



MINISTÉRIO DA AGRICULTURA — MA
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária — EMBRAPA
Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido — CPATU

1º Simpósio do Trópico Úmido

1st Symposium
on the Humid Tropics

1er Simposio
del Trópico Húmedo

ANAIS PROCEEDINGS ANALES

Volume I

CLIMA e SOLO

CLIMATE and SOIL

CLIMA y SUELO

BELEM - PARA - BRASIL

1986



MINISTÉRIO DA AGRICULTURA — MA
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária — EMBRAPA
Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido — CPATU

1º Simpósio do Trópico Úmido

**1st Symposium
on the Humid Tropics**

**1^{er} Simpósio
del Trópico Húmedo**

Belém, Pará, 12 a 17 de Novembro de 1984

Belém, November 12 through 17, 1984

Belém, 12 a 17 de novembre de 1984

ANAIS PROCEEDINGS ANALE

Volume I

CLIMA e SOLO

CLIMATE and SOIL

CLIMA y SUELO

BELÉM - PARÁ - BRASIL

EMBRAPA-CPATU. Documentos, 36

Exemplares desta publicação podem ser solicitados à
EMBRAPA-CPATU

Trav. Dr. Enéas Pinheiro s/n

Telefone: 226-6622

Telex: (091) 1210

Caixa Postal, 48

66000 Belém, PA - Brasil

Tiragem: 1.000 exemplares

Observação

Os trabalhos publicados nestes anais não foram revisados pelo Comitê de Publicações do CPATU como normalmente se procede para as publicações regulares. Assim sendo, todos os conceitos e opiniões emitidos são de inteira responsabilidade dos autores.

Simpósio do Trópico Úmido, I, Belém, 1984.

Anais. Belém, EMBRAPA-CPATU, 1986.

6v. (EMBRAPA-CPATU. Documentos, 36)

I. Agricultura — Congresso — Trópico. I. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido, Belém, PA, II. Título. III. Série.

CDD: 630.601

AVALIAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL (ETP) PARA A REGIÃO DE BELÉM — PARÁ

Herberto Tocantins Maltez¹, Maria Gil Lopes
Maltez², Therezinha Xavier Bastos³ e
Tatiana Deane de Abreu Sá Diniz³

RESUMO: Este trabalho trata da avaliação do valor da evapotranspiração potencial (ETP) por diferentes métodos, procurando colocar em evidência suas limitações e condições de utilização para a região de Belém. Para isso, foi desenvolvida uma série de programas em linguagem BASIC que permite em um computador, de 64k de memória, calcular a ETP pelos métodos de Thornthwaite, Turc, Penman e Bouchet. Foram utilizados dados obtidos na estação climatológica do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido (CPATU) de coordenadas 1°28' lat. Sul e 48°27' long. Oeste de Greenwich, durante um período de doze anos. Comparando-se os resultados obtidos e tomando como referência o método de Penman, que integra o máximo dos fatores climáticos, constatou-se que o método de Turc, de formulação e uso mais simples, fornece uma boa aproximação.

Termos para indexação: Métodos de estimativa de evapotranspiração potencial, método de Thornthwaite, método de Penman, método de Turc, método de Bouchet, região amazônica.

POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION ASSESSEMENT FOR THE REGION OF BELÉM, STATE OF PARÁ, BRAZIL

ABSTRACT: This paper presents an evaluation of four methods of estimating potential evapotranspiration. The objective is to analyze the advantages and disadvantages of those methods in order to be utilized in Belém, State of Pará-Brazil. Sets of BASIC programs in a 64k computer to calculate potential evapotranspiration were used by Thornthwaite, Turc, Penman and Bouchet methods. The climatological data were obtained from Center of Agricultural Research for the Humid Tropics - CPATU, through its Climatological Station located at 1°28' South and 48°27' West, during a period of twelve years. The results were compared taking as reference the Penman method that integrate greater number of climatological factors. It was observed that the Turc method, which has a more simple formula, exhibits good approximation.

Index terms: Estimative methods for potential evapotranspiration, Thornthwaite method, Penman method, Turc method, Bouchet method, Amazon Region.

¹Geólogo Docteur d'Etat UFPA. Campus Universitário do Guamá. CEP 66000. Belém, PA.

²Matemática Docteur d'Etat UFPA. Campus Universitário do Guamá. CEP 66000. Belém, PA.

³Eng. Agr. M. Sc. EMBRAPA-CPATU. Caixa Postal 48. CEP 66000. Belém, PA.

Trabalho financiado pela CNPq e UFPA.

INTRODUÇÃO

A avaliação das características hídricas de uma bacia hidrográfica necessita que se tome em consideração as perdas de água por evapotranspiração que compreende de um lado a evaporação direta e de outro a transpiração das plantas.

A evapotranspiração é um fenômeno complexo que depende da energia solar disponível e da reserva hídrica do solo (Choisnel 1977). Por outro lado, intervém em menor grau e em condições difíceis de se avaliar a natureza e características da cobertura vegetal e pedológica do solo.

Compreende-se, pois, que o conhecimento quantitativo da evapotranspiração potencial irá permitir estudar as variações de umidade do solo, que condiciona, por exemplo, a quantidade de água necessária à vegetação e, em consequência, está relacionada com problemas de irrigação e do resíduo disponível para alimentação dos aquíferos.

