

ANÁLISE DA VARIABILIDADE TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM O MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH UTILIZANDO DADOS DIÁRIOS DE PCDS EM FORTALEZA-CEARÁ

*Ticiana Marinho de Carvalho Studart¹, Danilo Nogueira de Souza², Renata Mendes Luna³, José
Nilson B. Campos⁴ & Maria Inês Teixeira Pinheiro⁵*

RESUMO - No presente trabalho estima-se a evapotranspiração pelo Método de Penman-Monteith utilizando-se dados diários de Plataforma Automática de Coleta de Dados, localizada em Fortaleza, Ceará. Um dos principais objetivos é analisar a variabilidade temporal deste fenômeno e verificar a ocorrência de erros significativos ao estimá-la utilizando valores médios mensais para suas variáveis de entrada (por exemplo, usar dados das Normais Climatológicas (INMET, 1990)). Os resultados de Fortaleza, para os anos de 2004 a 2008, mostram que há pouca variabilidade temporal dos seus valores diários e mensais. Uma vez que o método em questão utiliza como variável de entrada a velocidade do vento e esta não é disponibilizada nas Normais, avaliou-se o desempenho de métodos tradicionais como Hargreaves e Thornthwaite comparados ao Penman-Monteith. Os resultados mostram que as estimativas com os dois métodos diferem em muito dos valores obtidos com o Penman-Monteith para Fortaleza.

ABSTRACT - This paper estimates the evapotranspiration using Penman-Monteith method with daily data from DCP (Automatic Data Collection Platform), in Fortaleza, Ceará. One of the main objective is to evaluate its temporal variability and there is significant error in evaluate this phenomenon using average values of its input variable (e.g. data from Normais Climatológicas (INMET, 1990). The results show that there isn't too much variability. Once the Normais doesn't present wind velocity, it was also evaluated the performance of two other traditional methods such as Hargreaves e Thornthwaite. The results show a lot of difference in the results of the three methods.

PALAVRAS-CHAVE – Evapotranspiração; Penman-Monteith; Variabilidade.

¹ Professora Associado do Departamento de Engenharia Ambiental da UFC. E-mail: ticiana@ufc.br

² Aluno do curso de Doutorado em Engenharia Civil da UFC.

³ Professora Adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da UFC. E-mail: renata.luna@ufc.br.

⁴ Professor Titular do Departamento de Engenharia Ambiental da UFC. E-mail: nilson@ufc.br

⁵ Professora do IFCE – Campus Maracanaú. E-mail: inestp@cefet.br

1. INTRODUÇÃO

Muitas equações e métodos têm sido desenvolvidos para a estimativa da evapotranspiração potencial. Há aqueles que estimam a Etp a partir da **radiação solar**, outros utilizam dados de **temperatura**, ou dados de **evaporação** medida no tanque Classe A. Os métodos baseados no trabalho original de Penman (1948), os quais utilizam dados de temperatura, umidade, radiação solar e vento, são denominados **métodos combinados**.

Dentre os métodos que utilizam dados de temperatura, se destaca o de Hargreaves (1974), pela larga utilização em projetos de irrigação no Nordeste Brasileiro. Recentemente, entretanto, tem havido um consenso em torno da utilização de uma outra metodologia – a de Penman-Monteith – para a estimativa da Etp em todo o mundo. Outro método de larga aceitação é o de Thornthwaite, que expressa a evapotranspiração potencial como uma função exponencial da temperatura média mensal.

Costuma-se adotar os valores médios das grandezas climatológicas como característicos de uma região – dentre estes dados se destacam aqueles publicados nas Normais Climatológicas (INMET, 1990). Nesta publicação não constam os valores de evapotranspiração, apenas os de evaporação medidos por Piche. Também não se pode calcular a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, já que também não se dispõe de dados de velocidade de vento. Assim sendo, dentre os métodos aqui destacados somente são de fácil obtenção as estimativas por Hargreaves e Thornthwaite.

Assim sendo, pretende-se neste trabalho: (1) analisar a variabilidade temporal da evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith utilizando dados diários e verificar se os valores médios são ou não representativos do fenômeno e (2) comparar os resultados dos métodos Hargreaves e Thornthwaite com Penman-Monteith, considerado pela FAO como referência.

2. SÍNTESE CONCEITUAL

O Método de Penman-Monteith é baseado no efeito combinado do transporte convectivo das massas de ar e da radiação líquida, conforme equação 1.

