

## CORRELACIÓN ENTRE LA EVAPORACIÓN EN TINA Y LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA EN CINCO ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE VENEZUELA

Raúl Martínez<sup>1</sup>, Millena Ariana Boueri<sup>1</sup> y Pedro Escalona<sup>2</sup>

### RESUMEN

Con la finalidad de conseguir fórmulas de evapotranspiración más adaptadas a diferentes zonas del centrooccidente de Venezuela, se utilizaron las ecuaciones de Penman-Monteith, Hargreaves, García-López, Thornthwaite y Blaney-Criddle, para correlacionar la ETo con la evaporación registrada en las cinco siguientes estaciones climáticas: Mesa de Cavacas en el estado Portuguesa, Naranjal y Yaritagua en el estado Yaracuy, y Tarabana y Quíbor en el estado Lara. Se estableció como mínimo un coeficiente de correlación de 0,65 y se utilizaron 12 años de registro común en cada estación (1989-2000). La ecuación de Penman-Monteith obtuvo la mejor correlación en la estación Naranjal. En las estaciones Yaritagua y Mesa de Cavacas la ecuación de Hargreaves produjo el mayor coeficiente de correlación. En las estaciones Tarabana y Quíbor no se encontraron resultados satisfactorios. Se propone usar la ecuación de Penman-Monteith en Naranjal, la de Hargreaves en Yaritagua y, dependiendo de la disponibilidad de datos, la de Penman-Monteith, Hargreaves ó García-López en Mesa de Cavacas.

**Palabras clave adicionales:** Penman-Monteith, Hargreaves, García-López, Blaney-Criddle, necesidades hídricas

### ABSTRACT

#### **Correlation between pan evaporation and the reference evapotranspiration in five climatological stations in Venezuela**

With the purpose of obtaining the evapotranspiration equations more adapted to different zones of the midwest of Venezuela, ETo was estimated by Penman-Monteith, Hargreaves, García-López, Thornthwaite and Blaney-Criddle equations and correlated with the pan evaporation measured at the following climatic stations: Mesa de Cavacas (Portuguesa State), Naranjal and Yaritagua (Yaracuy State), and Tarabana and Quíbor (Lara State). For that purpose a minimum correlation coefficient of 0.65 was established and 12 years of records in each station were used (1989-2000). The equation of Penman-Monteith produced the best correlation in Naranjal station. In the Yaritagua and Mesa de Cavacas stations, the Hargreaves equation gave the best correlation. In Tarabana and Quíbor stations no satisfactory results were found. The use of Penman-Monteith equation is suggested in Naranjal, Hargreaves in Yaritagua, and depending on the availability of data, the Penman-Monteith, Hargreaves or García-Lopez in Mesa de Cavacas.

**Additional key words:** Penman-Monteith, Hargreaves, García-López, Blaney-Criddle, water needs

### INTRODUCCIÓN

La necesidad del riego está fundamentada en el conocimiento de la evapotranspiración de los cultivos. Doorenbos y Pruitt (1976) introdujeron el término de evapotranspiración de referencia (ETo) como la tasa de evapotranspiración (ET) de una superficie extensa de gramíneas verdes de 8 a 15 centímetros de altura, uniforme, de crecimiento activo, que sombrea totalmente el suelo y que no escasea de agua.

La obtención de la ET se debe basar fundamentalmente en el conocimiento de las condiciones climáticas, edáficas y de cultivo (De Juan, 1993). Muchas de estas variables son difíciles de cuantificar por falta de equipos o instrumentos, bien sea por el costo que éstos representan o por la imposibilidad de monitorearlos eficazmente, por esto, las fórmulas empíricas que permiten calcular el consumo de agua surgen como una respuesta. Estas fórmulas se basan en condiciones climáticas, agronómicas y

---

Recibido: Octubre 20, 2004

Acceptado: Agosto 16, 2005

<sup>1</sup> Universidad Estadual Paulista Campus de Botucatu, São Paulo, Brasil. CP: 237, CEP: 18603070. e-mail: raulmartinez@fca.unesp.br, e-mail: millena@fca.unesp.br

<sup>2</sup> Dpto. de Ingeniería Agrícola. Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Apdo. 400. Barquisimeto. Venezuela. pescalona@intercable.net.ve

edáficas propias de una localidad, por lo que la transferencia de estas metodologías de una zona a otra diferente de aquella en la que han sido concebidas sigue siendo problemática.

