

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

**Estudo das perdas de água
por transpiração em povoamentos
adultos de *Eucalyptus globulus* Labill
e de *Pinus pinaster* Aiton**

Fernando Manuel Leite Pereira

MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL

LISBOA, 1994

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA
INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA

**Estudo das perdas de água
por transpiração em povoamentos
adultos de *Eucalyptus globulus* Labill
e de *Pinus pinaster* Aiton**

Fernando Manuel Leite Pereira

MESTRADO EM PRODUÇÃO VEGETAL

LISBOA, 1994

Este trabalho foi expressamente elaborado como dissertação original para efeitos de obtenção do grau de Mestre em Produção Vegetal, sendo apresentado no Instituto Superior de Agronomia. Toda a orientação e colaboração recebidas são mencionadas.

Agradecimentos

Desejamos expressar o nosso sincero reconhecimento a todos quantos, de algum modo, contribuíram para a realização deste trabalho. Em particular agradecemos:

- Ao Prof. Jorge Soares David pelos conhecimentos que nos transmitiu, pela orientação e apoio que sempre nos facultou e pela cuidada revisão do manuscrito;

- À Eng.^a Fernanda Valente pela disponibilidade constante e pelo auxílio que nos prestou em diversas ocasiões, bem como pelo conjunto de dados micro-meteorológicos que nos facultou;

- Aos Profs. João Santos Pereira e Manuel Madeira pelo apoio prestado no delineamento e na realização dos trabalhos nos domínios de, respectivamente, ecofisiologia e solo;

- Aos Drs. John Roberts e John Gash do *Institute of Hydrology* (Grã-Bretanha) pelas valiosas sugestões, comentários e troca de impressões que nos proporcionaram;

- Ao Eng. José Tomé por toda a informação facultada e pela valiosa ajuda no trabalho de porometria;

- Ao Eng. Manuel Osório Henriques pelo trabalho de programação que possibilitou o cálculo diário da evapotranspiração de referência;

- Ao Sr. Joaquim Mendes por toda a dedicação demonstrada e pelo incansável apoio que nos prestou durante a realização de todo o trabalho experimental;

- Ao André G. M. Claassen, da Universidade de Wageningen, pela colaboração prestada no trabalho de porometria;
- Aos Srs. Albino Rodrigues e Miguel Cotrim e à Sra. Iolanda de Brito pela colaboração prestada em diversas fases da parte experimental e controlo contabilístico;
- Ao Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia pelas facilidades concedidas e pelos meios disponibilizados;
- À Escola Superior Agrária de Castelo Branco pelas facilidades concedidas para a realização deste trabalho;
- Ao Eng. Rui Monteiro pelo auxílio no arranjo gráfico do documento final e pela disponibilização dos meios informáticos do Centro de Recursos da E.S.A.C.B. e ao Sr. Manuel Salvado pelo arranjo das ilustrações e reprodução deste documento;
- À Companhia das Lezírias e à Portucel pela disponibilização das suas matas para a realização deste trabalho.

A realização deste trabalho só foi possível através do financiamento concedido pela Comunidade Económica Europeia através da Direcção Geral XII (no âmbito do contrato nº STEP - CT90-0041) e pelo Governo Português através da Junta Nacional de Investigação Científica (no âmbito do projecto nº PMCT/C/AGR/138/90).

Resumo

O presente estudo foi realizado com o objectivo de quantificar as perdas de água por transpiração em dois povoamentos adultos de eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) e de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Aiton).

A estimativa destas perdas foi feita recorrendo a dois métodos distintos: o *balanço de água no solo* e a *equação de Penman-Monteith*. Para o eucalipto esta equação foi aplicada considerando o coberto representado, quer através de um modelo unilaminar, quer através de um modelo multilaminar.

Os resultados obtidos indicam que, em qualquer dos povoamentos, a transpiração está sobretudo dependente da disponibilidade de água no solo, tendo-se verificado que a transpiração acumulada ao longo dos anos de 1992 e 93 é muito próxima do valor da precipitação efectiva no mesmo período.

As taxas de transpiração no eucaliptal estimadas pelos modelos uni e multilaminar não revelaram diferenças significativas entre si pelo que se poderá aceitar que, em cobertos esparsos, como é o caso do eucaliptal, a transpiração pode ser adequadamente estimada através do modelo unilaminar.

A realização de medições de condutância estomática revelou que ambas as espécies apresentam padrões de variação horária e sazonal que traduzem a capacidade destas espécies em controlarem eficazmente as perdas de água por transpiração, quer quando aumenta a secura do ar, quer quando se reduz a humidade no solo.

Abstract

The study aims at estimating the transpiration losses in *Eucalyptus globulus* Labill and *Pinus pinaster* Aiton stands in central Portugal.

Water losses through transpiration were estimated by two different methods: the soil water balance and the Penman-Monteith equation. The latter was used in the eucalyptus stand considering both the *big leaf* and the multilayer approach.

Results show that in both stands and under the existing climatic conditions transpiration is mainly restricted by soil water availability thus reporting to 1992 and 1993 the cumulative transpiration follows closely on the cumulative net rainfall for the same period.

The estimates of the transpiration rates obtained by both the unilayer and the multilayer models do not differ significantly which means that transpiration in sparse canopies can be properly estimated using the *big leaf* model.

Through measurements of stomatal conductance both species have shown similar hourly and seasonal variations which reveal an effective control of transpiration losses as the soil dries up and the air humidity decreases.

Índice

Resumo
Abstract

Lista de figuras
Lista de quadros
Lista de símbolos

1. Introdução	1
2. Caracterização das áreas de estudo e da instrumentação utilizada	4
3. Método do balanço hidrológico	12
3.1. Descrição do método	12
3.2. Medição das variáveis envolvidas	14
3.2.1. Precipitação efectiva	14
3.2.2. Armazenamento de água no solo	15
3.2.2.1. O método neutrónico	15
3.2.2.2. Calibração do método neutrónico	17
3.2.2.3. Rede de tubos de acesso	20
3.3. Aplicação do balanço hidrológico	22
3.4. Resultados	26

4. Método de Penman-Monteith	29
4.1. A equação de Penman-Monteith	29
4.2. Modelo unilaminar para a transpiração	31
4.3. Modelo multilaminar para a transpiração	35
4.4. Aplicação dos modelos e o cálculo das taxas de transpiração	36
4.4.1. Condutância aerodinâmica	37
4.4.2. Condutância do coberto	37
4.4.3. Variáveis micrometeorológicas	41
4.5. Resultados	42
4.5.1. Pinhal	42
• Condutância estomática	42
• Transpiração	43
4.5.2. Eucaliptal	45
• Condutância estomática	45
• Transpiração	46
• O microclima no interior do copado	48
5. Discussão	50
• Eucaliptal	50
• Pinhal	57
• Valores acumulados da transpiração do eucaliptal e do pinhal	58
• Relações E/E_w vs. TRD	59
6. Conclusões	63
Bibliografia	66
Anexos	

Anexos

Anexo 1 - Caracterização dos solos locais e da instrumentação utilizada

Quadro A.1.1 - Perfis de densidade aparente no eucaliptal e no pinhal

Quadro A.1.2 - Principais características físico-químicas dos solos e dos materiais subjacentes

Quadro A.1.3 - Instrumentos e aparelhos instalados nas parcelas experimentais

Anexo 2 - Evolução temporal da humidade do solo e cálculo do balanço hidrológico

Fig. A.2.1 - Rede de tubos de acesso instalada na parcela experimental do eucaliptal

Fig. A.2.2 - Rede de tubos de acesso instalada na parcela experimental do pinhal

Fig. A.2.3 - Algoritmo para o cálculo da transpiração pelo método do balanço hidrológico

Quadro A.2.1 - Evolução temporal da humidade do solo no eucaliptal

Quadro A.2.2 - Evolução temporal da humidade do solo no pinhal

Quadros A.2.3 a A.2.6 - Cálculo do balanço hidrológico em 1992/93 nos dois povoamentos

Anexo 3 - Variação horária e diária da condutância estomática e das taxas de transpiração estimadas pela equação de Penman-Monteith

Quadro A.3.1 - Valores médios horários da condutância estomática no eucaliptal

Quadro A.3.2 - Valores médios horários da condutância estomática no pinhal

Quadro A.3.3 - Valores das principais variáveis envolvidas no cálculo das taxas de transpiração no eucaliptal através da equação de Penman-Monteith - modelo unilaminar

Quadro A.3.4 - Valores das principais variáveis envolvidas no cálculo das taxas de transpiração no eucaliptal através da equação de Penman-Monteith - modelo multilaminar

Quadro A.3.5 - Valores das principais variáveis envolvidas no cálculo das taxas de transpiração no pinhal através da equação de Penman-Monteith

Anexo 4 - Evapotranspiração de referência

Anexo 5 - Taxas de transpiração estimadas pelo balanço hidrológico e pela equação de Penman-Monteith

Quadro A.5.1 - Taxas diárias de transpiração estimadas, quer pelo balanço de água no solo, quer pela equação de Penman-Monteith através dos modelos uni e multilaminar.

Lista de Figuras

- Fig. 1.1** - Representação simplificada de uma planta (A) e da rede de resistências envolvidas no fluxo de água associado à transpiração (B), incluindo a resistência no solo, nas raízes, caule e folhas (adaptado de Jones, 1992). 2
- Fig. 2.1** - Localização das parcelas experimentais. 5
- Fig. 2.2** - Valores mensais de precipitação efectiva (P_e - barras) e evapotranspiração de referência (E_o - círculos) para o eucaliptal (▣) e para o pinhal (□), ao longo dos anos de 1992 e 1993. 6
- Fig. 2.3** - Valores médios mensais do défice de pressão de vapor (δ_a) e da temperatura do ar (T) no eucaliptal (—) e no pinhal (-----) ao longo de 1992 e 1993. Os valores apresentados referem-se às medições efectuadas no topo dos povoamentos. 7
- Fig. 2.4** - Variação em profundidade da densidade aparente (ρ_s) do solo no eucaliptal (—▲—) e no pinhal (—○—). 7
- Fig. 2.5** - Profundidade atingida pelos furos efectuados nos dois povoamentos e descrição da natureza dos materiais identificados até àquela profundidade. 8
- Fig. 2.6** - Instrumentos instalados no cimo da torre metálica localizada no eucaliptal. 9
- Fig. 2.7** - Partição da copa do eucaliptal em 3 estratos para aplicação do modelo multilaminar para a transpiração, indicando-se a localização dos psicrómetros adicionais (P2 e P3), instalados para a caracterização dos perfis de temperatura e humidade no interior da copa 10
- Fig. 3.1** - Elementos principais que constituem uma sonda de neutrões, representando-se o modo de utilização num tubo de acesso. (1) Painel de controlo, (2) unidade de contagem e armazenamento de dados, (3) tubo de acesso, (4) corpo da sonda no interior do qual se encontram o emissor de neutrões rápidos (5) e o detector de neutrões térmicos (6). (7) Cabo de ligação entre o corpo da sonda e a unidade de contagem. 16

- Fig. 3.2** - Rectas de calibração ajustadas, em ambos os povoamentos, para as diferentes regiões do solo. 19
- Fig. 3.3** - Variação em profundidade das contagens normalizadas observadas em diferentes situações de humidade do solo: (—○—) 31/08/93, (—△—) 27/10/93, (—◇—) 25/11/93, (—★—) 30/12/93. 24
- Fig. 3.4** - Humidade do solo em condições extremas nos dois povoamentos. Representam-se os perfis relativos à situação que se admite corresponder à capacidade de campo (—●—) e à situação de máxima secura do solo (—▲—). 26
- Fig. 3.5** - Evolução temporal da precipitação efectiva (P_e), do teor relativo de água disponível no solo (TRD) e das taxas de transpiração (E) estimadas pelo método do balanço hidrológico em ambos os povoamentos. 27
- Fig. 3.6** - Relação entre a razão E/E_0 e o TRD para os dois povoamentos, considerando períodos de secagem (▲) e de humedecimento (□) do solo. 28
- Fig. 3.7** - Transpiração (E) e precipitação efectiva (P_e) - valores acumulados ao longo dos anos de 1992 e 1993. 28
- Fig. 4.1** - Percursos para a água evaporada a partir da superfície de uma folha e representação das resistências que lhe estão associadas: resistência da cutícula (r_c), dos espaços intercelulares (r_i), das paredes celulares (r_w), dos estomas (r_s) e da camada limite da folha (r_b) (adaptado de Jones, 1992). 32
- Fig. 4.2** - Representação esquemática de um coberto vegetal. (A) O modelo unilaminar da folha gigante pode ser utilizado para representar simplificadaamente um coberto vegetal tendo em conta o seu índice de área foliar (IAF) e admitindo a possibilidade de determinar um valor médio para resistência estomática (adaptado de Rose, 1984). (B) O mesmo coberto pode ser representado através de modelos multilaminares que o consideram constituído por um conjunto de n estratos diferentes (adaptado de Shuttleworth, 1979). Em (C) representa-se o modelo multilaminar aplicado ao eucalipto. Para o estrato i , IAF_i é o respectivo índice de área foliar, r_{si} e r_{bi} são, respectivamente, as resistências estomática e da camada limite laminar do estrato e r_{avi} é a resistência à difusão turbulenta de vapor de água entre o estrato i e o estrato $i-1$. 34
- Fig. 4.3** - Porómetro utilizado nas medições de condutância estomática, tendo montada a câmara apropriada à realização de medições em folhas de eucalipto. 38
- Fig. 4.4** - Porómetro equipado com uma câmara cilíndrica para a realização de medições de condutância estomática em agulhas de pinheiro. 39
- Fig. 4.5** - Evolução horária da condutância estomática (gs) no pinhal durante alguns dias da Primavera de 1993. (—■—) 27/Março; (—□—) 15/Abril; (—◇—) 05/Junho; (—◇—) 12/Junho. 42

- Fig. 4.6** - Evolução horária típica da condutância estomática no pinhal ao longo do dia 12/06/93 em agulhas com 1 (\triangle), 2 (\square) e 3 (\circ) anos de idade. 43
- Fig. 4.7** - Variabilidade típica associada às médias horárias da condutância estomática (g_s) no pinhal ao longo do dia 12/06/93. As barras verticais representam $\pm 1s$. 43
- Fig. 4.8** - Transpiração no Pinhal em 12/06/93. Além do fluxo de calor latente (λE) resultante da transpiração, apresentam-se também, para o mesmo dia, os valores médios horários da energia líquida disponível no coberto ($R_n - G$), das condutâncias aerodinâmica (g_a) e do coberto (g_s), da temperatura (T) e do déficit de humidade específica do ar (DHE). 44
- Fig. 4.9** - Evolução horária da condutância estomática (g_s) no eucaliptal em alguns dias da Primavera de 1993: (\circ) 20/Março; (\square) 3/Abril; (\triangle) 19/Maio; (\blacksquare) 2/Junho; (\bullet) 16/Junho; (\blacktriangle) 26/Junho. 45
- Fig. 4.10** - Valores extremos (máximo e mínimo diários representados, respectivamente, por quadrados e por círculos) de condutância estomática (g_s) no eucaliptal. Aos valores máximos de condutância foi associado o teor relativo de água disponível no solo para as plantas que se verificava na altura. O símbolo (*) assinala os dias de céu nublado. 45
- Fig. 4.11** - Variabilidade associada às médias horárias da condutância estomática (g_s) no eucaliptal ao longo do dia 16/06/93. As barras verticais representam $\pm 1s$. 45
- Fig. 4.12** - Transpiração (λE_s) no eucaliptal em 16/06/93 estimada pelo modelo multilaminar. Para o mesmo dia apresentam-se também os valores médios horários da energia líquida disponível (R_n), da condutância do coberto (g_s), da temperatura (T) e do déficit de humidade específica do ar (DHE) para os estratos superior (\square), médio (\circ) e inferior (\triangle). 46
- Fig. 4.13** - Variação horária média do coeficiente de extinção para a radiação líquida no eucaliptal, considerando um índice de área foliar de 3.168. As barras verticais representam $\pm 1s$. 48
- Fig. 4.14** - Evolução horária média (A) da temperatura do ar (T) e (B) do déficit de pressão de vapor (δ_s) para os três estratos do copado do eucaliptal (\square estrato superior; \circ estrato médio; \triangle estrato inferior). 49
- Fig. 4.15** - Perfis verticais do déficit de pressão de vapor (δ_s) observados no eucaliptal em diferentes horas do dia 16/06/93. 49
- Fig. 5.1** - Transpiração (E_s) no eucaliptal e no pinhal estimada pelos métodos do balanço hidrológico (linhas) e de Penman-Monteith (modelo unilaminar) (pontos) durante 1993. 55

Lista de Quadros

- Quadro 2.1** - Principais características dos povoamentos estudados. 5
- Quadro 3.1** - Equações de calibração da sonda de neutrões obtidas por regressão linear através do método dos mínimos quadrados. As equações são do tipo $\theta_v = a + bC_n$, em que θ_v representa o teor volumétrico de água no solo e C_n o valor das contagens normalizadas fornecido pela sonda (s_a e s_b são, respectivamente, o desvio padrão dos coeficientes de regressão a e b , CV_b representa o coeficiente de variação de b , s^2 é a variância residual e R^2 o coeficiente de determinação). 20
- Quadro 3.2** - Constituição e características das redes de tubos de acesso implantadas. 21
- Quadro 3.3** - Escoamento verificado em 3 bacias hidrográficas experimentais. A bacia 1 está florestada com eucalipto de 9 anos de idade (Março de 1993; 3ª rotação), enquanto que a bacia 2 é ocupada por um eucaliptal de 1 ano (Julho de 1993; 4ª rotação), tendo sido efectuado, entre Maio e Julho de 1992, um corte raso no termo da 3ª rotação. A bacia 3 está ocupada por um povoamento de pinheiro bravo. Entre () apresentam-se as percentagens de P_g que os valores do escoamento representam (David e Henriques, em publicação). 23
- Quadro 4.1** - Valores adoptados para as relações entre os parâmetros de rugosidade (z_0 e d) e a altura (h) dos povoamentos de eucalipto (Campbell, 1977, cit. por Jones, 1992) e de pinheiro bravo (Jarvis *et al*, 1976). 32

Quadro 4.2 - Alguns aspectos relativos às condições de medição da condutância estomática e aos procedimentos de amostragem adoptados nos dois povoamentos estudados.	40
Quadro 4.3 - Taxas de transpiração no pinhal estimadas pela equação de Penman-Monteith. Os valores das taxas horárias referem-se à taxa horária média, bem como às taxas máxima e mínima observadas em cada dia.	43
Quadro 4.4 - Taxas de transpiração no eucaliptal estimadas pela equação de Penman-Monteith, através dos modelos uni e multilaminar. No modelo multilaminar, além das taxas de transpiração do coberto, apresentam-se ainda as taxas relativas aos diferentes estratos do copado. As taxas horárias e diárias são expressas, respectivamente, em mmh^{-1} e mmdia^{-1} .	47
Quadro 5.1 - Alguns valores de condutância estomática observados em diferentes espécies de eucaliptos e pinheiros. Todos os valores referidos que, originalmente, não se encontravam expressos nas unidades agora utilizadas foram convertidos tendo em conta a relação $40 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1} = 1 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ (estabelecida considerando uma temperatura de 25°C e a pressão atmosférica de 100 kPa).	52
Quadro 5.2 - Taxas de transpiração observadas em algumas espécies de eucaliptos e de pinheiros. São também referidos os valores da precipitação bruta anual (valores médios anuais ou valores observados nos anos em que decorreram os vários estudos) para cada local, bem como, o tipo de método utilizado na determinação das taxas de transpiração: (1) equação de Penman-Monteith (unilaminar), (1) equação de Penman-Monteith (multilaminar), (3) balanço hidrológico, (4) uso de marcadores, (5) lísimetria, (6) fluxo de seiva, (7) razão de Bowen, (8) método das árvores cortadas.	54

Lista de símbolos

A	Armazenamento de água num sistema aberto	mm
a	Coefficiente de regressão (<i>ordenada na origem</i>)	
b	Coefficiente de regressão (<i>declive da recta de regressão</i>)	
C	Taxa de contagem de neutrões térmicos índices: C_n taxa de contagem normalizada; C_p taxa de contagem no padrão	
CV	Coefficiente de variação índice: CV_b coeficiente de variação de b	
c_p	Calor específico do ar a pressão constante (=1005.553 Jkg ⁻¹ K ⁻¹ , a 20°C, quando apropriado)	Jkg ⁻¹ K ⁻¹
D	Drenagem em profundidade	mm
DHE	Défice de humidade específica do ar	gkg ⁻¹
d	Altura de deslocamento do plano de referência	m
E	Taxa de evaporação índices: E_0 evaporação de uma superfície de água livre; E_i transpiração; $E_{i,c}$ transpiração do estrato i do copado; E_{i0} evapotranspiração de referência	mmdia ⁻¹ ou mmh ⁻¹ ou mmano ⁻¹
E_a	<i>Poder de secagem do ar</i>	mmdia ⁻¹
e	Pressão de vapor de água índices: e_a pressão actual de vapor de água do ar; e_{sT} , e_{sT_d} , e_{sT_w} pressão de vapor saturante às temperaturas T , T_d e T_w , respectivamente	Pa

G	Densidade de fluxo de calor sensível para o solo	Wm^{-2}
g	Condutância índices: g_a aerodinâmica; g_c do coberto; g_s estomática; \bar{g}_s estomática média	$\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ou ms^{-1}
z	Altura da vegetação	m
I	Entradas de água num sistema aberto	mm
IAF	Índice de área foliar índice: IAF_i índice de área foliar do estrato i do copado	
k	Constante de von Karman (= 0.41)	
k	Coefficiente de extinção para a radiação líquida	
O	Saídas de água num sistema aberto	mm
P	Precipitação índices: P_g bruta; P_e efectiva (ou líquida); P_s sob-coberto	mm
p	Pressão atmosférica (= 101.3 kPa, a 0 m e a 20°C, quando apropriado)	Pa
Q_s	Escoamento superficial	mm
R^2	Coefficiente de determinação associado a uma equação de regressão	
R_n	Energia disponível no topo do coberto por unidade de área índices: R_{ni} no estrato i do copado	Wm^{-2}
R_{ne}	Energia disponível expressa como uma taxa equivalente de evaporação diária	mmdia^{-1}
r	Resistência índices: r_a aerodinâmica; r_{ai} aerodinâmica para o estrato i do copado; r_{ah} aerodinâmica para o calor sensível; r_{am} aerodinâmica para a quantidade de movimento; r_{av} aerodinâmica para o vapor de água; r_b da camada limite laminar; \bar{r}_b valor médio de r_b ; r_{bi} da camada limite laminar da folha ou do estrato i do copado; r_c do coberto; r_{ci} do estrato i do coberto; r_s estomática; \bar{r}_s estomática média; r_{si} estomática da folha ou do estrato i do copado; r_i dos espaços intercelulares; r_w das paredes celulares; r_{ct} da cutícula	$\text{m}^2\text{smmol}^{-1}$ ou sm^{-1}
S	Armazenamento de água no solo	mm
s^2	Variância residual	
s	Desvio padrão índices: s_a , s_b desvio padrão dos coeficientes de regressão a e b , respectivamente	

T	Temperatura índices: T_a do termómetro seco; T_w do termómetro molhado	K ou °C
TE	Escorrimento ao longo dos troncos	mm
TRD	Teor relativo de água disponível no solo para as plantas	
u	Velocidade horizontal do vento índice: u_z ao nível z acima da superfície	ms^{-1}
z	Distância na vertical a partir da superfície do solo	m
z_0	Altura de rugosidade	m
γ	Constante psicrométrica (= 66.770 PaK ⁻¹ , a 20°C, quando apropriado)	PaK ⁻¹
ε	Relação entre as massas moleculares do vapor de água e do ar seco (= 0.62192)	
Δ	Varição finita num dado intervalo de tempo	
Δ'	Declive da curva de pressão de vapor saturante em função da temperatura	PaK ⁻¹
δ_e	Défice de pressão de vapor da atmosfera índices: $\delta_{e(z)}$ ao nível z ; δ_{ei} ao nível do estrato i do copado	Pa
θ	Teor de água no solo índices: θ_w gravimétrico θ_v volumétrico; θ_{cc} à capacidade de campo; θ_m mínimo	$kgkg^{-1}$ m^3m^{-3}
λ	Calor latente de vaporização da água	Jkg ⁻¹
ρ	Densidade índices: ρ_a do ar; ρ_s densidade aparente (seca) do solo; ρ_w da água (= 998.2 kgm ⁻³ , a 20°C ou =1000 kgm ⁻³ , a 4°C, quando apropriado)	kgm ⁻³

1. Introdução

A evaporação da água à superfície do globo constitui uma das principais fases do ciclo hidrológico, através da qual, ao regressar à atmosfera, a água deixa de estar disponível para qualquer tipo de utilização a jusante. Este facto é de importância fundamental no planeamento e gestão dos recursos hídricos, tornando indispensável o conhecimento dos quantitativos de água evaporada em inúmeras situações. Seguramente que a evaporação a partir de superfícies cobertas com vegetação representa, entre essas situações, um caso de significativa importância o que justifica, por si só, todo o empenhamento que tem sido posto na quantificação das perdas de água por evaporação em cobertos vegetais, usualmente designadas por *evapotranspiração*. Infelizmente, a nossa capacidade actual para estimar a evapotranspiração, a uma escala regional e com exactidão, é limitada dadas as dificuldades em determinar valores médios para um conjunto de parâmetros (temperatura da superfície, resistência aerodinâmica ou a resistência do coberto, por exemplo) que controlam o fluxo de vapor de água entre a superfície e a atmosfera (Lhomme, 1992). Apesar destas limitações à escala regional, ao nível local (do povoamento ou da cultura, por exemplo) a determinação das taxas de evapotranspiração é menos difícil e, normalmente, suficientemente rigorosa, reconhecendo-se que, numa escala temporal suficientemente alargada, aquelas taxas traduzem a contribuição de três processos básicos - a evaporação a partir da superfície do solo, a evaporação da precipitação interceptada pelas plantas que constituem o coberto e a transpiração dessas plantas.

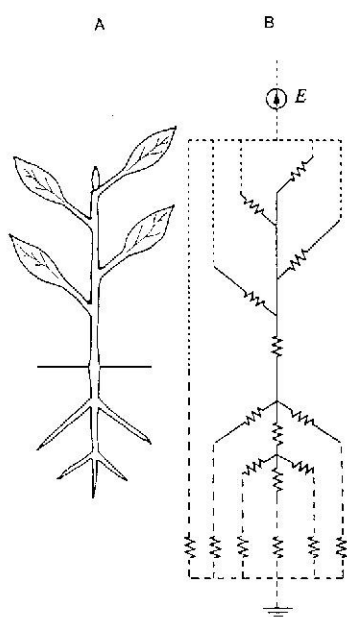


Fig. 1.1 - Representação simplificada de uma planta (A) e da rede de resistências envolvidas no fluxo de água associado à transpiração (B), incluindo a resistência no solo, nas raízes, caule e folhas (adaptado de Jones, 1992).

A contribuição relativa destes processos depende, por um lado, da quantidade de água disponível para evaporação e, por outro lado, do facto de o coberto se encontrar molhado ou enxuto (Ward e Robinson, 1990). Estando o coberto enxuto, o processo evaporativo dominante é a transpiração, ou seja, a libertação para a atmosfera de água através dos estomas das plantas o que envolve um fluxo de água mais ou menos constante desde o solo até à região da atmosfera imediatamente adjacente às folhas - *contínuo solo-planta-atmosfera*. Este fluxo segue um percurso relativamente complexo ao qual estão associadas diversas resistências, de valores variáveis consoante o “troço” do percurso considerado. De acordo com o sugerido originalmente por van den Honert em 1948 (Jones, 1992) aquele percurso pode ser representado, simplificadamente e por analogia com os sistemas eléctricos, através do esquema da Fig. 1.1.

Esta representação do processo transpiratório põe em evidência a importância que pode assumir o controlo fisiológico da transpiração, em particular o controlo exercido pelos estomas. No entanto, não são apenas os estomas que condicionam, do ponto de vista da planta, as perdas de água por transpiração uma vez que a possibilidade das plantas transpirarem, bem como as taxas a que a transpiração se processa, estão dependentes das características do sistema radicular, responsável pela utilização da água armazenada no solo (Dickinson *et al*, 1991). É precisamente a natureza do sistema radicular um dos aspectos que determinam que, dentro dos vários tipos de coberto vegetal, as florestas possam ser consideradas, numa base anual, grandes consumidoras de água por transpiração, uma vez que no caso dos cobertos arbóreos o sistema radicular, explorando uma região mais vasta do solo, tem naturalmente acesso a uma maior quantidade de água que pode ser utilizada no processo transpiratório (Alves *et al*, 1990).

Embora a transpiração contribua normalmente com a maior parcela para a perda total de água por evapotranspiração, no caso das florestas tem-se verificado que, numa escala anual, a quantidade de água transpirada tem valores relativamente constantes, independentemente da espécie e para uma grande variedade de locais (Dunin e Mackay, 1982; Roberts, 1983), sendo a perda por interceptação a principal responsável pelas diferenças observadas na evapotranspiração anual dos diferentes tipos de coberto vegetal com uma contribuição que pode variar, no caso das florestas, entre os 25 e os 75% das perdas totais por evapotranspiração (Valente, 1990).

A importância que as perdas por interceptação podem assumir nos cobertos arbóreos relaciona-se com outra característica particular das florestas que é a sua grande rugosidade aerodinâmica capaz de gerar e manter fenómenos de turbulência que constituem o principal processo de transferência, tanto de energia como de massa, entre o coberto e a atmosfera. Estes fenómenos asseguram a manutenção de um gradiente de tensão de vapor de água entre a superfície do coberto e a atmosfera circundante, fundamental para que a evaporação da água transpirada ou interceptada se possa manter a níveis elevados.

Os aspectos referidos salientam a importância dos cobertos vegetais como superfícies evaporantes realçando, em particular, a evapotranspiração das florestas. Em regiões onde os recursos hídricos são escassos, como acontece na região Mediterrânica da Europa, o impacto das perdas de água por evapotranspiração acentua-se. Se considerarmos ainda que nos países do Sul da Europa extensas áreas agrícolas marginais têm vindo a ser florestadas, compreendemos a necessidade de tentar quantificar a evapotranspiração dos principais tipos de cobertos florestais, de modo a planear e gerir correctamente a utilização do solo e dos recursos hídricos.

Em Portugal a espécie florestal dominante é o pinheiro bravo. No entanto, nas duas últimas décadas, tem-se verificado uma acentuada expansão da área ocupada por eucaliptal, tendo sido suscitada acesa discussão sobre o impacte ambiental dessa expansão. Neste contexto, foi implementado o projecto **Interception Losses and Transpiration Rates in *Eucalyptus globulus* and *Pinus pinaster* Stands in Central Portugal**, financiado pela CEE - DG XII (*STEP PROGRAMME*), cujos objectivos consistiam em quantificar e modelar as perdas de água para a atmosfera através da interceptação e da transpiração em povoamentos de eucalipto e pinheiro bravo localizados na região do Ribatejo.

O presente estudo foi realizado no âmbito deste projecto com o objectivo fundamental de quantificar as perdas por transpiração naqueles povoamentos.

A estimativa destas perdas foi feita recorrendo a 2 métodos distintos: o *balanço de água no solo* e a *equação de Penman-Monteith*. No eucaliptal, esta equação foi aplicada considerando o coberto representado, quer através de um modelo unilaminar, quer através de um modelo multilaminar admitindo a existência de 3 estratos com características particulares distintas.

No presente trabalho, depois de caracterizados os povoamentos estudados e descritos os métodos empregues, referem-se os resultados obtidos, sendo ainda tecidas algumas considerações no sentido de enquadrar e justificar esses resultados. Por fim, são apresentadas as principais conclusões deste estudo. Com o intuito de facilitar a leitura do trabalho, optou-se, nalguns casos, por apresentar apenas os resultados mais significativos e/ou aqueles que melhor representam os resultados gerais obtidos, remetendo-se o leitor para a consulta dos anexos onde todos os resultados são integralmente apresentados sob a forma de quadros e figuras.

2. Caracterização das áreas de estudo e da instrumentação utilizada

A realização do presente estudo decorreu em dois povoamentos adultos de, respectivamente, eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill) e pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Aiton), situados na região de Pegões/Porto Alto, próximo de Lisboa (Fig.2.1). A distância entre os povoamentos é de, aproximadamente, 30 km, localizando-se o primeiro na *Herdade da Espirra* (38° 38' N, 8° 36' W), propriedade da empresa PORTUCEL, S.A., enquanto que o segundo se situa numa área pertencente à Companhia das Lezírias designada por *Pinhal da Carrasqueira* (38° 50' N, 8° 51' W).

Três critérios principais foram seguidos, pela equipa responsável pelo projecto, na escolha destes povoamentos. O primeiro, resultou da necessidade de que fossem suficientemente extensos de modo a garantir um *fetch* apropriado (o *fetch* corresponde à distância, segundo a direcção dos ventos dominantes, entre o local onde são realizados os estudos micrometeorológicos e a periferia dos povoamentos) e, o segundo, da necessidade de que as áreas fossem planas de modo a garantir condições aerodinâmicas e energéticas adequadas à aplicação correcta dos métodos micrometeorológicos. O terceiro critério relacionou-se com a necessidade de assegurar a proximidade dos locais relativamente a Lisboa, uma vez que a generalidade das

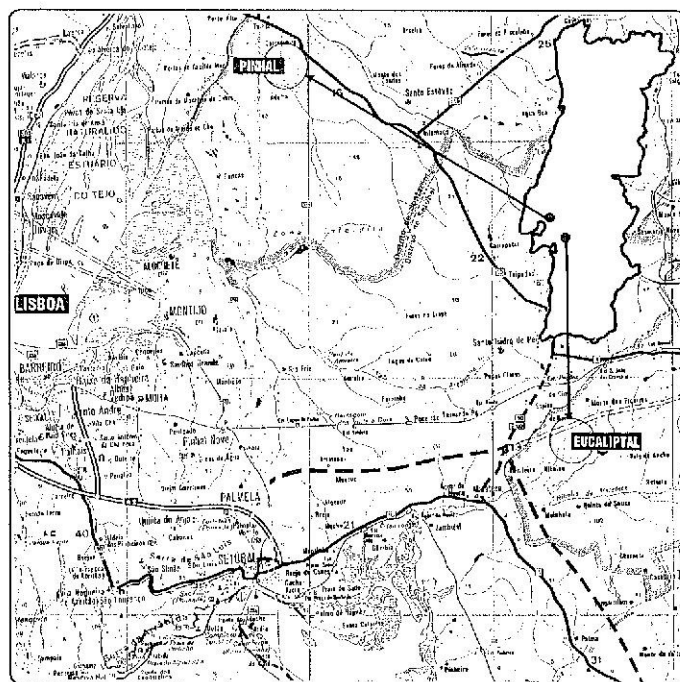


Fig. 2.1 - Localização das parcelas experimentais

peças e meios envolvidos no projecto, dentro do qual este estudo se integra, provêm do Departamento de Engenharia Florestal do Instituto Superior de Agronomia (Universidade Técnica de Lisboa).

As principais características dos povoamentos estudados sintetizam-se no Quadro 2.1 onde se referem, entre outros, aspectos relacionados com a sua instalação, com as principais variáveis dendrométricas e com a área foliar total e a sua distribuição pelos diferentes estratos do copado.

Quadro 2.1- Principais características dos povoamentos estudados.

	Eucaliptal	Pinhal
Instalação		
Tipo	Plantação	Sementeira
Compasso	3 m x 3 m	Irregular
Preparação do terreno	Lavoura contínua a, aproximadamente, 0.6 m	
Regime de exploração	Talhaia	Alto fuste
Características dendrométricas ⁽¹⁾⁽²⁾		
Idade (anos) ⁽³⁾	6 (1ª rotação)	55 (povoamento equiénio)
Número de árvores por hectare	885	320
Diâmetro à altura do peito (cm)	13.596	
Altura (m)	14.606	24.0
Altura da base da copa (m)	4.889	
Diâmetro na base da copa (cm)	9.650	
Índice de área foliar ⁽¹⁾		
Povoamento	3.168	2.3 ⁽⁴⁾
Estrato superior	0.830	
Estrato médio	1.402	
Estrato inferior	0.936	
Sub-bosque	Não ocorre	Disperso

(1) Os valores referidos para o eucaliptal foram cedidos pelo Eng^o José Tomé (DEF-ISA).

(2) Os valores referidos para o pinhal foram cedidos pelos Eng.^{os} Fernanda Valente e Manuel Osório Henriques (DEF-ISA).

(3) Idade dos povoamentos à data do início do estudo (1992).