(1)

$$\lambda_e \cdot ET_{pot} = \frac{\Delta_{vap}(R_n - G) + \rho_{ar} \cdot c_p \left(\frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta_{vap} + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

Onde: ET_{pot} - evapotranspiração potencial, λ_e - entalpia da evaporação da água, Δ_{vap} - curva que descreve a pressão de saturação do vapor d'água, e_a - pressão de saturação do vapor, γ - constante do psicrômetro, r_s - bulk resistance resistance, r_a - resistência aerodinâmica, R_n - balanço de radiação, G - fluxo de calor através do solo e T_{ar} - a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

O Método de Hargreaves tem sido comumente utilizado no Nordeste Brasileiro para o cálculo da Evapotranspiração Potencial. De fácil utilização, o método fornece a Etp em função da temperatura média compensada, da umidade relativa do ar e de um coeficiente de correção que depende da latitude do local considerado, conforme equação 2:

$$ETP = F \cdot (100 - U)^{1/2} \cdot 0,158 \cdot (32 + 1,8 T_{comp}) \quad (2)$$

onde: F - Fator dependente da latitude (adimensional); T_{comp} - Temperatura média compensada em $^{\circ}\text{C}$ e U - Umidade relativa do ar (%).

Thornthwaite, a partir da correlação entre dados de evapotranspiração medida e temperatura do ar, elaborou a equação 3:

$$ET_0 = bT_m^a \quad (3)$$

onde: b - N/12 (fator de ajuste do comprimento do dia); Eto = evapotranspíração potencial (mm/mês); Tm = temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$); a = uma função do índice de calor 1 e N - fotoperíodo, função da latitude e mês (horas).

3. METODOLOGIA

No presente estudo, foram utilizados dados oriundos da Plataforma Automática de Coleta de Dados Meteorológicos e Ambientais (PCD) para a cidade Fortaleza, capital do Ceará. Esta PCD integra o serviço de monitoramento da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCCEME), e estão espacialmente distribuídas por todo o Estado (Figura 1). Existem sensores para captar os valores das seguintes variáveis: *temperatura do ar, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica, precipitação, umidade relativa do ar e radiação solar*.

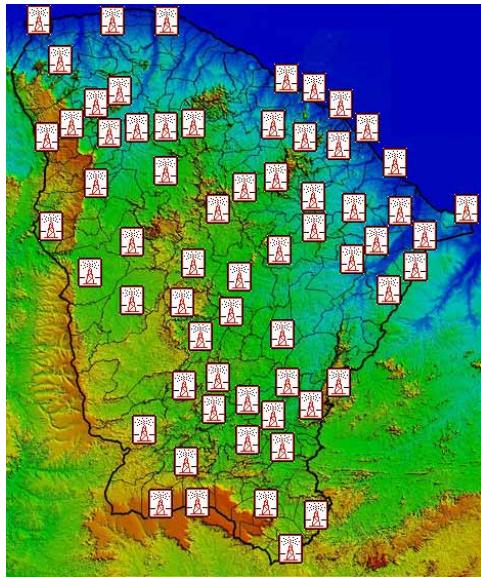


Figura 1: Distribuição espacial das PCDs no Estado do Ceará (Fonte:
<http://www.funceme.br/DEPAM/pcd/MapaPCD.php>)

Dados Utilizados

Teoricamente estão disponíveis dados das PCDs de 68 localidades (conforme mostrado na Figura 1) - das varáveis climatológicas citadas - de 1999 a 2009, coletados a cada três horas de cada dia. Entretanto ao se trabalhar os dados, viu-se que, durante alguns períodos, sensores apresentavam informações inconsistentes, inviabilizando o cálculo da evapotranspiração. Sendo assim optou-se por estudar os dados de apenas uma estação – Fortaleza – fazer a consistência de seus dados – e proceder-se as análises desejadas.

Os valores utilizados abrangem os anos de 2004 a 2008, uma vez que este período foi o de melhor confiabilidade e clareza dos dados. Vale observar que para os anos de 2006 e 2008, só estavam disponíveis as leituras para os meses de maio a dezembro e janeiro a junho, respectivamente. Embora, aparentemente, tenha-se um pequeno número de anos, o trabalho de Cai et. al. (2007) concluiu que estimativas utilizando os 5 últimos anos de dados são satisfatórias, segundo e que existem diferenças significativas nos resultados quando são utilizadas séries muito longas de tempo. Esta variabilidade temporal também é objeto de estudo no presente trabalho.

