

# ANÁLISE ESPACIAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO ESTADO DO CEARÁ: análise comparativa entre métodos

*Cleiton da Silva Silveira<sup>1</sup>; Jackeline Lucas Souza<sup>1</sup>; José Valmir Farias Maia Júnior<sup>2</sup>; Bruno Aragão Martins de Araújo<sup>2</sup>; Francisco Augusto Ferreira Almeida<sup>2</sup>; Ticiania Marinho de Carvalho Studart<sup>3</sup> e Renata Mendes Luna<sup>3</sup>*

**RESUMO** - Neste trabalho avaliaram-se os diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração para as estações meteorológicas no Estado do Ceará, operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram avaliados os métodos: Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor, Thornthwaite e Penman-Monteith. Um método que também foi avaliado, apesar de mensurar apenas a evaporação, foi o evaporímetro Piché. As informações climatológicas necessárias foram consultadas nas Normais Climatológicas, disponibilizadas pelo INMET e no Plano Estadual de Recursos Hídricos. Uma avaliação estatística com base na correlação e no desvio relativo percentual (bias) foi feita para definir quais métodos possuem melhor desempenho para o Ceará. Os resultados de cada método foram comparados ao método de Penman-Monteith, considerado padrão. Os resultados evidenciam uma clara influência das características locais como topografia, existência de frentes frias e proximidade do oceano sobre os valores de evapotranspiração. As estações climatológicas do Ceará apresentam potenciais bem avaliados com ciclo anual bem definido com quase todos os métodos presente em todas as suas regiões. No que se refere aos métodos de estimativa de evapotranspiração, nenhum teve bom desempenho em reproduzir as estimativas do Penman-Monteith.

**ABSTRACT** - This study evaluated different methods for evapotranspiration estimative for weather stations in the state of Ceará, operated by the National Institute of Meteorology (INMET). The methods were: Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor, Thornthwaite and Penman-Monteith. Another method was also evaluated, although it only measures evaporation, was evaporimeter Piché. The necessary information was consulted in Normais Climatológicas, published by INMET, and the Water Resources State Plan. A statistical evaluation based on correlation and percentage deviation (bias) was made, to define which methods have better performance for Ceará. The results of each method were compared to the Penman-Monteith, considered standard. The results show a clear influence of local characteristics like topography, existence of cold fronts and proximity to the ocean on the values of evapotranspiration. With regard to methods of estimating evapotranspiration, none had a good performance in reproducing the estimates of the Penman-Monteith.

**Palavras-chave:** métodos de evapotranspiração, Penman-Monteith, Hargreaves

---

<sup>1</sup> Doutorandos em Eng. Civil - Recursos Hídricos (UFC): cleitonsilveira16@yahoo.com.br e jackeline.souza@hotmail.com

<sup>2</sup> Mestrandos em Eng. Civil – Recursos Hídricos (UFC): junior\_maia\_fisica@hotmail.com, brunoaragao\_@hotmail.com e fco\_augusto@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Bloco 713. Email: [ticiania@ufc.br](mailto:ticiania@ufc.br) - Fone: 85 3366.9770

## 1. INTRODUÇÃO

O Nordeste do Brasil apresenta clima semi-árido com grande variabilidade temporal e espacial de chuvas e altas taxas de evaporação (MOLION e BERNARDO, 2002; ALBUQUERQUE *et al.* 2009). Pequenas flutuações, associadas às condições climáticas, provocam significativos impactos sociais e econômicos sobre a região, descritos por Souza Filho e Moura (2006). Desta forma, torna-se relevante a identificação e o entendimento de fatores que impactem o balanço hídrico da região. A evaporação e a evapotranspiração constituem perdas de água relevantes para regiões áridas e semiáridas (TUCCI, 2005), devendo ser quantificadas corretamente.

São vários os métodos de estimativa de evapotranspiração disponíveis na literatura; alguns dos mais comumente utilizados no Brasil são Hargreaves-Samani (HARGREAVES e SAMANI, 1982), Priestley-Taylor (PRIESTLEY E TAYLOR, 1972), Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948) e Penman-Monteith (ALLEN *et al.* 1998). Destes, o de Hargreaves, devido à sua fácil manipulação, por meio de tabelas (HARGREAVES, 1974), é muito utilizado em todo o Nordeste Brasileiro. No Ceará, a evapotranspiração potencial, para várias localidades do Estado, foi calculada pelo Plano Estadual dos Recursos Hídricos (PERH, 1992), utilizando o método Thornthwaite. Entretanto, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), recomenda o método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.* 1998) como o que deve ser utilizado como padrão de referência para estimativas de evapotranspiração.

Assim, o presente trabalho procura calcular e analisar o comportamento espacial da evapotranspiração média mensal para o Ceará (utilizando as estações climatológicas operadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET - no Estado), pelo Método de Penman-Monteith, e comparar os resultados obtidos com os dos outros métodos acima citados.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A evapotranspiração representa a perda de água do solo vegetado para a atmosfera devido à evaporação e transpiração. Desde 1990, um dos métodos mais utilizados para cálculo da evapotranspiração é o Penman-Monteith, que possui variados elementos meteorológicos em sua solução, sendo o recomendado pela FAO como modelo global padrão para estimativa da evapotranspiração da cultura de referência. Assim, muitos são os estudos para comparar os resultados obtidos por outros métodos em relação ao mesmo, em várias regiões do país.

Estudos realizados por Medeiros (2002), na estação meteorológica do Vale do Curu, no Centro de Pesquisa em Agroindústria Tropical pertencente à EMBRAPA de Paraipaba/CE,

demonstraram que o método Priestley e Taylor (1972) e o Thornthwaite modificado por Camargo *et al.* (1999) foram os que se ajustaram melhor aos valores obtidos por Penman-Monteith.