(4) Valor referido por Gash *et al* (1989) para um povoamento da mesma espécie, com uma altura média de 20.3 m e uma densidade de 430 árvores por hectare. Este valor foi adoptado por não se conhecerem quaisquer estudos realizados no País que indicassem outros valores mais adequados.

O clima da região, embora influenciado pela proximidade do mar, é caracteristicamente mediterrânico. A precipitação concentra-se habitualmente no período de Outubro a Abril sendo o seu valor médio anual de, aproximadamente, 600 mm. Contudo, os anos de 1992 e 1993, ao longo dos quais decorreu este estudo, foram especialmente secos, particularmente o ano de 1992. Apesar de mais reduzida, a precipitação caída nestes dois anos teve uma distribuição mais homogénea do que é normal, tendo chovido em todos os meses do ano à excepção de Julho (Fig. 2.2). A

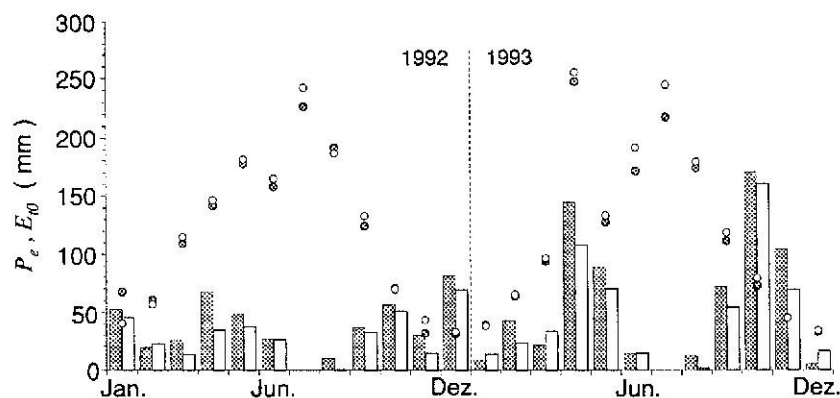


Fig. 2.2 - Valores mensais de precipitação efectiva (P_e - barras) e evapotranspiração de referência (E_{R0} - círculos) para o eucaliptal (▨) e para o pinhal (□), ao longo dos anos de 1992 e 1993.

evaporação (avaliada por tinas evaporimétricas classe A) é de aproximadamente 1300 mm ano^{-1} , enquanto que a evapotranspiração de referência estimada pela equação de Penman modificada por Doorembos e Pruitt (1992) (ver Anexo 4) foi em média, durante 1992 e 1993, de 1392 mm ano^{-1} no eucaliptal e de 1444 mm ano^{-1} no pinhal. O facto de os valores da evapotranspiração de referência ultrapassarem o valor dado pelas tinas resulta provavelmente da utilização, na equação de Penman, dos valores das variáveis micrometeorológicas medidos no topo dos povoamentos onde a velocidade do vento é maior. Na Fig. 2.3 representa-se o padrão de variação dos valores médios mensais da temperatura e défice de pressão de vapor do ar ao longo do período 1992/93.

De forma a caracterizar os solos locais foi implementado um processo de amostragem, tendo-se procedido à abertura de 4 perfis na imediação das parcelas experimentais. Em cada perfil foram recolhidas amostras a diferentes níveis até à profundidade máxima de 1.5 m no eucaliptal e 1.6 m no pinhal. As amostras recolhidas foram utilizadas para determinação da densidade aparente pelo método dos cilindros (Anexo 1, Quadro A1.1) e para o estabelecimento das curvas características de humidade do solo através dos métodos laboratoriais das placas e placas de pressão. Dado que as determinações laboratoriais não puderam ser totalmente concluídas até ao momento, não se dispõe de informação completa sobre as curvas características de humidade do solo. Procedeu-se ainda à recolha de amostras adicionais, quer a partir de um quinto perfil escavado até à profundidade de 2 m, quer durante o processo de instalação dos tubos de acesso para a sonda de neutrões, realizada por uma outra equipa de trabalho, que foram utilizadas em diversas análises físicas e químicas (Anexo 1, Quadro A1.2).

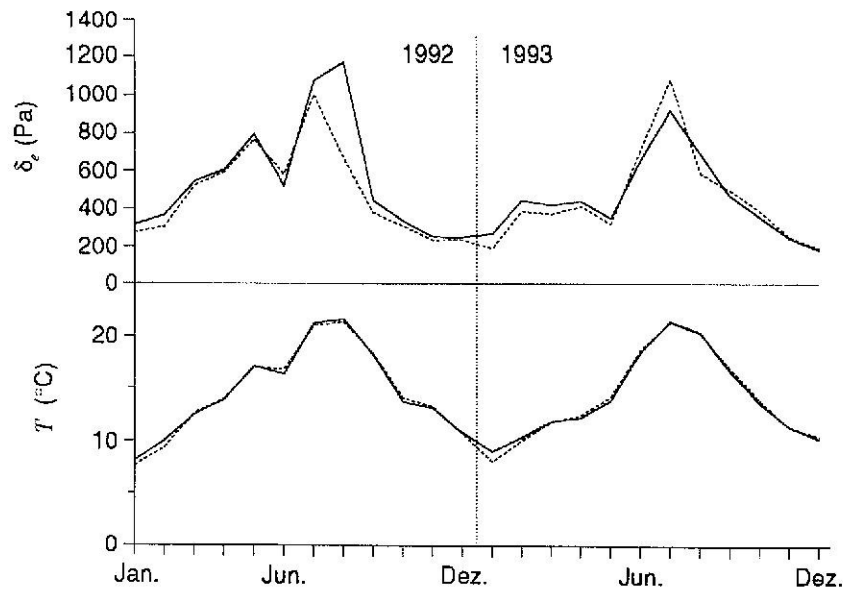


Fig. 2.3 - Valores médios mensais do déficit de pressão de vapor (δ_e) e da temperatura do ar (T) no eucaliptal (—) e no pinhal (---) ao longo de 1992 e 1993. Os valores apresentados referem-se às medições efectuadas no topo dos povoamentos.

O solo do eucaliptal é um *Cambissolo Dístico* (classificação FAO/UNESCO) com uma profundidade entre 30 a 40 cm, abaixo da qual se encontra um arenito. Dado que o solo superficial foi lavrado antes da plantação dos eucaliptos até à profundidade de 60 cm, pode, por isso, ser considerado um *Antrossolo*. Estes solos têm uma textura franco-argilo-arenosa, variando o teor de argila entre, aproximadamente, 20 e 40 %. O pH é próximo de 5 e o teor em carbono orgânico varia entre 0.2 e 0.8 %, sendo significativamente mais baixo no arenito onde tem valores entre 0.04 e 0.07 %. Nos 60 cm mais superficiais a soma das bases de troca situa-se entre 1.22 e 1.95 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$, enquanto que no arenito é inferior a 1.3 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$. A densidade aparente (Fig. 2.4) nos primeiros 60 cm é de cerca de 1.6 gcm^{-3} variando, abaixo desse nível, entre, aproximadamente, 1.7 e 1.8 gcm^{-3} .

No pinhal, o solo é um *Podzol* (classificação FAO/UNESCO) com uma profundidade entre 60 a 80 cm, originado a partir de areias aluvionares e cujo perfil não foi modificado por qualquer operação de mobilização. A textura é arenosa sendo o pH próximo de 6. O teor em carbono orgânico varia entre cerca de 0.1 e 0.5 %, enquanto que a

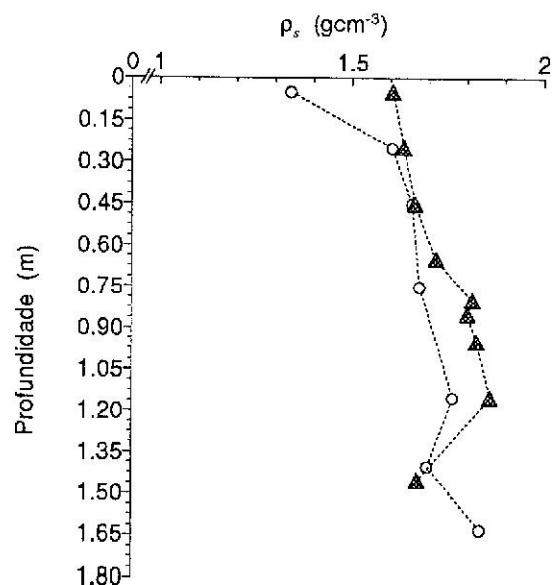


Fig. 2.4 - Variação em profundidade da densidade aparente (ρ_s) do solo no eucaliptal (—▲—) e no pinhal (---○---).

soma das bases de troca varia entre 0.2 e 1.1 $\text{cmol}(+)\text{kg}^{-1}$. Os valores de densidade aparente situam-se entre 1.3 e 1.6 gcm^{-3} (Fig. 2.4). Subjacentemente ao Podzol encontra-se um arenito com um teor de argila e limo de, respectivamente, 8 e 14 %. A sua densidade aparente é de 1.7 a 1.8 gcm^{-3} .

Tanto no pinhal como no eucaliptal foram feitos dois furos com o objectivo de verificar a ocorrência de lençóis freáticos próximo da superfície e de acompanhar a eventual variação do seu nível. A descrição dos materiais encontrados até à profundidade máxima atingida pelos furos é apresentada na Fig. 2.5.

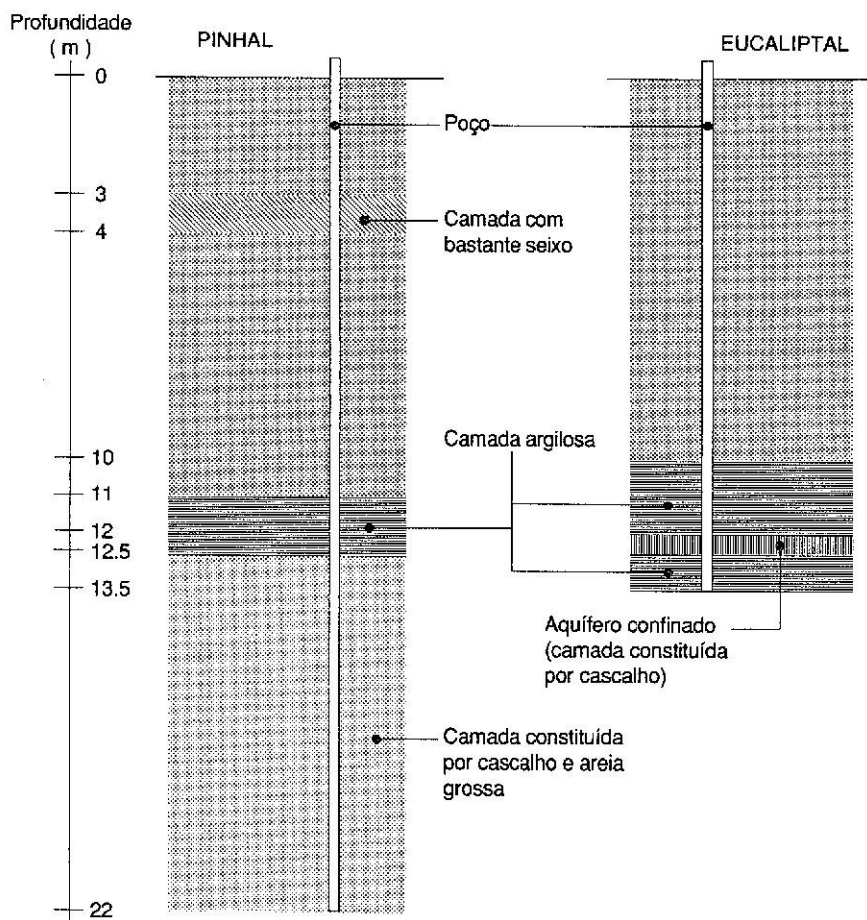


Fig. 2.5 - Profundidade atingida pelos furos efectuados nos dois povoamentos e descrição da natureza dos materiais identificados até àquela profundidade.

Em cada povoamento foram estabelecidas duas parcelas experimentais. Uma, com 35 x 35 m^2 no eucaliptal e 40 x 40 m^2 no pinhal, destinada à instalação de todos os instrumentos meteorológicos, bem como de todos os dispositivos e aparelhos destinados ao estudo da interceptação; uma outra, com 40 x 40 m^2 em qualquer dos povoamentos, destinada à instalação da rede de tubos de acesso para a sonda de neutrões utilizada para determinação da variação do teor de água no solo. Em clareiras próximas dos povoamentos, foi ainda reservada uma pequena área onde foram instalados os udógrafos utilizados na medição e registo da precipitação bruta.

A fase inicial de instalação de todos estes sistemas decorreu durante 1991, tendo sido executada por equipas de trabalho em que o autor desta tese não se encontrava inserido.

A maioria dos instrumentos meteorológicos foram instalados acima das copas em torres metálicas (Fig. 2.6) com 26 m de altura no eucaliptal e 30 m no pinhal.

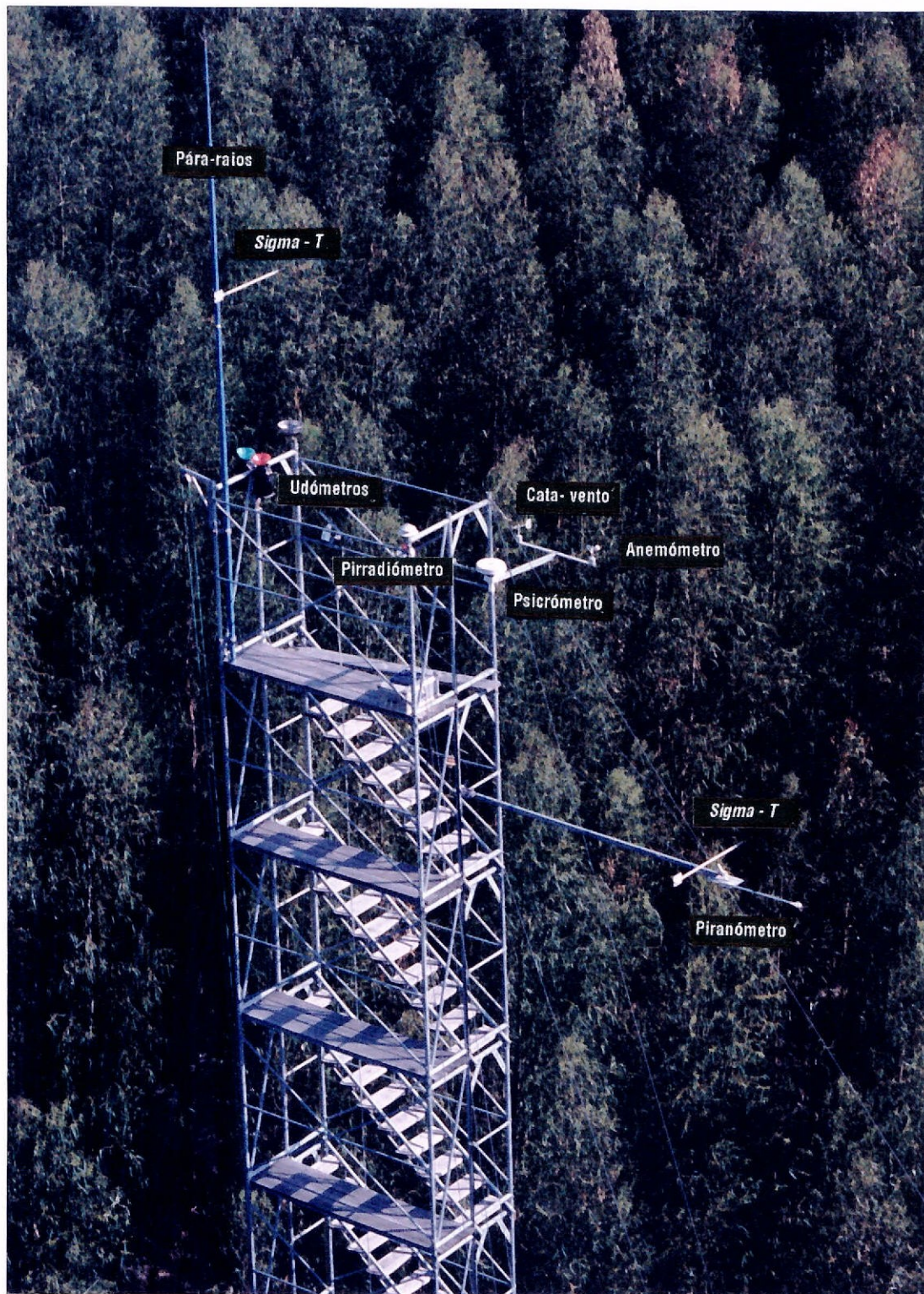


Fig. 2.6 - Instrumentos instalados no cimo da torre metálica localizada no eucaliptal

Os instrumentos instalados nas torres (Anexo 1, Quadro A.1.3) permitiram a medição contínua da radiação solar, da radiação líquida, da temperatura e humidade do ar e da direcção e velocidade do vento. A instalação de um udómetro e de um funil no cimo das torres ligado, por meio de um tubo, a um udógrafo colocado junto ao solo, permitiu a medição e registo contínuos da precipitação bruta no topo dos povoamentos. Foram igualmente instaladas placas de fluxo de calor de e para o solo de modo a avaliar esta componente do balanço energético. A instalação e monitorização desta rede permanente de informação micrometeorológica foi realizada por uma equipa de trabalho liderada pela Eng.^a Fernanda Valente e Prof. J. Soares David.

Para além deste conjunto de instrumentos permanentemente em funcionamento, foram instalados, apenas no eucaliptal e por um período de aproximadamente 10 semanas, outros aparelhos destinados ao estudo do ambiente microclimático no interior do coberto (Anexo 1, Quadro A.1.3). Assim, foram instalados na torre metálica e a níveis distintos dois psicrómetros adicionais (Fig. 2.7). Junto ao solo, em localização variável estabelecida semanal e aleatoriamente, foi instalado um conjunto de três sensores de radiação com o objectivo de estudar a atenuação da radiação solar e da radiação líquida pelo coberto.

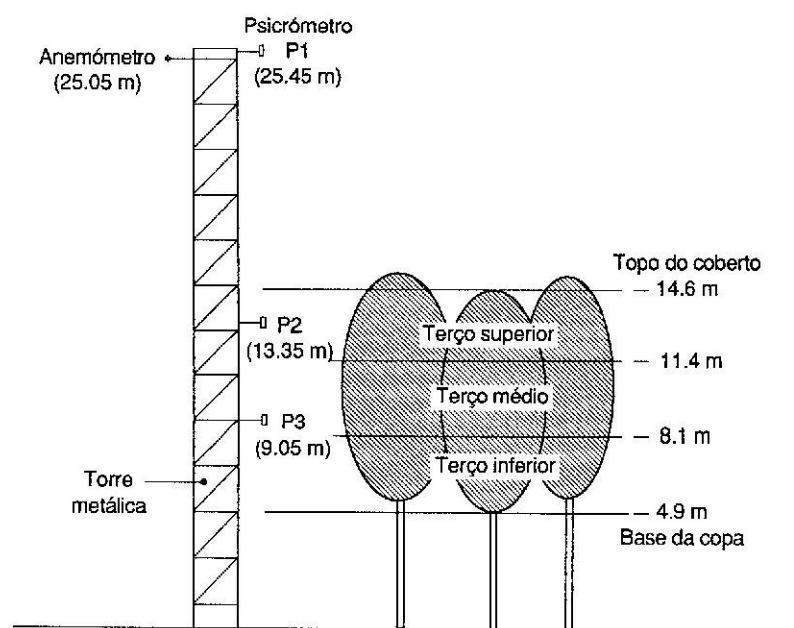


Fig. 2.7 - Partição da copa do eucaliptal em 3 estratos para aplicação do modelo multilaminar para a transpiração, indicando-se a localização dos psicrómetros adicionais (P2 e P3), instalados para a caracterização dos perfis de temperatura e humidade no interior da copa.

A ligação dos diversos instrumentos a um *data-logger* assegurou a realização de medições contínuas e o registo dos respectivos valores médios em intervalos de 10 minutos. O fornecimento da energia necessária ao funcionamento de todo o sistema de medição foi assegurado através do recurso a painéis solares e a baterias de automóvel.

As torres, localizadas no centro das parcelas experimentais, permitiram, igualmente, o acesso às copas de modo a que pudessem ser realizadas medições de condutância estomática recorrendo a porómetros de difusão (LI - COR Inc., Lincoln, Nebraska, U.S.A. mod. LI - 1600).

3. Método do balanço hidrológico

3.1. Descrição do método

A quantidade total de água existente na Terra pode ser considerada constante, distribuindo-se por três reservatórios principais - os oceanos, os continentes e a atmosfera - sob as formas líquida, sólida ou gasosa. Entre estes reservatórios estabelecem-se fluxos permanentes, envolvendo ou não mudanças de fase, mantidos fundamentalmente, à custa da energia solar. A integração destes fluxos e das relações que se estabelecem entre os diferentes reservatórios é descrita, à escala do planeta, pelo ciclo hidrológico.

Considerando-se uma escala regional ou local, o conceito de ciclo hidrológico é, naturalmente, substituído pelo de balanço hidrológico, dado que então se tem de considerar um sistema aberto para o qual a variação da quantidade de água armazenada no interior das suas fronteiras (ΔA) corresponde à diferença entre *entradas* (I) e *saídas* (O) de água.

À semelhança do que acontece com o conceito de ciclo hidrológico ao nível do planeta, também o conceito de balanço traduz o princípio da conservação da massa, embora a uma escala espacial mais restrita, expresso através da equação da continuidade sob a forma genérica

$$\Delta A = I - O \quad (3.1)$$

que, concretizando, para a região superficial do solo, vem

$$\Delta S = P_e - (Q_s + D + E) \quad (3.2)$$

em que

ΔS - é a quantidade de água armazenada no solo

P_e - é a precipitação efectiva

Q_s - é o escoamento superficial

D - é a drenagem em profundidade

E - é a perda de água devida à evapotranspiração (neste caso, e quando se considera a precipitação efectiva, E corresponde à soma da transpiração com a evaporação directa do solo sendo esta última, normalmente, insignificante (Ward e Robinson, 1990))

Esta equação está na base do método do balanço da água no solo para a determinação da transpiração (E_t), aplicável sempre que seja possível a medição independente das restantes variáveis em jogo. Nessas circunstâncias, E_t constitui a única variável desconhecida, pelo que poderá ser facilmente calculada reescrevendo então a equação (3.2) em ordem a E_t ,

$$E_t = P_e - \Delta S - Q_s - D \quad (3.3)$$

Relativamente simples em termos conceptuais, este método tem vindo a ser aplicado desde há muito por inúmeros investigadores no estudo da transpiração em povoamentos florestais (ver, entre outros, Aussenac e Granier, 1979; Aussenac e Boulangeat, 1980; Ibrahim et al, 1982; Roberts et al, 1982; Nizinski e Saugier, 1989; Harding et al, 1992). Apesar da sua simplicidade conceptual, a sua aplicação nem sempre é fácil dadas as dificuldades que normalmente se põem à medição das restantes variáveis do balanço, em especial à determinação da drenagem em profundidade e do escoamento superficial. No sentido de ultrapassar estas dificuldades, o método é normalmente aplicado em condições para as quais é lícito admitir que, tanto o escoamento superficial como a drenagem em profundidade, podem ser desprezados. Nestas condições as únicas variáveis a medir são então P_e e ΔS .

Por outro lado, em locais onde a toalha freática, permanente ou temporária, ocorra próximo da superfície do solo, este método torna-se dificilmente aplicável uma vez que a vegetação poderá ter acesso directo à toalha freática e, ao mesmo tempo, o movimento ascensional de água da região saturada para os níveis superiores poderá contribuir para a variação de S . Ambos os casos correspondem a um *input* adicional de água cuja estimativa é difícil ou mesmo impossível (Brutsaert, 1991).

No entanto, apesar destas dificuldades estudos como os de Ibrahim et al (1982) ou, em particular, o de Van Slycken e Vereecken (1990) que relacionou o crescimento observado num povoamento de choupo híbrido com o fornecimento de água a partir da toalha freática por ascensão capilar, põem em evidência a importância que aqueles *inputs* podem assumir como componentes do balanço hidrológico.

Assim, no sentido de verificar a eventual ocorrência de um lençol freático que pudesse contribuir para o fornecimento de água às plantas, directa ou indirectamente, foi aberto um poço em cada povoamento cuja profundidade atingiu os 13 m no eucaliptal e os 22 m no pinhal (ver capítulo 2, Fig. 2.5). A abertura destes poços permitiu constatar que, normalmente, não ocorre, em qualquer dos locais, nenhum lençol freático próximo da superfície. Contudo, foi identificada, tanto no eucaliptal como no pinhal, a presença de camadas argilosas em profundidade susceptíveis de originarem eventuais zonas de saturação suspensas em períodos extremamente húmidos.

No pinhal verificou-se a existência de uma camada deste tipo entre os 10 e os 11.5 m de profundidade; a região compreendida entre os 11.5 e os 22 m (profundidade máxima atingida pelo poço) é constituída por areia grossa e cascalho. No eucaliptal, além da presença de uma primeira camada argilosa entre os 11.5 e os 12.5 m de profundidade, identificou-se uma segunda camada argilosa abaixo dos 13 m; estas duas camadas envolvem uma zona de areão na qual se detectou um lençol freático confinado.

3.2. Medição das variáveis envolvidas

3.2.1. Precipitação efectiva

No caso de zonas arborizadas, o processo da intercepção determina a perda, por evaporação, de parte da precipitação bruta (P_g) que atinge o topo do coberto, pelo que seria incorrecto utilizar os valores de P_g para representar as entradas de água no solo para a equação do balanço. Surge assim, o conceito de precipitação efectiva (P_e) que corresponde à quantidade de água que atinge efectivamente a superfície do solo, quer através dos espaços livres da copa e do gotejo a partir das folhas (precipitação sob-coberto, P_s), quer através do escoamento ao longo dos ramos e troncos (escoamento ao longo do tronco, TE) (Zinke, 1967 cit. por Valente, 1990). Uma vez atingida a superfície do solo, esta água poderá então infiltrar-se, escoar-se superficialmente ou evaporar-se directamente para a atmosfera.

A determinação de P_e foi feita, nas parcelas experimentais, pela Eng.^a Fernanda Valente com base em medições da precipitação sob-coberto e do escoamento ao longo dos troncos recorrendo, para o efeito, a redes de udómetros e/ou udógrafos e

de colectores de escurrimto ao longo do tronco instalados junto ao solo, no interior do coberto, de acordo com um processo adequado de amostragem.

3.2.2. Armazenamento de água no solo

O estudo do armazenamento de água no solo e da sua variação exige, à partida, a definição da região do solo sobre a qual o estudo irá incidir, sendo usual considerar que aquela região corresponde ao espaço explorado pelas raízes das plantas.

Tendo em conta o padrão de distribuição das raízes identificado no reconhecimento prévio dos perfis do solo realizado em ambos os povoamentos estudados, tentou-se efectuar o controlo de ΔS na região compreendida entre a superfície e os 2 m de profundidade. O método de medição usado foi o método neutrónico que se descreverá em pormenor seguidamente. A instalação dos tubos de acesso para a sonda de neutrões até àquele nível revelou-se extremamente difícil devido à ocorrência de camadas mais compactas à profundidade aproximada de 1.85 m no eucaliptal e de 1.70 m no pinhal. Por este motivo os perfis considerados para a aplicação da equação do balanço hidrológico referem-se à região 0-1.80 m e 0-1.65 m, respectivamente, para o eucaliptal e para o pinhal.

3.2.2.1. O método neutrónico

Como já referido, recorreu-se ao método neutrónico para a determinação da variação da quantidade de água armazenada no solo. Este método tornou-se particularmente comum em aplicações do balanço hidrológico dado tratar-se de um processo rápido, não destrutivo, permitindo medições repetidas e frequentes nos mesmos locais e a profundidade variável.

A sua aplicação baseia-se na utilização de sondas de neutrões de profundidade cujo desenvolvimento e aperfeiçoamento se iniciou nos anos 50, embora os primeiros estudos sobre o assunto tenham sido realizados ainda na década de 40.

Os aspectos relativos à sua utilização, bem como a teoria que lhe está subjacente encontram-se exaustivamente descritos em diversos trabalhos entre os quais destacamos os de Visvalingam e Tandy (1972), Hodnett (1986), Bell (1987) e, em especial, Greacen (1981).

O método neutrónico de medição do teor de humidade do solo é um método indirecto baseado no efeito de moderação dos neutrões rápidos (1) emitidos por uma

(1) - O efeito de moderação consiste na redução do nível energético de neutrões rápidos para um nível inferior - o nível térmico - em resultado de colisões elásticas (considerando-se como tal aquelas em que há conservação de energia cinética e de momento pelo neutrão que sofre a colisão) entre os neutrões rápidos e os núcleos dos átomos do solo.

fonte apropriada e no facto de ser o hidrogénio o elemento moderador mais eficaz. Dado que o hidrogénio presente no solo se encontra, fundamentalmente, sob a forma de água, o efeito de moderação é devido, sobretudo, à quantidade de água presente no solo.

As sondas de neutrões desenvolvidas para aplicação deste método são constituídas por duas componentes principais: a sonda de profundidade e a unidade de contagem (Fig. 3.1). A sonda de profundidade alberga uma fonte de neutrões rápidos e um detector de neutrões lentos. O detector permite avaliar a dimensão da nuvem de neutrões térmicos, formada em consequência do efeito de moderação, através da contagem dos neutrões detectados num período de tempo pré-estabelecido. À taxa de contagem observada corresponde um teor de humidade volúmica dado pela curva de calibração estabelecida para o solo considerado.

A nuvem de neutrões térmicos originada na região que envolve o conjunto fonte-detector é tanto maior quanto maior for a concentração no solo de elementos fortemente moderadores. Num solo relativamente homogéneo os fenómenos que determinam a densidade da nuvem de neutrões térmicos e, portanto, a taxa de contagem, ocorrem numa região aproximadamente esférica em cujo centro se encontra o conjunto fonte-detector. Junto do centro desta região esférica aquela nuvem torna-se particularmente densa o que significa que é o volume de solo mais próximo da fonte o principal responsável pelas taxas de contagem observadas. Em 1965, Olgaard (cit. por Hodnett, 1986) introduziu o conceito de *esfera de influência* que definiu como “o volume de solo em torno da fonte que, sendo removidos todo o solo e água exteriores a esse volume, daria origem a um fluxo de neutrões térmicos no detector igual a 95% do fluxo que se obteria num meio infinito”. A dimensão da esfera de influência varia com a quantidade de água no solo, diminuindo quando a humidade aumenta; no entanto, além da humidade, também a densidade e a composição do solo, por um lado, e o espectro de energia dos neutrões rápidos, por outro, determinam o raio da esfera de influência. Este raio varia aproximadamente entre os 15 cm, para solo húmido, e os 30 cm, no caso de solo muito seco. Em situações em que se verifique grande heterogeneidade do solo, a esfera de influência fica sujeita a deformações mais ou menos complexas de acordo com a forma em que aquela heterogeneidade se manifesta. De

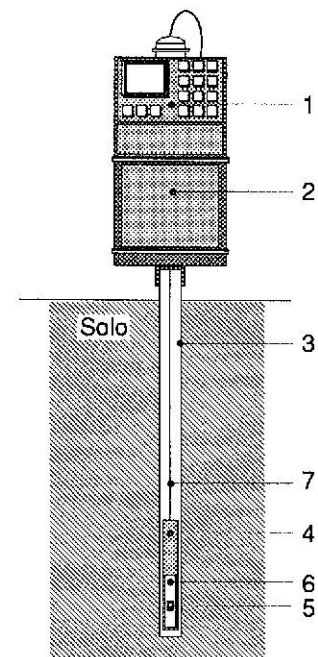


Fig. 3.1 - Elementos principais que constituem uma sonda de neutrões, representando-se o modo de utilização num tubo de acesso. (1) painel de controlo, (2) unidade de contagem e armazenamento de dados, (3) tubo de acesso, (4) corpo da sonda no interior do qual se encontram o emissor de neutrões rápidos (5) e o detector de neutrões térmicos (6). (7) cabo de ligação entre o corpo da sonda e a unidade de contagem.

qualquer modo, este conceito permite-nos estabelecer como espaçamento óptimo entre duas leituras sucessivas em profundidade uma distância de cerca de 10 a 15 cm, verificando-se que a resolução do método não é melhorada realizando leituras sucessivas a intervalos menores (Bell, 1987). Por outro lado, as dificuldades normalmente encontradas na interpretação das leituras realizadas próximo da superfície, onde a nuvem de neutrões térmicos sofre uma distorção apreciável em resultado de uma perda, para o exterior do solo, tanto de neutrões rápidos como de neutrões térmicos, podem ser melhor compreendidas à luz do conceito de esfera de influência.

A contagem de neutrões térmicos baseia-se na capacidade de determinados elementos (particularmente o Boro, o Hélio e o Lítio) interagirem com os neutrões térmicos dando origem à emissão de partículas carregadas (radiação α). Os fenómenos de ionização causados por estas partículas permitem que, à detecção de um neutrão térmico, seja associado um impulso eléctrico que é enviado para a unidade de contagem. Como se referiu, esta unidade procede à contagem dos impulsos recebidos num dado intervalo de tempo fornecendo o valor da respectiva taxa de contagem (C).

Embora fundamentalmente dependentes do teor de água no solo, as taxas de contagem são, no entanto, afectadas por um conjunto de factores relacionados com o solo (composição química, densidade aparente, textura e hidrogénio associado à fracção mineral e à matéria orgânica), com as características dos aparelhos (em especial a natureza, forma e dimensão da fonte de neutrões rápidos e a posição relativa da fonte e do detector) e ainda com as condições de medição (sobretudo, com as características dos tubos de acesso utilizados e com as condições em que estes tubos são instalados).

3.2.2.2. Calibração do método neutrónico

Dado que o método neutrónico constitui um processo indirecto de medição do teor de humidade do solo torna-se necessária a calibração das sondas de neutrões utilizadas na sua aplicação. Para o efeito, realizam-se medições independentes da humidade do solo, normalmente pelo método gravimétrico, que são relacionadas com as taxas de contagem fornecidas pela sonda através de uma equação de regressão. Para as sondas construídas actualmente (2) e para solos não expansíveis, aquela equação é linear sendo normalmente apresentada sob a forma

$$\theta_v = a + bC_n \quad (3.4)$$

(2) - A generalidade das sondas de neutrões construídas actualmente utiliza fontes de Amerício-Berílio com uma actividade entre 30 a 100mCi e uma forma capsular no centro da qual se encontra o detector (Hodnett, 1986; Bell, 1987).

em que

θ_v é o teor volumétrico de água no solo

C_n é a taxa de contagem normalizada definida como $C_n = C/C_p$, sendo C a taxa actual de contagem e C_p a taxa de contagem no *padrão*. C_p refere-se à taxa de contagem obtida colocando a sonda num meio moderador padrão.

O quociente C/C_p designa-se por contagem normalizada (C_n). A normalização das taxas de contagem tem como objectivo eliminar a variabilidade devida à substituição de componentes, à alteração da sensibilidade da sonda após uma reparação e ao lento envelhecimento dos componentes (Bell, 1987)

a e b são os coeficientes da recta de regressão

A influência exercida pelos factores referidos atrás sobre as taxas de contagem repercute-se obviamente sobre a calibração, sendo mais importantes os efeitos devidos à densidade aparente, ao *hidrogénio de constituição* e à composição química do solo. No entanto, enquanto que o efeito da densidade aparente se exerce sobre o coeficiente b da recta de regressão, o efeito da composição do solo faz-se sentir sobre a posição da recta através do valor da *ordenada na origem*, a (Greacen e Hignett, 1979). Para além dos efeitos referidos, há ainda que considerar a influência que as características dos tubos de acesso exercem sobre a calibração uma vez que espessuras e/ou diâmetros maiores levam a uma redução do valor do coeficiente de regressão b (Hodnett, 1986). Estes aspectos põem em evidência as dificuldades que podem surgir em locais onde os solos apresentam grande heterogeneidade, como acontece na parcela experimental do eucaliptal, e/ou sempre que a instalação dos tubos de acesso não tenha sido objecto de cuidados especiais dado que, nesses casos, o próprio processo de calibração poderá dar origem a estimativas erradas do teor de água no solo (Greacen et al, 1981).