Dois conceitos são associados à noção de evapotranspiração: a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR).

A noção de evapotranspiração potencial foi introduzida por Thornthwaite & Mather (1954) e mais tarde redefinida a base física por Penman (1956) como sendo a evapotranspiração de uma superfície do solo totalmente coberta de relva curta e uniforme e bem suprida em água, isto é, com toda a água que o fenômeno necessita.

A evapotranspiração real difere dessa definição de um lado, pela diferença da cobertura vegetal e de outro, e sobretudo, pela alimentação real possível do solo em água (Bouchet 1963).

Pode-se obter a evapotranspiração potencial de uma região através de métodos diretos, utilizando dispositivos apropriados (lisímetros) ou através de fórmulas nas quais intervêm dados climáticos como temperatura média do ar, insolação, radiação solar, etc.

Alguns autores estabelecem fórmulas empíricas de cálculo de ETP a partir de dados climáticos fazendo ajuntamentos estatísticos entre os dados de estações experimentais em um modelo teórico (Thornthwaite, Turc, etc). Por outro lado, outros autores, como Penman e Bouchet, propuseram uma avaliação da ETP através de cálculos apropriados, utilizando o balanço de energia.

Considerando a radiação solar, é importante frisar que a mesma desempenha um papel determinante nos mecanismos termodinâmicos geradores dos fenômenos meteorológicos. Isto implica que o processo da evaporação ao nível da superfície do solo depende, portanto, desse parâmetro. É necessário também considerar que a atmosfera atenua a radiação que atinge a superfície do solo, devendo-se levar em consideração os conceitos de radiação diária teórica do sol na ausência da atmosfera e da radiação global do sol que considera o efeito da atuação da atmosfera.

Este trabalho trata da avaliação da evapotranspiração potencial para a região de Belém, através de processos estimativos utilizando parâmetros climáticos como temperatura do ar e umidade relativa do ar, evaporação de piché, insolação e radiação solar procurando colocar em evidência as vantagens e desvantagens da utilização dos diferentes processos. Como não houve dados de lisímetros, o problema foi abordado por via matemática em função dos parâmetros climáticos utilizados.

MATERIAL E MÉTODOS

Para esse trabalho foram utilizados os métodos estimativos de evapotranspiração potencial propostos por Thornthwaite, Turc, Penman e Bouchet conforme segue:

a) Cálculo da radiação diária teórica do sol na ausência da atmosfera.

Inicialmente considerou-se a radiação solar teórica na ausência de atmosfera, partindo de sua expressão diferencial:

$$dR_{ga} = \frac{J_0}{r^2} \cos z \, dt \quad (1)$$

onde J_0 é uma constante igual a $116,4 \text{ cal/cm}^2/\text{h}$

r = raio vetor da terra (distância entre o centro da terra e o centro do sol). Esta distância é expressa em relação à distância real do semi-eixo da órbita da Terra. Ela é função do dia e do mês do ano. Seus valores são dados em tabelas (por exemplo, tabelas de Smithsonian)

t = hora solar

z = distância zenital do sol

$$\cos z = \sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \cosh$$

onde ψ = latitude do lugar de observação
 γ = declinação do sol, função do tempo e tado pelas tabelas de Smithsonian.

h = ângulo horário do sol

$$t = 12 \left(1 + \frac{h}{\pi} \right)$$

t é dado em horas e h em radianos, portanto:

$$dt = \frac{12}{\pi} dh$$

Então:

$$dR_{ga} = \frac{12}{\pi} \frac{J_0}{r^2} (\sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \cosh) dh$$

considerando que γ e r permanecem constantes durante o dia, pode-se integrar a equação precedente entre os limites h_2 e h_1 , isto é, no intervalo de um dia. Esses limites correspondem a $z = \pm \pi/2$, então $\cos z = 0$, logo as duas soluções de h são: $h_1 = -\arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma)$ $h_2 = \arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma)$

$$R_{ga} = \frac{12}{\pi} \frac{J_0}{r^2} ((h_2 - h_1) \sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma (\sin h_2 - \sin h_1))$$

sabendo-se que: $h_1 = -h_2$ e $\sin h_1 = -\sin h_2 = -\sin h$. Então:

$$\begin{aligned} R_{ga} &= \frac{12}{\pi} \frac{J_0}{r^2} (2 \arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma) \sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma (2 \sin h)) \\ &= \frac{12}{\pi} \frac{J_0}{r^2} (2 \arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma) \sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma (2 \sin \arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma))) \end{aligned}$$

finalmente:

$$R_{ga} = \frac{24 J_0}{\pi r^2} (h \sin \psi \sin \gamma + \cos \psi \cos \gamma \sin h) \quad (2) \text{ e}$$

$$h = \arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma) \quad (3)$$

Os valores de R_{ga} dependem do tempo e da latitude do lugar de observação.

A duração teórica do dia h é o intervalo entre o aparecimento e o pôr do sol. Em consequência pode-se obter h calculando a diferença de h entre esses instantes. Deste modo tem-se:

$$\Delta h = 2 \arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma)$$

A duração teórica do dia expressa em horas é:

$$H_n = \frac{24}{2\pi} \Delta h$$

$$H_n = \frac{24}{\pi} \arccos(-\operatorname{tg} \psi \operatorname{tg} \gamma) \quad (4)$$

Que é, como no caso da radiação solar, função da época do ano e da latitude do lugar de observação.