Estimativa da Evapotranspiração (ETo)

Para a estimativa da ETo, utilizou-se o programa SEVAP (Figura 2), desenvolvido no Departamento de Ciências Atmosféricas do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), que utiliza os métodos Penman-Monteith, Hargreaves,

Priestly-Taylor, Linacre, Jensen-Haise, Makkink, Tanque Classe A e Thorntwaite. O SEVAP foi desenvolvido em ambiente “Windows 95+” e “Delphi v.5.0”.



Figura 2: Tela inicial do *software* SEVAP.

Segundo SILVA (2005), o modelo SEVAP apresentou resultados muito semelhantes aos do Computer Program for Irrigation Planning and Management – CROPWAT (Figura 3), programa recomendado pela Food and Agriculture Organization (FAO), em ambiente DOS.

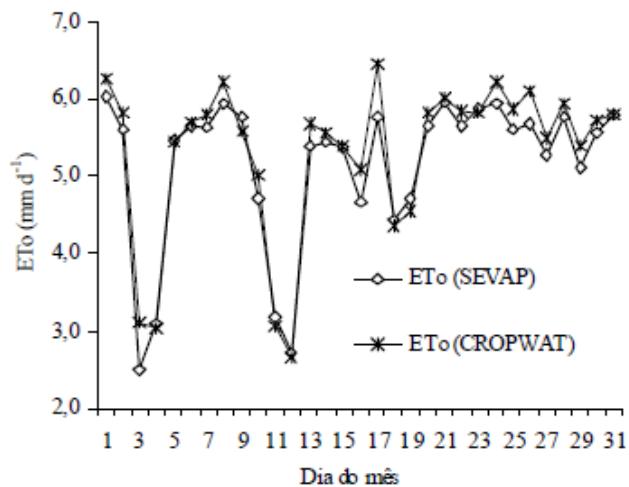


Figura 3: Comparação entre os valores de ET₀ estimados pelo SEVAP e o CROPWAT. Fonte: SILVA (2005).

Sendo o CROPWAT um *software* de referência pela FAO, os resultados apresentados na Figura 3 atestam a confiabilidade do SEVAP para o cálculo das estimativas de ETo.

Análise da variabilidade da Evapotranspiração estimada pelo Método Penman-Monteith

A seguir foram estimadas as evapotranspirações diárias e Fortaleza pelo método Penman-Monteith e analisada a sua variabilidade em escalas diária, mensal e anual e se a utilização de valores médios mensais incorreria em grandes erros.

Comparação dos resultados obtidos pelos métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite

Observando quais as variáveis de entrada de cada método, verificou-se que os dados da PCDs permitiam a estimativa da ETo por apenas três deles - Penman-Monteith (recomendado pela FAO), Hargreaves e Thornthwaite. Poderia ainda ter analisado o Método Priestly-Taylor; entretanto estudos mostram que este método é apenas uma simplificação do Penman-Monteith (Silva et.al., 2005). Os cálculos foram efetivados e o desempenho dos três métodos comparados. Por curiosidade, foram também comparados os valores das normais climatológicas, para evaporação – calculadas pelo Piché.

4. RESULTADOS

A Tabela 1 e a Figura 3 mostram o comportamento temporal da ETo em Fortaleza, estimada pelo Método Penman-Monteith para o período 2004 a 2008. Existem falhas nos anos de 2006 e 2008 em função de mau funcionamento de algum sensor que mede valores variáveis de entrada.

Tabela 1 – Estimativa da Evapotranspiração em Fortaleza segundo Penman-Monteith para o período 2004 a 2008

	2004	2005	2006	2007	2008
Jan	137,02	153,76		186,62	154,69
Fev	118,32	130,76		120,12	129,34
Mar	122,14	125,86		134,23	113,15
Abr	119,70	124,80		132,90	109,50
Mai	138,88	134,54	131,75	143,84	128,03
Jun	111,30	121,80	141,90	133,20	123,60
Jul	141,36	157,79	156,55	170,19	
Ago	142,91	150,35	151,90	141,05	
Set	172,20	167,10	176,40	194,70	
Out	180,42	183,21	190,03	203,36	
Nov	168,60	175,50	176,10	189,30	
Dez	167,40	169,88	172,36	163,68	