Uma vez que as estimativas da variação do teor de água no solo são insensíveis ao valor do coeficiente a da equação de calibração (Williams e Sinclair, 1981; Bell, 1987), toda a atenção deverá ser posta na estimativa do coeficiente b e, em particular, nos efeitos que a densidade aparente exerce sobre aquele coeficiente. Assim e no sentido de minimizar aqueles efeitos, deverá procurar-se o ajustamento de uma curva de calibração distinta a cada região do perfil do solo com uma densidade aparente característica. Se, para além destes efeitos, se considerar que a camada superficial do solo tem, em geral, características marcadamente diferentes das camadas inferiores e, ao mesmo tempo, sofre a influência da interface solo-atmosfera, verifica-se que, qualquer que seja a situação considerada, há necessidade de estabelecer, pelo menos, duas curvas distintas de calibração - uma para a região superficial do solo e outra para a região subjacente. Deste modo, tendo em conta a informação recolhida sobre o perfil do solo em ambos os locais e, em particular, os valores da densidade aparente (ver capítulo 2, Fig. 2.4), foram estabelecidas equações de calibração específicas para a zona superficial do solo (0-22.5 cm) tanto no pinhal como no eucaliptal. Dado que no eucaliptal ocorrem variações nítidas da densidade aparente

em profundidade relacionadas com a realização de uma lavoura antes da instalação do povoamento, consideraram-se duas regiões distintas, a primeira entre os 22.5 e os 82.5 cm e a segunda entre os 82.5 e os 187.5 cm, para as quais se estabeleceram diferentes equações de calibração. No pinhal adoptou-se uma única equação de calibração para a região compreendida entre os 22.5 e os 172.5 cm, dada a sua homogeneidade relativamente à densidade aparente (ver capítulo 2, Fig. 2.4).

Para o estabelecimento das curvas de calibração representadas na Fig. 3.2 adoptou-se o processo normalmente designado por *calibração de campo* que constitui, porventura, a técnica de calibração mais simples e cuja principal vantagem consiste no facto de se poderem ignorar todos os factores que, além de θ_v , são susceptíveis de influenciar C_n uma vez que essa influência é tida em conta pelo próprio processo de calibração. Tal como as calibrações em laboratório, esta técnica baseia-se no estabelecimento de uma regressão de C_n em θ_v . Cada ponto de calibração (par de valores (C_n, θ_v)) é obtido a partir de um tubo de acesso temporário no qual se realizam as leituras de C_n , sendo o correspondente valor de θ_v obtido a partir de um conjunto de amostras recolhidas na região imediatamente adjacente ao tubo de acesso e logo após a realização das leituras de C_n . Dado que θ_v se relaciona com o teor gravimétrico de humidade (θ_w) através da densidade aparente (ρ_s) de acordo com a expressão

$$\theta_v = \rho_s \theta_w \quad (3.5)$$

torna-se necessário determinar não apenas θ_w mas também ρ_s . Se as amostras recolhidas forem não perturbadas e o seu volume fôr conhecido ambas as determinações podem ser realizadas a partir das mesmas amostras. No entanto, dado que as sondas utilizadas na recolha das amostras de solo tendem a comprimir a amostra recolhida, optou-se pelo

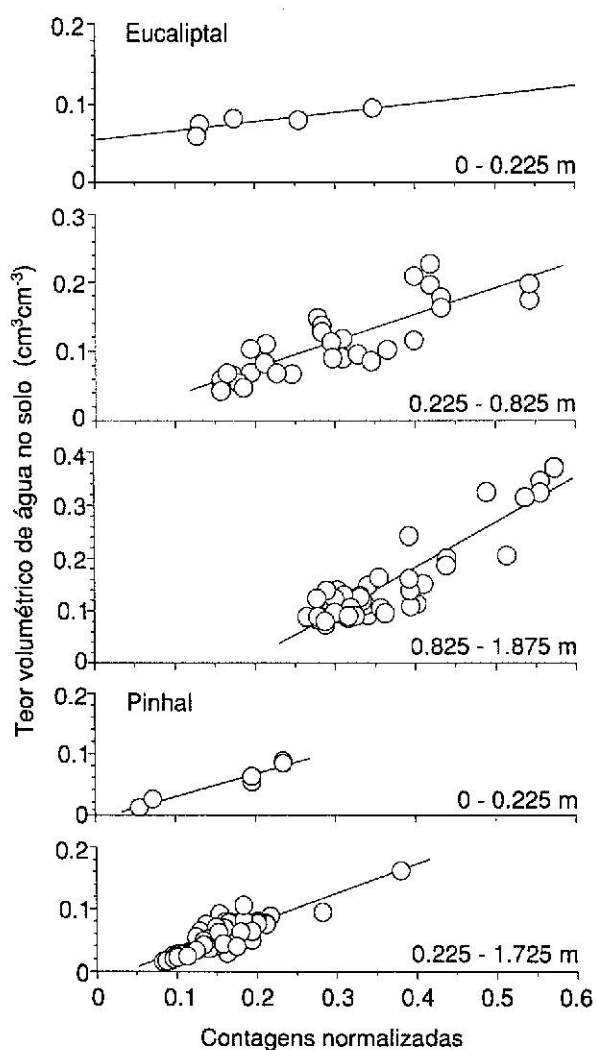


Fig. 3.2 - Rectas de calibração ajustadas, em ambos os povoamentos, para as diferentes regiões do solo

estabelecimento do perfil de densidade aparente com base num processo independente de amostragem conforme se referiu no capítulo 2.

Tendo em conta que a precisão da calibração é determinada pela dispersão dos pontos de calibração, importa obter o número máximo possível de pontos, cobrindo toda a gama de variação do teor de humidade do solo. Dado que a precisão da calibração afecta necessariamente o rigor das estimativas de ΔS , torna-se importante a sua avaliação podendo, para o efeito, utilizar-se o coeficiente de variação de b (CV_b) como uma medida inversa da precisão (Greacen et al, 1981).

Assim, além dos valores dos coeficientes de regressão (a e b), dos respectivos desvios padrão (s_a e s_b) e dos indicadores da qualidade do ajustamento (R^2 e s^2), apresentam-se igualmente no Quadro 3.1 os valores do coeficiente de variação associados ao coeficiente de regressão b .

Quadro 3.1 - Equações de calibração da sonda de neutrões obtidas por regressão linear através do método dos mínimos quadrados. As equações são do tipo $\theta_v = a + bC_n$, em que θ_v representa o teor volumétrico de água no solo e C_n o valor das contagens normalizadas fornecido pela sonda (s_a e s_b são, respectivamente, o desvio padrão dos coeficientes de regressões a e b , CV_b representa o coeficiente de variação de b , s^2 é a variância residual e R^2 o coeficiente de determinação).

Local	Nível (m)	$a \pm s_a$	$b \pm s_b$	CV_b (%)	s^2	R^2	Número de pontos de calibração
Eucaliptal	0 - 0.225	0.054±0.01	0.118±0.043	36.3	6.50x10 ⁻⁵	0.716	5
	0.225 - 0.825	-0.002±0.016	0.388±0.049	12.7	8.67x10 ⁻⁴	0.690	30
	0.825 - 1.875	-0.160±0.021	0.851±0.055	6.5	1.12x10 ⁻³	0.838	48
Pinhal	0 - 0.225	-0.008±0.009	0.375±0.048	12.7	7.30x10 ⁻⁵	0.940	6
	0.225 - 1.725	-0.018±0.005	0.475±0.033	6.9	1.66x10 ⁻⁴	0.740	76

A análise daqueles valores permite constatar que em ambos os locais são os coeficientes b das equações relativas à zona superficial do solo os mais afectados pela heterogeneidade daquela zona o que se reflecte em valores do coeficiente de variação elevados face aos valores daquele coeficiente para as camadas subjacentes. No entanto, enquanto que o valor de CV_b para a zona superficial do solo no pinhal (12.7 %) corresponde a um nível de precisão aceitável (Greacen et al, 1981), no eucaliptal em consequência da grande variabilidade espacial do solo local, CV_b apresenta um valor (36.3 %) bastante mais elevado o que significa que, naquele povoamento, as estimativas do teor de humidade do solo próximo da superfície não são muito rigorosas, exigindo a obtenção de novos pontos de calibração para aquela região do perfil do solo.

3.2.2.3. Rede de tubos de acesso

A utilização de sondas de neutrões exige, como se referiu, a instalação de tubos de acesso ao longo dos quais a sonda pode ser descida de modo a realizar medições

a diferentes profundidades. Ao nível local a estimativa tanto do teor de humidade do solo como da sua variação, é feita com base nas medições realizadas nos diversos tubos de acesso instalados para o efeito. A precisão da estimativa obtida é determinada, em grande medida, pela variabilidade espacial da humidade do solo resultante das características do coberto vegetal e da heterogeneidade espacial do solo. Assim, é importante que a localização das parcelas experimentais, bem como o número e a distribuição dos tubos de acesso sejam estabelecidos tendo em conta aqueles aspectos no sentido de garantir a representatividade das estimativas obtidas. Bell (1987) sustenta que deverão ser inicialmente instaladas redes com um número elevado de tubos de acesso seleccionando-se, mais tarde, os tubos de acesso considerados mais representativos do padrão local de variação da humidade do solo. Contudo e na prática, há que compatibilizar a necessidade de instalar o maior número possível de tubos com a necessidade de realizar medições em todos eles num período de tempo limitado. Este último aspecto, para além de ter determinado a dimensão das redes nos dois povoamentos, determinou igualmente tanto o número de leituras realizadas, em cada data, num dado nível bem como o tempo de medição adoptado, tendo-se estabelecido que seriam realizadas 3 leituras de 16 seg. cada em todos os níveis considerados ao longo do perfil; posteriormente, passou a realizar-se apenas uma leitura por nível com a duração de 32 seg.

A fase inicial de instalação das redes de tubos de acesso foi executada, por outras equipas de trabalho, antes do início do presente estudo. Os tubos de acesso que compõem cada uma destas redes foram então instalados em parcelas estabelecidas para esse efeito, tendo a sua localização dentro da parcela (Anexo 2, Figs. A.2.1 e A.2.2) sido definida através de um processo simples de casualização baseado na utilização de uma malha quadriculada aplicada à parcela. Posteriormente, parte dos tubos de acesso instalados foi reservada para a realização da calibração, tendo os restantes tubos sido utilizados na medição regular da variação da humidade do solo (Quadro 3.2). Os tubos necessários para a calibração foram sorteados entre os tubos que constituem ambas as redes.

Quadro 3.2 - Constituição e características das redes de tubos de acesso implantadas.

Local	Rede de tubos de acesso (TA)			
	Número total de TA	TA para calibração	TA para medição de ΔS	Profundidade máxima de medição (m)
Eucaliptal	16	7	9	1.80
Pinhal	11	4	7	1.65

Os cuidados exigidos pelo estabelecimento das redes de tubos de acesso não se limitam, no entanto, à necessidade de garantir uma cobertura representativa da variabilidade espacial e temporal da humidade do solo ou da sua variação. De facto, também a instalação dos tubos de acesso no terreno exige grande atenção uma vez que uma instalação deficiente dará origem a estimativas erradas de ΔS . O principal problema a considerar na instalação dos tubos de acesso relaciona-se com a presença de folgas ou espaços vazios entre o tubo e a parede do furo onde este é inserido, dando origem a uma redução das taxas de contagem devido à fuga rápida dos neutrões quando se verificam baixos teores de humidade ou, pelo contrário, podem originar taxas elevadas de contagem quando se dá a acumulação de água nesses espaços (Amoozegar et al, 1989). No sentido de atenuar este problema, as equipas envolvidas nas várias fases de instalação dos tubos de acesso tiveram sempre o cuidado de colmatar os espaços vazios com o material extraído durante a abertura dos furos, respeitando o nível de origem desse material.

Uma vez que o cloro é um elemento que absorve fortemente os neutrões térmicos, utilizaram-se tubos de acesso em alumínio, praticamente *transparentes* aos neutrões. A sua instalação foi feita manualmente por equipas de duas pessoas que utilizaram um sistema de brocas de perfuração e de sondas para recolha de amostras em profundidade, especialmente adaptado para o efeito. Trata-se de um processo que, nos solos em presença, se revelou pouco eficiente e particularmente duro, exigindo que a instalação dos tubos seja feita apenas durante o período do ano em que o solo se encontra convenientemente humedecido de modo a facilitar a operação.

Com o objectivo de verificar a ocorrência de variações do teor de humidade do solo a níveis inferiores aos atingidos pelos tubos de acesso instalados, procedeu-se à colocação de 3 tubos adicionais (2 no eucaliptal e 1 no pinhal) a uma profundidade máxima de 4.5 m. Dado que não se procedeu ao estabelecimento de equações de calibração para níveis tão profundos, as leituras C_n feitas nestes tubos, embora não tenham permitido a quantificação da variação de humidade àqueles níveis, forneceram indicações importantes relativas à dinâmica da água na região compreendida entre os 1.65 - 1.80 m e os 4.50 m. À semelhança dos restantes tubos de acesso, também estes foram instalados manualmente, embora recorrendo a um novo conjunto de brocas e ferramentas que provou ser mais eficaz do que o utilizado anteriormente.

3.3. Aplicação do balanço hidrológico

Durante o período em que decorreu este estudo, foi mantida uma rotina de medição regular da humidade do solo em ambas as parcelas experimentais. Estas medições foram realizadas com uma frequência variável tendo em conta a época do

ano. Assim, nos períodos em que se poderia esperar uma variação rápida e significativa do teor de humidade do solo, as medições foram realizadas semanalmente enquanto que, fora destes períodos, a frequência de medição foi alargada, realizando-se as medições quinzenal, trisemanal ou mensalmente.

Deste modo, foi possível acompanhar continuamente a variação do teor de humidade do solo (Anexo 2, Quadros A.2.1 e A.2.2) e, através da equação (3.3), calcular a transpiração total para cada intervalo entre medições de S (Anexo 2, Quadros A.2.3 a A.2.6). Nas parcela onde foram realizadas estas medições toda a vegetação espontânea foi eliminada de forma a anular a sua contribuição para as taxas de transpiração estimadas por este método.

O escoamento superficial foi desprezado tendo em conta que, em qualquer dos locais, o terreno é praticamente plano. Por outro lado, as características do solo do pinhal conferindo-lhe uma boa permeabilidade, tornam bastante limitada, naquele local, a probabilidade de ocorrência daquele tipo de escoamento. Além destes aspectos, foi ainda tida em conta a informação proveniente de um estudo hidrológico levado a cabo em três bacias hidrográficas experimentais (David *et al*, 1986), estabelecidas próximo do Cercal a, aproximadamente, 60 km a Norte de Lisboa, florestadas com eucalipto (bacias 1 e 2) e com pinheiro bravo (bacia 3). De acordo com a informação proveniente desses estudos (David e Henriques, dados em publicação), o escoamento verificado naquelas bacias, nos anos hidrológicos de 1991/92 e 1992/93, foi inferior a 1 % da precipitação bruta registada nos mesmos períodos (Quadro 3.3) podendo, portanto, considerar-se que, nestes anos, o escoamento superficial e subsuperficial não teve qualquer significado.

Quadro 3.3 - Escoamento verificado em 3 bacias hidrográficas experimentais. A bacia 1 está florestada com eucalipto de 9 anos de idade (Março de 1993; 3ª rotação), enquanto que a bacia 2 é ocupada por um eucaliptal de 1 ano (Julho de 1993; 4ª rotação), tendo sido efectuado, entre Maio e Julho de 1992, um corte raso no termo da 3ª rotação. A bacia 3 está ocupada por um povoamento de pinheiro bravo. Entre () apresentam-se as percentagens de P_g que os valores do escoamento representam (David e Henriques, em publicação).

Ano hidrológico	Precipitação bruta (mm)	Escoamento total (mm)		
		Bacia 1	Bacia 2	Bacia 3
1991/92	512.720	3.361 (0.66 %)	1.331 (0.26 %)	0.000
1992/93	622.890	1.291 (0.21 %)	0.476 (0.08 %)	0.000

Simultaneamente, procurou-se verificar se ocorreria ou não drenagem em profundidade. Para o efeito, foram instalados três tubos de acesso até à profundidade máxima de 4.5 m. Conforme referido atrás, para estes tubos apenas se procedeu à análise das contagens normalizadas uma vez que as equações de calibração estabelecidas se referem à região compreendida entre a superfície do solo e as profundidades de 1.875 e 1.725 m, respectivamente, para o eucaliptal e para o pinhal. A análise efectuada daquelas contagens baseou-se num conjunto de medições realizadas entre 31/08/93 e 30/12/93, conjugadas com os registos de precipitação para o mesmo período. Verificou-se, assim, no caso do eucaliptal, que as variações mais significativas de C_n ocorrem até à profundidade máxima aproximada de 1.8 m (Fig. 3.3), podendo ser encaradas como *respostas rápidas*, tanto à queda de precipitação como à transpiração. A níveis inferiores, as variações detectadas são mais reduzidas

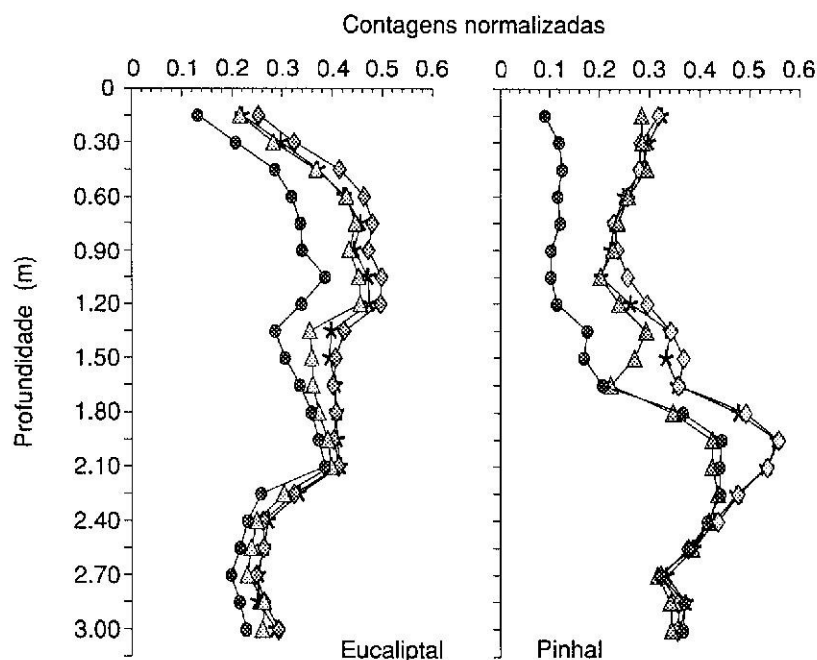


Fig. 3.3 - Variação em profundidade das contagens normalizadas observadas em diferentes situações de humidade do solo: (—●—) 31/08/93, (—△—) 27/10/93, (—◇—) 25/11/93, (—★—) 30/12/93.

e desfazadas no tempo relativamente às que ocorrem na região mais superficial, o que poderá significar que a natureza menos permeável dos materiais localizados abaixo dos 1.8 m limita o movimento descendente da água tornando, portanto, negligíveis as perdas por drenagem em profundidade. À semelhança do que aconteceu no eucaliptal, também no pinhal foi identificada a ocorrência de uma zona mais compacta, aproximadamente a 1.7 m. A presença destes materiais mais duros e compactos, além de confirmada pelas determinações de densidade aparente, havia sido já identificada durante o processo de instalação das redes de tubos de acesso, tendo mesmo impedido a colocação dos tubos a maior profundidade. Tal como no

eucaliptal, a análise das contagens C_n obtidas no pinhal revelaram que, tanto o humedecimento como a secagem, se processam, abaixo dos 1.7 m, a um ritmo mais lento, não se tendo mesmo verificado quaisquer variações nas contagens normalizadas obtidas a níveis situados além dos 2.4 m. Além disso, grande parte das variações ocorreram acima dos 1.7 m de profundidade, só tendo ocorrido variações significativas entre os 1.7 e 2.4 m durante os dois meses finais do estudo (Novembro e Dezembro de 1993), na sequência a uma situação pontual, excepcionalmente húmida, nada representativa em relação ao restante período de observações. Deste modo, considerou-se que, também no pinhal, a contribuição da drenagem em profundidade para a variação de S , pode ser desprezada.

Nestas condições, a equação (3.3) pode ser simplificada para o período em estudo (1992/93), reduzindo-se a

$$E_t = P_e - \Delta S \quad (3.6)$$

que, tendo em conta um conjunto de princípios previamente estabelecidos, torna mais fácil o cálculo da evapotranspiração através do balanço hidrológico. Este cálculo foi, para o pinhal, realizado por aplicação directa daquela equação enquanto que, para o eucaliptal, o mesmo cálculo foi executado segundo o algoritmo apresentado na Fig. A.2.3 (Anexo 2), tendo-se considerado que:

- 1) Sempre que a evapotranspiração total calculada para um dado período fosse superior à evapotranspiração de referência (E_{r0}) nesse período, calculada pela fórmula de Penman modificada por Doorembos e Pruitt (1992) (ver Anexo 4), assumia-se então que $E_t = E_{r0}$;
- 2) Verificando-se a situação anterior, a diferença ($P_e - \Delta S - E_{r0}$) correspondia a um excesso de precipitação que, dada a fraca permeabilidade dos solos do eucaliptal, permanecia armazenada à superfície do solo em pequenas poças, sendo contabilizada como um *input* de água para o período seguinte (3). Esta transferência de água de um período para outro, só se considerou possível apenas entre o período em que o excesso ocorria e o período imediatamente seguinte, pelo que
- 3) Verificando-se em dois períodos consecutivos a situação descrita em 1), a transferência de água do segundo para o terceiro período correspondia estritamente à diferença ($P_e - \Delta S - E_{r0}$), observada no segundo período. Apesar do que se referiu atrás relativamente à drenagem em profundidade e ao escoamento de superfície e tendo ainda em conta que apenas se verificou uma situação como esta na sequência de precipitações abundantes e concentradas, admitiu-se que o excesso de água que eventualmente se verificasse relativamente àquela diferença poderia ser contabilizado como uma perda por drenagem ou por escoamento superficial ou ainda por evaporação directa a partir da superfície do solo.

Os resultados de base do cálculo do balanço hidrológico das parcelas experimentais para o período de estudo estão incluídos nos Quadros A.2.3, A.2.4, A.2.5 e A.2.6 do Anexo 2.

(3) - Este procedimento foi estabelecido no seguimento de observações visuais de campo que, qualitativamente, o confirmaram.

3.4. Resultados

A quantidade de água retida no solo está, naturalmente, relacionada com a sua utilização pelas plantas e com a ocorrência de precipitação. Por outro lado, a quantidade máxima de água que um dado solo retém depende das características próprias desse solo variando, portanto, de solo para solo. Assim, de modo a traduzir a disponibilidade efectiva de água para as plantas recorreu-se à utilização do conceito de *teor relativo de água disponível no solo (TRD)* (Granier, 1987), definido por

$$TRD = \frac{\theta - \theta_m}{\theta_{cc} - \theta_m} \quad (3.7)$$

em que θ representa o teor actual de humidade do solo, θ_m é o valor mínimo de humidade do solo registado em todo o período de medições e θ_{cc} é o teor de humidade que se admite corresponder à capacidade de campo. θ_{cc} é representado, tanto no eucaliptal como no pinhal, pelo teor de humidade do solo observado em 30/12/93, ou seja, no fim de um período seco que se seguiu a um outro bastante pluvioso. Todos os teores de água referem-se à integração da humidade medida até às profundidades de, respectivamente, 1.80 m e 1.65 m para o eucaliptal e para o pinhal. Na Fig. 3.4 representam-se os perfis de humidade do solo relativos às

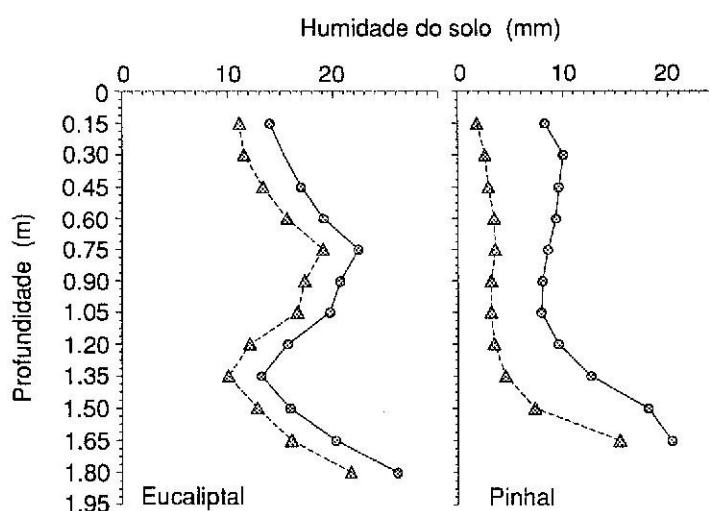


Fig. 3.4 - Humidade do solo em condições extremas nos dois povoamentos. Representam-se os perfis relativos à situação que se admite corresponder à capacidade de campo (—○—) e à situação de máxima secura do solo (---△---).

situações extremas de solo seco e à capacidade de campo, verificando-se que, apesar de no eucaliptal o valor absoluto do teor de humidade à capacidade de campo ser cerca de 100 mm superior ao valor observado no pinhal, os solos do pinhal possuem

uma capacidade de retenção para a água aproximadamente 30 mm superior à capacidade de retenção dos solos do eucaliptal. A Fig. 3.5 revela a natural dependência do *TRD* relativamente à ocorrência de precipitação. De facto, o teor relativo de água

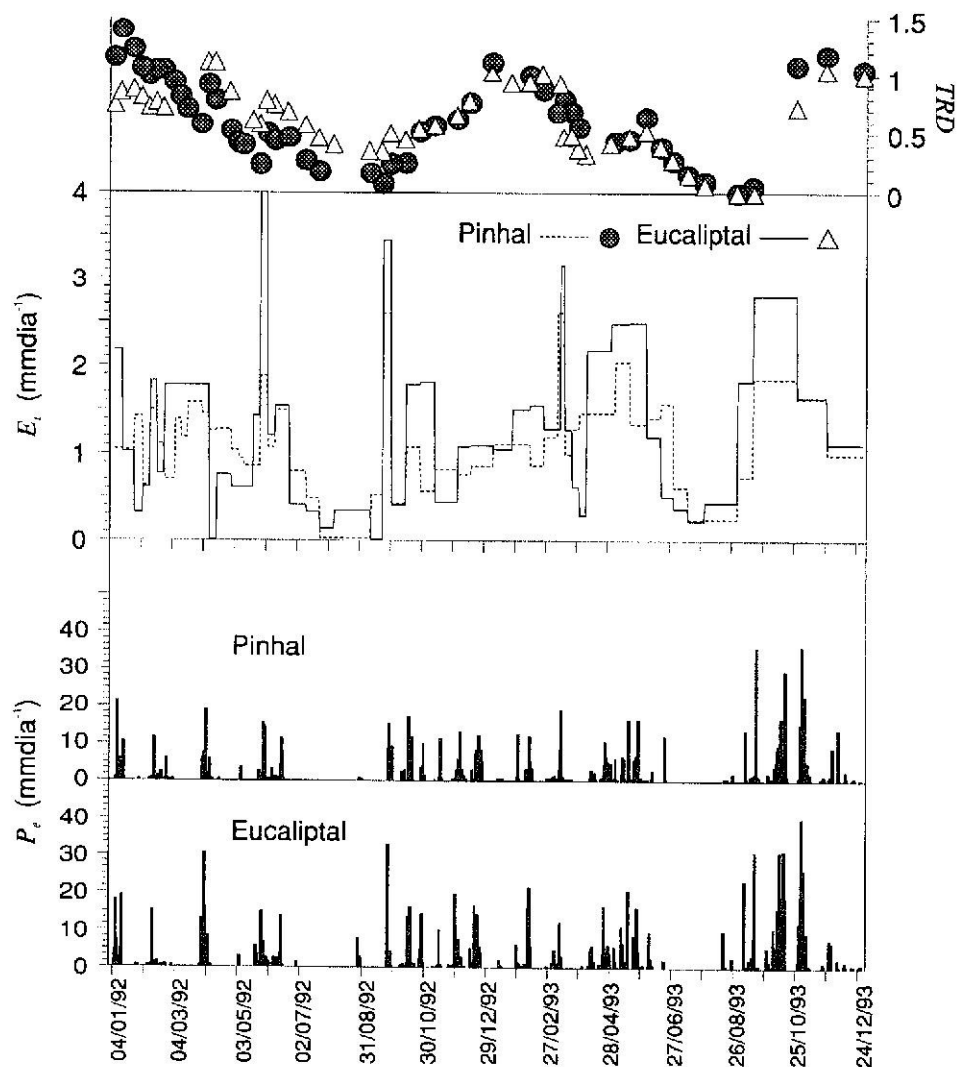


Fig. 3.5 - Evolução temporal da precipitação efectiva (P_e), do teor relativo de água disponível no solo (*TRD*) e das taxas de transpiração (E_e) estimadas pelo método do balanço hidrológico em ambos os povoamentos.

disponível no solo apresenta valores mínimos no final do Verão, enquanto que os valores mais altos se registam no Inverno. Por outro lado, durante a Primavera e apesar da ocorrência de precipitação, a humidade do solo decresce quase continuamente em consequência da transpiração, manifestando respostas muito ténues à precipitação.

As taxas de transpiração determinadas por aplicação do balanço hidrológico revelam-se bastante variáveis no tempo (Fig. 3.5), qualquer que seja o povoamento considerado, respondendo de forma directa a valores elevados do *TRD* e à ocorrência de precipitação. No entanto, no eucaliptal a taxa máxima observada (4.004 mmdia^{-1} ,

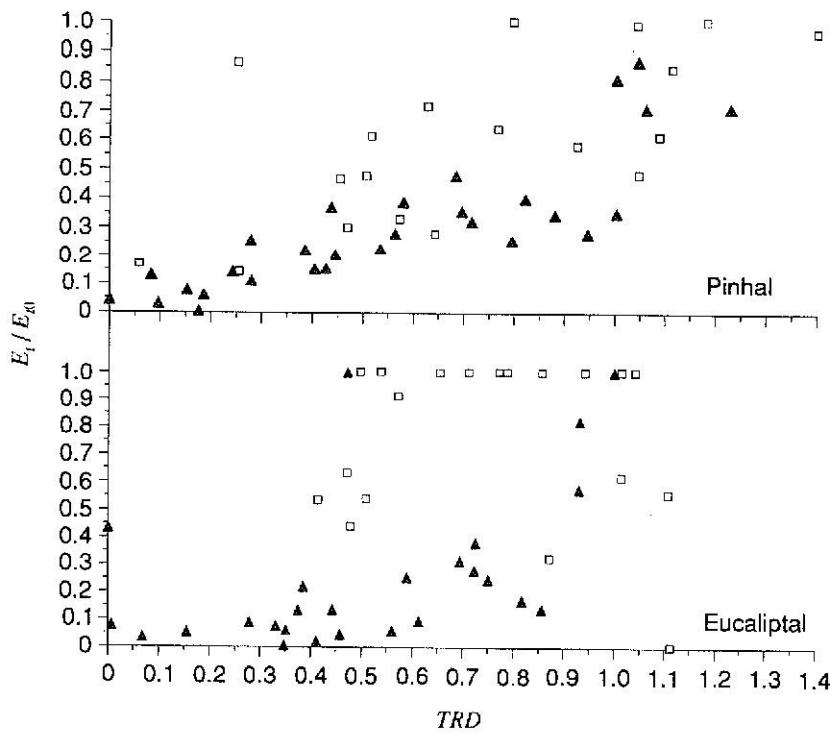


Fig. 3.6 - Relação entre a razão E_t/E_{t0} e o TRD para os dois povoamentos, considerando períodos de secagem (▲) e de humedecimento (□) do solo.

A forte dependência que, nas nossas condições climáticas, existe entre as taxas de transpiração e as disponibilidades hídricas é também evidenciada pela Fig. 3.6 que relaciona a razão E_t/E_{t0} com o TRD . As tendências observadas parecem sugerir, no entanto, que a razão E_t/E_{t0} varia de forma diferente com o TRD conforme o solo está, respectivamente, em processo de humedecimento ou de secagem. As diferenças que se observam entre os relacionamentos para as fases de humedecimento e secagem são, contudo, mais marcadas no caso do eucaliptal do que no caso do pinhal.

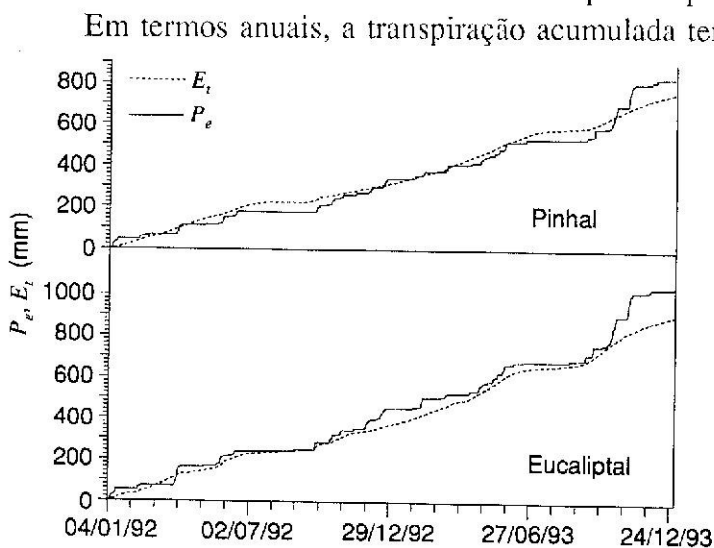


Fig. 3.7 - Transpiração (E_t) e precipitação efectiva (P_e) - valores acumulados ao longo dos anos de 1992 e 1993.

□ no período de 27/5 a 3/6/92) é aproximadamente 2 vezes superior à observada para o pinhal (2.608 mmdia^{-1} , no período de 10/3 a 17/3/93), enquanto que ambos os povoamentos apresentam taxas mínimas próximas de zero (mínimos absolutos de 0.006 e 0.024 mmdia^{-1} , respectivamente no eucaliptal e no pinhal) no período que abrange parte do mês de Julho, Agosto e os primeiros dias de Setembro.

precipitação efectiva, ou seja, praticamente toda a chuva que atinge o solo é transpirada, o que se torna tanto mais patente quanto mais seco é o ano (Fig. 3.7). Para os dois anos de observações, a transpiração estimada pelo balanço hidrológico representou 93.5 e 88.6 % da precipitação efectiva, respectivamente, no pinhal e no eucaliptal.

4. Método de Penman-Monteith

4.1. A equação de Penman-Monteith

Diversos métodos e técnicas são hoje em dia utilizados para medir ou estimar taxas de evaporação. Estes métodos são usualmente incluídos em diferentes “classes” de acordo com o tipo de princípios em que se baseiam, sendo a adoção de um método particular determinada pelos dados e/ou instrumentos disponíveis. Para além dos métodos baseados no balanço de massa (de que é exemplo o método do balanço hidrológico descrito no capítulo 3), podem ser considerados outros métodos e técnicas entre os quais se incluem os modelos que conjugam aspectos de natureza aerodinâmica com o princípio da conservação da energia. O primeiro método deste tipo foi desenvolvido e apresentado por Penman em 1948 (Thom, 1975) para estimar a taxa de evaporação a partir de uma superfície de água livre utilizando, para o efeito, a equação (4.1) (Brutsaert, 1991; ver Anexo 4)

$$E_0 = \frac{\Delta'}{\Delta' + \gamma} R_{ne} + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta'} E_a \quad (4.1)$$

em que

E_0 é a taxa de evaporação diária

R_{ne} corresponde à radiação líquida expressa como uma taxa de evaporação

equivalente, ou seja, $R_{ne} = R_n / \lambda$, sendo R_n a energia líquida disponível por unidade de área e λ o calor latente de vaporização da água
 γ é a constante psicrométrica
 Δ' é o declive da curva que relaciona a pressão de vapor saturante com a temperatura
 E_a representa o *poder evaporante* do ar

No entanto, considerando *coeficientes de cultura* determinados experimentalmente, Penman (1956) relacionou a taxa de evaporação estimada pelo seu método com a evapotranspiração, em Inglaterra, de cobertos vegetais rasteiros amplamente abastecidos de água, tendo-se, mais tarde, associado às taxas de evaporação assim determinadas o conceito de *evapotranspiração potencial*. Posteriormente constatou-se que a equação de Penman pode representar adequadamente a evapotranspiração potencial não apenas em climas como o de Inglaterra (frio e húmido), mas também em climas quentes e em regiões semi-áridas (Doorembos e Pruitt, 1992).

No estabelecimento da equação (4.1), Penman baseou-se na admissão de que, quando a superfície evaporante se encontra molhada, é lícito considerar que a pressão de vapor nessa superfície corresponde à pressão de vapor saturante à temperatura a que a mesma se encontra. Deste modo, a aplicação da equação de Penman a cobertos vegetais rasteiros admite que esses cobertos não sofrem quaisquer restrições hídricas e que a evaporação ocorre directamente a partir da superfície das folhas que se consideram molhadas.

