

# ESTIMAÇÃO DE ESCOAMENTOS SUPERFICIAIS MENSAIS EM PORTUGAL CONTINENTAL BASEADA NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL DE THORNTHWAITE

*Maria Manuela PORTELA, João Filipe SANTOS*  
*IST, DECivil, SHRHA, Lisboa, Portugal; ESTIG, Beja, Portugal*  
*mps@civil.ist.utl.pt; joaof.santos@estig.ipbeja.pt*

## RESUMO

Com base nos registos de dezasseis estações climatológicas portuguesas, evidencia-se que a técnica do balanço hídrico sequencial baseada na consideração da evapotranspiração potencial de Thornthwaite (não obstante a sua simplicidade e modestas exigências, em termos dos parâmetros intervenientes e da informação hidrológica necessária), fornece estimativas dos escoamentos mensais muito próximas ou correlacionadas de modo significativo com as obtidas por aplicação daquela técnica à evapotranspiração potencial de Penman-Monteith (técnica que, em contrapartida, é fortemente condicionada pela complexidade do cálculo desta última evapotranspiração e pela vasta informação climatológica que o mesmo exige).

A partir dos registos de escoamento relativos a uma estação hidrométrica, evidencia-se, ainda, a razoável proximidade entre escoamentos estimados pela técnica em menção baseada na evapotranspiração potencial de Thornthwaite e pelo modelo de Temez aplicado a essa evapotranspiração.

Conclui-se, assim, que a evapotranspiração potencial de Thornthwaite pode ser integrada num modelo de estimação de escoamentos mensais, tendo em vista o preenchimento de falhas de registos ou, com assinalável importância, o prolongamento das séries de registos, com as vantagens evidentes que decorrem de o cálculo daquela evapotranspiração apenas fazer intervir temperaturas médias do ar, para as quais existem normalmente registos facilmente acessíveis, não só no que respeita à dimensão das séries, mas também ao número de pontos de medição

**PALAVRAS-CHAVE:** Evapotranspirações potenciais de Thornthwaite e de Penman-Monteith, balanço hídrico sequencial, modelo de Temez, estimação de escoamentos mensais.

## ABSTRACT

Based on the records at sixteen Portuguese climatologic stations, it is shown that the sequential water budget technique applied to the Thornthwaite potential evapotranspiration (despite its simplicity and its poor data requirements) enables monthly stream flow estimates that are similar or closely related to those provided by the application of the same technique based on the Penman-Monteith evapotranspiration (which implementation is, however, highly limited by the complex evaluation of the latter evapotranspiration and by its data requirements).

By utilizing the records at one Portuguese stream gauging station, it is also shown that the monthly stream flow estimates provided by the sequential water budget technique applied to the Thornthwaite potential evapotranspiration and by the Temez model applied to the same evapotranspiration are fairly close.

The previous results point towards the possibility of using the Thornthwaite potential evapotranspiration in a monthly stream flow estimation model, having in view the fulfillment, but, mainly, the extension of the series of flow records, with evident advantages as only records of mean air temperatures are required to evaluate that evapotranspiration, those records being generally available.

**KEYWORDS:** Thornthwaite and Penman-Monteith potential evapotranspiration, sequential water budget, Temez model, evaluation of monthly stream flows.

## 1. INTRODUÇÃO. OBJECTIVO DO ESTUDO

Em Portugal Continental, a medição, de modo extensivo e sistemático, de alturas hidrométricas, e a conseqüente avaliação de escoamentos fluviais, iniciaram-se posteriormente à da generalidade das demais variáveis hidrológicas. Acresce que as correspondentes séries de registos apresentam, não só falhas esporádicas frequentes, mas também longas interrupções, o que dificulta a sua utilização em estudos hidrológicos, quer de índole científica, quer destinados ao dimensionamento de infra-estruturas hidráulicas. Surge, assim, a necessidade de dispor de modelos que permitam preencher as falhas de registos e, muito especialmente, prolongar as séries de registos. A eficiência de tais modelos depende, contudo, da sua capacidade para fornecer estimativas do escoamento fazendo intervir as variáveis hidrológicas para as quais é de esperar existirem medições, como sejam a precipitação e, em certa medida, a temperatura.

De entre tais modelos, destaca-se, pela sua simplicidade, a técnica do balanço hídrico sequencial e, mais recentemente, devido a uma utilização generalizada no âmbito da elaboração dos Planos de Bacia Hidrográfica e do correspondente Plano Nacional da Água, o modelo de Temez. Contudo, tanto aquela técnica, como este modelo fazem intervir a evapotranspiração potencial, cujo cálculo mais rigoroso requer registos de variáveis climatológicas que, exceptuando mais uma vez, a precipitação e a temperatura, não estão, regra geral, facilmente disponíveis ou não existem mesmo.

No anterior contexto, o estudo subjacente ao presente artigo teve por objectivo comparar as estimativas de escoamentos mensais obtidas, fundamentalmente, pela técnica do balanço hídrico sequencial e, complementarmente, pelo modelo de Temez, uma e outro aplicados considerando dois métodos de cálculo da evapotranspiração potencial: o método de Thornthwaite, de reconhecida simplicidade, uma vez que apenas faz intervir temperaturas médias do ar, e o método de Penman-Monteith que, contrariamente, exige registos de numerosas variáveis climatológicas, do que resulta uma aplicação muito mais restritiva. Para tanto, foram utilizados os registos de variáveis climatológicas relativos a dezasseis estações climatológicas de Portugal Continental.

Com base num caso de estudo, verifica-se ainda que o modelo de Temez apoiado na evapotranspiração potencial de Thornthwaite constitui uma ferramenta adequada para estimar escoamentos mensais em bacias hidrográficas de Portugal Continental. Tais escoamentos são, contudo, muito razoavelmente aproximados pelos fornecidos pela técnica do balanço hídrico sequencial baseada na evapotranspiração potencial de Thornthwaite, cuja aplicação é incomparavelmente mais expedita.

## 2. EVAPOTRANSPIRAÇÕES POTENCIAIS DE THORNTHWAITTE (ETP) E DE PENMAN-MONTEITH (ET0)

Por evapotranspiração potencial, ETP, entende-se o processo de transferência de água para a atmosfera, directamente a partir do solo ou através das plantas, no pressuposto de que a humidade requerida pelo processo está totalmente disponível.

De acordo com Thornthwaite (1948), o cálculo da ETP (mm/mês) para um mês com  $N_d$  dias processa-se apenas a partir do conhecimento da temperatura média do ar nesse mês,  $T_{med}$  (° C), por aplicação da seguinte equação:

$$ETP = \left[ 16 \times \left( 10 \frac{T_{med}}{I} \right)^\alpha \right] \times \left[ \frac{N/12 \times N_d}{30} \right] \quad [ 1 ]$$

em que  $I$  é o índice térmico anual que depende do índice térmico mensal que, por sua vez, é função das temperaturas médias do ar ao longo dos sucessivos meses do ano;  $\alpha$  um expoente que depende também do índice  $I$ ; e  $N/12$  a insolação astronómica diária expressa em unidades de 12 h de um mês com 30 dias, definida em função da latitude do local para o qual se está a efectuar o cálculo de ETP.

O método de Penman-Monteith fornece a evapotranspiração potencial para um solo completamente coberto por uma cultura de referência, razão pela qual tal evapotranspiração é frequentemente designada por de referência,  $ET_0$ . A cultura pode ser assimilada a uma relva amplamente regada, cobrindo completamente a superfície do solo, com altura uniforme, em crescimento activo e sem problemas de abastecimento hídrico, Pereira *et al.* (1998), p. 15

O cálculo de ET<sub>0</sub> (mm/dia) para um dado local pode ser efectuado a partir da seguinte equação, Pereira *et al.* (1998), p. 24

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - g) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} v_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad [ 2 ]$$

em que T<sub>med</sub> é a temperatura média do ar (°C); Δ o declive da curva de tensão de vapor na atmosfera (k Pa °C<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> a radiação solar líquida (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); G o fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); γ a constante psicométrica (k Pa °C<sup>-1</sup>); e v<sub>2</sub> a velocidade média do vento a 2 m do solo (ms<sup>-1</sup>); e<sub>a</sub> a tensão de saturação do vapor à temperatura T (k Pa); e e<sub>d</sub> a tensão real do vapor (K Pa).

O cálculo de algumas das variáveis que figuram na anterior equação, para além da complexidade de que se pode revestir, faz ainda intervir as temperaturas média máxima e média mínima do ar, a humidade relativa média do ar e a radiação solar global ou, em alternativa (por recurso à equação de Angström), a insolação.

De acordo com Quintela (1984), p. 634, e Lencastre e Franco (1984), p. 118, o método de Thornthwaite aparenta conduzir a estimativas por defeito da evapotranspiração potencial em Portugal Continental. Por sua vez, segundo Pereira *et al.* (1998), p. 18, o método de Penman-Monteith tende, em relação a outros métodos, a sobrestimar a evapotranspiração; apresenta, contudo, os resultados mais satisfatórios num grande número de situações climáticas, diferentes locais e escalas temporais.

