

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA SEGUNDO PENMAN COM INSTRUMENTOS SIMPLES DE BAIXO CUSTO PARA AGRICULTORES IRRIGANTES¹

FERNANDO SILVEIRA DA MOTA²

RESUMO - Estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman foram obtidas a partir das observações de termômetros seco e úmido, anemômetro e heliógrafo. Estas estimativas foram comparadas com outras, também calculadas pelo método de Penman, porém a partir de observações de termômetros de máxima e de mínima, tanque classe A e evaporímetro de Piche. Nestas, a radiação solar global foi estimada à partir de uma equação de regressão linear simples entre a radiação solar global medida com piranômetro e a evaporação do tanque classe A, com coeficiente de determinação (R^2) = 0,66. O R^2 entre os dois tipos de estimativas foi de 0,93. As estimativas de ET_o a partir do tanque classe A foram menos correlacionadas com as de Penman obtidas com as observações tradicionais com R^2 = 0,73. A metodologia proposta requer instrumentos com custo bem menor do que os usados na metodologia tradicional e seu manejo é suficientemente simples, de modo a poderem ser usados por agricultores.

Termos para indexação: termômetro, anemômetro, heliógrafo, tanque classe A, evaporímetro de Piche, radiação solar.

PENMAN'S REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATES WITH SIMPLE LOW COST INSTRUMENTS FOR FARMERS

ABSTRACT - The estimates of Penman's reference evapotranspiration (ET_o) obtained from observations of wet and dry bulb thermometers, sunshine recorder and anemometer were compared to Penman's estimates obtained from values of class A pan and Piche evaporimeters and maximum and minimum air thermometers. In the later, global solar radiation was obtained from a simple linear regression between global solar radiation measured with a piranometer and class A pan evaporation, with a R^2 = 0,66. The R^2 between the two estimates was 0,93. ET_o estimates from class A evaporation were less correlated with Penman's estimates using the traditional instruments with a R^2 = 0,73. The proposed methodology requires much cheaper instruments than the traditionally ones used for this purpose and are very simple to be managed by farmers.

Index terms: thermometer, anemometer, sunshine recorder, class A pan, Piche evaporimeter, solar radiation.

INTRODUÇÃO

É objetivo deste trabalho obter estimativas para períodos curtos de tempo, da evapotranspiração de referência (ET_o) de Penman, a partir de dados meteorológicos obtidos com instrumentos de baixo custo e de manejo simples que possam ser economicamente usados por agricultores irrigantes.

Estimativas da evapotranspiração de referência em Pelotas, Rio Grande do Sul, com a fórmula de Penman (1948) e com o tanque "A" foram satisfatórias (Mota & Beirsdorf 1976, Beirsdorf & Mota 1976). Entretanto, ambas requerem o uso do anemômetro e do psicrômetro (Doorembos & Pruitt 1976) e a fórmula de Penman requer, ainda o uso do

heliógrafo (Mota & Beirsdorf 1976), e estes três instrumentos são de uso complexo e o heliógrafo e o anemômetro são dispendiosos.

Na fórmula de Penman, em Pelotas, é viável substituir o uso do psicrômetro e do anemômetro pelo evaporímetro de Piche (Mota & Beirsdorf 1976) que é de uso simples e de baixo custo. Também em várias outras regiões do Brasil e de outros países tem sido viável estimar o termo aerodinâmico (E_a) da equação de Penman com medidas do evaporímetro de Piche (Stanhill 1962a, Ometto 1981).

A radiação solar é o principal elemento meteorológico que afeta a evaporação do tanque classe A (Ravello 1971). Mukammal & Bruce (1960) mostraram a importância relativa de três elementos meteorológicos que afetam a evaporação do tanque classe A. A importância relativa da radiação solar, umidade e vento foi na razão 80:6:14.

A radiação líquida tem sido largamente estimada a partir da radiação solar (Shaw 1956, Ometto 1968, Mota 1976). Os mesmos autores consideram que as

¹ Aceito para publicação em 4 de abril de 1988. Trabalho realizado dentro do convênio UFPEL/ EMBRAPA (CPATB) com auxílio do CNPq.

² Eng. - Agr., M.Sc., Dr. Pesquisador CNPq. Prof. Titular, Caixa Postal 49, CEP 96100 Pelotas, RS.

estimativas empíricas têm dado os melhores resultados, e estas estimativas são mais precisas quando levam em conta a transmissividade atmosférica (R_S/R_o) de acordo com Mota (1976), para condições brasileiras. Também as estimativas da radiação líquida, usando a fórmula de Brunt (1932) ajustada por Penman (1948) e a de Linacre (1967) têm apresentado boa concordância com as medidas de radiação líquida no Brasil (Funari et al. 1985, Sobrinho & Sedyama 1983).

As relações empíricas para estimar a radiação líquida para uma determinada região e tipo de superfície são importantes (Davies & Idso 1979), e a relação mais comumente usada é entre a radiação líquida e a radiação solar global, geralmente com R^2 da ordem de 0,90. A inclusão de outros parâmetros para estimar a radiação líquida não tem tido sucesso, segundo os mesmos autores.

Um entendimento completo dos parâmetros da regressão da relação linear entre a radiação líquida e a radiação solar global e suas variações com o tipo de superfície, tempo e lugar envolve todos os fatores que controlam o balanço da radiação, exceto os que controlam a radiação solar global. Simplificações devem ser feitas se quisermos usar uma equação de regressão como alternativa praticável. Estas simplificações podem resultar em perda de precisão para estimar a radiação líquida. Sendo improvável que a maioria das medidas do fluxo tenham uma precisão melhor do que 10% (Davies & Idso 1979), não devemos esperar que as estimativas empíricas sejam melhores. Para uma única superfície ou grupo de superfícies similares, uma única equação pode ser adequada. Denmead (1976), revisando as relações de regressão determinadas na Austrália, Europa e Estados Unidos para cereais de inverno, notou que as várias fórmulas forneciam estimativas da radiação líquida que diferiam entre si no máximo 20%, o que julgou uma precisão suficiente para estimar a evapotranspiração diária.

Segundo Denmead (1976) e Uchijima (1976), a radiação líquida de culturas anuais varia de 50% a 70% da radiação solar global, dependendo do estágio de desenvolvimento das mesmas.

Evidências claras da variação estacional do albedo são dadas por Fristschen (1964), cujas medidas mostram um aumento de aproximadamente 50% entre os estágios iniciais e o desenvolvimento máximo da cultura.

Numerosas determinações experimentais do albedo de várias culturas têm sido realizadas nas duas últimas décadas, em vários países, e, na última década,

no Brasil. Por exemplo, para culturas de grãos, os valores estão entre 0,13 e 0,26 no estágio reprodutivo, no qual as plantas cobrem totalmente o solo. Antes de atingir esta cobertura, ou mais tarde, quando as folhas secam, o albedo do solo contribui para o albedo geral da cultura e pode aumentar ou diminuir, dependendo do tipo de solo. Os solos negros têm um albedo menor do que os vermelhos e cinzentos, de maneira geral; e nos solos secos, o albedo é maior. Existe, também, uma relação inversa entre o albedo e a altura das plantas.

