) dias, desde a data da sementeira, e UTP (Unidades Térmicas Potenciais) é o integral de DGC até à maturidade fisiológica do grão (30-35 % H_2O), observada entre 12 (DAS = 128) e 14 (DAS 130) de Setembro.

A maturidade fisiológica é, alternativamente, aproximada para LAI (folhas verdes) final igual a zero, tendo sido considerado que o declínio se dá linearmente a partir de LAI_{max} . Este critério é seguido pelo modelo de produção vegetal EPIC (Williams *et al.*, 1989) no seu módulo “cultura” (*cf.*, *e.g.*, Santos *et al.* 1995).

No quadro 3.12 estão indicadas as fases fenológicas do milho, nos três diferentes tratamentos de rega em análise. UTN é calculado na base de UTP = 1534.0 [dia °C]. UTP depende do rigor da determinação de T_b (de natureza genotípica) além da informação climática T_a .

Quadro 3.12 Fenologia do milho em função do tempo físico (DAS) e do tempo térmico normalizado (UTN). UPT = 1534 [dia °C.]

Data (1995)	DAS [dia]	UTN []	Evento fenológico	Tratamentos		
				R600	R500	R400
Junho						
			Núm folhas			
2	27	0.208		4.0-4.9	4.0-4.3	4.0-4.9
9				5.1-5.7	5.7-5.8	5.0-5.8
16	42	0.323		6.2-6.6	6.4-6.9	5.8-6.8
23	49	0.377		6.4-7.6	7.2-7.8	7.0-7.7
30	56	0.431		7.7-8.5	7.9-9.2	8.0-9.0
Julho						
7	62	0.477		9.4-9.9	9.4-9.8	9.1-10
17	72	0.554		13.6-16	13.6-14.6	13.5-15.8
17			Panícula	58.3%	81.3%	70%
31	86	0.662	flor feminina e plena floração	96%	96%	85%
Agosto						
16	102; 0.78		Início da fase leitosa	Sim	Sim	Sim
30	116; 0.89		Grão pastoso	Sim	Sim	Sim
Setembro						
14	130; 1.00		Maturidade fisiológica	Sim	Sim	Sim

3.4 | Análise de Crescimento

O crescimento é o aspecto quantitativo do processo de desenvolvimento. A mensurabilidade do crescimento pode envolver mais do que um fenómeno e, no que toca ao crescimento da cultura, é expresso através da evolução da altura, da biomassa, e da área foliar, no presente estudo. A eleição dos parâmetros a medir é condicionada por considerações de ordem vária como objectivos, instrumentos de medição disponíveis, unidades-homem de trabalho, etc.. A presente análise de crescimento é, por conseguinte, baseada no perfil temporal do índice de área foliar (LAI), da biomassa (BM), da altura da cultura (H_c) e de parâmetros derivados como a massa específica

foliar, ou o seu inverso, a área específica foliar, definidos a seguir. LAI, BM e H_c são biovariáveis básicas das correlações pretendidas, cujo objectivo é o ajustamento de modelos simples entre as componentes da biomassa total, com o intuito de fornecer informações que facilitem a estimativa de BM. Concretamente, e no âmbito da conversão dos recursos hídricos e energéticos disponíveis em biomassa, o aumento da superfície foliar ganha particular interesse na parte aérea da planta. A área foliar (A_f) está, ainda, associada à acumulação da biomassa foliar (BM_f). A razão A_f/BM_f define o importante parâmetro ecofisiológico designado área específica foliar (AEF) e, o seu inverso, a massa específica foliar (MEF). A razão A_f/BM_f é designado área específica foliar (AEF) e, o seu inverso, a massa específica foliar (MEF). Acresce, ainda, que, numa comunidade vegetal, a área foliar é reportada à superfície do solo que lhe está adestrada pela rectangularidade do compasso para traduzir o índice de área foliar, já referido, identificado pela sigla LAI ("Leaf Area Index"); LAI é um índice de densidade de cobertura do solo.

As entidades MEF e AEF constituem parâmetros de integração ecológica na medida em que são descritores do grau de esclerofilia (Abrams *et al.* 1994). Ambos, MEF e AEF, caracterizam a morfologia intrínseca da folha. Na medição de LAI entra, apenas, a área foliar de uma página de cada limbo foliar. Tal critério de definição tem consistência quando se trata da intercepção da radiação solar directa incidindo sobre a cultura, mas mostra-se ambíguo no que se refere à superfície foliar efectivamente activa na troca de gases, em geral, a menos que a espécie não tenha folhas anfiestomatosas. Em modelos numéricos fotossintéticos esta informação deve integrar a "matriz cultura", complementada por outros parâmetros biofísicos, como seja a razão de conversão da energia radiante em biomassa, orientada no sentido da abordagem da produtividade primária do agrossistema e da gestão da água.

Em modelação há, quase sempre, a necessidade de se recorrer à interpolação para responder, entre outros requisitos, à necessidade da verificação da simultaneidade no estudo de correlações entre fenómenos com relações de causa-efeito. Para isso, recorre-se a polinómios de grau superior a uma, mas, raramente superior a três, para evitar hiperajustamentos irrealistas. No caso do domínio (*e.g.*, tempo) ser subdividido,

garante-se a continuidade nos “nós”. A variável a estimar é tomada como independente. Aqui, tentamos preencher dois requisitos: a) apresentar vias de estimativa da produção final a partir de correlações simples que b) preconizam o mínimo de intervenção no sistema-cultura e economia de tempo e energia. As correlações estudadas são as apresentadas nas secções que se seguem e envolvem H_c , LAI e BM como informações primárias. Apesar de fundamentalmente se tratar dos regimes de rega R400, R500 e R600, o regime "Sequeiro" ($RA = 70$ [mm]) é mencionado pontualmente.

3.4.1 Evolução do Índice de Área Foliar

O índice de área foliar verde (LAI: *Leaf Area Index*) é um importante descritor biofísico do desenvolvimento da cultura. LAI é utilizado em Agronomia para acompanhar o desenvolvimento da área foliar das culturas, estimar a fracção (f_i) da radiação solar interceptada (R_i) pela cultura e a produtividade vegetal. O significado eco-agrícola de LAI é sinónimo da superfície de exposição para a captação da luz, e de trocas de gases como o CO_2 , o vapor de água (vH_2O), mas também de poluentes, como o SO_2 .

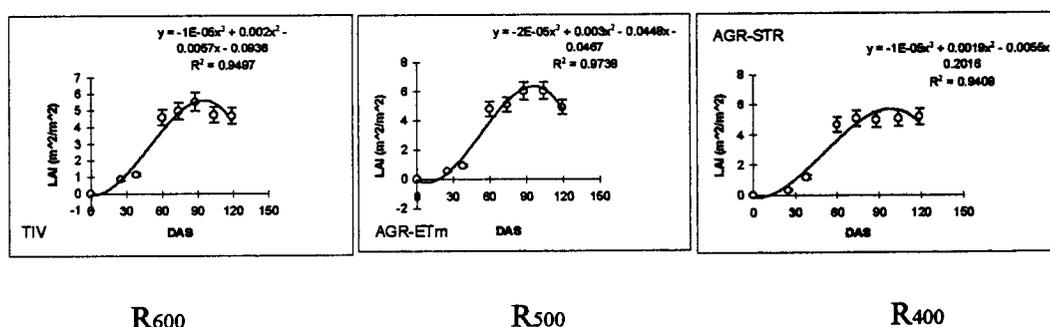


Fig. 3.5. Evolução de LAI em três regimes de rega no milho.

A Fig. 3.5 ilustra a dinâmica do índice de área foliar (LAI) das diferentes modalidades de rega, ao longo do ciclo vegetativo. No milho, tal como acontece na maior parte das culturas, LAI é, inicialmente, zero ou muito próximo de zero mas cresce exponencialmente na maior parte da fase vegetativa (Fig. 3.5), quando as taxas de desenvolvimento dos primórdios foliares, do aparecimento de folhas e da expansão do limbo são funções lineares das unidades térmicas acumuladas (Williams et al., 1989).

Em muitas culturas não forrageiras, de crescimento determinado, como o milho para grão, LAI atinge um máximo e depois decresce até zero, à maturidade fisiológica, a taxas de declínio, geralmente variáveis.

No presente estudo, os máximos de LAI (LAI_{max}), entre 5.0 e 7.0 [$m^2 m^{-2}$] são típicos do milho adulto bem regado, o que exprime a não ocorrência de qualquer *stress* apreciável que limitasse a formação da parte aérea. As curvas de LAI em função do tempo (DAS) têm andamento sinozoidal e, após o primeiro ponto de inflexão, aproximadamente a DAS = 15 [dia] (DGC = 177.0 [$^{\circ}C$ dia], UTN = 0.07 []), o segundo desenha-se a DAS = 15 [dia] (DGC = 755.2 [$^{\circ}C$ dia]), ameio do ciclo (UTN = 0.49 []), em todos os tratamentos. Ou seja, houve sincronia quanto às fases de LAI, apesar das diferenças do total de água aplicada. No entanto, em relação à taxa e ao máximo de LAI, nota-se clara tendência de maior semelhança entre os regimes mais regados (R₅₀₀ e R₆₀₀) e de R₄₀₀ ter sido mais precoce na definição do patamar de LAI igual a 5.0, contra 6.0, em R₆₀₀, e 6.5, em R₅₀₀.

As curvas da evolução de LAI são descritas por polinômios de grau três, com ordenadas na origem não nulas, ajustados pelo método dos mínimos quadrados, em todo o domínio dos valores experimentais: ramo ascendente, máximo e ramo descendente. Quando os tratamentos foram comparados entre si, dois a dois, os testes-F para o declive igual à unidade e ordenada na origem igual a zero, não houve diferenças significativas ($\alpha < 5\%$). Para efeitos de interpolação, no ramo ascendente da curva, o domínio foi restringido ao intervalo que assegura uma relação unívoca entre LAI e DAS (dias após sementeira), da origem até ao início do declínio de LAI máximo, critério que evita a ocorrência de raízes múltiplas quando se inverte o modelo. Isto é feito por supressão dos pontos cujas abcissas são superiores à do máximo, em que DAS é de 90 a 100 [dia], e ajustando outro polinômio da mesma ordem três, para gerar valores não medidos. Os pontos do ramo descendente das dispersões serviram para se determinar a taxa linear do declínio de LAI verde; os intermédios determinam a duração do máximo de LAI e identificam o patamar superior (LAI_{max}). Feitas as interpolações necessárias (ramo ascendente) para posteriores relações, polinômios de primeira ordem

foram ajustados tendo-se obtido graus de determinação (r^2) superiores a 0.80 e significativos ao nível de 0.001 (quadro 3.14).

Entre os tratamentos R₄₀₀, R₅₀₀ e R₆₀₀, cujos intervalos de rega foram de 7, 8 e 10 [dia], respectivamente, as taxas absolutas $\Phi_L = dLAI/dt$ [$m^2 m^{-2} dia^{-1}$] médias (em oposição à taxa relativa []) são todas similares (quadro 3.13), entre si, *i.e.* a $7.85 \cdot 10^{-2}$ (R₄₀₀), $7.46 \cdot 10^{-2}$ (R₅₀₀) $7.83 \cdot 10^{-2}$ (R₆₀₀) [dia^{-1}], reflectindo independência de Φ_L em relação ao regime hídrico. Além da taxa Φ_L , outros aspectos que merecem destaque são o tempo necessário (ou tempo de realização) para atingir LAI_{max} (TLAI_{max}) entre a origem e o início de LAI_{max}, a duração de LAI_{max}, (DLAI_{max}) e o início do declínio de LAI (LAI_{dec}). Estes parâmetros caracterizam o crescimento em termos de LAI e o quadro 3.13 resume os seus valores.

Quadro 3.13 Parâmetros de crescimento relacionados com LAI (índice de área foliar)

Parâmetros	R600	R500	R400
TLAI _{max} [dia]	87.1	75.5	74.5
LAI _{max} []	6.0	5.0	5.0
DLAI _{max} [dia]	25	46	46
Φ_L [dia^{-1}]	$7.83 \cdot 10^{-2}$	$7.46 \cdot 10^{-2}$	$7.85 \cdot 10^{-2}$

TLAI_{max}: tempo para atingir LAI_{max}; DLAI_{max}: duração da área foliar (verde) máxima; Φ_L [dia^{-1}]: taxa absoluta de crescimento de LAI [$m^2 m^{-2}$].

Os números do quadro 3.13 mostram que TLAImax não se apresenta igual para todos os tratamentos e que LAI_{max} é igual a 5.0 em R₄₀₀ e R₅₀₀, e 6.0 em R₆₀₀, pesar das regas acumuladas (RA) terem sido de 400, 500 e 600 [mm], por esta ordem. No tratamento mais regado (R₆₀₀), LAI_{max} tem o seu valor supremo de 6.0 mas dura apenas 25 [dia], ou 295.0 [°C dia], em comparação com 46 [dia], ou 506.0 [°C dia], nos restantes. A diferença em TLAImax é de 1 [dia], ou 11.8 [°C dia], entre a modalidade regada a intervalos de 8 [dia] (R₅₀₀) e a regada a 10 [dia] (R₄₀₀), mas a que tem menor TLAImax responde por uma taxa de expansão da área foliar (Φ_L) ligeiramente superior, *i.e.* em 5%.

De uma forma geral, o produto da duração da área foliar ($DLAI_{max} \equiv \Delta t$), pela taxa absoluta $\Phi_L(t)$ é o integral $\int_i^j \phi_L(t) dt$; $i < j$, entre os dias i e j . Isto significa que, num programa em que é necessário incorporar uma sub-rotina para o cálculo de LAI, este possa ser definido opcionalmente pela entrada directa do valor medido ou pelo cálculo entre dois instantes a partir de Φ_L . Conclui-se dos resultados do quadro 3.13 que as diferenças de rega não foram suficientes para explicarem as diferenças de Φ_L . Conhecido que seja Φ_L [dia^{-1}], o seu inverso (Φ_L^{-1} [dia]) revela outra informação interessante, a do tempo de realização ou de acumulação de uma unidade de LAI (que estima a da área foliar) e produz a seguinte série 12.8, 14.4 e 12.7 [dia], em que não há diferenças significativas, em relação à média de 13.0 [dia], ou 153.4 [$^{\circ}\text{C}$ dia], entre os três regimes de RA.

A importância de LAI e, em particular, da duração de LAI_{max} , é, aqui, circunscrita à estimativa da produtividade biomássica da água e da radiação no sistema, tendo como foco a fracção f_i de intercepção da radiação e da diminuição da evaporação directa (E_s) da água do solo. Daí inferir-se ser muito importante que a cultura alcance rapidamente um valor de LAI, significativamente inferior a LAI_{max} , compatível com uma boa eficiência do uso da água (pela diminuição de E_s) e da luz (pela maximização de f_i). Porventura, tal estratégia, no início da fase vegetativa, será mais importante (na óptica que vimos a defender), do que uma prolongada fase de $DLAI_{max}$, com f_i elevado. O argumento é justificado i) pelo facto de o cociente de conversão da luz em biomassa chegar a ser 10 vezes mais elevada que a da água no mesmo processo (*cf.*, *e.g.* Lima, 1992) e ii) haver tendência da produtividade da luz baixar na fase de maturidade da cultura (*cf.* Thomas & Fukai, 1995).

No presente caso, a este respeito, a duração de LAI_{max} ($DLAI_{max}$) pode ter sido influenciada pela vaga de calor registada entre os dias 17 e 29 de Julho, em que as temperaturas máximas variaram entre 37 e 45 [$^{\circ}\text{C}$]. Duas excepções: no dia 25, a temperatura máxima foi de 27 [$^{\circ}\text{C}$] e, a 26, de 20 [$^{\circ}\text{C}$]. Houve queimaduras irreversíveis a nível de folhas, e as mais atingidas secaram 3 dias mais tarde. Nessa altura, o estado fenológico geral era o da polinização, portanto, em pleno LAI_{max} . Em

suma, a diferença de DLAI_{max} pode ser uma medida da sensibilidade mostrada pelos tratamentos ao par termoinibição-fotoinibição naquela fase fenológica.

Quadro 3.14 Relação índice de área foliar (LAI) e dias após sementeira (DAS): r^2 , grau de determinação; $g.l.$: grau de liberdade; a coeficiente de DAS; b : ordenada na origem.

Tratamento	a [m ² m ⁻² dia ⁻¹]	b [m ² m ⁻²]	r^2 []	$g.l.$	Intervalo de DAS [dia]
R600	7.83 10 ⁻²	- 7.3 10 ⁻¹	0.856	6	0-90
R500	7.46 10 ⁻²	- 6.3 10 ⁻¹	0.893	6	0-74
R400	7.85 10 ⁻²	- 8.4 10 ⁻¹	0.876	6	0-74

Por fim, o quadro 3.14 apresenta a relação linear, ajustada pelo método dos mínimos quadrados, entre o ramo ascendente de LAI e DAS, para os tratamentos considerados. O grau de determinação é significativo ($\alpha = 0.001$) com valores iguais a 0.876 (R400), 0.893 (R500) e 0.856 (R600). O declive a é a taxa da evolução de LAI e descreve Φ_L [dia⁻¹] e a ordenada na origem (b) presta-se à estimativa do tempo de germinação, seja 9.3, 8.4 e 10.7 [dia], para uma média de 9.5 [dia], ou 112.1 [°C dia], mais ou menos o desvio absoluto de 0.5 [dia], ou 5.9 [°C dia], em relação ao valor observado de 9.0 [dia], ou 106.2 [°C dia].