Conceição (2003), quando da análise de diversos modelos de estimativas de evapotranspiração em comparação com o método Penman-Monteith, em um estudo realizado no Baixo do Rio Grande/SP foi percebido que os métodos que melhor representam relação de desempenho foram o Thornthwaite modificado e o Hargreaves & Sanami.

Leitão *et al.* (2007), em um estudo sobre a aplicação dos métodos de estimativa de evapotranspiração, nas cidades de Boqueirão e Patos na região da Paraíba, apresentaram o método proposto por Snyder (1992) como o melhor método em desempenho, que utiliza dados de umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar.

Borges e Mendiondo (2007), avaliando comparativamente seis métodos de evapotranspiração com o método Penman-Monteith, concluíram que o método Hargreaves apresenta índice de confiança superior a 0,995 para a bacia do rio Jacupiranga/SP. Já Back (2008), em estudo feito na estação meteorológica de Urussanga/SC, com nove métodos de estimativa de evapotranspiração, dentre eles os métodos Penman-Monteith, Hargreaves e Thornthwaite, verificou que o método de Hargreaves substituiu os valores de evapotranspiração em todos os meses analisados e que o Thornthwaite apresentou um desempenho muito bom no intervalo mensal, quando comparados com o Penman-Monteith.

A formulação dos métodos citados é a que se segue:

## 2.1. Método de Hargreaves

O método de Hargreaves é de natureza empírica e com algumas modificações recentes (HARGREAVES E SAMANI, 1982) assume a forma descrita pela Equação 1:

$$PET = 0,0075 \times R_a \times C_t \times \delta_t^{1/2} \times T_{avg,d} \quad (1)$$

em que o PET é a taxa de evapotranspiração potencial (mm/d),  $R_a$  é o total de radiação solar extraterrestre recebida nas mesmas unidades de evaporação (mm),  $C_t$  é a redução do coeficiente de temperatura que é uma função da umidade relativa,  $\delta_t$  é a diferença entre a média máxima mensal e a média mensal das temperaturas mínimas, e  $T_{avg,d}$  é a temperatura média no intervalo de tempo. Segundo os autores, a equação de Hargreaves consistentemente produz estimativas precisas da evapotranspiração, e em alguns casos, muito melhor do que as estimativas feitas usando outros métodos.

## 2.2. Método de Priestley e Taylor

O modelo de Priestley-Taylor (PRIESTLEY E TAYLOR, 1972) é uma modificação da equação de Penman mais teórica. Usado em áreas de estresse de baixa umidade, as duas equações têm produzido estimativas dentro de aproximadamente 5% do outro (SHUTTLEWORTH e CALDER, 1979). Uma aproximação empírica da equação de Penman combinada é feita pelo Priestley-Taylor para eliminar a necessidade de outros dados de entrada de radiação. A adequação das hipóteses apresentadas na equação de Priestley-Taylor foi validado por uma revisão de 30 estudos de balanço de água no qual foi encontrado geralmente que, em áreas vegetadas, sem déficit hídrico, ou muito pequenos défices, cerca de 95% da evaporação anual demanda foi suprida pela radiação (STAGNITTI *ET AL.*, 1989).

Raciocina-se que, sob condições ideais de evapotranspiração, acabaria por atingir uma taxa de equilíbrio de uma massa de ar que se desloca através de uma camada de vegetação com uma oferta abundante de água, a massa de ar ficaria saturada e a taxa real de evapotranspiração (AET) seria igual à taxa de evapotranspiração potencial de Penman. Sob estas condições de evapotranspiração, é referida como a evapotranspiração potencial de equilíbrio (PETeq). O termo de transferência de massa na equação de Penman combinada se aproxima de zero e as condições de radiação dominar. Priestley e Taylor (1972) constatou que a AET da vegetação bem regado foi geralmente superior à taxa de equilíbrio potencial e pode ser calculado multiplicando a PETeq por um factor ( $\alpha$ ) igual a 1,26 (Equação 2):

$$PET = \alpha \frac{s(T_a)}{s(T_a) + \gamma} (K_n + L_n) \times \frac{1}{\rho_w \times \lambda_v} \quad (2)$$

onde  $K_n$  é a radiação de ondas curtas,  $L_n$  é a radiação de onda longa,  $s(T_a)$  é o declive da pressão de vapor de saturação versus curva de temperatura,  $\gamma$  é o psicrométrica  $w$ , a constante  $\rho$  é a densidade da massa de água, e  $\lambda_v$  é o calor latente de vaporização.

## 2.3. Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite (1948) correlaciona a temperatura média mensal com a evapotranspiração, determinada pelo balanço hídrico onde a água estava disponível com umidade suficiente para manter a transpiração ativa (Equação 3).

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

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

A Equação de Thornthwaite tem sido amplamente criticada por sua natureza empírica, mas é amplamente utilizada, já que tem como entrada apenas a temperatura (THORNTHWAITE E MATHER, 1955).

## 2.4. Método de Penman-Monteith

Em 1948, Penman combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa e derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície em águas abertas do padrão climatológico usando registros do Sol, temperatura, umidade e velocidade do vento. Este método, também chamado de método combinado, foi desenvolvido por diversos pesquisadores e estendido às superfícies cultivadas através da introdução de fatores de resistência.

A fórmula de Penman-Monteith é dada pela Equação 4:

$$\lambda_e \cdot ET_{pot} = \frac{\Delta_{vap}(R_n - G) + \rho_{ar} \cdot c_p \left( \frac{e_s - e_a}{r_a} \right)}{\Delta_{vap} + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (4)$$

onde  $ET_{pot}$  - evapotranspiração potencial,  $\lambda_e$  - entalpia da evaporação da água,  $\Delta_{vap}$  - curva que descreve a pressão de saturação do vapor d'água,  $e_a$  - pressão de saturação do vapor,  $\gamma$  - 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 ( $^{\circ}C$ ).