O albedo de culturas irrigadas (Fristchen 1967) no Arizona, na latitude de 33°N, foi de 0,21 para o sorgo e trigo, 0,22 para algodão, 0,23 para aveia e cevada, 0,24 para alfafa, com média de 0,23. Nkendirim (1973) indica valores médios de 0,21 para batata-inglesa, 0,26 para alface e 0,22 para tomate. Na Tabela 1, medidas de albedo efetuadas no Brasil indicam valores de 0,14 para milho e 0,22 - 0,25 para soja em Jaboticabal, 0,13 - 0,21 para milho em Planaltina (clima tropical), 0,15 para feijão, 0,26 para soja em Taquari e 0,18 - 0,23 para o sorgo em Pelotas (clima subtropical). Na Tabela 2, temos o albedo medido em gramado em diferentes latitudes, variando de 0,17 a 0,20 em latitudes de 15 a 21 graus e de 0,20 a 0,28 em latitudes de 41 a 52 graus. O valor do albedo para culturas anuais, usado no Brasil, é, geralmente, de 0,20 ou 0,25 nas fórmulas semi-empíricas para estimar a radiação líquida, indistintamente para regiões tropicais ou temperadas (Funari et al. 1983, Amorim Neto et al. 1985). Há necessidade, portanto, de usar valores regionalizados do albedo no Brasil, dada a sua grande dimensão latitudinal e, também, de acordo com o estágio de desenvolvimento das culturas (estágio vegetativo ou reprodutivo).

MATERIAL E MÉTODOS

A finalidade deste artigo foi desenvolver um método confiável para estimar a evapotranspiração de referência usando a fórmula de Penman a partir de dados de termômetros de máxima e mínima do ar, tanque "A" e evaporímetro de Piche. A determinação da temperatura máxima e da evaporação requerem apenas uma observação diária.

A fórmula de Penman pode ser escrita:

$$E_{To} = \frac{\frac{D}{Y} \cdot \frac{R_1}{59} + E_a}{\frac{D}{Y} + 1}$$

onde:

D (tangente à curva de saturação do vapor d'água em mmHg. °C⁻¹) é obtido, segundo Gomes (1983), a partir da temperatura média, pela fórmula:

$$D = es \left(\frac{6886}{T_a^2} - \frac{5,31}{T_a^2} \right), \text{ onde:}$$

T_a^2 = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{K}$) e,

$$es = \left(6,11 \times 10^{\frac{A \cdot t}{B + t}} \right) 0,75 \text{ (mmHg), onde:}$$

$A = 7,5$; $B = 237,5$ e t = temperatura média ($^{\circ}\text{C}$)

Y = constante psicrométrica em mmHg. $^{\circ}\text{C}^{-1}$ para a temperatura média.

R_1 = radiação líquida (Wm^{-2})

E_a = termo aerodinâmico (mm).

R_1 , segundo Mota (1976) pode ser obtida, de forma simples pela fórmula:

$$R_1 = 0,78 RS - 386,66 (RS/R_o) + 77,45, \text{ onde:} \quad (1)$$

R_o = radiação solar extraterrestre (Wm^{-2}) (Tabela 3).

RS = radiação solar global na superfície (Wm^{-2})

E_a (termo aerodinâmico), segundo Mota & Beirsdorf (1976), pode ser obtido a partir de dados do evaporímetro de Piche (P_i), pela fórmula:

$$E_a = 0,29 P_i - 0,43 \text{ (para períodos de cinco dias)} \quad (2)$$

Para estimar RS (radiação solar global), determinou-se uma equação de regressão linear simples para obter RS a partir de dados do tanque "A", para períodos de cinco dias, de outubro de 1985 a março de 1986, na estação agroclimatológica localizada no Campus da UFPel, latitude de $31^{\circ}52'00''\text{S}$, longitude $52^{\circ}21'24''\text{W}$. Grw. e altitude de 13,24 m, em Pelotas, Rio Grande do Sul.

Os valores observados de RS foram obtidos com um piranômetro LI-COR ligado a um integrador. Os valores observados do tanque classe A não foram corrigidos para umidade relativa e velocidade do vento, pois não se desejava usar dados de anemômetro, que é um instrumento caro, e de psicrômetro, que é de manejo relativamente difícil.

As estimativas da evapotranspiração de referência obtidas com o método proposto foram comparadas com as obtidas

TABELA 1. Medidas do albedo em culturas anuais no Brasil.

Local	Cultura	Albedo	Autor
Taquari - RS	Feijão*	0,15	Westphalem & Thomé 1987.
Taquari - RS	Soja*	0,26	Fontana et al. 1987.
Jaboticabal - SP	Milho*	0,14	André et. al. 1983.
Jaboticabal - SP	Soja**	0,22	André & Viswanadham 1983.
	Soja*	0,25	
Planaltina - DF	Milho**	0,13	Luchiani Júnior 1985.
	Milho*	0,21	
Pelotas - RS	Sorgo**	0,18	Assis et al. 1987
	Sorgo*	0,23	

* Estágio reprodutivo.

** Estágio vegetativo.

TABELA 2. Medidas do albedo em gramado.

Local	Latitude	Albedo	Referência
Holanda	52	0,20	Scholte-Ubing 1961, citado por Chang 1971.
Inglaterra	52	0,26	Monteith & Szeicz 1961, citado por Chang 1971.
Nebraska, U.S.A.	41	0,28	Monteith & Szeicz 1961, citado por Chang 1971.
Hawaii	20	0,17	Ekern 1965, citado por Chang 1971.
Viçosa - MG	21	0,20	Sobrinho & Sedyama 1983.
West Africa	15	0,20	Davies 1967, citado por Chang 1971.
Média latitudes tropicais		0,19	
Média latitudes temperadas		0,25	

TABELA 3. Radiação solar global diária em uma superfície horizontal no topo da atmosfera (Wm^{-2}). Ro.

Latitude	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
6°N	826	875	913	916	892	871	876	898	907	882	836	806
4°N	846	890	919	911	878	855	861	889	907	913	855	829
2°N	866	903	922	904	864	836	844	878	906	902	872	850
0°	886	914	924	898	848	817	828	868	904	910	889	871
2°S	903	926	925	888	832	798	809	856	901	917	905	891
4°S	920	936	925	877	815	777	791	842	897	924	920	909
6°S	936	944	924	866	797	757	771	829	892	929	933	928
8°S	952	953	922	855	778	735	750	813	886	932	945	945
10°S	965	959	919	841	759	712	729	798	878	935	958	961
12°S	978	964	913	828	738	690	707	780	869	936	968	976
14°S	990	969	908	812	716	666	684	763	860	937	977	991
16°S	1001	972	902	797	695	641	662	744	849	936	986	1003
18°S	1011	974	894	779	672	618	637	725	838	934	993	1015
20°S	1020	975	886	762	648	591	613	705	825	932	1000	1027
22°S	1028	975	875	743	625	565	588	684	811	928	1005	1037
24°S	1034	974	864	724	600	538	562	662	797	923	1008	1046
26°S	1040	971	853	703	575	511	536	640	781	916	1012	1054
28°S	1044	968	839	682	549	483	509	616	765	909	1014	1061
30°S	1048	964	825	660	523	456	482	593	747	901	1015	1067
32°S	1050	958	810	637	496	429	456	569	729	891	1015	1072
34°S	1053	952	794	614	469	400	428	543	709	880	1014	1076

pelo método de Penman, utilizando medidas efetuadas com psicrômetro, heliógrafo e anemômetro a 2 m de altura, para períodos de cinco dias, utilizando uma série de dados independentes, não utilizados no estabelecimento das regressões, de outubro de 1984 a março de 1985. Outra comparação foi feita para valores diários no período de outubro de 1986 a março de 1987.