3.4.2 Evolução da Altura

A altura da cultura (H_c) é outro parâmetro utilizado para a quantificação do crescimento. O estudo de H_c tem interesse biofísico porque determina a rugosidade aerodinâmica e o deslocamento do plano de origem do perfil do vento da cultura. Em termos operacionais, é um parâmetro de medição rápida e em termos biométricos traz vantagem prática a sua correlação com outras componentes da biomassa, esta de medição mais onerosa em tempo e energia, casos de BM e de LAI.

A análise de H_c segue o mesmo procedimento analítico descrito para LAI. O principal objectivo é o estabelecimento da sua correlação com a biomassa acumulada (BMA) e com LAI, desde que se referiram ao mesmo intervalo de tempo.

Os gráficos da Fig. 3.6 mostram o perfil temporal de H_c , evoluindo durante o ciclo vegetativo. A altura, lançada contra o tempo (DAS), tem o mesmo tipo de curva que a de LAI. Exceptuando-se o tratamento “Sequeiro” (não apresentado) que se ficou por 1.50 [m], os restantes alcançaram alturas máximas (H_{cmax}) entre 2.20 e 2.50 [m] (quadro 3.15). A estabilização da altura aconteceu a DAS = 100 [dia] (DGC = 1180 [°C dia], UTN = 0.77 []), excepto para a modalidade “Sequeiro” que foi mais precoce: a estabilização antecipou-se para DAS \approx 74 [dia] (873.2 [°C dia], UTN = 0.57 []). Aliás, o mesmo aconteceu com BMA, cuja evolução é estudada na secção seguinte.

A similaridade da monotonia temporal das curvas $H_c(DAS)$, legitima o ensaio de ajustamentos lineares dois a dois, tal como se fez para LAI. A referência é o tratamento R500 (inicialmente R_{tiv}), tomado como argumento, mas podia ter sido um qualquer dos três tratamentos em confronto.

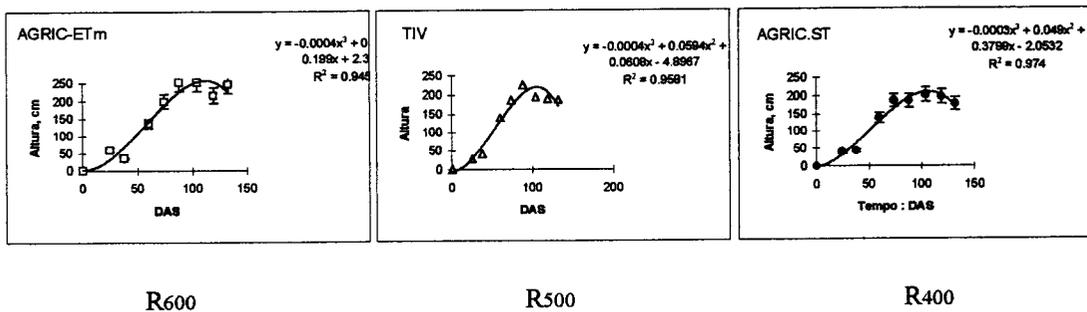


Fig. 3.6. Cursos da Altura (H_c [m]) da cultura em três regimes de rega no milho.

A seguir, no quadro 3.15, apresentamos as equações lineares (passando pela origem) do ramo ascendente da curva e a altura máxima (\pm erro-padrão) atingida por cada tratamento. Os graus de determinação (r^2) são elevados e os modelos significativos a níveis de significância (calculada) inferior a 0.1 %. Outros pormenores estatísticos constam do referido quadro. Na comparação entre tratamentos, feita dois a dois, em que se tomou como termo de comparação R500, o declive apenas diferiu da unidade entre R500 e "Sequeiro" (caso não apresentado), sustentado pelos valores de a (quadro

3.15). Das relações referidas, obtivemos os seguintes limites: declive, 0.90 e 1.17, não significativamente diferente de 1.0; ordenada na origem, 4.8 e 12.5 [cm], não significativamente diferente de 0.0; erro-padrão de ajustamento, 23.0 e 24.4 [cm]; F, 75.99 e 129.75 []; nível de significância inferior a 0.001; r^2 , 0.90 e 0.94. De todas as estatísticas de regressão obtidas, pôde concluir-se que os diferentes regimes de rega impostos à variedade de milho não impuseram diferenças significativas nem à taxa de crescimento em altura nem à altura máxima (ver quadro 3.15) nos tratamentos R400, R500 e R600.

Quadro 3.15 Relação ($y = ax$) altura da cultura (Hc) e dias após sementeira ($0 < DAS < 100$). r^2 : grau de determinação; g.l: grau de liberdade; a coeficiente de DAS. Mostra-se hc máximo.

Tratamento	a [cm dia ⁻¹]	r ² []	g.l.	Hcmax [cm] (± s)
R600	2.09	0.894	6	240.3 (17.5)
R500	2.54	0.891	6	196.8 (16.0)
R400	2.17	0.922	6	190.7 (10.8)

3.4.3 Evolução da Biomassa

A biomassa acumulada (BMA) é a integração no tempo das variações da assimilação líquida. Entenda-se que a biomassa (BM), a que nos temos referido, é a obtida por desidratação da matéria vegetal verde, em estufa, a 80 [°C], até a estabilização do peso seco, ou seja, para a obtenção da biomassa seca (BMS), em unidades de massa vegetal por unidade de área do solo. A biomassa verde não constitui, geralmente, um termo de referência fiável da produtividade primária porque o teor hídrico relativo na planta varia à escala horária, com a taxa transpiratória, e, no longo, com a água na zona das raízes. Quando, na expressão da biomassa, se considera a unidade de tempo, diz-se taxa de assimilação líquida que pode ser reportada ou à área foliar da planta ou à área do solo, para se referir à cultura; nesta mudança de escala, o factor de conversão é o índice de área foliar.

Há todo o interesse agronómico em se discriminar as componentes da biomassa; uma delas é o produto comercializável, o grão, no caso do milho, o objectivo último do produtor. O interesse em conhecer a lei da acumulação de BM ao longo do ciclo e

relacioná-la com outros descritores do processo de crescimento (por exemplo, a altura da cultura) facilita a previsão de um em relação a outros, uma vez sustentadas as relações de causalidade. As curvas de crescimento da cultura em biomassa (em $[\text{kg m}^{-2}]$), estão apresentadas na Fig. 3.7. Não há patamar porque o último ponto se refere à penúltima medição, pelo o valor à colheita (16 Out.) foi assumido igual ao anterior.

As séries temporais de BMA são descritas por polinomiais de grau três que explicam mais de 95 % da variância total dos modelos. Além disso, polinômios de terceira ordem, assim obtidos, prestam-se às interpolações necessárias, ao mesmo tempo que as suas primeiras derivadas expressam a existência de uma taxa de crescimento não linear, isto é, variável com a fase vegetativa (Fig. 3.7). Porém, na maior parte das vezes, em estudos biométricos, não raramente se transige neste aspecto e considera-se uma taxa constante, determinada ao longo da fase logarítmica do crescimento. Tal transigência é admitida dado o carácter aleatório das amostragens, no espaço, e porque a escala “log” é pouco sensível a pequenas alterações aleatórias do que a escala aritmética.

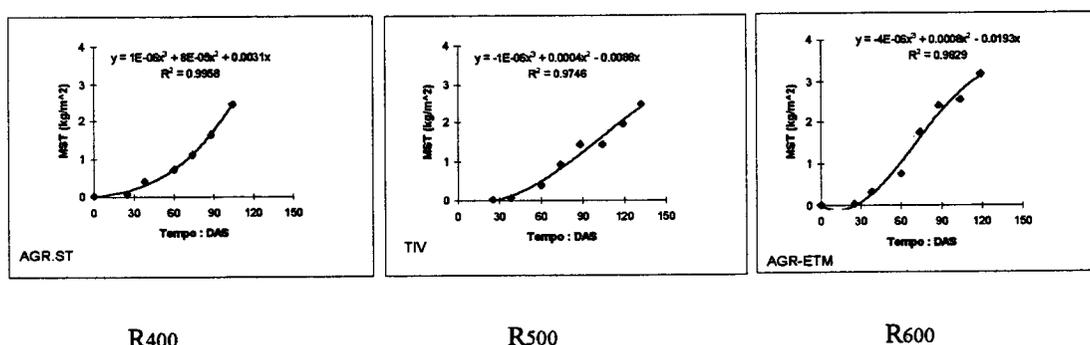


Fig. 3.7. Cursos da biomassa em três regimes de rega no milho.

No quadro 3.16, constam as estatísticas de regressão dos modelos do terceiro grau (presentes na Fig. 3.7) relativos à evolução da biomassa onde as constantes de ajustamento são identificados com o seu significado biofísico, através das suas unidades. A ordenada na origem é nula por força. Se tomarmos a primeira derivada da curva, que traduz a taxa absoluta de crescimento de BMA, o termo independente é negativo (coeficiente do parâmetro c), sinal de que a assimilação líquida é, igualmente, na origem dos tempos. Isto diz-nos, tão só, que o crescimento

inicial se dá às expensas do endosperma seminal antes da plântula ganhar autonomia trófica.

A taxa absoluta de crescimento cultural é, por definição, então $\Phi_M = dBM/dt$. A taxa máxima Φ_{Max} (tratamento) foi de 24 (R600), 22 (R500), 18 (R400) (e 25 no "Sequeiro") [$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$], obtida para os ramos ascendentes (de maior inclinação) das respectivas curvas da relação BM vs. DAS. Em modelação, geralmente, trabalha-se quer com a taxa relativa (μ) (ver quadro 3.17), como são os casos dos modelos empíricos, caso da equação dita *logística* e o modelo de Gompertz (*cf.*, Abreu, 1994); já o modelo exponencial considera a taxa absoluta, Φ , em que o tempo é normalizado. O modelo exponencial pressupõe taxa de crescimento constante. Na Fig. 3.7, se arbitrarmos como sendo $W_0(t_0)$ e $W_1(t_1)$ a massa inicial $W_0 = 0.267\ [kg\ m^{-2}]$, no instante $t_0 = 64$ DAS, e $W_1 = 2.2\ [kg\ m^{-2}]$, a produção acumulada até ao instante $t_1 = 130$ DAS, a taxa relativa (μ []) constante é dada por $\mu = \Phi_{MW_0}^{-1} = 0.110\ dia^{-1}$ ou $110\ [g\ kg^{-1}\ dia^{-1}]$ (compara-se com o quadro 3.17). Em termos de BMS, de Hc e de LAI, vimos no quadro 3.14 os valores de μ para cada tratamento.

Quadro 3.16 Resumo das estatísticas (ANOVA) de regressão dos polinómios de grau 3 dos cursos de biomassa. r^2 : grau de determinação; $g.l.$: grau de liberdade; $x = DAS$ (0-120)
 $y = ax^3 + bx^2 + cx + 0$.

Tratamento	a [$kg\ m^{-2}\ dia^{-3}$]	b [$kg\ m^{-2}\ dia^{-2}$]	c [$kg\ m^{-2}\ dia^{-1}$]	r^2 []	$g.l.$
R600	-2E-05	0.0025	-0.0266	0.967	8
R500	-1E-05	0.0021	-0.0077	0.951	8
R400	-2E-05	0.0023	-0.0186	0.939	8

Excepto no caso do regime "sequeiro", e só para enfatizar (quadro 3.17), todas as taxas relativas, das três componentes da produção, situaram-se à volta de 0.100, não havendo evidência do efeito de RA, na faixa 400-600 [mm]. Porém, a forte carência hídrica, experimentada por "Sequeiro" (RA \approx 70 [mm]) impôs maior ritmo ao crescimento, em biomassa e em altura, por unidade anteriormente acumulada, tratamento em que as taxas da biomassa e da altura chegaram a ser, respectivamente, 2.0 e 1.5 vezes superiores às taxas homónimas nos restantes tratamentos.

Quadro 3.17 Taxas relativas de crescimento (μ) em LAI (L), altura (h) e biomassa (M).

Taxa relativa [dia ⁻¹]	Tratamento			
	R600	R500	R400	SEQ
μ_L	0.085	0.091	0.091	0.100
μ_M	0.121	0.090	0.110	0.255 [#]
μ_h	0.100	0.075	0.016	0.156

período de integração: $\Delta t = 115-64$ DAS; $W_0 = 67$ [g m⁻²]. $\Delta t = 130-74$ DAS; $W_0 = 267$ [g m⁻²].

3.4.4 Correlações entre Formas de Expressão de Crescimento

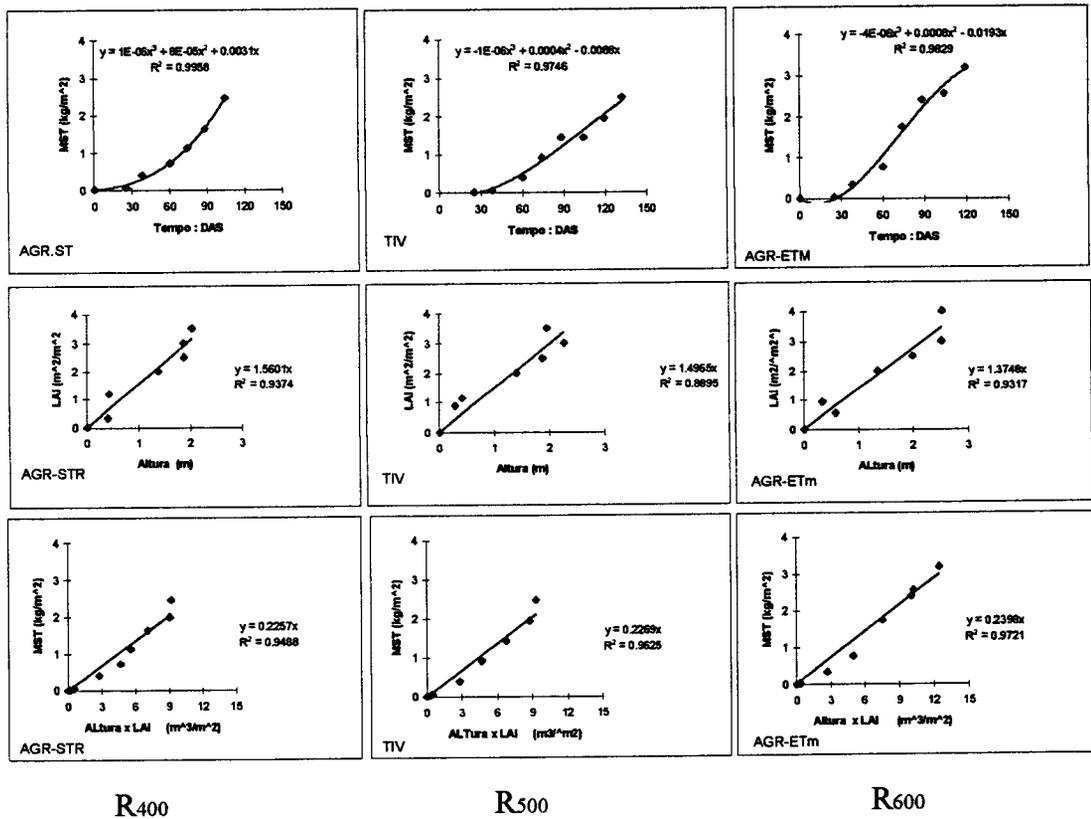


Fig. 3.8. Relações entre parâmetros de expressão de crescimento. LAI: índice de área foliar; MST: matéria seca (ou biomassa).

Para os três pares de relações que se seguem, vejam-se os gráficos da figura 3.8. Deles ressalta uma clara tendência linear, de correlações positivas entre as variáveis, a ajuizar-se

pelo valor do grau de determinação e por outras estatísticas de regressão, resumidas no quadro no quadro 3.18 (pág. 84). Os parâmetros de mais fácil determinação são tomados como variáveis independentes. O procedimento experimental das amostragens para as determinações da biomassa (BM), da altura da cultura (H_c) e do índice de área foliar (LAI), respeitaram o critério de simultaneidade. A periodicidade média das medições foi de quinze dias, num total de oito medições no ciclo. Os restantes pontos que completam as séries foram obtidos por interpolação, nomeadamente para $LAI \in [2.0, 3.5]$, como já se descreveu nas secções anteriores, por inversão dos modelos ajustados, com o apoio da subrotina “Objectivo” do Excel 5.0.

3.4.4.1 Biomassa vs. LAI

A superfície foliar (fotossintetizante e local da transpiração) da planta do milho é claramente dominada pela massa foliar verde logo a partir da emergência, embora a autonomia trófica se dê mais tarde, a partir de um valor crítico do índice de área foliar, não determinado neste estudo, altura em que se esgotam as reservas do endosperma seminal. A área foliar aumenta devido ao crescente número de folhas e à expansão do limbo. O número de folhas é determinado pela resposta fotoperiódica do milho - da emergência ao estado adulto - (Bonhomme *et al.*, 1991) e a taxa de emergência foliar é condicionada pela temperatura e pela duração do fotoperíodo (Swan *et al.*, 1981).