A abordagem de Penman-Monteith, tal como formulada acima inclui todos os parâmetros que regem a troca de energia e fluxo de calor latente correspondente (evapotranspiração) de extensões uniforme da vegetação. A maioria dos parâmetros são medidos ou pode ser facilmente calculado a partir dos dados meteorológicos. A equação pode ser utilizada para o cálculo direto de qualquer evapotranspiração da cultura como a superfície e as resistências aerodinâmicas são específicas de determinada cultura.

### **3. METODOLOGIA**

No presente estudo foi utilizado o programa computacional Sistema de Estimativa da Evapotranspiração (SEVAP) - desenvolvido pelo Departamento de Ciências Atmosféricas, do Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Tal programa permite a utilização de oito métodos diferentes para a estimativa de evapotranspiração: Penman-Monteith, Hargreaves, Priestley e Taylor, Thornthwaite, Piché, Makking, Jensen-Haise e Linacre. Destes, somente os cinco primeiros foram trabalhados nesta pesquisa, em função da disponibilidade de dados nas Normais Climatológicas (INMET, 1990), as quais possuem informações de temperatura (médias, máximas e mínimas relativas e absolutas), nebulosidade, precipitação total, insolação total, evaporação Piche e umidade relativa. Três desses métodos utilizam informações não contidas nas Normais (velocidade do vento). Neste caso, foram utilizados os dados do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH, 1992).

Depois de calculadas as evapotranspirações para cada um dos cinco métodos, foram analisadas as correlações entre os resultados obtidos e suas tendências com o método de Penman-Monteith.

#### **3.1 Métodos utilizados**

Dentre os oito métodos disponíveis, foram analisados quatro deles: Hargreaves-Samani, Priestley e Taylor, Thornthwaite e Penman-Monteith. Para fins de comparação e pela facilidade de obtenção dos dados, foram efetuados também os cálculos para o evaporímetro Piché, que estima apenas a evaporação.

#### **3.2. Dados utilizados**

São 11 (onze) as estações meteorológicas operadas pelo INMET no Estado do Ceará, porém somente nove apresentam dados suficientes para cálculo de todos os cinco métodos (Tabela 1 e Figura 1).

Tabela 1 - Estações climatológicas operadas pelo INMET no Estado do Ceará

Estação	Lat.(S)	Long.(W.Gr.w.)	HP	Altitude HZ	Período
Barbalha	-7,32	-39,30	409,03	408,07	68/90
Campos Sales	-7,00	-40,38	583,5	584,92	61/90
Crateús	-5,17	-40,67	296,82	299,57	61/90
Fortaleza	-3,75	-38,55	26,45	26,95	61/90
Guaramiranga	-4,28	-39,00	870,67	872,86	61/90
Iguatu	-4,78	-37,77	217,67	216	61/90
Jaguaruana	-5,12	-38,37	11,71	12,59	70/89
Morada Nova	-3,73	-40,33	43,62	44,44	61/90
Quixeramobim	-6,00	-40,42	211,72	211,09	61/90
Sobral	-7,32	-39,30	83,25	84,18	61/90
Tauá	-7,00	-40,38	398,77	399,59	64/89

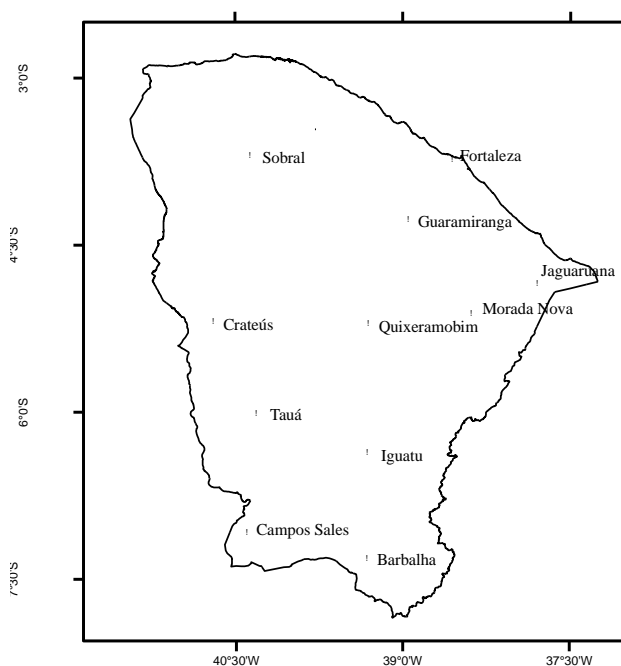


Figura 1 – Distribuição espacial das estações climatológicas analisadas no Estado do Ceará

Dos municípios apresentados na Tabela 1, foram retirados os de Iguatu e de Quixeramobim por não possuírem dados de velocidade dos ventos.

### 3.3. Avaliação do desempenho dos métodos de estimativa de evapotranspiração quanto à representação da sazonalidade

Utilizou-se como critério de avaliação do método a sensibilidade quanto à sazonalidade da evapotranspiração. A representação da sazonalidade é de grande relevância para a avaliação dos

impactos do clima em recursos hídricos e agricultura. O início do plantio das culturas e o regime fluvial são condicionados pela distribuição temporal das chuvas.