### 3. TÉCNICA DO BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL

A técnica do balanço sequencial de Thornthwaite, Thornthwaite (1948), Carter (1958), Varennes e Mendonça (1972-1973), p. 481 a 484, Mather (1978 e 1981), Lencastre e Franco (1984), p. 328, recorre à equação da continuidade aplicada a um “elemento” da fase terrestre do balanço hidrológico, mediante o cálculo dos fluxos de água “entrados” nesse “elemento”, dos fluxos de água dele “saídos” e das variações de armazenamento de água no mesmo. A equação geral que traduz o balanço hídrico sequencial pode ser dada por:

$$P = S + ETR + \Delta S \quad [ 3 ]$$

em que, para um dado intervalo de tempo, P é a precipitação, S o excesso hídrico ou *superavit*, ETR, a evapotranspiração real e ΔS a variação de armazenamento de água no elemento (variáveis expressas nas mesmas unidades).

Embora com carácter aproximado – que, no essencial, decorre do facto de o balanço hídrico sequencial não ter em conta a heterogeneidade da bacia hidrográfica, a infiltração profunda e a complexidade dos movimentos da água à superfície e no interior do solo que contribuem para o escoamento no “elemento” e de não atender a que necessariamente existe produção de escoamento superficial sempre que a intensidade da precipitação é superior à da infiltração da água no solo –, pode considerar-se que o excesso hídrico ou *superavit*, S, representa o limite superior do escoamento superficial.

Nesse entendimento, a técnica do balanço hídrico sequencial pode ser aplicada para estimar o escoamento superficial. Para tanto e uma vez atribuída ao solo uma capacidade de água utilizável, S<sub>max</sub>, a técnica considera que, enquanto existir água disponível (no solo e proveniente da precipitação), a evapotranspiração real ocorre à taxa da potencial; em caso contrário, ocorre a uma taxa inferior. Admite ainda que não existe produção de escoamento enquanto não estiver preenchida a capacidade de armazenamento de água no solo, mesmo que a intensidade da precipitação exceda a da infiltração, como anteriormente referido. Nas aplicações efectuadas da técnica do balanço hídrico sequencial implementou-se o procedimento apresentado por Lencastre e Franco (1984), p. 328. O quantitativo da água no solo nos meses em que a precipitação é inferior à evapotranspiração foi calculado de acordo com a seguinte equação, Varennes e Mendonça (1972 - 1973), p. 483:

$$AS_i = S_{max} \cdot e^{L_i/S_{max}} \quad [ 4 ]$$

em que  $AS_i$  (mm) representa a água no solo no mês  $i$ ;  $S_{max}$  (mm) a capacidade de água utilizável; e  $L_i$  (mm) a perda potencial de água (ou seja, da diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial) acumulada desde o início do período seco até ao mês  $i$ .

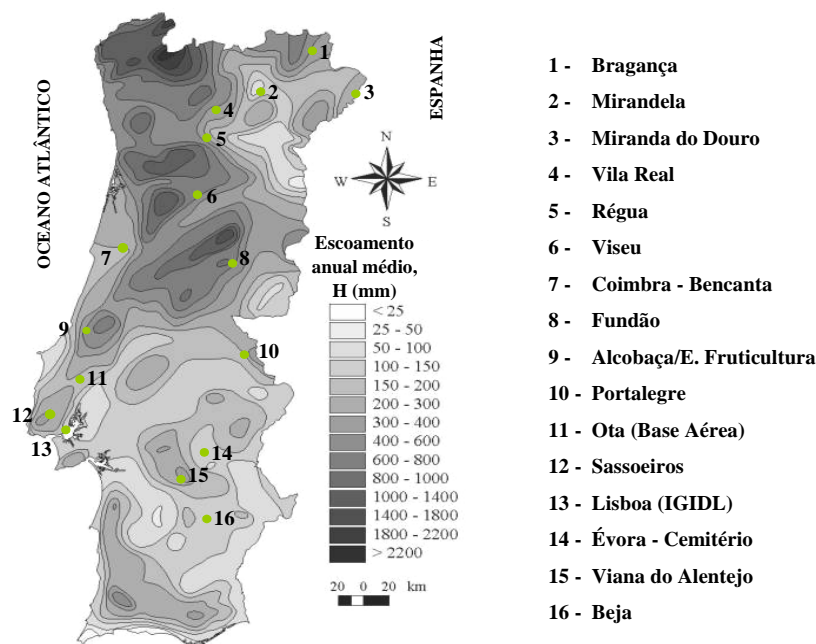
#### 4. COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MENSIS DAS EVAPOTRANSPIRAÇÕES DE THORNTHWAITE (ETP) E DE PENMAN-MONTEITH (ET0) E DOS ESCOAMENTOS ESTIMADOS COM BASE NESSAS EVAPOTRANSPIRAÇÕES

##### 4.1. Considerações prévias. Dados de base

Por utilização dos registos mensais de precipitação (P), de temperaturas médias do ar – diária (Tmed), máxima diária (Tmax) e mínima diária (Tmin) –, de humidade relativa (HR), de insolação (I) e de velocidade do vento (v) nas dezasseis estações climatológicas identificadas no Quadro 1 e esquematicamente localizadas na Figura 1, comparam-se, estação a estação, as evapotranspirações potenciais avaliadas pelos métodos de Thornthwaite e de Penman-Monteith, bem como os correspondentes escoamentos superficiais a que conduzem por aplicação da técnica do balanço hídrico sequencial.

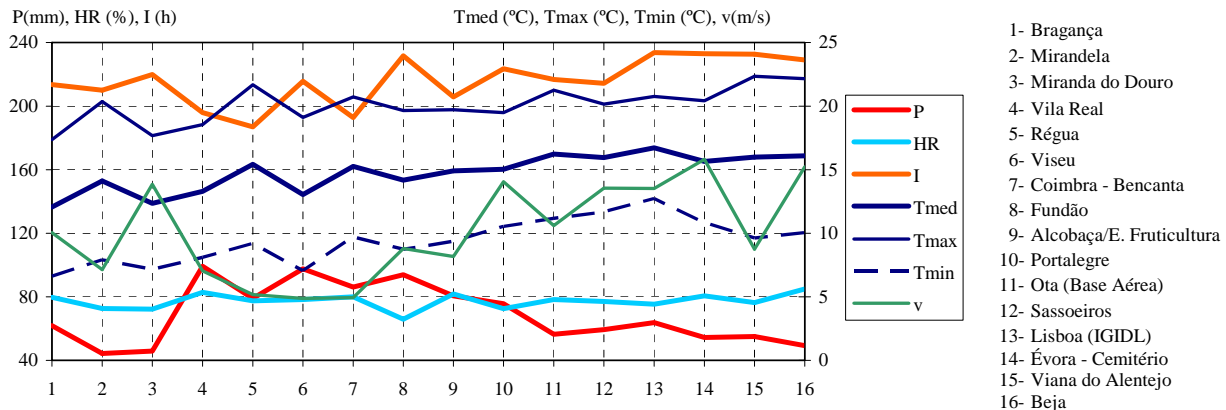
**Quadro 1** – Estações climatológicas. Características gerais. Valores médios mensais da precipitação (P), das temperaturas do ar média diária (Tmed), máxima diária (Tmax) e mínima diária (Tmin), da humidade relativa (HR), da insolação (I) e da velocidade do vento (v).