Na realidade, o fluxo de vapor de água entre o coberto e a atmosfera tem origem, não na superfície das folhas, mas sim nas cavidades sub-estomáticas. Por outro lado, mesmo quando plenamente abastecido de água, nenhum coberto vegetal pode ser considerado molhado excepto após a queda de precipitação. Considerando ainda que o próprio coberto controla, através da abertura dos estomas, a taxa de evaporação facilmente se compreende que a equação de Penman deixe de ser aplicável sempre que se pretendam estimar as taxas reais de evaporação em cobertos vegetais enxutos, ou seja, quando se pretendam estimar taxas de transpiração.

No sentido de tornar aquela equação formalmente válida para qualquer tipo de coberto em qualquer estado de *stress* hídrico, Monteith introduziu, em 1963, na equação originalmente proposta por Penman, um conjunto de parâmetros de resistência que caracterizam a transferência de vapor de água entre o coberto e a atmosfera. Foi assim estabelecida a equação (4.2), usualmente referida como *Equação de Penman-Monteith* (Shuttleworth, 1979),

$$\lambda E_t = \frac{\Delta'(R_n - G) + \rho c_p \delta_e / r_a}{\Delta' + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (4.2)$$

em que

E_t é a taxa de transpiração do coberto

λ é o calor latente de vaporização da água

G é o fluxo de calor entre a atmosfera e o solo, convencionando-se positivo quando ocorre da atmosfera para o solo

ρ_a é a densidade do ar

c_p é o calor específico do ar a pressão constante

δ_e é o déficit de pressão de vapor da atmosfera

r_a é a resistência aerodinâmica

r_c é a resistência do coberto que depende, fundamentalmente, da resistência estomática (r_s) e do índice de área foliar (IAF).

4.2. Modelo unilaminar para a transpiração

O fluxo de vapor de água que constitui a transpiração tem origem, como se referiu, no interior das plantas, nas cavidades sub-estomáticas das folhas individuais, inicialmente através de um processo de difusão molecular que tem lugar até que o vapor de água libertado atinja a região turbulenta da atmosfera que envolve o coberto.

A partir daí, os remoinhos gerados sobretudo pelo retardamento do vento causado pela rugosidade da superfície, tornam-se os principais responsáveis pelo transporte de vapor de água (e também de energia e quantidade de movimento) entre o ar próximo da superfície e os níveis superiores da atmosfera. Este processo de transporte, bastante mais eficiente do que a difusão molecular, é designado por difusão turbulenta podendo ser mantido exclusivamente à custa da turbulência gerada pela rugosidade da superfície (convecção forçada) ou, mais usualmente, pelo efeito combinado da rugosidade da superfície e de um gradiente vertical de temperatura diferente do gradiente adiabático (convecção mista).

No caso do fluxo de vapor de água que se estabelece entre um coberto vegetal e um nível superior z na atmosfera, a resistência à transferência turbulenta de vapor de água é designada por *resistência aerodinâmica para o vapor de água* (r_{av}).

Em condições de neutralidade térmica da atmosfera a equação do perfil logarítmico do vento pode ser combinada com a equação de transporte de quantidade de movimento obtendo-se a expressão (4.3) (Shuttleworth, 1979) que permite o cálculo da resistência aerodinâmica para a quantidade de movimento (r_{aM})

$$r_{aM} = \frac{\left[\frac{\ln(z-d)}{z_0} \right]^2}{k^2 u_z} \quad (4.3)$$

em que u_z é a velocidade do vento medida ao nível z e k é a constante de von Karman ($=0.41$). Os parâmetros z_0 e d de (4.3) representam as características de rugosidade do coberto e referem-se, respectivamente, à altura de rugosidade e à altura de deslocamento do plano de referência, podendo ser determinadas experimentalmente com maior rigor através da medição do perfil de velocidade do vento (a título de exemplo ver Jaeger, 1985). Contudo, dado que habitualmente estas medições não se realizam, há necessidade de estimar aqueles parâmetros com base em características geométricas das superfícies. Entre estas características a altura média (h) dos elementos rugosos - as árvores, no caso dos cobertos florestais - é a mais utilizada, tendo diversos autores determinado experimentalmente valores para as relações z_0/h e d/h (ver Brutsaert, 1991), adoptando-se, no caso presente, os valores apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 - Valores adoptados para as relações entre os parâmetros de rugosidade (z_0 e d) e a altura (h) dos povoamentos de eucalipto (Campbell, 1977, cit. por Jones, 1992) e de pinheiro bravo (Jarvis *et al*, 1976).

	Eucalipto	Pinhal
z_0 / h	0.13	0.075
d / h	0.64	0.78

Nestas condições (neutralidade térmica) a convecção forçada é o mecanismo dominante de transporte vertical na atmosfera aceitando-se então a hipótese de semelhança que considera que a difusão turbulenta é igualmente eficaz no transporte quer de quantidade de movimento, quer de calor sensível ou vapor de água, pelo que se admite a igualdade das resistências aerodinâmicas para qualquer uma daquelas entidades (Thom, 1975), designando-se genericamente por *resistência aerodinâmica* (r_a) o valor único que corresponde a

$$r_{aM} = r_{aV} = r_{aH} = r_a \quad (4.4)$$

em que r_{aM} , r_{aH} , e r_{aV} se referem, respectivamente, à condutância aerodinâmica para a quantidade de movimento, calor sensível e vapor de água. Deste modo, a equação (4.3) pode ser utilizada para estimar $r_{aV} = r_a$.

A resistência aerodinâmica não é, contudo, a única resistência associada ao fluxo de vapor de água entre as plantas e a atmosfera. De facto, ao percurso inicial da água evaporada pelas plantas que ocorre por difusão molecular estão associadas, fundamentalmente, a resistência estomática e a resistência da camada limite da folha (Fig. 4.1). Dado que se considera que as resistências associadas às

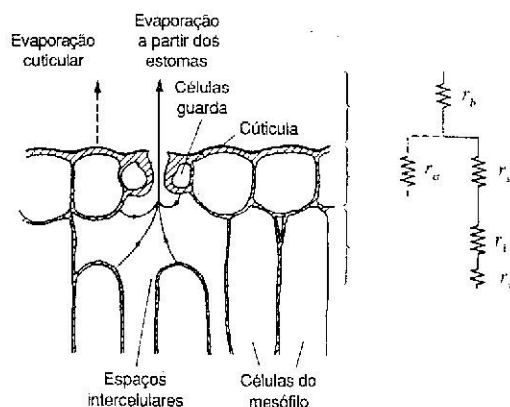


Fig. 4.1 - Percursos para a água evaporada a partir da superfície de uma folha e representação das resistências que lhes estão associadas: resistência da cutícula (r_c), dos espaços intercelulares (r_i), das paredes celulares (r_w), dos estomas (r_s) e da camada limite da folha (r_b) (adaptado de Jones, 1992).

folhas que compõem um coberto vegetal actuam em paralelo, podemos escrever

$$\frac{1}{r_s} = \sum_i \frac{1}{r_{si}} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{r_b} = \sum_i \frac{1}{r_{bi}} \quad (4.6)$$

em que r_s e r_b são, respectivamente, a resistência estomática e da camada limite do coberto, referindo-se o índice i à resistência da folha individual i .

Na prática tanto r_s como r_b podem ser estimadas conhecendo os respectivos valores médios - \bar{r}_s e \bar{r}_b - e o índice de área foliar do coberto (IAF) (Jones, 1992) através de

$$r_{s,b} = \frac{\bar{r}_{s,b}}{IAF} \quad (4.7)$$

Dado que a resistência da camada limite das folhas, actuando em série com r_s , é, em geral para todas as espécies cujas folhas possuem uma dimensão característica reduzida segundo a direcção do vento, bastante pequena face à resistência estomática (o que acontece quer com o pinheiro bravo, quer com o eucalipto) é usual, nestas condições, desprezar r_b . Contudo, sempre que tal não seja lícito, r_b pode ser estimada através de (4.7) sendo, para o efeito, \bar{r}_b calculada, quer através de equações que relacionam aquela resistência com a velocidade do vento ou com a dimensão característica da folha (Monteith e Unsworth, 1990, cit. por Jones, 1992) quer, preferencialmente, com base em medições da taxa de evaporação ou do balanço de energia em réplicas das folhas (para uma breve descrição destas técnicas ver Jones, 1992).

Relativamente à resistência estomática, um dos processos mais vulgarmente utilizados em medições de campo baseia-se no recurso a porómetros de difusão. Esta técnica foi adoptada neste trabalho, sendo descritos, mais adiante, os principais aspectos relacionados com a sua aplicação.

Admitindo que estas resistências actuam a uma *altura efectiva* (muito próxima do nível ($d+z_0$) correspondente à localização aparente da *sink* ou *sorvedouro* de quantidade de movimento) na qual tem origem o fluxo de calor latente entre o coberto e a atmosfera, pode reduzir-se o coberto vegetal a uma superfície homogénea (Fig. 4.2.A), mais ou menos extensa, susceptível de ser caracterizada por condições médias de temperatura e pressão de vapor para as quais r_s pode então, estando o coberto enxuto, ser considerada como a *resistência do coberto* (r_c) uma vez que, nessas condições, r_c está directamente relacionada com o controlo da transpiração pelo coberto, exercido através da abertura estomática (Shuttleworth, 1979). O significado físico dos conceitos de *resistência estomática do coberto* e de *resistência do coberto* não está ainda claramente compreendido (Brutsaert, 1991), sendo este assunto objecto de discussão actual. Thom (1972 cit. por Thom, 1975) terá sido

provavelmente o primeiro autor a estabelecer formalmente a diferença entre aqueles dois conceitos. Lhomme (1991) faz uma breve, mas interessante, resenha histórica sobre a *resistência do coberto*, referindo-se a diferentes processos para o seu cálculo.

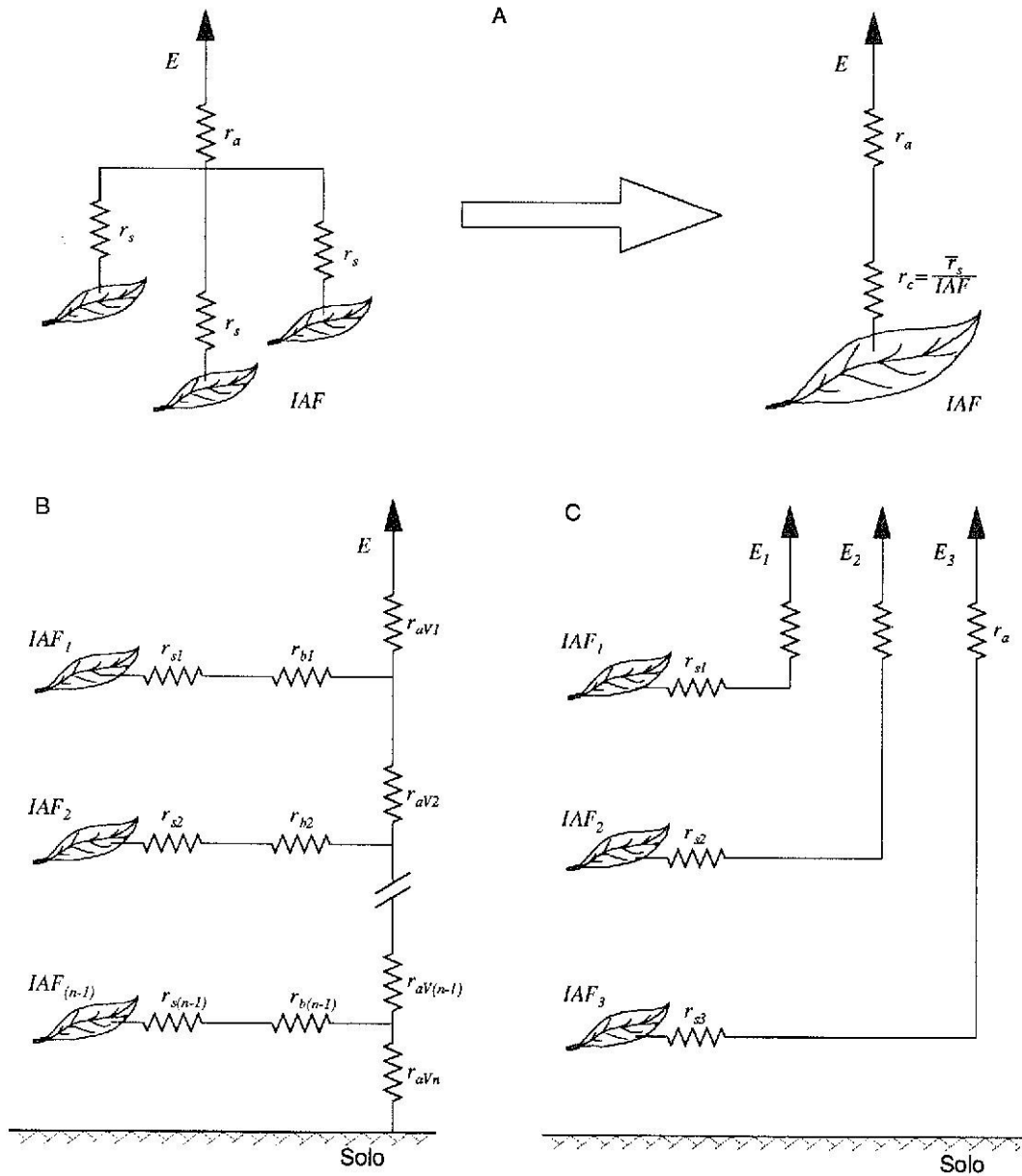


Fig. 4.2 - Representação esquemática de um coberto vegetal. (A) O modelo unilaminar da *folha gigante* pode ser utilizado para representar simplificadaamente um coberto vegetal tendo em conta o seu índice de área foliar (IAF) e admitindo a possibilidade de determinar um valor médio para resistência estomática (adaptado de Rose, 1984). (B) O mesmo coberto pode ser representado através de modelos multilaminares que o consideram constituído por um conjunto de n estratos diferentes (adaptado de Shuttleworth, 1979). Em (C) representa-se o modelo multilaminar aplicado ao eucaliptal. Para o estrato i , IAF_i é o respectivo índice de área foliar, r_{si} e r_{bi} são, respectivamente, as resistências estomática e da camada limite laminar do estrato e $r_{av(i)}$ é a resistência à difusão turbulenta de vapor de água entre o estrato i e o estrato $i-1$.

A aplicação da equação de Penman-Monteith (4.2) conforme a descrição feita, pressupõe pois, a representação do coberto como uma fina camada verde localizada a uma altura característica acima do solo na qual tem origem o fluxo de vapor de água associado à transpiração. Esta representação, usualmente designada por *modelo unilaminar*, constitui uma simplificação da realidade que põe de parte toda a complexidade e heterogeneidade dos cobertos vegetais e, em particular, das florestas, não tendo em conta as variações das condições microclimáticas que se verificam no seu interior e esquecendo ainda, a intrincada rede de resistências envolvida na partição da energia disponível no coberto em calor latente e calor sensível (Shuttleworth, 1979; Denmead, 1984). Deste modo, ao aproximar o coberto a uma *folha gigante*, o modelo unilaminar limita, em grande medida, a possibilidade de se obterem indicações sobre os mecanismos envolvidos no processo de transpiração pelo que tem sido alvo de diversas críticas.

4.3. Modelo multilaminar para a transpiração

Na tentativa de atenuar as limitações dos modelos unilaminares, têm vindo a ser apresentados *modelos multilaminares* que consideram os povoamentos vegetais constituídos por um conjunto, discreto ou contínuo, de camadas ou estratos horizontais e homogêneos. Cada um destes estratos absorve energia e troca calor sensível e latente com as camadas adjacentes ou com o meio envolvente (solo ou atmosfera) (Lhomme, 1991), Fig. 4.2.B. Os diversos estratos caracterizam-se por possuírem aspectos morfológicos (como a duração da área foliar) e fisiológicos (controlo estomático, sobretudo) próprios e ainda por condições microclimáticas particulares (temperatura, radiação e pressão de vapor).

A representação dos povoamentos vegetais através de modelos multilaminares, torna-se particularmente adequada a cobertos vegetais altos, como é o caso das florestas, permitindo conhecer, não apenas a taxa de evaporação de todo o coberto, mas também a forma como cada estrato (incluindo não só as várias camadas em que o copado pode ser dividido, como também as *camadas* constituídas pelo sub-bosque e pelo próprio solo) contribui para aquela taxa, além de permitir igualmente a caracterização do microclima no interior dos povoamentos através, por exemplo, do estabelecimento dos perfis de temperatura e humidade ao longo do copado, assumindo ainda um papel relevante no estudo da evaporação de cobertos parcialmente molhados (Raupach e Finningan, 1988; McNaughton e Jarvis, 1991).

Apesar de fornecerem uma imagem mais correcta da realidade, os modelos multilaminares nem sempre são de fácil aplicação dada a sua complexidade e a grande quantidade de informação necessária à sua operação (Shuttleworth, 1979);

por outro lado, é reconhecido que a própria teoria que lhes está subjacente (baseada nas relações fluxo-gradiente) tem uma validade limitada (Denmead e Bradley, 1985; Raupach e Legg, 1984; Lhomme, 1991).

Deste modo a decisão sobre o tipo de modelo a adoptar residirá sobretudo em, por um lado, pesar o acréscimo de realismo e a perda de simplicidade associados à utilização de modelos multilaminares e, por outro lado, ter em conta as condições de aplicação do modelo bem como os objectivos que se pretendem atingir (Raupach e Finnigan, 1988).

Embora os modelos multilaminares sejam, sob o ponto de vista descritivo, mais realistas, é usualmente aceite que os modelos unilaminares baseados na equação de Penman-Monteith constituem um processo capaz de fornecer estimativas aceitáveis das taxas de transpiração em especial, quando se trata de cobertos homogéneos e relativamente fechados (Stewart, 1984; McNaughton e Jarvis, 1984), pelo que se tornaria interessante a comparação das estimativas das taxas de transpiração no eucaliptal obtidas, quer através da equação (4.2), quer através de um modelo multilaminar. Neste sentido, adoptou-se um modelo multilaminar conceptual e estruturalmente semelhante ao apresentado por Roberts *et al* (1993), tendo-se considerado o copado do eucaliptal constituído por três estratos - superior (1), médio (2) e inferior (3) - (Fig. 4.2.C). De acordo com aquele autor a taxa de transpiração do povoamento pode ser estimada somando a contribuição de cada estrato avaliada ainda pela equação de Penman-Monteith embora reescrita sob a forma

$$\lambda E_{\dot{u}} = \frac{\Delta' R_{ni} + \rho C_p \delta_{ei} / r_{ai}}{\Delta' + \gamma \left(1 + \frac{r_{ci}}{r_{ai}} \right)} \quad (4.8)$$

em que

$E_{\dot{u}}$ é a taxa de transpiração do estrato i

R_{ni} é a energia líquida por unidade de área disponível no estrato i

δ_{ei} é o défice de pressão de vapor do ar ao nível do estrato i

r_{ci} tem um significado semelhante ao de r_c embora se refira ao estrato i

r_{ai} é a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor de água entre o estrato i e o nível de referência (nível ao qual são feitas as medições no topo do coberto das variáveis micrometeorológicas)

4.4. A aplicação dos modelos e o cálculo das taxas de transpiração

Embora na descrição feita dos modelos de transpiração adoptados se refira exclusivamente o conceito de *resistência*, do ponto de vista da aplicação destes modelos torna-se mais prático substituir a resistência pelo seu inverso, ou seja,

$$r = 1/g \quad (4.9)$$

designando-se g por *condutância*.

4.4.1 Condutância aerodinâmica

A resistência aerodinâmica pode ser calculada através de (4.3) que, tendo em conta a relação definida por (4.9), vem

$$g_a = \frac{k^2 u_z}{\left[\frac{\ln(z-d)}{z_0} \right]^2} \quad (4.10)$$

sendo g_a a *condutância aerodinâmica*.

No caso do modelo unilaminar esta condutância está associada ao fluxo de vapor de água entre o nível no qual se admite ter origem aquele fluxo (nível $d+z_0$) e o nível de referência (z) onde a velocidade do vento é medida.

Para o modelo multilaminar a complexidade da rede de resistências (ou condutâncias) que se admite corresponder à realidade (Fig. 4.2.B) determinou o estabelecimento de algumas simplificações considerando-se então que g_a , dada pela equação (4.10), representa a condutância aerodinâmica associada ao fluxo de vapor de água qualquer que seja o estrato onde esse fluxo tem origem (Fig. 4.2.C). Trata-se de facto de uma simplificação grosseira da realidade que, no entanto, se crê ter um impacto muito reduzido sobre as estimativas das taxas de transpiração uma vez que g_a é, no caso de cobertos altos e aerodinamicamente rugosos, de uma ordem de grandeza bastante superior à condutância do coberto assumindo esta última, assim, um papel predominante no controlo das perdas de água por transpiração (Beven, 1979; Stewart, 1984; Roberts *et al*, 1993).

4.4.2. Condutância do coberto

De acordo com as equações (4.7) e (4.9) podemos escrever

$$g_s = \overline{g_s I A F} \quad (4.11)$$

em que g_s representa a condutância estomática total do conjunto de folhas que

compõem o coberto e \bar{g}_s a condutância estomática média das folhas individuais. Considerando que g_s representa adequadamente a condutância do coberto (g_c), (4.11) pode ser reescrita sob a forma

$$g_c = \bar{g}_s I A F \quad (4.12)$$

A equação (4.12) põe em evidência o facto de as estimativas de g_c dependerem da nossa capacidade para estimar correctamente o índice de área foliar e, sobretudo, o valor médio da condutância estomática característico para o copado (no caso dos modelos unilaminares) ou para os diferentes estratos que o constituem (no caso dos modelos multilaminares) (Leverenz *et al*, 1982).

A precisão das estimativas do valor médio da condutância estomática está largamente dependente, por um lado, do tipo de aparelho utilizado e dos cuidados postos na realização das medições e, por outro lado, da intensidade e processo de amostragem adoptados (Turner, 1991; Jones, 1992).

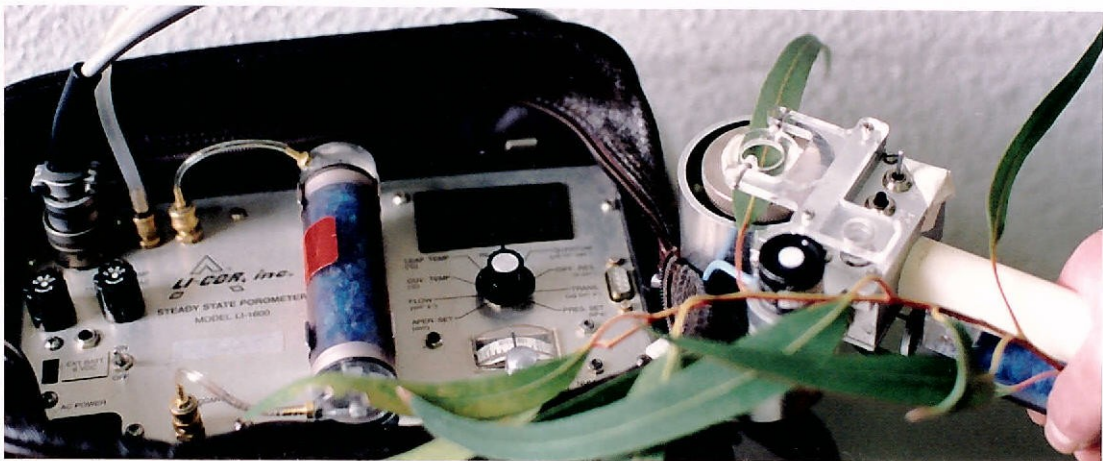


Fig. 4.3 - Porómetro utilizado nas medições de condutância estomática, tendo montada a câmara apropriada à realização de medições em folhas de eucalipto

Na realização destas medições foi utilizado um porómetro de difusão, em modo de balanço nulo (LI - COR Inc., Lincoln, Nebraska, U.S.A. mod. LI - 1600) (Fig. 4.3). No sentido de minimizar os erros de medição procurou-se manter o porómetro à sombra nos intervalos entre medições de modo a que as temperaturas da câmara e da folha fossem semelhantes; da mesma forma, para que a abertura estomática não fosse influenciada pela realização das próprias medições, tentou-se que estas fossem feitas no mais curto espaço de tempo possível, ao mesmo tempo que, antes de iniciar qualquer medição, a câmara era convenientemente agitada de modo a assegurar que a humidade do ar no seu interior fosse muito próxima da humidade do ar em torno da folha (Turner, 1991; Fanjul e Jones, 1982).

Dado que o eucalipto é uma espécie anfiestomática, em cada folha a resistência estomática foi medida em ambas as faces, sendo a condutância da folha igual à soma das condutâncias medidas em cada face.

Para realizar as medições no pinheiro bravo foi utilizada uma câmara cilíndrica (Fig. 4.4) na qual eram sistematicamente inseridas 4 agulhas o que corresponde a uma área foliar média de 12.606 cm².



Fig. 4.4 - Porómetro equipado com uma câmara cilíndrica para a realização de medições de condutância estomática em agulhas de pinheiro

O trabalho de porometria decorreu ao longo do período de Março a Junho, nos anos de 1992 e 1993. As medições realizadas em 1992 não puderam, no entanto, ser utilizadas uma vez que se verificou, posteriormente, que o aparelho utilizado apresentava algumas deficiências de funcionamento. Por este motivo, antes do início da realização de medições regulares em 1993, o porómetro que viria a ser utilizado, foi sujeito a uma revisão completa, tendo o sensor de humidade e o contador de fluxo sido recalibrados. A recolha dos dados de campo durante a Primavera de 1993 foi feita com a colaboração de André G. M. Claassen da Universidade de Wageningen e do Eng. José Tomé. Nesse ano

foram realizadas medições de condutância estomática em 4 dias no pinhal e 6 dias no eucaliptal. No entanto, devido às condições de instabilidade que se verificaram durante aquele período, dois dos 6 dias de medições realizadas no eucaliptal correspondem, não a dias completos de observação, mas apenas ao período do dia em que não ocorreu precipitação.

Em qualquer dos povoamentos, a posição das torres metálicas só permitiu o acesso a uma árvore (4). O número de folhas medidas foi estabelecido tentando conciliar a necessidade de garantir a representatividade das estimativas da condutância estomática com a realização de cada conjunto de medições num período de tempo tão curto quanto possível (aproximadamente 45 minutos em ambos os povoamentos) e com a autonomia das baterias do aparelho. Assim, enquanto que no pinhal as medições incidiram sobre um conjunto de 18 grupos de 4 agulhas, no eucaliptal foram medidas ambas as faces de 12 folhas, sendo a frequência de medição nos dois povoamentos bi-horária.

Uma vez estabelecido o número de folhas a amostrar, a sua selecção teve em conta os principais aspectos característicos das plantas que determinam a variabilidade associada aos valores da condutância estomática em condições de campo. Assim, no eucaliptal foram tidos em conta os efeitos quer da idade das folhas (Turner, 1991)

(4) - Na realidade a torre instalada no eucaliptal garantia acesso a 3 árvores embora em 2 dessas árvores apenas fosse possível aceder a parte da copa pelo que se centralizaram todas as medições na única árvore cuja totalidade da copa era acessível; do mesmo modo, também no pinhal se centralizou todo o trabalho de medição numa só árvore uma vez que os ramos acessíveis de um segundo pinheiro se encontravam em más condições.

quer da sua localização na copa (Roberts *et al*, 1992; Dolman e Van Den Burg, 1988) pelo que foram seleccionadas 4 folhas em cada um dos três estratos considerados, localizadas no interior e na periferia da copa. No povoamento de pinheiro bravo, apesar de reconhecida a influência de aspectos como o *estatuto social* das árvores, a posição hierárquica dos lançamentos, a localização na copa ou a idade das folhas sobre a variabilidade da condutância estomática (Leverenz *et al*, 1982; Beadle *et al*, 1985a; Granier *et al*, 1990; Saugier e Katerji, 1991), apenas este último aspecto foi tido em conta na selecção das agulhas a medir uma vez que o acesso limitado às copa dos pinheiros impediu que os restantes aspectos fossem considerados. Deste modo, os 18 grupos de agulhas foram igualmente repartidos pelas três classes de idade que o pinheiro bravo mantém. No Quadro 4.2 sintetizam-se os principais aspectos relativos às condições de medição da condutância

Quadro 4.2 - Alguns aspectos relativos às condições de medição da condutância estomática e aos procedimentos de amostragem adoptados nos dois povoamentos estudados

	Eucaliptal	Pinhal
Número de dias de observação	6	4
Dias com céu nublado	3/4/93; 19/5/93; 2/6/93	5/6/93
Dias com céu limpo	20/3/93;16/6/93; 26/6/93	27/3/93;15/4/93; 12/6/93
Número de árvores utilizadas nas medições	1	1
Medições		
frequência	bi-horária	bi-horária
duração	aprox. 45 min.	aprox. 45 min.
folhas medidas	12 (2 faces)	18
num. de medições	24	18
Critérios de amostragem das folhas	estrato (4 folhas x 3 estratos)	idade das agulhas

estomática e aos procedimentos de amostragem adoptados.

Os valores do *IAF* utilizados para estimar g_c através da expressão (4.12) foram determinados, pelo Eng. José Tomé no caso do eucaliptal, através da medição rigorosa da área foliar de 9 árvores abatidas para o efeito e seleccionadas de modo a que os valores obtidos representassem adequadamente o povoamento. As determinações feitas incluíram não apenas o *IAF* para o povoamento, mas também para os três estratos em que o copado foi dividido. Para o pinhal não foi possível realizar determinações semelhantes pelo que,

dada a inexistência de quaisquer outros estudos sobre a área foliar de povoamentos de pinheiro bravo em Portugal, se considerou o valor referido por Gash *et al* (1989) de 2.3 para o *IAF* de um povoamento da mesma espécie, embora com características algo diferentes.

4.4.3. Variáveis micrometeorológicas

Os diversos equipamentos referidos no capítulo 2 permitiram a medição contínua de todas as variáveis micrometeorológicas necessárias à operação dos modelos de transpiração. Com base nas medições realizadas e registadas pelos *data-loggers*, obtiveram-se os respectivos valores médios horários utilizados no cálculo das taxas de transpiração.

Os valores do défice de pressão de vapor foram calculados indirectamente com base nas temperaturas dos termómetros seco e molhado (T_d e T_w , respectivamente) dos psicrómetros utilizados, recorrendo à equação de Richards (Brutsaert, 1991) para o cálculo da pressão de vapor saturante à temperatura T

$$e_{sT} = 101325 \exp(13.3185tr - 1.976tr^2 - 0.6445tr^3 - 0.1299tr^4) \quad (4.13)$$

em que

$$tr = 1 - [373.15 / (273.15 + T)] \quad (4.14)$$

(conforme $T=T_w$ ou $T=T_d$, e_{sT} representa e_{sT_w} ou e_{sT_d}) e à equação de Regnault (Beer, 1990) para a determinação da pressão de vapor actual

$$e_a = e_{sT_w} - \gamma(T_d - T_w) \quad (4.15)$$

sendo o défice de pressão de vapor dado por

$$\delta_e = e_{sT_d} - e_a \quad (4.16)$$

A equação de Richards permite ainda, derivando em ordem a T , obter uma expressão para o cálculo do declive da curva que relaciona a pressão de vapor saturante com a temperatura do ar (T_d) (Brutsaert, 1991)

$$\Delta' = [373.15 e_{sT_d} / (273.15 + T_d)^2] (13.3185 - 3.952tr - 1.9335tr^2 - 0.5196tr^3) \quad (4.17)$$

Dado que em ambos os povoamentos estavam instaladas no solo placas de fluxo de calor, foi igualmente possível medir o fluxo de calor entre o solo e a atmosfera (G) utilizado no cálculo da diferença ($R_n - G$).

De acordo com a formulação apresentada para o modelo multilaminar (4.8) aplicado no eucaliptal, torna-se necessário o conhecimento, para cada estrato do copado, não apenas da radiação líquida disponível (R_{n_i}), como também do défice de pressão de vapor (δ_{e_i}).

A radiação líquida em cada estrato foi calculada recorrendo à lei de Beer (Ross, 1975; Landsberg, 1986 cit. por Roberts *et al*, 1993) através das expressões

$$R_{n1} = R_n \quad (4.18)$$

$$R_{n2} = R_n \exp(-k IAF_1) \quad (4.19)$$

$$R_{n3} = R_n \exp[-k (IAF_1 + IAF_2)] - G \quad (4.20)$$

em que IAF_1 e IAF_2 representam, respectivamente, o índice de área foliar dos estratos 1 (superior) e 2 (médio) e k o coeficiente de extinção para a radiação líquida. Este coeficiente foi estimado conjugando medições de R_n realizadas continuamente no topo do coberto e junto ao solo, ao longo de um período de cerca de 10 semanas (02/05/93 a 13/07/93). O défice de pressão de vapor para cada estrato (δ_{ei}) foi directamente estimado a partir de medições realizadas por psicrómetros instalados a vários níveis no eucaliptal (ver capítulo 2).

4.5. Resultados

4.5.1. Pinhal

Condutância estomática

A condutância estomática apresenta, no pinhal, um padrão característico de variação horária ao longo do dia (Fig. 4.5). No início da manhã ocorrem os valores máximos de g_s , verificando-se um decréscimo contínuo da condutância até ao final do dia (ao pôr-do-sol) quando se atingem os valores mínimos (entre cerca de 3 a 20 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Os máximos de g_s observados variam, aproximadamente, entre 35 e 58 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, verificando-se que os maiores valores ocorrem, aparentemente, no início da Primavera. Em dias nublados (5/6/93) a variação horária de g_s parece atenuar-se, ocorrendo então valores máximos e mínimos menos acentuados.

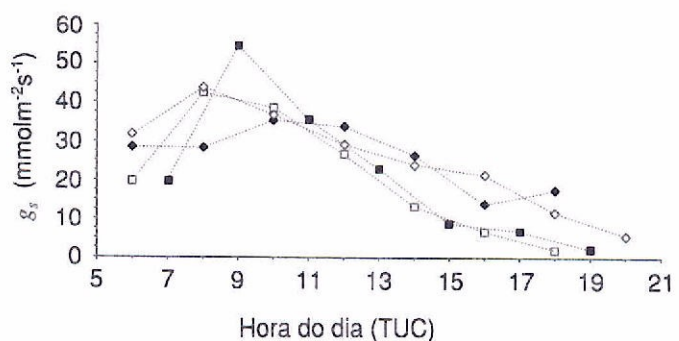


Fig 4.5 - Evolução horária da condutância estomática (g_s) no pinhal durante alguns dias da Primavera de 1993. (■) 27/Março; (□) 15/Abril; (●) 05/Junho; (○) 12/Junho.

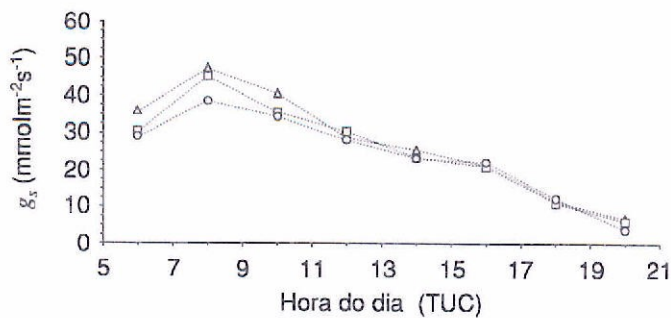


Fig. 4.6 - Evolução horária típica da condutância estomática no pinhal ao longo do dia 12/06/93 em agulhas com 1 (Δ), 2 (\square) e 3 (\circ) anos de idade.

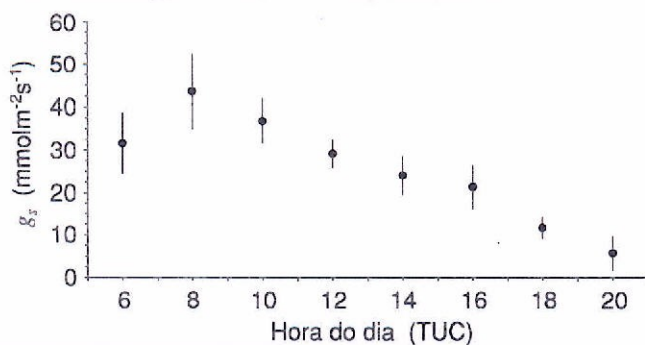


Fig. 4.7 - Variabilidade típica associada às médias horárias da condutância estomática (g_s) no pinhal ao longo do dia 12/06/93. As barras verticais representam $\pm 1s$.