Para avaliação dos modelos foi feita a climatologia média mensal de cada estação meteorológica para cada método. Em seguida, efetuou-se uma análise comparativa entre eles com base em alguns índices estatísticos, para que fossem identificados quais reproduzem melhor o comportamento sazonal da evapotranspiração no Ceará. Calcularam-se as correlações entre os valores mensais de evapotranspiração, para cada estação, para cada um dos métodos com os calculados utilizando-se Penman Monteith; a seguir calculou-se o desvio relativo percentual (BIAS) definido pela Equação 5.

$$BIAS = \frac{P - A}{A} \times 100 \quad (5)$$

Onde P e A indicam previsão e análise verificada, respectivamente. Um valor positivo do *erro de viés* indica uma predisposição do modelo em superestimar os valores, por outro lado, um BIAS negativo, implica em uma tendência de subestimar.

O coeficiente de correlação (r), por sua vez, pode assumir valores entre -1 e 1 os quais indicam, respectivamente, correlação negativa e positiva (ou ausência de correlação, quando igual a zero). Este índice tem a capacidade de detectar correspondência de fase entre as séries, sendo, por construção, insensível ao BIAS (Equação 6).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{i=n} (A_i - \bar{A})^2}} \quad (6)$$

### 3.4. Cálculo da evapotranspiração potencial pelo método de Penman-Monteith e espacialização dos resultados

Após a estimativa da evapotranspiração para cada estação meteorológica, utilizando-se Penman-Monteith, foi realizada uma interpolação para uma grade regular 1,5 x 1.5 graus, de modo a obter valores de evapotranspiração para outros pontos da área. Assim, foram gerados valores para os pontos da grade, seguindo uma média ponderada das evapotranspirações dos pontos das estações



em questão (equação 7), tal que as funções-peso são dadas conforme a equação 8 (SILVEIRA *et al.*, 2010), o que permitiu a geração de uma superfície contínua de dados sobre mapa do Estado.

$$P_A = \frac{\sum_{N=1}^n W_N P_N}{\sum_{N=1}^n W_N} \quad (7)$$

$$W_N = \exp\left(-\sqrt{\left(\frac{X_I - X_A}{K_X}\right)^2 + \left(\frac{Y_I - Y_A}{K_Y}\right)^2}\right), \quad (8)$$

Se  $W_N > \exp(-R^2)$ , senão  $W_N = 0$

Onde  $X_A$  e  $Y_A$  são as coordenadas dos pontos de grade da análise da grade desejada;  $X_I$  e  $Y_I$  são as coordenadas das estações;  $N$  é o número de estações avaliadas;  $P_N$  são os valores da evapotranspiração em cada ponto de grade das estações avaliadas;  $W_N$  são os pesos de cada ponto grade das estações avaliadas em relação ao ponto de grade desejada;  $P_A$  são as evapotranspirações de cada ponto de grade depois da interpolação;  $K_X$ ,  $K_Y$  e  $R$  são constantes, para as quais é atribuído o valor 1,1 e 3,5, respectivamente.

#### 4. RESULTADOS

Na Figura 2 pode ser observada a evapotranspiração potencial anual obtida a partir do método de Penman-Monteith para todas as estações. A maioria apresenta valores superiores a 1.750 mm, exceto Fortaleza e Guaramiranga. Os valores de Guaramiranga provavelmente estão associados à topografia e, os de Fortaleza, à sua proximidade com o oceano.

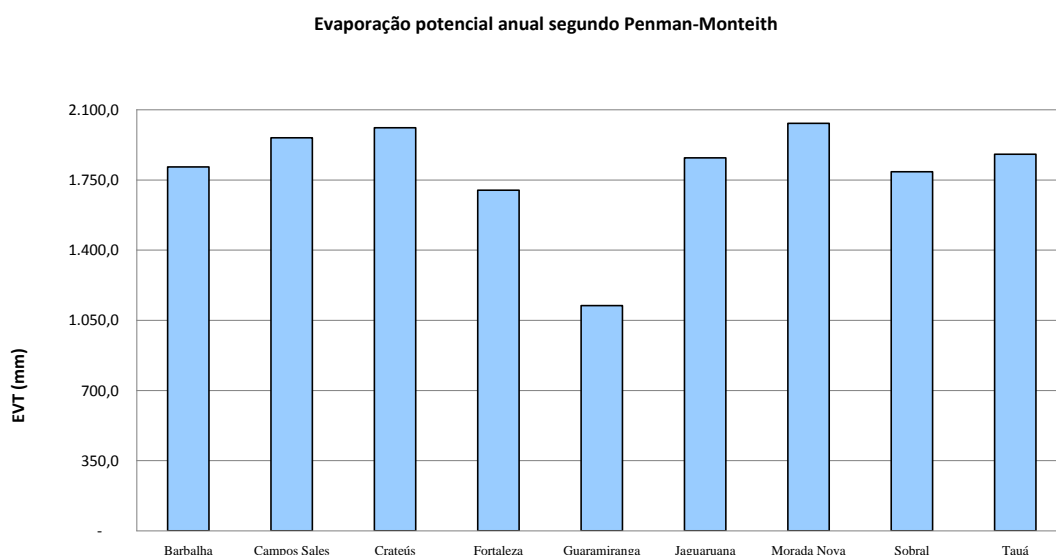


Figura 2 – Evapotranspiração potencial anual (mm/s) (Penman-Monteith) para estações meteorológicas avaliadas.

### 4.3. Análise espacial da evapotranspiração potencial no Estado do Ceará

Na Figura 3 é observada a evapotranspiração potencial mensal média ao longo do ano utilizando-se o método de Penman-Monteith para o Estado do Ceará, obtida através da interpolação dos dados das estações. Percebe-se que no segundo semestre os valores são maiores que no primeiro semestre, acentuando-se em outubro, novembro e dezembro. Observa-se que para os postos trabalhados não existe uma homogeneidade de comportamento relacionada com a localização espacial. Há influência da topografia na região da serra de Baturité, onde os valores de evapotranspiração são inferiores 125 mm/mês, para todo o ano. Já na região do Sertão Central, ao sul da região de Ibiapaba, os valores de evapotranspiração são superiores aos das demais regiões, em praticamente todos os meses.