Estação climatológica		Período analisado	Coordenadas de localização				Altitude (m)	Valores médios mensais das variáveis climatológicas						
Nome	Código		Cartográficas		Geográficas			P (mm)	Tmed (°)	Tmax (°)	Tmin (°)	HR (%)	I (h)	v (m/s)
			M (m)	P (m)	Lat	Long								
Bragança	03Q/01	1963/64 a 1987/88 (25)	316224	537542	41° 48' 00"	6° 44' 00"	690	61.86	12.06	17.37	6.62	79.69	213.7	10.05
Mirandela	04N/02	1959/60 a 1980/81 (22)	277777	505545	41° 31' 00"	7° 12' 00"	250	44.33	14.12	20.36	7.91	72.66	210.1	7.14
Miranda do Douro	05T/01	1956/57 a 1965/66 (10)	354341	504926	41° 30' 00"	6° 17' 00"	693	45.94	12.36	17.68	7.15	72.23	219.8	13.86
Vila Real	06K/01	1959/60 a 1987/88 (29)	233357	482990	41° 19' 00"	7° 44' 00"	481	99.27	13.30	18.55	8.10	82.86	195.9	7.05
Régua	07K/01	1959/60 a 1987/88 (29)	227839	466307	41° 10' 00"	7° 48' 00"	65	78.95	15.43	21.69	9.20	77.52	186.9	5.18
Viseu	10J/01	1961/62 a 1975/76 (15)	219594	410752	40° 40' 00"	7° 54' 00"	443	97.64	13.04	19.12	7.06	78.32	215.6	4.87
Coimbra - Bencanta	12G/06	1959/60 a 1987/88 (29)	172905	360804	40° 13' 00"	8° 27' 00"	27	86.15	15.26	20.72	9.72	79.94	192.8	4.93
Fundão	13L/01	1957/58 a 1963/64 (7)	253842	351694	40° 08' 00"	7° 30' 00"	495	93.81	14.19	19.65	8.75	65.90	231.6	8.80
Alcobaça/E. Fruticultura	16D/06	1960/61 a 1976/77 (17)	128198	283364	39° 03' 00"	8° 58' 00"	38	80.64	14.91	19.72	9.37	81.86	205.8	8.17
Portalegre	18M/01	1959/60 a 1987/88 (29)	261698	257370	39° 17' 00"	7° 25' 00"	597	75.75	15.03	19.49	10.54	72.53	223.6	14.06
Ota (Base Aérea)	19D/01	1976/77 a 1983/84 (8)	126346	238967	39° 07' 00"	8° 59' 00"	40	56.49	16.22	21.26	11.18	78.29	216.7	10.61
Sassoeiros	21B/03	1958/59 a 1967/68 (10)	96916	193031	38° 42' 00"	9° 19' 00"	50	59.29	15.95	20.17	11.68	77.14	214.4	13.55
Lisboa (IGIDL)	21C/06	1958/59 a 1987/88 (30)	111436	194707	38° 43' 00"	9° 09' 00"	77	63.74	16.72	20.77	12.73	75.40	233.8	13.53
Évora - Cemitério	22J/02	1956/57 a 1987/88 (32)	218744	177586	38° 34' 00"	7° 55' 00"	265	54.38	15.66	20.43	10.83	80.70	232.9	15.81
Viana do Alentejo	23I/02	1958/59 a 1984/85 (27)	207147	151665	38° 20' 00"	8° 03' 00"	202	55.04	16.00	22.36	9.63	76.39	232.6	8.76
Beja	25J/02	1958/59 a 1987/88 (30)	223278	116545	38° 01' 00"	7° 52' 00"	246	49.22	16.09	22.16	10.05	85.00	229.0	15.23



**Figura 1** – Mapa do escoamento anual médio em Portugal Continental. Localização das estações climatológicas do Quadro 1.

Importa mencionar que, apesar de as estações do Quadro 1 pertencerem à rede de medição da responsabilidade do Instituto de Meteorologia Português, não foram solicitados registos a tal Instituto, pois a informação que constava da base de dados AGRIBASE, disponibilizada pela Secção de Agricultura do Instituto Superior de Agronomia de Lisboa, não obstante ser incompleta, revelou-se suficiente e adequada à análise em vista. Os períodos dispendo em simultâneo de registos mensais das variáveis anteriormente mencionadas, referidos ao ano hidrológico, bem como os valores médios mensais dessas variáveis, são também indicados no Quadro 1 e estão representados na Figura 2.



**Figura 2** – Estações climatológicas. Valores médios mensais da precipitação (P), das temperaturas do ar média diária (Tmed), máxima diária (Tmax) e mínima diária (Tmin), da humidade relativa (HR), da insolação (I) e da velocidade do vento (v).

Antecedendo a apresentação de resultados, anota-se que a localização esquemática das estações climatológicas apresentada na Figura 1 foi efectuada sobre o mapa de isolinhas do escoamento anual médio em Portugal Continental. Para tanto, tal escoamento foi expresso em altura uniforme de água,  $\bar{H}$ . Conforme se conclui da análise da Figura 1, verifica-se que o Sul e também uma parte bem demarcada do interior Norte de Portugal correspondem a zonas com acentuada escassez de água (aquele escoamento raramente excedendo 150 a 200 mm na média dos anos), ocorrendo alguma abundância de recurso sensivelmente na metade oeste do Norte/Centro do País.

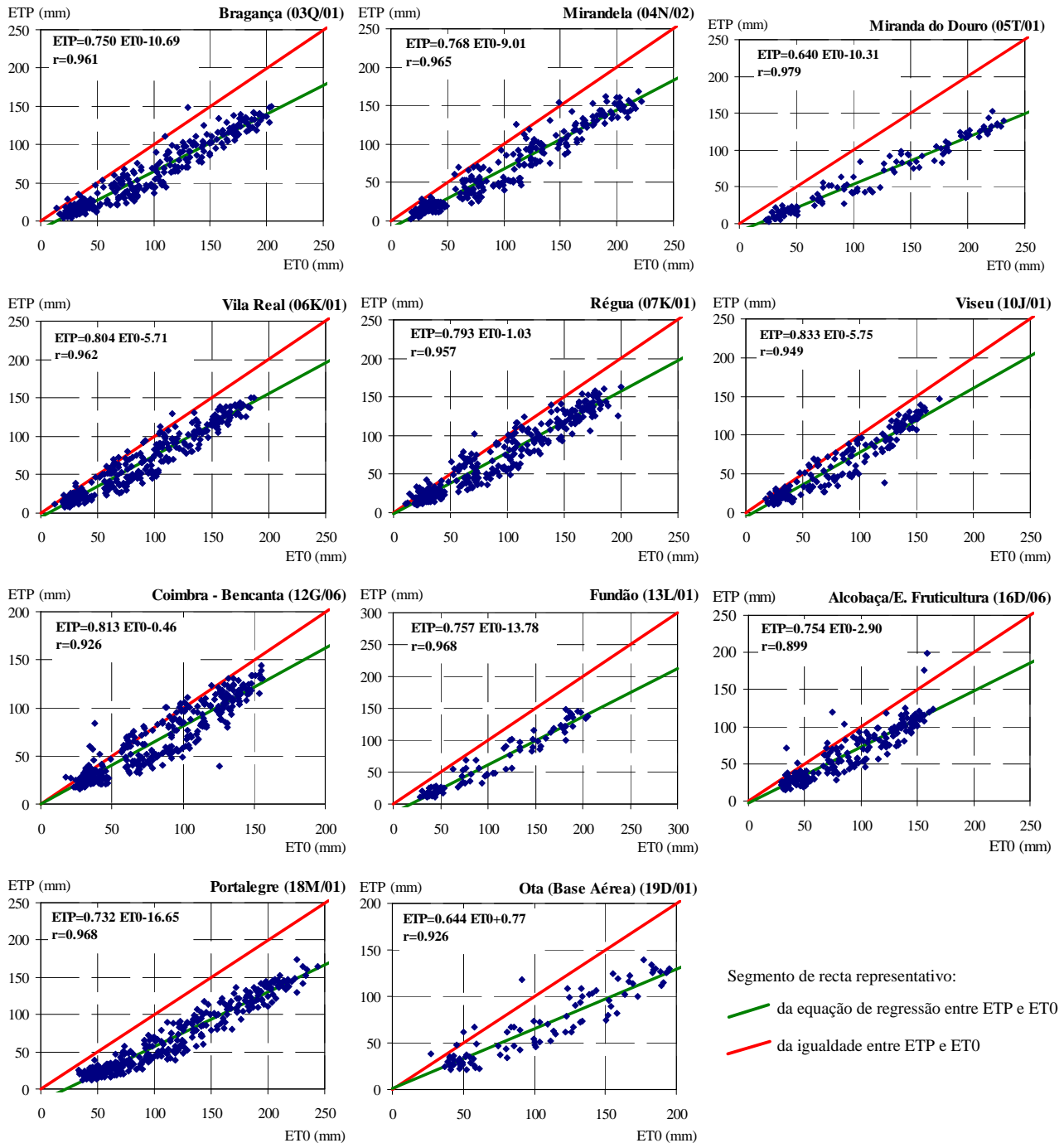
Importa mencionar que o regime hidrológico em Portugal Continental apresenta acentuada irregularidade, não só entre anos, mas ao longo de cada ano: em média, cerca de 70 (a norte) a 85% (a sul) da precipitação anual ocorre no semestre húmido – de Outubro a Março. O escoamento é ainda mais irregular, especialmente no Sul, em que, em média, 95% do escoamento anual pode ocorrer no semestre húmido e apenas 5% no semestre seco. Os valores anuais médios da precipitação e do escoamento para o País são de 960 e 385 mm, respectivamente, PNA (2001).