A relação funcional entre área (ou massa) foliar (A_f) (ou M_f) e a biomassa seca (BMS) acumulada (MST no gráfico), durante um dado intervalo de tempo, é útil na Análise de Crescimento. A razão A_f/BMS [$m^2 kg^{-1}$] pode ser obtida pelo inverso da primeira derivada da curva BMS vs. LAI que, entretanto, não está discriminada da Fig. 3.8. Aqui, graficou-se o parâmetro composto MST vs. $H_c * LAI$. Mas, como é dada a evolução da altura, a questão fica resolvida se multiplicarmos aquela derivada pela altura referente ao mesmo período. É preciso ter-se presente que razão A_f/BMS exhibe variabilidade fenotípica (Poorter *et al.*, 1989), genética e exogenamente determinadas (Kang & Gorman, 1989).

As equações ajustadas entre BMS e H_c e entre BMS e $H_c \cdot LAI$ são de grau um com a ordenada na origem nula, por forçagem. Os declives são sempre inferiores à unidade e, tendo em conta as alturas médias semelhantes, sustentam que LAI apresenta maior taxa absoluta de crescimento em relação à BMS, tipicamente 2.8 a 3.6 vezes superior, considerando os três tratamentos. Das equações apresentadas, o declive é a mais importante informação delas a extrair-se. Assim, $dBM/dLAI$ (coluna a do quadro 3.18) é a medida da massa específica cultural mas, também, exprime a razão entre as taxas de crescimento de BM e de LAI. Deste modo, LAI cresceu 3, 4 e 5 vezes mais depressa do que BMS, quadro 3.18), respectivamente, nos tratamentos R₆₀₀, R₄₀₀ e R₅₀₀. Se LAI é multiplicado pela massa específica foliar (MEF ou SLM), $dBMS/(dLAI \cdot MEF)$ define o inverso da fracção da massa foliar da cultura (§ 3.4.4.4 e 3.4.4.5).

A Fig. 3.8 grafica as correlações entre BMS (= MST) e $LAI \cdot H_c$, para as diferentes modalidades. Os ajustamentos são bons, para os graus de liberdade dados, sendo os níveis de teste da estatística F de regressão inferiores a 0.001. Dentro da filosofia desta discussão, em termos práticos, os métodos não destrutivos, como o uso de ceptómetro, para a medição de LAI são pretendidos.

3.4.4.2 LAI vs. Altura

A correlação entre LAI e a altura (H_c [m]) é linear e estreita (Fig. 3.8) e a sua variação conjunta é explicada, por r^2 , entre 48 % (R₅₀₀) e 82 % (R₆₀₀) (quadro 3.18), pesem, embora, as diferenças entre os graus de liberdade. O ajustamento para R₆₀₀ é 5 % e 34% melhor que R₄₀₀ e R₅₀₀, respectivamente. Entre R₄₀₀ e R₆₀₀, r^2 sugere que o regime hídrico influenciou, predominantemente, a correlação. Outros indicadores da bondade do ajustamento preenchem o quadro 3.18. Conclui-se, dos declives, que LAI tem maior taxa de crescimento do que H_c , sendo a razão de 1.65 (R₆₀₀), 1.56 (R₅₀₀) e 1.92 (R₄₀₀) [$m^2 m^{-2} m^{-1}$]. O seu inverso, $dH_c/dLAI$, é o que se pode denominar “altura específica unitária da cultura”, que assume os valores: 0.52 (*i.e.* R₄₀₀), 0.61 (R₅₀₀) e 0.64 (R₆₀₀) [$m^2 m^{-2}$]. Chama-se a atenção para os níveis de significância relativamente altos (> 5 %), nomeadamente em R₄₀₀ (13 %) e em R₅₀₀ (8.5 %), todavia aceitáveis para fins agronómicos.

3.4.4.3 Biomassa vs. LAI * Hc.

Outro ensaio preconizado foi o de sondar o comportamento da correlação entre a biomassa acumulada e o produto Altura x LAI, isto, pensando que, numa regressão múltipla, do tipo BMS (LAI, Hc), surge o termo-produto, para exprimir a interacção entre ambos na expressão de BMS. O resultado foi uma relação linear, com uma redução generalizada da variância total entre 23 e 26%, em comparação com a relação BMS vs. LAI. Outra curiosidade desta relação é a sua derivada ser a medida da densidade aparente (em massa) da cultura. Esta relação mostra-se preferível às anteriores para prever BMS.

Quadro 3.18 Resumo das estatísticas (ANOVA) de regressão (y vs. x) entre BMS [kg m^{-2}], LAI [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$] e altura da cultura (Hc [m]).

Parâmetro Tratamento	a declive	Erro-pad. do modelo	r^2 \square	g.l.	F \square	α %
<i>BMS vs. LAI</i>						
R500	0.21	0.47	0.49	10	8.77	1.81
R600	0.32	0.83	0.40	13	7.99	1.64
R400	0.25	0.64	0.36	13	6.68	2.54
<i>LAI vs. Hc</i>						
R500	1.56	1.08	0.48	6	4.59	8.50
R600	1.65	0.78	0.82	9	36.81	0.051
R400	1.92	0.86	0.77	9	26.51	0.13
<i>BMS vs. LAI*hc</i>						
R500	0.23	0.20	0.94	7	99.12	0.017
R600	0.24	0.21	0.97	9	278.77	6.79E-04
R400	0.32	1.44	0.36	9	4.50	7.16

3.4.4.4 Massa Específica Foliar (MEF) e Área Específica Foliar (AEF)

No sentido de aumentar a quantidade da radiação solar interceptada por um agrossistema, é imperativo que a área foliar se desenvolva rapidamente. Paralelamente, o grau de cobertura (GC) oferecida ao solo aumenta e as perdas de água, por evaporação directa da superfície húmida do solo, reduzem-se significativamente (Monteith, 1993; Richards *et al.*, 1993). Ritchie (1972, *cf.* Williams *et al.* (1989); propôs um modelo para estimar a razão entre as necessidades hídricas potenciais de uma cultura cobrindo parcialmente o solo e a evaporação potencial baseado em LAI. O modelo EPIC usa essa equação (Williams *et al.*, *ibid*) para simular o balanço de água no solo. Também, Goudriaan & Monteith (Monteith, 1993) apoiaram-se na ideia desse modelo para desenvolverem um

novo método de cálculo da fracção (f_i) da luz interceptada, da evaporação directa e da produção potencial de um agrossistema.

O desenvolvimento foliar encerra mudanças estruturais e as prioridades ecofisiológicas deste processo dividem-se entre a acumulação de matéria por unidade de área foliar (MEF ou SLM). MEF aumenta ao longo do ciclo até LAI_{max}. O quadro 3.19, apresenrado de seguida, mostra os valores mínimos e máximos de MEF e de AEF relativos à varieddae de milho estudada e, como se verifica a relação de reciprocidade, $MEF = 1/MEF$, os perfis temporais são simétricos, com MEF crescente ao longo do ciclo cultural até LAI_{max}. No que toca à evolução da morfologia foliar, no início do ciclo (quadro 3.19), AEF atingiu valores altos iguais a 0.25 a 0.50 [$\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$] (25 a 50 [$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$]) e MEF níveis baixos entre 2 e 4 [mg cm^{-2}] (0.02 e 0.04 [kg m^{-2}]), o que responde à necessidade, advogada acima, da munição rápida de uma grande área foliar fotossintetizante. Esta rapidez do crescimento de AEF, na fase inicial, assegura maior poder de competição entre as plantas. Posteriormente, a estratégia inverte-se e passa a traduzir-se em maior “investimento” relativo na construção de tecidos estruturais em detrimento de AEF (0.05 a 0.06 [$\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$]) que diminui uma ordem de grandeza. Os valores mais elevado de MEF, ao nível de 16 a 20 [mg cm^{-2}] (0.16 a 0.20 [kg m^{-2}]), na fase de LAI máximo, representam uma concentração média da massa foliar 6 vezes superior à inicial.

Quadro 3.19 Parâmetros de morfologia foliar do milho. MEF: massa específica foliar (valores médios de mínimos e máximos e erros-padrões); AEF: área específica foliar (médias).

Designação	R600	R500	R400
MEF [mg cm^{-2}] (Erro-padrão)	2.83 - 20.27 (0.23; 0.85)	2.68 - 20.00 (0.15; 0.63)	2.76 - 19.50 (0.13; 0.64)
AEF [$\text{cm}^2 \text{mg}^{-1}$]	0.05- 0.35	0.05 - 0.37	0.05 - 0.36

Os tratamentos R₄₀₀, R₅₀₀ e R₆₀₀ não apresentaram diferenças significativas quanto a MEF ou a AEF na faixa 400-600 [mm] de RA, o que é mais uma evidência da viabilidade dos tratamentos R₄₀₀ e R₅₀₀. Em termos práticos, a noção de MEF (ou AEF) é importante na determinação de LAI através do processo de subamostragem. A este respeito, nota-se

que AEF é precisamente a derivada da curva Área Foliar-Massa Foliar quando esta é obtida por calibração de áreas com o peso seco ao longo do tempo.

Outro aspecto inerente a MEF é o seu significado ecofisiológico. Neste âmbito, MEF é uma medida da esclerofilia, atributo que, aparentemente, está associado a situações de deficiência hídrica e de elevadas temperaturas ambientais, em que a sua expressão acentuada constitui uma forma de adaptação vegetal a essas restrições. Como não houve diferenças significativas entre os diferentes regimes de rega quanto a este parâmetro (quadro 3.19), conclui-se, para mais este parâmetro, que os totais de rega aplicados são aceitáveis e fornecem a indicação de que pode ser viável a aplicação de quantidades inferiores de água, na cultura do milho, em princípio em solos relativamente profundos e com elevada capacidade de armazenamento de água, que permitem melhorar a eficiência da água das chuvas outono-invernais. De seguida faz-se uma síntese da análise de crescimento.

3.4.4.5 Síntese de Parâmetros da Análise de Crescimento

No capítulo da Análise de Crescimento, o conhecimento dos conceitos e a análise dimensional permitem estabelecer as suas inter-relações. Vamos usar as siglas internacionalmente consagradas, de origem anglófona, resumidas no quadro 3.20 e adaptadas de Poorter *et al.* (1989). No fim desta secção, na Fig. 3.9, várias relações entre parâmetros de crescimento são apresentadas para a variedade de milho estudada. Como não houve diferenças significativas entre os regimes R₄₀₀, R₅₀₀ e R₆₀₀, só ajustámos curvas para R₅₀₀.

Quadro 3.20 Abreviaturas utilizadas em Análise de Crescimento e as unidades preferidas para a sua expressão, por ordem alfabética. Os números na coluna mais à direita referem-se à primeira equação em que surgem neste documento. O peso pode referir-se à massa seca ou verde.

Abreviatura	Significado	Unidades Preferidas	Equação
CGR	Crop growth rate	[g m ² dia ⁻¹]	3.22
LAI	Leaf area index	[m ² m ⁻²]	3.21
LAR	Leaf area ratio	[m ² kg ⁻¹]	3.14
LWR	Leaf weight ratio	[g g ⁻¹]	3.18
NAR	Net assimilation rate	[g m ⁻² dia ⁻¹]	3.15
RGR	Relative growth rate	[mg g ⁻¹ dia ⁻¹]	3.16
SLA	Specific leaf area	[m ² kg ⁻¹]	3.19
SLM	Specific leaf mass	[kg m ⁻²]	3.17

a) Taxa de Assimilação Líquida

A designação "Taxa de Assimilação Líquida" é a tradução de *Net Assimilation Rate* (NAR; [g (CH₂O) m⁻² (área foliar) dia⁻¹]), geralmente aplicada a folhas e a plantas individuais. NAR pode ser medido instantaneamente por um sistema IRGA ("Infra-red Gas Analyser") quer a nível foliar, na base da quantidade de CO₂ consumido (*e.g.* Matos, 1990; Lima, 1992) quer a nível de plantas inteiras, usando câmaras transparentes totalmente automatizadas com instrumentos de grande autonomia e precisão (Whitfield, 1990). Para determinar a capacidade fotossintética máxima (F_{nmax}), as plantas são submetidas a várias condições experimentalmente controladas. É sabido que F_{nmax} varia com as espécies (Koonings, 1989), nomeadamente, entre aquelas com diferentes mecanismos fotossintéticos (C₃ C₄ ou CAM), o que sustenta admitir-se o mesmo para NAR e para a taxa relativa de crescimento cultural (*Crop Growth Rate*, CGR). Como NAR é a medida do balanço entre o ganho fotossintético e o consumo respiratório, ele depende claramente da relação das dimensões dos *centros de produção* e de *consumo* e, ainda, da intensidade das suas actividades metabólicas. Deste ponto de vista, por exemplo, uma elevada razão sistema radical / sistema fotossintetizante surge quando a planta se desenvolve sob efeito de deficiência hídrica, em ambiente de elevada exigência evapotranspiratória, e diminui quando a água no solo deixa de ser limitante (Loomis, 1983, *in* Taylor *et al.*, 1983). No trigo (Loomis, *ibid*), o sistema radical tende a ser 30% do total da biomassa sob carência de água e 10% em condições de boa provisão em água. Em cereais, NAR parece ter sempre valores elevados e, por extensão, será particularmente maior em espécies C₄ (*e.g.* milho, sorgo) que apresentam a vantagem adicional de não exibirem fotorrespiração (Goldsworthy, 1976) e de serem fotossinteticamente mais eficiente que as do grupo C₃ (Tanner & Sinclair, 1983; Saugier, 1992). A relação "parte aérea / parte radical" é importante para a descrição do padrão da partição dos assimilados (Hay, 1995) entre os órgãos fotossinteticamente activos e os órgãos de reserva.

Quando se trata de uma cultura, NAR é substituído pela taxa de crescimento da cultura (CGR; [g (MS) m⁻² (solo) dia⁻¹]). Naturalmente, CGR é o produto NAR * LAI, em que

LAI funciona como o factor de transferência de escala (no sentido de nível hierárquico do fitossistema) da planta para a comunidade vegetal.

b) Taxa Relativa de Crescimento

A Taxa Relativa de Crescimento (*i.e.*, *Relative Growth Rate*: RGR) é, por definição, $RGR = dM/dt * (1/M)$ onde $M = BM$ (seca ou verde), para abreviar; dM é o incremento de M no intervalo de tempo dt [dia]. No quadro 3.17 foi apresentada a ordem de grandeza de RGR (μ_M) da biomassa que variou entre 0.090 e 0.012 [dia⁻¹], nos tratamentos bem regados, a 0.255 [dia⁻¹], no regime de "Sequiro". Por exemplo, o valor 0.090 corresponde a 90 [mg (M) g⁻¹ (M) dia⁻¹]. Poorter (1989) reporta valores típicos de μ_M para herbáceas, desenvolvidas em câmaras de crescimento, com adubação azotada óptima, na faixa de 100 a 300 [mg (M) g⁻¹ (M) dia⁻¹], estando os do quadro 3.17 em consonância com este intervalo de variação.

Uma análise de crescimento é, conforme asseveram Poorter *et al.* (1989), o primeiro passo em qualquer estudo de aspectos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos que determinam RGR. Na experimentação é, portanto, uma forma de estudar os efeitos dos factores de acumulação de biomassa (logo, de NAR) como o regime hídrico, o nível de adubação, regime de luz, etc.. NAR e RGR podem ser utilizados na análise da produtividade do azoto, sendo a natureza da discussão reconhecidamente complexa (Poorter, 1989).

c) Razão Área Foliar e Biomassa

A Razão Área Foliar / BM (ou M) é equivalente a *Leaf Area Ratio* (LAR [m² (área foliar) kg⁻¹ (BM da planta)]) (Poorter, 1989). LAR exprime o peso da folhagem fotossinteticamente activa num dado microclima cultural e é típica da espécie (Koonings, 1989). A sua definição, preconiza que a irradiância, a temperatura e a nutrição azotada situam-se entre os principais factores que influenciam LAR.

$$LAR = Af / M \quad (3.14)$$

Os conceitos e os parâmetros afins a LAR, até agora descritos nesta secção, podem ser conciliados da seguinte forma:

$$\text{NAR} = 1/\text{Af} * dM/dt \quad (3.15)$$

onde dM/dt define a taxa absoluta de crescimento da cultura.

$$\text{RGR} = \text{NAR} * \text{LAR} \quad (3.16)$$

Retenhamo-nos um pouco na análise de LAR. LAR varia com a fracção da massa foliar e com a morfologia (estrutura) foliar. A fracção da massa foliar equivale a *Leaf Weight Ratio* (LWR) expressa em [g (massa foliar) g⁻¹ (planta)]. A massa foliar (Mf) é calculada por:

$$\text{Mf} = \text{SLM} * \text{Af} \quad (3.17)$$

Ou seja, a massa específica foliar (SLM) é o declive da relação entre Mf e Af, ajustada estatisticamente. Dependendo da fase fenológica, e como já foi discutido, SLM exprime o compromisso de optimização da relação entre Af e Mf, estando a prioridade deslocada para a acumulação relativa de Mf ou de Af. Se houver estiolamento, a folha fica verde-pálido devido ao efeito conjugado de baixa irradiância ($R_n < 400$ [W m⁻²]) e alta temperatura, a área específica foliar, SLA (= 1/SLM) é promovida, através de Af, em detrimento de Mf; contrariamente, se houver carência acentuada de água (em condições normais de irradiância e de temperatura), a folha fica mais espessa, a área foliar diminui e aumenta SLM (*cf. e.g.* Lima, 1992; Abrams *et al.*, 1994), adaptação geralmente acompanhada da alteração (visível) da tonalidade do verde que se desloca para o verde-azulado, com a folha mais coreácea.