Em Barbalha e Campo Sales, o método Penman-Monthein apresenta um ciclo anual semelhantes, porém, em Campo Sales, no segundo semestre, ocorre maior evapotranspiração, provavelmente, por estar mais ao norte do que Barbalha

Para a região sul do Estado, nota-se forte influência do regime de chuvas do sul do Nordeste do Brasil, onde são observados menores valores de evapotranspiração para a região do Cariri que para o Sertão Central, o Litoral Norte e a região do Jaguaribe.

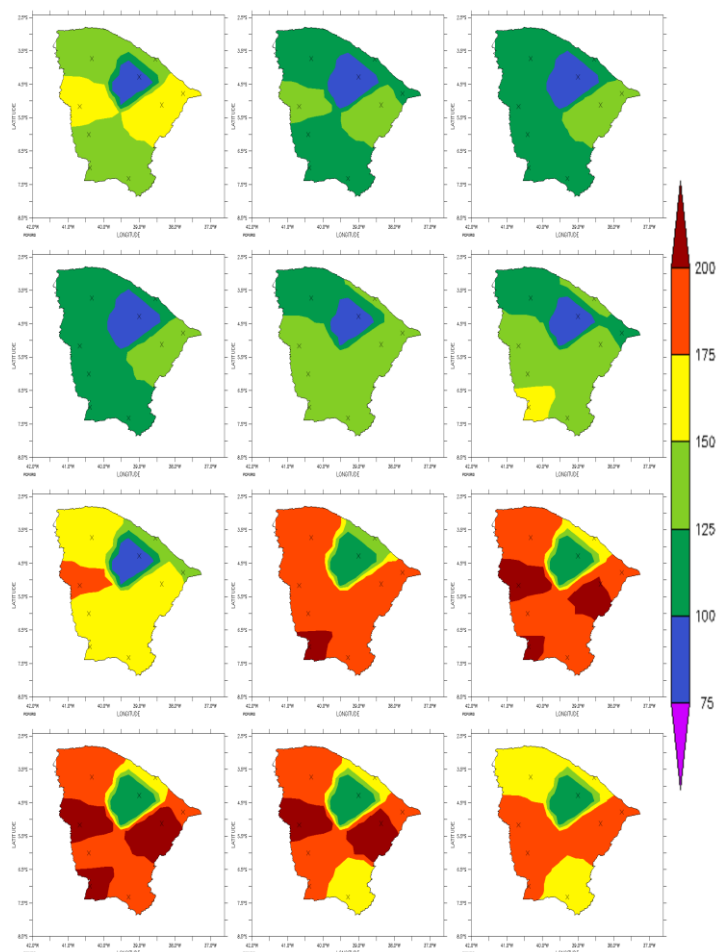


Figura 3 – Evapotranspiração Potencial média mensal (mm), segundo o Método de Penman-Monteith. A sequência dos meses se dá da esquerda para a direita e de cima para baixo.

#### 4.4. Análise comparativa entre os métodos de estimativa de evapotranspiração potencial em relação ao de Penman-Monteith para o Estado do Ceará

A Figura 4 apresenta o comportamento da evapotranspiração (mm/mês) para os cinco métodos estudados na pesquisa, nas nove estações meteorológicas no Estado do Ceará.