Um programa em BASIC, para o microcomputador pessoal Apple II Plus foi desenvolvido para o cálculo de ETo pelo método proposto, como apresentado no anexo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa de RS

Na Tabela 4 estão as médias diárias de períodos de cinco dias da radiação solar global medida no piranômetro, e da evaporação do tanque "A".

O coeficiente de determinação (R^2) entre as duas séries de valores foi igual a 0,66, e a equação de regressão para estimar RS a partir de valores obtidos no tanque "A" é:

$$RS = 125,10 + 34,30 "A" \quad (3)$$

Na Fig. 1 encontra-se o diagrama de dispersão e a reta de regressão.

RL pode ser obtido no nomograma da Fig. 2 a partir do RS, e RS pode ser obtido na Tabela 5, a partir de dados do tanque A. O valor de Ea pode ser obtido na Tabela 6 a partir de dados do evaporímetro Piche. O valor D/Y pode ser obtido na Tabela 7 a partir da temperatura média.

A temperatura média é obtida somando-se as temperaturas máxima e mínima e dividindo-se o resultado por 2.

Estimativa de Eto

Na Tabela 8 são dados os valores de Eto obtidos pelo método tradicional, usando a fórmula de Penman com dados de heliógrafo, termômetro seco e úmido e anemômetro a 2 m, e os valores de Eto obtidos usando dados do tanque "A", do evaporímetro Piche e dos termômetros de máxima e mínima. O coeficiente de determinação (R^2) entre ambas as séries de valores é 0,93, e a equação de regressão para estimar os valores de ETo (Penman tradicional) a partir dos valores de ETo (Penman proposto) é:

$$\begin{aligned} ETo (\text{Penman tradicional}) &= -0,28 + 1,87 \\ ETo (\text{Penman proposto}) & \end{aligned} \quad (4)$$

Na Fig. 3 encontra-se o diagrama de dispersão e a reta de regressão. Na Tabela 9 pode-se obter o valor final de ETo.

Evidentemente, as regressões obtidas (fórmulas 1, 2, 3 e 4) são válidas somente para as condições regionais e devem ser determinadas para cada região particular. No Brasil existem dados suficientes para estabelecer as relações das fórmulas 1 a 4. Há necessidade de medidas ou estimativas regionais da radiação líquida para estabelecer as relações da fórmula 1. Segundo Rosemberg et al. (1983), a razão R_n/R_s é geralmente alta em climas tropicais porque a refletividade da vegetação é baixa e as

temperaturas da superfície são moderadas. Isto concorda com as primeiras razões calculadas no Brasil, segundo a Tabela 10. Enquanto não existirem estas relações regionais, podemos usar o valor médio da razão radiação líquida/radiação global conforme dados da Tabela 10, isto é, multiplicar a radiação global (RS) por 0,60 em climas subtropicais, e por 0,82 em climas tropicais. Pode-se assumir, para culturas irrigadas, que o total da radiação líquida é usada na evapotranspiração.

Nas estimativas regionais da radiação líquida, as fórmulas de Brunt (1932), Penman (1948) e Linacre

(1967), já referidas, deveriam ser usadas com valores de albedo conforme a latitude e o estágio de desenvolvimento das culturas, segundo a literatura disponível (Tabela 1).

A partir dos dados e evidências da literatura, julgou-se que era possível estabelecer um modelo simples preliminar para o albedo das culturas anuais. Partiu-se das seguintes premissas:

1. O albedo varia durante o ciclo das culturas, atingindo o valor máximo na época de máximo índice de área foliar, o que ocorre geralmente durante o período reprodutivo.

TABELA 4. Valores observados e estimados da radiação solar global média de períodos de cinco dias e da evaporação do tanque classe A, outubro 1985 a março de 1986. Estação Agroclimatológica, UFPEL, Pelotas.

Período	Radiação solar Global (Wm^{-2})		Evaporação Tanque A sem correções (mm)
	Observados	Estimados	
1.10.85 - 5.10.85	290	307	5,3
6.10.85 - 10.10.85	298	262	4,0
11.10.85 - 15.10.85	275	307	5,3
16.10.85 - 20.10.85	192	221	2,8
21.10.85 - 25.10.85	365	307	5,3
26.10.85 - 30.10.85	322	321	5,7
31.10.85 - 4.11.85	305	297	5,0
5.11.85 - 9.11.85	402	406	8,2
10.11.85 - 14.11.85	319	362	6,9
15.11.85 - 19.11.85	283	365	7,0
20.11.85 - 24.11.85	243	235	3,2
25.11.29 - 29.11.85	425	393	7,8
30.11.85 - 4.12.85	448	389	7,7
5.12.85 - 9.12.85	386	372	7,2
10.12.85 - 14.12.85	348	321	5,7
15, 19, 20, 21 e 24.12.85	401	400	8,0
25.12.85 - 29.12.85	327	331	6,0
30.12.85 - 3.01.86	260	341	6,3
4.01.86 - 8.01.86	475	478	10,3
9.01.86 - 13.01.86	372	400	8,0
14.01.86 - 19.01.86	326	331	6,0
20.01.86 - 24.01.86	507	413	8,4
25.01.86 - 29.01.86	397	396	7,9
30.01.86 - 3.02.86	298	310	5,4
4, 5, 6, 7 e 11.02.86	320	379	7,4
12.02.86 - 16.02.86	351	386	7,6
17.02.86 - 21.02.86	437	365	7,0
22.02.86 - 26.02.86	307	300	5,1
27.02.86 - 3.03.86	269	303	5,2
4.03.86 - 8.03.86	354	297	5,0
9.03.86 - 13.03.86	271	303	5,2
14.03.86 - 18.03.86	234	286	4,7
19.03.86 - 23.03.86	326	273	4,3
24.03.86 - 28.03.86	262	238	3,3