A irregularidade interanual é tanto mais acentuada quanto mais árida é a região, ou seja, quanto menor é a altura do escoamento anual médio  $\bar{H}$ , Portela e Quintela (2005). Associadas às zonas mais secas (com menor precipitação e logo menor escoamento) surgem as mais elevadas temperaturas e insolações e, conseqüentemente, evapotranspirações potenciais. A evapotranspiração real é aí fortemente limitada pela indisponibilidade de água

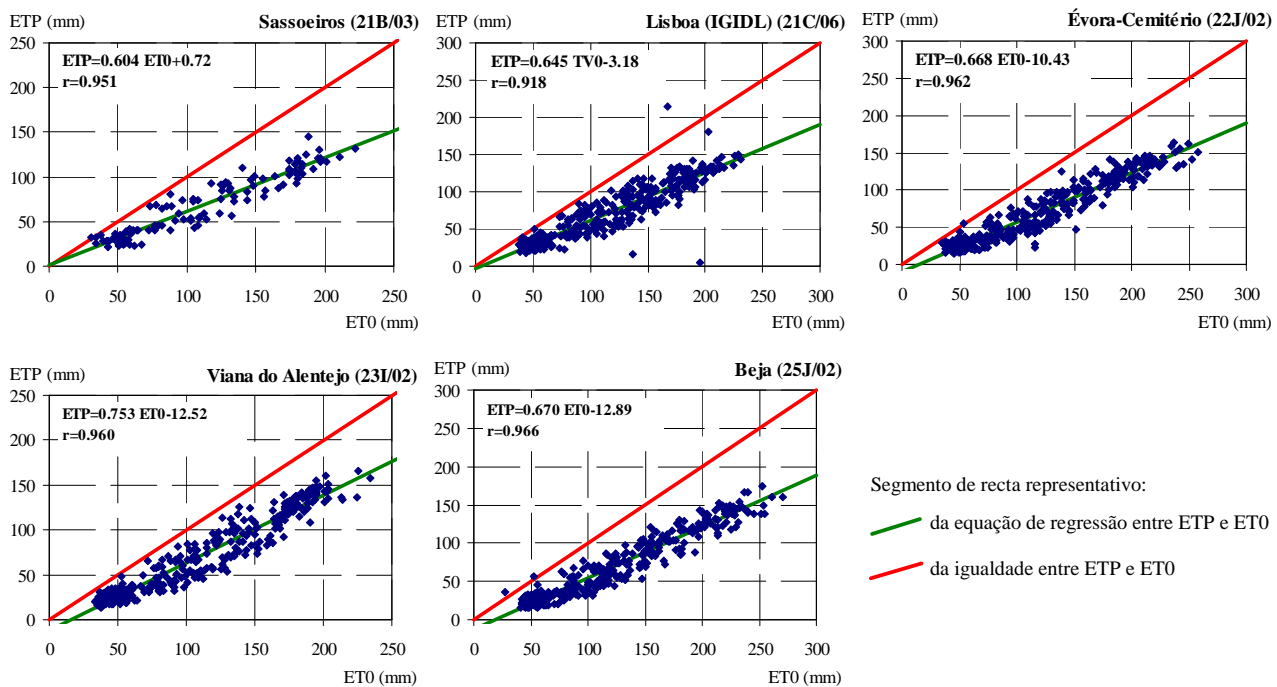
As anteriores considerações estão também patentes nos valores médios mensais das variáveis climatológicas relativas aos dezasseis postos analisados no estudo – Figura 2. De facto, em certa medida, os postos de Mirandela, de Miranda do Douro e de Ota (Base Aérea), mas especialmente os de Évora-Cemitério, de Viana do Alentejo e de Beja (a que, nas Figuras 1 e 2, se atribuíram também os números 2, 3, 11, 14, 15 e 16, respectivamente) localizam-se em zonas mais secas, com menor precipitação (e, logo, com menor escoamento), mais elevada temperatura e maior insolação.

## 4.2 Comparação entre as evapotranspirações potenciais mensais de Thornthwaite (ETP) e de Penman-Monteith (ET0).

Nos diagramas da Figura 3 comparam-se, para cada um das dezasseis estações climatológicas do Quadro 1, as evapotranspirações potenciais mensais de Thornthwaite, ETP, e de Penman-Monteith, ET0. Cada diagrama contém ainda a representação do segmento de recta (a verde) que traduz a equação de regressão linear entre ETP e ET0, bem como a equação que lhe corresponde e o respectivo coeficiente de correlação, r. Em cada diagrama foi ainda incluído um segmento de recta auxiliar (a vermelho) que traduz a igualdade entre ETP e ET0.



**Figura 3** – Evapotranspirações potenciais mensais de Thornthwaite, ETP, e de Penman-Monteith, ET0. Equações de regressão linear simples e respectivos coeficientes de correlação, r.



**Figura 3** (cont.) – Evapotranspições potenciais mensais de Thornthwaite, ETP, e de Penman-Monteith, ET0. Equações de regressão linear simples e respectivos coeficientes de correlação, r.

A Figura 3 evidencia duas circunstâncias que se julga merecerem relevo:

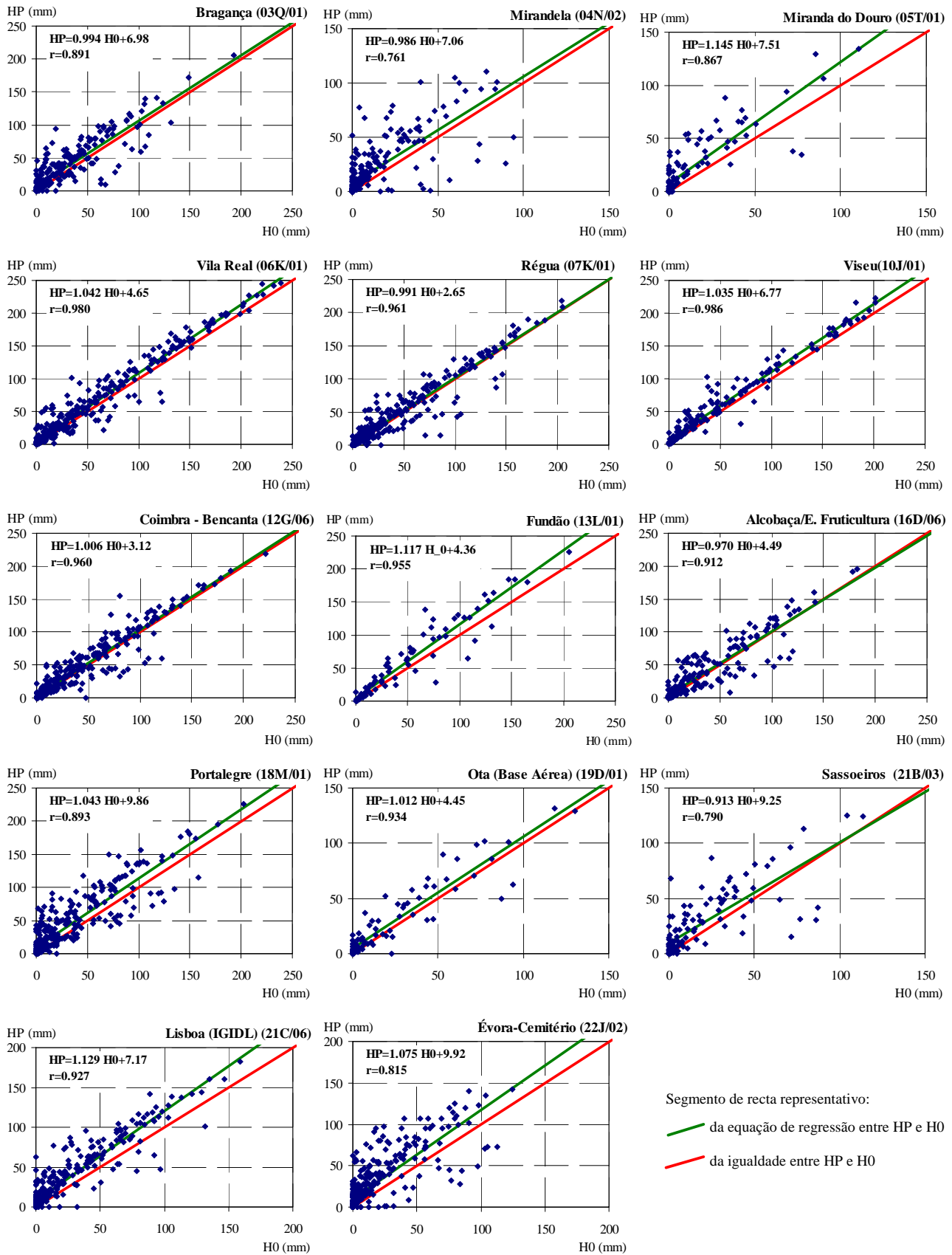
- i) a evapotranspiração potencial de Thornthwaite apresenta valores sempre inferiores aos da evapotranspiração de Penman-Monteith (segmento de recta verde localizado sempre abaixo do segmento de recta vermelho) facto que confirma o conhecimento antecedente para Portugal Continental, Quintela (1984), p. 634, e Lencastre e Franco (1984), p. 118; a diferença entre valores é tanto mais acentuada quanto mais elevada é a evapotranspiração (progressiva divergência entre os segmentos de recta vermelho e verde à medida que aumenta a evapotranspiração);
- ii) as duas evapotranspições potenciais em comparação apresentam elevadas correlações, o que sugere a possibilidade de, na indisponibilidade de registos, estimar a evapotranspiração de Penman-Monteith (ET0) a partir da de Thornthwaite (ETP).