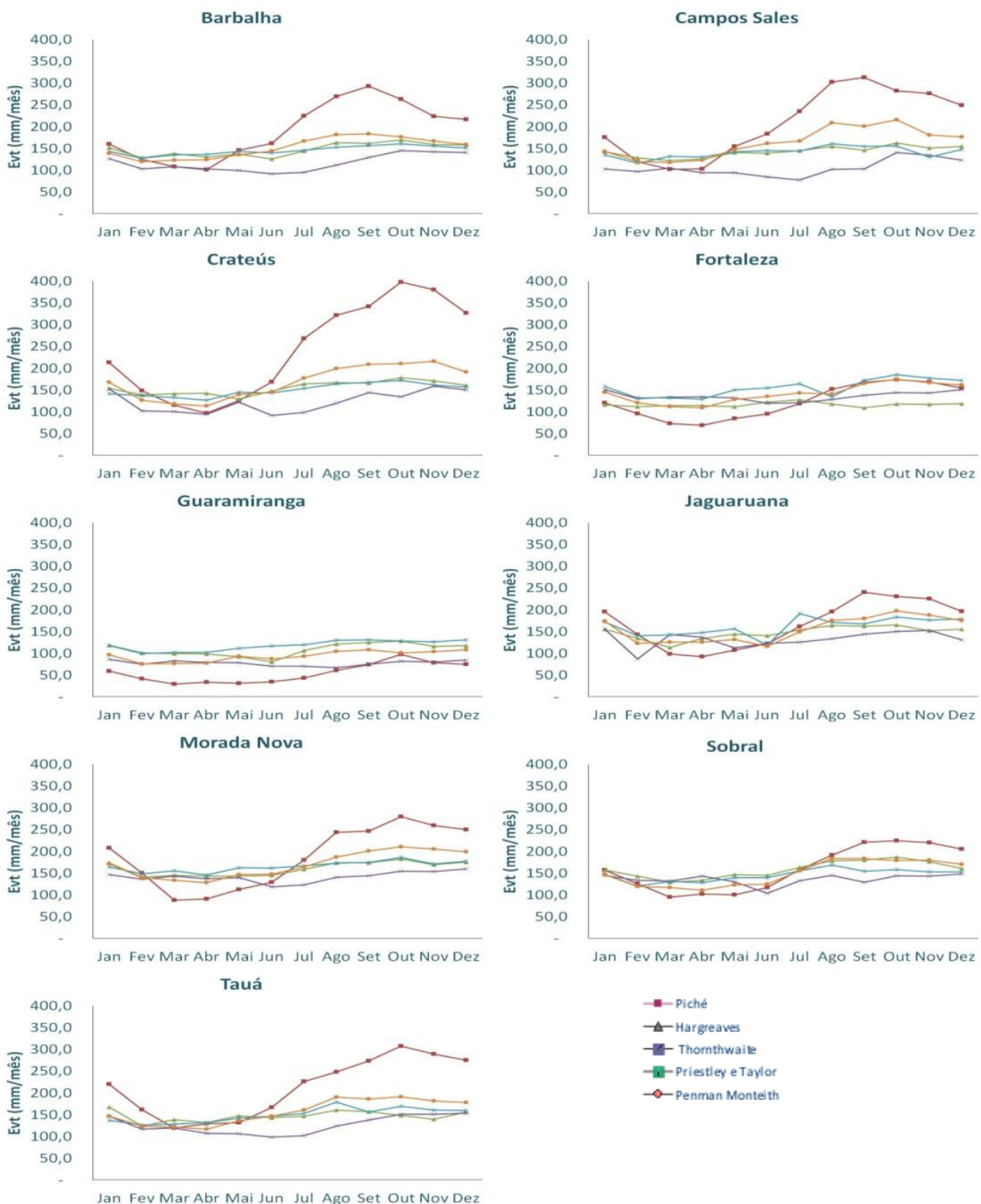


Figura 4 – Climatologia dos métodos de evaporação potencial avaliados para as estações meteorológicas de nove estações meteorológicas no Estado do Ceará.

Observa-se na Figura 4 um ciclo anual bem definido, capturado por quase todos os métodos em todas as regiões, evidenciando uma alta evapotranspiração na estação seca (agosto, setembro e outubro), um pequeno declínio na pré-estação (novembro, dezembro e janeiro), baixa evapotranspiração na quadra-chuvosa (de fevereiro a maio) e uma leve intensificação da

evapotranspiração na pós-estação (junho e julho). Porém, na região de Guaramiranga e de Fortaleza, a evapotranspiração é bem inferior as demais localidades.

A performance dos métodos em relação ao Penman-Monteith pode ser melhor avaliada por do coeficiente de correlação (r) (Tabela 2). Os coeficientes de correlação (r) acima de 0,8 estão grifados.

Tabela 2 – Coeficiente de correlação entre as medidas de evapotranspiração calculados pelos métodos Hargreaves, Thornthwaite, Priestley-Taylor e evaporímetro Piché em relação ao Penman-Monteith.

Métricas	Estações	Piché	Hargreaves	Thornthwaite	Priestley e Taylor
CORREL	Barbalha	0,99	0,84	0,51	0,92
	Campos Sales	0,96	0,91	0,47	0,85
	Crateús	0,90	0,85	0,50	0,97
	Fortaleza	0,89	0,19	0,16	0,68
	Guaramiranga	0,80	0,67	-0,25	0,93
	Jaguaruana	0,81	0,87	0,40	0,58
	Morada Nova	0,85	0,82	0,31	0,92
	Sobral	0,86	0,94	0,18	0,90
	Tauá	0,86	0,57	0,48	0,96

As tabelas 3 a 11 apresentam os resultados dos desvios relativos percentuais (BIAS) de cada método, em relação ao Penman-Monteith, em cada estação. Os BIAS inferiores a 10% (considerados admissíveis) estão grifados.

Tabela 3 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Barbalha (%)

	Município	Piché	Hargreaves	Thornthwaite	Priestley e Taylor
Jan	Barbalha	15,2	9,2	-8,9	2,9
Fev		4,5	7,5	-13,6	7,1
Mar		-12,0	12,4	-12,0	10,4
Abr		-18,5	5,1	-16,8	10,5
Mai		8,1	1,4	-26,7	5,7
Jun		12,5	-12,3	-36,3	-2,5
Jul		34,8	-13,8	-43,3	-12,6
Ago		48,2	-10,3	-38,7	-15,7
Set		59,7	-11,8	-29,5	-14,9
Out		49,0	-4,0	-18,1	-9,1
Nov		34,6	-4,5	-14,7	-6,5
Dez		36,2	-0,6	-11,5	-4,9

Tabela 4 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de C. Sales

	Município	Piché	Hargreaves	Thornthwaite	Priestley e Taylor
Jan	Campos Sales	22,3	-0,9	-28,2	-5,8
Fev		0,2	7,8	-18,8	-2,8
Mar		-13,4	3,2	-11,6	11,6
Abr		-16,3	2,2	-23,4	5,4
Mai		4,9	-4,8	-36,4	-3,8
Jun		13,8	-13,8	-47,7	-10,1
Jul		41,6	-12,9	-53,4	-13,2
Ago		44,6	-26,3	-51,3	-23,3
Set		55,6	-27,8	-49,0	-23,1
Out		30,5	-25,1	-35,3	-28,0
Nov		52,9	-16,1	-25,6	-28,1
Dez		41,1	-12,7	-30,6	-16,5

Tabela 5 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Crateús

	Município	Piché	Hargreaves	Thornthwaite	Priestley e Taylor
Jan	Crateús	27,7	-8,2	-8,9	-15,4
Fev		17,6	9,8	-19,2	8,2
Mar		-1,9	19,8	-15,1	12,9
Abr		-15,0	25,4	-17,3	11,6
Mai		-10,2	-7,5	-12,8	3,3
Jun		16,3	1,9	-36,9	-1,0
Jul		51,6	-7,5	-44,4	-13,3
Ago		61,8	-16,4	-39,9	-17,5
Set		63,8	-20,5	-31,3	-19,7
Out		88,9	-15,4	-36,3	-18,4
Nov		76,6	-20,8	-26,1	-25,2
Dez		71,1	-15,9	-21,7	-18,2