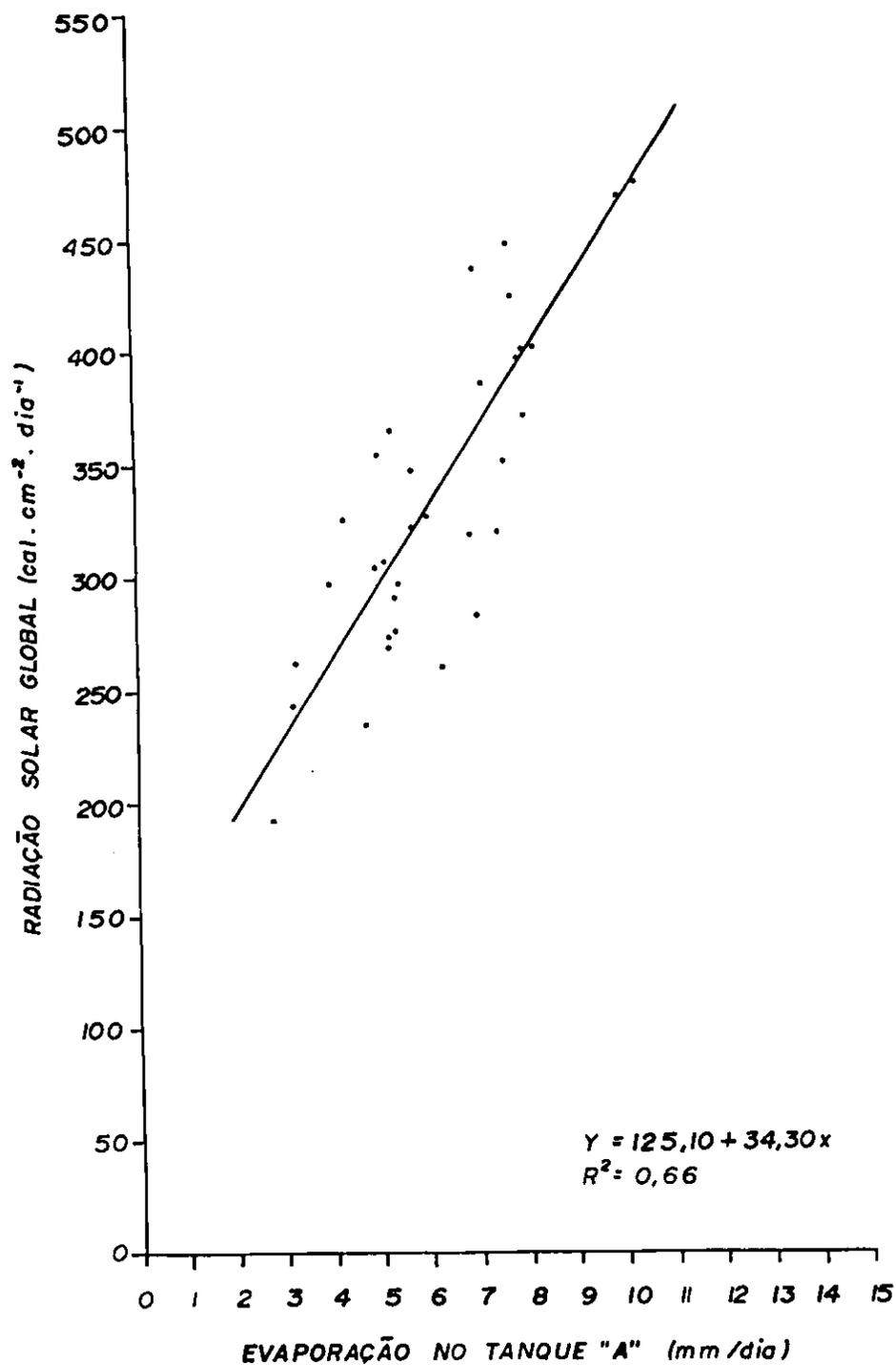


FIG. 1. Regressão linear simples entre as médias de cinco dias da radiação solar global e da evaporação do tanque "A", em Pelotas, outubro 1985 a março 1986.

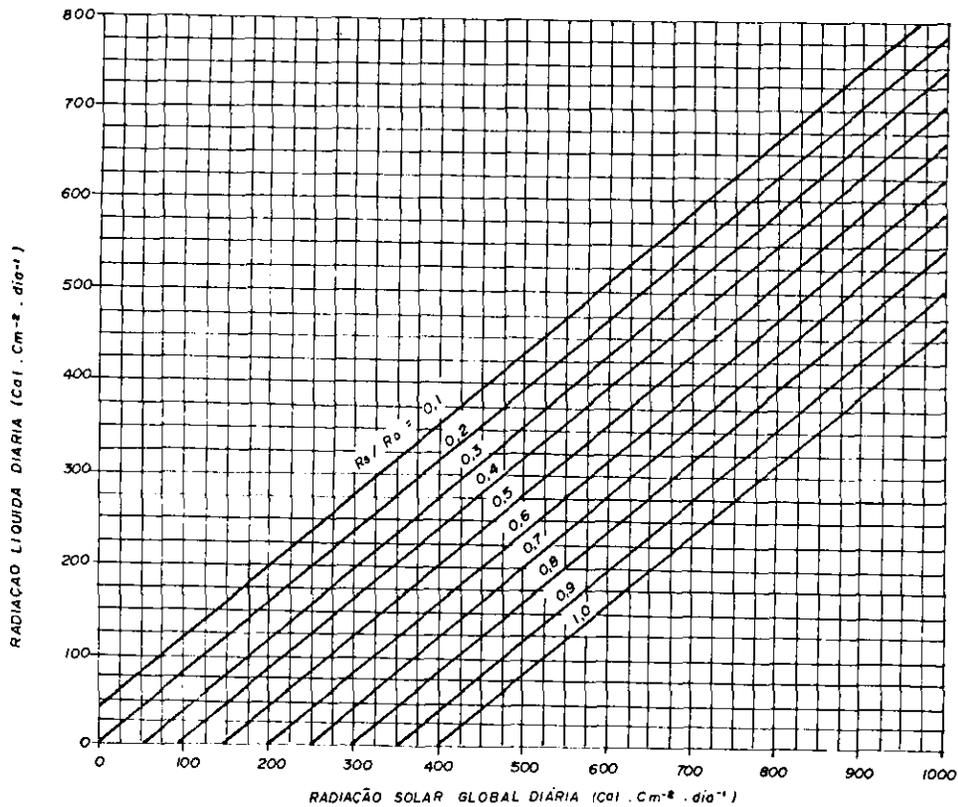


FIG. 2. Nomograma para a determinação da radiação líquida a partir da radiação solar global, para Pelotas.

TABELA 5. Valores de R_S (Wm^{-2}) em função da evaporação do tanque classe A. Pelotas, Rio Grande do Sul.

A	RS	A	RS	A	RS	A	RS
0,5	142	3,0	228	5,5	314	8,0	400
1,0	159	3,5	245	6,0	331	8,5	417
1,5	177	4,0	262	6,5	348	9,0	434
2,0	194	4,5	297	7,0	365	9,5	451
2,5	211	5,0	297	7,5	382	10,0	468

TABELA 6. Valores de E_a (termo aerodinâmico, mm) em função da evaporação do evaporímetro de Piche (P_i), mm. Pelotas, Rio Grande do Sul.

P_i	E_a	P_i	E_a	P_i	E_a	P_i	E_a
0,5	0,5	3,0	1,3	5,5	2,0	8,0	2,8
1,0	0,7	3,5	1,5	6,0	2,2	8,5	2,9
1,5	0,9	4,0	1,6	6,5	2,3	9,0	3,0
2,0	1,0	4,5	1,7	7,0	2,5	9,5	3,2
2,5	1,2	5,0	1,9	7,5	2,6	10,0	3,3

TABELA 7. Valores de D/Y para diferentes temperaturas médias, do ar, °C.