Considerando que as fórmulas precedentes dependem da declinação do sol e do raio vetor da terra. As Tabelas 1 e 2 fornecem esses valores para os dias 1, 5, 9, 13, 17, 21, 25 e 29, correspondentes aos diversos meses do ano (Tabelas de Smithsonian).

Considerando a fórmula da duração teórica do dia, conhecida pelos astrônomos com o nome de duração astronômica do dia, obteve-se a seguinte tabela para a região de Belém (Tabela 3).

Por outro lado, a radiação diária teórica do sol na ausência de atmosfera, de acordo com a fórmula dada anteriormente, apresenta os seguintes resultados: (Tabela 4).

A evolução da radiação diária teórica do sol na ausência de atmosfera apresenta um comportamento cíclico num período anual. A Fig. 1 mostra que essa radiação é muito elevada durante todo o ano. Vê-se na Tabela 5 os limites de oscilações da radiação diária teórica do sol.

Para exprimir esse comportamento através de uma curva conveniente definida

matematicamente, foi efetuado um tratamento computacional utilizando a técnica de análise de regressão de modelo polinomial, cujo resultado obtido é apresentado na Fig. 1.

b) Determinação da expressão matemática da radiação global para a região de Belém.

A expressão matemática da radiação global foi estudada por Black et al. (1954) e utilizada por Penman (1956) e Turc (1961) para o cálculo de evapotranspiração potencial relativa a estações meteorológicas situadas na Europa, Estados Unidos e África. De acordo com esses autores, a radiação global é uma função da insolação relativa (relação entre a duração da insolação e a duração teórica do dia):

$$R_g = R_{ga} (a + bEr)$$

TABELA 1. Declinação do sol expressa em graus (Tabelas de Smithsonian)

Dia Mês	1	5	9	13	17	21	25	29
Jan	-23,068	-22,7	-22,217	-21,617	-20,9	-20,083	-19,15	-18,133
Fev	-17,317	-16,167	-14,917	-13,617	-12,25	-10,833	-9,383	-
Mar	-7,883	-6,35	-4,8	-3,233	-1,65	-0,083	1,5	3,067
Abr	4,233	5,767	7,283	8,767	10,2	11,583	12,933	14,217
Mai	14,833	16,033	17,15	18,183	19,15	20,033	20,817	21,5
Jun	21,95	22,467	22,867	23,167	23,367	23,45	23,417	23,283
Jul	23,167	22,867	22,467	21,95	21,35	20,633	19,833	18,95
Ago	18,233	17,2	16,1	14,917	13,683	12,383	11,033	9,65
Set	8,583	7,117	5,617	4,1	2,567	1,017	-0,533	-2,1
Out	-2,883	-4,433	-5,967	-7,483	-8,967	-10,417	-11,833	-13,2
Nov	-14,183	-15,45	-16,633	-17,75	-18,3	-19,75	-20,6	-21,35
Dez	-21,683	-22,267	-22,75	-23,1	-23,333	-23,433	-23,417	-23,283

TABELA 2. Raio Vetor da Terra, expresso em relação ao semi-eixo maior da órbita da Terra (Tabelas de Smithsonian)

Dia Mês	1	5	9	13	17	21	25	29
Jan	0,98324	0,98324	0,98333	0,98352	0,98378	0,9841	0,98448	0,98493
Fev	0,98533	0,98593	0,98662	0,98738	0,98819	0,98903	0,98991	-
Mar	0,99084	0,99182	0,99287	0,99396	0,99508	0,99619	0,99731	0,99843
Abr	0,99928	1,00043	1,0016	1,00276	1,0039	1,005	1,00606	1,00708
Mai	1,00759	1,00859	1,00957	1,01051	1,01138	1,01218	1,01291	1,01358
Jun	1,01405	1,01465	1,01518	1,01564	1,01602	1,0163	1,01649	1,01662
Jul	1,01667	1,01671	1,01669	1,01659	1,01639	1,0161	1,01573	1,0153
Ago	1,01494	1,01442	1,01384	1,01318	1,01244	1,01163	1,01076	1,00986
Set	1,00917	1,00822	1,00723	1,00619	1,0051	1,00397	1,00283	1,0017
Out	1,00114	1,00001	0,99888	0,99774	0,99659	0,99544	0,99433	0,99326
Nov	0,99249	0,9915	0,99054	0,9896	0,98869	0,98784	0,98706	0,98636
Dez	0,98604	0,98546	0,98494	0,98446	0,98405	0,98372	0,98348	0,98334

TABELA 3. Duração teórica do dia expressa em horas para a região de Belém, PA ($1,47^\circ$ de latitude sul)

Dia Mês	1	5	9	13	17	21	25	29
Jan	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
Fev	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	-
Mar	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Abr	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	11,9	11,9
Mai	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Jun	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Jul	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Ago	11,9	11,9	11,9	11,9	12,0	12,0	12,0	12,0
Set	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Out	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Nov	12,0	12,0	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
Dez	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1

TABELA 4. Radiação diária teórica do sol na ausência de atmosfera, expressa em $\text{cal/cm}^2/\text{dia}$ para a região de Belém, PA.