Tabela 6 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Fortaleza

	Município	Piché	Hargreaves	Thornthwaite	Priestley e Taylor
Jan	Fortaleza	-16,9	-20,0	4,7	9,2
Fev		-20,7	-7,4	8,1	9,3
Mar		-35,1	2,5	19,7	17,8
Abr		-37,5	4,4	23,1	18,7
Mai		-34,1	-13,5	2,4	16,7
Jun		-29,7	-9,4	-11,1	14,7
Jul		-17,0	-10,7	-15,7	14,8
Ago		8,1	-16,3	-8,7	-4,4
Set		1,7	-34,2	-16,4	4,4
Out		-0,8	-33,0	-17,9	6,0
Nov		1,1	-30,0	-14,0	6,5
Dez		-4,1	-26,2	-6,0	6,7

Tabela 7 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Guaramiranga

	Município	Piché	Hargreaves	Thorntwaite	Priestley e Taylor
Jan	Guaramiranga	-38,8	23,5	-10,4	21,9
Fev		-45,8	33,7	-1,2	31,1
Mar		-61,4	30,2	8,1	33,9
Abr		-57,2	27,1	1,6	31,0
Mai		-66,9	-0,3	-16,0	20,4
Jun		-60,9	-8,0	-18,9	34,9
Jul		-54,1	13,3	-24,7	28,2
Ago		-42,1	15,7	-36,2	24,3
Set		-31,9	15,6	-30,7	21,1
Out		-3,4	27,0	-19,4	26,7
Nov		-24,2	12,2	-22,9	22,7
Dez		-30,7	8,6	-22,1	20,9

Tabela 8 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Jaguaruana

	Município	Piché	Hargreaves	Thorntwaite	Priestley e Taylor
Jan	Jaguaruana	12,7	-10,4	-10,8	-0,9
Fev		15,9	8,9	-29,6	14,4
Mar		-21,8	-9,9	14,3	13,6
Abr		-27,0	6,4	9,1	17,4
Mai		-18,8	8,9	-15,1	18,6
Jun		4,9	21,5	6,1	2,3
Jul		7,9	2,7	-16,2	28,0
Ago		11,4	-6,2	-23,8	-2,3
Set		33,4	-9,8	-20,3	-6,8
Out		17,0	-16,4	-23,7	-6,9
Nov		19,8	-19,2	-18,8	-6,1
Dez		11,8	-11,5	-25,7	1,8

Tabela 9 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Morada Nova

	Município	Piché	Hargreaves	Thorntwaite	Priestley e Taylor
Jan	Morada Nova	21,4	1,3	-14,5	-4,3
Fev		7,4	0,6	-2,3	6,4
Mar		-34,4	8,1	7,1	16,0
Abr		-29,8	11,4	6,4	13,3
Mai		-23,0	-2,1	-4,5	11,0
Jun		-12,6	-2,0	-19,8	9,4
Jul		9,3	-3,2	-25,4	1,1
Ago		30,6	-7,0	-24,8	-7,3
Set		23,1	-13,5	-28,4	-12,7
Out		32,9	-13,1	-26,8	-11,5
Nov		26,7	-17,4	-25,2	-16,5
Dez		25,4	-11,8	-19,9	-11,2

Tabela 10 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Sobral

	Município	Piché	Hargreaves	Thornthwaite	Priestley e Taylor
Jan	Sobral	7,0	7,2	-1,0	0,8
Fev		5,2	19,8	11,8	0,7
Mar		-18,6	10,7	12,9	12,5
Abr		-8,2	20,3	29,2	16,0
Mai		-18,6	19,7	5,8	13,9
Jun		-6,3	15,9	-17,2	12,3
Jul		1,5	4,8	-14,7	0,0
Ago		4,2	-3,2	-21,4	-8,1
Set		20,7	-2,0	-29,7	-15,7
Out		25,4	4,2	-19,9	-11,9
Nov		22,6	-2,0	-20,3	-14,9
Dez		20,4	-5,8	-13,1	-10,7

Tabela 11 – Desvios percentuais relativos (BIAS) para a Estação de Tauá

	Município	Piché	Hargreaves	Thornthwaite	Priestley e Taylor
Jan	Tauá	50,9	14,9	0,2	-6,6
Fev		30,3	0,0	-5,7	2,3
Mar		-1,4	14,6	-1,6	5,9
Abr		10,4	12,6	-8,2	12,1
Mai		-3,2	8,2	-21,7	4,1
Jun		13,5	-2,3	-33,1	-0,2
Jul		40,7	-8,7	-36,7	-4,8
Ago		30,5	-15,5	-35,1	-5,7
Set		47,2	-15,6	-26,1	-16,1
Out		60,9	-22,5	-21,2	-11,5
Nov		59,4	-23,1	-17,3	-11,9
Dez		54,8	-12,4	-14,0	-10,1

No que se refere às medidas obtidas para evaporação pelo atmômetro Piché, observa-se na Tabela 2 que as mesmas apresentam altos coeficientes de correlação com as medidas de Penman-Monteith – superiores a 0,8 em todas as estações avaliadas. Ou seja, o comportamento sazonal da evaporação e evapotranspiração é bastante parecido. Entretanto, ao se observar a Figura 4 ou o índice BIAS percentual nas tabelas 3 a 11, verifica-se que o Piché superestima a evaporação nas estações meteorológicas do Cariri e Sertão Central do Ceará. Nas demais estações, subestima a evapotranspiração no trimestre mais úmido (março, abril e maio) e superestima na estação seca (exceto para Fortaleza e Guaramiranga). Sendo assim, a evaporação por Piché pode ser pensada como um estimador para a evapotranspiração por Penman-Monteith, caso se procure um fator de correção de escala entre as duas medidas.