Dispondo da relação LAI e BMS (ou M, para abreviar), estabelecida para uma cultura, obtém-se:

$$\text{LWR} = (d\text{LAI}/dM) * (\text{área de amostragem}) * \text{SLM} \quad (3.18)$$

onde $\text{SLM} = dMf/dAf$, como se viu, e o local de amostragem é comum a BM e a LAI; se forem diferentes, é preciso uma redução à mesma escala. Por consequência, do que se disse atrás, outra forma de desuzir LAR é a seguinte:

$$\text{LAR} = \text{LWR} * \text{SLA} \quad (3.19)$$

De acordo com Konings (1989) e Poorter (1989), numa cultura que se desenvolve sob condições não limitantes de nutrição azotada e intensidade luminosa moderada a alta, os valores típicos de LWR varia no intervalo 0.3 a 0.8 [g g⁻¹] e, de SLA, entre 10 e 50 [m² (Af) kg⁻¹ (BMS)].

Por sua vez, a conciliação entre a taxa relativa de crescimento (em biomassa) (RGR) e a taxa de assimilação líquida (NAR) gera a igualdade:

$$\text{RGR} = \text{LWR} * \text{NAR} \quad (3.20)$$

Agora, para se passar da média relativa a uma amostra de plantas para a cultura, escrevemos:

$$\text{LAR}_c = \text{LAR} * \text{LAI} \quad (3.21)$$

em que LAR_c cultural [mg g⁻¹ (MS) m⁻² (solo)] tem o significado de LAR da planta, a razão entre a massa foliar e a biomassa total da planta. Tem-se, ainda:

$$\text{CGR} = \text{NAR} * \text{LAI} \quad (3.22)$$

CRG (*Crop Growth Rate*) é a assimilação líquida por metro quadrado da superfície cultivada (e.g., [g m⁻² (solo) dia⁻¹]).

A sinopse analítica que se segue baseia-se na Fig. 3.9 (pág.). No quadro 3.21 (a seguir), resumimos a curva de cada parâmetro em três pontos, um inicial, outro intermédio e outro à maturidade da cultura (dada por LAI máximo). O valor intermédio de LAI foi fixado em 2.7, igual a metade de LAI máximo (média dos três tratamentos analisados) o que ocorreu a 45 DAS (531 [°C dia], UTN = 0.35 []), em todos os tratamentos. Em regra, 2.7 ≤ LAI ≤ 3.0 é tido como um valor crítico em termos de intercepção e extinção da luz e da evaporação directa da água, a partir do solo (e.g., Tanner & Sinclair, 1983); Majeed *et al.*, 1994).

É possível ver (quadro 3.21) que CGR, passa por três ordens de grandeza numéricas em R₆₀₀, no intervalo 3-122 [g m⁻² dia⁻¹], enquanto que não houve diferenças médias significativas entre R₄₀₀ e R₅₀₀, na fase vegetativa; na fase reprodutiva, estes mantêm valores semelhantes de CGR, entre si, mas R₆₀₀ supera-os claramente, impondo uma diferença absoluta de 35 [g m⁻² dia⁻¹]. Podemos assumir que esta diferença ao nível de CGR traduz a diferença entre as respectivas taxas de enchimento do grão (TEG), o que pode ser justificado por ter sido RA em R₆₀₀ 1.20 e 1.50 superior do que em R₄₀₀ e em R₅₀₀, respectivamente; digamos, em média 1.35. É interessante notar que a razão entre os máximos de CGR de R₆₀₀ e a média dos máximos de R₄₀₀ e R₅₀₀ foi $122/87 = 1.40$, o que pode corroborar a ideia aventada. CGR tem por bases directas NAR e LAI que aumentam à medida que a cultura caminha para a maturidade. NAR atinge o valor máximo de 24 [g m⁻² dia⁻¹] em R₆₀₀ e 17 [g m⁻² dia⁻¹] nos restantes tratamentos, enquanto que, na fase inicial, não se vislumbra diferenças sensíveis. Atribuímos estas diferenças e semelhanças aos regime hídricos: os tratamentos de rega diferenciaram-se aproximadamente a 51-52 DAS, posterior a LAI = 2.7.

Por seu lado, LAR deve variar com as espécies. No caso presente (quadro 3.21), LAR, sobrelevado para 1000LAR, tem um regime decrescente com o tempo (DAS), tendo variado entre 11.3 e 0.83 [m² kg⁻¹], em R₄₀₀, entre 10.3 e 0.95 [m² kg⁻¹], em R₅₀₀ e entre 12.2 e 0.64 [m² kg⁻¹], em R₆₀₀, entre o início e a fase de maturidade, respectivamente. Repare-se que LWR, um dos termos de LAR (equação 3.19), está entre os extremos apontados por Koonings (1989), citados antes; embora este autor se não tenha referido ao mecanismo fotossintético, cremos que o intervalo que apresentou se reportava à média relativa aos três mecanismos fotossintéticos conhecidos. Ao contrário de LAR, a monotonia de LWR exhibe um máximo a meio do ciclo, estando limitado pelos pares dos valores extremos (mínimo, máximo) iguais a (0.15, 0.64), (0.19, 0.45) e (0.12, 0.49) [g g⁻¹], com o valor mínimo a ocorrer na fase adulta, em R₄₀₀ R₅₀₀ e R₆₀₀, respectivamente. Contudo, LWR é, aqui, sobrestimado porque o peso das raízes não entrou no cálculo. O outro termo de LAR é a área específica foliar (SLA) que, como vimos e discutimos já, diminui com a idade da cultura, numa clara expressão de que há duas estratégias bilógicas para enfrentar e gerir o compromisso entre o ganho fotossintético e a perda de água, por

evapotranspiração, à medida que a área foliar ganha importância com a idade. Mais uma vez, o intervalo de 10 a 50 [m² kg⁻¹] de SLA destacado por Koonings (1989) é justificado.

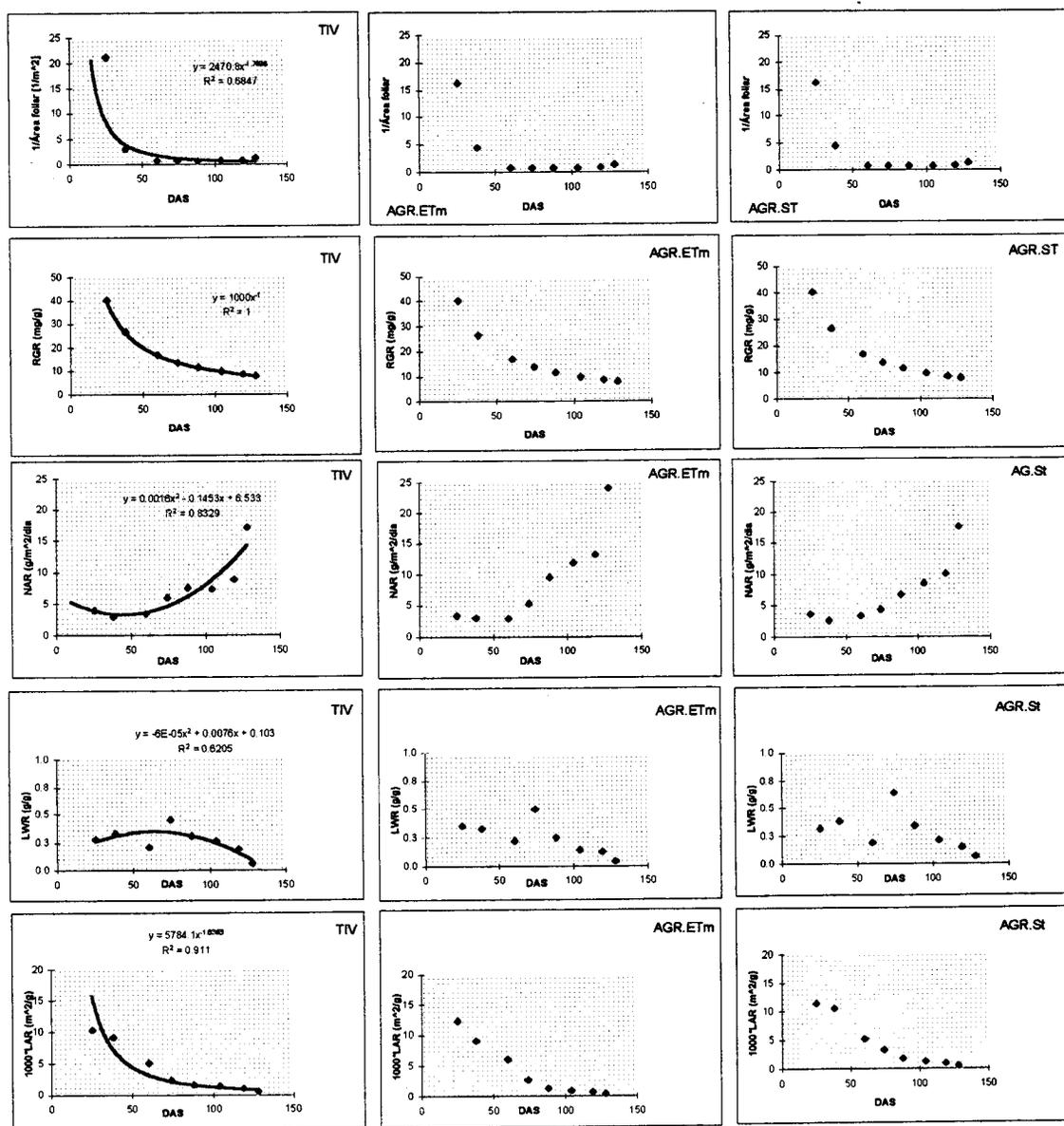
A bioestratégia evidenciada pelo milho, em termos do curso de SLA, não parece ser regra nas espécies vegetais, porquanto se apresenta diversa da observada na *Colocasia esculenta* (inhame): 22.30 [m² kg⁻¹] foi o valor constante obtido ao longo do ciclo (10 meses) (Shih & Snyder, 1983), enquanto, no trigo (*Triticum aestivum* L., cv. Pesudo), Abreu (1994) obteve, em ensaios multianuais, em ambiente mediterrânico, um perfil médio bimodal de SLA: um máximo de 25 [m² kg⁻¹], ocorreu no estado de desenvolvimento normalizado (EN) 0.4 e outro de 15 [m² kg⁻¹] a EN = 1.5, posterior à antese (ocorrida a EN = 1.2). O inhame e o trigo são espécies C₃, mas há informação (cf., Shih & Snyder, *ibid*) de que a cevada (*Hordeum vulgare* L.), também C₃, mostra SLA independente do tempo. Conclui-se que; 1) o trigo diminui SLA, ao longo do ciclo, tal como o milho, mas a redução faz-se segundo o factor 0.60 (em relação ao máximo) muito menos acentuado que 0.14 no milho, de acordo com os nossos resultados, e 2) a monotonia da curva de SLA tem carácter específico ou varietal.

Quadro 3.21 Parâmetros de crescimento do milho: três pontos de cada curva (25, 74 e 109 DAS) para os três regimes de rega (400, 500 e 600 [mm] / ciclo); LAI e NAR (38; 45; 128 DAS). $\Delta t = 16$ dias; LAI (45 DAS)= 2.7.

Parâmetros	Unidades	R400	R500	R600
CGR	[g m ⁻² dia ⁻¹]	2.3; 8.1; 87.5	3.5; 8.5; 87.2	2.6; 7.8; 121.9
LAI	[m ² m ⁻²]	1.1; 2.7; 5.1	1.2; 2.7; 5.1	0.91; 2.7; 5.2
LAR * 1000	[m ² kg ⁻¹]	11.3; 3.2; 0.83	10.3; 2.3; 0.95	12.2; 2.9; 0.64
LWR	[g g ⁻¹]	0.31; 0.64; 0.15	0.27; 0.45; 0.19	0.34; 0.49; 0.12
NAR	[g m ⁻² dia ⁻¹]	2.5; 3.0; 17.5	2.9; 3.14; 17.1	2.9; 2.9; 23.9
RGR	[mg g ⁻¹ dia ⁻¹]	40; 13.5; 8.4	40; 13.5; 8.4	40; 13.5; 8.4
SLA	[m ² kg ⁻¹]	36.3; 5.0; 5.8	37.5; 5.1; 5.1	35.7; 5.3; 5.3
dW dt ⁻¹	[g dia ⁻¹]	0.23; 7.2; 15.4	0.18; 9.1; 12.2	0.20; 7.7; 16.1

Sucintamente, a Fig. 3.9 (página seguinte) informa, de cima para baixo, que a área foliar, expressa pelo seu inverso (1/LA [m⁻²]), a taxa relativa de crescimento (de BMA) (*i.e.* RGR) e a razão área foliar-massa foliar estão relacionadas com o tempo por relações de

potência, com a particularidade de RGR ($y = 10^3x$) ser hiperbólico. LA (*i.e* $1/LA = 2470.8x^{-1.7696}$) é cada vez mais importante à medida que a



R500

R600

R400

Fig. 3.9. Padrões de parâmetros de crescimento: em três regimes de rega, 400, 500 e 600 [mm] não houve diferenças significativas. Ver texto.

cultura caminha para a maturidade; RGR pode ser dividido em dois intervalos, em torno de DAS = 54 [dia] (637.2 [dia °C]; UTN = 0.42 []), o mesmo acontecendo com LAR e, dependendo da precisão desejada, uma relação linear pode ser assumida para ambos. Leis

diferentes, agora de grau dois, são evidenciadas por NAR ($y = 0.0016x^2 - 0.1453x + 6.536$), LWR ($y = -6E-05 x^2 + 0.0076x + 0.103$) em função do tempo.

A taxa de assimilação líquida (NAR) tem um mínimo em DAS = 50 [dia] (590.0 [dia °C]; UTN = 0.39 []). Comportamento contrário parece típico da proporção da massa foliar (LWR), cujo máximo se situa a DAS = 75 [dia] ([885.0 dia °C]; UTN = 0.58 []). O decréscimo de LWR é atribuído à translocação de produtos não estruturais que migraram para tecidos de reserva. Este parecer é sustentado pela estabilização da massa específica foliar (MEF ou SLM), o inverso de AEF (ou SLA). Nota-se que, enquanto LWR aumentava, SLA decrescia (aumento de MEF), também, segundo uma lei quadrática do tempo, mas o máximo do primeiro foi mais precoce do que o mínimo deste último, segundo uma diferença de 25 [dia] (ou 295.0 dia °C)]. O efeito conjunto de LWR e de SLA evidenciado sobre LAR é dominado por SLA, como parece evidente da semelhança entre as curvas de SLA e de LAR. Por outro lado, se NAR aumenta sempre a partir de DAS = 50 [dia], é porque a acumulação de biomassa é comandada pelo enchimento do grão, a partir de DAS = 75 [dia], por comparação dos gráficos de NAR e de SLA.

Se NAR aumenta sempre a partir de DAS 50, é porque a acumulação em massa é comandada pelo enchimento do grão, depois de DAS 75, por comparação do gráfico de NAR e SLA.

Em traços gerais, estes parecem ser os compromissos atingidos pelos vários parâmetros de crescimento, nos vários tratamentos, mostrando-se estes desempenhos semelhantes em relação aos mesmos. Uma maior extensão da análise de crescimento deve integrar o estudo do papel dos nutrientes principais (N, P e K) associado ao regime de água. Em particular, deve ser dada atenção ao azoto, dada a sua participação no teor proteico dos tecidos e na constituição da clorofila. Outro interesse ecológico-agrícola é a necessidade de se apurar a eventual existência de uma taxa de substituição metabólica entre o azoto e a água (Gutiérrez & Meinzer, 1994; Sobrado, 1994) que, a existir, teria toda a conveniência que fosse negativa e mais que proporcional (pelo menos entre certos limites), para responder à questão "de quanto se deve reduzir a aplicação da água e aumentar a aplicação do azoto para manter a produção constante"?

3.5 | Conversões Energia-Biomassa e Energia-Evapotranspiração

Ficou claro ao longo de § 3.4 que NAR é o balanço entre dois importantes processos de acumulação de biomassa vegetal: a fotossíntese bruta e a respiração bruta. Sabe-se, também, que a fotossíntese é endoenergética e envolve *c.* 510 [kJ] (Sesták *et al.* 1971; Monteith, 1972). O produto final que nos interessa analisar são os carboidratos. Para isso recorda-se que a fórmula ponderal de uma ose é CH₂O que dá a combinação relativa dos três elementos C (carbono; m.a. = 12 [g]), H (hidrogénio; m.a. = 1 [g]) e O (oxigénio; m.a. = 16 [g]); PM (CH₂O) = 30 [g]. Portanto, a razão a que a transformação se dá é de 17 [kJ g⁻¹(CH₂O)], ao nível dos cloroplastos.