Dia Mês	1	5	9	13	17	21	25	29
Jan	860,5	862,6	865,1	868,0	871,3	874,8	878,6	882,3
Fev	885,1	888,6	891,9	894,8	897,4	899,4	901,0	-
Mar	901,9	902,1	901,6	900,4	898,4	895,8	892,5	888,5
Abr	885,1	880,1	874,4	868,3	861,8	855,1	848,1	841,0
Mai	837,4	830,2	823,1	816,2	809,5	803,2	797,5	792,3
Jun	788,9	784,7	781,3	778,7	776,8	775,8	775,8	776,4
Jul	777,1	779,0	781,5	784,9	788,9	793,6	798,8	804,4
Ago	808,8	815,0	821,3	827,8	834,4	840,9	847,3	853,5
Set	857,8	863,4	868,6	873,3	877,5	881,1	884,2	886,6
Out	887,6	889,0	889,8	890,0	889,7	888,8	887,4	885,5
Nov	883,8	881,3	878,5	875,7	871,7	869,8	867,0	864,4
Dez	863,2	861,1	859,3	858,2	857,6	857,6	858,1	859,1

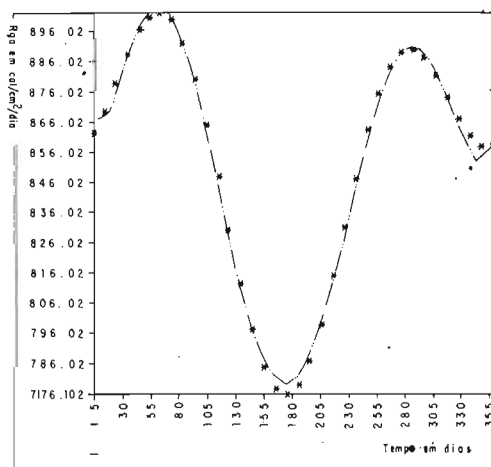


FIG. 1. Evolução da radiação diária teórica do sol na ausência de atmosfera. Resultado de análise da regressão de modelo polinomial para a região de Belém, PA.

TABELA 5. Extremos da radiação diária teórica do sol para Belém.

Extremos	Por volta do dia	Valor em $\text{cal/cm}^2/\text{dia}$
Primeiro máximo	5 de março	902,1
Segundo máximo	13 de outubro	890,0
Mínimo	25 de junho	775,7

R_{ga} = radiação diária teórica do sol na ausência de atmosfera, a e b são fatores locais a determinar.

E_r = insolação relativa

E = duração da insolação diária

H_n = duração teórica do dia

Para uma estação meteorológica bem equipada é possível medir experimentalmente os parâmetros R_g e E . Por outro lado, considerando a latitude da estação, pode-se determinar a radiação diária teórica e a duração teórica do dia pela apli-

cação das fórmulas 2) e 4) do parágrafo precedente.

Partindo então da correlação linear entre R_g/R_{ga} e E/H_n tem-se:

$$\frac{R_g/R_{ga}}{H_n} = a + b E$$

Isso permite, utilizando-se a análise de regressão linear, determinar para essa estação os dois parâmetros locais **a** e **b**, a partir dos dados disponíveis de radiação global e de insolação, relativas aos anos de 1969, 1970 e 1971 para a região de Belém. É evidente que, com aparelho de maior precisão, e um número maior de dados a reta de regressão será melhor definida.

Com os dados disponíveis, obtiveram-se os valores **a** e **b** seguintes:

$$a = 0,28, \quad b = 0,36$$

Dessa forma estabeleceu-se a fórmula que permitirá encontrar o valor da radiação global para a região de Belém quando são conhecidos os valores experimentais da duração da insolação diária E .

c) Descrição dos métodos estimativos da evapotranspiração potencial.

c.1) Método de Thornthwaite

Thornthwaite (1954) procurou relacionar a evapotranspiração potencial com a temperatura média do ar medida num abrigo apropriado, a fim de evitar a incidência direta do sol. O trabalho de Thornthwaite consistiu em fazer ajustamentos estatísticos das medidas experimentais da evapotranspiração, obtidas em lisímetros com os dados de temperatura, resultando na fórmula seguinte:

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \cdot F(\lambda)$$

ETP = evapotranspiração potencial decadária medida em milímetros de água no período considerado.

t = temperatura média do ar em °C
 I = índice térmico anual definido como

$$I = \sum_{j=1}^{12} a_{ij}, \quad \text{onde}$$

a_{ij} é um índice anual definido como

$$a_{ij} = \frac{(T_j)^{1.514}}{5}$$

T_j é a temperatura média no período considerado.

a = é calculado pela fórmula:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,49$$

$F(\lambda)$ termo corretivo, função da latitude e do tempo.

Vê-se então que a fórmula de Thornthwaite utiliza como único parâmetro climático a temperatura média do ar, o que implica numa suavização das flutuações reais da ETP.