Quanto ao método de Thornthwaite, observa-se que o mesmo tem dificuldade de representar a sazonalidade da evapotranspiração, e a subestima em praticamente todos os meses, em todas as regiões avaliadas. O método apresenta baixas correlações em todas as estações avaliadas, conforme Tabela 2.

Observa-se nas tabelas 3 a 11 que, de um modo geral, os métodos Priestley e Taylor e Hargreaves apresentaram estimativas de evapotranspiração bem semelhantes entre si, mas com melhores resultados (quando comparadas ao Penman-Monteith) para o primeiro semestre. Para o segundo semestre – estação seca – apenas em Barbalha, Fortaleza e Jaguarana tiveram um bom desempenho para Priestley-Taylor.

## 5. CONCLUSÕES

O Ceará apresenta ciclo sazonal de evapotranspiração bem definido, que é capturado pela maioria dos métodos em todas as regiões. As características climáticas da precipitação e a topografia são fatores determinantes na evapotranspiração.

Dentre os métodos analisados, o que obteve pior desempenho foi o de Thornthwaite, com baixíssimas correlações e maiores desvios percentuais. Tal método foi o adotado pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH, 1992), o que indica que se deve ter reservas ao adotar-se os valores indicados pelo Plano.

O atmômetro Piché, que mede evaporação, apresentou altas correlações com a evapotranspiração estimada por Penman-Monteith. Entretanto, tendeu a subestimar a evapotranspiração no trimestre chuvoso (março, abril e maio) e superestimá-la durante a estação seca. A adoção de um fator de correção pode ser a solução.

Outro método bastante utilizado no Nordeste – o método de Hargreaves – que inclusive tem seus valores tabelados para todas as estações estudadas - também não teve um bom desempenho para o Ceará. De modo geral, assim como o método de Priestley-Taylor, só apresentou resultados próximos ao dos de Penman-Monteith no o primeiro semestre. A estação seca não foi bem representada pelos dois métodos, exceto em três estações.

Sendo assim, nenhum dos métodos usualmente utilizados no Ceará – Hargreaves (tabelado para o Ceará) e Thornthwaite (calculado no Plano Estadual) – representa a evapotranspiração estimada por Penman-Monteith para o Estado do Ceará.

## BIBLIOGRAFIA

ALBURQUERQUE, I.F.; FERREIRA,J.N.; SILVA,M. G.; DIAS, M. F. *Tempo e Clima no Brasil*.São Paulo.OFICINA DE TEXTOS. p. 280, 2009.

ALLEN R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES,D. Et al. *Crop Evapotranspiration*. Rome: FAO, 1998. 297p (FAO Irrigation and Drainage paper, 56), 1998.

BACK, JOSÉ A. *Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC*. Irriga, Botucatu, v.13, n.4, p.449-466, outubro/dez. 2008. Disponível em: <http://200.145.140.50/ojs1/viewarticle.php?id=367&layout=abstract>>. Acesso em: 18 maio 2011.

BORGES, ALISSON C.; MENDIONDO, EDUARDO M. *Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência da Bacia do Rio Jacupiranga*. Revista Brasileira de Eng. Agrícola e Ambiental v.11, n.3, p.293–300, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n3/a08v11n3.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2011.

CONCEIÇÃO, MARCO A.F. *Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/viewFile/7374/6846>>. Acesso em: 18 maio 2011.

HARGRAEVES, G.H. *Potential Evapotranspiration and irrigation requirements for northeast Brazil*. Logan: Utah State University, p123,1974.

HARGRAEVES, G.H.,; Z.A. SAMANI. *Estimating potential evapotranspiration*. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division, 108(3): 225-230,1982.

LEITÃO, M.de M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M. de; LEITÃO, T. J.V. *Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba*. Revista Brasileira de Eng.Agrícola e Ambiental, v.11, n.6, p.585–593, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v11n6/v11n06a06.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2011.

MEDEIROS, A.T. *Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraipaba, CE*. 2002. 120 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Curso de Pós-graduação Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, da Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-16072002-140154/pt-br.php>>. Acesso em: 18 maio 2011.

MOLION, L. C. B; BERNARDO, S. O.*Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro*.REVISTABRASILEIRA DE METEOROLOGIA, Rio de Janeiro (RJ), v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

PRIESTLEY, C.H.B.; R.J. TAYLOR. *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. MonthlyWeatherReview, 100(2): 81-92, 1972.

ROCHA, E.DA J.T.; EVANGELISTA, S.R.M.; FUCK JÚNIOR, S.C. DE F.; GONDIM, R.S.(2011). “*Estimativa da  $E_t$  pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica*”. Revista Ciência Agronômica, v.42, n.1

SILVEIRA, C. S. ; COSTA, A. A. ; VASCONCELOS JUNIOR, F.C. ; NORONHA, A. W. T. *Verificação da previsão numérica do tempo por ensemble regional no Estado do Ceará*;. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. Modelagem Atmosférica, 2010.

SNYDER, R. L. *Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Jerusalém, v.118, n.6, p.977-980, 1992. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/iro/resource/1/jidedh/v118/i6/p977\\_s1](http://ascelibrary.org/iro/resource/1/jidedh/v118/i6/p977_s1)>. Acesso em 18 maio 2011.

SOUZA FILHO, F.A.;MOURA,A.D.*Memórias do Seminário Natureza e Sociedade nos Semi-Áridos*.Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil; Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 332p.,2006.

THORNTHWAITE, C.W.. *An approach toward a rational classification of climate*. Geographical Review, v38, p55-94,1948.

TUCCI, CARLOS E. M. *Modelos hidrológicos-2ed*– Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

WILKS, D.S *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. San Diego: Academic Press, 467 p,1995.