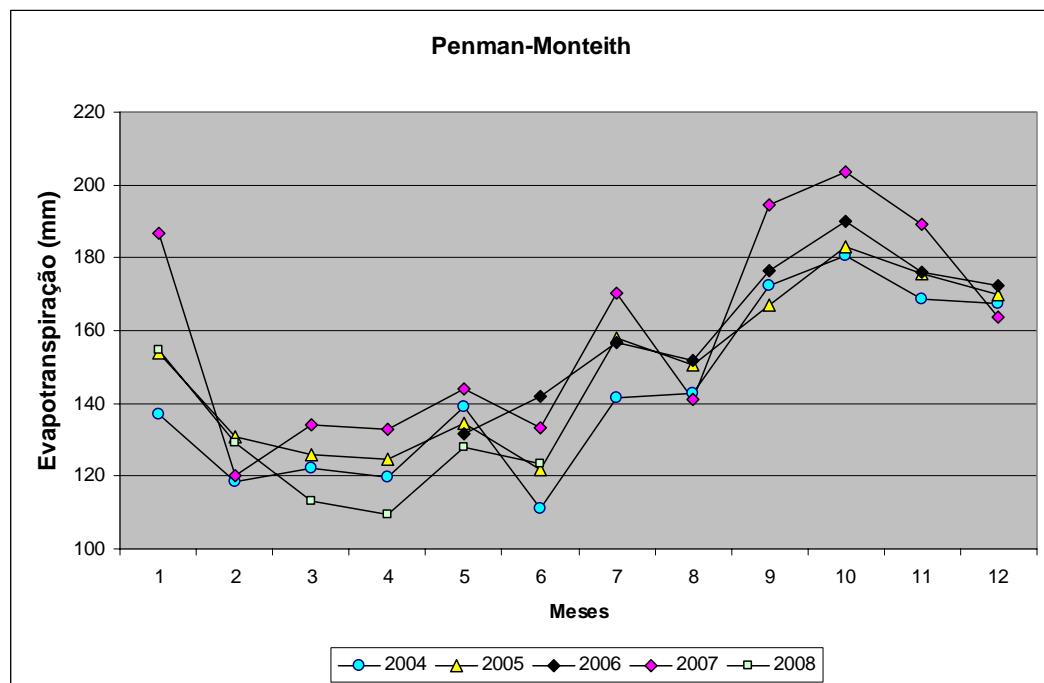


Figura 3 – Estimativa da Evapotranspiração em Fortaleza segundo Penman-Monteith para o período 2004 a 2008

A evapotranspiração anual para os anos de 2004, 2005 e 2007 foram respectivamente 1.720,25, 1.795,35 e 1.913,19 milímetros. Observa-se que a variação temporal da evapotranspiração mensal para Fortaleza não é muito grande, principalmente durante a estação seca – julho a dezembro. Este comportamento pode ser melhor avaliado na Tabela 2, que mostra o coeficiente de variação (CV) da evapotranspiração para cada mês do ano.

Tabela 2 – Estatísticas das estimativas da Evapotranspiração Mensal em Fortaleza segundo Penman-Monteith para o período 2004 a 2008

	Média mensal	Desvio Padrão	CV
Jan	158,02	20,72	0,13
Fev	124,64	6,32	0,05
Mar	123,85	8,74	0,07
Abr	121,73	9,80	0,08
Mai	135,41	6,16	0,05
Jun	126,36	11,66	0,09
Jul	156,47	11,81	0,08
Ago	146,55	5,37	0,04
Set	177,60	12,02	0,07
Out	189,26	10,23	0,05
Nov	177,38	8,65	0,05
Dez	168,33	3,70	0,02

O mês de janeiro é o que apresenta maior variabilidade – provavelmente devido ao ano de 2007. Estes resultados indicam que a média mensal é um bom estimador da evapotranspiração para um dado mês.

Comparou-se desempenho dos métodos de Hargreaves e Thornthwaite (ambos utilizando dados das PCDs e software SEVAP) em relação ao Penman-Monteith. Os resultados para os anos de 2004, 2005, 2006, 2007 e 2008 são mostrados nas figuras 4, 5, 6, 7 e 8. As figuras mostram, via de regra um comportamento bastante irregular da evapotranspiração mensal calculada por Hargreaves quando comparadas com as estimativas por Penman-Monteith.