Méndez y Rojas (1973) señalaron que el principal problema para la programación de obras de riego es la insuficiencia de datos de evapotranspiración (ET). Khan et al. (1998) mencionan que en Venezuela se ha venido trabajando con fórmulas empíricas para la determinación de la ETo, pero no existe la seguridad de que estos valores se correlacionan bien con la evapotranspiración real ya que los datos existentes sobre evapotranspiración medida son muy pocos. En tal sentido, Pire et al. (1998) aportaron alguna información al medir la evapotranspiración utilizando pequeños lisímetros.

García y López (1970) desarrollaron una fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15°N – 15°S) y concluyeron que la misma se ajustaba de manera confiable a la realidad. Luego de esto, las investigaciones sobre el consumo de agua en el país se han multiplicado. Muestra de ello son las realizadas por Martelo (1989), Suárez (1990) y López y Dennett (2005) para la estimación de la ETo o por Pire y Rodríguez (2003) para la medición de ET en cultivos.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, el objetivo de este trabajo fue correlacionar la evaporación medida en la tina clase A con la evapotranspiración potencial (ETo) calculada por diversas fórmulas, estableciendo qué fórmula se adapta mejor a cada zona. Esto incrementará las oportunidades de realizar, de manera cuantitativa y efectiva, la planificación del riego. La principal limitante del estudio es la poca validez de extrapolar los resultados obtenidos a otros lugares por la estrecha interrelación existente con las condiciones locales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en cada una de las siguientes estaciones climatológicas:

**Mesa de Cavacas:** Latitud 09° 04' N, longitud 69° 48' W y altura sobre el nivel del mar de 255 m. Presenta valores medios de 1781,4 mm de precipitación anual y una temperatura media de 26,5 °C. Según la clasificación de Holdridge (Ewel et al., 1976) el área representa una zona de

vida de bosque húmedo tropical transitorio hacia un bosque seco tropical.

**Naranjal:** latitud 10° 21' 45" N y longitud 69° 39' W; con una elevación de 107 msnm. La estación pertenece a una zona de vida de bosque seco tropical, con 1352,2 mm de precipitación anual en promedio y una temperatura media de 25,8 °C.

**Yaritagua:** Latitud 10° 05' N, longitud 69° 07' W y 350 msnm. El registro pluviométrico promedio anual desde 947,5 mm con temperatura promedio de 24,6 °C; lo que la sitúa en la zona de vida de bosque seco tropical en transición hacia el bosque muy seco tropical

**Tarabana:** Latitud 10° 01' 25" N y longitud 69° 17' W, la temperatura media es de 25,1 °C y llueven en promedio 860,1 mm al año. De acuerdo a estos valores, la estación se encuentra en la zona de transición entre bosque seco tropical y bosque muy seco tropical.

**Quíbor:** Latitud 09° 55' N y longitud 69° 37' 39" W, a una altitud de 682 msnm. Los valores promedios de precipitación y temperaturas anuales son 508 mm y 25,5 °C, respectivamente. Esto la sitúa en la zona de vida bosque muy seco tropical.

La información recabada en cada una de las estaciones consistió en los datos mensuales del período 1989-2000 (12 años de registro común) de los siguientes elementos climáticos: precipitación, evaporación, temperatura media del aire, humedad relativa media del aire, insolación y velocidad del viento, además de los datos propios de la estación como su latitud, longitud y altitud. Para realizar los cálculos de la ETo por la fórmula de Penman-Monteith se usó el programa Cropwat versión 5.7 de la FAO.

Se aplicó cada una de las fórmulas descritas a continuación al conjunto de datos climáticos:

**Penman-Monteith:** Método propuesto por la FAO (Allen et al., 1998). Las variables utilizadas en esta fórmula son radiación neta en la superficie del cultivo, densidad de flujo de calor del suelo, temperatura media, velocidad del viento a 2 m, presión de saturación de vapor y presión actual de vapor.

**Thornthwaite:** Expresión íntimamente ligada con los valores de evapotranspiración de cada lugar y denominada como eficiencia de temperatura. Para el cálculo se utiliza la temperatura media mensual (Thornthwaite, 1948).

**Método Blaney-Criddle:** El método original se basa en la temperatura, en el coeficiente de cultivo

y en el porcentaje de horas diurnas, que a su vez varía de acuerdo a la latitud aproximada de la zona en estudio (Doorenbos y Pruitt, 1976). La fórmula anterior fue considerada en el presente estudio como Blaney-Criddle sencillo.

Adicionalmente, se probó una modificación a la fórmula con la introducción de un factor de corrección  $k$  que ahora estaría conformado por un  $k$  de cultivo y un  $k$  dependiente de la temperatura (Grassi, 1975). Esta segunda ecuación fue considerada para el presente trabajo como "Blaney-Criddle completo".