O valor médio da radiação directa (R_s) ao longo do ciclo (130 DAS) totalizou 2600 [MJ m⁻²], à razão de 20 [MJ m⁻² dia⁻¹], donde a radiação líquida foi 0.77*R_s = 2002 [MJ m⁻²]. A radiação útil na conversão é a radiação fotossinteticamente activa, PAR (*Photosynthetically Active Radiation*). PAR coincide com o espectro visível (400-700 [nm]) e constitui 50% de R_s (Monteith & Answorth, 1992). Ou seja, PAR = 0.5 * R_s. Ficamos com 1001 [MJ m⁻²]. O coeficiente de absorção (α) das folhas, na banda 400-700 [nm], varia entre 0.80 e 0.90 [] (apurámos este intervalo em várias espécies ornamentais e é confirmado, *e.g.*, Monteith, 1972). Fixando α = 0.85 [] (eficiência espectral), fica à disposição da fotossíntese 850 [MJ m⁻²]. Mas, para um coberto com densidade de plantas usuais, procede-se a uma correcção para o factor de absorção f_α = 0.95(1-e^{-k*LAI}) (*cf.* Saugier, 1992); esta fórmula sugere haver uma atenuação na absorção da radiação, talvez porque a arquitectura do coberto interfere no regime da luz segundo fenómenos ópticos múltiplos; 0.95 refere-se a um coberto completamente denso, tipo “folha gigante”, com qualquer valor de LAI, mas que não extingue a luz (k = 0). Calculámos f_α = 0.79 [], representativo do ciclo, no presente estudo.

No caso presente, a taxa média de acumulação de biomassa pela cultura (ou CGR) foi, para os dois regimes hídricos extremos, 17.0 [g m⁻² dia⁻¹] (R₄₀₀) e 22.1 [g m⁻² dia⁻¹] (R₆₀₀). Para 130 dias, obtemos, então, 2.6 e 3.4 [g (CH₂O) (MJ_{vis})⁻¹]. Este valor é representativo, assumindo que a cultura interceptava toda a radiação incidente. Se

admitirmos um factor de intercepção $f_i = 0.95$ [], para todo o ciclo, o resultado é 2.5 e 3.2 $[\text{g} (\text{MJ}_{\text{vis}})^{-1}]$, respectivamente. Segundo Saugier podemos reter uma gama de variação de 1.5 a 3.0 $[\text{g} (\text{MJ}_{\text{vis}})^{-1}]$, sendo o extremo inferior dominado pelas C_3 e o superior pelas C_4 . Estas são cerca de 1.5 a 2.0 (seja, 1.75) mais eficientes que as primeiras, no mesmo bioclima. Os números acabados de apresentar-se não são a eficiência quântica (ϵ_q) do processo, porque esta é definida para luz fraca ($\text{PAR} \in [0, 200] [\text{Wm}^{-2}]$), na curva de resposta fotossintética à luz, quando esta não é limitante. Como, no Verão, prevalece o céu limpo, tem-se $\text{PAR} > 200 [\text{Wm}^{-2}]$, donde não ser rigoroso usar-se o termo eficiência. Vamos, então, dizer produtividade quântica da biomassa (π_q), um conceito mais flexível.

Em trabalho anterior, determinámos $\epsilon_q = 0.020 [\text{mol mol}^{-1}]$, no trevo (*cf.* Lima, 1992), na base do CO_2 , equivalente a 3.1 $[\text{g} (\text{MJ}_{\text{vis}})^{-1}]$, na base de CH_2O ; 3.1 multiplicado por (30/44) dá 2.7 $[\text{g} (\text{MJ}_{\text{vis}})^{-1}]$, valor que cai no intervalo referido acima. Landsberg (1986) e Saugier (1992) propõem $\epsilon_q = 0.05 [\text{mol mol}^{-1} (\text{PAR})]$ para estimar a produtividade primária das plantas, mas é preciso ter em atenção que o valor de ϵ_q é obtido a partir de resposta à luz de folhas sem problemas de alimentação hídrica ou carência nutricional. Além disso, enquanto que uma folha exposta exhibe saturação fotossintética a densidades de fluxo de radiação natural, não é imediato que o mesmo aconteça na cultura devido precisamente à concavidade característica da referida curva e do fenómeno da extinção da luz, através da folhagem. Portanto, observada a concavidade da curva fotossíntese-luz, podemos adiantar a aproximação $\pi_q = 0.75 \epsilon_q$, para a folha, e $\pi_q = 0.45 \epsilon_q$, para a cultura. Mas, presumivelmente haverá casos em que se verificará $\pi_q = \epsilon_q$.

Considerando dois casos extremos, os nossos resultados mostram os totais da biomassa (BMA) iguais a 28.7 (R_{600}) e 22.0 (R_{400}) $[\text{t ha}^{-1}]$, respectivamente, o que corresponde à produção energética da biomassa iguais a 37.6 e 47.3 $[\text{MJ m}^{-2}]$, pela mesma ordem. Isto traduz, em relação a R_n e a PAR, índices de conversão da ordem de 0.04 e 0.02, respectivamente. É por a fotossíntese ter esta ordem de grandeza em relação à radiação incidente (ou líquida) que a desprezamos no balanço energético das folhagens fotossintetizantes, nomeadamente em lisímetros vegetados.

Análise similar à anterior se faz em relação à água efectivamente evapotranspirada pela cultura (ET_c). Na situação extrema, o regime R_{600} correspondeu a uma taxa média de $ET_c = 4.2$ [mm dia⁻¹] (para a eficiência de rega igual a 0.7 e $ET_o = 5.5$ [mm dia⁻¹] e $k_c = 1.1$ (Julho); com o calor latente de vaporização da água $\lambda = 2.5$ [MJ kg⁻¹] e a equivalência 1 [mm h⁻¹] ≈ 700 [W m⁻²], a energia de calor latente da evapotranspiração envolvida, em todo o ciclo (130 [dia]), calcula-se em 1752.4 [MJ m⁻²].

A biomassa, por seu lado, integrou 48.8 [MJ m⁻²] da radiação (*e.g.* R_{600}). Podemos, então, calcular a eficiência da água, na base da massa, em 28.7 [t(CH₂O)]/5500.0 [t(H₂O)] = 0.0052 (0.52 % ou 5.2 [g kg⁻¹]) e, na base da energia, igual a 2.8 % (= 48.8/1752.4). Significa isto que o consumo de água pelo sistema é, pelo menos, 5 vezes mais eficiente em termos de fluxo energético do que em termos do fluxo de massa correspondente. A diferença é grande com esta mudança de base de cálculo, e cremos que a explicação está na diferença das entropias, que apresentam a luz e a água, a montante do processo fotossintético. Afinal, neste aspecto, entre a luz e a água, a maior promoção qualitativa na conversão fotossintética refere-se à luz.

O parâmetro acima quantificado pelo valor 5.2 [g kg⁻¹] é dito eficiência do uso da água (*Water Use Efficiency*, WUE) da cultura e o seu principal discriminante externo é o défice de pressão de vapor (DPV) (*cf. e.g.* Tanner & Sinclair 1983; Monteith, 1993). WUE pode ser corrigido para a transpiração efectiva (Tr), mas, em regra, isto não é feito para as culturas. Deve, sim, indicar-se sempre a base de cálculo. No mesófilo, há outros tipos de discriminação, por exemplo, a discriminação isotópica do CO₂ que tem servido para quantificar WUE (Gutiérrez & Meinzer, 1994).

Se analisarmos uma curva de BM- ET_c (*cf.* Richards *et al.* 1993), conclui-se que Tr é cerca de $0.7 \cdot ET_c$, em condições propícias ao regadio, representando os restantes 0.3 a evaporação directa (E_s) a partir do solo. Esta informação apoia o resultado $Tr/ET_c = 0.72$ [] que deduzimos, antes, quando tratámos da rega. Este é o argumento das tecnologias de rega localizada que, por minimizarem E_s , apresentam eficiências muito altas. Contudo,

eficiência unitária não se obtém, porque a água do solo, sempre se perde por difusão gasosa.

Capítulo 4

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

No presente estudo foi analisado o comportamento ecofisiológico da variedade de milho (*Zea mays* L.) LG 26.88, Índice FAO-600, sujeita a regimes de rega acumulada (RA), no ciclo vegetativo, e três repetições. O microclima do Verão mediterrânico (quadro 3.1) apresentou elevada concentração térmica estival (0.33) e a relação entre ET_0 e a precipitação durante o ciclo foi de 11.7 [], o que traduz um elevado índice de aridez em Alvalade-Sado, no Sudoeste de Portugal.

O objectivo da diferenciação do regime de rega foi conseguido segundo uma condução simples baseada na aplicação da dotação de rega única (48 [mm]) e na manipulação da sua frequência de aplicação. Este critério permitiu conhecerem-se, *a priori*, os limites superior e inferior de RA, respectivamente, $RA = 600$ [mm] (*i.e.* R_{600}) e $RA = 400$ [mm] (R_{400}). O regime R_{600} foi estabelecido para satisfazer a evapotranspiração máxima (ET_m) e, R_{400} , para impôr um défice hídrico igual a 1/3 de RA. Contrariamente, o terceiro tratamento de RA resultou da natureza dinâmica do critério de oportunidade da rega que lhe foi aplicado, indicada pela igualdade entre a temperatura da cultura (T_c) e a temperatura do ar (T_a), seja $T_c - T_a = 0$; a temperatura da folhagem foi medida por um termómetro de infravermelho (TIV), daí a designação inicial de R_{tiv} . O facto da condição $T_c - T_a = 0$ depender da temperatura do ar, confere-a periodicidade variável. Deste modo, RA relativo a R_{tiv} foi conhecido apenas no fim do plano de rega e totalizou 500 [mm] (doravante, R_{500}). O critério de regar quando $T_c - T_a = 0$ sustentou-se, primeiro em argumentos empíricos (é regra $T_c - T_a$ ser negativo quando não há défice de água no solo, nas condições ambientais descritas) e, logo, enquadrados em agrometeorologia (ver Capítulo 1) através da discussão das condições de estabilidade atmosférica da quantidade de movimento. No ensaio conduzido com o tratamento R_{500} , não se atingiu o valor médio $T_c - T_a = 0$, mas sim $T_c - T_a = 0.4$ [°C] (o que não é significativamente diferente de zero).

Apurados todos os regimes de RA, a filosofia da análise encetada centrou-se no estudo comparativo do efeito da rega sobre o padrão temporal médio de $T_c - T_a$ e do balanço energético consequente, e sobre a biomassa total. Paralelamente, o desenvolvimento da cultura, foi alvo de uma detalhada análise de crescimento baseada na evolução da biomassa (BM), do índice de área foliar (LAI) e da altura da cultura (H_c).



Observamos que regar quando $T_c = T_a$ (regime R₅₀₀) significa que a rega se dá na condição de neutralidade atmosférica entre a cultura, activamente evapotranspirante, e o ar, isto é, na condição de estabilidade atmosférica, traduzida pela anulação do fluxo de calor sensível (H). Nos dias subsequentes à rega, verificou-se ser norma $T_c - T_a < 0$, ou da estabilidade atmosférica, pelo menos durante o fotoperíodo, desde que não haja carência hídrica. A condição $T_c - T_a < 0$ manteve-se mas em regime crescente; em média $T_c - T_a$ anulou-se oito dias após a rega em R₅₀₀, nunca tendo sido nos restantes tratamentos. Regar quando $T_c - T_a = 0$ tem outro significado biofísico, o de anular a razão de Bowen (β), entre a cultura e o ar sobrejacente. β é um conceito que define um método de balanço energético simplificado cuja utilidade, à escala regional, se nos afigura promissora na utilização de informação do estado da superfície obtida via satélite.

A razão mais próxima do facto de $T_c - T_a$ se revelar negativo é a do endotermismo do processo de vaporização da água, o que sustenta ter havido uma adequada resposta da cultura à solicitação ambiental (Fig., 3.2, quadro 3.8) para a evapotranspiração. Em condições de plena disponibilidade de água (quadro 3.2), $T_c - T_a$ chegou a atingir -7 [°C], em R₆₀₀. $T_c - T_a$ médio foi igual a -3.9 (R₆₀₀), -1.9 (R₅₀₀) e -2.2 (R₄₀₀) [°C]. Em termos médios o valor absoluto de $T_c - T_a$, em R₆₀₀, acabou por ser igual ao dobro do de R₅₀₀ e R₄₀₀, enquanto que, entre estes, a diferença não foi perceptível. Isto significa que a sensibilidade de $T_c - T_a$, ao défice hídrico, quando RA decresceu de 600 para 500 [mm], foi mais acentuada do que quando passou de 500 para 400 [mm], respectivamente, 2.0 [°C]/100 [mm] e, praticamente, 0 [°C]/100 [mm].

A diferença do nível térmico entre tratamentos é atribuída à disponibilidade de água no sistema, pois, a água é, com efeito, o regulador biofísico da temperatura da cultura, fundamentalmente devido ao seu calor latente de vaporização e ao carácter endoenergético do processo de vaporização, do mesmo modo que $T_c - T_a$ é o descritor do nível entálpico do sistema, em relação ao ar. A prova disto, foi o facto de, após uma rega, $T_c - T_a$ atingir um valor mínimo negativo para encetar, então, uma evolução tendencial crescente, nos dias subsequentes; os valores médios dos extremos, no tratamento R₅₀₀, foram -1.9 e +0.41 [°C], à razão de 0.3 [°C dia⁻¹]; no tratamento R₆₀₀, não houve registos de caso em que $T_c - T_a$ tivesse sido positivo. Ou seja, afiguraram-se os regimes de $T_c - T_a$, de H e de β negativos, em cultura evapotranspirando à taxa máxima (ET_m) ou satisfatoriamente próximo dela.

O padrão temporal de $T_c - T_a$ negativo e de módulo decrescente, entre duas regas consecutivas, é uma clara evidência de que $T_c - T_a$ responde, predominantemente, à

depleção da água no solo, em períodos longos, *e.g.* uma semana, em que T_c cresce mais que T_a (mais estável) à medida que o potencial de água no solo diminui, aquecimento atribuído à resistência da cultura. Ao contrário, ao longo de um dia (e estamos a falar de dias típicos de Verão), $T_c - T_a$ responde, efectivamente, à irradiância (*e.g.*, Hatfield, 1985), à resistência aerodinâmica e, principalmente, ao défice de pressão higrométrica do ar (DPV), pois, a variação do potencial de água no solo é pouco significativo (senão não detectável) no período de luz, como constatámos. Aliás, foi com base nestas considerações que o protocolo adoptado para o ajustamento do limite inferior (LI) de $T_c - T_a$ vs DPV estabelece medições nas mesmas condições de água no solo (com plena disponibilidade de água). Nestas condições, entre 24 a 72 [h] após a rega, o potencial de água no solo foi de -0.084 a -0.064 [MPa] e -0.021 e -0.072 [MPa] em R_{500} e R_{600} , respectivamente, valores representativos das camadas 0-30 e 60-90 [cm] do perfil do solo, numa condição típica, após a rega, aqui referente a 19 de Julho (anexo xiii).

A propósito do efeito da rega sobre a relação entre $T_c - T_a$ vs DPV, as LI's dos regimes R_{500} e R_{600} foram estabelecidas com LI(R_{500}) a sofrer uma translação de $\sim + 1$ [°C], por défice de dotação acumulada comparada de 100 [mm], mas manteve o declive (1.07 °C kPa⁻¹). Além de informarem quais os valores mínimos de $T_c - T_a$ em função de DPV, ficou estabelecido experimentalmente, das LI's e do balanço de R_n médio, que a resistência da cultura (r_c) é perfeitamente acedida pela equação de $T_c - T_a$, se as condições de medição se porcessarem com rigor. Por esta via, r_c de R_{500} e R_{600} foram calculados em 57 e 30 [s m⁻¹], respectivamente. Para R_{600} , tomado como referência, o valor de r_c foi confirmado por medições independentes e directas com porómetro, tendo-se obtido o valor médio de 31 [s m⁻¹], entre 1 e 4 [dia] após rega. Digamos, um valor médio de 30.5 [s m⁻¹]. Conclui-se, por isso, que o termómetro de infravermelho pode ser considerado, por extensão e com toda a propriedade, um porómetro, ressalvados os devidos enquadramentos conceptuais e experimentais (Lima, 1992). Repara-se, ainda, que os módulos das relações $r_c(R_{500})/r_c(R_{600}) = 1.9$ e $T_c - T_a(R_{600})/T_c - T_a(R_{500}) = 2.1$, se sobrepõem dentro de $\pm 11\%$, o que corrobora a nossa tese.