Embora se detectem ligeiras diferenças na condutância estomática medida em agulhas de idades distintas (Fig. 4.6), essas diferenças são pouco marcadas ou mesmo nulas, sobretudo no fim do dia. Apesar de pouco acentuadas, as diferenças observadas na condutância de agulhas com 1, 2 ou 3 anos de idade reflectem-se na variabilidade associada aos valores médios de g_s (Fig. 4.7). As figuras 4.6 e 4.7 apresentam valores só para o dia 12/06/93 tentando tipificar comportamentos padrão da condutância estomática no pinhal. A totalidade dos valores obtidos nos quatro dias de observação apresenta-se no Quadro A.3.2 do Anexo 3.

Transpiração

As taxas diárias de transpiração no pinhal, estimadas pela equação de Penman-Monteith, variam entre 0.36 e 0.80 mm dia^{-1} , enquanto que os valores horários oscilam entre 0.002 e 0.08 mm h^{-1} (Quadro 4.3). Estes valores correspondem a uma utilização reduzida da energia disponível no coberto ($R_n - G$) para evaporação, como exemplificado na Fig. 4.8.

Quadro 4.3 - Taxas de transpiração no pinhal estimadas pela equação de Penman-Monteith. Os valores das taxas horárias referem-se à taxa horária média, bem como às taxas máxima e mínima observadas em cada dia.

Data	Taxas de transpiração			diárias (mm dia^{-1})
	horárias (mm h^{-1})			
	média	máx.	min.	
27/03/93	0.036	0.076	0.003	0.501
15/04/93	0.026	0.059	0.002	0.364
05/06/93	0.028	0.051	0.012	0.364
12/06/93	0.031	0.088	0.006	0.804

De facto, em dias de céu limpo apenas cerca de 10 % da energia disponível é consumida através da transpiração, tornando-se esta fracção ainda mais reduzida (aproximadamente 5 %) em situações de céu encoberto (5/6/93).

A relação entre as condutâncias aerodinâmica e do coberto é a característica de cobertos altos e aerodinamicamente rugosos, sendo g_a significativamente superior a g_c (em média, g_a é 118 vezes maior do que g_c), Fig. 4.8.

A condutância do coberto, dependente sobretudo da condutância estomática média do povoamento, segue um padrão diário semelhante a g_s , decrescendo à medida que a temperatura e o déficit de humidade específica aumentam.

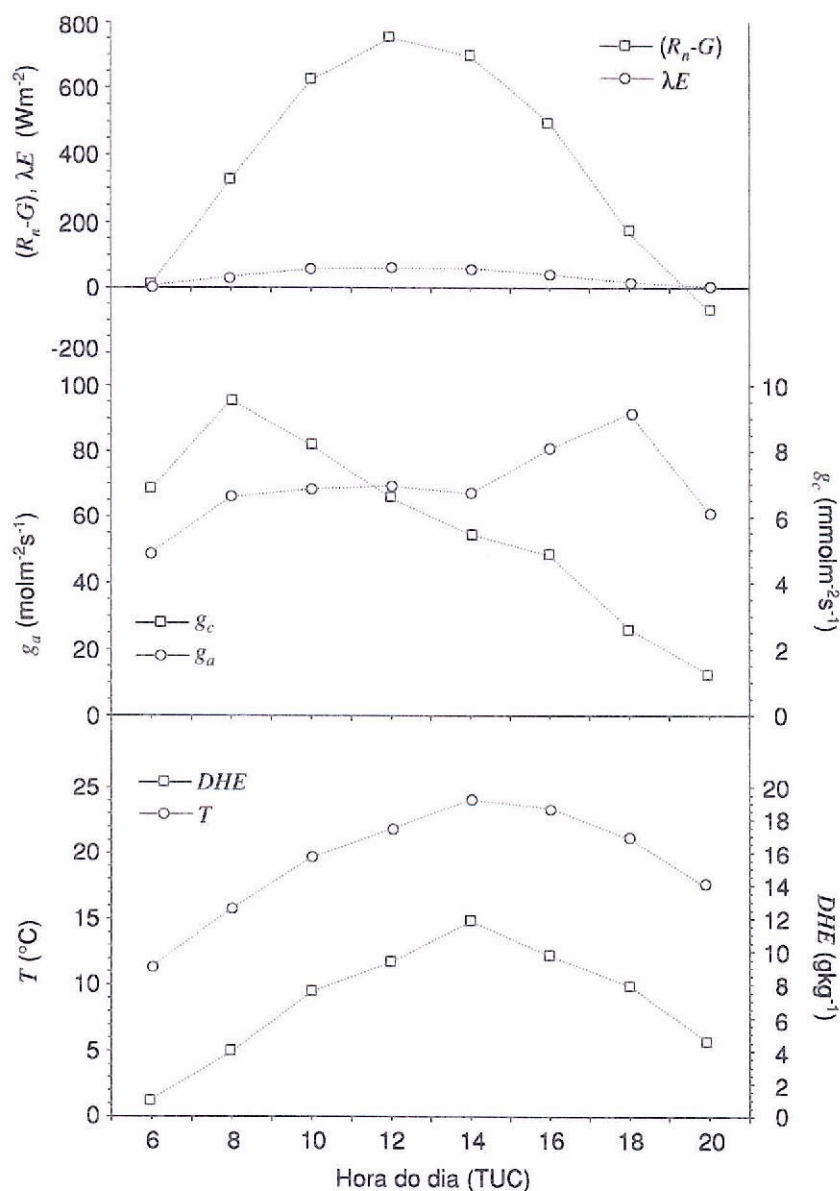


Fig. 4.8 - Transpiração no Pinhal em 12/06/93. Além do fluxo de calor latente (λE) resultante da transpiração, apresentam-se também, para o mesmo dia, os valores médios horários da energia líquida disponível no coberto (R_n-G), das condutâncias aerodinâmica (g_a) e do coberto (g_c), da temperatura (T) e do déficit de humidade específica do ar (DHE).

A totalidade dos valores medidos e cálculos realizados para os quatro dias de observação no pinhal estão explicitados no Quadro A.3.5 do Anexo 3.

4.5.2. Eucaliptal

Condutância estomática

À semelhança do que acontece com o pinheiro bravo, também a variação horária de g_s no eucaliptal segue um padrão característico com um máximo a meio da manhã e um mínimo ao fim da tarde (Fig. 4.9), mesmo quando a humidade do ar aumenta de novo. O valor máximo absoluto observado é de cerca de $113 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, registado em 3/4/93.

Contudo, à medida que os dias se tornam mais quentes e secos e a humidade no solo se reduz, os máximos tendem a atenuar-se verificando-se então valores ligeiramente inferiores a $50 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, ao mesmo tempo que o padrão de variação horária tende a esbater-se. Os valores mínimos estão sujeitos a uma variação mais limitada, oscilando entre, aproximadamente, 8 e $50 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, sendo maiores quando o défice de pressão de vapor do ar (δ_e) é menor, como aconteceu nos dias 3/4 e, em especial, 19/5 (Fig.

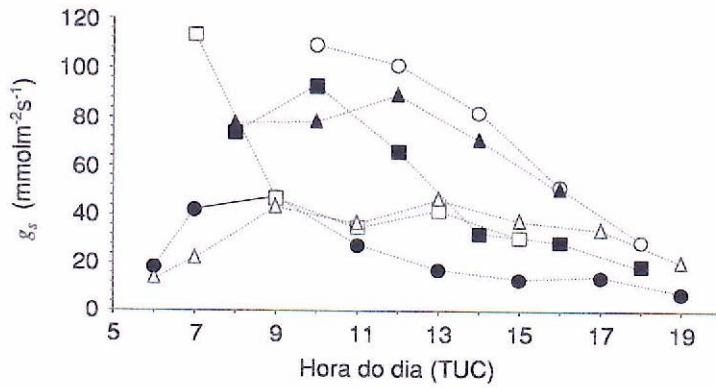


Fig. 4.9 - Evolução horária da condutância estomática (g_s) no eucaliptal em alguns dias da Primavera de 1993: (○) 20/Março; (□) 3/Abril; (△) 19/Maio; (■) 2/Junho; (●) 16/Junho; (▲) 26/Junho.

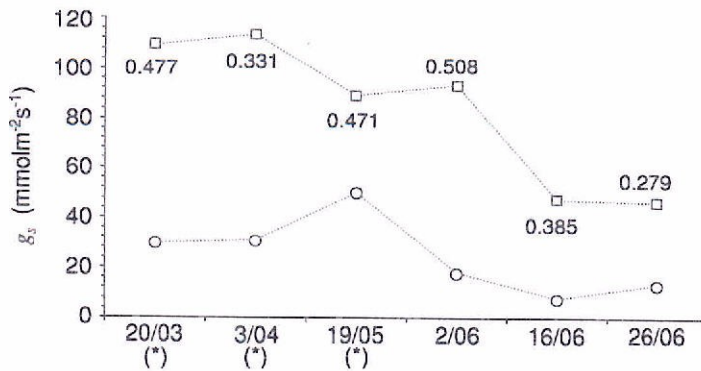


Fig. 4.10 - Valores extremos (máximo e mínimo diários representados, respectivamente, por quadrados e por círculos) de condutância estomática (g_s) no eucaliptal. Aos valores máximos de condutância foi associado o teor relativo de água disponível no solo para as plantas que se verificava na altura. O símbolo (*) assinala os dias de céu nublado.

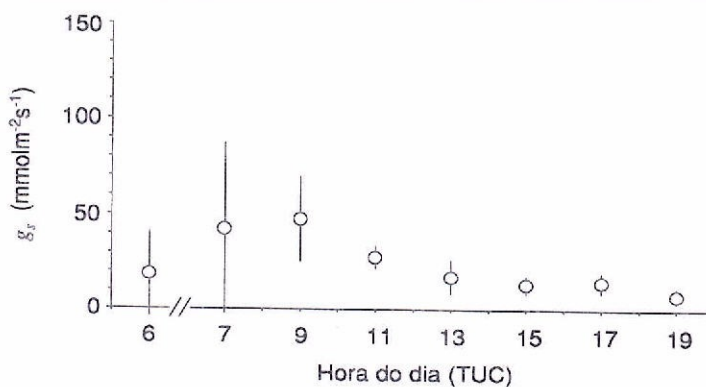


Fig. 4.11 - Variabilidade associada às médias horárias da condutância estomática (g_s) no eucaliptal ao longo do dia 16/06/93. As barras verticais representam $\pm 1 s$.

4.10). Por outro lado, a variabilidade associada aos valores médios de g_s é maior sobretudo nas primeiras horas da manhã, até o máximo diário da condutância estomática ser atingido. A Fig. 4.11 exemplifica esta situação para o dia 16/06/93.

Parecem existir diferenças entre os valores de condutância do estrato superior e os valores observados nos estratos médio e inferior, principalmente durante a manhã, com valores máximos menos acentuados e ocorrendo mais tarde nestes dois últimos estratos. A Fig. 4.12 exemplifica esta situação para o dia 16/06/93. A totalidade dos valores medidos para os 6 dias de observação são apresentados no Quadro A.3.1 do Anexo 3.

Transpiração

Os valores das taxas diárias de transpiração estimadas para o eucaliptal, quer pelo modelo unilaminar quer pelo modelo multilaminar, constam do Quadro 4.4. A aplicação do modelo unilaminar foi possível para cada um dos dias em que foram realizadas medições da condutância, embora nos dias 20/3/93, 3/4/93 e 19/5/93 essas medições se refiram apenas a parte do dia uma vez que dificuldades no funcionamento dos aparelhos no início do dia 20/3/93 e a ocorrência de precipitação durante a tarde dos dias 3/4/93 e 19/5/93, impediram que fossem realizadas medições ao longo de todo o período compreendido entre o nascer e o pôr-do-sol. As taxas de transpiração estimadas pelo modelo unilaminar variam entre 1.1 e 1.7 mm dia⁻¹, exceptuando o dia 3/4/93 em que o valor estimado é bastante mais baixo (0.32 mm dia⁻¹). Neste dia apenas 14 % da energia líquida disponível foi consumida através da transpiração enquanto que, nos restantes dias, o fluxo de calor latente associado à transpiração representou entre 17 % (26/6/93) a 36 % (20/3/93) da energia disponível no coberto. Por outro lado, as taxas horárias têm valores entre 0.016 e 0.3 mm h⁻¹.

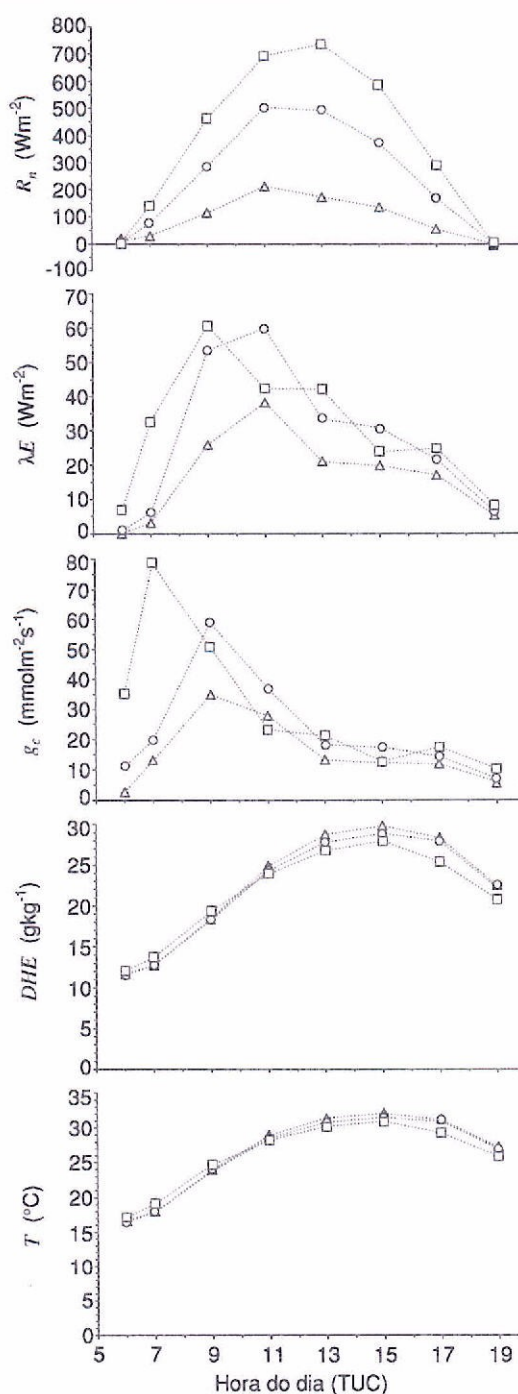


Fig. 4.12 - Transpiração (λE_i) no eucaliptal em 16/06/93 estimada pelo modelo multilaminar. Para o mesmo dia apresentam-se também os valores médios horários da energia líquida disponível (R_n), da condutância do coberto (g_c), da temperatura (T) e do déficit de humidade específica do ar (DHE) para os estratos superior (\square), médio (\circ) e inferior (\triangle).

Quadro 4.4 - Taxas de transpiração no eucaliptal estimadas pela equação de Penman-Monteith, através dos modelos uni e multilaminar . No modelo multilaminar, além das taxas de transpiração do coberto, apresentam-se ainda as taxas relativas aos diferentes estratos do copado. As taxas horárias e diárias são expressas, respectivamente, em mmh^{-1} e mmdia^{-1} .

Data	hora do dia (TUC)	Modelo				
		unilaminar	multilaminar			
			copa	estrato superior	estrato médio	estrato inferior
20/03/93	dia	1.545				
	10	0.174				
	12	0.300				
	14	0.246				
	16	0.122				
	18	0.034				
03/04/93	dia	0.329				
	7	0.038				
	9	0.061				
	11	0.054				
	13	0.062				
19/05/93	dia	1.126	1.018	0.471	0.357	0.190
	8	0.121	0.088	0.070	0.014	0.005
	10	0.122	0.119	0.059	0.044	0.015
	12	0.165	0.142	0.068	0.045	0.027
	14	0.170	0.158	0.054	0.062	0.042
	16	0.090	0.090	0.038	0.039	0.014
02/06/93	dia	1.704	1.525	0.588	0.558	0.379
	8	0.089	0.070	0.054	0.014	0.002
	10	0.261	0.228	0.097	0.090	0.041
	12	0.243	0.216	0.068	0.075	0.074
	14	0.158	0.138	0.054	0.046	0.038
	16	0.121	0.118	0.038	0.050	0.028
16/06/93	dia	1.734	1.640	0.658	0.608	0.374
	6	0.016	0.012	0.010	0.001	0.000
	7	0.074	0.061	0.048	0.008	0.004
	9	0.224	0.206	0.089	0.078	0.038
	11	0.210	0.206	0.062	0.088	0.056
	13	0.150	0.142	0.062	0.049	0.030
	15	0.113	0.110	0.035	0.045	0.029
	17	0.094	0.093	0.036	0.032	0.025
	19	0.029	0.029	0.012	0.009	0.008
26/06/93	dia	1.316	1.244	0.464	0.490	0.290
	6	0.016	0.012	0.004	0.004	0.004
	7	0.037	0.032	0.012	0.013	0.006
	9	0.135	0.112	0.038	0.050	0.023
	11	0.136	0.140	0.046	0.052	0.042
	13	0.132	0.124	0.051	0.045	0.028
	15	0.118	0.112	0.043	0.044	0.024
	17	0.090	0.090	0.038	0.034	0.018
	19	0.026	0.031	0.010	0.014	0.008

A aplicação do modelo multilaminar restringiu-se aos dias 19/5/93, 2/6/93, 16/6/93 e 20/6/93 dado que apenas estes dias se incluem no período (2/5 a 13/7/93) durante o qual se realizaram medições contínuas de temperatura e humidade no interior do copado, necessárias à operação do modelo. As taxas diárias de transpiração obtidas por este modelo são inferiores, entre 5 a 10 %, às estimadas pelo modelo unilaminar (Quadro 4.4). Conforme exemplifica a Fig. 4.12 para o dia 16/06/93, a contribuição relativa dos vários estratos para as taxas horárias de transpiração é significativamente diferente. O estrato inferior apresenta, normalmente, as taxas mais baixas, independentemente da hora do dia considerada. Os estratos médio e superior apresentam diferenças entre si aparentemente mais pequenas, sobretudo na segunda metade do dia. Em ambos os estratos as taxas horárias máximas ocorrem a meio/fim da manhã em consonância com os valores máximos da condutância estomática e da radiação líquida. O estrato superior evidencia uma relação mais nítida entre as taxas horárias de transpiração e os correspondentes valores médios horários de g_s . A totalidade dos valores medidos e calculados para os 6 dias de observações no eucaliptal pelos modelos unilaminar e multilaminar são apresentados, respectivamente, nos Quadros A.3.3 e A.3.4 do Anexo 3.

O microclima no interior do copado

Conforme referido no capítulo 2, a instalação de um conjunto adicional de equipamentos permitiu, por um lado, estudar a atenuação da radiação líquida pelo copado do eucaliptal e determinar o coeficiente de extinção (k) para R_n . Por outro lado, foi possível caracterizar os perfis de temperatura e humidade ao longo da copa bem como dispôr dos valores do défice de pressão de vapor, para cada estrato, necessários à aplicação do modelo multilaminar de transpiração.

O valor médio horário do coeficiente de extinção, obtido para o período 02/05/93-13/07/93, varia ao longo do dia, acompanhando a variação da altura do sol, com um mínimo ao fim da manhã e máximos ao nascer e pôr-do-sol (Fig. 4.13). O seu valor médio global é de 0.557 ± 0.246 .

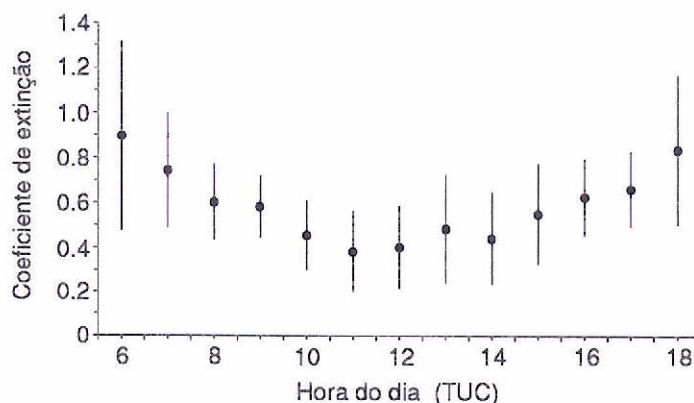


Fig. 4.13 - Variação horária média do coeficiente de extinção para a radiação líquida no eucaliptal, considerando um índice de área foliar de 3.168. As barras verticais representam $\pm 1 s$.

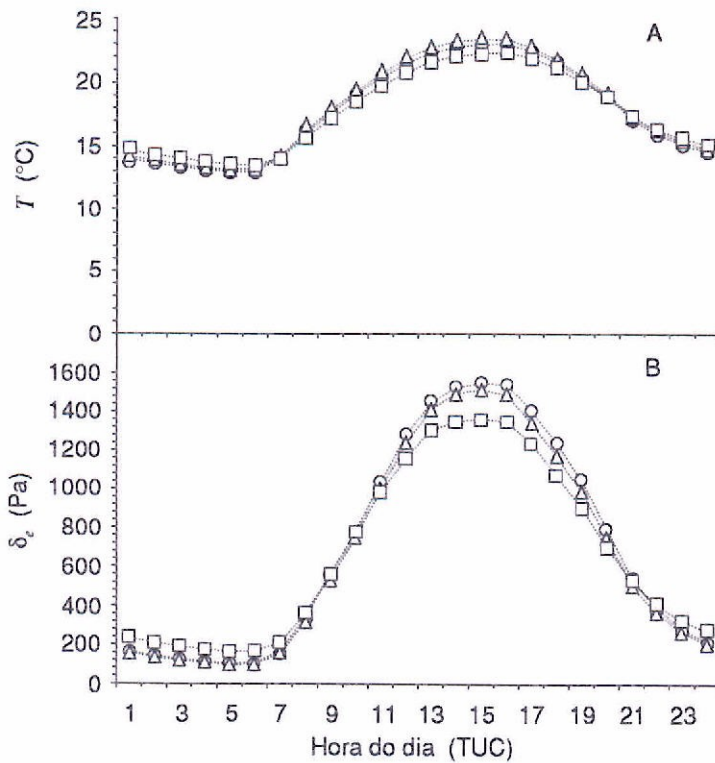


Fig. 4.14 - Evolução horária média (A) da temperatura do ar (T) e (B) do déficit de pressão de vapor (δ_v) para os três estratos do copado do eucaliptal (\square estrato superior; \circ estrato médio; \triangle estrato inferior).

longo do dia semelhante ao da temperatura média do ar (Fig. 4.14.B) o que se traduz igualmente pela inexistência de diferenças acentuadas entre estratos, como a Fig. 4.15 tenta exemplificar melhor para o dia 16/06/93.

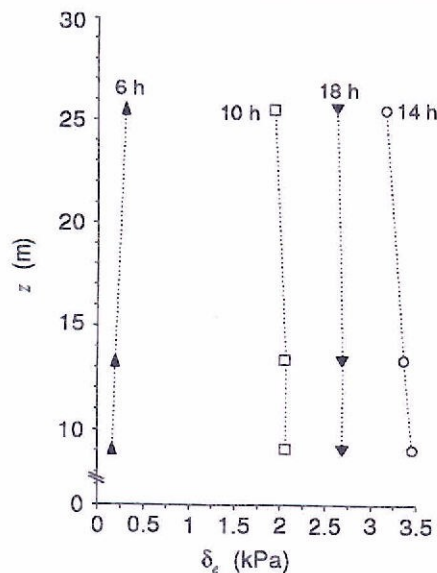


Fig. 4.15 - Perfis verticais do déficit de pressão de vapor (δ_v) observados no eucaliptal em diferentes horas do dia 16/06/93.

A análise da evolução horária da temperatura média do ar, durante o período 02/05/93-13/07/93, revelou diferenças pouco marcadas entre os três estratos verificando-se, no entanto, que durante a noite a temperatura no topo do coberto é ligeiramente superior à temperatura no interior do mesmo, enquanto que durante o dia se verifica o contrário (Fig. 4.14.A). Os valores médios do déficit de pressão de vapor, para o mesmo período de observação, apresentam um padrão de variação ao

5. Discussão

Eucaliptal

Desde que se constatou a capacidade das plantas em regularem as trocas gasosas com a atmosfera, que o papel dos estomas no controlo da transpiração tem sido objecto de intensa investigação e contínuo debate reconhecendo-se, hoje em dia, a importância que aquele controlo pode assumir, sobretudo em cobertos vegetais aos quais está associada uma condutância aerodinâmica elevada, como é o caso da generalidade das florestas (Stewart, 1984). Através de mecanismos fisiológicos, a abertura estomática é ajustada em resposta a um conjunto de condições ambientais entre as quais assumem particular destaque, especialmente em climas caracteristicamente mediterrânicos, a água disponível no solo para as plantas e o défice de pressão de vapor entre as folhas e o ar envolvente (Calder, 1982; Schulze, 1986a; Turner, 1991; Meinzer, 1993). A generalidade das espécies reage a défices de pressão de vapor crescentes ou a situações de *stress* hídrico através da redução da condutância estomática (ver, por exemplo, Gollan *et al*, 1985; Dolman e Van Den Burg, 1988 ou Pereira *et al*, 1987). O fornecimento limitado de água às plantas tem ainda como consequência uma progressiva redução dos valores máximos diários da condutância. No Verão, actuando em conjunto, estes dois factores tendem a causar uma redução acentuada da abertura dos estomas. Apesar de algumas espécies de eucaliptos manifestarem uma fraca relação entre a condutância estomática e o défice de pressão de vapor da atmosfera (Colquhoun *et al*, 1984 cit. por Calder,

1992), o *E. globulus* revela uma sensibilidade marcada à humidade do ar, posta em evidência pelos estudos realizados por Pereira *et al* (1986, 1987). O padrão de variação diária de g_s observado no presente estudo (Fig. 4.9) para o eucalipto é semelhante ao descrito, não só por aqueles autores para o *E. globulus*, como também por Colquhoun *et al* (1984, cit. por Calder, 1992) para *E. wandoo* e por Roberts e Rosier (1993) para *E. tereticornis* e *E. camaldulensis* e ainda por diversos outros autores para um grande número de espécies (ver Jones, 1992), verificando-se que, durante a Primavera, o máximo diário da condutância ocorre quando o défice de humidade do ar ainda não é acentuado (início ou meio da manhã). Atingido o valor máximo, a condutância reduz-se progressivamente até ao final do dia observando-se que, apesar do decréscimo do défice de pressão de vapor que normalmente ocorre naquele período do dia, a condutância não recupera os valores observados durante a manhã para os mesmos défices de pressão de vapor. Na origem deste fenómeno de histerese associado à resposta dos estomas à humidade do ar poderão estar alterações do balanço hormonal nas folhas entre a manhã e o fim da tarde (Turner, 1986; Schulze, 1986b; Pereira *et al*, 1987).

Embora este padrão de variação diária de g_s se tenha mantido ao longo de toda a Primavera, os valores máximos diários de condutância ocorrem progressivamente mais cedo e sofrem uma atenuação sensível, à medida que o estado de secura do solo aumenta (Figs. 4.9 e 3.5), tornando-se bastante reduzida a amplitude de variação de g_s ao longo do dia no início do Verão. Tal como se referiu, esta redução marcada de g_s resulta também da ocorrência de défices de pressão de vapor sucessivamente mais acentuados (Fig. 2.3).

Diversos autores fazem referência a diferenças na condutância estomática entre folhas de diferentes estratos ou zonas da copa (Beadle *et al*, 1985a; Turner, 1991; Green, 1993; Roberts e Rosier, 1993), relacionando essas diferenças com o ensombramento causado pelo(s) estrato(s) superior(es) da copa. Dado que não se observou, no eucaliptal, uma distinção marcada dos valores do défice de pressão de vapor do ar entre o topo do coberto e os níveis inferiores, as diferenças que parecem existir entre os valores da condutância do estrato superior e os valores observados nos estratos médio e inferior (Fig. 4.12), dever-se-ão quase exclusivamente ao ensombramento a que estes dois estratos estão sujeitos. De facto, estas diferenças são maiores sobretudo no início do dia quando a atenuação da radiação pelo coberto é também maior (valores do coeficiente de extinção mais elevados, Fig. 4.13), verificando-se então que o máximo de g_s ocorre claramente mais cedo no estrato superior, enquanto que os estratos médio e inferior reagem sucessivamente mais lenta e tardiamente.

É também no estrato superior que ocorre o maior decréscimo no valor máximo de g_s à medida que os dias se tornam mais secos e quentes, sendo provável que seja aquele estrato o principal responsável pelo padrão de variação horária e sazonal da condutância estomática média do povoamento. Com efeito, a variabilidade associada aos valores médios de g_s , evidenciada na Fig. 4.11, é um reflexo das diferenças entre

estratos, em particular, da existência de valores de g_s marcadamente mais altos no estrato superior no início da manhã (Fig. 4.12). Com a redução dos valores máximos de g_s e com o esbatimento do padrão de variação da condutância que se verifica com o avanço da Primavera, aquela variabilidade reduz-se significativamente (Quadro A.3.1, Anexo 3).

Os valores de condutância estomática observados no eucaliptal são inferiores aos referidos por outros autores, em situações de campo, tanto para o *E. globulus*, como para outras espécies de eucaliptos (Quadro 5.1), o que se deverá à fraca disponibilidade de água no solo que se verificou ao longo de quase todo o período de estudo em resultado da queda reduzida de precipitação. Durante a Primavera de 1993 o teor relativo de água disponível no solo para as plantas (*TRD*) oscilou entre 0.3 e 0.5 tendo, a partir do mês de Junho, sofrido um decréscimo contínuo até se

Quadro 5.1 - Alguns valores de condutância estomática observados em diferentes espécies de eucaliptos e pinheiros. Todos os valores referidos que, originalmente, não se encontravam expressos nas unidades agora utilizadas foram convertidos tendo em conta a relação $40 \text{ mmolm}^{-2}\text{s}^{-1} = 1 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ (estabelecida considerando uma temperatura de 25°C e a pressão atmosférica de 100 kPa).

Espécie	Condutância estomática ($\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$)		Local	Referência
	valor máximo	valor mínimo		
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	400	50	Kerala, Índia	Kallarackal, 1992
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	500	50	Puradai, Índia	Roberts e Rosier, 1993
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	700	50	Puradai, Índia	Roberts e Rosier, 1993
<i>Eucalyptus globulus</i>	40-400	0-100	Sobreda da Caparica, Portugal	Pereira <i>et al</i> , 1986
<i>Pinus pinaster</i>	120-532	12-192	Les Landes, França	Berbigier <i>et al</i> , 1991
<i>Pinus pinaster</i>	80-120	64	Les Landes, França	Granier <i>et al</i> , 1990
<i>Pinus resinosa</i>	128			Waring, 1976 cit. por Granier <i>et al</i> , 1990
<i>Pinus resinosa</i>	53-80	24-44	Lake Tomahawk, EUA	Pereira e Kozlowski, 1977
<i>Pinus resinosa</i>	129 -ag. do ano 93 -ag. 1 ano 46 -ag. 2 anos 44 -ag. 3 anos 36 -ag. 4 anos			Waggoner e Turner, 1971 cit. por Jarvis <i>et al</i> , 1976
<i>Pinus sylvestris</i>	136			Whitehead, 1984 cit. por Granier <i>et al</i> , 1990
<i>Pinus sylvestris</i>	200-280		Thetford Forest, GB	Beadle <i>et al</i> , 1985
<i>Pinus sylvestris</i>	88.4-167.2	24-50	Thetford Forest, GB	Roberts <i>et al</i> , 1982
<i>Pinus banksiana</i>	40-80		Lake Tomahawk, EUA	Pereira e Kozlowski, 1977
<i>Pinus ponderosa</i>	42			Running, 1974 cit. por Jarvis <i>et al</i> , 1976

anular no início de Setembro. Em estudos realizados na Índia, Roberts e Rosier (1993) observaram, numa plantação de *E. tereticornis*, valores máximos de g_s entre

cerca de 50 a 500 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e mínimos entre 50 e 300 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, enquanto que Kallarackal (1992) refere, para a mesma espécie e na mesma região, valores máximos de, aproximadamente, 400 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e mínimos de cerca de 50 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Por outro lado, Pereira *et al* (1986), num estudo com *E. globulus* que decorreu na *Quinta de São Pedro* (aproximadamente 55 km a Noroeste da *Herdade da Espirra*), observou valores máximos absolutos de 400 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, durante o Inverno, enquanto que no Verão a condutância máxima oscilou entre, aproximadamente, 60 e 160 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$, sendo os valores mínimos inferiores a 20 $\text{mmolm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Os valores relativamente baixos de g_s observados no eucaliptal traduzem, como se referiu, a capacidade do *E. globulus* em controlar eficazmente as perdas de água por transpiração em condições desfavoráveis do ponto de vista hídrico. É natural, portanto, que as taxas de transpiração estimadas, tanto pelo balanço hidrológico como pela equação de Penman-Monteith, sejam reduzidas quando comparadas com as taxas máximas de transpiração referidas para diversas espécies de eucalipto (Quadro 5.2). Contudo, estes resultados são consistentes com os obtidos por Roberts e Rosier (1993), utilizando um modelo multilaminar baseado na equação de Penman-Monteith e por Calder *et al* (1992), recorrendo à utilização de deutério como marcador, que, em condições de acentuada secura do ar e de disponibilidade limitada de água para as plantas, obtiveram estimativas de E_t reduzidas, nalguns casos mesmo inferiores a 1 mmdia^{-1} , em plantações de *E. tereticornis* e *E. camaldulensis*. Por outro lado, em circunstâncias mais favoráveis, são vários os autores que referem taxas de transpiração entre cerca de 3 a 6 mmdia^{-1} , não só para aquelas espécies (Roberts e Rosier, 1993; Calder *et al*, 1992; Kallarackal, 1992) como também para *E. maculata* (Dunin e Mackay, 1982; McIlroy e Dunin, 1982) e para florestas mistas de *E. marginata* e *E. calophylla* (Sharma, 1984), duas espécies cujo controlo estomático da transpiração parece ser diminuto (Colquhoun *et al*, 1984 cit. por Calder, 1992).

A comparação das taxas de transpiração estimadas quer pelo balanço hidrológico quer pela equação de Penman-Monteith (modelo unilaminar) revelou, como se referiu, algumas diferenças postas em evidência na Fig. 5.1 (Quadro A.5.1, Anexo 5). Embora as taxas estimadas por ambos os métodos possam, para os dias 20/3 e 3/4/93, ser consideradas semelhantes (diferem entre si de 12 a 17 %), o mesmo não acontece para os restantes dias. As maiores discrepâncias entre as estimativas de E_t obtidas por estes métodos verificaram-se em 19 de Maio e 2 de Junho tendo sido, nesses dias, mais elevadas as taxas estimadas pelo balanço hidrológico. Uma possível explicação para estas diferenças baseia-se no facto de estes dois métodos serem normalmente aplicados numa escala temporal distinta, ou seja, enquanto que o balanço hidrológico fornece estimativas das taxas de evapotranspiração para períodos mais ou menos longos ou de taxas "médias" diárias nesses períodos, o método de Penman-Monteith é usualmente utilizado numa base horária no sentido de obter taxas horárias ou diárias de transpiração que, necessariamente, reflectem as condições ambientais

Quadro 5.2 - Taxas de transpiração observadas em algumas espécies de eucaliptos e de pinheiros. São também referidos os valores da precipitação bruta anual (valores médios anuais ou valores observados nos anos em que decorreram os vários estudos) para cada local, bem como, o tipo de método utilizado na determinação das taxas de transpiração: (1) equação de Penman-Monteith (unilaminar), (1) equação de Penman-Monteith (multilaminar), (3) balanço hidrológico, (4) uso de marcadores, (5) lísimetria, (6) fluxo de seiva, (7) *razão de Bowen*, (8) *método das árvores cortadas*.

