

# A ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL. UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE MENDONÇA (1958) E DE RIJTEMA E ABOUKHALED (1975)

Valter BARBIERI<sup>1</sup>, Miguel NAVARRO Dujmovich<sup>2</sup>, Luiz Roberto ANGELOCCI<sup>3</sup>

## INTRODUÇÃO

Estudos da evapotranspiração de referência (Eto) e da evapotranspiração máxima das culturas (Etm) são abundantes na bibliografia agrometeorológica, chegando a ser excessivo o esforço dos pesquisadores neste tema, motivado pela sua aplicação no manejo da irrigação. Entretanto as medidas do consumo real de água das culturas (Eta), quando em condições naturais, é mais difícil de serem realizadas, de forma que há uma carência relativa do conhecimento deste importante parâmetro. Em especial, os estudos dos efeitos dos déficits hídricos nos rendimentos agrícolas passam inevitavelmente pela evapotranspiração real (ou atual) das culturas.

Mendonça (1958) teve como objetivo estabelecer uma teoria matemática para o método de Balanço Hídrico desenvolvido por Thorthwaite e Mather (1955). Em seu trabalho, aquele autor mostrou, mediante a introdução de parâmetros adimensionais, que o procedimento ilustrado pelos dois outros autores somente era utilizável para a capacidade de armazenamento de água disponível (CAD) de 300mm e que poderia ser generalizado para qualquer CAD e resumido em duas equações apenas. Mendonça considerou que no transcorrer do tempo a taxa de perda real da água do solo é função do volume armazenado, o qual, com o solo na capacidade de campo, é a própria CAD, e considerou a hipótese mais simples da proporcionalidade entre a evapotranspiração e o armazenamento de água. Considerou também que, a partir do instante em que o armazenamento de água se torna menor que a capacidade de água disponível CAD, a Eta será menor que a Etm.

Rijtema e Aboukhaled (1975) utilizaram a mesma conceituação introduzindo o conceito de evapotranspiração máxima (Etm) em lugar de evapotranspiração potencial (Eto) e o conceito de fração de água prontamente disponível de água **p**, ou seja, durante o consumo da fração **p** da CAD tem-se Eta=Etm. Entretanto, em sua equação para estimativa da Eta não consideraram as possíveis precipitações naturais, as quais promovem alteração no armazenamento de água do solo que, por sua vez, provocará aumento da Eta. Assim, são aqui apresentados os desenvolvimentos teóricos das equações das duas metodologias, com o fim de contribuir com as pesquisas desenvolvidas nesta área, e novamente salientar que o estudo da Eta, e portanto da fração **p**, ainda é um campo aberto para as pesquisas agrônomicas. Por fim pretende-se realçar trabalhos tão antigos, mas tão atuais nos seus conceitos e uso. Este trabalho foi iniciado

durante a estadia do primeiro autor Universidade de Córdoba - ES, como bolsista da FAPESP.

## MATERIAL E DISCUSSÃO

### 1 –Método de Mendonça (1958)

Utilizou a hipótese da proporcionalidade entre a evapotranspiração e o armazenamento de água no solo

$$\text{Eq.1 } \partial E / \partial t = k.A$$

$$\text{Eq.2 } E=C-A \text{ então } A=C-E$$

onde E=Eta (Evapotranspiração atual); C=CAD (Capacidade de água disponível na zona da raiz) e A=Arm (Armazenamento atual de água no solo)

Pode-se escrever que

$$\text{Eq.3 } \partial E / \partial t = k(C - E)$$

Sendo  $N=\Sigma(Eto-P)$  a perda potencial de água quando  $P < Etm$ , no intervalo de tempo T, pode-se dizer que a evapotranspiração real será igual a potencial para  $t=0$ , se o solo estiver com seu armazenamento máximo (CAD), de modo que:

$$\text{Eq.4 } (\partial E / \partial t)_{t=0} = kC = N/T$$

donde  $k=N/C.T$ , que por substituição em 3, leva a:

$$\text{Eq.5 } \partial E / \partial t = N/CT (C-E), \text{ que integrada resulta}$$

$$\text{Eq.6 } \int_0^E \frac{\partial E}{(C-A)} = \frac{N}{CT} \int_0^t \partial t \text{ isto é,}$$

$$\text{Ln} \left( \frac{C}{(C-E)} \right) = N/CT$$

Pela eq. 2,  $C-E = A$ , de modo que a eq. 6 se transforma em

$$\text{Eq.7 } \text{Ln} (C/A) = N/CT \text{ multiplicando por } -1$$

$$\text{Eq.8 } \text{Ln} (A/C) = -N/CT \text{ ou}$$

$$\text{Eq.9 } A/C = e^{(-N/CT)}$$

e finalmente: Eq.10  $A = C \cdot e^{(-N/CT)}$ , essa equação é, em nosso meio, conhecida na forma:

$$\text{Eq.10 } \text{Arm} = \text{CAD} \cdot e^{\text{Neg.Acum}/\text{CAD}} \text{ ou}$$

$$\text{Eq.11 } \text{Arm} = \text{CAD} \cdot e^{\Sigma(P-Eto)/\text{CAD}} \text{ quando } P-Eto < 0 \text{ onde } P = \text{precipitação.}$$