#### 4.3. Comparação entre escoamentos superficiais mensais estimados pela técnica do balanço hídrico sequencial baseada nas evapotranspições potenciais mensais de Thornthwaite (HP) e de Penman-Monteith (H0)

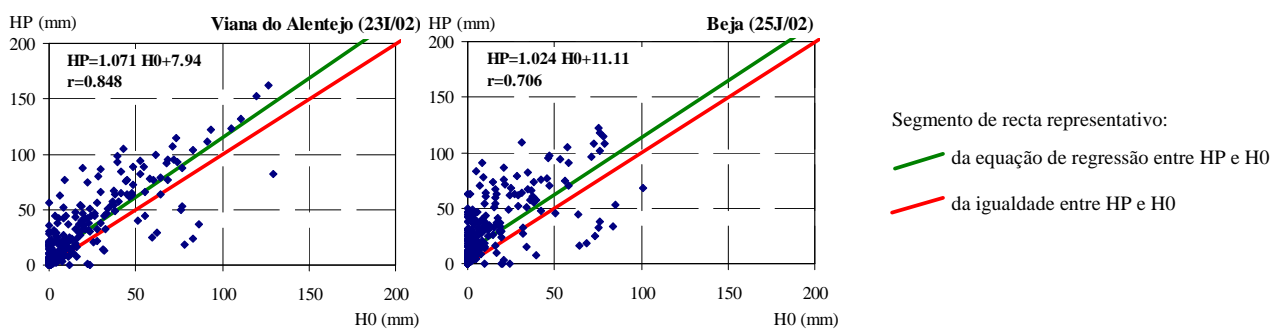
A primeira das circunstâncias mencionadas no final do sub item precedente levaria a esperar que as estimativas do escoamento superficial mensal fornecidas por aplicação da técnica do balanço hídrico sequencial baseada, por um lado, na evapotranspiração potencial de Thornthwaite (HP) e, por outro lado, na evapotranspiração de Penman-Monteith (H0) fossem bem distintas.

A comparação entre os escoamentos mensais estimados a partir de uma e de outra evapotranspiração, HP e H0, respectivamente, é apresentada na Figura 4, incluída na página seguinte. Tais resultados têm subjacente a capacidade de água utilizável de  $S_{max}=150$  mm que se admitiu corresponder às condições médias ocorrentes em Portugal Continental, embora, na realidade, se esperem valores de  $S_{max}$  mais elevados no Sul do que no Norte do País.

À semelhança da Figura 3, cada diagrama da Figura 4 contém ainda a representação do segmento de recta (a verde) que traduz a equação de regressão linear entre HP e H0, bem como a equação que lhe corresponde e o respectivo coeficiente de correlação, r. Em cada diagrama foi ainda incluído um segmento de recta auxiliar (a vermelho) que traduz a igualdade entre HP e H0.



**Figura 4** – Escoamentos mensais calculados pelo balanço hídrico considerando a evapotranspiração potencial mensal de Thornthwaite, HP, e de Penman-Monteith, H0. Equações de regressão linear simples e respectivos coeficientes de correlação, r.



**Figura 4 (cont.)**– Escoamentos mensais calculados pelo balanço hídrico considerando a evapotranspiração potencial mensal de Thornthwaite, HP, e de Penman-Monteith, H0. Equações de regressão linear simples e respectivos coeficientes de correlação, r.

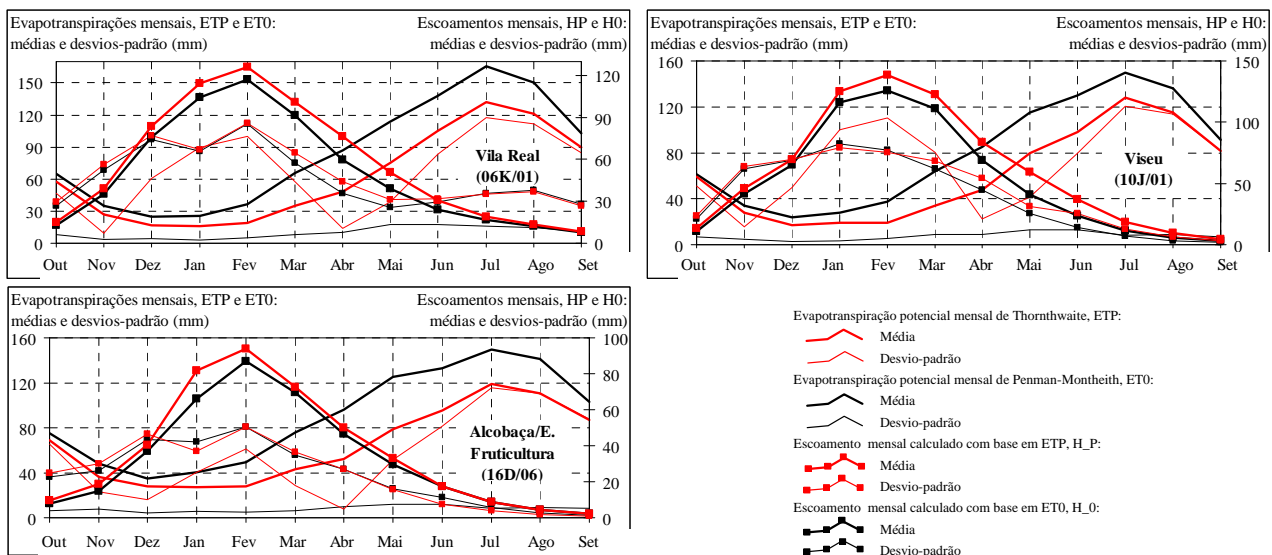
Em primeiro lugar importa realçar que, na generalidade das estações climatológicas, é possível reconhecer uma dependência estatisticamente significativa (expressa pelos elevados valores do coeficiente de correlação) entre escoamentos mensais avaliados com base nas evapotranspiração de Thornthwaite (HP) e de Penman-Monteith (H0).

Como seria de esperar em face dos resultados da Figura 3, uma vez que a evapotranspiração potencial de Thornthwaite (ETP) apresenta valores sempre inferiores à de Penman-Monteith (ET0), os escoamentos mensais que lhes correspondem (HP) são superiores aos obtidos com base em Penman-Monteith (H0) (na Figura 4, segmento de recta a verde localizado acima do segmento de recta a vermelho).

Contudo, verifica-se que diferenças significativas entre evapotranspirações potenciais podem não conduzir a diferenças significativas entre os escoamentos calculados com base nessas evapotranspirações. Estão claramente nestas circunstâncias os resultados relativos às estações climatológicas de Bragança, Mirandela, Vila Real, Régua, Viseu, Coimbra-Bencanta, Alcobaca, Ota e Sassoeiros em que os escoamentos mensais obtidos pela técnica do balanço hídrico considerando a evapotranspiração potencial de Thornthwaite (HP) ou a evapotranspiração de Penman-Monteith (H0) são muito próximos (segmentos de recta vermelho e verde muito próximos ou, mesmo praticamente coincidentes).

Julga-se que tal facto, cuja constatação foi apresentada pela primeira vez em Portela *et al.* (2006) e que se afigura de grande interesse, é explicado por as maiores diferenças entre valores mensais de ETP e ET0 ocorrerem no semestre seco, período durante o qual já não é a evapotranspiração que condiciona o excesso hídrico ou *superavit* e, consequentemente, o escoamento superficial, mas os reduzidos ou inexistentes valores da precipitação e da água no solo. Resultam, assim, evapotranspirações reais que pouco podem ter a ver com as evapotranspirações potenciais, pois são condicionadas, não pela “potencialidade” do solo e das plantas para transferir de água para a atmosfera, mas pela insuficiência da água disponível que não permite satisfazer essa “potencialidade”. Nestas circunstâncias, os valores das evapotranspirações reais resultam próximos, mesmo que, teoricamente, lhes correspondam evapotranspirações potenciais bastante distintas.

Em reforço dos resultados e conclusões precedentes, obteve-se, a título de exemplo baseado nas estações climatológicas de Vila Real, de Viseu e de Alcobaca-E. Fruticultura, a Figura 5. Para cada uma das anteriores estações, tal figura contém, mês a mês, a média e o desvio-padrão, tanto das séries das evapotranspirações potenciais calculadas pelos dois métodos aplicados, como das séries de escoamentos mensais que lhes correspondem, avaliadas de acordo com a técnica do balanço hídrico sequencial.