Convém também ressaltar que, para uma dada temperatura média do ar, o poder evaporante do ar depende, entre outros parâmetros, de seu grau higrométrico e da velocidade média do vento, parâmetros físicos que não intervêm nesta fórmula (Pedelaborde 1967; Estianne & Godard 1970; Pegny 1970; Arlery & Guilmet 1973).

c.2) Método de Turc

Turc (1961) estabeleceu empiricamente uma série de fórmulas permitindo obter o déficit de escoamento de uma bacia hidrográfica a partir do conhecimento de dados climáticos. No entanto, são impostas uma série de restrições e limitações para o uso dessas fórmulas. Uma das últimas fórmulas publicadas pelo autor apresenta um campo de aplicação mais geral. Para sua utilização, o meio deve ser irrigado e a umidade relativa do ar superior a 50%.

A fórmula de Turc tem a seguinte expressão:

$$ETP = 0,013 J \frac{t}{t+15} (R_g + 50)$$

ETp = evapotranspiração potencial no período considerado.

J = número de dias do período
(J > 7)

t = temperatura do ar do período em graus centígrados.

R_g = radiação global média do sol em cal/cm²/dia.

Turc introduz, portanto, um novo parâmetro R_g, o que permitirá melhorar a resolução de cálculo da ETP, pois sua fórmula leva em conta a energia radiante do sol.

c.3) Método de Penman

O método de Penman (1948 e 1953) é baseado na evolução do balanço de energia ao nível da superfície evaporante. Os resultados encontrados por diversos autores que aplicam o método em diferentes e inúmeras regiões da Terra são em geral bem próximos da ETP medida com equipamento de campo. Sua utilização necessita do conhecimento não somente da temperatura média do ar, mas também dos seguintes parâmetros: umidade relativa do ar, velocidade média do vento, duração de insolação, albedo da superfície evaporante e radiação global do sol.

A fórmula proposta por Penman tem a seguinte expressão:

$$ETP = \frac{\Delta}{L(\gamma + \Delta)} R_n + \frac{\gamma}{\gamma + \Delta} E_{ad}$$

ETP = evapotranspiração potencial diária em milímetros de água.

L = calor latente de evaporação da água, igual a 59 cal/cm².

Δ = inclinação da curva de tensão de vapor saturante à temperatura t e expressa em milibar/°C.

R_n = radiação solar definida pela fórmula de Brunt (1939) e que representa a radiação solar absorvida pelo solo e pelas plantas e igual a R_c-R_b, onde:

R_c = R_{ga} (a + b E/H_n) (1 - Alb).

R_b = σT⁴ (0,40 - 0,05 √E_d) (0,50 + 0,50 E/H_n).

R_c = radiação solar recebida pela Terra.

R_b = radiação solar difusa.

Alb = albedo da superfície evaporante.

σ = constante de Stephan - Boltzmann

T = temperatura absoluta (K)

E_{ad} = poder evaporante do ar e igual a 0,26 (1 + 0,54 V_t) (E_a - E_d).

E_a = tensão máxima de vapor da água à temperatura t em milibar.

E_d = tensão de vapor da água medida fora de abrigo em milibar.

V_t = velocidade média do vento expressa em cm/seg e medida a dois metros do solo.

Convém fazer algumas observações sobre a utilização da fórmula de Penman.

Considera-se o valor da ETP calculado por essa fórmula idêntico ao obtido pela medida da ETP de uma superfície de água cujo albedo é representado pelo valor correspondente ao da cobertura vegetal da região considerada.

A constante psicrométrica, embora dependa de vários parâmetros físicos, pode ser colocada como função única da pressão atmosférica:

Com efeito, sendo seu valor dado pela expressão $\gamma = \frac{C}{KL} p$ expressa em milibar/°C, onde:

C = calor específico do ar seco à pressão constante, podendo ser considerado constante e igual a 0,239 cal/g/°C.

K = relação entre as massas moleculares do vapor da água e do ar e igual a 0.622.

L = calor latente de evaporação do ar. (59 cal/cm)

P = pressão atmosférica.

Considerando esses valores, a constante psicrométrica pode ser, portanto, colocada como função única da pressão atmosférica:

$$Y = 6,51 \cdot 10^{-4} P \text{ expressa em milibar/}^{\circ}\text{C e } P \text{ em milibar.}$$

Sabendo-se que a pressão atmosférica média da região é de 1.009 milibar, a constante psicrométrica será finalmente:

$$= 0,66 \text{ mbar/}^{\circ}\text{C}$$

c.4) Método de Bouchet

Bouchet (1963) propôs para o cálculo da ETP uma expressão muito simples, considerando o balanço energético de uma superfície evaporante colocada num abrigo apropriado.

A formulação de Bouchet considera a evaporação em um evaporômetro de Piché, a temperatura média do ar e a temperatura de orvalho medida num abrigo especial.

Por outro lado, convém observar que a evaporação medida num evaporômetro de Piché considera, além da temperatura média do ar, a ventilação e o déficit de saturação do ar.

A fórmula de Bouchet tem a seguinte expressão:

$$ETP = B \cdot E_p \cdot \lambda(\theta)$$

O parâmetro B é igual a 0,37, no caso em que o evaporômetro de Piché seja colocado num abrigo a dois metros do solo.

E_p = evaporação no evaporômetro de Piché.

$\lambda(\theta)$ = coeficiente dependente da temperatura que pode ser estimado com a média entre a temperatura média do ar e a temperatura de orvalho.