Sendo assim, decorrido um tempo T, a Eta será a variação do Arm neste tempo:

$$\text{Eta}_{(i-T)} = \text{Arm}_{(t=i)} - \text{Arm}_{(t=T)} \text{ ou seja}$$

$$\text{Eta} = \text{CAD} - \text{Arm}_T$$

Substituindo o valor de  $\text{Arm}_T$  dado pela eq. 11

<sup>1</sup>Prof., Doutor, Dept<sup>o</sup> de Ciências Exatas, ESALQ/USP, Cx. Postal 9, 13418-960, Piracicaba, SP. E-mail: [vbarbier@carpa.ciagri.usp.br](mailto:vbarbier@carpa.ciagri.usp.br)

<sup>2</sup>M.Sc. Prof. De la Universidad N. Del Centro de la Provincia de Buenos Aires-Facultad de Agronomía de Azul. Mail: [mnavarro@faa.unicen.edu.ar](mailto:mnavarro@faa.unicen.edu.ar)

<sup>3</sup>Prof., Doutor, Assoc. Dept<sup>o</sup> de Ciências Exatas, ESALQ/USP, Cx. Postal 9, 13418-960, Piracicaba, SP. E-mail: [lrangelo@carpa.ciagri.usp.br](mailto:lrangelo@carpa.ciagri.usp.br)

$$E_{ta} = CAD - CAD \cdot e^{-\text{Neg. Acum}/CAD} \text{ ou } E_{ta} = CAD(1 - e^{-\text{Neg. Acum}/CAD})$$

Para se obter a taxa média neste intervalo de tempo divide-se esta equação por  $t$ . Assim,  
**Eq.12**  $E_{ta} = (CAD/t)(1 - e^{-\text{Neg. Acum}/CAD})$

## 2 - Método de Rijtema e Aboukhled(1978)

Da mesma forma, estes autores citados por Doorenbos e Kassan (1979) (FAO 33), consideraram a teoria da proporcionalidade, mas introduziram o conceito da fração prontamente disponível de água no solo  $p$ , a qual considera que durante o consumo de uma lâmina de água equivalente a  $p \cdot CAD$ , a  $E_{ta}$  será igual a  $E_{tm}$  (Evapotranspiração máxima da cultura), sendo:  $E_{tm} = E_{to} \cdot K_c$  onde  $K_c$  (coeficiente de cultura) é variável com o IAF, conforme a equação  $K_c = 1 - \exp(-k \cdot IAF)$ , sendo  $k$  o coeficiente de transmissão da luz através das folhas para o solo, o qual está em torno de 0,45. Esta equação é limitada pelo  $k_c$  mínimo de 0,3. Desta forma pode-se escrever que:

Quando  $Arm \geq (1-p)CAD$  então

$$E_{ta} = E_{tm} = \frac{\partial Arm}{\partial t} \text{ eq.13}$$

Quando  $Arm < (1-p)CAD$

$$\text{Eq.14 } E_{ta} = \left( \frac{\partial Arm}{\partial t} / (1-p)CAD \right) E_{tm} = \frac{\partial Arm}{\partial t}$$

Integrando e substituindo a equação 14 em 13 tem-se:

$$E_{ta} = (CAD/t) [1 - (1-p) e^{-\text{Etm} \cdot t / ((1-p)CAD + p/(1-p))}]$$

Sendo  $t$  o tempo total em dias secos, e  $t'$  o tempo necessário para se consumir a fração  $p$ , então, quando  $t > t'$ ,

$$\text{Eq.15 } t' = p \cdot CAD / E_{tm} \text{ donde } t' \cdot E_{tm} = p \cdot CAD$$

Não ocorrendo chuva, então  $(t' - t) \cdot E_{tm}$  pode ser considerado como o Neg. Acum. da equação de Mendonça (1958). Sendo  $t' = t$ , o Neg. Acum. será nulo e o armazenamento de água no solo será  $(1-p)CAD$ . Portando o valor de  $(1-p)CAD$  no tempo  $t'$  pode ser considerado como o de armazenamento máximo, quando se iniciará o acúmulo dos negativos e a partir do que  $E_{ta} < E_{tm}$ .