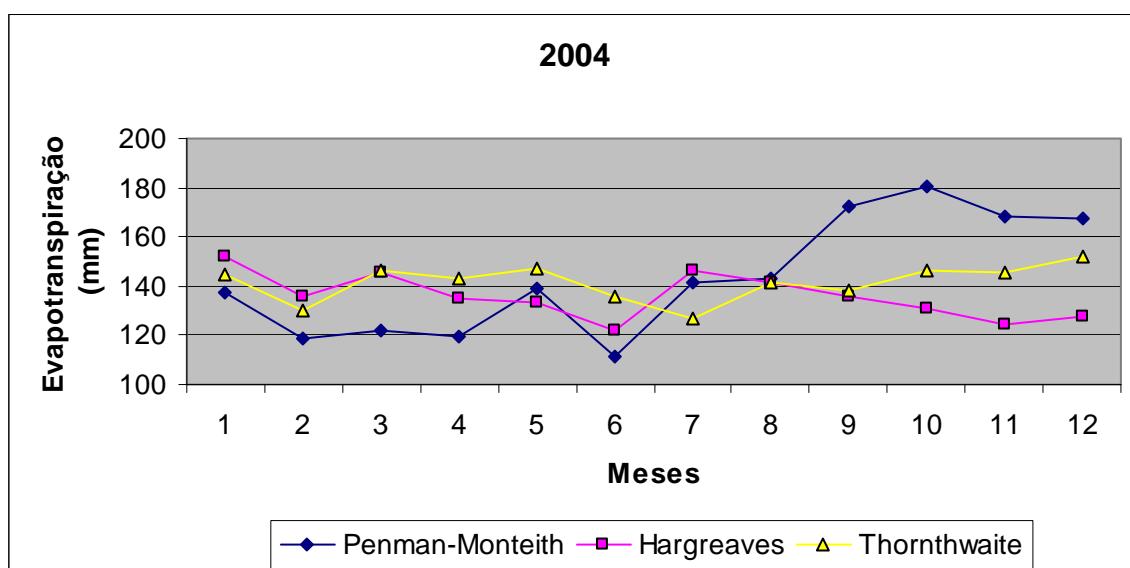


Figura 4 – Análise comparativa entre os métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite no ano de 2004

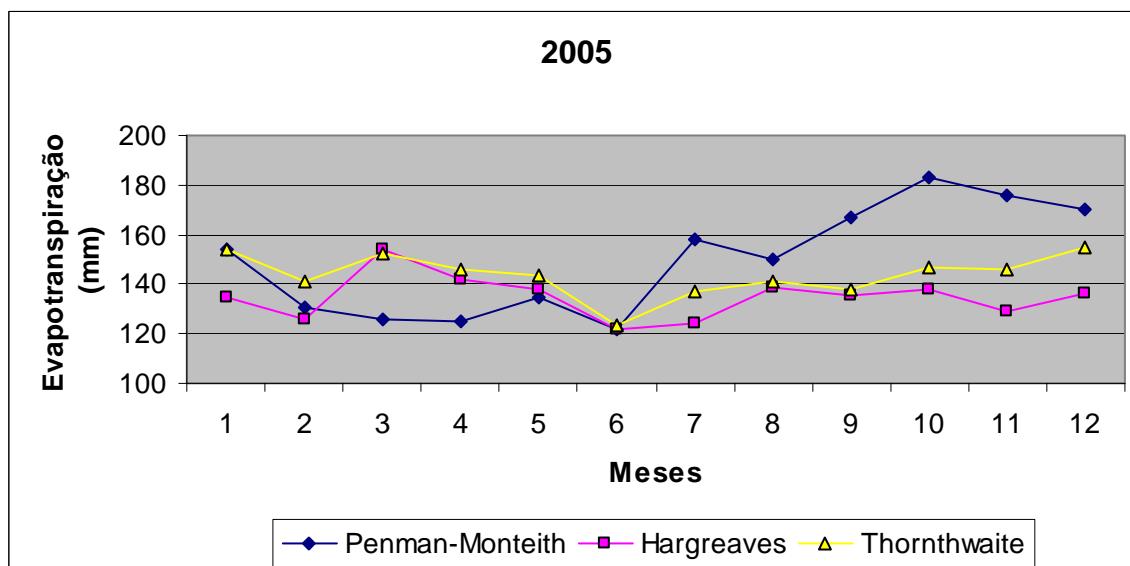


Figura 5 – Análise comparativa entre os métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite no ano de 2005

A evapotranspiração anual calculada pelos três métodos são apresentadas na Tabela 3, assim como os desvios percentuais (erros) em relação ao Método Penman-Monteith.