O valor da resistência da cultura regada ao regime de ET_m , $r_c = 31$ [s m⁻¹], é proposto para o milho, para entrar no Modelo de Penman-Monteith, na determinação de ET_o , se se pretender uma ET referência-milho. r_c igual a 31 [s m⁻¹], corresponde à resistência estomática média foliar igual a 77.5 [s m⁻¹] (e LAI = 5.0), ligeiramente superior a 70 [s m⁻¹] da referência-luzerna (*cf.* Smith *et al.*, 1990) padronizada para o cálculo de ET_o . É um facto que r_c mínimo difere entre espécies e entre cultivares, sendo menor na luzerna que na relva, outra cultura referência (Allen *et al.*, 1989). Conclui-se que a resistência

da cultura (r_c) e T_c-T_a estão interligados e respondem ao regime da rega. Operacionalmente, o regime de T_c-T_a e de r_c (actual) serviram para calcular o índice de carência hídrica, CWSI (e.g equação 3.7). Os valores médios de CWSI situaram-se em 0.03 (R₆₀₀), 0.13 (R₅₀₀) e 0.12 (R₄₀₀); entre os dois últimos não houve diferença significativa e qualquer deste níveis afigura-se residual (cf. Garrot *et al.*, 1994), portanto regar mesmo com 400 [mm] afigura-se viável, desde que a rega seja aplicada criteriosamente de acordo com a susceptibilidade da fase fenológica (Cabelguenne *et al.*, 1995).

Quando foi estudo o efeito da rega e, logo de CWSI, sobre a produção de grão, concluiu-se que os tratamentos não explicaram as quebras de produção e do índice de colheita (IC) verificadas. O causa foi atribuída à ocorrência de elevadas temperaturas máximas, durante duas semanas, na fase de reprodutiva, uma fase muito lábil.

A análise do efeito da rega na produção de biomassa não acusou diferenças significativas na faixa 600-400 [mm] de rega, por ciclo, de acordo com testes ANOVA. A viabilidade da estratégia de maior risco (i.e. 400 [mm]) pode ser garantida na cultura do milho, assumidos que forem os devidos compromissos, nomeadamente de ordem económica, neste caso, compatível com a diminuição de IC em 14 %. Biologicamente, R₄₀₀ é sustentável, a ajuizar pelas várias análises encetadas ao longo do documento. Porém, pudemos concluir que um efeito extra se manifestou sobre a produção de grão ao constatarmos uma quebra do índice de colheita que é, por natureza, altamente conservativo, em escalas amplas de regime hídrico. O efeito da variação de IC em ensaios de rega nem sempre é claro, conforme resultados obtidos por Thomas & Fukai (1994) com trigo e grão-de-bico, em condições mediterrânicas da Austrália. Isto está, certamente, ligado à complexidade de mecanismos fisiológicos da expressão de IC.

Posto isto, uma análise subsequente da relação água/biomassa foi feita assente nos pressupostos da não-linearidade, linearidade e, no caso desta, discutiu-se o afastamento do declive do valor típico 1.25 do milho (cf. Tanner & Sinclair, 1983). O efeito independente da água quantificou-se em 9% no défice relativo de produção e foi atribuído às elevadas temperaturas ocorridas na fase reprodutiva (FR). Tal significa que, em condições normais de temperaturas médias durante FR, o regime R₅₀₀ teria produzido (grão) 9.5 [t ha⁻¹] e, R₄₀₀, 8.1 [t ha⁻¹], à razão de 21.8, 19.0 e 20.3 [kg (grão) ha⁻¹ mm⁻¹] contra valores observados de 20.0, 16.8 e 15.0 [kg (grão) ha⁻¹ mm⁻¹], para R₆₀₀, R₅₀₀ e R₄₀₀, respectivamente.

Outra forma de estudar o desempenho da cultura em relação à rega foi através da análise de crescimento baseada em LAI, BMA e H_c (altura da cultura). Da análise, ficámos a saber que, apesar de aparentemente “crescer muito”, o milho discrimina ecofisiologicamente as prioridades de crescimento por adopção de estratégias biológicas, de acordo com os períodos vegetativos. Por exemplo, no cômputo geral, a acumulação de LAI é promovida em relação à biomassa (BMA), em cerca de 3 vezes e, a H_c , em 1.5 vezes, para $LAI \leq 4.0$, e em 2.2 vezes, para $4.0 \leq LAI \leq 6.0$. Este padrão é concordante com a necessidade da cultura em dispôr, rapidamente, de um grande grau de cobertura do solo. Isto faz diminuir a evaporação directa (E_s) (função do teor de água no solo) e desloca perda de água para um plano de compromisso entre a transpiração e a fotossíntese, através da eficiência do uso da água.

O desenvolvimento morfológico da folha foi, também estudada, através da relação entre a área foliar (A_f) e a massa foliar (M_f). O parâmetro “área específica foliar” ($SLA = A_f/M_f$, ver texto) ou o seu inverso (SLM), mostra duas tendências contrárias, da emergência ao estado adulto e alternadas, se vistas em todo o ciclo. Inicialmente, SLA é grande, o que quer dizer que a área de exposição é ecofisiologicamente prioritária em relação à acumulação da massa foliar (M_f) (a folha é “grande” e visivelmente translúcida); numa segunda fase (aproximadamente a $UTN = 0.58$) promove M_f às expensas de A_f . A primeira estratégia assegura uma rápida cobertura do solo, no sentido da poupança de água via diminuição de E_s ; ao inverter a estratégia, ante a aproximação da ântese, M_f aumenta em cerca de 5 a 6 vezes, o que é compatível com a necessidade de aumentar a capacidade fotossintética (Wardlaw & Moncur, 1995) e a eficiência do uso do azoto (Pooter *et al.*, 1989), ante a proximidade de FR, nomeadamente no que se refere à sua migração para o grão. Sobrado (1994) reporta haver uma diminuição da eficiência transpiracional da água (WUE), nesta fase. A conclusão que extrairmos destas informações, é que parece haver uma relação de substituição metabólica da água pelo azoto. A explicação pode estar ligada ao facto dos fotoassimilados não estruturais e solúveis, acumulados nos caules e folhas, migrarem para o grão durante a fase de formação deste. Releva, ainda, o facto da taxa de assimilação líquida da cultura (CGR) ter sido praticamente igual nos três regimes, variando entre 17 e 22 [$g\ m^{-2}\ dia^{-1}$].

Por fim, averiguámos e quantificámos as eficiências de conversão dos fluxos da energia radiante e da água no sistema cultural. A conclusão foi a de que a energia solar é convertida em biomassa a eficiências médias muito baixas, da ordem de 0.04 a 0.02 para R_n e PAR , respectivamente. Estas cifras justificam que se despreze a fotossíntese no balanço energético. Por seu lado, o fluxo de água, durante o mesmo período foi

analisado, similarmente, em termos de fluxo de energia e de massa. Calculámos e comparámos conteúdo energético da biomassa e a energia consumida pelo processo de vaporização da água. Apurou-se que a eficiência energética com que a água é transferida do fitossistema para a atmosfera foi de igual a 2.8 %, contra 0.52 % para o fluxo em massa.

O compromisso entre a evapotranspiração e a assimilação líquida cultural, tal como foi colocada a questão, expressou-se pela eficiência do uso da água de rega (EUR). EUR é reportada à água de rega (por não ter havido percolação profunda nem escoamento superficial) e à BMA. Assim, tem-se 55 (*i.e.*, R₄₀₀), 41 (R₅₀₀) e 48 (R₆₀₀) [kg (BMA) ha⁻¹ mm⁻¹], ou, na base de massa, 5.5, 4.1 e 4.8 [g (BMA) kg⁻¹ (H₂O)], respectivamente, evidência de que regar de forma a impôr $ET_c < ET_m$, aumenta a produtividade da água, dentro dos limites biofisicamente sustentáveis.

A análise dos resultados, aqui sumarizada, leva-nos a confirmar a validação do critério de rega segundo $T_c - T_a = 0$ [°C], do tratamento R₅₀₀, controlado por termómetro de infravermelho, tal como tinha sido colocada a questão inicialmente. Fôra, então assumido, que o critério de rega referido só seria válido se não resultasse numa significativa diminuição do índice de colheita da cultura, neste caso, apenas 2 % (*cf.* quadro 3.11), e não aumentasse marcadamente a frequência da rega (apenas 1 dia), o que se saldou na frequência de 8 [dia] contra os 7 [dia] da referência, o regime R₆₀₀; em R₄₀₀ regou-se com 10 [dia] de intervalo. A aplicação do critério referido, traduziu-se no teor hídrico relativo (THR) médio do solo a oscilar entre 15% e 20% de U_z , no momento da rega, em R₅₀₀, entre 10 e 15 %, e entre 30 e 35 %, em R₄₀₀ e R₆₀₀, respectivamente (quadro 3.3), no dia anterior à rega. Qualquer destes valores é muito inferior à clássica fracção igual a 0.50 de U_z , tomada como indicadora da oportunidade da rega. Isto significa que, para manter o intervalo de rega igual a 7 dias no regime de ET_m , seria preciso regar com a dotação igual a 75 [mm], admitindo um regime linear de depleção de água no solo entre a capacidade de campo e $0.5U_z$, e durante o mesmo tempo de aplicação que utilizámos. Conclui-se que a eficiência do funcionamento do sistema de rega (*e.g.* energia de bombagem, número de regas) e da produtividade primária da água aplicada foram aumentadas, com a prática do nosso plano de rega, em geral, e do critério de rega proposto em R₅₀₀, em particular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

*Artigo não consultado pelo Autor.

- Abrams, Marc D.; Kubiske, Marc.E. & Mostoller, Scott, A. (1994). Relating wet and dry year ecophysiology to leaf structure in contrasting temperate tree species. *Ecology*, **75(1)**:123-133.
- Abreu, José P.M. de Melo e (1994). *Modelo de Crescimento e Produção da Cultura do Trigo em Condições Mediterrânicas*. Tese de Doutor. Universidade Técnica de Lisboa - ISA. Lisboa.
- Abtew, W.; Newman, S.; Pietro, K.; Kosier, T. (1995). Canopy Resistance Studies of Cattails. *Transactions of the ASAE* **32(1)**:113-119.
- Abtew, W.; Gregory, M.J.; Borreli, J. (1989). Wind Profile: Estimation of Displacement Height and Aerodynamic Roughness. *Transactions of the ASAE* **32(2)**: 521-527.
- Allen, R.G.; Jensen, M.E.; Wright, J.L.; Burman, R.D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy J.* **81**:650-662.
- Blad, B.L. & Rosenberg, N.J. (1976). Measurements of crop temperature by leaf thermocouple, infrared thermometry and remotely infrared imagery. *Agron. J.* **65**: 603-608.
- Bonhomme, R.; Derieux, M.; Kiniry, J.R.; Edmeades, G.O.; Ozier-Lafontaine. Maize leaf number sensitivity in relation to photoperiod in multilocation field trials. *Agron. J.* **83**:153-157.
- Cabelguenne, M.; Jones, C.A.; Williams, J.R. (1995). Strategies for limited irrigations of maize in Southwestern France - a modelling approach. *Transactions of the ASAE*. Vol. 38(2):507-511.
- Cao, Mingkui.; Ma, Shijun & Han, Chunru (1995). Potential productivity and human carrying capacity of agro-ecosystems: an analysis of food production of China. *Agric. Syst.* **47**:387-414.
- Choudhury, B.J. & Idso, S.B. (1985). Evaluating plant and canopy resistances of field-grown wheat from concurrent diurnal observations of leaf water potential, stomatal resistance, canopy temperature and evapotranspiration flux. *Agric Forest Meteor.* **34**:67-76.
- Dickey, Gylan L. (1988). Crop Water Use and Water Conservation Benefits from Windbreaks. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **22/23**: 381-392.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 24. 2nd ed. Rome.

- Doorenbos, J. & Kassam, A.H. (1979). Yield Response to water. FAO Irrigation Drainage Paper Nº 33. FAO, Rome.
- Everest Interscience, Inc. (1990). Infrared AG Multimeter Model AG510B Owner's Manual. CA.
- Fontes, J.C. Goulart. (1992). Condução da Rega com o Termómetro de Infravermelho. ..Encontro Nacional de Rega.
- Forsythe, W.C.; Rykiel, E.J.Jr; Sthal, R.S.; Wu, Hsin-i, Schoolfield, R.M. (1995). A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year. *Ecological Modelling* **80**:87-95.
- Gallardo, M.; Jackson, L.E.; Schulbach, K.; Snyder, R.L.; Thompson, R.B.; Wyland, L.J. (1996). Production and water use in lettuces under variable water supply. *Irrig. Sci.*, **16**: 125-137.
- Garrot, D.J.; Ottman, M.J.; Fangmeier, D.D.; Husman, S.H. (1994). Quantifying Wheat Water Stress with Crop Water Stress Index to Schedule Irrigations. *Agron. J.* **86**:195-199.
- Gent, Martin P. (1994). Photosynthate reserves during filling winter wheat. *Agron. J.* **86**:159-167.
- Goldsworthy, A. (1976). Fotorrespiração. Tradução (Prof. Fernando Henriques), U.N.L. Lisboa
- Gutiérrez, Marco V. & Meinzer, Frederic C. (1994). Carbon isotope discrimination and photosynthetic gas exchange in coffee hedgerows during canopy development. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1994, **21**: 207-19.
- Hay, R.K.M. (1995). Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Ann. Appl Biol.* **126**:197-216.
- Idso, S. B.; Jackson, R. D.; Reginato, R. J. (1977). Remote Sensing of Crop Yields. *Science*, Vol. 196: 19-25.
- Idso, S. B.; Jackson, R. D.; Pinter, P.J.; Reginato, R. J. (1981a). Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* **27**:29-70.
- Idso, S. B.; Jackson, R. D.; Pinter, P.J.; Reginato, R. J.; Hatfield, J.L. (1981b). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agron. J.* **24**:45-55.
- Idso, S. B.; Pinter, P.J.; Reginato, R. J. (1990). Non-water-stressed baselines: the importance of site selection for air temperature and air vapour pressure deficit measurements. *Agric. Meteorol.* **53**: 73-80.

- *Jackson, R.D.; Idso, S.D.; Reginato, R.J.; Pinter, P.J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* **17**:1133-1136.
- Jackson, R.D. (1982). Canopy temperature and crop water stress. *Adv. Irrig.* **1**:43-85.
- Jones, Hamlyn G. (1990). L'Irrigation du Futur. *La Recherche. L'Eau*, **221**: 644-53.
- Kang, M.S. & Gorman, D.P. (1989). Genotype x environmental interaction in maize. *Agron. J.* **81**:662- 664.
- Keiser, W.M. (1989). Inhibition of Metabolism by Dehydration: Cell Volume or Water potential as Decisive Factor. *Seminar on Photosynthesis and Growth under Mediterranean Conditions: Influence of Dryness and Salinity*. Estação Agronómica Nacional. Oeiras. Portugal.
- Kemper, W.D. (1993). Effects of Soil Properties on Precipitaion Use efficiency. *Irrig. Sci.* **14**:65-73
- Koonings, H. (1989). Physiological and morphological differences between plants with a high NAR or a high LAR as related to environmental conditions. *In: Lambers, H. et al. (1990) (Ed.)*, pp. 101-123.
- Kramer, P. J. (1983). *Water Relations of Plants*. Academic Press. New York.
- Kreis, W. & Raffy, M. (1992) "Milieu Homogène Équivalent pour l'étude des flux de Chaleur Sol-Atmosphère par télédetection". p. 285-298. *In: Hiérarchie en Écologie*. SCOPE-Comité français. Naturalia Publ. ISBN2-909717-05-4.
- Lambers, H.; Cambrigde, M.L., Koonings, H. & Ponts, T.L. (eds). (1990) (Ed.). *Causes and Consequences of Variation in Growth Rate and Productivity of Higher Plants..* Academic Publishing. The Hague.
- Landsberg, J.J. (1986). *Physiological Ecology of Forest Production*. Academic Press. London, N.Y.
- Laureano, J.; Melhorado, F.L.; Lima, J.C.; Lopes, L.; Henriques, F. & Moreira, T. (1995). Stomata and regional climate change or putting the "big leaf" in the meteorological shield. Congresso Luso-Espanhol de Fisiologia Vegetal. Outubro, 1995. Portugal.
- Letey, J. (1993). Relation between salinity and efficient Water Use. *Irrig. Sci.* **14**:75-84
- Lima, J.C. (1992). *Introdução ao Controlo da Água e da Temperatura no Trevo por Termometria de Infravermelho: Estudos Experimentais e Dedutivos*. TFC-848. pp. 272. Universidade de Évora. Évora.
- Lima, J.C.; Moreira, T.J.S; Santos, F L. (1995a). An Infrared Thermometer behaves as a porometer. (a submeter).