**Hargreaves:** Propone a la temperatura, humedad relativa media diaria, velocidad del viento, insolación y la altitud como factores para la determinación de la ET (Hargreaves, 1968).

**García-López:** Según su estudio, la fórmula propuesta se adapta a la banda comprendida desde los 15° N hasta los 15° S de latitud. Las variables utilizadas son la temperatura media en °C y la humedad relativa media de las horas diurnas (García y López, 1970).

Después de aplicar las seis fórmulas se calcularon los totales anuales de ETo de las cinco estaciones y en cada una de estas se obtuvieron seis valores de evapotranspiración para cada año.

Posteriormente, se calcularon los coeficientes de correlación entre las dos variables para valores mensuales: EV de la tina clase A vs. ETo de los

seis procedimientos. Se realizó análisis de correlación paramétrico para estudiar en qué grado se relacionan dos variables que forman pares ordenados e interrelacionados.

La literatura no señala una frontera definida para los valores de coeficientes de correlación "r", aunque existen experiencias de investigadores como De Juan (1993) que proponen rangos de 0,71 a 0,87 como correlaciones "muy altas" y de 0,57 a 0,70 como "aceptables". En esta investigación se tomó  $r=0,635$  que representa el valor medio del rango propuesto por De Juan (1993) como aceptable.

Al calcular los coeficientes  $r$  se determinó la región crítica en la cual se observó la significancia del resultado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las correlaciones mensuales se pueden apreciar en el Cuadro 1.

La fórmula mejor adaptada a los datos de la estación Mesa de Cavacas fue la de Hargreaves con un  $r = 0,80$ , luego Penman-Monteith con  $r = 0,78$  y García-López con  $r = 0,67$ , todos altamente significativos ( $P \leq 0,01$ ) (Cuadro 1). Similarmente, en un estudio con lisímetros en el estado Lara, la fórmula que mejor reprodujo los valores de ETo fue la de Penman-Monteith (Pire et al., 1998).

**Cuadro 1.** Correlación de valores mensuales

|           | Thornthwaite | Blaney-Criddle Completo | Blaney-Criddle Sencillo | García-López | Hargreaves | Penman-Monteith |      |
|-----------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------|------------|-----------------|------|
| Cavacas   | r            | 0,40                    | -0,09                   | 0,67         | 0,80       | 0,78            |      |
|           | p            | 0,00                    | 0,28                    | 0,00         | 0,00       | 0,00            |      |
|           | Signif.      | **                      | *                       | ns           | **         | **              | **   |
| Naranjal  | r            | 0,10                    | 0,13                    | 0,13         | 0,26       | 0,66            | 0,72 |
|           | p            | 0,25                    | 0,11                    | 0,14         | 0,00       | 0,00            | 0,00 |
|           | Signif.      | ns                      | ns                      | ns           | **         | **              | **   |
| Yaritagua | r            | -0,10                   | -0,18                   | -0,31        | 0,28       | 0,80            | 0,65 |
|           | p            | 0,25                    | 0,03                    | 0,00         | 0,00       | 0,00            | 0,00 |
|           | Signif.      | ns                      | *                       | **           | **         | **              | **   |
| Tarabana  | r            | 0,20                    | 0,21                    | 0,19         | 0,28       | 0,31            | 0,40 |
|           | p            | 0,01                    | 0,01                    | 0,03         | 0,00       | 0,00            | 0,00 |
|           | Signif.      | *                       | *                       | *            | **         | **              | **   |
| Quíbor    | r            | 0,37                    | 0,02                    | 0,06         | 0,02       | 0,13            | 0,14 |
|           | P            | 0,00                    | 0,80                    | 0,49         | 0,77       | 0,11            | 0,08 |
|           | Signif.      | **                      | ns                      | ns           | ns         | ns              | Sig  |

r: coeficiente de correlación, p: tamaño de la zona crítica, \*\* altamente significativo, \*significativo, ns- no significativo

Según lo expresado por Allen et al. (1998), las ecuaciones que relacionan elementos aerodinámicos de radiación, insolación, temperatura y humedad relativa serán las de mejor actuación, como lo demuestran las altas correlaciones obtenidas con la ecuación de Hargreaves y Penman-Monteith.

Al realizar las correlaciones de los valores acumulados mensuales en la estación Naranjal (Cuadro 1), se repiten dos de las fórmulas anteriores, sólo que esta vez Penman-Monteith posee el mayor coeficiente de correlación con 0,72 y Hargreaves con 0,66.

Las ecuaciones de Hargreaves y Penman-Monteith fueron también las más adaptadas a la estación Yaritagua, con coeficientes de 0,80 y 0,65, respectivamente (Cuadro 1).