A temperatura de orvalho de região úmida, como é o caso de Belém, varia muito pouco durante o dia. Ela é bastante próxima da temperatura mínima.

Deste modo, pode-se considerar para essa região a temperatura de orvalho como sendo a temperatura mínima.

Apesar da simplicidade da fórmula de Bouchet, ela deve ser utilizada com muita precaução. O evaporômetro de Piché é efetivamente prático e robusto, no entanto ele é muito sensível ao meio físico circundante (aeração do abrigo, radiação refletida pelo solo, etc.).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tratamento dos dados e resultados.

a.1) Métodos de Thornthwaite

Foi desenvolvido um programa em linguagem BASIC permitindo calcular a ETP decadal, isto é, com uma amostragem de dez dias. O programa calcula inicialmente a evolução da ETP para cada ano individualmente e em seguida realiza os cálculos para um ano estatístico médio (ano normal).

A normal climática referida acima é expressa pela média aritmética de diversos anos. O número de anos deve ser bastante elevado. O desejável é dispor-se de algumas dezenas de anos, trinta, por exemplo, a fim de que novos valores não tenham influência sensível na normal e também para que após diversas flutuações ela termine por se estabilizar. Neste trabalho utilizaram-se dados climáticos de doze anos (de janeiro de 1967 a 31 de dezembro de 1978), tomados na estação meteorológica do ex-IPEAN (Instituto de Pesquisa Agropecuária do Norte), atualmente CPATU (Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido).

Para conveniência do trabalho, são apresentados apenas os resultados relativos ao "ano normal", pois além de ser muito extensa a série de tabelas e gráficos cor-

respondentes a cada ano individualmente, o interesse maior deve residir no cálculo para as normais.

Os resultados obtidos utilizando o método de Thornthwaite são apresentados na Fig. 2.

A sensível elevação da curva na segunda metade do ano é devida ao aumento da temperatura, único parâmetro climático envolvido na fórmula de Thornthwaite.

Por outro lado, o baixo valor da amplitude da ETP assim calculado é devido à baixa variação da temperatura média do ar da região ($1,3^{\circ}\text{C}$).

a.2) Método de Turc

Como no caso do método de Thornthwaite, foi desenvolvido um programa para permitir o cálculo automático da ETP pelo método de Turc.

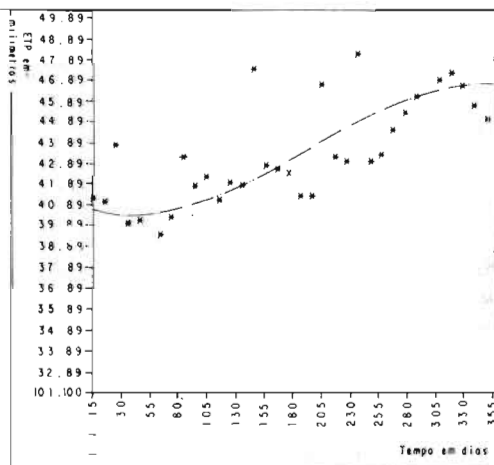


FIG. 2. Evolução da ETP normal obtida pela aplicação da fórmula de Thornthwaite. Curva média ajustada utilizando a análise de regressão polinomial. Belém-Pará.

A Fig. 3 que, representa a evolução decadária da ETP, ajustando uma expressão polinomial aos valores da ETP obtidos, sintetiza o resultado encontrado por esse método.

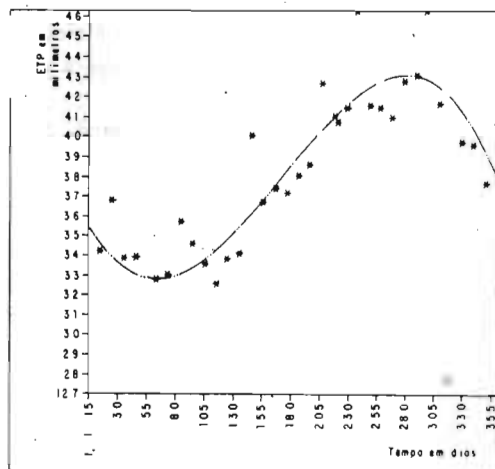


FIG. 3. Evolução da ETP normal obtida pela aplicação da fórmula de Turc. Curva média ajustada utilizando a análise de regressão de modelo polinomial. Belém-Pará.

a.3) Método de Penman

Da mesma forma que para os métodos precedentes, foi desenvolvido um programa para o cálculo da ETP pelo método de Penman.

Na aplicação deste programa para os dados da região de Belém, consideraram-se dois conjuntos de cálculos, o primeiro usando o valor do albedo igual a 0,20, tendo em vista as características geológicas e de vegetação da zona onde se encontra a estação climática, e o segundo igual a 0,05 correspondente à água livre. O interesse nesses cálculos reside tanto na comparação desses resultados como àqueles obtidos pelos outros métodos de cálculo da ETP.

Os resultados são mostrados nas Figs. 4 e 5.

a.4) Método de Bouchet

Os resultados da aplicação do programa de cálculo da ETP pelo método de Bouchet são apresentados na Fig. 6.