**Figura 5** – Estações climatológicas. Médias e desvios-padrão das séries mensais das evapotranspirações de Thornthwaite e de Penman-Monteith e dos correspondentes escoamentos obtidos por aplicação da técnica do balanço hídrico sequencial.

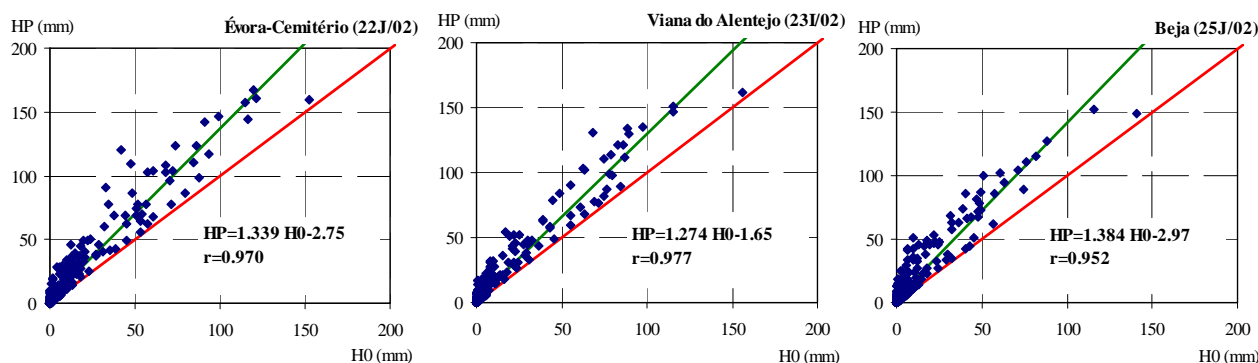
Verifica-se, assim e mais uma vez, que, em média, a evapotranspiração potencial de Thornthwaite é sempre inferior à de Penman-Monteith sendo a diferença entre as duas evapotranspirações maior nos meses de Verão. Contudo, mesmos nesses meses, as diferenças entre os correspondentes escoamentos mensais médios são muito pequenas, o que confirma o facto constatado a propósito da Figura 4.

Importa ainda realçar que, não obstante as séries mensais de evapotranspiração potencial de Thornthwaite apresentarem uma variabilidade bastante superior à das séries mensais da evapotranspiração de Penman-Monteith (conforme se conclui das comparação, mês a mês, dos respectivos desvios-padrão), já a variabilidade dos escoamentos mensais obtidos com base numa ou noutra evapotranspiração é muito próxima. Conclui-se assim que, nas circunstâncias da Figura 5, o balanço hídrico sequencial aplicada a ETP ou a ET0 conduziria a escoamentos mensais com características muito próximas.

#### 4.4. Breve comparação entre escoamentos superficiais mensais estimados pelo modelo de Temez baseado nas evapotranspirações potenciais mensais de Thornthwaite (HP) e de Penman-Monteith (H0)

Para averiguar a possibilidade de melhorar a correlação entre escoamentos estimados considerando ETP ou ET0, recorreu-se à aplicação do modelo de Temez a algumas das estações climatológicas do Quadro 1 localizadas no Sul do País, para o que se adoptaram cada uma daquelas evapotranspirações e os seguintes parâmetros, estimados em Portela *et al.* (2006) para a bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Albernoa (26J/01), também localizada naquela zona: coeficiente de escoamento  $C=0.3$ ; capacidade máxima de armazenamento  $H_{max}=200$  mm; taxa máxima de infiltração  $I_{max}=25$  mm/mês; e constante de recessão ou de esgotamento dos aquíferos  $\alpha=0.1$ .

Não obstante a descrição desse modelo exceder o âmbito do presente artigo, optou-se por apresentar a Figura 6 que, para as estações climatológicas de Évora-Cemitério, Viana do Alentejo e Beja (a que na Figura 4 correspondiam coeficientes de correlação com valores menores ou próximos dos menores) exemplifica os escoamentos mensais fornecidos por aquele modelo fazendo intervir a evapotranspiração potencial de Thornthwaite (HP) e a de Penman-Monteith (H0).



**Figura 6** – Escoamentos mensais calculados pelo modelo de Temez com base em ETP (HP) e em ET0 (H0). Equações de regressão linear simples e respectivos coeficientes de correlação, r.

A comparação das Figuras 4 e 6 evidencia claramente que o recurso ao modelo de Temez melhora significativamente a dependência entre HP e H0, reforçando a constatação essencial do estudo efectuado: julga-se válido estimar o escoamento mensal com base na evapotranspiração potencial de Thornthwaite. Se necessário, nomeadamente, em regiões do Sul do País, tal opção pode ser devidamente combinada com o recurso a equações de regressão do tipo das exemplificadas nas Figuras 3 e 4, as quais corrigindo aquela evapotranspiração ou, em alternativa, o escoamento que daí advém, melhoram a correlação entre as estimativas HP e H0 dos escoamentos mensais.

## 5. CASO DE ESTUDO. ESTIMAÇÃO DE ESCOAMENTOS MENSAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DA ESTAÇÃO HIDROMÉTRICA DE VINHAIS-QUINTA DA RANCA (03P/01)

Importa realçar que os elementos apresentados no item 4 apenas atestam que existe uma forte dependência entre estimativas de uma mesma variável – a evapotranspiração potencial ou o escoamento mensal – fornecidas por modelos distintos, havendo modelos que reforçam mais essa dependência, como seja o caso da aplicação do modelo de Temez à estimação de escoamentos mensais baseada em ETP e em ET0.

Em nenhuma circunstância foi possível concluir que um dado modelo fornece de facto estimativas que, por se aproximarem mais dos escoamentos observados, possam ser consideradas mais rigorosas. Para tanto, haveria que comparar escoamentos estimados pelos diferentes modelos para um dado intervalo de tempo com escoamentos efectivamente observados nesse intervalo de tempo.

No sentido de comprovar a eficácia da consideração da evapotranspiração potencial de Thornthwaite para estimar escoamentos fluviais mensais, apresentam-se alguns dos resultados obtidos por Portela *et al.* (2006), relativos à aplicação da técnica do balanço hídrico sequencial e do modelo de Temez à estimação daqueles escoamentos para a bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Vinhais-Quinta da Ranca (03P/01), com a área de 455 km<sup>2</sup>, localizada no rio Tuela (coordenadas cartográficas da estação de M=294388 m, P=539121 m).

Importa anotar que em Portela *et al.* (2006) a técnica do balanço hídrico sequencial foi também aplicada de modo separado às evapotranspirações potenciais de Thornthwaite e de Penman-Monteith na bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Vinhais-Quinta da Ranca (03P/01), tendo o modelo de Temez utilizado apenas a primeira das anteriores evapotranspirações.

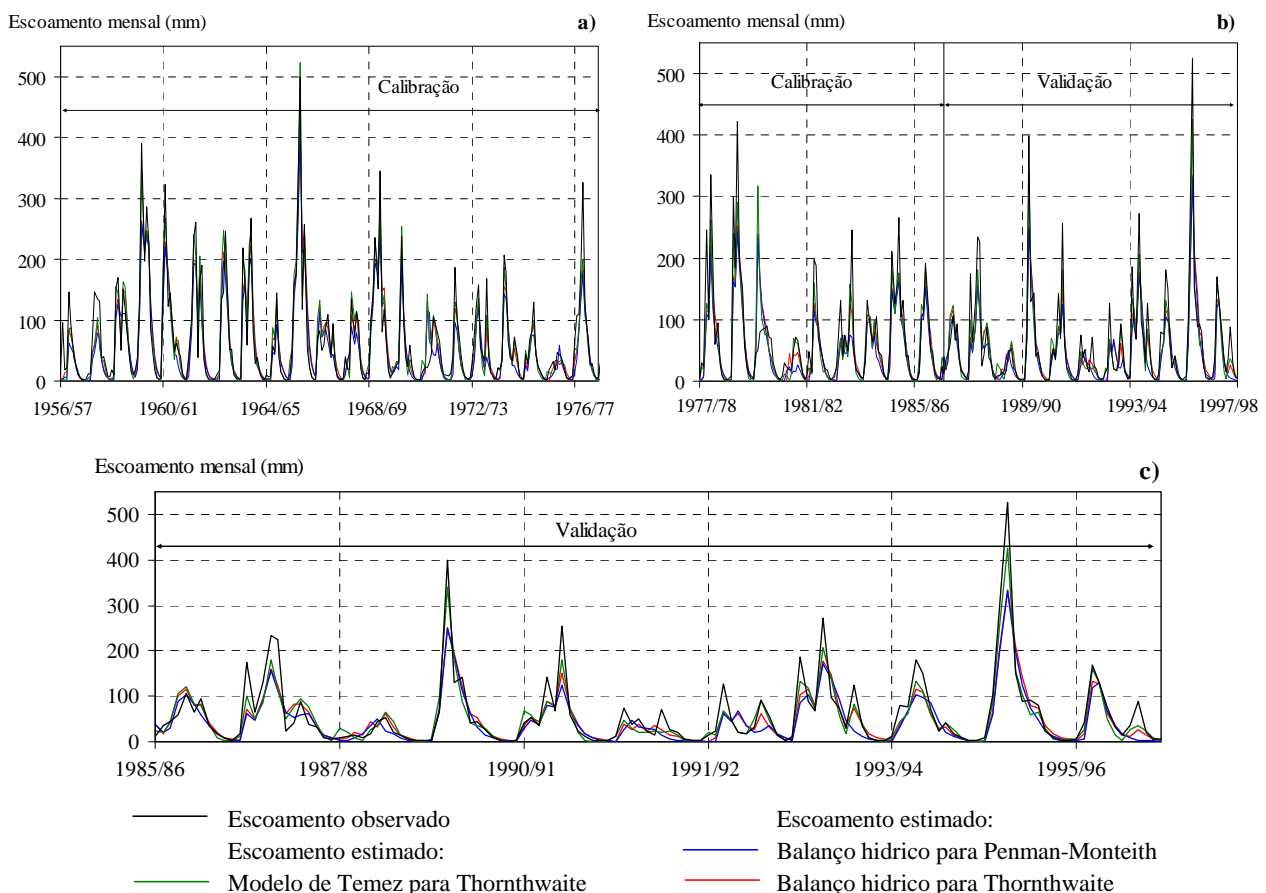
Para o efeito, o período de 41 anos (de 1956/57 a 1996/97) com registos na estação hidrométrica foi subdividido em dois períodos: um primeiro sub período, compreendido entre 1956/57 a 1985/86, que foi utilizado para calibrar os parâmetros do modelo de Temez, e um segundo sub período, de 1986/87 a 1996/97, para o qual se procedeu à validação do modelo com os parâmetros anteriormente calibrados, mediante comparação entre escoamentos estimados e observados. Os valores obtidos para os parâmetros do modelo de Temez na fase de calibração foram os seguintes: C=0.33, Hmax=130 mm, Imax=500 mm/mês e  $\alpha=0.05$ .