- Lima, J.C.; Santos, F.L.; Moreira, T. (1995b). Crop-Air Equivalence Temperature as a Criterion of Irrigation Scheduling for White Clover in a Mediterranean Climate. Paper 96C-034. "International Congress on Agricultural Engineering". 23-27 Set.. Madrid.
- Long, S.P.; Humphries, S. & Falkowski, P.G. (1994). Photoinhibition of photosynthesis in nature. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant. Mol. Biol.* **45**:633-662.
- Loomis, R.S. (1983). Crop manipulations for efficient use of water: an overview. *In: Taylor et al.*, Ed., 345-74.
- Majeed, A.; Stockle, C.O.; King, L.G. (1994). Computer model for managing saline water for irrigation and crop growth: preliminary testing with lysimeter data. *Agric. Water Managem.* **26**:239-251.
- Matos, M. Céu R.B.A. (1990). *Economia da Água da Macieira. Aspectos Fisiológicos e Aplicação ao Controlo da Rega*. Tese Doutor. F.C.U.L. Lisboa.
- *Monin, A.S. (1973). Boundary layers in planetary atmospheres. P. Morrel Ed. *Dynamic Meteorology*. pp 419-458. D. Reidel Publishing Company. Boston. *In: Monteith & Answorth (1990)*.
- Nunes, M.A. & Correia, M.M. (1983). Regulação Estomática da Água Disponível no Solo em *C. arabica* (cvs. *Caturra, Catuai e Harrar*). Garcia d'Orta. Série de Estudos Agrónomicos. **10(1-2)**: 83-89. Lisboa.
- *Monsi, M. & Saeki, T. (1953). *Japanese Journal of Botany*. **14(1)**:22-52. *In: Sugier, B. (1992)*.
- Monteith, J.L. Campbell, G.S.; Potter, E.A. (1988). Theory and performance of a dynamic diffusion porometer. *Agricultural and Forest Meteorology*. **44(1)**: 27-38.
- Monteith, J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecology*. **9**:747-766.
- Monteith, J.L. (1993) The exchange of water and carbon by crops in a mediterranean climate. *Irrig. Sci.* **14**:85-91.
- Monteith, J.L. & Answorth, M. (1990). *Principles of Environmental Physics* (2nd Ed.) Edward Arnold. London.
- Moreira, Tomaz J.da S. (1981). Os Estomas e a Produtividade Fotossintética da Água. Estudos Dedutivos e Experimentais. Tese Doutor. . ISA. 1981. Lisboa.
- Poorter, H.; Hirose, T. & van der Werf (1989). Analysis of growth based on net assimilation rate and nitrogen productivity. Their physiological background. *In: Lambers, H. et al. (1990) (Ed.)*, pp. 1-17.

- Oertly, J.J. (1976). "The Soil-Plant-Atmosphere-Continuum". In: *Water and Plant Life*. Ecological Studies Series. Vol.: 19:32-41. Lange et al. Eds. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. N.Y.
- Poorter, H. (1989). Interspecific variation in relative growth rate: On ecological causes and physiological consequences. In: Lambers, H. *et al.* (1990) (Ed.), pp. 45-68.
- Richards, R.A.; López-Castañeda, C.; Gomez-Macpherson, H. & Condon, A.G. (1993). Improving the efficiency of water use by plant breeding and molecular biology. *Irrig. Sci.* 14:93-104.
- Ruprecht, J.K. & Schofield, N.S. (1990). "In Situ" Neutron Moisture Meter Calibration in Lateritic Soils. *Aust. J. Soil Res.* 28:153-165.
- Santos, F.L.; Serralheiro, R.P.; Bica, M.; Santos, A.M. Tactical Irrigation of Maize in Southwest of Portugal. Universidade de Évora.
- Saugier, B.; Katerji, N. (1991). Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agric. and Forest Meteorol.* 54:263-277.
- Saugier, B. (1992). "Production Primaire: du chloroplaste à la biosphère". p. 65-84. In: *Hierarchie en Écologie*. SCOPE-Comité français. Naturalia Publ. ISBN2-909717-05-4.
- Sepaskhah, A.R. & Kashefipour, S.M. (1994). Relationship between water potential, CWSI, yield and fruit quality of sweet lime under drip irrigation. *Agricultural Water Management.* 25:13-22.
- Sesták, Z.; Catský, J.; Jarvis, P.G. (1971) (eds). *Plant Photosynthesis Production: Manual of Methods*. Dr. Junk Publ. The Hague.
- Shih, S.F. & Snyder, G.H. (1983). Leaf area index and dry biomass of taro. *Agron. J.* 76:750-753.
- Smith, M.; Allen, R.; Monteith, J.P.; Perrier, A.; Santos Pereira, L.; Segreen, A. (1990). Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements. FAO, 28-31 May. Roma-Italy.
- Smith, M. (1992). CROPWAT-Programme d'Irrigation, version 5.7. Programmatheque, FAO, Rome, Italie.
- Sobrado, M.A. (1994). Leaf age effects on photosynthetic rate, transpiration rate and nitrogen content in tropical dry forest. *Physiologia Plantarum*, 90: 210-215.
- Swan, D.; Brown, D.M.; Coligado, M.C. (1981). Leaf emergence rates of corn (*Zea mays* L.) as affected by temperature and photoperiod. *Agric. Meteorol.* 24:57-73.
- Taylor, H.M.; Jordan, W.R.; Sinclair, T.R. (1983). (eds.). Limitations to efficient water use in crop production. ASA, CSCA, SSSA, Madison, Wis, USA.

- Tanner, C.B. & Sinclair, T.R. (1983). Efficient water use of crop production. *In* Taylor *et al.* (eds).
- Thomas, A.B. & Fukai, A.C. (1995). Growth and Yield Response of Barley and Chickpea to Water Stress Under Three Environments in Southeast Queensland. I. Light Interception, Crop Growth and Grain Yield. *Austr. J. Agric. Res.* **46**: 19-
- Trabaud, Louis & Methy, Maurice (1994). Tolérance aux stress thermiques des feuilles et aire de répartition de *Quercus Ilex*. *Ecologia Mediterranea XX (1-2)*: 77-85.
- Tyree, M.T. & Sperry, J.S. (1989). Vulnerability of Xylem to Cavitation and Embolism. *Ann. Rev. Plant Physiol. Molec. Bio.* **40**: 29-38.
- Vaux, H.J. Jr, & Pruitt, W.O. (1983). Crop-water production functions. *Advances in Irrigations*. Vol 2: 61-97.
- Wardlaw, I.F. & Moncur, L. (1995). The response of wheat to high temperature following anthesis. I. The rate and duration of kernel filling. *Aust. J. Plant Physiol.* **22**: 391-397.
- Williams, J.R.; Jones, C.A.; Kiniry, J.R.; Spanel, D.A. (1989). The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE.* **32(2)**: 497-511.
- Whitfield, D.M. (1990). Canopy conductance, carbon assimilation and water use in wheat. *Agric. Forest Meteor.* **53**:1-18.
- Yamane, T. (1973). *Statistics: An Introductory Analysis*. (3th ed.). Harper & Row Publ. N.Y.

ANEXOS

Os anexos apresentados são amostras dos casos exemplificados. Para que a informação saísse mais concisa, procuraram-se datas comparáveis, para se apreciar diferentes parâmetros.

	Página
Potencial de água no solo e seus componentes durante um intervalo de rega.	xiii
Humidade no solo (teor volumétrico) no tratamento R ₅₀₀ .	xiv
Humidade no solo, em R ₅₀₀ , e variação do armazenamento antes, imediatamente depois e ao longo do intervalo de rega.	xv
Humidade no solo, antes e depois da rega em R ₅₀₀ e em R ₆₀₀ (comparar)	xvi xvii
Informação microclimática para cálculo de ETo mensal, com o programa CropWat (Smith, 1992) e para cálculo diário (preparada em folha de cálculo electrónica)	xviii
Condutância (g_s) e resistência (r_{ec}) estomáticas. Nota: mede-se g_m e, por ponderação pela luz (g_{mp}) e pelo índice de área a_j (folha "j")/AU(solo), chega-se a g_{s-j} . Somam-se os g_{s-j} e tem-se g_s da planta e $r_{ec} = g_s^{-1}$; a resistência do coberto é $r_c = 2 * r_{ec} / LAI$. (LAI = 5.0)	xix
Perfil da resistência foliar (r_{ec}) de uma planta, em que a resistência é apresentada em função da luz (PAR), plena disponibilidade hídrica no solo.	xx

Potencial de água no solo e componentes antes e depois da rega

Potencial gravimétrico (hPa)											
Tratamento		Profundidade (cm)				Regimes de rega					
		30	60	90	120						
	1	-46	-73	-111	-123	R500					
	2	-44	-79	-93	-117	R500*					
	3	-35	-66	-102	-117	R400*					
	4	-44	-83	-102	-123	R600					
	5	-44	-68	-101	-123	R400					
Potencial matricial (hPa)						Potencial Total (hPa)					
Data	Tratamento	Profundidade (cm)				Data	Tratamento	Profundidade (cm)			
		30	60	90	120			30	60	90	120
17-jul	1					17-jul	1	-	-	-	-
	2		-779	-427	-135		2	-	-858	-520	-252
	3		-107	-180	-139		3	-	-173	-282	-256
	4						4	-	-	-	-
	5	0	-565	-254			5	-44	-633	-355	-
Potencial matricial (hPa)						Potencial Total (hPa)					
Data	Tratamento	Profundidade (cm)				Data	Tratamento	Profundidade (cm)			
		30	60	90	120			30	60	90	120
19-jul	1	-793	-702	-351		19-jul	1	-839	-775	-462	-
	2	-826	-797	-806	-146		2	-870	-876	-899	-263
	3		-187	-160	-143		3	-	-253	-262	-260
	4	-675	-143	-103			4	-719	-226	-205	-
	5		-607	-262			5	-	-675	-363	-
Potencial matricial (hPa)						Potencial Total (hPa)					
Data	Tratamento	Profundidade (cm)				Data	Tratamento	Profundidade (cm)			
		30	60	90	120			30	60	90	120
20-jul	1		-741	-456		20-jul	1	-	-814	-567	-
	2		-812	-557	-160		2	-	-891	-650	-277
	3		-252	-187	-144		3	-	-318	-289	-261
	4	-796	-169	-107			4	-840	-252	-209	-
	5	-597	-669	-300			5	-641	-737	-401	-
Potencial matricial (hPa)						Potencial Total (hPa)					
Data	Tratamento	Profundidade (cm)				Data	Tratamento	Profundidade (cm)			
		30	60	90	120			30	60	90	120
21-jul	1	-786	-768	-488		21-jul	1	-832	-841	-599	-
	2	-802	-799	-574	-167		2	-846	-878	-667	-284
	3		-448	-202	-151		3	-	-514	-304	-268
	4	-291	-107	-118			4	-335	-190	-220	-
	5		-707	-338			5	-	-775	-439	-
Potencial matricial (hPa)						Potencial Total (hPa)					
Data	Tratamento	Profundidade (cm)				Data	Tratamento	Profundidade (cm)			
		30	60	90	120			30	60	90	120
22-jul	1	-799	-779	-502	-350	22-jul	1	-845	-852	-613	-473
	2	-810	-800	-599	-163		2	-854	-879	-692	-280
	3		-597	-196	-144		3	-	-663	-298	-261
	4	-255	-123	-110	-115		4	-299	-206	-212	-238
	5	-807	-711	-319	-162		5	-851	-779	-420	-285
Potencial matricial (hPa)						Potencial Total (hPa)					
Data	Tratamento	Profundidade (cm)				Data	Tratamento	Profundidade (cm)			
		30	60	90	120			30	60	90	120
23-jul	1	-826	-812	-556	-425	23-jul	1	-872	-885	-667	-548
	2		-828	-645	-175		2	-	-907	-738	-292
	3		-710	-220	-151		3	-	-776	-322	-268
	4	-440	-153	-121	-122		4	-484	-236	-223	-245
	5	-846	-749	-371	-178		5	-890	-817	-472	-301

Humidade no solo

Tratamento R500

Data	Profundidade (cm)	Humidade no Solo				Desvio Padrão
		(%)				
		I	II	III	Média	
12-jul	10	10.10	13.57	12.26	12.0	1.75
<i>Antes da rega</i>	20	10.21	14.07	12.46	12.2	1.94
	30	14.84	19.12	14.37	16.1	2.62
	40	16.52	21.09	16.62	18.1	2.61
	50	18.41	22.21	17.04	19.2	2.68
	60	21.71	23.02	20.03	21.6	1.50
	70	23.37	24.05	23.42	23.6	0.38
	80	23.30	25.36	23.49	24.1	1.14
	90	24.28	24.75	23.42	24.2	0.67
	100	24.75	24.61	24.24	24.5	0.27
	110	25.61	25.70	24.77	25.4	0.51
	120	25.27	25.45	24.70	25.1	0.39
	130	25.13	25.08	24.68	25.0	0.25
	140	25.31	24.84	25.83	25.3	0.49
	150	25.36	24.92	25.27	25.2	0.23
	160	26.04	25.11	25.70	25.6	0.47
	14-jul	10	15.47	22.15	19.81	19.1
<i>Depois da rega</i>	20	14.20	20.71	20.84	18.6	3.80
	30	16.29	26.73	23.55	22.2	5.35
	40	17.41	26.48	22.46	22.1	4.54
	50	19.94	24.86	19.47	21.4	2.99
	60	22.21	24.08	20.78	22.4	1.65
	70	23.24	24.24	23.12	23.5	0.62
	80	23.12	25.27	23.68	24.0	1.12
	90	24.75	24.55	23.84	24.4	0.48
	100	24.36	24.98	24.33	24.6	0.37
	110	25.92	25.36	24.19	25.2	0.88
	120	25.76	25.48	24.47	25.2	0.68
	130	25.41	24.70	25.13	25.1	0.35
	140	25.64	25.27	25.13	25.3	0.27
	150	25.73	24.61	25.45	25.3	0.58
	160	25.73	25.05	25.52	25.4	0.35
	20-jul	10	8.87	14.70	10.01	11.2
<i>Antes da rega</i>	20	10.35	14.29	10.44	11.7	2.25
	30	14.99	18.02	14.55	15.9	1.89
	40	15.70	19.80	17.08	17.5	2.08
	50	18.02	20.27	17.13	18.5	1.62
	60	20.69	22.31	20.24	21.1	1.08
	70	22.02	23.55	24.02	23.2	1.04
	80	23.27	24.87	22.85	23.7	1.06
	90	24.07	24.30	24.24	24.2	0.12
	100	24.93	25.08	24.37	24.8	0.38
	110	25.31	25.59	24.96	25.3	0.31
	120	25.74	25.01	24.87	25.2	0.47
	130	25.05	25.17	24.87	25.0	0.16
	140	25.05	25.10	25.19	25.1	0.07
	150	25.24	25.40	25.83	25.5	0.31
	160	25.92	23.97	25.24	25.0	0.99

Humidade no solo (cm³/cm³) (média e variação entre depois e antes da rega)

Tratamento R500

Profundidade	A 19-jun		B 22-jun		C 29-jun		D 3-jul		E 12-jul		F 14-jul		G 20-jul		H 24-jul		I 28-jul		J 31-jul		K 4-ago		L 7-ago					
	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.	Média	Acum.		
10	3,2	3	17,0	17	11,9	12	18,2	18	12,0	12	19,1	11	11,2	11	12,5	12	8,3	8	14,5	15	9,5	10	16,1	16	10,7	20		
20	10,2	13	17,0	34	13,7	26	18,4	37	12,2	24	18,6	23	11,7	23	12,7	25	9,6	18	15,0	30	10,7	20	16,1	32	10,7	20		
30	13,7	27	21,3	55	17,9	44	22,2	59	16,1	40	22,2	60	15,9	39	15,9	41	14,2	32	17,3	47	15,5	36	19,9	52	15,5	36		
40	16,5	44	21,2	76	19,5	63	22,4	81	18,1	58	22,1	82	17,5	56	17,4	48	16,2	48	17,8	65	16,0	52	19,1	71	16,0	52		
50	19,0	62	21,2	98	21,2	84	22,4	104	19,2	78	21,4	103	18,5	75	18,6	57	17,4	66	18,2	83	17,5	69	18,9	90	17,5	69		
60	21,3	84	21,8	120	22,7	107	23,3	127	21,6	99	22,4	126	21,1	96	20,6	98	20,0	86	20,3	103	19,8	89	20,2	110	19,8	89		
70	22,9	107	23,1	143	23,6	131	24,0	151	23,6	123	23,5	149	23,2	119	22,3	120	21,7	107	21,8	125	21,5	111	21,8	132	21,5	111		
80	24,0	131	23,9	167	24,5	155	24,7	176	24,1	147	24,0	173	23,7	143	23,3	143	23,0	130	23,0	148	22,6	133	22,4	155	22,6	133		
90	24,0	155	23,9	190	24,8	180	24,8	200	24,2	171	24,4	198	24,2	167	23,9	167	23,6	154	23,9	172	23,2	156	23,0	178	23,2	156		
100	24,6	179	24,8	215	25,0	205	24,9	225	24,5	196	24,6	222	24,8	192	24,4	192	24,6	178	24,6	196	24,2	180	23,6	201	24,2	180		
110	25,1	204	25,4	241	25,8	231	25,4	251	25,4	221	25,2	247	25,3	217	24,7	216	24,7	203	25,4	222	24,2	204	24,2	225	24,2	204		
120	25,3	230	25,5	266	25,6	256	25,8	276	25,1	246	25,2	273	25,2	242	25,1	241	25,3	228	24,9	247	24,8	229	25,0	250	24,8	229		
130	25,4	255	25,3	291	25,3	282	25,7	302	25,0	271	25,1	298	25,0	267	26,0	268	25,6	254	25,8	272	25,0	254	24,9	275	25,0	254		
140	25,0	280	25,3	317	26,0	307	25,5	328	25,3	296	25,3	323	25,1	292	25,4	293	25,2	279	25,2	298	24,8	279	25,3	301	24,8	279		
150	25,1	305	25,8	343	25,6	333	25,7	353	25,2	322	25,3	348	25,5	318	25,1	318	25,3	305	25,5	323	25,0	304	24,8	325	25,0	304		
160	25,2	330	25,4	368	25,8	359	25,8	379	25,6	347	25,4	374	25,0	343	25,5	344	25,8	330	25,7	349	24,9	329	25,0	350	24,9	329		
160	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37	0	37