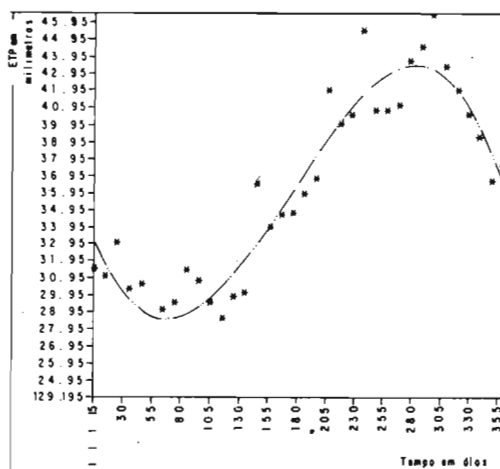


FIG. 4. Evolução da ETP normal obtida pela aplicação da fórmula de Penman utilizando o albedo igual a 0,20 (p/vegetação). Curva média ajustada pela análise de regressão polinomial, Belém-Pará.

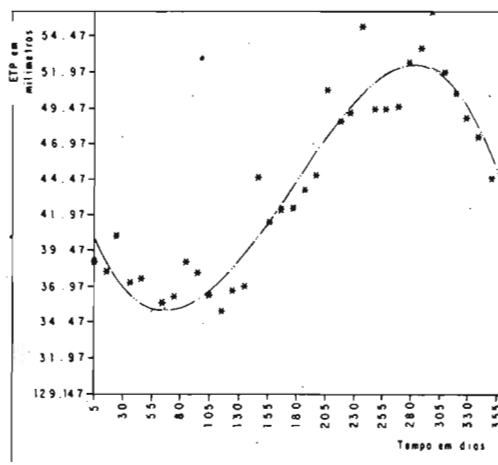


FIG. 5. Evolução da ETP normal obtida pela aplicação da fórmula de Penman utilizando o albedo igual a 0,05 (p/água livre). Curva média ajustada pela análise de regressão polinomial, Belém-Pará.

b) comparação dos métodos de avaliação da ETP para a região de Belém.

As representações gráficas obtidas pela utilização dos diversos métodos de cálculo da ETP foram colocadas num único gráfico a fim de permitir a comparação entre essas curvas (Fig. 7).

Nesse mesmo gráfico apresentou-se também a evaporação medida num tanque

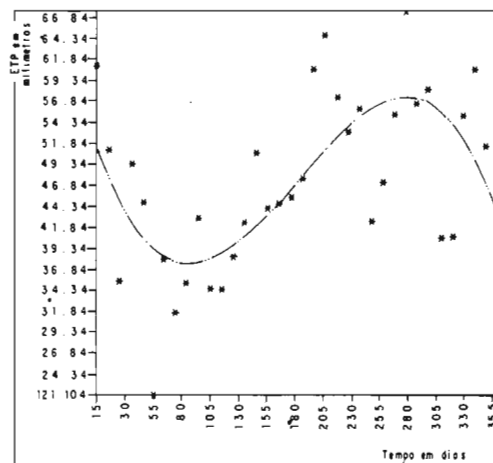


FIG. 6. Evolução da ETP normal obtida pela aplicação da fórmula de Bouchet. Curva média ajustada utilizando a análise de regressão de modelo polinomial, Belém-Pará

"classe A", assim como a ETP calculada com albedo igual a 0,05 (correspondente à água livre) e a curva pluviométrica.

Constatou-se inicialmente que as curvas apresentam uma oscilação completa sazonal no período de um ano, sendo que no período correspondente aos cinco primeiros meses do ano, que representa a estação mais chuvosa da região, as curvas de ETP encontram-se no seu trecho de menores valores, e no período seguinte (menos chuvoso) no trecho de valores mais elevados, correspondente, portanto, à crista da curva.

Verificou-se também, que neste primeiro período os valores pluviométricos são bem mais elevados que os valores de ETP, e depois que a curva pluviométrica atinge seu máximo por volta do mês de março, tende a cair continuamente, atingindo valores comparáveis aos da ETP por volta do mês de julho, até o momento em que os valores de ETP tornam-se superiores aos das chuvas. Podendo dizer que, em certos anos de baixa pluviosidade (como foi o caso do ano de 1983), ocorre um período bem definido na segunda metade do ano (entre setembro e novembro podendo algumas vezes se prolongar até o começo de dezembro)

no qual a ETP é superior às chuvas, com esgotamento da reserva hídrica do solo, acarretando um balanço hídrico do solo deficitário, e em consequência com necessidade de irrigação das áreas cultivadas.

O gráfico mostra também que as curvas da ETP evoluem inversamente com relação ao comportamento das chuvas, o que aliás é previsível.