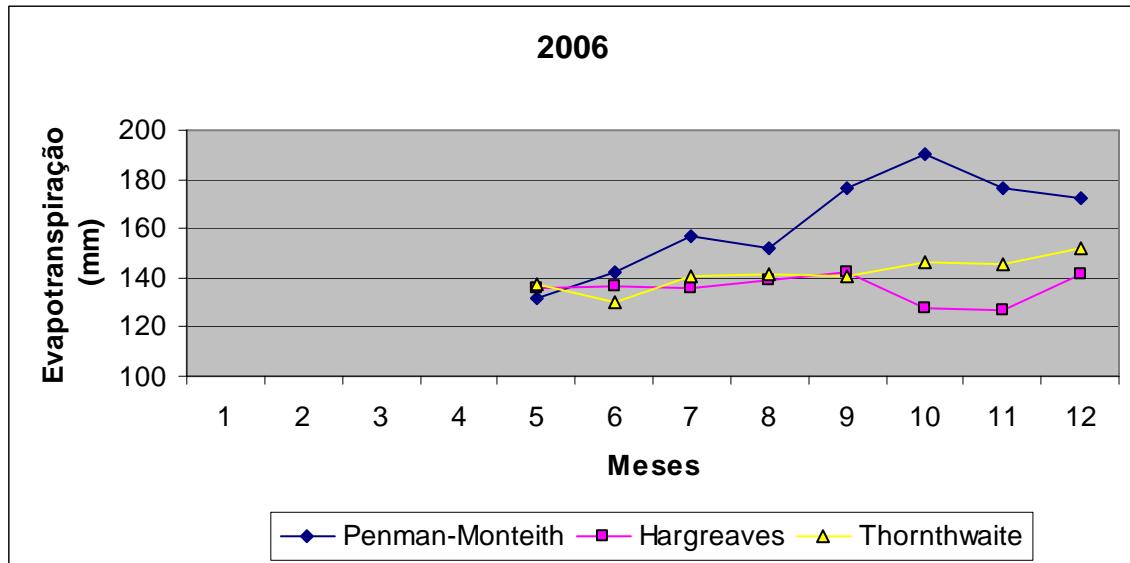


Figura 6 – Análise comparativa entre os métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite no ano de 2006

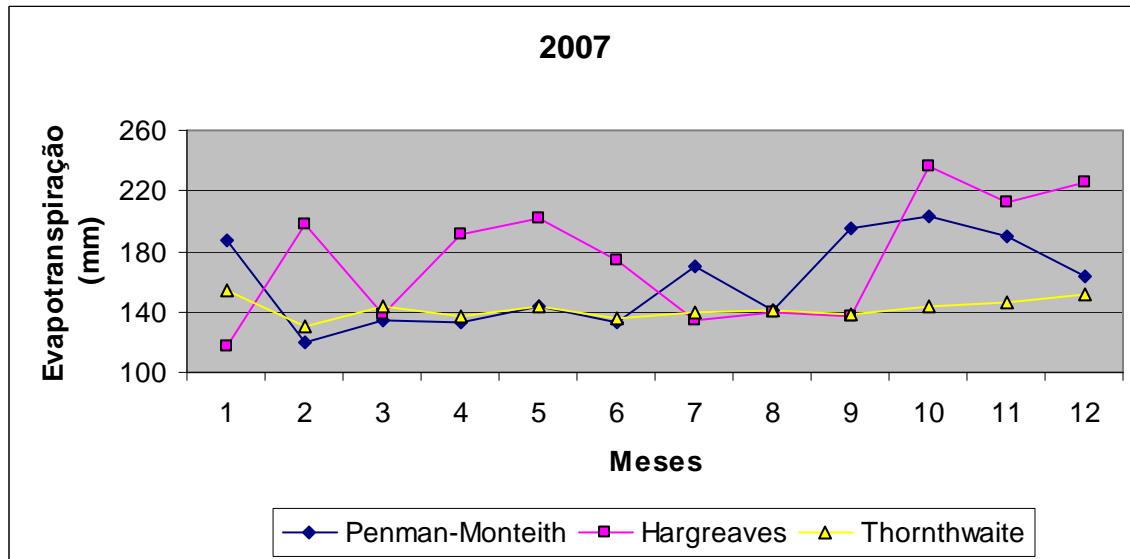


Figura 7 – Análise comparativa entre os métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite no ano de 2007