Sendo  $t > t'$ , o Armazenamento num tempo  $t$  qualquer ( $Arm_t$ ) será

$$Arm_t = (1-p)CAD \cdot e^{-\frac{(t-t') \cdot E_{tm}}{(1-p)CAD}} \text{ podendo escrever}$$

$$Arm_t = (1-p)CAD \cdot e^{-\frac{t' \cdot E_{tm} - t \cdot E_{tm}}{(1-p)CAD}} \text{ ou}$$

$$\text{Eq.16 } Arm_t = (1-p)CAD \cdot e^{-\frac{t' \cdot E_{tm}}{(1-p)CAD}} \cdot e^{-\frac{t \cdot E_{tm}}{(1-p)CAD}}$$

Substituindo 15 em 16, tem-se

$$Arm_t = (1-p)CAD \cdot e^{-\frac{p \cdot CAD}{(1-p)CAD}} \cdot e^{-\frac{t \cdot E_{tm}}{(1-p)CAD}} \text{ ou}$$

$$\text{Eq.17 } Arm_t = (1-p)CAD \cdot e^{-\frac{t \cdot E_{tm}}{(1-p)CAD} + \frac{p}{(1-p)}}$$

Considerado  $E_{tm}$  média como a variação do  $Arm_{(t \rightarrow t')}$ , sendo  $t > t'$ , tem-se:

$$\text{Eq.18 } E_{ta} = \Delta Arm = (Arm_{t=0} - Arm_t) / t$$

Se  $Arm_t = CAD$  e substituindo 17 em 18, podemos escrever

$$\text{Eq.19 } E_{ta} = (CAD/t) [1 - (1-p) e^{-\text{Etm} \cdot t / ((1-p)CAD + p/(1-p))}]$$

Esta vem a ser a equação proposta por Rijtema e Aboukhled(1978), semelhante à proposta por Mendonça

(1958), modernizada pela introdução dos parâmetros  $p$  e  $k_c$ . Nessa equação, os Neg. Acum. somente são considerados a partir do consumo da fração  $p$ . A CAD da equação original de Mendonça(1958) é substituída por  $(1-p)CAD$ . Considerando-se como nula a fração  $p$ , então a equação de Rijtema e Aboukhled(1975) tornar-se-á igual à de Mendonça(1958), ou seja,

$$\text{Eq.12 } E_{ta} = (CAD/t)(1 - e^{-\text{Neg. Acum}/CAD})$$

## CONCLUSÕES

A equação proposta por Rijtema e Aboukhled(1975) difere da proposta por Mendonça (1958) somente pelo fato de não considerar as precipitações nos valores de Neg. Acum.. Tornar-se utilizável no balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955) se aos valores de Neg. Acum. forem somadas as precipitações  $P$ , e quando  $P > E_{tm}$ , ter-se-á  $E_{ta} = E_{tm}$ . É indispensável o uso dessas considerações para as condições climáticas brasileiras. A introdução dos parâmetros  $p$  e  $k_c$  representou um grande avanço na estimativa de  $E_{tm}$  e de  $E_{ta}$ . Entretanto serão necessários maiores estudos envolvendo as variáveis que atuam sobre estes parâmetros, e em especial para se estudar a relação de  $k_c$  com a área foliar. Para a fração  $p$  deverão ser consideradas as resistências ao movimento da água do solo para as raízes, das raízes para as folhas e para os estômatos e deles para o ar, sem esquecer que o pleno vigor vegetativo das plantas deverá ser considerado, uma vez que a evapotranspiração é fortemente afetada quando a temperatura ambiente está abaixo da temperatura base do vegetal. Tais considerações também são feitas por Allen et al (1998). O estudo da  $E_{tm}$  certamente envolverá o estudo da fração  $p$  da água do solo. Este parâmetro poderá ser desconsiderado quando as plantas estiverem crescendo em condições hidropônicas ou quando o solo estiver sob condições de umidade acima da capacidade de campo, durante o processo de drenagem da água livre. Tais estudos também deverão levar em conta a densidade das raízes num dado volume de solo pois a proximidade das raízes da fonte de água afetará o processo evapotranspirativo.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. ET AL (1998) Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Cap.8 p.161-82. Irrigation and Drainage Paper 33.
- ALLEN, R.G., JENSEN, M.E., WRIGHT, J.L., BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agronomy Journal, Madison, 81: 650-62. 1989.
- DOORENBOS, J. E KASSAN, A. H. Yield response to water. Rome. FAO, 1979, 193p. Irrigation and Drainage Paper 33.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 24. FAO. Rome, 179p. 1977.
- MENDONÇA, P. V. Sobre o novo método de balanço hidrológico do solo de Thornthwaite-Mather. In: Congresso Luso-Espanhol para o para o progresso das ciências, 24, Madrid, 1958. p.415-25.
- PEREIRA, A.. R., VILLA NOVA, N.A., PEREIRA, A.S., BARBIERI, V.A. A model for the Class A pan coefficient. Agric. And Forest
- RIJTEMA P.E. E ABOUKHALED A. Crop water use. In. Research on Crop Water Use, Salt Affected Soils and Drainage in the Arab Republic of Egypt. FAO Regional Office for the Near East. p.5-61.
- THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, R. J. The water balance. Publication in Climatology, 8 (1): 1-104, 1955.