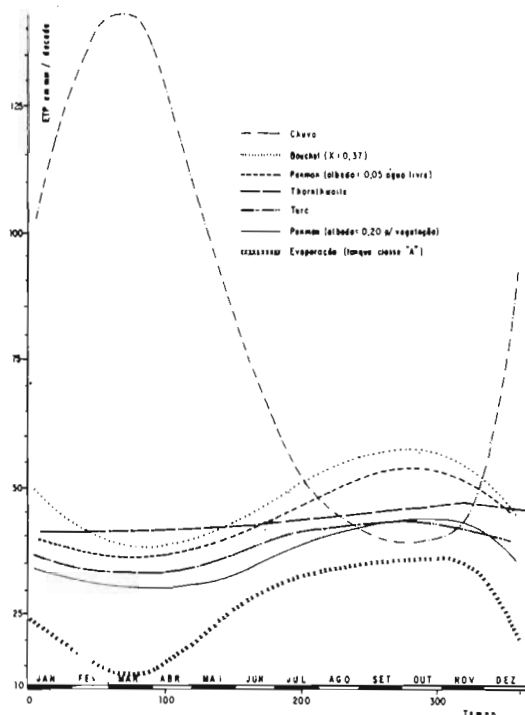


FIG. 7 Comparação das curvas de evapotranspiração potencial obtidas pelos diferentes métodos — Região de Belém.

Por outro lado, pode-se observar que a curva de Thornthwaite é aproximadamente linear, apresentando uma leve subida com máximo em novembro. Isso é devido ao fato de, na fórmula de Thornthwaite, o único parâmetro climático ser a temperatura média do ar, que varia durante o ano, conforme já foi mencionado.

Quanto às curvas de Penman (albedo = 0,20) e Turc, evoluem de modo comparável com uma diferença de 3 a 4 milímetros, até o final do mês de junho, depois do qual a diferença se torna ainda menor.

CONCLUSÕES

Da comparação dos diversos métodos de cálculo da ETP (Thornthwaite, Turc, Penman e Bouchet), foi constatado que o método de Thornthwaite superestima os valores da ETP em relação aos demais métodos. Além disso tem um comportamento quase linear, com uma pequena deflexão por volta do mês de novembro, devido ao método depender unicamente da temperatura e até certo ponto, devido ao fato de ter sido originalmente derivado para períodos mensais.

A dispersão apresentada pelo emprego do método de Bouchet comprometeu a qualidade dos resultados o que deve ter sido em função do coeficiente utilizado. O emprego e o método na região precisam ser cuidadosamente estudados.

Quanto aos métodos de Penman e Turc, conforme foi visto, foram concebidos de forma bastante diferente, apresentando formulações matemáticas diferentes, sendo seu único ponto comum a utilização da radiação global do sol (R_g). Apesar disso, seus resultados foram semelhantes.

Na ausência de informações de dados medidos para a região, considerando-se, portanto, como referência o método de Penman para estimativa da ETP por integrar o máximo de fatores climáticos, constatou-se que, para a região de Belém, a aplicação do método de Turc de formulação e uso mais simples fornece boa aproximação do método de Penman, calculado com o valor de albedo atribuído à vegetação (0,20).

Quanto aos valores encontrados pelos diferentes métodos, observou-se que a região apresenta uma distribuição bastante elevada da ETP durante todo o ano, o que é de se esperar, considerando sua posição geográfica na faixa equatorial da Terra e a presença da exuberante floresta amazônica.

Espera-se que, com a continuidade deste trabalho, onde deverão ser considerados dados climáticos referentes aos anos

seguintes a 1978, bem como dados medidos de ETP provenientes de aparelhos de maior precisão, obtenham-se resultados mais precisos e definitivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANUÁRIO AGROMETEOROLÓGICO DO IPEAN 1967-1968.
- ARLEY, R. & GUILMET, B. *Climatologie, methodes et pratiques*. Paris, Guthier Villars, 1973.
- BLACK, J.; BONNYTHON, C.; PRESCOTT, J. Solar rad. and duration of sunshine. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, p. 231-5, 1954.
- BOUCHET, R. J. Evapotranspiration réelle evapotranspiration potentielle et production agricole. *Ann. Agron.*, 14(5):743-824, 1963.
- BRUNT, D. *Physical and dynamical meteorology*. Cambridge, University of Cambridge, 1939.
- CHOISNEL, E. Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol. *La météorologie* Evapotranspiration VI Serie, n. 11. p.103, 159, dez. 1977. Número special.
- ESTIENNE, P. & GODARD, A. *Climatologie*. Paris, Armand Colin, 1970. 267p.
- MALTEZ, H.T. Evaluation des ressources en eaux en vue de l'aménagement de la région de Belém (Brésil) — Hydroclimatologie. These de doctorat d'Etat. Université Paul Sabatier de Toulouse. França, 1980.
- MALTEZ, M.G.L. Evaluation des ressources en eaux en vue de l'aménagement de la région de Belém (Brésil) — Informatique. These de doctorat d'Etat. Université Paul Sabatier de Toulouse. França, 1980.
- PEDELABORDE, P. Chronique météorologique. *Ann. de Géorg.* (413/414):79-92, 1967.
- PEGUY CH., P. *Précis de Climatologie*. Paris, Masson, 1970. 468p.
- PENMAN, H.L. Evaporation. An introductory survey. *Netherlands J. of. Agric. Sci.* (4):9-29, 1956.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc.*, London, 193: 120-45, 1948.
- PENMAN, H.L. *The physical base of irrigation control*. s.l., s.ed., 1953. p.913-14, Trabalho apresentado no 13th interr. Hort. Congress, 1953.
- THORNTHWAITE, C.W. MATHER, J.D. *The measurements of potential evapotranspiration*. New Jersey, Seabrook, 1954. 225p.
- TURC, L. Evaluation des besoin en eau d'irrigation, evapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.* 12(1):13-49, 1961.