Na aplicação da técnica do balanço hídrico sequencial à bacia hidrográfica da estação hidrométrica de Vinhais-Quinta da Ranca (03P/01) considerou-se para a capacidade máxima de água utilizável,  $S_{max}$ , o valor de  $H_{max}=130$  mm obtido pela calibração do modelo de Temez para a capacidade máxima de armazenamento.

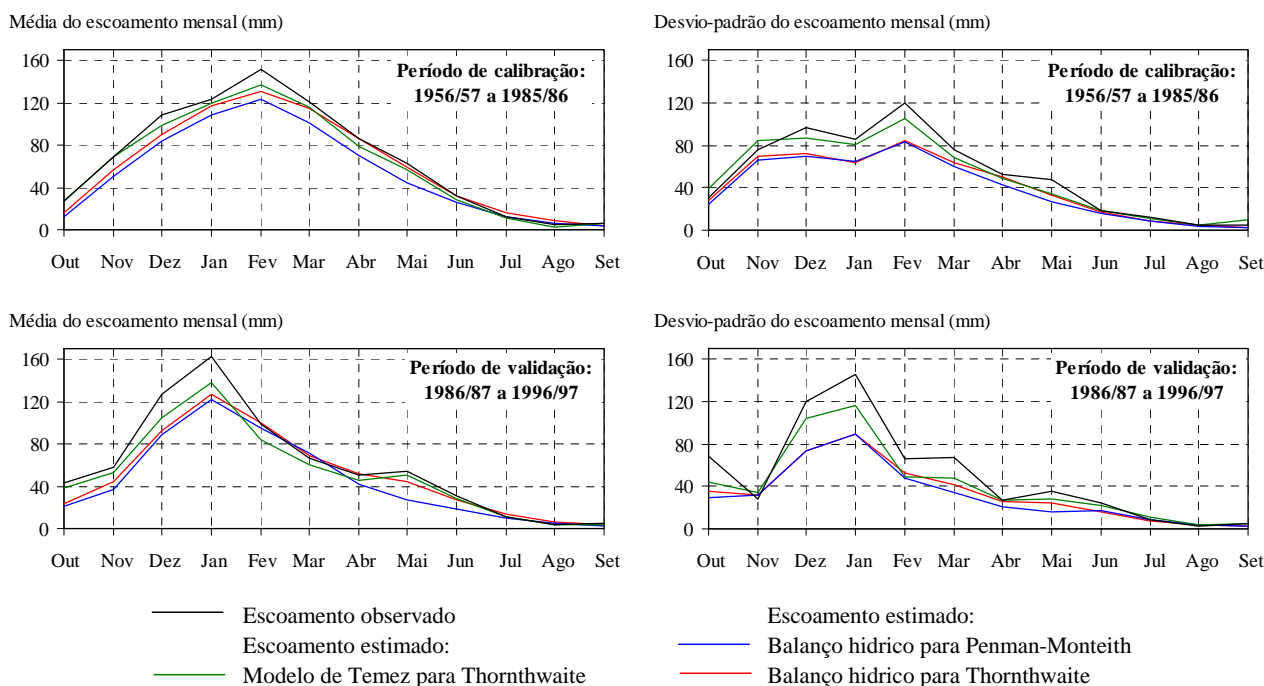
A Figura 7 contém a representação cronológica dos escoamentos observados e estimados para a estação hidrométrica em menção. Nos gráficos a) e b) de tal figura identificam-se os períodos de calibração e de validação, anteriormente referidos, tendo os escoamentos neste último período sido destacados no gráfico c) da mesma figura.

Na Figura 8 representam-se, mês a mês e para os períodos de calibração e de validação, as médias e desvios-padrão das séries de escoamentos observados e estimados para a estação hidrométrica de Vinhais-Quinta da Ranca (33P/01). Os valores dessas estatísticas amostrais naqueles dois períodos foram também incluídos no Quadro 2, em simultâneo com os valores dos coeficientes de correlação entre escoamentos observados e simulados por cada um dos procedimentos aplicados.

Os resultados apresentados nas Figuras 7 e 8 e no Quadro 2, com ênfase para os referentes ao período de validação, confirmam que o modelo de Temez aplicado à evapotranspiração potencial de Thornthwaite, com parâmetros devidamente calibrados, é capaz de fornecer estimativas fiáveis dos escoamentos mensais, no que respeita, tanto à sequencial temporal desses escoamentos, como às respectivas características estatísticas. A técnica do balanço hídrico sequencial aplicada com base naquela evapotranspiração é a que melhor aproxima os resultados do modelo de Temez, facto patente nos valores dos coeficientes de correlação que lhe correspondem, incluídos no Quadro 2.



**Figura 7** – Estação hidrométrica de Vinhais- Quinta da Ranca (03P/01). Escoamentos mensais observados e estimados pelo modelo de Temez e pela técnica do balanço hídrico sequencial (período de calibração: 1956/57 e 1985/86; período de validação: 1986/87 e 1996/97).



**Figura 8** – Estação hidrométrica de Vinhais- Quinta da Ranca (03P/01). Médias e desvios-padrão dos escoamentos mensais observados e estimados pelo modelo de Temez e pela técnica do balanço hídrico sequencial.

**Quadro 2** – Estação hidrométrica de Vinhais- Quinta da Ranca (03P/01). Médias e desvios-padrão dos escoamentos mensais observados e estimados pelo modelo de Temez e pela técnica do balanço hídrico sequencial. Coeficientes de correlação entre escoamentos mensais observados e estimados.

Período de calibração: 1967/57 a 1985/86								
Mês	Média do escoamento mensal (mm)				Desvio-padrão do escoamento mensal (mm)			
	Escoamento observado	Escoamento estimado			Escoamento observado	Escoamento estimado		
		Modelo de Temez	Balanço hídrico			Modelo de Temez	Balanço hídrico	
			Penman-Monteith	Thornthwaite			Penman-Monteith	Thornthwaite
Outubro	27.2	27.0	12.6	15.9	31.0	39.6	25.0	28.0
Novembro	69.6	69.3	50.8	56.7	76.0	83.8	66.6	69.1
Dezembro	107.9	99.1	84.0	89.4	96.1	87.3	70.2	72.4
Janeiro	122.9	119.9	108.4	116.8	85.4	81.0	64.5	63.3
Fevereiro	151.1	136.6	122.8	130.8	120.4	105.0	83.6	83.9
Março	121.2	116.4	101.0	114.9	75.8	69.0	59.9	63.5
Abril	86.5	78.9	70.5	86.1	52.6	48.6	42.9	50.6
Mai	62.8	56.5	44.6	59.5	48.1	33.9	26.7	33.0
Junho	32.0	28.7	25.3	31.8	18.3	17.9	16.2	17.5
Julho	12.6	10.7	12.7	16.1	12.5	10.7	8.3	9.1
Agosto	5.0	3.0	6.4	8.1	5.4	4.3	4.1	4.5
Setembro	6.1	6.6	3.3	4.2	5.1	10.0	2.5	2.8
Coeficiente de correlação, r, entre escoamentos observados e simulados (-)								
	--	0.926	0.896	0.907				