Àgua no solo antes (12/7) e depois (14/7) da rega

Tratamento R500

Tratamento : 1 - TIV		R500		DR		14/07/1995			
AR		12/07/1995				HUMIDADE ACTUAL			
PROFUNDIDADE (cm)	HUMIDADE ACTUAL VOLUMÉTRICA (%)	DÉFICE HIDRÍCO ACUMULADO (mm)	RESERVA ÚTIL UTILIZADA (%)	RESERVA U.U. ACUMULADA (%)	DÉFICE HIDRÍCO (mm)	DÉFICE ACUMULADO (mm)	RESERVA ÚTIL UTILIZADA (%)	RESERVA U.U. ACUMULADA (%)	
10	11.98	17.13	100.55	100.55	9.97	9.97	58.49	58.49	
20	12.25	16.67	100.87	102.26	10.34	20.30	62.53	61.41	
30	16.11	12.35	76.12	94.85	6.27	26.57	38.64	54.60	
40	18.08	9.92	67.55	95.43	5.88	32.45	40.04	55.23	
50	19.22	14.13	80.33	79.83	11.93	44.38	67.80	50.46	
60	21.59	12.97	77.95	83.31	12.21	56.58	73.35	56.67	
70	23.61	11.27	63.44	75.97	11.35	67.93	63.91	54.64	
80	24.05	12.42	72.38	77.84	12.45	80.39	72.56	58.56	
90	24.15	12.32	71.78	77.17	12.09	92.48	70.47	59.88	
100	24.53	11.94	69.56	76.41	11.91	104.39	69.42	60.83	
110	25.36	11.11	64.73	75.35	11.31	115.70	65.93	61.30	
120	25.14	11.33	66.02	74.57	11.23	126.94	65.46	61.64	
130	24.96	11.51	67.08	73.99	11.39	138.33	66.39	62.01	
140	25.33	11.14	64.93	73.35	11.13	149.46	64.84	62.21	
150	25.18	11.29	65.79	72.84	11.20	160.66	65.30	62.42	
160	25.62	10.85	63.24	72.24	11.04	171.70	64.31	62.54	

Água no solo antes (AR) e depois (DR) da rega

Tratamento R600

PROFUNDIDADE (cm)	13/07/1995				17/07/1995					
	AR		R600		DR		RESERVA U.U.			
	HUMIDADE ACTUAL VOLUMÉTRICA (%)	DÉFICE HIDRÍCO (mm)	DÉFICE HIDRÍCO ACUMULADO (mm)	RESERVA ÚTIL UTILIZADA (%)	RESERVA U.U. ACUMULADA (%)	HUMIDADE ACTUAL VOLUMÉTRICA (%)	DÉFICE HIDRÍCO (mm)	DÉFICE HIDRÍCO ACUMULADO (mm)	RESERVA ÚTIL UTILIZADA (%)	RESERVA U.U. ACUMULADA (%)
10	16.05	13.06	13.06	76.64	76.64	16.54	12.57	12.57	73.79	73.79
20	16.75	12.17	25.23	73.62	76.32	18.24	10.68	23.25	64.61	70.34
30	20.97	7.49	32.72	46.21	67.25	22.41	6.05	29.30	37.27	60.21
40	23.28	4.72	37.45	32.15	63.73	24.40	3.60	32.90	24.49	55.99
50	24.26	9.09	46.54	51.67	52.91	24.74	8.61	41.51	48.97	47.20
60	24.55	10.01	56.54	60.13	56.63	24.79	9.77	51.28	58.72	51.37
70	25.20	9.68	66.22	54.49	53.26	24.60	10.28	61.57	57.91	49.52
80	24.67	11.80	78.02	68.78	56.83	25.20	11.27	72.83	65.66	53.06
90	25.34	11.13	89.15	64.84	57.72	25.45	11.02	83.86	64.24	54.30
100	25.40	11.07	100.22	64.51	58.40	25.98	10.49	94.35	61.12	54.98
110	25.70	10.77	110.99	62.79	58.80	26.04	10.43	104.78	60.79	55.51
120	25.76	10.71	121.70	62.39	59.10	26.01	10.46	115.24	60.97	55.96
130	25.66	10.81	132.51	62.99	59.40	26.03	10.44	125.68	60.85	56.34
140	26.31	10.16	142.67	59.21	59.39	25.96	10.51	136.19	61.25	56.69
150	25.58	10.89	153.56	63.48	59.66	25.96	10.51	146.71	61.26	57.00
160	26.04	10.43	163.99	60.76	59.73	25.75	10.72	157.42	62.44	57.34

MÉDIAS MÁX MÍN	FOLHA PARA CROPWAT			15:30 h solar			Densidade de ar (ρ)			Densidade de ar (ρ _a)			MJ/kg			n	N	n/N	Lang Avor/ por ao Sol	Distanc./ Terra Sol	Dia Juliano(J)	Dist Sol (rad)	Reat E.T. Rs	Reat E.T. Ra	R _s (0.75 Ra)	R _s (1-nob)	R _s (1-nob)	R _s (1-nob)			
	Tmax	Tmin	Tmid	Ts	Ts-Tw	es(Ts)	100PHR	PHR	Humed	DVP	Densidade de ar (ρ)	Densidade de ar (ρ _a)	Lambda	G(L+D)	D(G+D)														Vento km/h	Vento m/s	Lang Avor/ por ao Sol
26.44	12.40	10.47	17.77	8.23	3.32	41.46	38.28	61.13	2.11	1.15	0.20	2.44	0.24	0.76	9.87	13.30	2.22	2.09	0.98	138.50	0.33	35.60	26.70	1.87	22.19	1.87	22.19	1.87	22.19		
27.05	14.41	20.71	17.13	8.86	3.40	46.11	41.59	63.11	2.16	1.14	0.20	2.44	0.24	0.76	12.00	11.90	2.32	3.02	0.98	126.50	0.29	31.71	23.78	3.40	16.56	3.40	16.56	3.40	16.56		
24.81	11.96	19.28	17.13	8.98	3.06	44.10	43.40	62.70	1.73	1.15	0.18	2.44	0.26	0.75	10.40	13.90	2.36	0.54	0.98	136.50	0.33	32.10	24.09	1.20	20.26	1.20	20.26	1.20	20.26		
27.60	10.97	19.28	17.46	8.77	3.43	39.38	34.44	56.74	2.35	1.15	0.20	2.44	0.23	0.77	6.33	14.44	2.02	-0.82	0.97	146.00	0.37	43.52	32.64	0.44	29.88	0.44	29.88	0.44	29.88		
28.19	13.88	21.02	18.41	7.59	3.47	48.44	41.18	60.45	1.85	1.14	0.20	2.44	0.23	0.77	8.22	13.54	1.98	-2.51	0.97	162.10	0.38	16.50	12.37	1.89	9.54	1.89	9.54	1.89	9.54		
30.80	13.58	22.19	18.72	8.07	3.67	41.20	36.38	63.65	2.43	1.14	0.21	2.44	0.23	0.78	7.10	12.80	1.93	-0.72	1.10	167.50	0.40	12.82	9.69	1.10	6.83	1.10	6.83	1.10	6.83		
26.23	12.25	19.24	17.62	8.84	3.11	47.90	42.53	62.50	1.64	1.15	0.15	2.44	0.26	0.78	6.20	16.00	2.20	-3.82	1.92	167.50	0.41	19.41	14.55	0.30	13.63	0.30	13.63	0.30	13.63		
27.36	16.23	21.79	25.69	6.69	3.40	51.88	45.52	65.74	1.74	1.14	0.20	2.44	0.24	0.78	8.93	11.38	1.75	-2.95	1.37	167.36	0.33	17.24	12.93	3.89	8.02	3.89	8.02	3.89	8.02		
28.13	14.02	21.07	25.98	7.53	3.46	46.89	41.47	60.63	1.84	1.14	0.20	2.44	0.23	0.77	8.81	13.39	1.96	-2.50	1.43	162.12	0.38	16.52	12.39	1.76	9.49	1.76	9.49	1.76	9.49		
32.47	14.80	23.64	31.31	20.53	4.78	34.50	31.30	50.08	3.27	1.13	0.27	2.43	0.19	0.81	8.45	16.18	2.39	0.93	1.91	208.05	0.37	39.83	25.44	0.72	24.39	0.72	24.39	0.72	24.39		
27.81	14.67	21.24	28.88	19.18	7.68	45.80	40.02	58.90	1.89	1.14	0.21	2.44	0.22	0.78	7.50	17.00	2.38	-0.68	1.41	167.50	0.39	27.89	20.98	1.60	19.59	1.60	19.59	1.60	19.59		
34.07	15.08	24.58	33.37	21.04	12.33	5.38	30.10	28.39	45.65	3.80	1.13	0.30	2.42	0.18	0.82	5.40	14.00	1.88	-0.68	1.33	167.50	0.37	43.00	31.00	0.20	32.36	0.20	32.36	0.20	32.36	
35.26	14.93	25.10	34.13	21.01	13.12	5.61	29.84	25.17	47.14	4.12	1.13	0.31	2.42	0.17	0.83	9.55	13.41	2.23	-0.38	1.55	208.00	0.35	32.82	24.47	0.36	23.31	0.36	23.31	0.36	23.31	
33.87	15.11	24.49	32.55	20.80	11.65	5.07	31.14	28.51	47.26	3.58	1.13	0.28	2.42	0.18	0.82	8.28	23.23	3.06	0.77	1.97	228.67	0.35	33.52	25.14	0.54	24.38	0.54	24.38	0.54	24.38	
31.33	14.23	22.78	29.63	20.50	9.13	4.25	35.90	36.40	50.56	2.75	1.14	0.24	2.43	0.20	0.80	11.50	13.30	2.41	0.74	1.45	218.50	0.34	31.50	23.63	0.90	22.28	0.90	22.28	0.90	22.28	
35.52	16.14	25.83	33.96	21.95	12.41	5.49	29.90	26.27	45.95	3.93	1.12	0.30	2.42	0.17	0.83	8.80	40.40	4.78	0.81	-0.24	1.78	228.50	0.34	29.15	21.88	0.00	21.88	0.00	21.88	0.00	21.88
34.76	14.95	24.85	34.05	20.95	13.40	5.46	27.73	23.95	45.08	4.05	1.13	0.30	2.42	0.17	0.83	4.55	18.00	1.98	0.68	1.24	268	0.38	39.89	29.92	0.73	29.00	0.73	29.00	0.73	29.00	
27.44	11.49	19.72	17.29	8.75	3.86	34.20	31.33	48.31	2.48	1.15	0.20	2.44	0.25	0.75	12.38	16.11	2.76	0.72	1.35	260.67	0.37	30.93	23.57	1.20	20.03	1.20	20.03	1.20	20.03		
28.39	15.01	21.70	28.70	19.78	7.95	3.59	44.27	35.77	29.23	2.08	1.14	0.21	2.44	0.23	0.77	12.84	19.55	3.12	-0.13	1.18	250.00	0.36	22.63	20.62	1.40	16.88	1.40	16.88	1.40	16.88	
25.74	10.95	18.35	24.80	16.55	6.35	3.71	38.45	32.82	29.22	1.16	0.19	0.24	2.44	0.24	0.76	15.18	17.91	3.21	0.49	1.51	281.00	0.36	36.58	27.43	1.84	22.30	1.84	22.30	1.84	22.30	
29.70	9.50	19.10	29.51	16.54	12.98	4.19	19.89	19.00	35.88	3.95	1.15	0.21	2.44	0.28	0.71	9.25	10.88	1.95	0.49	1.37	271.00	0.35	33.58	22.67	0.56	21.11	0.56	21.11	0.56	21.11	
27.28	11.53	19.40	25.25	17.74	7.50	3.28	45.89	46.98	64.08	1.88	1.15	0.19	2.44	0.24	0.74	14.81	14.81	2.17	-0.15	1.75	289.99	0.37	28.81	20.64	1.38	16.76	1.38	16.76	1.38	16.76	
28.25	11.33	19.79	25.71	18.18	7.53	3.37	44.42	35.77	29.23	2.08	1.14	0.21	2.44	0.23	0.77	7.45	13.56	1.82	0.61	1.18	281.00	0.36	21.10	16.17	1.20	13.03	1.20	13.03	1.20	13.03	
27.74	11.53	18.63	25.77	17.92	7.85	3.39	44.45	39.64	61.00	1.97	1.15	0.20	2.44	0.23	0.77	3.18	14.18	1.82	-2.11	2.88	1.01	297.00	0.38	30.86	22.99	1.18	18.69	1.18	18.69	1.18	18.69
25.66	11.72	18.79	24.26	17.13	7.12	3.09	48.81	42.81	97.49	1.73	1.15	0.18	2.44	0.25	0.75	12.00	17.87	2.90	0.20	1.50	231.07	0.35	34.86	22.75	1.75	19.57	1.75	19.57	1.75	19.57	

Resumo de valores da condutância foliar (g_{s_j}) ao fluxo de vapor de água, por planta e por folha, dois dias após uma rega. Data de medição: 27/3/95, ao meio-dia solar em condições de plena disponibilidade de água no solo. a_j/AU = índice de área da folha (j) em relação ao compasso (937.50 cm²). A área da folha = 0.75*Largura*Comprimento.

Folha/ Planta	g_m [mmol m ⁻² s ⁻¹]	g_{mp} [mmol m ⁻² s ⁻¹]	$2 * g_{mp}$ [mmol m ⁻² s ⁻¹]	a_j/AU []	g_{s_j} [mmol m ⁻² s ⁻¹]
5	35.10	25.70	51.39	0.47	24.11
7	116.00	118.98	237.97	0.43	102.80
9	146.00	215.21	430.42	0.42	182.84
11	123.33	183.07	366.13	0.33	119.51
12	64.65	30.79	61.58	0.25	15.17
13	155.50	238.50	477.00	0.15	70.79
Planta1	640.58	812.25	1624.50		515.23
7	140.58	249.44	498.89	0.43	215.52
8	76.38	106.67	213.35	0.44	93.70
10	87.58	142.65	285.30	0.37	104.19
12	65.23	158.93	317.87	0.25	78.32
Planta2	369.78	657.70	1315.41		491.74
7	68.27	102.57	205.14	0.62	128.01
9	115.17	260.77	521.53	0.62	321.26
10	107.75	220.53	441.06	0.56	246.99
11	77.50	147.83	295.67	0.50	149.02
14	67.65	168.87	337.73	0.21	69.71
Planta3	436.33	900.57	1801.13		914.99
4	11.09	0.93	1.87	0.49	0.91
5	80.92	86.40	172.81	0.75	129.40
7	128.17	101.74	203.48	0.62	126.32
8	79.18	58.67	117.34	0.62	72.66
9	157.53	221.78	443.55	0.58	255.49
11	101.83	89.92	179.84	0.34	61.43
Planta4	558.72	559.44	1118.89		646.21
7	66.52	54.73	109.45	0.50	54.51
8	47.30	68.94	137.88	0.36	49.42
9	63.50	105.49	210.98	0.25	53.67
11	54.00	97.61	195.22	0.07	12.99
Planta5	231.32	326.77	653.53		

Tomando todas as plantas, a condutância foliar média da planta é $g_s = 547.75$ [mmol m⁻² s⁻¹], ou 0.0142 [m s⁻¹], e $r_{ec} = 70.36$ [s m⁻¹]. Para LAI = 5.0, $r_c = 28.14$ [s m⁻¹].

Perfil da resistência foliar (r_{ec}) de uma planta, em que a resistência é apresentada em função da luz (PAR), no ponto de medição e segundo a orientação natural da folha, ao longo das duas páginas foliares.

A densidade de fluxo quântico incidente: PAR = 1850 [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; condições "ambientais" no sistema de medição: HR = 40%; $T_a = 37$ [$^{\circ}\text{C}$]; $T_f - T_a = -0.71$ [$^{\circ}\text{C}$]. Medições a 27/7/95 às 14:45 - 15:09 [h].

Planta10

Folha (base-topo)	r_{ec} [s m^{-1}]	PAR [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$]
2	5800	57
	1790	37
	2460	39
4	1940	42
	1910	54
	1030	59
6	550	65
	8100	76
	1780	28
8	580	133
	810	188
	1070	139
10	173	810
	335	151
	420	173
12	67	165
	930	199
	495	148
14	87	182
	116	510
	61	510
16	1370	188
	500	430
	114	640
17	272	920
	71	1660
	224	1850
18	320	385
	120	810
	206	1040