Espécie	Taxa de transpiração		Precipitação bruta anual (mm ano ⁻¹)	Método utilizado	Local	Referência
	diária (mm dia ⁻¹)	anual (mm ano ⁻¹)				
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	5.51-8.63		2000	1	Kerala, Índia	Kallarackal, 1992
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0.8 - 6.0		1000	2	Puradal, Índia	Roberts e Rosier, 1993
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0.81 - 3.33		800	4	Devabal, Índia	Calder <i>et al</i> , 1992
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	0.24 - 3.95		800	4	Puradal, Índia	Calder <i>et al</i> , 1992
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	7.35		800	4	Dandupalya, Índia	Calder <i>et al</i> , 1992
<i>Eucalyptus tereticornis</i>		918	986	3	Puradal, Índia	Harding <i>et al</i> , 1992
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	0.8 - 5.0		1000	2	Puradal, Índia	Roberts e Rosier, 1993
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	1.77 - 3.35		800	4	Hosakote, Índia	Calder <i>et al</i> , 1992
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		845	896	3	Devabal, Índia	Harding <i>et al</i> , 1992
		764	826			
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>		411	464	3	Hosakote, Índia	Harding <i>et al</i> , 1992
<i>Eucalyptus globulus</i>		347.5	1300		Nilgiris, Índia	Samraj e Sharda, 1986
<i>Eucalyptus maculata</i>	3.5 - 7.1			5	Batemans Bay, Austrália	Dunin e Mackay, 1982
<i>Eucalyptus marginata</i> + <i>Eucalyptus calophylla</i>	2.2 - 2.9	923	1100	3	Collie, Austrália	Sharma, 1984
<i>E. rossii</i> + <i>E. dives</i> + <i>E. maculosa</i> + <i>E. rubida</i>		638 (3) 501 (3) 574 (3)	895 870 750	3	Lidsdale, Austrália	Pilgrim <i>et al</i> , 1982
<i>Eucalyptus maculata</i>	1.12 - 4.94 1.11 - 4.38 1.06 - 3.83		1100	5 3 7	Batemans Bay, Austrália	McIlroy e Dunin, 1982
<i>Pinus pinaster</i>	3.6 (1)			6	Les Landes, França	Granier <i>et al</i> , 1990
<i>Pinus pinaster</i>	0.12 - 3.5		932	6	Les Landes, França	Loustau <i>et al</i> , 1990
<i>Pinus pinaster</i>	0.87 - 2.6		932	6	Les Landes, França	Diawara <i>et al</i> , 1991
<i>Pinus sylvestris</i>	0.88 - 1.18 1.67			3 8	Thetford Forest, GB	Roberts <i>et al</i> , 1982
<i>Pinus sylvestris</i>		352.8 (2)	595.1		Thetford Forest, GB	Gash e Stewart, 1977
<i>Pinus nigra</i>	1.09 2.31			3 8	Thetford Forest, GB	Roberts <i>et al</i> , 1982
<i>Pinus radiata</i>	1.9 - 4.7			5	Mt. Gambier, Austrália	Holmes e Olszyczka, 1982
<i>Pinus radiata</i>		627 427	871 842	3	Lidsdale, Austrália	Pilgrim <i>et al</i> , 1982
<i>Pinus elliottii</i>	1 - 5 11 (1)			5	Austin Cary Forest, E.U.A.	Riekerk, 1985

(1) Taxas máximas observadas.

(2) Transpiração das árvores e do sub-bosque.

(3) Transpiração e interceptação.

particulares (micrometeorológicas em especial) verificadas num período de tempo muito mais curto (algumas horas apenas). Com efeito, naqueles dois dias o céu tornou-se gradualmente mais nublado (tendo mesmo ocorrido chuva fraca durante um breve período da tarde do dia 19/5) o que determinou uma queda acentuada dos valores de g_s a partir do fim da manhã com a consequente redução das taxas de transpiração relativamente às taxas médias estimadas pelo balanço hidrológico para os períodos de 1/5 a 19/5 e 19/5 a 4/6.

Também nos dias 16 e 26 de Junho se observaram diferenças, embora mais

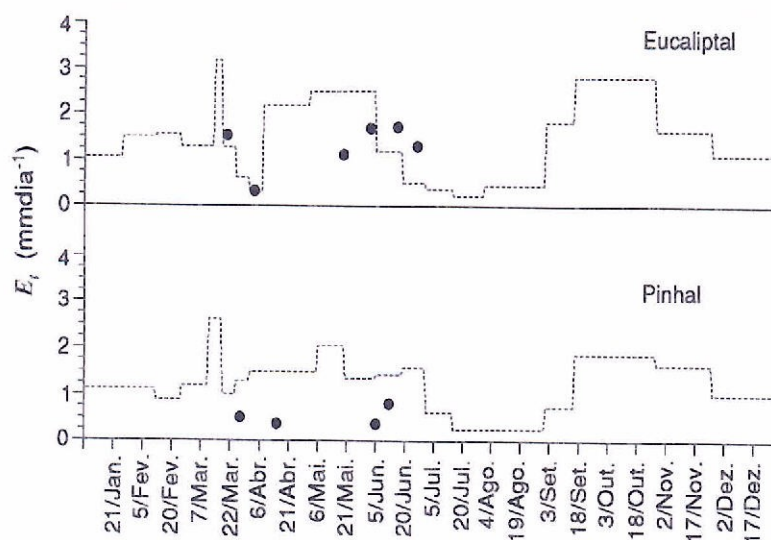


Fig. 5.1 - Transpiração (E_t) no eucaliptal e no pinhal estimada pelos métodos do balanço hidrológico (linhas) e de Penman-Monteith (modelo unilaminar) (pontos) durante 1993.

reduzidas, entre as taxas diárias de transpiração estimadas pelos dois métodos. Neste caso são, no entanto, as taxas estimadas pela equação de Penman-Monteith as mais elevadas. Aparentemente estas diferenças poderão dever-se à eventual possibilidade de os eucaliptos explorarem a água armazenada no solo a uma profundidade superior a 1.8 m e/ou à utilização directa de água a partir de uma toalha freática. Nestas circunstâncias, as taxas de transpiração estimadas pelo balanço hidrológico seriam então subestimativas. A primeira hipótese parece, contudo, pouco plausível dado o facto do *E. globulus* desenvolver um sistema radicular relativamente superficial (decrecendo abruptamente a densidade de raízes abaixo dos 0.7 a 0.9 m de profundidade, Fabião, 1986 cit. por Alves *et al*, 1990), admitindo-se que as raízes que atingem maior profundidade só assumem um papel importante durante o Verão, em condições de secura acentuada, permitindo nessa altura assegurar a sobrevivência das plantas (Rose e Sharma, 1984; Pereira e Pallardy, 1989 cit. por Alves *et al*, 1990). A possibilidade de as plantas acederem a lençóis freáticos, utilizando directamente a água desses lençóis tem sido verificada em diversas ocasiões (Carbon

et al, 1981 e Greenwood *et al*, 1985 cit. por Calder, 1992; Pereira *et al*, 1989 cit. por Alves, 1990), tornando possível que, numa base anual, as taxas de transpiração possam exceder a precipitação. Detectou-se no eucaliptal (ver capítulo 3), não apenas a presença em profundidade de camadas argilosas bastante compactas susceptíveis de originar a formação de lençóis suspensos temporários, mas também a ocorrência de um lençol confinado, aproximadamente à profundidade de 12 m. No entanto, a profundidade a que ocorrem aquelas camadas e as características das camadas suprajacentes sugerem que, em geral, as plantas não deverão tirar partido da eventual ocorrência de lençóis freáticos temporários o que, de resto, não se verificou em 1992 e 1993. Do mesmo modo, o aquífero confinado deverá manter-se inacessível aos eucaliptos, não só porque se encontra a grande profundidade, mas também porque a camada argilosa que o confina superiormente é bastante compacta.

Naturalmente que à aplicação, tanto da equação de Penman-Monteith como do balanço hidrológico, estão associadas várias fontes de erro (relacionadas com os processos de amostragem, com as técnicas de medição e com as características dos aparelhos) que poderão contribuir para as diferenças observadas nas estimativas de E_t que cada um destes métodos fornece. Convém salientar que a precisão (número de casas decimais) com que os resultados são apresentados corresponde, em geral, à precisão de cálculo dos computadores não reflectindo a precisão com que as medições das diversas variáveis são efectuadas.

As diferenças entre as estimativas obtidas pelos modelos uni e multilaminar parecem ser reduzidas tendo, o modelo multilaminar fornecido estimativas de E_t cerca de 5 a 10 % inferiores relativamente ao modelo unilaminar. Com efeito, é compreensível que estas diferenças sejam relativamente reduzidas tendo em conta que, por um lado, não se verificou a existência de gradientes acentuados da humidade e temperatura do ar no interior do copado. A inexistência destes gradientes resulta do facto de, em povoamentos esparsos como é o eucaliptal (a cobertura do terreno pelo copado foi avaliada pela Eng.^a Fernanda Valente utilizando um anascópio sendo de, aproximadamente, 60%), os fenómenos de turbulência mecânica serem bastante eficazes no transporte de energia e vapor de água impedindo a formação daqueles gradientes (Gash *et al*, 1994). Por outro lado, os valores relativamente baixos de g_s que se observaram em qualquer dos estratos traduzem, provavelmente, o facto de a condutância estomática ter sido muito mais controlada pela disponibilidade de água no solo do que pelas condições micrometeorológicas, pelo menos durante o período para o qual foi possível a comparação entre os dois modelos. McNaughton e Jarvis (1991), referindo-se ao problema mais geral da importância que o controlo estomático da transpiração assume em função da escala espacial a que os estudos são feitos, consideram que, nestas circunstâncias, o recurso a modelos multilaminares não se justifica.

Pinhal

Tal como se verificou para o eucalipto, também o pinheiro bravo manifesta um padrão de variação horária de g_s (Fig. 4.5) que revela a capacidade desta espécie em controlar as perdas de água por transpiração face a défices de humidade do ar crescentes. Resultados semelhantes haviam sido já descritos por outros autores, não só para o *P. pinaster* (Granier *et al*, 1990; Loustau *et al*, 1990; Berbigier *et al*, 1991), mas também para diversas outras espécies de coníferas (ver Beadle *et al*, 1985a,b e Jarvis *et al*, 1976) e, em particular, pinheiros como o *P. resinosa* e *P. banksiana* (Pereira e Kozlowski, 1977), o *P. nigra* (Roberts *et al*, 1982), o *P. sylvestris* (Roberts *et al*, 1982; Beadle *et al*, 1985a) ou o *P. radiata* (Benecke, 1980 cit. por Beadle *et al*, 1985a).

Com o decorrer da Primavera, os valores máximos diários de g_s reduzem-se levando a uma atenuação da amplitude de variação da condutância estomática ao longo do dia em resposta a progressivos aumentos quer do défice de pressão de vapor, quer dos défices de humidade do solo. Esta modificação sazonal do padrão básico de variação horária de g_s ocorre igualmente em outras espécies de pinheiros embora de forma eventualmente diferente consoante a espécie considerada (Pereira e Kozlowski, 1977).

A idade das agulhas constitui um factor de variabilidade da condutância estomática ao nível da árvore verificando-se que, nas mesmas condições ambientais, as agulhas mais velhas apresentam normalmente condutância estomática mais reduzida (Jarvis *et al*, 1976; Leverenz *et al*, 1982), tendo mesmo Granier *et al* (1990), em *P. pinaster*, e Beadle *et al* (1985a), em *P. sylvestris*, encontrado diferenças significativas entre os valores da condutância de agulhas do ano corrente e com 1 e 2 anos de idade. No entanto, as diferenças que observámos entre agulhas com 1, 2 e 3 anos de idade não parecem significativas (Fig. 4.6), apesar de se reconhecer que a variabilidade associada às médias horárias de g_s nas primeiras horas da manhã reflecte a existência daquelas diferenças (Fig. 4.7).

Os valores de condutância estomática observados são, para qualquer dos dias em que foram realizadas medições, bastante reduzidos quando comparados com os valores referidos por diversos autores, quer para o pinheiro bravo quer para outras espécies de pinheiros ou mesmo para outras coníferas (Quadro 5.1). Em consequência, as estimativas de E_t dados pela equação de Penman-Monteith foram igualmente reduzidas, não só face às taxas de transpiração mais comuns relatadas na bibliografia (Quadro 5.2), como também em relação às estimativas obtidas pelo balanço hidrológico (em média 3 vezes superiores) (Fig. 5.1; Quadro A.5.1, Anexo 5), sendo vários os factores que se admite estarem relacionados com as diferenças entre as taxas de transpiração fornecidas por ambos os métodos. Por um lado, a amostragem adoptada no pinhal para a realização das medições de g_s não abrange toda a copa centrando-se, sobretudo, na sua região média, o que poderá ter contribuído para a subestimativa do valor médio de g_s e, conseqüentemente, da condutância do coberto uma vez que tem sido observado, em diversas espécies de resinosas, um decréscimo da condutância

estomática entre o topo e a base da copa (Jarvis *et al*, 1976; Leverenz *et al*, 1982; Roberts *et al*, 1982). Por outro lado, dada a inexistência de estudos sobre a área foliar de povoamentos de pinheiro bravo em Portugal, adoptou-se o valor de 2.3 referido por Gash *et al* (1989) para um povoamento desta espécie com uma densidade de cerca de 430 árvores por hectare. Este valor, sendo inferior ao índice de área foliar real, contribuirá igualmente para a subestimativa de g_c e, portanto, das taxas de transpiração calculadas pela equação de Penman-Monteith. Embora estes dois aspectos nos pareçam os principais responsáveis pelas diferenças observadas, existe ainda a possibilidade de que as taxas de transpiração estimadas pelo balanço hidrológico incluam uma pequena componente devida à transpiração do sub-bosque. De facto, dada a reconhecida importância que a transpiração dos estratos herbáceo e arbustivo pode assumir como componente da perda total de água por transpiração em cobertos florestais (Roberts *et al*, 1980; Granier *et al*, 1990), procedeu-se à eliminação do sub-bosque (ver capítulo 3) dentro da parcela experimental onde foram instalados os tubos de acesso destinados ao controlo da humidade do solo. No entanto, sobretudo na Primavera, é difícil manter continuamente a parcela sem quaisquer outras plantas além dos pinheiros pelo que, nessas condições, a transpiração do pinhal estimada pelo balanço hidrológico poderá ser sobreavaliada.

Tendo em conta os vários aspectos referidos atrás e apesar da incerteza quanto ao significado real de E_t estimada pelo balanço hidrológico, parece ser este o método que, no pinhal, fornece estimativas da taxa de transpiração mais correctas.

Valores acumulados da transpiração do eucaliptal e do pinhal

O rigor das estimativas de E_t dadas pelo balanço hidrológico depende fundamentalmente da precisão com que são avaliadas as várias entradas e saídas de água na região do solo que se admite ser explorada pelas raízes em qualquer das parcelas experimentais. Apesar de não se ter tentado avaliar directamente as perdas por drenagem em profundidade e por escoamento superficial e/ou subsuperficial, a admissão feita quanto à não ocorrência de nenhum destes processos parece-nos aceitável tendo em conta os aspectos referidos no capítulo 3. Deste modo, as estimativas das taxas de evapotranspiração dadas pelo balanço hidrológico, em qualquer dos povoamentos, deverão aproximar-se das taxas reais, sobretudo quando consideramos períodos de tempo mais amplos. Assim, julgamos correctos os resultados que indicam que, durante 1992 e 1993, em ambos os povoamentos houve um consumo quase absoluto da precipitação efectiva anual através da transpiração (Fig. 3.7). Resultados semelhantes foram também obtidos por outros autores, em condições climáticas análogas, quer para eucaliptos em plantações ou em florestas naturais (Pilgrim *et al*, 1982; Dunin e Mackay, 1982; Sharma, 1984; Lima, 1986; Harding *et al*, 1992; Calder *et al*, 1993), quer para pinheiros (Pilgrim *et al*, 1982; Dunin e Mackay, 1982; Riekerk, 1985).

Relações E_t/E_{t0} vs. TRD

Como se referiu, a utilização da equação de Penman-Monteith exige a medição, não só de diferentes variáveis microclimáticas, como também da condutância do coberto. A medição de g_c além de exigir um grande dispêndio de tempo envolve, geralmente, algumas dificuldades que se procuram ultrapassar através do estabelecimento de modelos para a condutância do coberto. Estes modelos, ao permitirem a aplicação da equação de Penman-Monteith a períodos de tempo mais extensos, facilitam não só a obtenção de estimativas diárias de E_t ao longo desses períodos, como a própria modelação das perdas totais de água por transpiração que, quando associadas a modelos de intercepção, poderá contribuir para estimar os valores globais da evapotranspiração dos cobertos. Tendo em conta a expressão (4.12), compreende-se facilmente que qualquer modelo deverá, por um lado, basear-se na representação adequada do comportamento estomático e, por outro lado, ter em conta os aspectos relacionados com a variação espacial e temporal da área foliar. Estudos como o de Beadle *et al* (1982) em *P. sylvestris* deram relevo ao significado que estas variações podem ter, tendo-se verificado que também nos eucaliptos (Roberts *et al* 1992; Beadle e Turnbull, 1992; Roberts e Rosier, 1993) e em particular no *E. globulus* (Pereira *et al*, 1989, cit. por Alves *et al*, 1990 ou Gazarini *et al*, 1990) aquelas variações são significativas ocorrendo, não só em resultado das características fenológicas das espécies, como também em consequência de situações de stress hídrico.

Por seu lado, o facto de alguns mecanismos fisiológicos relacionados com o funcionamento estomático permanecerem por esclarecer, tem limitado a possibilidade de construção de modelos verdadeiramente “mecanísticos”, com uma base suficientemente geral que permita prever o comportamento dos estomas de um número variado de espécies em condições ambientais distintas. Por este motivo, tem-se prosseguido na tentativa de obter modelos “correlativos”, de natureza empírica, em que a resposta estomática é relacionada com as condições ambientais prevalentes (como exemplo podem referir-se os trabalhos de Avissar *et al*, 1985; Lindroth e Halldin, 1986; Stewart, 1988) o que, do ponto de vista da sua aplicação, levanta alguns problemas relacionados com o facto dos modelos assim obtidos, sendo específicos para sistemas particulares espécie-clima, exigirem reajustamentos no sentido de os aplicar a condições ambientais diferentes (Collatz *et al*, 1991). A construção destes modelos constitui um processo muitas vezes complicado e nem sempre bem sucedido (Dolman e Van Den Burg, 1988), pelo que uma outra alternativa pode ser considerada na tentativa de obter processos relativamente simples e expeditos que permitam estimar a transpiração de cobertos florestais. É o caso de modelos baseados em relações empíricas que estimam directamente as perdas por transpiração

a partir de variáveis ambientais cuja medição é relativamente fácil de realizar.

Neste sentido, procurou-se estudar a influência da disponibilidade de água no solo sobre as taxas diárias de transpiração, tentando avaliar a possibilidade de estimar aquelas taxas em função do teor relativo de água disponível no solo (*TRD*). A escolha desta variável baseou-se no facto de, em climas mediterrânicos e como as observações feitas demonstraram, a transpiração ser limitada, durante boa parte do ano, pela humidade do solo que, por seu lado, pode ser facilmente avaliada recorrendo, por exemplo, à utilização de sondas de neutrões. Dado que a transpiração, como processo evaporativo que é, depende da energia líquida disponível no coberto e do poder evaporante do ar que variam não só sazonal como diariamente, procurou-se eliminar a influência destes factores relacionando a água disponível no solo com o quociente E/E_{i0} , em lugar de estabelecer uma relação directa com E_i (Saugier e Katerji, 1991; ver Ward e Robinson, 1990, para uma breve revisão sobre o estabelecimento deste tipo de relações). Assim, utilizando as taxas médias diárias de transpiração estimadas pelo balanço hidrológico e os valores médios diários de E_{i0} para os períodos correspondentes, procedeu-se ao estabelecimento daquela relação cuja representação gráfica é feita na Fig. 3.6, tendo-se considerado como de *secagem* ou de *humedecimento* todos os períodos em que se verificou, respectivamente, $\Delta S < 0$ ou $\Delta S > 0$.

A Fig. 3.6 põe em evidência a existência de duas tendências distintas na nuvem de pontos correspondente ao eucaliptal, relacionadas com o facto de o solo estar em processo de secagem ou humedecimento. A Fig. 3.6, relativa ao pinhal, não revela uma distinção tão marcada entre os dois conjuntos de pontos, sugerindo mesmo uma relação aparentemente linear entre E/E_{i0} e o *TRD*, independentemente de se considerar uma situação de secagem ou de humedecimento (5).

É provável que estes resultados estejam relacionados não apenas com características próprias das duas espécies, nomeadamente com a natureza dos respectivos sistemas radiculares, mas também com algumas propriedades físicas dos solos do eucaliptal e do pinhal. Na tentativa de compreender e explicar os padrões observados em cada povoamento podem pôr-se algumas hipóteses cuja eventual confirmação exigirá, no entanto, estudos adicionais.

Uma primeira hipótese sugerida pelos padrões observados na Fig. 3.6 para o eucaliptal, é a de que a histerese que caracteriza as curvas tensão-humidade dos solos de textura mais fina, como é o caso dos solos que ocorrem no eucaliptal, se reflecte na capacidade das plantas utilizarem a água retida no solo uma vez que, em solos com estas características, o potencial mátrico quando o solo se encontra em fase de secagem é, para o mesmo teor de humidade, significativamente superior em módulo (mais negativo) ao potencial que se verificaria quando o solo se encontrasse num

(5) - Foi tentado o ajustamento de um modelo linear ao conjunto de pontos relativo ao pinhal, recorrendo ao método dos mínimos quadrados, tendo sido obtida a equação de regressão $E/E_{i0} = -3.404 + 0.64TRD$, à qual está associado um *coeficiente de determinação* (R^2) de 0.70.

ciclo de humedecimento (Hillel,1982). Deste modo, a maior facilidade em utilizar a água retida no solo durante as fases de humedecimento permitiria taxas de transpiração mais elevadas relativamente a períodos de secagem. Esta hipótese ajustar-se-ia igualmente aos resultados do pinhal uma vez que em solos de textura menos argilosa, como é o caso do solo do pinhal, os fenómenos de histerese, embora também existam, são em geral menos acentuados, o que poderia explicar o facto de não se observarem padrões marcadamente distintos para as situações de secagem e humedecimento. No entanto, a forma como a absorção de água pelas plantas é influenciada pelo potencial de água no solo não está ainda devidamente esclarecida pelo que a hipótese posta, sem confirmação experimental, poderá ser criticável.

Uma outra hipótese poderá ser também considerada baseada no facto de que, quando o solo se encontra num ciclo de secagem, são as camadas mais superficiais as primeiras a perder humidade devido, fundamentalmente, à evaporação a partir da superfície do solo e ao consumo pelas plantas. Por outro lado, quando o solo se encontra em humedecimento, são também as camadas mais superficiais aquelas onde o aumento de humidade se faz sentir em primeiro lugar. Este efeito deverá ser mais acentuado no eucalipto uma vez que, pelas suas características físicas, o solo possui aí uma permeabilidade mais reduzida, limitando a possibilidade de uma rápida redistribuição da água por todo o perfil o que deverá acontecer no pinhal com maior facilidade. Tendo em conta, conforme já referido, que o sistema radicular do *E. globulus* é particularmente denso na região mais superficial do solo, poder-se-á então admitir que a transpiração seja particularmente afectada à medida que o solo seca uma vez que é nessa região que a secura do solo se começa por fazer sentir. A redução da transpiração nestas circunstâncias poderá resultar directamente da quantidade limitada de água susceptível de ser absorvida e transpirada pelas plantas ou, indirectamente, da redução da condutância estomática em resposta a alterações do balanço hormonal das folhas em consequência da produção, pelas raízes em condições de deficiência hídrica, de hormonas que são depois transportadas para a parte aérea da planta (Gollan et al, 1985). Do mesmo modo, o humedecimento do solo, decorrendo a partir da superfície, permite uma utilização relativamente fácil e rápida da água pelas plantas, com o consequente aumento das taxas de transpiração. No pinhal este processo é menos importante, não só porque o humedecimento de todo o perfil do solo se faz mais rápida e homogeneamente, como também porque as raízes se estendem até ao limite inferior do perfil, admitindo-se que os pinheiros utilizam com igual eficiência a água retida em toda aquela região.

Conforme se referiu, estas hipóteses só poderão ser confirmadas através de estudos suplementares, sendo mesmo possível que outras explicações possam ser consideradas. No entanto e independentemente da natureza das causas que estão na origem destes resultados, podemos aceitar desde já que não existe uma relação única que traduza a forma de variação das taxas de transpiração das duas espécies em função das disponibilidades hídricas do solo devendo procurar-se, no caso do eucalipto, o estabelecimento de relações

também distintas para as situações de secagem e humedecimento do solo.

Por outro lado, a Fig. 3.6 para o eucaliptal sugere que, em períodos de humedecimento do solo, a transpiração só parece ser limitada pela disponibilidade de água no solo quando o *TRD* é inferior a 0.5 enquanto que, em períodos de secagem, a transpiração é afectada pela água disponível no solo mesmo quando o *TRD* é elevado. Dunin e Aston (1984) referem um conjunto de resultados, obtidos em *E. maculata*, que revelam uma relação semelhante entre E/E_{i0} e a fracção de água utilizável no solo não fazendo contudo qualquer referência a padrões distintos relacionados com o facto de o solo se encontrar em secagem ou humedecimento. No pinhal (Fig. 3.6) e em condições de secagem, o quociente E/E_{i0} aumenta continuamente em resposta à disponibilidade crescente de água no solo enquanto que, em períodos de humedecimento, a dispersão dos valores obtidos não permite qualquer conclusão sobre a eventual limitação imposta à transpiração pela humidade do solo. Estes resultados contrastam com os obtidos por Granier (1987), num povoamento de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco e por Nizinski e Saugier (1989), num povoamento de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl., na medida em que estes autores observaram relações únicas e bem definidas entre E/E_{i0} e o *TRD*, tendo verificado que a transpiração só era afectada quando o teor de água no solo disponível para as plantas era inferior a, aproximadamente, 0.30 e 0.44% para a pseudotsuga e para o carvalho, respectivamente.

6. Conclusões

Sintetizando os principais aspectos que se destacaram da discussão anterior, algumas conclusões podem ser estabelecidas.

O número limitado de dias em que foi possível estimar E_t através da equação de Penman-Monteith dificulta a comparação entre este método e o balanço hidrológico uma vez que, sendo aplicados numa escala temporal distinta, os dois métodos fornecem estimativas das taxas de transpiração que reflectem condições ambientais e fisiológicas distintas. Em relação a esta questão verificou-se que, ao longo do período estudado, os valores acumulados da transpiração, quer do eucalipto quer do pinhal, podem considerar-se como praticamente iguais aos da precipitação efectiva, dentro dos valores prováveis dos erros experimentais. No entanto, dada a evidência de que as admissões em que se baseia a aplicação do método do balanço hidrológico correspondem à realidade, podemos aceitar que as taxas de transpiração estimadas por este método representam, com uma precisão aceitável, as taxas reais. Este, é um aspecto bastante importante na medida em que corresponde ao cumprimento de um dos principais objectivos deste trabalho que consistia na quantificação das perdas de água por transpiração de dois povoamentos de eucalipto e pinhal. No entanto, a importância dos resultados obtidos pelo método do balanço hidrológico não se limita à quantificação daquelas perdas. Com efeito, o conhecimento das taxas médias diárias de transpiração ao longo de 1992 e 93 poderá vir a permitir o estabelecimento de modelos para a condutância do coberto através do recurso à equação de Penman-

Monteith que, sendo conhecida a taxa E_T , pode então ser resolvida em ordem a g_c . A obtenção destas estimativas da condutância do coberto constitui o primeiro passo do processo de modelação que deverá depois continuar com a formulação e parametrização do modelo e, por fim, com a sua validação.

A breve análise das relações entre E/E_{10} e o TRD constituiu uma aproximação simples à modelação da transpiração nestes povoamentos que, através de estudos adicionais, poderá ainda contribuir para o esclarecimento de alguns aspectos relacionados com a utilização da água do solo por estas espécies, em particular pelo eucalipto.

Quando comparadas com outros resultados descritos na bibliografia, as taxas de transpiração de qualquer dos povoamentos, estimadas quer pela equação de Penman-Monteith, quer pelo balanço de água no solo, também parecem ser reduzidas, embora os valores máximos absolutos de E_T observados, tanto no eucaliptal como no pinhal, sejam comparáveis aos valores “médios” referidos por diversos autores.

Quer o *E. globulus* quer o *P. pinaster* revelaram um padrão de variação horária da condutância estomática que traduz a capacidade destas espécies em controlarem eficazmente as perdas de água por transpiração quando aumenta o défice de humidade do ar. Ambas as espécies revelaram igualmente um padrão de variação sazonal de g_s , com a redução dos valores máximos diários da condutância à medida que se acentuam as condições de secura do solo.

Os valores de g_s observados durante o período de estudo são mais baixos do que os valores comuns referidos por outros autores, tanto para estas duas espécies como para outras espécies de eucaliptos e pinheiros. Contudo, os valores particularmente reduzidos de condutância estomática medidos no pinhal sugerem que o processo de amostragem adoptado para a realização daquelas medições não terá sido suficientemente adequado por contemplar apenas agulhas do estrato médio da copa.

Os valores reduzidos de g_s e E_T dever-se-ão a situações de escassez hídrica, quase permanentes ao longo de 1992 e 93, em ambos os povoamentos estudados. Contudo, o facto de, por um lado, a evapotranspiração de ambas as espécies corresponder a uma percentagem muito elevada da precipitação efectiva caída naquele período e de, por outro lado, as taxas diárias de transpiração terem sido mais elevadas nos curtos períodos em que as limitações hídricas se atenuaram, sugere que em anos com uma precipitação normal possam ocorrer períodos em que se verifiquem taxas de transpiração semelhantes (eventualmente superiores) aos valores máximos absolutos observados durante este estudo. De qualquer modo, dado o reduzido valor da precipitação média anual nesta região (cerca de $600 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$), é de esperar que a evapotranspiração anual de ambas as espécies se mantenha próxima do valor total da precipitação efectiva que atinge a superfície do solo durante o ano (Pilgrim *et al*, 1982; Dunin e Mackay, 1982; Calder *et al*, 1993), embora seguindo padrões característicos eventualmente diferentes para o eucalipto e para o pinheiro.

A comparação das taxas de transpiração obtidas pela equação de Penman-Monteith considerando, por um lado, o coberto representado como uma *folha gigante* e, por outro lado, considerando-o constituído por três estratos caracterizados por valores particulares de área foliar e de condutância estomática, não revelou diferenças significativas entre as duas aproximações, concluindo-se que a transpiração em cobertos esparsos, como é o caso do eucaliptal, pode ser adequadamente estimada através do modelo unilaminar.

BIBLIOGRAFIA

- Alves, A.A.M.; Pereira, J.S.; Borges, J.G.C.; Borges, G.C.; Carvalho, P.O.; David, J.S.; Gonçalves, J.H.C.; Madeira, M.; Onofre, N.; Valente, F. (1990). *Impactes ambientais e sócio-económicos do eucaliptal em Portugal*. Departamento de Engenharia Florestal, UTL-Instituto Superior de Agronomia, Lisboa.
- Amoozegar, A.; Martin, K.C.; Hoover, M.T. (1989). Effect of access hole properties on soil water content determination by neutron thermalization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53: 330 - 335.
- Aussenac, G. e Granier, A. (1979). Étude bioclimatique d'une futaie feuillue (*Fagus silvatica* L. et *Quercus sessiflora* Salisb.) de l'Est de la France. II - Étude de l'humidité du sol et de l'évapotranspiration réelle. *Ann. Sci. Forest.*, 36(4): 265-280.
- Aussenac, G. e Boulangeat, C. (1980). Interception des précipitations et évapotranspiration réelle dans des peuplements de feuillu (*Fagus silvatica* L.) et des résineux (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco). *Ann. Sci. Forest.*, 37(2): 91-107.
- Avissar, R.; Avissar, P.; Mahrer, Y.; Brando, B.A. (1985). A model to simulate response of plant stomata to environmental conditions. *Agric. For. Meteorol.*, 34: 21-29.

- Beadle, C.L.; Talbot, H.; Jarvis, P.G. (1982). Canopy structure and leaf area index in a mature scots pine forest. *Forestry*, 55(2): 105-123.
- Beadle, C.L.; Neilson, R.E.; Talbot, H.; Jarvis, P.G. (1985a). Stomatal conductance and photosynthesis in a mature scots pine forest - I. Diurnal, seasonal and spatial variation in shoots. *J. Appl. Ecology*, 22: 557-571.
- Beadle, C.L.; Jarvis, P.G.; Talbot, H.; Neilson, R.E. (1985b). Stomatal conductance and photosynthesis in a mature scots pine forest - II. Dependence on environmental variables of single shoots. *J. Appl. Ecology*, 22: 573-586.
- Beadle, C.L. e Turnbull, C.R.A. (1992). Comparative growth rates of *Eucalyptus* in native forest and in plantation monoculture. In: Calder, I.R.; Hall, I.R.; Adlar, P.G. (eds.) (1992), *Growth and water use of forest plantations*. John Wiley and Sons. Chichester., pp. 318-331.
- Beer, T. (1990). *Applied environmetrics meteorological tables*. Applied Environmetrics, Victoria
- Bell, J.P. (1987). *Neutron probe practice*. Institute of Hydrology, Rept. 19 (3th. ed.), Wallingford.
- Berbigier, P.; Diawara, A.; Loustau, D. (1991). Étude microclimatique de l'effect de la sécheresse sur l'évaporation d'une plantation de pins maritimes et du sous-bois. *Ann. Sci. For.*, 22: 157-177.
- Beven, K. (1979). A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *J. Hydrology*, 44: 169-190.
- Brutsaert W.(1991). *Evaporation into the atmosphere*. Kluwer Academic Publishers.Dordrecht.
- Calder, I.R. (1982). Forest evaporation. In: *Proc. Can. Hydrol. Symp.* June, 1982. Natl. Res. Counc. Can., Ottawa, pp. 173-193.
- Calder, I.R.; Hall, R.L.; Adlard, P.G. (eds.) (1992). *Growth and water use of forest plantations*. John Wiley and Sons. Chichester.
- Calder, I.R (1992). Water use of eucalypts - a review. In: Calder, I.R.; Hall, I.R.; Adlar, P.G. (eds.) (1992), *Growth and water use of forest plantations*. John Wiley and Sons. Chichester., pp. 167-179.

- Calder, I.R.; Hall, R.L.; Prasanna, K.T. (1993). Hydrological impact of *Eucalyptus* plantation in India. *J. Hydrology*, 150: 635-648.
- Collatz, G.J.; Ball, J.T.; Grivet, C.; Berry, J.A. (1991). Physiological and environmental regulation of stomatal conductances, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agric. For. Meteorol.*, 54: 107-136.
- David, J.S.; Henriques, M.O.; Rego, Z.C. (1986). Estudo preliminar sobre as influências hidrológicas do *Eucalyptus globulus* Labill. *Recursos Hídricos*, 7(1): 5-39.
- Denmead, O.T. (1984). Plant physiological methods for studying evapotranspiration: problems of telling the forest from the trees. *Agric. Water Managem.*, 8: 167-189.
- Denmead, O.T. e Bradley, E.F. (1985). Flux-gradient relationships in a forest canopy. In: Hutchison B.A. e Hicks B.B. (eds.), *The Forest-Atmosphere Interaction*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, pp. 421-442.
- Dickinson, R.E.; Henderson-Sellers, A.; Rosenzweig, C.; Sellers, P.J. (1991). Evapotranspiration models with canopy resistance for use in climate models, a review. *Agric. For. Meteorol.*, 54: 373-388.
- Dolman, A.J. e Van Den Burg, G.J. (1988). Stomatal behaviour in an oak canopy. *Agric. For. Meteorol.*, 43: 99-108.
- Doorembos, J. e Pruitt, W.O. (1992). *Crop water requirements*. Irrigation and drainage paper nº 24, F.A.O., Roma.
- Dunin, F. X. e Mackay, S.M. (1982). Evaporation of eucalypt and coniferous forest communities. In: *The First National Symposium on Forest Hydrology*, Melbourne, 11-13 May, The Inst. of Engineers, Australia. National Conference Publication nº 82/6, pp. 18-25.
- Dunin, F.X. e Aston, A.R. (1984). The development and proving of models of large scale evapotranspiration: an australian study. *Agric. Water Managem.*, 8: 305-323.
- Fanjul, L. e Jones, H.G. (1982). Rapid stomatal responses to humidity. *Planta*, 154: 135-138.
- Gash, J.H.C.; Shuttleworth, W.J.; Lloyd, C.R.; André, J.C.; Goutorbe, J.P.; Gelpe, J. (1989). Micrometeorological measurements in Les Landes forest during HAPEX-MOBILHY. *Agric. For. Meteorol.*, 46: 131-147.