Es importante acotar que en las estaciones Mesa de Cavacas, Naranjal y Yaritagua, las ecuaciones dependientes de la temperatura media y humedad relativa obtuvieron coeficientes de correlación bastante bajos. Allen et al. (1998) afirman que a pesar de que los métodos de temperatura son una herramienta válida para aquellas zonas que sólo poseen estos datos, los valores provenientes de dichas ecuaciones siempre serán profundamente afectados por las condiciones locales y por las calibraciones.

En las estaciones de Tarabana y Quíbor no se obtuvieron valores aceptables de  $r$  (Cuadro 1). Este resultado se debe a la insuficiencia de datos climatológicos en sus registros, lo que afectó de manera categórica la posibilidad de detectar alguna correlación.

En resumen, las ecuaciones de Penman-Monteith y Hargreaves obtuvieron, en la mayoría de los casos, los más altos valores de coeficiente de correlación, demostrando su efectividad cuando se dispone de datos necesarios para su aplicación. Sin embargo, es importante mencionar que las fórmulas restantes constituyen una herramienta aceptable cuando no se cuenta con los datos climatológicos suficientes o de procedencia confiable tal como lo señalan Allen et al. (1998) quienes indican que se pueden recomendar muchos métodos para el cálculo de la ETo basado en el tipo de datos climáticos que se posea.

## CONCLUSIONES

La ecuación de Hargreaves fue la de mejor

actuación en la estación de Mesa de Cavacas y Yaritagua con  $r=0,80$ , y la segunda mejor en la estación Naranjal con  $r=0,66$ .

La fórmula de Penman-Monteith obtuvo un coeficiente de correlación de 0,72 siendo la que mejor reprodujo la ETo en la estación Naranjal y fue la segunda más adaptada en las estaciones de Mesa de Cavacas ( $r=0,78$ ) y Yaritagua ( $r=0,65$ ), respectivamente.

La ecuación de García-López obtuvo un  $r$  de 0,67 en la estación Mesa de Cavacas.

Las ecuaciones de Thornthwaite y Blaney-Criddle no produjeron valores aceptables en ninguna de las estaciones estudiadas mientras que en las estaciones de Tarabana y Quíbor no se obtuvieron valores aceptables de  $r$ .

## LITERATURA CITADA

- Allen, R., S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO. Roma.
- De Juan, J. 1993. Agronomía del Riego. Mundi - Prensa. Madrid.
- Doorenbos, J. y W. Pruitt. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. Paper 24. FAO. Roma.
- Ewel, J., A. Madriz y J. Tosi. 1976. Zonas de vida de Venezuela. Memorias sobre el mapa ecológico. FONAIAP. Caracas.
- García, J. y J. López. 1970. Fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial adaptada al trópico (15° N - 15° S). Agronomía Tropical 20(5): 335-345.
- Grassi, C. 1975. Estimación de los usos consuntivos de agua y requerimientos de riego con fines de formulación y diseño de proyectos. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Mérida.
- Hargreaves, G. 1968. Consumptive use derived from evaporation pan data. Journal of the Irrigation and Drainage (ASCE). 94: 97-105.
- Khan, L., J. Gil y R. Acosta. 1998. Diseño y

- funcionamiento de un lisímetro hidráulico para medición de la evapotranspiración potencial. *Bioagro* 10 (1): 11-18.
9. López, J. y M. Dennett. 2005. Comparación de dos métodos para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) en una zona semiárida de Venezuela. *Bioagro* 17(1): 41-46.
  10. Martelo, M.T. 1989. Selección de la fórmula de evapotranspiración mejor adaptada al área de Guanare-Masparro. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 15 (3-4): 185-206.
  11. Méndez A. y E. Rojas. 1973. Los métodos más adecuados para estimar la evapotranspiración potencial en Venezuela. *Agronomía Tropical* 23(5): 445-449.
  12. Pire, R., J. López y R. Rodríguez. 1998. Evapotranspiración de la grama San Agustín (*Stenotaphrum secundatum*) en la zona de Tarabana, estado Lara. XLIV Annual Meeting of the Interamerican Society for Tropical Horticulture. Barquisimeto, Venezuela. Abstract p. A-2.
  13. Pire, R. y R. Rodríguez. 2003. Evapotranspiration of bell pepper in the tropics as measured by a weighing lysimeter. 4<sup>th</sup> International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops. Davis, California. Abstract. p. 105
  14. Suárez, J. 1990. Determinación de la fórmula de evapotranspiración potencial que más se adapta al área de la cuenca del Lago de Valencia. MARNR. Caracas.
  15. Thornthwaite, G. W. 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Rev.* 38: 59-64.