°C	D/Y								
5	0,938	11	1,336	17	1,869	23	2,572	29	3,483
6	0,996	12	1,415	18	1,974	24	2,708	30	3,658
7	1,057	13	1,497	19	2,083	25	2,850	31	3,841
8	1,122	14	1,584	20	2,197	26	2,999	32	4,031
9	1,190	15	1,675	21	2,316	27	3,153	33	4,229
10	1,261	16	1,770	22	2,441	28	3,315	34	4,434

TABELA 8. Médias diárias de períodos de cinco dias da evapotranspiração de referência de Penman, segundo as duas metodologias, e do tanque classe A, de outubro de 1984 a março de 1985. Estação Agroclimatológica da UFFel, Pejetas.

Período	Evapotranspiração de referência, (mm)			Evaporação Tanque A corrigido (mm)
	Metodologia tradicional (mm)	Metodologia proposta		
		Estimado (Fórmula 4)	Observado	
1.10.84 - 5.10.84	3,2	3,3	1,9	2,3
6.10.84 - 10.10.84	3,9	3,6	2,1	3,0
11.10.84 - 15.10.84	4,2	4,0	2,3	3,4
16.10.84 - 20.10.84	4,7	4,6	2,6	4,3
21.10.84 - 25.10.84	4,6	4,6	2,6	3,8
26.10.84 - 30.10.84	3,9	3,8	2,2	2,5
31.10.84 - 4.11.84	4,4	4,0	2,3	3,1
5.11.84 - 9.11.84	4,2	4,2	2,4	2,6
10.11.84 - 14.11.84	4,9	4,9	2,8	4,5
15.11.84 - 19.11.84	5,6	5,5	3,1	5,0
20.11.84 - 24.11.84	5,8	5,5	3,1	4,8
25.11.84 - 29.11.84	6,0	6,1	3,4	5,5
30.11.84 - 4.12.84	5,9	5,9	3,3	5,8
5.12.84 - 9.12.84	5,2	5,7	3,2	5,3
10.12.84 - 14.12.84	5,9	5,5	3,1	4,7
15.12.84 - 19.12.84	6,0	6,1	3,5	5,5
20.12.84 - 24.12.84	5,4	5,5	3,1	4,9
25.12.84 - 29.12.84	6,1	5,7	3,2	5,2
30.12.84 - 3.01.85	6,5	6,6	3,7	6,5
4.01.85 - 8.01.85	6,0	5,7	3,2	5,0
9.01.85 - 13.01.85	6,7	6,8	3,9	6,1
14.01.85 - 18.01.85	6,2	6,1	3,4	5,7
19.01.85 - 23.01.85	5,2	4,9	2,8	3,8
24.01.85 - 28.01.85	4,9	5,1	2,9	4,5
29.01.85 - 2.02.85	5,5	5,3	3,0	5,2
3.02.85 - 7.02.85	5,5	5,5	3,1	5,3
8.02.85 - 12.02.85	4,4	4,8	2,7	4,2
13.02.85 - 17.02.85	4,8	5,0	2,8	4,4
18.02.85 - 22.02.85	4,8	5,0	2,8	4,4
23.02.85 - 27.02.85	5,5	5,7	3,2	5,6
28.02.85 - 4.03.85	5,1	4,6	2,6	3,8
5.03.85 - 9.03.85	4,3	4,8	2,7	4,6
10.03.85 - 14.03.85	4,5	4,6	2,6	4,7
15.03.85 - 19.03.85	3,9	4,3	2,4	4,3
20.03.85 - 24.03.85	3,1	3,3	1,9	2,3
25.03.85 - 29.03.85	3,3	3,6	2,1	4,1

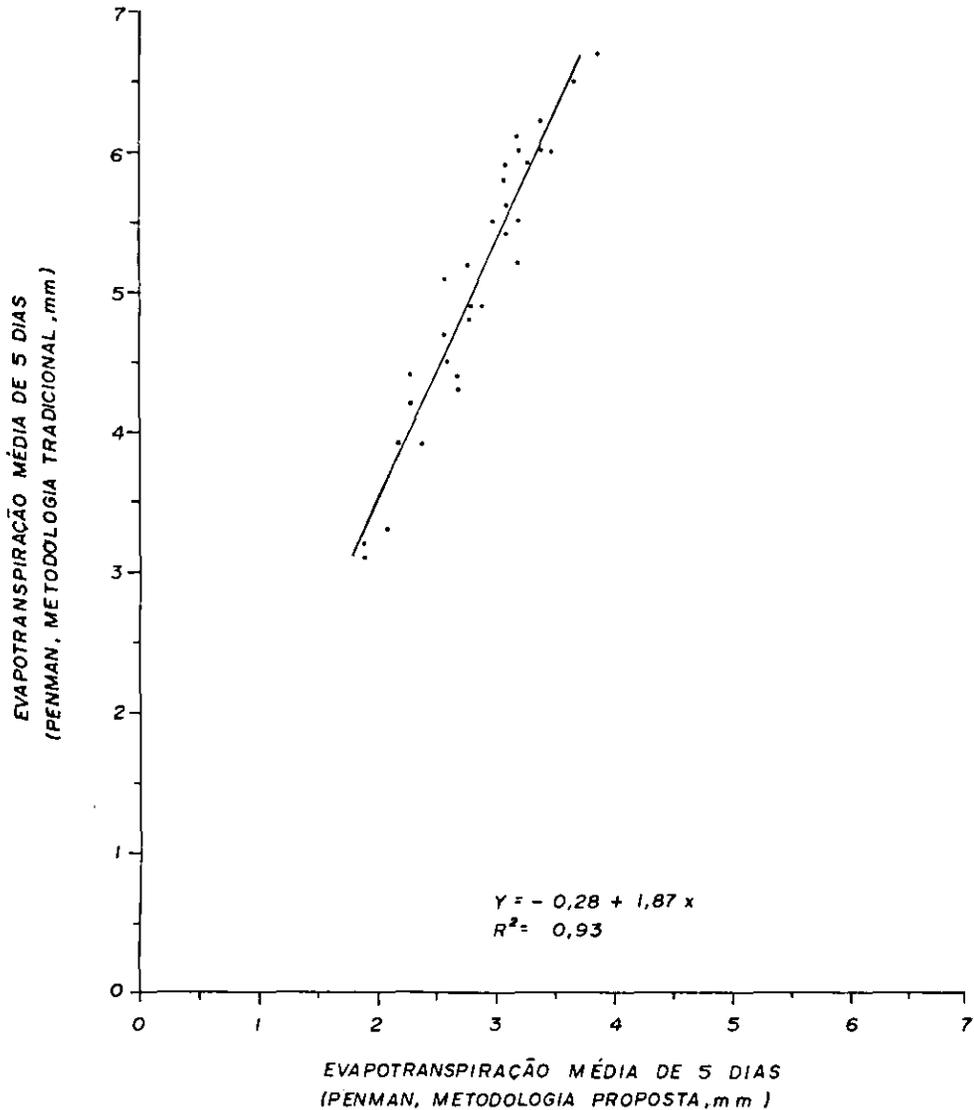


FIG. 3. Regressão linear simples entre as estimativas da evapotranspiração de referência obtidas pelo método de Penman segundo a metodologia tradicional e a proposta. Pelotas, outubro 1984 a março 1985.