- Gash, J.H.C.; Lloyd, C.R.; Lachaud, G.; Dolman, A.J.; Hunting Ford, C. (1994). Estimating sparse rainfall interception with an analytical model. *J. Hydrology*, sujeito a apreciação.
- Gazarini, L.C.; Araújo, M.C.C.; Borralho, N.; Pereira, J.S. (1990). Plant area index in Eucalyptus globulus plantations determined indirectly by a light interception method. *Tree Physiology*, 7: 107-113.
- Granier, A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3: 309-320.
- Granier, A.; Bobay, V.; Gash, J.H.C.; Gelpe, J.; Saugier, B.; Shuttleworth, W.J. (1990). Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. *Agric. For. Meteorol.*, 51: 309-319.
- Greacen, E.L. e Hignett, C.T. (1979). Sources of bias in the field calibration of a neutron meter. *Aust. J. Soil Research*, 17: 405 - 415.
- Greacen, E.L. (ed.) (1981). *Soil water assessment by the neutron method*. CSIRO, Australia.
- Greacen, E.L.; Correll, R.L.; Cunningham, R.B.; Johns, G.G.; Nicolls, K.D. (1981). Calibration. In: Greacen (ed.) (1981), *Soil water assessment by the neutron method*. CSIRO, Australia., pp 50 - 81.
- Green, S.R. (1993). Radiation balance, transpiration and photosynthesis of an isolated tree. *Agric. For. Meteorol.*, 64: 201-221.
- Gollan, T.; Turner, N.C.; Shulze, E.D. (1985). The responses of stomata and leaf gas exchange to pressure deficits and soil water content. III- In the sclerophyllous woody species *Nerium oleander*. *Oecologia*, 65: 356-362.
- Harding, R.J.; Hall, R.L.; Swaminath, M.H.; Murthy, K.V.S. (1992). The soil moisture regimes beneath forest and an agriculture crop in Southern India - measurements and modelling. In: Calder, I.R.; Hall, I.R.; Adlar, P.G. (eds.) (1992), *Growth and water use of forest plantations*. John Wiley and Sons. Chichester., pp. 226-243.
- Hillel, D. (1982). *Introduction to soil physics*. Academic Press. Orlando.USA.

- Hodnett (1986). The neutron probe for soil moisture measurement. In: Gessler, W. (Ed.) (1986). *Advanced agricultural instrumentation. Design and use*. NATO ASI Series: E - Applied Sciences - nº 111. Martinus Nijhoff Publishers. Dordrecht, pp. 148-192.
- Holmes, J.W. e Olszyczka, B. (1982). Evaporation of surface water from the foliage of an isolated pine tree. In: *The first National Symposium on Forest Hydrology*, Melbourne, 11-13/May, pp. 7-11.
- Ibrahim, M.; Rapp, M.; Lossaint, P. (1982). Economie de l'eau d'un écosystème à *Pinus pinea* L. du litoral méditerranéen. *Ann. Sci. Forest.*, 39(3): 289-306.
- Jaeger, L. (1985). Estimations of surface roughnesses and displacement heights above a growing pine forest from wind profile measurements over a period of ten years. In: Hutchison, B.A.; Hicks, B.B. (eds.) (1985) *The forest-atmosphere interaction*. D. Reidel Pub. Comp., Dordrecht, pp. 71-90.
- Jarvis, P.G.; James, G.B.; Landsberg, J.J. (1976). Coniferous Forest. In: Monteith, J.L. (ed.) (1976). *Vegetation and the atmosphere*. Vol.2 - *Case Studies*. Academic Press. London, pp. 171-240.
- Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Kallarackal, J. (1992). Water use of eucalypts in Kerala. In: Calder, I.R.; Hall, R.L.; Adlard, P.G. (eds.) (1992), *Growth and water use of forest plantations*. John Wiley and Sons. Chichester, pp. 290-297.
- Leverenz, J.; Deans, J.D.; Ford, E.D.; Jarvis, P.G.; Milne, R.; Whitehead, D. (1982). Systematic spatial variation of stomatal conductance in a Sitka Spruce plantation. *J. Appl.Ecology*, 19: 835-851.
- Lhomme, J.-P. (1991). The concept of canopy resistance: historical survey and comparison of different approaches. *Agric. For. Meteorol.*, 54: 227-240.
- Lhomme, J.-P. (1992). Energy balance of heterogeneous terrain: averaging the controlling parameters. *Agric. For. Meteorol.*, 61: 11-21.
- Lima, W.P. (1986). Influências hidrológicas dos eucaliptos: revisão de aspectos relevantes em diversas zonas do globo terrestre. In: *O Eucalipto, a água e o Solo*, Seminário promovido pela SPCF, Lisboa, 1 e 2 /Abril/1986, pp. 69-105.
- Lindroth, A.; Halldin, S. (1986). Numerical analysis of pine forest evaporation and surface resistance. *Agric. For. Meteorol.*, 38: 59-79.

- Loustau, D.; Granier, A.; Moussa, F. (1990). Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. *Ann. For. Sci.*, 21: 599-618.
- McIllroy, I.C.; Dunin, F.X. (1982). A Forest evaporation technique comparison experiment. In: *The first National Symposium on Forest Hydrology*, Melbourne, 11-13/May, pp. 12-17.
- McNaughton, K.G. e Jarvis, P.G. (1984). Using the Penman-Monteith equation predictively. *Agric. Water Managem.*, 8: 263-278.
- McNaughton, K.G. e Jarvis, P.G. (1991). Effects of spatial scale on stomatal control of transpiration. *Agric. For. Meteorol.*, 54: 279-301.
- Meinzer, F.C. (1993). Stomatal control of transpiration. *Trends in Ecology and Evolution*, 8(8): 289-294.
- Monteith, J.L. (ed.) (1975). *Vegetation and the atmosphere*. Vol.1 - *Principles*. Academic Press. London.
- Monteith, J.L. (ed.) (1976). *Vegetation and the atmosphere*. Vol.2 - *Case Studies*. Academic Press. London.
- Nizinski, J. e Saugier, B. (1989a). Dynamique de l'eau dans une chênaie (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl) en forêt de Fontainebleau. *Ann. Sci. Forest*, 46: 173-186.
- Nizinski, J. e Saugier, B. (1989b). A model of transpiration and soil-water balance for a nature oak forest. *Agric. For. Meteorol.*, 47: 1-17.
- Penman, H.L. (1956). Evaporation: an introductory survey. *Netherl. J. Agric. Sci.*, 4: 9-29.
- Pereira, J.S. e Kozlowski, T.T. (1977). Water relations and drought resistance of young *Pinus banksiana* and *P. resinosa* plantation trees. *Can. J. For. Res.*, 7: 132-137.
- Pereira, J.S.; Tenhunen, J.D.; Lange, O.L.; Beyschlag, W.; Meyer, A.; David, M.M. (1986). Seasonal and diurnal patterns in leaf gas exchange of *Eucalyptus globulus* trees growing in Portugal. *Can. J. For. Res.*, 16: 177-184.
- Pereira, J.S.; Tenhunen, J.D.; Lange, O.L. (1987). Stomatal control of photosynthesis of *Eucalyptus globulus* Labill. trees under field conditions in Portugal. *J. Exp. Bot.*, 38 (195): 1678-1688.

- Pilgrim, D.H.; Doran, D.G.; Rowbottom, I.A.; Mackay, S.M.; Tjendana, J. (1982). Water balance and runoff characteristics of nature and cleared pine and eucalypt catchments at Lidsdale, New South Wales. In: *The first National Symposium on Forest Hydrology*, Melbourne, 11-13/May, pp. 103-110.
- Raupach, M.R. e Legg, B.J. (1984). The uses and limitations of flux-gradient relationships in micrometeorology. *Agric. Water Managem.*, 8: 119-131.
- Raupach, M.R. e Finnigan, J.J. (1988). "Single-layer models of evaporation from plant canopies are incorrect but usefull, whereas multilayer models are correct but useless": Discuss. *Aust. J.. Plant Physiol.*, 15: 705-716.
- Riekert, H. (1985). Lysimetric evaluation of pine forest evapotranspiration. In: Hutchison, B.A. Hicks, B.B. (eds.) (1985). *The forest atmosfere interaction*. D. Reidel Pub. Comp., Dordrecht, pp. 293-308.
- Roberts, J.; Pymar, C.F.; Wallace, J.S.; Pitman, R.M (1980). Seasonal changes in leaf area, stomatal and canopy conductances and transpiration from bracken below a forest canopy. *J. App. Ecology*, 17: 409-422.
- Roberts, J.; Pitman, R.M.; Wallace, J.S. (1982). A comparison of evaporation from stands of scots pine and corsican pine in Thetford Chase, East Anglia. *J. App. Ecology*, 19: 859-872.
- Roberts, J. (1983). Forest Transpiration: a conservative hydrological process? *J. Hydrology*, 66: 133-141.
- Roberts, J.M.; Rosier, P.T.W.; Murthy, K.V.S. (1992). Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and their use in estimating forest transpiration. In: Calder, I.R.; Hall, R.L.; Adlard, P.G. (eds.) (1992). *Growth and water use of forest plantations*. John Wiley and Sons. Chichester, pp. 226-243.
- Roberts, J. e Rosier, P.T.W. (1993). Physiological studies in young Eucalyptus stands in southern India and derived estimates of forest transpiration. *Agric. Water Managem.*, 24: 103-118.
- Roberts, J.; Cabral, O.M.R.; Fisch, G.; Molion, L.C.B.; Moore, C.J., Shuttleworth, W.J. (1993). Transpiration from an Amazonian rainforest calculated from stomatal conductance measurements. *Agric. For. Meteorol.*, 65: 175-196.

- Rose, C.W. (1984). Modelling evapotranspiration: an approach to heterogeneous communities. *Agric. Water Managem.*, 8: 203-221.
- Rose, C.W. e Sharma, M.L. (1984). Summary and recommendations of the workshop on "Evapotranspiration from plant communities". *Agric. Water Managem.*, 8: 325-342.
- Ross, J. (1975). Radiative transfer in plant communities. In: Monteith (ed.) (1975). *Vegetation and the atmosphere*. Vol.1 - *Principles*. Academic Press. London. pp. 13-56.
- Saugier, B. e Katerji, N. (1991). Some plant factors controlling evapotranspiration. *Agric. For. Meteorol.*, 54: 263-277.
- Sharma, M.L. (1984). Evapotranspiration from a eucalyptus community. *Agric. Water Managem.*, 8: 41-56.
- Schulze, E.-D. (1986a). Carbon dioxide and water vapour exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Ann. Rev. Plant. Physiol.*, 37: 247-274.
- Schulze, E.-D. (1986b). Whole-plant responses to drought. *Aust. J. Plant Physiol.*, 13: 127-141.
- Shuttleworth, W.J. (1979). *Evaporation*. Institute of Hydrology, Rept. 56, Wallingford.
- Stewart, J.B. (1984). Measurement and prediction of evaporation from forested and agricultural catchments. *Agric. Water Managem.*, 8: 1-28.
- Stewart, J.B. (1988). Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.*, 43: 19-35.
- Thom, A.S. (1975). Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: Monteith (ed.) (1975). *Vegetation and the atmosphere*. Vol.1 - *Principles*. Academic Press. London, pp 57-109.
- Turner, N.C. (1986). Crop water deficits: a decade of progress. *Advances in Agronomy*, 39: 01-51.
- Turner, N.C. (1991). Measurement and influence of environmental and plant factors on stomatal conductance in the field. *Agric. For. Meteorol.*, 54: 137-154.

- Valente F. (1990). *Intercepção da precipitação por cobertos arbóreos*. Trabalho de síntese de provas de aptidão pedagógica. I.S.A., U.T.L., Lisboa.
- Van Slycken e Vereecken (1990). Water supply from the groundwater table and the growth of Poplar: a case study. *Agric. For. Meteorol.*, 50: 65 - 74.
- Visvalingam e Tandy (1972). The neutron method for measuring soil moisture content - a review. *J. Soil Science*, 23 (4): 499 - 511.
- Ward, R.C. e Robinson, M. (1990). *Principles of Hydrology*. McGraw-Hill.London.
- Williams e Sinclair (1981). Accuracy, bias and precision. In: Greacen (ed.) (1981). *Soil water assessment by the neutron method*. CSIRO, Australia, pp. 35 - 49.

ANEXOS

Anexo 1

Caracterização dos solos locais e da instrumentação utilizada

Quadro A.1.1 - Perfis de densidade aparente no eucaliptal e pinhal

Profundidade (m)	Densidade aparente (g cm ⁻³)	
	Eucaliptal	Pinhal
0.00 - 0.10	1.568	1.340
0.20 - 0.30	1.638	1.604
0.40 - 0.50	1.622	1.657
0.60 - 0.70	1.681	
0.70 - 0.80	1.792	1.677
0.80 - 0.90	1.802	
0.90 - 1.00	1.826	
1.10 - 1.20	1.861	1.764
1.35 - 1.45		1.698
1.40 - 1.50	1.672	
1.50 - 1.75		1.834

Quadro A.1.2 Principais características físico-químicas dos solos e dos materiais subjacentes

Nível (cm)	Análise granulométrica					pH (água)	Azoto (%)	Carbono (%)	Ca	Mg	K (me/100g)	Na	Soma	V (%)	Al (me/100g)
	Elementos grosseiros (%)	Areia grossa	Areia fina	Limo	Argila										
Eucaliptal															
0.00-0.20	25.6	43.9	10.4	3.8	41.9	0.330	0.034	4.9	3.8	0.98	0.08	0.06	1.81	26.60	2.76
0.20-0.40	22.4	49.8	22.9	8.2	19.1	0.790	0.055	5.1	3.9	1.21	0.06	0.07	1.95	30.60	0.94
0.40-0.65	30.6	47.5	12.4	4.9	35.2	0.180	0.016	5.0	3.9	0.45	0.04	0.04	1.22	23.40	2.11
0.65-1.05	6.4	71.8	4.1	3.5	20.6	0.070	0.009	5.0	3.8	0.79	0.04	0.07	0.96	23.40	1.58
1.05-1.45	8.1	69.6	5.5	4.4	20.5	0.040	0.006	5.1	3.7	1.00	0.05	0.17	1.27	29.60	1.44
1.45-1.85	6.8	68.0	5.8	3.9	22.3	0.050	0.006	5.1	3.7	0.77	0.04	0.35	1.22	28.30	1.50
Pinhal															
0.00-0.20	2.2	79.1	16.2	2.4	2.3	0.460	0.028	6.1	5.0	0.17	0.04	0.01	1.13	44.70	aprox. 0.0
0.20-0.45	1.9	80.6	15.5	1.7	2.2	0.070	0.010	6.3	4.9	0.09	0.02	0.01	0.39	36.80	aprox. 0.0
0.45-1.10	0.8	74.3	22.1	1.4	2.2	0.040	0.006	6.0	4.5	0.06	0.02	0.01	0.20	23.00	aprox. 0.0
1.10-1.60	2.3	71.8	25.5	1.1	1.6	0.030	0.003	6.2	4.7	0.09	0.03	0.01	0.22	28.60	aprox. 0.0
1.65-1.85	2.3	49.6	29.2	13.5	7.7	0.030	0.006	5.1	4.1	0.33	0.06	0.16	0.61	38.60	0.12

Quadro A.1.3 - Instrumentos e aparelhos instalados nas parcelas experimentais (1) no topo da torre, (2) ao longo da torre e (3) junto ao solo (* apenas no eucaliptal). As placas de fluxo de calor foram instaladas 1 cm abaixo da superfície do solo.

Instrumento	Utilização
<i>Data-logger</i> (CR10, Campbell Scientific, Shepshad, U.K.)	Armazenamento de dados
1 udógrafos (ARG100, Campbell Scientific, Shepshad, U.K.)	Medição e registo da precipitação bruta no topo do coberto
1 piranómetro (CM6B, Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)	Medição da radiação solar directa (1)
1 pirradiómetro (Q6, REBS, Seattle, U.S.A.)	Medição da radiação líquida (1)
1 anemómetro e catavento (Vector Instruments, Rhyl, U.K.)	Medição da velocidade e rumo do vento (1)
1 psicrómetro (H301, Vector Instruments, Rhyl, U.K.)	Medição da temperatura e humidade do ar (1)
2 placas de fluxo de calor (REBS, Seattle, U.S.A.)	Medição do fluxo de calor entre o solo e a atmosfera
2 psicrómetros (H301, Vector Instruments, Rhyl, U.K.)	Medição da temperatura e humidade do ar (2)*
1 piranómetro (CM6, Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)	Medição da radiação solar directa sob-coberto (3)*
2 pirradiómetros (Q6, Rebs; Net Radiometer No. 8110, Ph. Schenk)	Medição da radiação líquida sob-coberto (3)*

Anexo 2

**Evolução temporal da humidade do solo
e cálculo do balanço hidrológico**

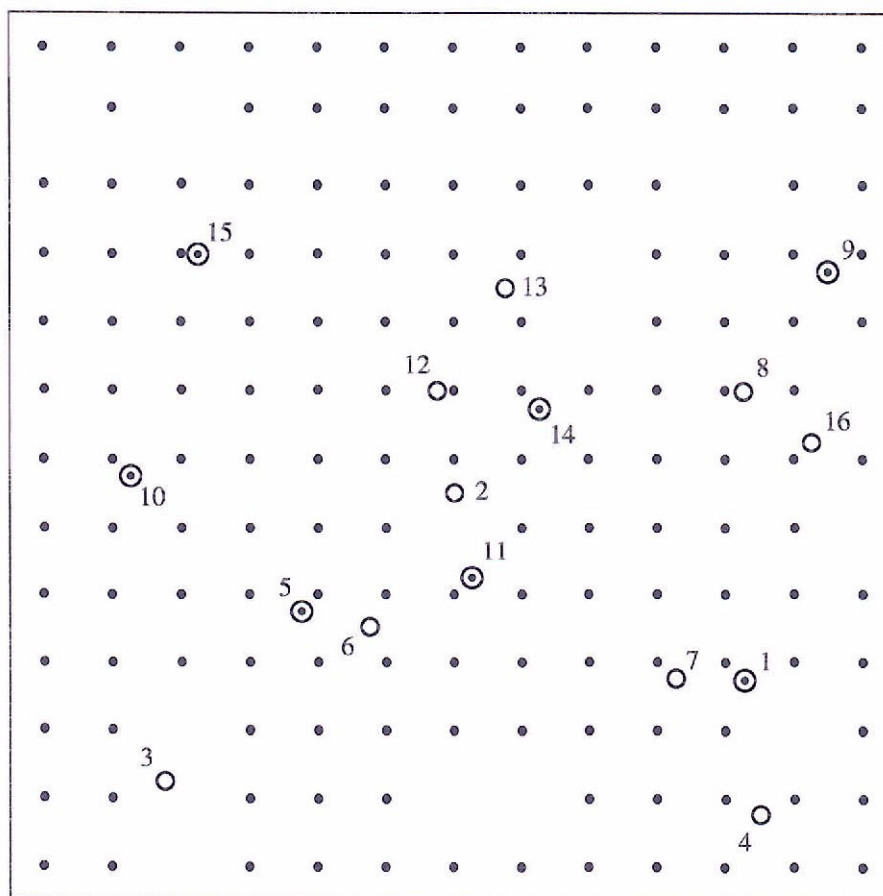


Fig. A.2.1 - Rede de tubos de acesso instalada na parcela experimental do eucaliptal (• árvores; ○ tubo de acesso para medição regular de ΔS ; ⊙ tubo de acesso reservado para calibração da sonda de nêutrons). Escala aproximada 1:330.

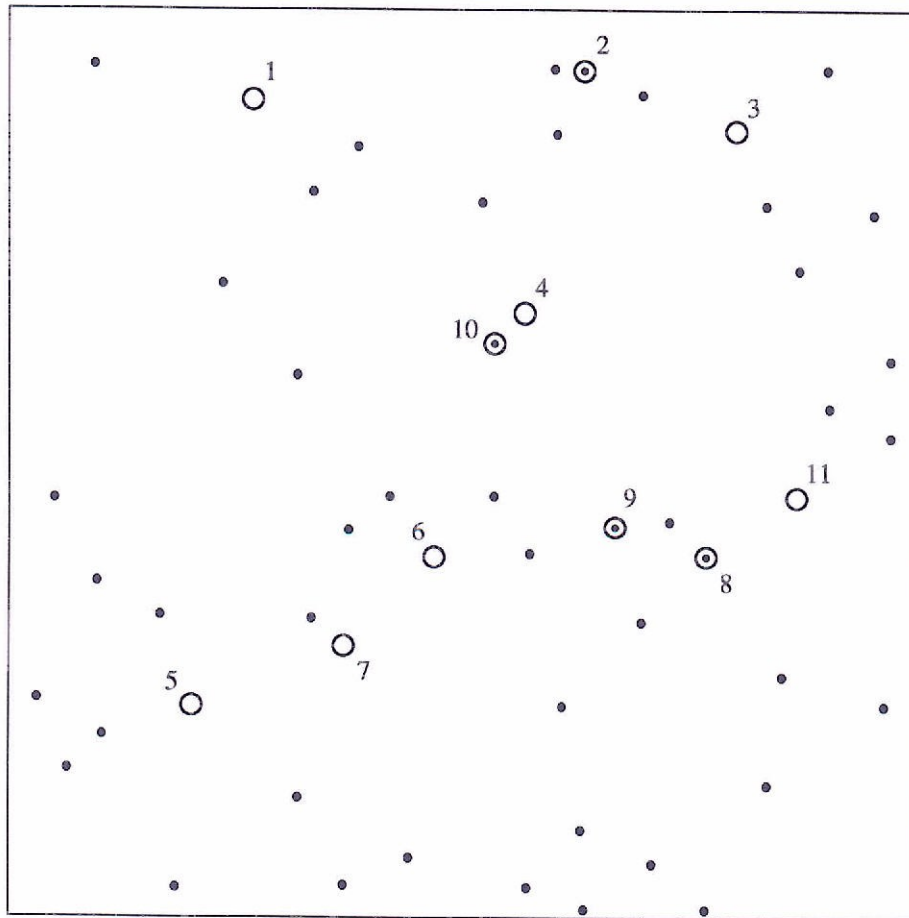


Fig. A.2.2 - Rede de tubos de acesso instalada na parcela experimental do pinhal (• árvores; ○ tubo de acesso para medição regular de ΔS ; ⊙ tubo de acesso reservado para calibração da sonda de nêutrons). Escala aproximada 1:330.

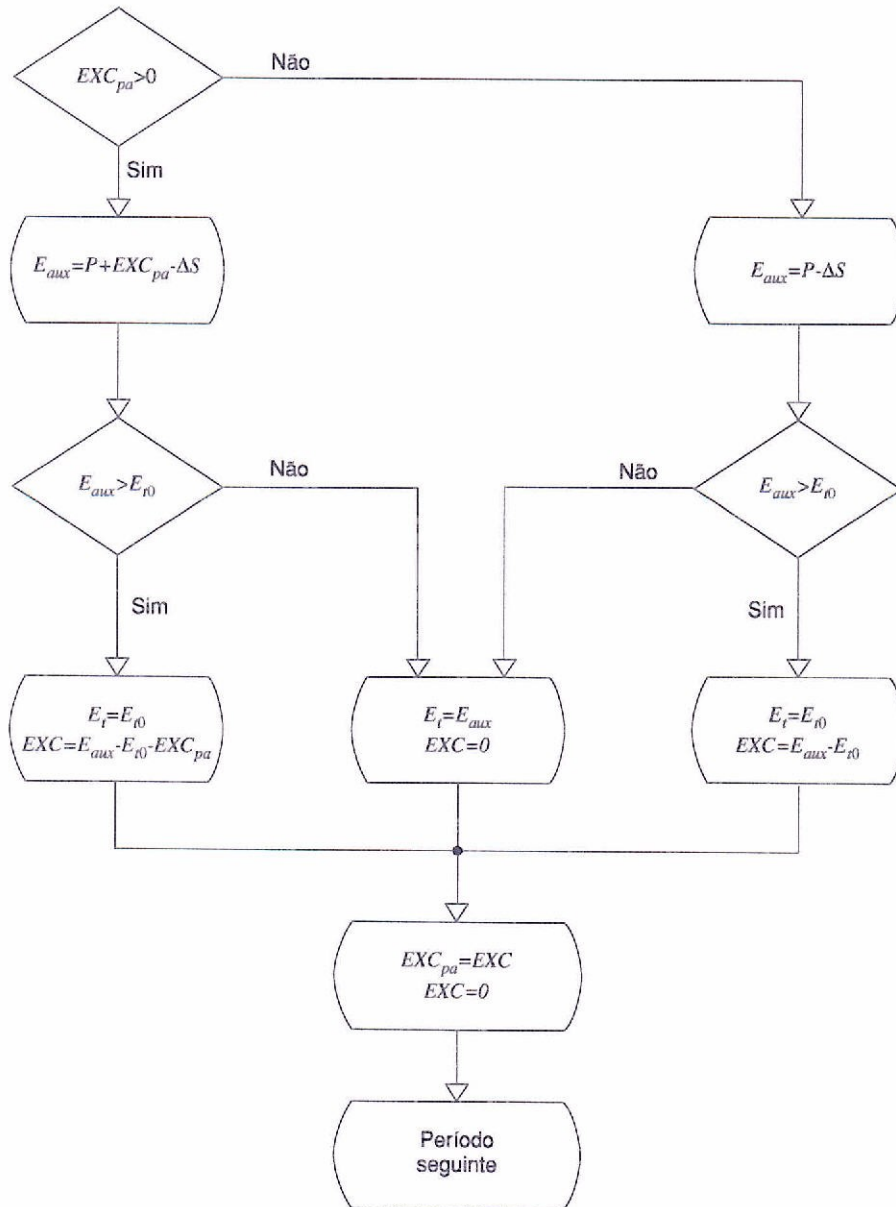


Fig. A.2.3 - Algoritmo para o cálculo da evapotranspiração pelo método do balanço de água no solo. EXC_{pa} - excesso de água proveniente do período anterior; EXC - excesso de água no período actual; E_t - perda de água por transpiração no período actual; E_{aux} - variável auxiliar; P - precipitação efectiva; ΔS - variação no armazenamento de água no solo; E_{r0} - evapotranspiração de referência.

Quadro A.2.1 - Evolução temporal da humidade do solo no eucaliptal. Apresentam-se os valores de humidade aos diferentes níveis de medição, bem como o valor acumulado para o perfil de solo considerado.

Data de medição	Profundidade (m)										Volume acumulado		
	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20	1.35	1.50		1.65	1.80
Altura equivalente de água (mm)													
13/12/91	11.78	13.50	15.09	17.18	20.58	21.53	19.97	16.67	13.63	16.18	19.69	23.70	209.49
20/12/91	11.92	13.66	15.14	17.13	20.57	21.68	19.91	16.79	13.52	16.23	19.90	24.03	210.47
9/1/92	12.13	14.14	15.11	17.07	20.35	21.21	19.67	16.43	13.32	15.83	19.55	23.63	208.44
16/1/92	12.28	14.21	15.56	17.42	20.78	21.55	20.16	16.94	13.66	16.49	20.07	24.18	213.29
27/1/92	11.79	13.72	15.25	17.29	20.78	21.95	20.37	17.18	14.16	16.69	20.27	24.58	214.00
4/2/92	11.55	13.37	15.07	17.27	20.67	21.77	20.34	16.88	13.85	16.58	20.30	24.09	211.73
11/2/92	11.45	13.16	14.89	17.00	20.55	21.39	19.70	16.49	13.58	16.24	19.77	23.52	207.75
18/2/92	11.79	13.65	15.09	17.13	20.55	21.25	19.95	16.67	13.70	16.15	19.94	23.90	209.78
25/2/92	11.52	13.15	14.85	17.10	20.56	21.11	19.85	16.56	13.48	16.03	19.84	23.81	207.86
6/3/92	11.29	12.58	13.96	15.67	19.54	21.96	21.07	18.68	15.15	15.28	19.35	35.34	219.87
18/3/92	11.21	12.51	14.59	16.76	20.43	21.06	19.47	15.88	13.17	16.10	19.79	35.17	216.16
1/4/92	12.46	13.93	15.14	17.83	20.31	24.04	21.59	16.31	12.87	13.05	16.45	20.24	204.22
8/4/92	12.53	14.74	15.82	18.25	21.74	23.32	21.01	17.42	14.35	17.26	21.25	26.19	223.89
15/4/92	11.83	13.89	15.61	17.96	21.61	23.11	21.25	17.70	14.90	17.75	21.51	26.94	224.07
29/4/92	11.32	12.97	14.87	17.26	20.93	21.98	20.26	16.68	13.95	16.86	20.70	25.57	213.35
6/5/92	10.91	12.57	14.99	16.53	19.81	18.84	18.35	15.36	14.74	17.73	20.73	26.75	207.32
11/5/92	11.13	12.71	14.62	16.62	20.61	21.55	19.76	16.36	13.49	16.23	20.06	43.38	226.51
20/5/92	11.03	12.46	14.34	16.85	20.34	20.81	18.06	16.68	13.40	15.68	19.35	24.14	203.14
27/5/92	11.18	12.40	14.29	16.64	20.31	20.53	19.13	15.62	12.94	15.73	19.45	23.89	202.11
3/6/92	11.69	13.14	14.89	17.21	20.82	21.33	19.88	16.22	13.59	16.31	20.20	24.98	210.26
10/6/92	11.43	12.85	14.73	16.95	20.62	21.45	19.72	16.36	13.49	16.33	20.11	24.85	208.89
24/6/92	11.29	12.72	14.59	16.95	20.58	21.10	19.48	16.00	13.35	16.05	19.73	24.67	206.52
10/7/92	11.03	12.25	14.29	16.63	20.21	20.57	19.15	15.48	12.68	15.44	19.11	24.09	200.91
23/7/92	10.88	11.98	14.02	16.44	20.03	20.22	18.46	15.01	12.31	15.23	18.59	23.39	196.58
6/8/92	10.76	11.74	13.89	16.44	19.88	20.01	18.21	14.83	12.17	14.97	18.43	23.25	194.58
10/9/92	10.79	11.55	13.82	16.21	19.78	19.80	18.27	14.66	11.84	14.61	18.06	22.66	192.06
22/9/92	10.73	11.45	13.67	16.18	19.80	19.63	18.27	14.50	11.85	14.57	18.20	23.01	191.87
30/9/92	11.30	11.97	13.69	16.44	20.03	20.14	18.54	15.06	12.47	15.02	18.63	24.92	198.21

Quadro A.2.1 (continuação) - Evolução temporal da humidade do solo no eucalipto. Apresentam-se os valores de humidade aos diferentes níveis de medição, bem como o valor acumulado para o perfil de solo considerado.

Data	Profundidade (m)											Volume acumulado	
	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20	1.35	1.50	1.65		1.80
de medição	Altura equivalente de água (mm)												
14/10/92	11.00	11.80	14.00	16.42	19.90	20.12	18.59	14.71	12.38	15.09	18.56	23.36	195.93
28/10/92	11.53	12.44	14.11	16.57	20.04	20.33	18.98	15.25	12.66	15.31	18.82	23.88	199.92
11/11/92	11.39	12.41	14.29	16.66	20.29	20.59	18.65	15.46	12.82	15.39	19.41	23.97	201.31
3/12/92	11.97	13.09	14.47	16.84	20.40	20.92	19.23	15.64	13.06	15.69	19.56	24.04	204.91
16/12/92	11.77	13.07	14.80	17.12	20.79	21.43	19.73	16.33	13.49	16.42	20.23	25.22	210.42
6/1/93	11.89	13.39	15.03	17.68	21.31	23.10	21.08	17.42	14.40	17.37	21.08	26.20	219.92
25/1/93	11.62	12.90	14.78	17.26	21.22	22.12	20.60	17.11	14.53	17.53	20.84	26.03	216.53
11/2/93	11.87	13.49	15.05	17.61	21.19	22.12	20.30	16.93	14.59	17.09	20.83	25.84	216.90
24/2/93	11.73	13.07	15.14	17.68	21.41	22.68	21.13	17.42	14.61	17.43	21.37	26.28	219.94
13/3/93	11.53	13.82	14.92	17.38	21.09	22.12	20.35	16.86	14.29	17.22	20.99	25.85	216.41
17/3/93	11.41	12.56	14.12	16.54	19.96	19.65	18.22	14.90	12.43	15.20	18.77	23.41	197.16
24/3/93	11.28	12.87	14.11	17.14	19.96	19.54	18.29	14.75	12.25	15.06	18.86	23.26	197.37
31/3/93	11.19	12.13	14.04	16.23	19.75	19.31	18.14	14.38	11.85	14.78	18.38	22.87	193.05
7/4/93	11.10	12.04	13.89	16.20	19.76	19.16	17.62	14.41	11.81	14.60	17.99	22.65	191.22
1/5/93	11.53	12.26	13.97	16.32	19.76	19.48	17.90	14.50	12.08	14.81	18.74	23.30	194.65
19/5/93	11.80	13.60	14.88	16.64	19.75	19.26	17.77	14.60	12.21	14.90	18.73	22.96	197.12
4/6/93	11.46	12.90	14.50	16.69	20.08	19.73	18.18	15.18	13.15	15.05	18.18	23.56	198.66
18/6/93	11.17	12.28	14.08	16.26	20.02	19.59	18.39	14.31	12.02	15.24	18.30	21.84	193.50
30/6/93	11.07	12.04	13.86	16.15	19.53	19.12	17.34	13.86	11.71	14.40	17.87	22.09	189.02
14/7/93	10.87	11.72	13.57	15.80	19.31	18.71	16.99	13.24	10.85	13.62	17.36	21.76	183.80
30/7/93	10.74	11.49	13.42	15.66	19.03	18.23	16.10	12.92	11.25	12.87	16.87	21.56	180.13
31/8/93	10.77	11.13	13.09	15.70	18.80	17.75	16.78	12.93	10.63	13.15	16.24	20.59	177.56
15/9/93	11.13	11.56	13.34	15.64	19.08	17.29	16.61	12.09	10.04	12.78	16.05	21.67	177.28
27/10/93	12.06	14.01	15.74	17.84	20.65	21.08	19.49	15.74	13.13	15.06	18.24	24.16	207.22
25/11/93	14.21	15.87	17.71	20.04	23.02	20.87	19.28	15.34	13.17	15.18	20.34	26.08	221.13
30/12/93	14.01	15.36	16.96	19.13	22.42	20.69	19.69	15.70	13.17	15.90	20.23	26.11	219.37

Quadro A.2.2 - Evolução temporal da humidade do solo no pinhal. Apresentam-se os valores de humidade aos diferentes níveis de medição, bem como o valor acumulado para o perfil de solo considerado.

Data de medição	Profundidade (m)										Volume acumulado	
	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20	1.35	1.50		1.65
9/1/92	15.44	15.76	13.74	12.37	10.25	8.83	8.23	7.99	8.20	10.67	18.54	130.03
16/1/92	14.10	14.84	13.56	13.27	12.30	11.27	10.79	11.04	11.76	13.45	20.04	146.43
27/1/92	11.12	11.87	11.12	10.94	10.25	9.64	9.60	10.31	11.99	15.47	22.62	134.94
4/2/92	9.69	10.71	10.13	10.15	9.51	8.98	8.79	9.38	11.24	14.71	20.20	123.50
11/2/92	8.89	9.89	9.45	9.53	9.00	8.53	8.32	8.79	10.43	14.30	22.37	119.49
18/2/92	11.68	11.75	10.34	9.67	8.83	8.14	7.99	8.25	9.76	13.61	22.22	122.24
25/2/92	12.68	11.99	10.20	9.57	8.62	7.78	7.72	7.98	9.40	13.86	22.61	122.40
6/3/92	10.23	11.03	9.92	9.44	8.42	7.61	7.32	7.51	8.83	13.15	22.16	115.62
12/3/92	8.28	9.53	8.93	8.59	7.98	7.43	7.01	7.10	8.19	12.47	21.71	107.22
18/3/92	6.76	8.31	8.03	7.91	7.46	7.00	6.68	6.90	8.15	11.89	20.97	100.06
1/4/92	7.65	7.89	6.99	6.69	6.42	6.12	5.97	5.83	6.85	10.50	19.91	90.82
8/4/92	12.25	13.02	11.57	10.60	9.16	7.57	6.75	6.36	6.86	10.32	19.73	114.19
15/4/92	8.63	10.54	9.95	9.77	8.76	7.59	6.73	6.62	7.26	10.29	19.34	105.47
29/4/92	4.63	7.18	7.33	7.46	7.09	6.56	5.96	5.96	6.81	9.97	18.81	87.76
6/5/92	3.78	6.07	6.32	6.54	6.41	6.01	5.62	5.60	5.99	9.57	18.55	80.44
11/5/92	5.27	5.55	5.77	6.06	5.95	5.71	5.32	5.30	6.25	9.39	18.41	78.97
27/5/92	2.82	4.39	4.72	4.95	5.15	4.89	4.61	4.60	5.57	8.67	17.61	67.97
3/6/92	7.74	9.37	8.53	7.50	6.18	5.40	4.63	4.61	5.53	8.70	17.59	85.78
10/6/92	6.74	8.23	7.59	7.04	6.02	5.27	4.67	4.50	5.52	8.67	17.50	81.74
24/6/92	7.28	8.91	8.12	7.33	6.09	5.17	4.49	4.37	5.37	8.61	17.54	83.29
10/7/92	3.87	5.71	5.74	5.73	5.33	4.73	4.17	4.21	5.18	8.43	17.33	70.43
23/7/92	2.81	4.49	4.71	4.86	4.82	4.34	4.07	3.88	4.99	8.16	16.96	64.10
10/9/92	1.79	2.98	6.41	3.99	3.92	6.47	3.36	5.76	4.59	7.69	16.43	63.39
22/9/92	1.76	5.24	3.43	3.81	3.94	3.60	3.33	3.40	4.65	7.60	16.25	57.02
30/9/92	8.21	7.79	5.99	4.42	3.91	3.50	3.24	3.38	4.51	7.56	16.10	68.50
14/10/92	7.19	7.65	6.33	5.04	4.03	3.53	3.21	3.33	4.50	7.56	16.31	68.66

Quadro A.2.2 (continuação) - Evolução temporal da humidade do solo no pinhal. Apresentam-se os valores de humidade aos diferentes níveis de medição, bem como o valor acumulado para o perfil de solo considerado.