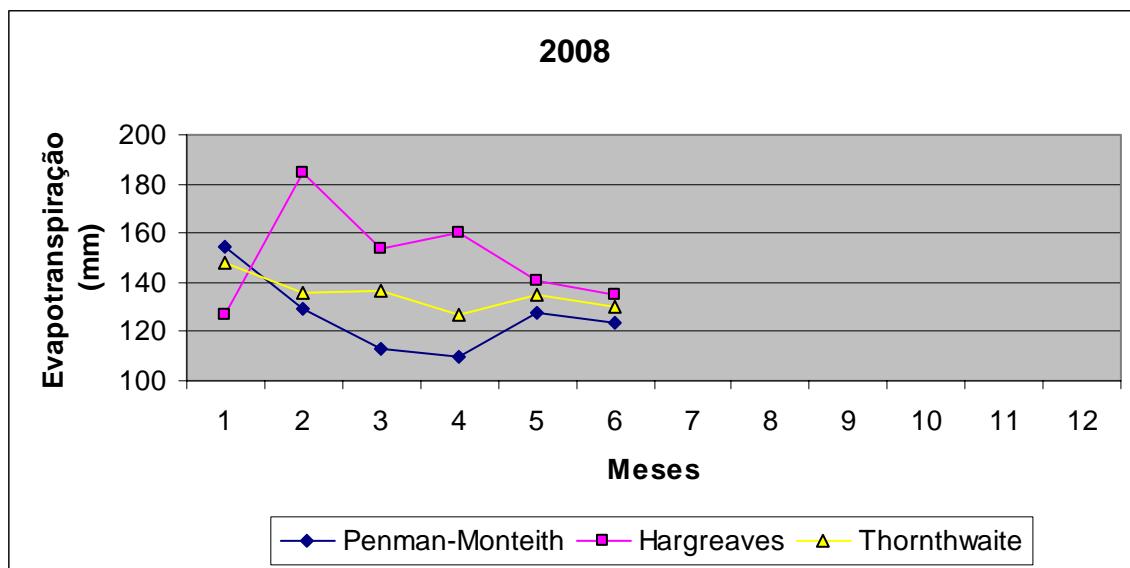


Figura 8 – Análise comparativa entre os métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite no ano de 2008

As Normais Climatológicas (INMET, 1990) não apresentam valores evapotranspiração, nem permite que se estime seu valor pelo Método de Penman-Monteith a partir de seus dados, uma vez não apresenta valores de velocidade de vento. Apresenta valores de evaporação, calculadas por Piché. Pela sua fácil obtenção e sua abrangência espacial, comparou-se as estimativas de evapotranspiração de Penman-Monteith com os valores de evaporação por Piché.

Tabela 4 – Análise comparativa da evapotranspiração anual estimada pelos métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite (2004 a 2008) em Fortaleza

	Evapotranspiração Anual (mm)					Desvios Percentuais em relação ao Método Penman-Monteith (%)				
	2004	2005	2006 *	2007	2008 *	2004	2005	2006	2007	2008
Penman-Monteith	1.720,25	1.795,35	1.296,99	1.913,19	758,31	-	-	-	-	-
Hargreaves	1.630,03	1.617,19	1.086,03	2.104,21	900,30	-5,2	-9,9	-16,3	10,0	18,7
Thornthwaite	1.697,50	1.725,40	1.134,40	1.704,90	812,00	-1,3	-3,9	-12,5	-10,9	7,1
Normais	1.469,20	1.469,20	1.113,10	1.469,20	933,80	-14,6	-18,2	-14,2	-23,2	23,1

(*) ano incompleto – somatório das Normais com os meses cujos dados existem nos outros métodos

Analizando-se os totais anuais, os valores de ETo estimados a partir do Penman-Monteith são muito diferentes daqueles estimados a partir da evaporação das Normais Climatológicas, entretanto quando se analisa a Figura 9, observa-se que, embora a ETo seja subestimada na estação chuvosa, os valores mensais estimados para os anos 2004 a 2008 são bastante

semelhantes durante a estação seca. Novamente observa-se um comportamento diferenciado na ETo do ano de 2007.