2. O albedo decresce geralmente de 50% do estágio reprodutivo para os estágios iniciais de emergência ou transplante (hortaliças).

3. O albedo aumenta com a latitude.

4. O albedo das culturas no estágio reprodutivo é bem conhecido para grande número de culturas.

5. No Brasil, são disponíveis estimativas da radiação solar global (RS) e da radiação de onda longa da superfície (Rb) para praticamente todo o território.

Os valores preliminares que propomos para o albedo de culturas anuais no Brasil constam na Tabela 11.

Como o tanque classe A é muito usado por agricultores, foram verificadas as suas estimativas de ETo comparando-as com o método de Penman, que é considerado o método padrão. O resultado não foi satisfatório, pois o R^2 entre ambas as séries de valores, médias de cinco dias para o período outubro de

1984 a março de 1985, foi de 0,73 inferior ao $R^2 = 0,93$ entre as estimativas de ETo a partir do método proposto e as estimativas pelo método de Penman tradicional. Neste caso, os valores do tanque classe A foram corrigidos para a velocidade do vento e umidade relativa. A equação de regressão entre os valores corrigidos do tanque classe A e os valores de Penman para estimar os valores de ETo (Penman tradicional) a partir dos valores de ETo (tanque A tradicional) é:

$$\begin{aligned} \text{ETo (Penman tradicional)} &= 1,67 + 0,75 \\ \text{ETo (tanque A corrigido)} & \end{aligned} \quad (5)$$

A Fig. 4 mostra a comparação entre valores diários de ETo estimados com o método proposto, Penman e tanque A, estes dois últimos corrigidos pelas equações de regressão.

A metodologia proposta poderia ser usada na prática da irrigação para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do balanço hídrico diário,

com microcomputador de acordo com Verona & Mota (1985). Segundo Stanhill (1962b), a radiação líquida poderia ser estimada em uma estação central, e o termo aerodinâmico, em diversos locais da região irrigada, com o evapômetro de Piche em abrigo meteorológico simples. Da mesma forma achou-se que a precipitação deveria ser medida em vários locais da região irrigada. A estação central teria um microcomputador, e se comunicaria com os demais locais de medição do Piche e da chuva, alimentaria o microcomputador e difundiria o aconselhamento de quanto e quando irrigar, através das rádios locais, agentes de extensão etc. Tensiómetros poderiam ser usados para ajustar o sistema. O uso de microcomputador pessoal para informar quando e quanto irrigar encontra apoio na literatura (The Proceedings of the Irrigation Scheduling Conference 1981, Verona & Mota 1985).

No final deste trabalho, encontra-se a listagem do programa de microcomputador desenvolvido (Anexo 1).

TABELA 9. Valores corrigidos do ETo a partir dos valores de ETo obtidos com a metodologia proposta, mm.

Eto	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2	1,4
1,0	1,6	1,8	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3
2,0	3,5	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	5,1
3,0	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1	6,3	6,3	6,6	6,8	7,0
4,0	7,2	7,4	7,6	7,8	7,9	8,1	8,3	8,5	8,7	8,9
5,0	9,1	9,3	9,4	9,6	9,8	10,2	10,4	10,6	10,7	10,9

TABELA 10. Alguns dados sobre a fração medida da radiação global retida como radiação líquida em diferentes locais e culturas no Brasil.

Local	Cultura	Clima	Razão: Radiação líquida/ Radiação global	Autor
Pelotas - RS	Gramado (<i>Paspalum</i> sp.)	Subtropical	0,66	Mota 1976.
Taquari - RS	Milho	Subtropical	0,75	Matzenauer et al. 1985.
Pelotas - RS	Sorgo sacarino	Subtropical	0,53	Assis & Mendez 1987.
Piracicaba - SP	Cebola	Tropical	0,84	Bergamaschi et al. 1983.
Jaboticabal - SP	Milho	Tropical	0,82	André et al. 1983.
Campinas - SP	Milho	Tropical	0,81	Brunini et al. 1987.
Taquari - RS	Soja	Subtropical	0,47	Fontana et al. 1987.
Média geral	-	-	0,69	-
Média clima subtropical			0,60	-
Média clima tropical			0,82	-

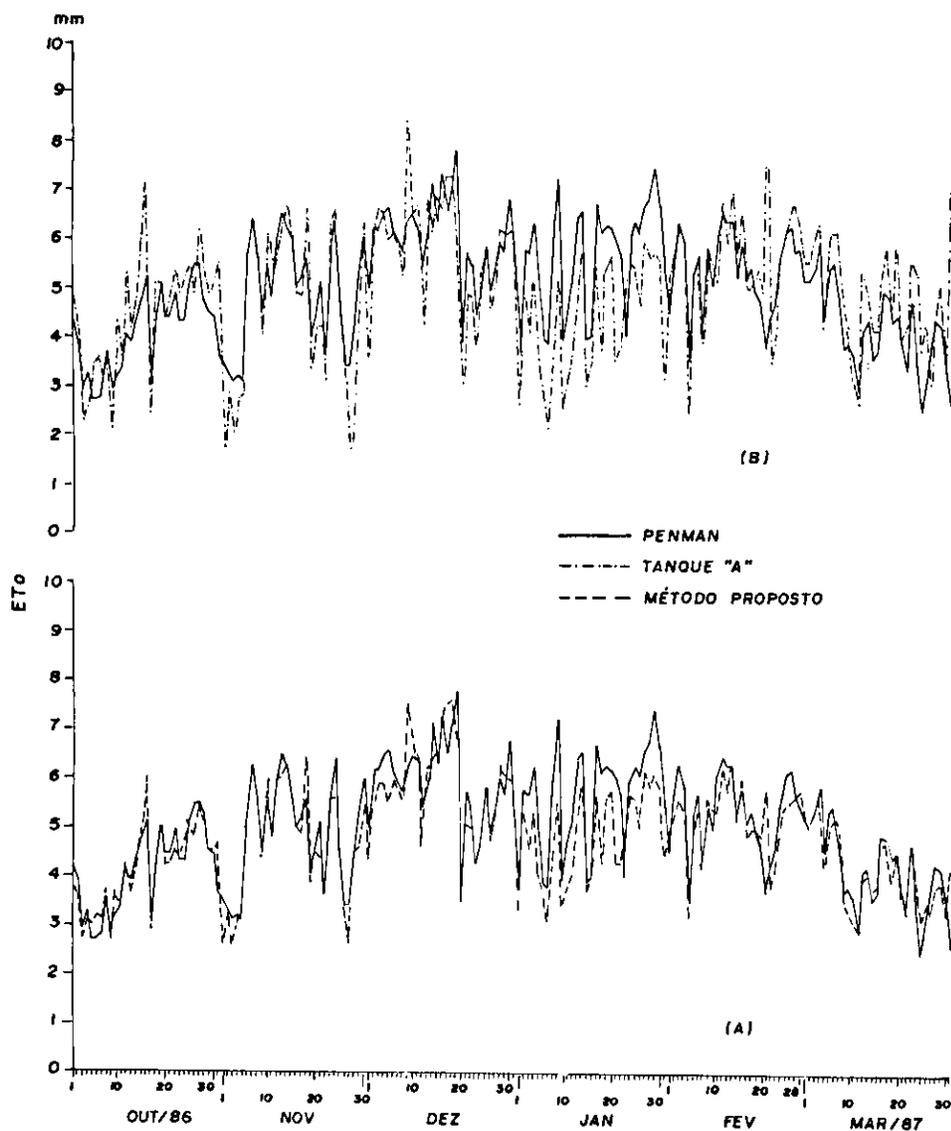


FIG. 4. Comparação dos valores diários do ET_0 obtidos pelo método de Penman com a metodologia proposta (A) e com os dados do tanque A corrigidos pela sua regressão com o método de Penman (B). Pelotas, outubro 1986 a março 1987.