Data de medição	Profundidade (m)										Volume acumulado	
	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20	1.35	1.50		1.65
Altura equivalente de água (mm)												
28/10/92	10.10	10.40	9.39	8.90	6.90	5.42	3.66	3.46	4.49	7.48	16.24	86.44
11/11/92	8.34	9.80	9.50	9.26	8.30	6.91	5.30	4.37	4.70	7.56	16.26	90.30
3/12/92	11.57	10.93	9.36	8.83	7.89	6.89	5.45	4.61	4.99	7.61	15.97	94.09
16/12/92	10.54	11.31	10.37	10.03	9.10	7.99	7.07	6.45	6.32	8.05	16.29	103.50
6/1/93	9.97	11.07	10.50	10.33	9.76	9.55	9.11	9.87	11.23	14.11	21.49	126.99
11/2/93	13.80	13.54	11.00	9.58	7.98	7.27	7.15	7.43	8.69	12.21	20.87	119.52
24/2/93	8.69	10.38	9.72	9.70	9.03	8.07	7.42	7.15	8.80	12.01	20.26	111.23
10/3/93	6.45	8.10	8.01	8.00	7.71	7.26	6.90	6.87	7.67	11.06	19.82	97.84
17/3/93	8.94	10.25	9.71	9.46	8.75	7.85	7.08	6.88	7.49	10.55	18.58	105.54
24/3/93	7.15	8.77	8.50	8.53	8.05	7.43	6.91	6.73	7.34	10.46	18.82	98.69
31/3/93	5.33	7.21	7.15	7.24	7.25	6.76	6.49	6.50	7.01	10.13	18.64	89.70
5/5/93	8.40	8.02	6.19	5.54	5.20	4.96	4.97	5.18	6.11	9.07	17.46	81.11
19/5/93	9.95	10.07	7.87	6.69	5.19	4.69	4.51	4.60	5.34	8.00	15.34	82.25
4/6/93	7.97	9.33	8.69	8.46	7.68	6.87	6.34	6.14	6.98	9.26	17.30	95.02
18/6/93	4.29	5.80	6.06	6.11	6.16	5.54	5.60	5.60	6.15	9.23	17.10	77.63
30/6/93	4.04	5.06	5.18	5.20	5.26	5.05	4.77	4.61	5.65	8.54	17.03	70.39
14/7/93	2.64	3.76	4.12	4.25	4.60	4.21	4.21	4.20	5.20	7.96	16.67	61.83
30/7/93	2.00	3.35	3.70	3.73	3.83	4.01	3.86	3.78	5.02	7.96	16.72	57.97
31/8/93	1.82	2.59	2.92	3.47	3.56	3.19	3.18	3.47	4.54	7.33	15.39	51.46
15/9/93	3.68	3.86	3.56	3.53	3.44	3.06	3.27	3.22	4.44	7.26	15.97	55.30
27/10/93	7.12	8.95	8.88	8.81	8.57	8.16	8.71	10.65	13.43	18.44	23.49	125.20
25/11/93	8.03	9.22	9.09	8.89	8.39	8.36	8.87	10.66	14.03	19.68	26.34	131.56
30/12/93	8.28	10.02	9.60	9.33	8.57	8.04	7.94	9.57	12.67	18.05	20.32	122.40

Quadro A.2.3 - Cálculo do balanço hidrológico no eucaliptal ao longo de 1992. Os valores médios diários da evapotranspiração de referência são também apresentados.

Período	Precipitação efectiva (mm)	Água no solo (mm)	Drenagem (mm)	Transpiração		Evapotransp. de refer. ^a (mm/dia)
				(no período) (mm)	(méd. diária) (mm/dia)	
34343		208.440				
9/1-16/1	32.112	213.292	0.000	15.274	2.182	2.182
16/1-27/1	0.000	214.004	0.000	11.274	1.025	3.171
27/1-4/2	0.326	211.727	0.000	2.604	0.325	1.907
4/2-11/2	0.295	207.748	0.000	4.274	0.611	2.191
11/2-18/2	17.818	209.783	0.000	12.798	1.828	1.828
18/2-25/2	0.533	207.856	0.000	5.446	0.778	2.049
25/2-8/4	92.741	223.885	0.000	76.711	1.784	3.209
8/4-15/4	0.222	224.067	0.000	0.040	0.006	4.881
15/4-29/4	0.000	213.346	0.000	10.722	0.766	5.487
29/4-20/5	2.554	203.136	0.000	12.764	0.608	6.406
20/5-27/5	9.022	202.109	0.000	10.049	1.436	5.669
27/5-3/6	39.386	210.258	0.000	28.031	4.004	4.004
3/6-10/6	3.904	208.887	0.000	8.481	1.212	4.931
10/6-24/6	19.192	206.516	0.000	21.564	1.540	4.900
24/6-10/7	1.085	200.910	0.000	6.690	0.418	7.047
10/7-23/7	0.000	196.576	0.000	4.335	0.333	7.430
23/7-6/8	0.000	194.579	0.000	1.997	0.143	7.142
6/8-10/9	9.799	192.056	0.000	12.322	0.352	5.820
10/9-22/9	0.000	191.870	0.000	0.186	0.016	3.597
22/9-30/9	36.719	198.210	0.000	27.562	3.445	3.445
30/9-14/10	0.726	195.933	0.000	5.820	0.416	3.052
14/10-28/10	36.403	199.920	0.000	25.026	1.788	1.788
28/10-11/11	19.404	201.313	0.000	25.401	1.814	1.994
11/11-3/12	45.370	204.905	0.000	9.881	0.449	0.449
3/12-16/12	17.592	210.419	29.801	14.175	1.090	1.090
16/12-6/1	47.840	219.922	15.209	23.128	1.101	1.101
				Var. no armazenamento água no solo		11.482
				Drenagem anual		45.010
	Precip. efectiva anual	433.046		Transpiração anual		376.554
	Entradas	433.046		Saídas		433.046

Quadro A.2.4 - Cálculo do balanço hidrológico no eucaliptal ao longo de 1993. Os valores médios diários da evapotranspiração de referência são também apresentados.

Período	Precipitação efectiva (mm)	Água no solo (mm)	Drenagem (mm)	Transpiração (no período) (mm)	Transpiração (méd. diária) (mm/dia)	Evapotransp. de refer. ^a (mm/dia)
34340		219.922				
6/1-25/1	1.420	216.530	0.000	20.022	1.054	1.285
25/1-11/2	43.997	216.902	0.000	25.638	1.508	1.508
11/2-24/2	5.265	219.944	0.000	20.209	1.555	2.520
24/2-13/3	18.322	216.405	0.000	21.860	1.286	2.237
13/3-17/3	2.584	197.160	0.000	12.666	3.167	3.167
17/3-24/3	0.000	197.368	0.000	8.955	1.279	2.900
24/3-31/3	0.000	193.047	0.000	4.321	0.617	4.597
31/3-7/4	0.212	191.215	0.000	2.044	0.292	3.867
7/4-1/5	55.718	194.653	0.000	52.281	2.178	4.066
1/5-19/5	47.169	197.122	0.000	44.700	2.483	3.923
19/5-4/6	41.432	198.663	0.000	39.891	2.493	4.623
4/6-18/6	11.607	193.502	0.000	16.768	1.198	5.494
18/6-30/6	1.641	189.019	0.000	6.124	0.510	5.780
30/6-14/7	0.000	183.802	0.000	5.216	0.373	7.229
14/7-30/7	0.000	180.132	0.000	3.671	0.229	6.771
30/7-31/8	11.580	177.562	0.000	14.149	0.442	5.677
31/8-15/9	27.087	177.278	0.000	27.371	1.825	4.201
15/9-27/10	182.095	207.216	0.000	117.765	2.804	2.804
27/10-25/11	121.452	221.126	34.391	47.607	1.642	1.642
25/11-30/12	18.601	219.373	41.390	38.899	1.111	1.111
Água armazenada à superfície do solo		15.209		Var. no armazenamento água no solo		-0.549
Precip. efectiva anual		590.182		Drenagem anual		75.781
Entradas		605.391		Transpiração anual		530.159
				Saídas		605.391

Quadro A.2.5 - Cálculo do balanço hidrológico no pinhal ao longo de 1992. Os valores médios diários da evapotranspiração de referência são também apresentados.

Período	Precipitação efectiva (mm)	Água no solo (mm)	Drenagem (mm)	Transpiração (no período) (mm)	(méd. diária) (mm/dia)	Evapotransp. de refer. ^a (mm/dia)
34343		130.026				
9/1-16/1	23.789	146.430	0.000	7.386	1.055	1.094
16/1-27/1	0.000	134.938	0.000	11.492	1.045	1.471
27/1-4/2	0.034	123.501	0.000	11.471	1.434	2.022
4/2-11/2	0.416	119.492	0.000	4.425	0.632	1.817
11/2-18/2	13.272	122.238	0.000	10.526	1.504	1.522
18/2-25/2	7.987	122.404	0.000	7.821	1.117	2.319
25/2-6/3	0.324	115.622	0.000	7.105	0.711	2.539
6/3-12/3	0.000	107.217	0.000	8.404	1.401	3.526
12/3-18/3	0.000	100.062	0.000	7.156	1.193	3.729
18/3-1/4	12.885	90.815	0.000	22.132	1.581	4.099
1/4-8/4	33.608	114.187	0.000	10.236	1.462	2.522
8/4-15/4	0.158	105.467	0.000	8.878	1.268	4.969
15/4-29/4	0.258	87.764	0.000	17.961	1.283	5.731
29/4-6/5	0.000	80.443	0.000	7.321	1.046	6.820
6/5-11/5	3.275	78.966	0.000	4.752	0.950	6.303
11/5-27/5	2.877	67.969	0.000	13.874	0.867	6.156
27/5-3/6	30.990	85.775	0.000	13.184	1.883	3.965
3/6-10/6	3.488	81.738	0.000	7.525	1.075	5.296
10/6-24/6	22.519	83.285	0.000	20.972	1.498	5.044
24/6-10/7	0.000	70.425	0.000	12.860	0.804	7.381
10/7-23/7	0.000	64.096	0.000	6.329	0.487	8.053
23/7-10/9	0.488	63.387	0.000	1.197	0.024	6.309
10/9-22/9	0.000	57.020	0.000	6.367	0.531	4.088
22/9-30/9	32.283	68.501	0.000	20.802	2.600	3.013
30/9-14/10	6.217	68.660	0.000	6.058	0.433	3.070
14/10-28/10	32.904	86.442	0.000	15.122	1.080	1.769
28/10-11/11	11.870	90.296	0.000	8.016	0.573	1.746
11/11-3/12	22.094	94.087	0.000	18.304	0.832	1.158
3/12-16/12	19.368	103.496	0.000	9.958	0.766	1.203
16/12-6/1	41.635	126.992	0.000	18.139	0.864	1.024
				Var. no armazenamento água no solo		-3.034
				Drenagem anual		0.000
	Precip. efectiva anual	322.740		Transpiração anual		325.774
	Entradas	322.740		Saídas		322.740

Quadro A.2.6 - Cálculo do balanço hidrológico no pinhal ao longo de 1993. Os valores médios diários da evapotranspiração de referência são também apresentados.

Período	Precipitação efectiva (mm)	Água no solo (mm)	Drenagem (mm)	Transpiração (no período) (mm)	Transpiração (méd. diária) (mm/dia)	Evapotransp. de refer. ^a (mm/dia)
6/1		126.992				
6/1-11/2	32.807	119.524	0.000	40.275	1.119	1.381
11/2-24/2	3.031	111.231	0.000	11.325	0.871	2.538
24/2-10/3	3.354	97.838	0.000	16.747	1.196	2.512
10/3-17/3	30.301	105.537	4.347	18.255	2.608	2.608
17/3-24/3	0.120	98.688	0.000	6.969	0.996	2.807
24/3-31/3	0.000	89.699	0.000	8.989	1.284	4.638
31/3-5/5	43.004	81.110	0.000	51.593	1.474	4.004
5/5-19/5	29.742	82.246	0.000	28.606	2.043	4.383
19/5-4/6	34.313	95.019	0.000	21.541	1.346	4.850
4/6-18/6	2.436	77.628	0.000	19.827	1.416	6.435
18/6-30/6	11.615	70.387	0.000	18.856	1.571	6.176
30/6-14/7	0.000	61.829	0.000	8.557	0.611	7.980
14/7-30/7	0.000	57.971	0.000	3.858	0.241	7.846
30/7-31/8	1.543	51.461	0.000	8.053	0.252	5.886
31/8-15/9	14.918	55.303	0.000	11.076	0.738	4.374
15/9-27/10	147.778	125.204	0.000	77.877	1.854	3.025
27/10-25/11	109.789	131.564	55.995	47.434	1.636	1.636
25/11-30/12	25.755	122.404	0.000	34.915	0.998	1.149
				Var. no armazenamento água no solo		-4.588
				Drenagem anual		60.342
	Precip. efectiva anual	490.506		Transpiração anual		434.752
	Entradas	490.506		Saídas		490.506

Anexo 3

**Variação horária e diária da condutância estomática
e das taxas de transpiração estimadas pela equação
de Penman-Monteith**

Quadro A.3.1 - Valores médios horários da condutância estomática no eucaliptal durante a Primavera de 1993. Os valores apresentados referem-se à copa (média geral e respectivo desvio padrão) e a cada um dos estratos que a constituem.

Data	Hora (TUC)	Condutância média horária (mmol/m ² /s)				
		Copa		Estrato superior	Estrato médio	Estrato inferior
		média geral	desvio padrão			
20-3-93	10	109.327	54.423	173.051	92.311	62.618
20-3-93	12	101.441	34.207	118.348	107.195	78.780
20-3-93	14	82.367	21.690	75.526	80.625	90.951
20-3-93	16	51.513	21.485	69.030	50.204	35.306
20-3-93	18	29.605	12.990	42.712	24.740	21.362
3-4-93	7	113.507	126.683	111.516	223.817	5.187
3-4-93	9	46.932	22.861	72.148	40.634	28.014
3-4-93	11	34.964	20.884	47.993	37.394	19.504
3-4-93	13	42.046	26.656	65.364	39.423	21.351
3-4-93	15	30.832	24.106	54.796	24.209	10.181
19-5-93	8	77.732	67.914	156.877	46.319	30.001
19-5-93	10	78.178	47.575	132.141	57.784	44.610
19-5-93	12	89.207	39.649	132.016	65.579	70.024
19-5-93	14	70.701	20.890	79.886	59.355	72.862
19-5-93	16	50.124	26.940	76.743	46.323	27.305
2-6-93	8	73.891	73.525	156.467	51.727	13.478
2-6-93	10	93.356	30.483	111.862	88.331	79.877
2-6-93	12	66.135	35.729	57.848	46.561	93.996
2-6-93	14	32.828	11.155	39.337	23.061	36.085
2-6-93	16	28.949	8.727	32.737	27.243	26.865
2-6-93	18	18.106	8.624	26.232	14.541	13.544
16-6-93	6	18.578	22.502	44.420	8.258	3.057
16-6-93	7	42.492	44.818	98.243	14.706	14.526
16-6-93	9	47.559	22.206	61.825	42.824	38.027
16-6-93	11	27.920	5.948	27.919	26.236	29.605
16-6-93	13	17.442	8.966	25.526	12.868	13.931
16-6-93	15	13.495	4.760	15.225	12.343	12.917
16-6-93	17	14.590	5.240	21.027	10.163	12.582
16-6-93	19	7.865	3.980	12.412	4.950	6.234
26-6-93	6	13.395	3.656	11.694	11.286	17.206
26-6-93	7	22.019	8.340	27.132	21.056	17.869
26-6-93	9	43.466	13.819	43.717	48.358	38.324
26-6-93	11	36.621	13.324	43.046	27.684	39.133
26-6-93	13	46.492	16.338	64.167	36.482	38.826
26-6-93	15	37.574	10.185	49.600	33.291	29.832
26-6-93	17	34.288	14.834	52.371	27.148	23.345
26-6-93	19	20.407	6.581	28.614	17.701	14.907

Quadro A.3.2 - Valores médios horários da condutância estomática no pinhal durante a Primavera de 1993. Os valores apresentados referem-se à copa (média geral e respectivo desvio padrão) e a cada um dos estratos que a constituem.

Data	Hora (TUC)	Condutância média horária (mmol/m ² /s)					
		Copa		agulhas de 1 ano	agulhas de 2 anos	agulhas de 3 anos	agulhas de 2 e 3 anos
		média geral	desvio padrão				
27-3-93	8	20.095	8.527	16.674	22.871	20.738	21.805
27-3-93	10	54.503	8.758	52.771	56.851	53.887	55.369
27-3-93	12	35.519	7.812	39.234	35.314	32.008	33.661
27-3-93	14	22.817	6.110	20.641	20.594	27.215	23.904
27-3-93	16	8.823	2.830	8.539	8.956	8.975	8.965
27-3-93	18	6.805	2.314	7.126	7.149	6.141	6.645
27-3-93	20	2.118	1.533	2.683	2.032	1.640	1.836
15-4-93	6	19.938	11.449	18.443	27.759	13.611	20.685
15-4-93	8	42.279	10.982	33.410	46.019	47.409	46.714
15-4-93	10	38.511	7.527	33.792	40.516	41.225	40.871
15-4-93	12	26.654	6.003	22.745	27.589	29.627	28.608
15-4-93	14	13.268	5.002	10.366	15.404	14.034	14.719
15-4-93	16	6.732	4.689	4.956	6.222	9.019	7.621
15-4-93	18	1.973	1.421	1.811	1.528	2.581	2.054
5-6-93	6	28.564	4.044	30.838	29.570	25.283	27.426
5-6-93	8	28.235	7.998	32.866	28.915	22.923	25.919
5-6-93	10	35.427	6.676	37.127	37.354	31.800	34.577
5-6-93	12	33.806	6.138	36.906	34.849	29.664	32.256
5-6-93	14	26.472	6.388	30.371	25.773	23.271	24.522
5-6-93	16	13.872	5.581	16.875	13.607	11.134	12.370
5-6-93	18	17.538	4.298	18.470	17.054	17.092	17.073
12-6-93	6	31.606	7.122	35.597	30.298	28.922	29.610
12-6-93	8	43.699	8.782	47.376	45.187	38.534	41.861
12-6-93	10	36.773	5.255	40.513	35.486	34.319	34.903
12-6-93	12	29.178	3.268	28.799	30.478	28.258	29.368
12-6-93	14	24.039	4.482	25.483	23.427	23.208	23.317
12-6-93	16	21.331	5.189	21.078	20.912	22.002	21.457
12-6-93	18	11.654	2.597	11.649	11.128	12.187	11.657
12-6-93	19	5.599	4.068	6.772	6.161	3.866	5.013

Quadro A.3.3 - Valores das principais variáveis envolvidas no cálculo da taxa de transpiração no eucaliptal através da equação de Penman-Monteith. São ainda apresentados os valores horários do fluxo de calor latente, bem como as taxas diárias de transpiração calculadas por aquela equação de acordo com o modelo unilaminar.

Data	Hora (TUC)	$R_n - G$ (W/m ²)	T_d (°C)	g_c (mmol/m ² /s)	g_a (mol/m ² /s)	DHE (g/Kg)	λE_t (W/m ²)	E_t (mm/dia)
20/03/93	10	369.819	15.745	331.394	1.863	11.043	118.176	1.545
20/03/93	12	508.307	20.168	311.709	3.271	14.622	203.789	
20/03/93	14	499.916	20.935	254.651	4.872	15.337	167.568	
20/03/93	16	274.747	19.393	157.896	4.976	13.930	83.303	
20/03/93	18	-10.389	16.455	89.706	3.534	11.560	23.550	
03/04/93	7	23.427	7.985	332.390	2.021	6.597	25.838	0.329
03/04/93	9	316.944	12.188	140.251	2.950	8.754	41.207	
03/04/93	11	339.269	15.172	105.520	4.410	10.643	36.723	
03/04/93	13	321.645	16.208	127.634	4.826	11.378	42.119	
19/05/93	8	378.882	12.598	232.997	2.664	8.995	82.364	1.126
19/05/93	10	431.861	13.432	235.178	4.354	9.502	82.822	
19/05/93	12	367.090	14.812	269.286	5.965	10.399	112.251	
19/05/93	14	584.091	15.833	214.211	6.733	11.109	115.896	
19/05/93	16	225.050	15.283	151.658	6.797	10.721	61.837	
02/06/93	8	367.515	15.368	224.048	3.349	10.777	60.550	1.704
02/06/93	10	665.078	18.168	285.592	3.664	12.894	177.666	
02/06/93	12	675.360	20.117	204.026	3.448	14.576	165.531	
02/06/93	14	643.321	21.990	101.522	3.032	16.372	107.323	
02/06/93	16	362.571	22.902	89.803	3.317	17.316	82.270	
02/06/93	18	38.747	21.850	55.922	3.710	16.231	32.775	
16/06/93	6	11.956	17.100	56.292	2.743	12.045	10.872	1.734
16/06/93	7	141.171	19.133	129.731	2.092	13.702	50.656	
16/06/93	9	448.729	24.685	148.118	2.306	19.298	152.652	
16/06/93	11	608.698	28.273	88.423	3.496	23.913	143.230	
16/06/93	13	659.098	30.198	55.499	4.095	26.769	102.274	

Quadro A.3.3 (continuação) - Valores das principais variáveis envolvidas no cálculo da taxa de transpiração no eucalipto através da equação de Penman-Monteith. São ainda apresentados os valores horários do fluxo de calor latente, bem como as taxas diárias de transpiração calculadas por aquela equação de acordo com o modelo unilaminar.

Data	Hora (TUC)	$R_n - G$ (W/m ²)	T_d (°C)	g_c (mmol/m ² /s)	g_a (mol/m ² /s)	DHE (g/Kg)	λE_t (W/m ²)	E_t (mm/dia)
16/06/93	15	549.190	30.945	43.092	4.709	27.957	76.983	
16/06/93	17	277.945	29.273	46.304	5.707	25.361	63.975	
16/06/93	19	-3.943	25.875	24.607	4.161	20.732	20.021	
26/06/93	6	15.486	19.285	40.933	3.508	13.833	10.926	1.316
26/06/93	7	182.363	21.242	67.774	5.167	15.629	25.226	
26/06/93	9	481.772	24.100	135.420	6.336	18.624	92.052	
26/06/93	11	590.884	25.377	114.649	6.397	20.118	92.988	
26/06/93	13	673.469	22.957	144.427	6.472	17.370	90.066	
26/06/93	15	509.082	23.917	117.114	5.867	18.418	80.144	
26/06/93	17	297.168	23.043	106.512	6.168	17.462	61.784	
26/06/93	19	10.796	20.757	62.835	3.969	15.165	17.439	

Quadro A.3.4 - Cálculo do fluxo horário de calor latente e das taxas diárias de transpiração no eucaliptal através da equação de Penman-Monteith considerando o coberto constituído por três estratos distintos.

Data	Hora (TUC)	Estrato Superior						Estrato Médio						
		g^a (mol/m ² /s)	R_n (W/m ²)	T_d (°C)	g^c (mmol/m ² /s)	DHE (g/Kg)	λE_t (W/m ²)	E_t (mm/dia)	R_n (W/m ²)	T_d (°C)	g^c (mmol/m ² /s)	DHE (g/Kg)	λE_t (W/m ²)	E_t (mm/dia)
19/05/93	8	2.664	380.760	12.598	123.300	8.995	47.624	0.471	231.017	10.910	61.345	8.039	9.243	0.357
	10	4.354	456.730	13.432	104.156	9.502	40.131		313.117	13.823	76.966	9.750	30.597	
	12	5.965	380.620	14.812	104.437	10.399	46.924		272.679	14.427	87.559	10.141	30.792	
	14	6.733	594.000	15.833	63.405	11.109	36.501		412.007	15.995	79.590	11.226	42.151	
	16	6.797	228.050	15.283	60.836	10.721	25.713		136.072	15.747	62.017	11.047	26.528	
	18	3.349	378.730	15.368	124.432	10.777	36.701	0.588	229.773	14.490	69.208	10.179	9.935	0.558
02/06/93	10	3.664	710.850	18.168	89.829	12.894	66.178		487.331	17.477	119.524	12.340	61.153	
	12	3.448	777.500	20.117	46.564	14.576	45.928		557.007	20.050	63.463	14.515	51.104	
	14	3.032	661.980	21.990	31.884	16.372	36.713		459.159	21.920	31.586	16.302	30.996	
	16	3.317	377.820	22.902	26.607	17.316	26.271		225.437	23.610	37.420	18.081	34.165	
	18	3.710	43.497	21.850	21.202	16.231	12.877		21.789	23.524	19.885	17.986	14.800	
	19	2.743	2.910	17.100	35.250	12.045	6.744	0.659	1.384	16.440	11.058	11.546	0.966	0.609
16/06/93	7	2.092	139.150	19.133	78.647	13.702	32.631		75.162	17.948	19.808	12.714	5.936	
	9	2.306	461.630	24.685	50.634	19.298	60.611		284.954	23.765	58.924	18.250	53.466	
	11	3.496	691.570	28.273	23.171	23.913	42.277		503.822	28.552	36.791	24.309	59.834	
	13	4.095	736.500	30.198	21.250	26.769	42.101		493.427	30.840	18.142	27.787	33.442	
	15	4.709	587.770	30.945	12.717	27.957	23.810		373.213	31.497	17.420	28.864	30.901	
	17	5.707	291.520	29.273	17.447	25.361	24.793		168.762	30.927	14.271	27.928	21.518	
26/06/93	19	4.161	-2.868	25.875	10.157	20.732	8.385		-1.437	26.965	6.857	22.127	6.327	
	6	3.508	14.339	19.285	9.348	13.833	2.558	0.464	6.818	18.540	15.256	13.198	3.249	0.490
	7	5.167	189.000	21.242	21.853	15.629	8.435		102.088	20.052	28.679	14.514	9.033	
	9	6.336	505.230	24.100	35.636	18.624	25.954		311.867	22.932	66.675	17.343	34.350	
	11	6.397	674.650	25.377	35.379	20.118	31.354		491.495	26.263	38.377	21.217	35.553	
	13	6.472	717.870	22.957	52.155	17.370	35.004		480.945	23.845	50.132	18.336	30.900	
15	15	5.867	531.580	23.917	40.491	18.418	29.409		337.534	24.470	45.882	19.046	30.401	
	17	6.168	301.820	23.043	42.683	17.462	25.727		174.725	24.267	37.264	18.814	23.097	
	19	3.969	7.751	20.757	23.103	15.165	6.578		3.883	21.985	24.096	16.363	9.296	

Quadro A.3.5 - Valores das principais variáveis envolvidas no cálculo da taxa de transpiração no pinhal através da equação de Penman-Monteith. São ainda apresentados os valores horários do fluxo de calor latente, bem como as taxas diárias de transpiração calculadas por aquela equação.

Data	Hora (TUC)	$R_n - G$ (W/m ²)	T_d (°C)	g_c (mmol/m ² /s)	g_a (mol/m ² /s)	DHE (g/Kg)	λE_t (W/m ²)	E_t (mm/dia)
27/03/93	7	-12.551	4.140	42.344	3.563	1.100	3.413	0.501
27/03/93	9	281.321	8.465	117.069	2.418	2.312	32.621	
27/03/93	11	463.822	14.700	77.857	2.830	6.004	51.740	
27/03/93	13	597.725	18.530	50.988	3.832	10.124	51.781	
27/03/93	15	410.043	19.575	19.650	3.696	10.986	20.084	
27/03/93	17	95.273	18.680	15.076	4.358	9.910	11.515	
27/03/93	19	-56.805	14.657	4.634	4.234	6.309	2.074	
15/04/93	6	-5.972	8.348	42.665	3.492	0.859	2.648	0.364
15/04/93	8	309.414	11.643	91.579	6.312	2.326	21.405	
15/04/93	10	594.624	14.432	84.871	6.566	4.460	39.144	
15/04/93	12	691.370	16.808	59.367	7.228	6.145	36.436	
15/04/93	14	584.072	17.257	29.412	7.931	6.248	17.403	
15/04/93	16	315.173	16.443	14.827	8.667	5.948	7.450	
15/04/93	18	-17.058	13.975	4.309	6.640	3.752	1.188	
05/06/93	6	56.012	14.192	62.345	2.044	1.990	8.476	0.364
05/06/93	8	84.009	16.167	61.971	3.133	2.573	13.945	
05/06/93	10	279.123	17.585	78.277	4.464	3.694	29.075	
05/06/93	12	424.297	18.695	74.999	4.966	4.248	34.672	
05/06/93	14	160.957	18.715	58.729	4.986	4.621	22.879	
05/06/93	16	74.824	18.738	30.700	4.157	5.079	12.258	
05/06/93	18	64.559	18.502	38.847	4.288	4.476	13.536	
12/06/93	6	10.898	11.353	68.322	4.904	1.024	5.306	0.805
12/06/93	8	328.241	15.772	95.489	6.594	3.936	34.648	
12/06/93	10	622.483	19.660	81.913	6.837	7.547	58.797	

Quadro A.3.5 (continuação) - Valores das principais variáveis envolvidas no cálculo da taxa de transpiração no pinhal através da equação de Penman-Monteith. São ainda apresentados os valores horários do fluxo de calor latente, bem como as taxas diárias de transpiração calculadas por aquela equação.

Data	Hora (TUC)	$R_n - G$ (W/m ²)	T_d (°C)	g_c (mmol/m ² /s)	g_a (mol/m ² /s)	DHE (g/Kg)	λE_t (W/m ²)	E_t (mm/dia)
12/06/93	12	750.695	21.808	65.606	6.932	9.365	59.535	
12/06/93	14	694.027	24.032	54.574	6.711	11.831	59.696	
12/06/93	16	496.205	23.378	48.251	8.059	9.739	40.611	
12/06/93	18	167.318	21.033	26.054	9.156	7.921	15.919	
12/06/93	20	-71.800	17.240	12.373	6.110	4.497	3.806	

Anexo 4

Evapotranspiração de referência

O conceito de *Evapotranspiração de Referência*

Desde há muito e em condições diversas que se tem considerado conveniente a definição de taxas padrão de evaporação que permitam avaliar o grau de controlo exercido sobre o processo evaporativo pelas condições meteorológicas e climáticas prevalentes num dado local ou região particulares (Shuttleworth, 1979). Surgiu assim, o conceito de *evapotranspiração potencial* a que Penman (1956) se refere como "a quantidade de água transpirada, por unidade de tempo, por uma cultura verde rasteira, cobrindo por completo o solo, com altura uniforme e amplamente abastecida de água". Contudo, à medida que se tomou consciência da importância que podem assumir sobre a evaporação quer o controlo exercido pela própria vegetação, quer o fenómeno da advecção, o conceito de evapotranspiração potencial foi redefinido tendo Doorembos e Pruitt (1992) apresentado o conceito de *evapotranspiração de referência* (E_{10}) que aqueles autores definiram como "a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa completamente coberta com uma cultura de altura uniforme entre 8 a 15 cm, crescendo activamente e não estando sujeita a quaisquer restrições hídricas".

Ambos os conceitos pretendem traduzir a importância do controlo atmosférico da evaporação em circunstâncias para as quais os efeitos da superfície sobre aquele processo são tão reduzidas quanto possível, pelo que existe uma natural sobreposição entre estes dois conceitos. No entanto, o conceito de evapotranspiração de referência ao ter em conta quer o controlo exercido pela vegetação quer a advecção, torna-se conceptualmente mais aceitável.

Por outro lado, apesar do uso generalizado da equação proposta por Penman, nunca foi consensual a formulação da função da velocidade do vento incorporada no termo aerodinâmico daquela equação, pelo que diversos autores têm vindo a propor diversas alterações à função $f(u)$ inicialmente apresentada por Penman (Brutsaert, 1991). No presente estudo, adoptou-se o conceito de evapotranspiração de referência como taxa padrão de evaporação, tendo o cálculo de E_{10} sido executado através da equação de Penman (eq. 4.1) modificada por Doorembos e Pruitt (1992), utilizando as medições das diferentes variáveis micrometeorológicas feitas pelos instrumentos instalados nas parcelas experimentais. Este cálculo foi realizado numa base diária ao longo de 1992/93, em ambos os povoamentos, utilizando um programa especialmente concebido para o efeito (em linguagem FORTRAN 77) pelo Eng.º Manuel Osório Henriques (DEF - ISA).

Anexo 5

**Taxas de transpiração estimadas pelo balanço hidrológico
e pela equação de Penman-Monteith**

Quadro A.5.1 - Taxas diárias de transpiração estimadas, quer pelo balanço de água no solo, quer pela equação de Penman-Monteith através dos modelos uni e multilaminar. Os valores da evapotranspiração de referência (E_{r0}) para os mesmos dias são também apresentados.

	Método de Penman-Monteith		Método do	E_{r0}
	modelo unilaminar	modelo multilaminar	balanço hidrológico	
Eucaliptal				
20/03/93	1.545		1.279	4.140
03/04/93	0.329		0.292	2.460
19/05/93	1.126	1.019	2.483	3.719
02/06/93	1.704	1.525	2.493	6.580
16/06/93	1.734	1.641	1.198	8.546
26/06/93	1.316	1.244	0.510	7.428
Pinhal				
27/03/93	0.510		1.284	4.767
15/04/93	0.366		1.474	5.632
05/06/93	0.369		1.416	2.568
12/06/93	0.812		1.416	7.736

ERRATA

página	linha	onde se lê	deve ler-se
Lista de figuras	Fig. 4.2 Fig. 4.5 Fig. 4.8	conjunto de n estratos (gs) (λE)	conjunto de n estratos (g_s) (λE_c)
Lista de Quadros	Quadro 5.2	(1) equação de Penman-Monteith (modelo multilaminar)	(2) equação de Penman-Monteith (modelo multilaminar)
7	15	1.7 e 1.8 gcm ⁻³	1.6 e 1.8 gcm ⁻³
20	linha 4 da legenda do Quadro 3.1	de regressões	de regressão
20	14	coeficientes b	coeficientes b
25	37	das parcelas	nas parcelas
44	Fig. 4.8	(λE)	(λE_c)
46	Fig. 4.12	(λE)	(λE_c)
54	linha 5 da legenda do Quadro 5.2	(1) equação de Penman-Monteith (modelo multilaminar)	(2) equação de Penman-Monteith (modelo multilaminar)
59	18	(Pereira <i>et al.</i> , 1989, cit. por Alves <i>et al.</i> , 1990 ou Gazarini <i>et al.</i> , 1990)	(Pereira <i>et al.</i> , 1989, cit. por Gazarini <i>et al.</i> , 1990)
69	5	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
69	10	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pinus pinaster</i>
69	23	exchange to pessage deficits and soil water content. III - In the sclerophyllous	exchange to vapour pressure deficits and soil water content. III - In the sclerophyllous
70	8	<i>Pinus pinea</i>	<i>Pinus pinea</i>
71	3	A Forest evaporation	A forest evaporation
Anexo 1	Quadro A.1.2 (1ª coluna)	(cm)	(m)
Anexo 5	linha 4 da legenda do Quadro A.5.1	são também apresentados.	são também apresentados. Todos os valores são expressos em mm dia ⁻¹ .

Por lapso, foi indevidamente incluída na bibliografia a referência Nizinski e Saugier, 1989b. A referência Nizinski e Saugier, 1989, que surge nas páginas 13 (linha 22) e 62 (linha 15) corresponde, na bibliografia, a Nizinski e Saugier, 1989a.