Período de validação 1986/87 a 1996/97								
Mês	Média do escoamento mensal (mm)				Desvio-padrão do escoamento mensal (mm)			
	Escoamento observado	Escoamento estimado			Escoamento observado	Escoamento estimado		
		Modelo de Temez	Balanço hídrico			Modelo de Temez	Balanço hídrico	
			Penman-Monteith	Thornthwaite			Penman-Monteith	Thornthwaite
Outubro	43.5	37.6	20.4	24.0	68.0	43.9	29.9	35.2
Novembro	58.1	53.5	37.0	44.3	28.3	34.1	31.6	32.0
Dezembro	127.1	104.4	89.1	92.7	120.4	104.0	73.1	73.9
Janeiro	162.1	138.4	121.8	127.1	145.5	115.9	89.1	89.1
Fevereiro	98.2	84.2	94.8	99.8	65.9	49.1	47.3	53.1
Março	66.2	60.8	71.4	68.9	67.5	48.2	34.0	41.4
Abril	50.7	45.6	41.3	51.7	26.6	27.2	21.1	25.5
Mai	54.0	51.0	26.6	44.6	36.0	28.2	16.3	24.7
Junho	30.4	28.6	18.3	26.7	24.1	21.6	16.9	15.4
Julho	10.6	10.8	9.3	13.4	8.5	11.5	8.5	7.7
Agosto	3.8	3.3	4.6	6.7	2.2	3.8	4.3	3.9
Setembro	5.1	3.7	2.3	3.3	4.4	4.4	2.1	1.9
Coeficiente de correlação, r, entre escoamentos observados e simulados (-)								
	--	0.954	0.895	0.913				

Embora apenas baseado num caso de estudo, verifica-se, assim, que, não obstante a simplicidade do seu cálculo e o reduzido número de variáveis hidrológicas que faz intervir, a evapotranspiração potencial de Thornthwaite é susceptível de ser integrada num modelo fiável de estimação de escoamentos superficiais mensais. As melhores estimativas destes escoamento são alcançadas pelo modelo de Temez. Contudo, tais estimativas são muito razoavelmente aproximadas pelas decorrentes da técnica do balanço hídrico sequencial aplicada considerando aquela evapotranspiração.

## 5. CONCLUSÕES

Como principais conclusões do estudo brevemente apresentado, mencionam-se as seguintes:

- i. O método de Thornthwaite fornece evapotranspirações potenciais inferiores às que resultam do método de Penman-Monteith, o que sugere que aquele primeiro método subestima a evapotranspiração potencial em Portugal Continental, em conformidade, aliás, com o indicado por autores precedentes, Quintela (1984), p. 634, e Lencastre e Franco (1984), p. 118.
- ii. As evapotranspirações potenciais mensais de Thornthwaite e de Penman-Monteith apresentam elevada correlação, facto que, na indisponibilidade dos registos necessários ao cálculo desta última evapotranspiração, sugere a possibilidade de a sua estimativa se efectuar a partir daquela outra evapotranspiração, por utilização de equações de regressão, do tipo das exemplificadas na Figura 3.
- iii. Com excepção da estação climatológica de Sassoeiros que, para as evapotranspirações mais elevadas, denota comportamento algo anómalo, os escoamentos mensais calculados pela técnica do balanço hídrico sequencial aplicada considerando a evapotranspiração potencial de Thornthwaite são superiores aos obtidos por aquela técnica baseada na evapotranspiração potencial de Penman-Monteith.
- iv. Contudo, as diferenças entre escoamentos mensais estimados pela técnica do balanço hídrico sequencial considerando as evapotranspirações potenciais, quer de Thornthwaite, quer de Penman-Monteith são muito mais atenuadas do que as diferenças entre aquelas evapotranspirações, chegando mesmo a ser negligenciáveis, especialmente nas zonas mais húmidas de Portugal, para as quais os escoamentos mensais obtidos pela consideração de uma ou de outra evapotranspiração são praticamente coincidentes.
- v. Necessariamente nessas zonas, mas também nas zonas mais secas do País, é possível reconhecer uma correlação entre os escoamentos mensais obtidos pela técnica do balanço hídrico sequencial aplicada a uma e a outra evapotranspiração potencial, embora se registre, nalguns casos e em comparação à dependência directa entre ETP e ET<sub>0</sub>, uma maior dispersão de valores, traduzida por mais baixos coeficientes de correlação entre HP e H<sub>0</sub>. Admite-se, contudo, que não havendo registos que possibilitem basear a técnica do balanço hídrico sequencial na evapotranspiração de Penman-Monteith é possível estimar os escoamentos que lhe corresponderiam por aplicação de equações de regressão do tipo das esquematizadas nas Figuras 4 e 6 aos escoamentos fornecidos por consideração da evapotranspiração potencial de Thornthwaite.
- vi. A dependência entre escoamentos mensais estimados com base, por um lado, na evapotranspiração potencial de Thornthwaite e, por outro lado, na de Penman-Monteith torna-se mais acentuada se, em tal estimação, se utilizar o modelo de Temez em vez da técnica do balanço hídrico sequencial.
- vii. O bom ajustamento entre escoamentos efectivamente observados e escoamentos estimados pelo modelo de Temez, baseado na evapotranspiração potencial de Thornthwaite e com valores dos parâmetros devidamente calibrados, evidencia a adequação de tal modelo para estimar escoamentos fluviais mensais.
- viii. A comparação entre escoamentos efectivamente observados e escoamentos estimados pela técnica do balanço hídrico sequencial aplicada à evapotranspiração potencial de Thornthwaite permite concluir que tal técnica aproxima muito razoavelmente os

escoamentos estimados pelo modelo de Temez aplicado àquela mesma evapotranspiração.

- ix. O facto de ser possível fundamentar um modelo de estimação do escoamento mensal (quer seja a técnica do balanço hídrico sequencial, quer seja o modelo de Temez) na evapotranspiração potencial de Thornthwaite (para cujo cálculo intervêm apenas temperaturas médias do ar com registos facilmente acessíveis, não só no que respeita à dimensão das séries, mas também ao número de pontos de medição), apresenta vantagens por demais evidentes, possibilitando, por exemplo, o preenchimento de falhas de registos de caudal ou, com ênfase, o prolongamento das séries desses registos, aspectos que se consideram de interesse relevante em termos de investigação e, sobretudo, da prática profissional na área dos recursos hídricos.

## REFERÊNCIAS

- Carter, D. B.**, 1958. "The average water balance of the Delaware basin". Drexel Institute of Technology, Laboratory Climatology, *Publications in Climatology XI* (3):249-269.
- Lencastre, A., e Franco, F. M.**, 1984, *Lições de hidrologia*. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.
- Mather, J. R.**, 1978. *The climate water budget in environmental analysis*. D. H. Health Co., Lexington Books, Lexington, MA:39-65.
- Mather, J. R.**, 1981. "Using computed stream flow in watershed analysis". *Water Resources Bulletin* 17(3):474-482.
- Monreal, T. E.**, 1993, *Curso Internacional de Hidrologia General y Aplicada. Área de Hidrologia Superficial*. Tomo I, II, III, IV, V e VI CEDEX, Madrid, Espanha.
- Pereira, L. S.; Allen, R. G.; Raes, D.; Smith, M.**, 1998, *Fao Irrigation and Drainage Paper n° 56 "Crop Evapotranspiration"*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- PNA**, 2001, *Plano Nacional da Água*, Instituto da Água, INAG, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, MAOT, Lisboa, Portugal.
- Portela, M. M.; Quintela, A. C.**, 2005, "Estimação de séries de caudais médios diários na ausência de informação hidrométrica", *7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa*, 7º SILUSBA, Évora, Portugal.
- Portela, M. M.; Santos, J.; Coelho, F.**, 2006. "Alterações em séries de variáveis hidrológicas: seus efeitos nos volumes de água a fornecer para rega e na fiabilidade do fornecimento desses volumes a partir de albufeiras", *8º Congresso da Água*. APRH, Figueira da Foz, Portugal.
- Quintela, A. C.**, 1984, "Hidrologia de águas superficiais" in *Curso Internacional de Hidrologia Operativa*, Manual, Vol. II, Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamento Hidráulicos, Lisboa, Portugal, 505-794.
- Thornthwaite, C.W.**, 1948. "An Approach Toward a Rational Classification of Climate," *Geographical Review*, 38, 55-94.
- Varenes e Mendonça, P.**, 1972-1973, *Excerto das Lições de Hidráulica Geral e Agrícola*. Instituto Superior de Agronomia 4ª edição ciclostilada, Lisboa, Portugal.