TABELA 11. Valores preliminares propostos para o albedo de culturas anuais no Brasil.

Cultura	Albedo	
	Estágios iniciais ¹	Estágio reprodutivo
Climas temperados e subtropicais		
Abaixo de 24°S:		
Cereais de inverno, batata-inglesa, pastagens e hortaliças	0,12 - 0,23	0,24
Milho	0,18 - 0,21	0,24
Soja	0,13 - 0,25	0,26
Feijão	0,10 - 0,14	0,15
Sorgo	0,18 - 0,22	0,23
Climas tropicais		
Algodão	0,09 - 0,18	0,19
Abacaxi	0,05 - 0,07	0,08
Soja	0,12 - 0,22	0,23
Milho	0,13 - 0,20	0,21
Feijão	0,10 - 0,14	0,15
Cereais de inverno, pastagens, batata-inglesa e hortaliças	0,10 - 0,18	0,19

¹ O primeiro valor corresponde ao estágio da emergência, o último ao início da floração e aos estágios intermediários correspondem valores intermediários aos indicados em ordem crescente da emergência ao início da floração.

CONCLUSÕES

1. O método proposto permite obter estimativas mais precisas do que o método do tanque classe A para a evapotranspiração de referência a partir de medidas do tanque classe A, do evaporímetro Piche e dos termômetros de máxima e mínima com apenas uma observação diária, tanto para períodos de cinco dias como para períodos diários.
2. C manejo dos instrumentos utilizados no método proposto é muito mais simples do que o necessário no método tradicional, podendo ser realizado por agricultores.
3. O método proposto poderia ser usado em fazendas de irrigação, para aconselhamento de quanto e quando irrigar, com baixo custo.
4. Devem ser estabelecidas relações regionais entre a radiação líquida, a radiação solar global e a transmissividade atmosférica, utilizando valores do albedo de acordo com o tipo de clima.

REFERÊNCIAS

- AMORIM NETO, M. da S.; OLIVEIRA, C.A.; SILVA, D.D. da. Avaliação de diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração potencial em regiões semi-áridas. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4, Londrina, 1985. *Anais...* Londrina, s.ed., 1985. p.211-29.
- ANDRÉ, R.G.B.; VOLPE, C.A.; NISHIMURA, T.; LIBERA, C.L.F.D.; MALHEIROS, E.; ALMEIDA, A. Balanço de radiação numa cultura de milho (*Zea mays* L.). CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, 1983. *Anais...* Campinas, Fundação Cargill, 1983. p.93-102.
- ANDRÉ, R.G.B. & VISWANADHAM. Radiation balance of soybeans in Brazil. *Agric. Forest. Meteorol.*, 30:157-73, 1983.
- ASSIS, F.N.; MENDEZ, M.E.G.; MARTINS, S.R.; VERRONA, L.A. Estimativa de radiação na cultura do sorgo sacarino. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, 22(4):349-52, 1987.
- BEIRSDORF, M.I.C. & MOTA, F.S. da. Evapotranspiração do arroz irrigado em Pelotas, Rio Grande do Sul. *Ci. e Cult.*, 28(11):1329-34, 1976.
- BERGAMASCHI, H.; RODRIGUES, A.R.F.; COUTINHO, A.R.; CHAGAS FILHO, M.F.; VIEIRA, H.J.; PADOVESE, P.P.; SANTOS, R.; IGREJA, S.M.S. Balanço de energia em uma cultura de cebola (*Allium cepa* L.), em condições de céu encoberto e céu limpo. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, 1983. *Anais...* Campinas, Fundação Cargill, 1983. p.60-2.
- BRUNINI, O.; MACHADO, E.C.; ALFONSI, R.R.; CAMARGO, M.B.P.; SAWASAKI, E.; MIRANDA, L.T.; MIRANDA, E.G.C.; PRESTI, M.C.; FERREIRA, R.N.; TANAKA, Y.M. Efeitos da densidade de plantio na absorção de radiação solar por cultura de milho. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5, Belém, 1987. *Coletânea de Trabalhos...* Belém, EMBRAPA-CPATU, 1987. p.322-7.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 58:389-418, 1932.
- CHANG, JEN-HU. *Problems and methods in agricultural meteorology*. Taipei Oriental, Pub. Co., 1971. 146p.
- DAVIES, J.A. & IDSO, S.B. Estimating the surface radiation balance and its components. In: BARFIELD, B.J. & GERBER, J.F. eds. *Modification of the aerial environment of plants*. Michigan, American Society of Agricultural Engineers, 1979. p.357-9. (Monograph, 2)
- DENMEAD, O.T. Temperate cereals. In: MONTEITH, J.L. ed. *Vegetation and the Atmosphere*. London, Academic Press, 1976. 369p.
- DOOREMBOS, J. & PRUITT, W.O. *Las necesidades de agua de los cultivos*. Roma, FAO, 1976. 194p. (Estudio FAO, Riego y Drenaje, 24)

- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5, Belém, 1987. **Coletânea de trabalhos...** Belém, EMBRAPA-CPATU, 1987. p.320-1.
- FRISTSCHEN, L.J. **Report on components of the radiation balance of field crops under irrigated conditions.** Arizona, USDA, 1964. 10p. (Soil and Water Conservation, 18)
- FRISTSCHEN, L.J. Net and solar radiation relations over irrigated field crops. **Agric. Meteorol.**, 4:55-62, 1967.
- FUNARI, F.L.; TARIFA, J.R.; SIMPSON, J.G.P. Estudo comparativo entre as equações de Brunt-Penman (1948), e de Linacre (1967), para a estimativa da radiação líquida. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, 1983. **Anais...** Campinas, Fundação Cargill, 1983. p.251-4.
- GOMES, R.A. **Pocket computers in Agrometeorology.** Rome, FAO, 1983. 140p. (Plant Production and Protection Paper, 45)
- LINACRE, E.T. Climate and evaporation from crops. **Proc. Am. Soc. Civil Eng.**, 93(IR 4):61-97, 1967.
- LUCHIARI JÚNIOR, A. Balanço de radiação em milho (*Zea mays* L.) cultivado em área de cerrado. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2, Pelotas, 1981. **Anais...** Pelotas, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1985. p.168-9.
- MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S.L.; BERGAMASCHI, H. Estimativa do saldo de radiação sobre uma comunidade de milho (*Zea mays* L.) a partir da radiação global. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2, Pelotas, 1981. **Anais...** Pelotas, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1985. p.102-5.
- MOTA, F.S. da. Estimativas da radiação líquida em Pelotas, Rio Grande do Sul. **Ci. e Cult.**, 28(10):1174-1178, 1976.
- MOTA, F.S. da. **Meteorologia agrícola.** 7.ed. s.l., Nobel, 1987. 367p.
- MOTA, F.S. da & BEIRSDORF, M.I.C. Medidas e estimativas da evapotranspiração potencial em Pelotas, Rio Grande do Sul. **Ci. e Cult.**, 28(6):666-72, 1976.
- MUKAMMAL, E.I. & BRUCE, J.P. **Evaporation measurements by pan and atmometer.** s.l., Association of Scientific Hydrology, 1960. p.408-20.
- NKENDIRIM, L.C. Radiative flux relations over crops. **Agric. Meteorol.**, 11:229-42, 1973.
- OMETTO, J.C. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida, insolação.** Piracicaba, ESALQ, 1968. 64p. Tese Doutorado.
- OMETTO, J.C. **Bioclimatologia Vegetal.** São Paulo, Agronômica Ceres, 1981. 440p.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proc. R. Meteorol. Soc. Ser. A**, 193:120-45, 1948.
- THE PROCEEDINGS OF THE IRRIGATION SCHEDULING CONFERENCE, Chicago, 1981. **Irrigation scheduling for water & energy conservation in the 80's.** St. Joseph, Michigan, ASAE, 1981. (ASAE Publication, 23-81)
- RAVELLO, A.C. Evaluación del atmómetro de disco poroso negro em comparación com el tanque de evaporación y el Piche. **Rev. Fac. Agron. Vet.**, Buenos Aires, 19(1-2):53-9, 1971.
- ROSEMBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERNA, S.B. **Microclimate.** 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1983. 495p.
- SHAW, R. Comparison of solar and net radiation. **Bull. Am. Meteorol. Soc.**, 37:205-6, 1956.
- SOBRINHO, J.E. & SEDIYAMA, G. Análise do termo "balanço de energia" da equação de Penman, para Viçosa, MG. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 3, Campinas, 1983. **Anais...** Campinas, Fundação Cargill, 1981. p.31.
- STANHILL, G. The use of Piche evaporimeter in the calculation of evaporation. **Quart. Roy Meteorol. Soc.**, 88:80-2, 1962a.
- STANHILL, G. The control of field irrigation practice from measurements of evaporation. **Isr. J. Agric. Res.**, 12:51-62, 1962b.
- UCHIYAMA, Z. Maize and Rice. In: MONTEITH, J.L. **Vegetation and the Atmosphere.** London, Academic Press, 1976. Vol. 2, p.33-64.
- VERONA, L.A.F. & MOTA, F.S. da. O microcomputador pessoal na Agrometeorologia operacional. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 4, Londrina, 1985. **Anais...** Londrina, s.ed., 1985. p.11-6.
- WESTPHALEM, S.L. & THOMÉ, V.R. Efeito de espaçamento entre linhas e população de plantas de feijoeiro, em cultivar de hábito de crescimento determinado, sobre componentes do balanço de radiação. CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5, Belém, 1987. **Coletânea de trabalhos...** Belém, EMBRAPA-CPATU, 1987. p.314-6.

ANEXO 1

LIST

```

1 HOME
5 PRINT "  EVAPO PELOTAS"
10 CLEAR
13 PI = 3.1416
15 DIM A(15,15), C(11), K(11)
20 C$ = "-----"
25 PRINT C$
30 PRINT: PRINT SPC (6); "CALCULO
  DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO"
35 PRINT : PRINT SPC (9); "PELO MÉTODO
  DE PENMAN"
40 PRINT : PRINT SPC (4); "COM INSTRU-
  MENTOS DE BAIXO CUSTO"
45 PRINT : PRINT SPC (10); "PARA
  OS AGRICULTORES"
50 PRINT : PRINT C$
55 PRINT "FERNANDO SILVEIRA
  DA MOTA"
57 PRINT
60 PRINT "LUIS EDUARDO S.M. NOVAES"
61 PRINT : PRINT C$
62 PRINT : PRINT "* AGUARDE *"
64 FOR ESPERA = 1 TO 5000: NEXT
  ESPERA
65 HOME
68 PRINT : PRINT SPC (07); "** DADOS
  PARA O CÁLCULO *"
69 PRINT : PRINT C$: PRINT
70 INPUT "- NR. DO DIA: "; J
72 PRINT : INPUT "- LATITUDE: "; LT
73 PRINT : INPUT "- TEMP. MAX. "; T1
75 PRINT : INPUT "- TEMP. MIN.: "; T2
80 T = (T1 + T2) / 2
83 PRINT : PRINT "- TEMP. MED. "; T
85 TA = T + 273
86 K = LT * PI / 180
87 DE = 23.45 * SIN ((.98 * J - 80.5) * PI/180)
88 R = 1 - .0167 * COS (.0172 * (J - 1))
90 PRINT : INPUT "- CONST.
  PSICOMETRICA: "; CP
93 PRINT : INPUT "- TANQUE 'A': "; A
95 PRINT : INPUT "- PICHE: "; P
97 PRINT : PRINT C$: INPUT
  "CONFIRMADO OS DADOS?"; Y$
98 IF Y$ = "N" THEN GOTO 65
99 IF Y$ ( ) "S" THEN GOTO 97
100 HOME
101 X = COS (K) * COS (DE * PI / 180)
102 Y = SIN (K) * SIN (DE * PI / 180)
103 M1 = -((.0148 + Y) / X)
104 DEF FN ACS (M1) = - ATN (M1 / SQR
  (- M1 * M1 + 1)) + 1.571
105 M = FN ACS (M1)
107 RO = 458 * (2 * M * Y + 2 * X * SIN
  (M)) / R^2
108 ES = 6.11 * 10^(7.5 * T / (237.5 + T))
  * .75
110 D = ES * (6886 / TA^2 - 5.31 / TA^2)
115 RS = 125.1 + 34.3 *
115 RS = 125.1 + 34.3 * A
120 RL = (.78 * RS) - (386.66 * (RS / RO))
  + 77.45
125 EA = .29 * P - .43
130 ET = (D / CP * RL / 59 + EA) /
  (D / CP + 1) * 1.87 - .28
140 HOME
145 PRINT : PRINT C$
150 PRINT SPC ( 8); "EVAPOTRANSPIRA-
  ÇÃO = "; INT (ET * 10 + .5) / 10
155 PRINT : PRINT C$
160 PRINT : PRINT : PRINT
165 PRINT "- DESEJA CONTINUAR
  CALCULANDO?"
170 PRINT : INPUT "(S/N) "; Y$
175 IF Y$ = "S" THEN GOTO 65
180 IF Y$ ( ) "N" THEN GOTO 170
200 PRINT : PRINT : PRINT SPC ( 9); "**
  FIM DO PROGRAMA **"

```