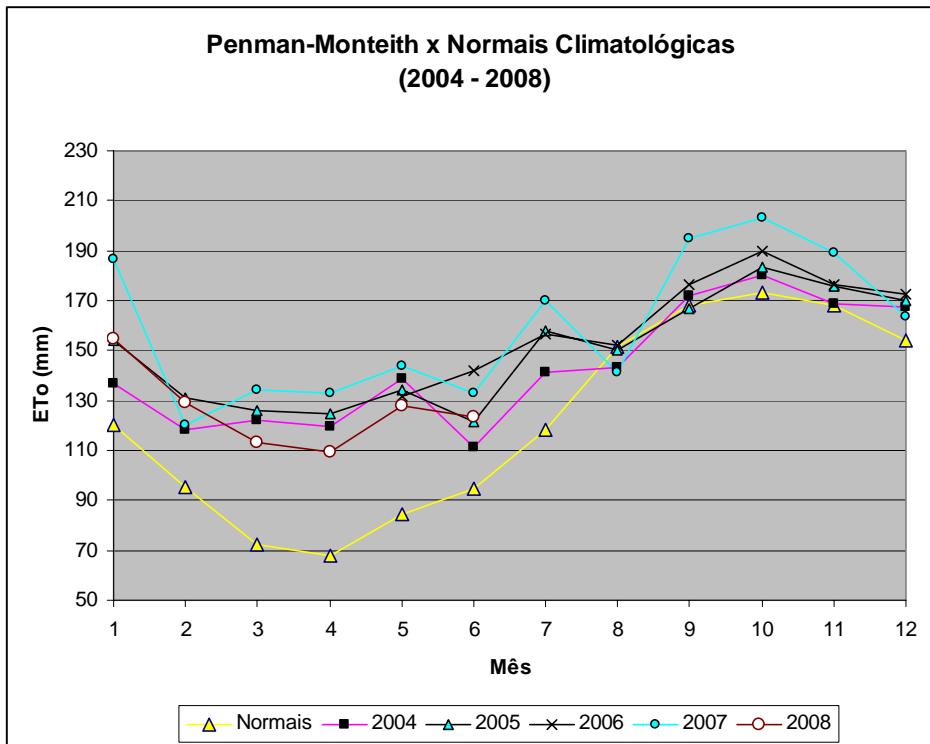


Figura 11: Comparação das estimativas de Penman-Monteith com as normais climatológicas (2004 – 2008)

Uma outra análise pertinente é apresentada a seguir: o comportamento do método de Hargreaves segundo a modelagem do SEVAP, o qual utiliza somente as temperaturas máxima e mínima como dados de entrada, e o comportamento dos valores tabelados de Hargreaves para a PCD de Fortaleza.

5. CONCLUSÕES

Considerando-se que o método Penman-Monteith como o que resulta em estimativas de ETo mais próximas da realidade, conclui-se que, para a PCD em Fortaleza, não há uma variabilidade significativa nos valores da evapotranspiração mensal. Logo, podem ser utilizados valores médios para cada mês sem incorrer em nenhum erro apreciável.

Embora represente evaporação, os dados pelas normais climatológicas podem ser utilizados para estimar os valores da evapotranspiração no segundo semestre, de agosto a dezembro, uma vez que os resultados do método de referência, Penman-Monteith, praticamente se igualaram aos dados das normais para este período.

As estimativas de ETo a partir dos métodos de Hargreaves e Thornthwaite se mostraram consideravelmente diferentes dos valores encontrados pelo Penman-Monteith., para a PCD de Fortaleza.

6. BIBLIOGRAFIA

- CAI, Jiabing; LIU, Yu;;LEI, Tingwu; PEREIRA, Luis Santos. *Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages*. Artigo. Agricultural and Forest Meteorology. 2007.
- HARGREAVES, G.H. (1974). *Potential Evapotranspiration and Irrigation Requirements for Northeast Brazil*. Utah State University, Logan, UT.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET (1992). *Normais Climatológicas (1961 –1990)*
- PENMAN, H.L. (1948). *Natural Evaporation from Open Ware, Bare Soil and Grass*. Proc. Roy. Soc. London, A 193:120-126.
- SILVA, Vicente de P. R. da; BELO FILHO, Adelgicio F.; SILVA, Bernardo B.; CAMPOS, João H. B. da C. *Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n.4, p.547-553, 2005.