



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,  
A.C.  
México

Villaman Peña, Ramon; Tijerina Chávez, Leonardo; Quevedo Nolasco, Abel; Crespo Pichardo,  
Guillermo  
Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el  
área de Montecillo, México  
Terra Latinoamericana, vol. 19, núm. 3, julio-septiembre, 2001, pp. 281-291  
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.  
Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57319310>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

# **COMPARACION DE ALGUNOS METODOS MICROMETEOROLOGICOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACION, EN EL AREA DE MONTECILLO, MEXICO**

**Comparison of Some Micrometeorological Methods to Estimate Evapotranspiration  
in Montecillo Area, Mexico**

**Ramon Villaman Peña<sup>1</sup>, Leonardo Tijerina Chávez<sup>1‡</sup>, Abel Quevedo Nolasco<sup>1</sup>  
y Guillermo Crespo Pichardo<sup>1</sup>**

## **RESUMEN**

Con el propósito de estudiar cuáles métodos micrometeorológicos estiman mejor la evapotranspiración (ET) en tiempo real para el cultivo de maíz (*Zea mays L.*), se compararon los métodos Thornthwaite-Holzman, Aerodinámico, Balance de energía (Relación de Bowen), Sistema de Bowen y Penman-Monteith, con la evapotranspiración medida en el lisímetro de pesada como referencia. El estudio se realizó en el lote experimental del Colegio de Postgraduados donde se localiza la estación agrometeorológica. Para el registro de las variables meteorológicas utilizadas por cada uno de los métodos antes indicados, se instalaron dos estaciones automatizadas colocadas a 5 m del lisímetro de pesada en los lados este y oeste. Las mismas se equiparon con sensores de humedad, temperatura y velocidad del viento a 1.5 y 2.5 m de altura por arriba del nivel del suelo, quedando el más bajo a 0.25 m por encima del nivel del dosel del cultivo de maíz. Para estimar la temperatura del suelo se midió a 0.02 y 0.12 m de profundidad con los geotermómetros de la estación CR10, y con los geotermómetros del Sistema de Bowen se midió a 0.02, 0.06 y 0.08 m de profundidad. Ambas estaciones se programaron para registrar el promedio de las variables meteorológicas cada 20 minutos. Se hizo la comparación del cálculo de la evapotranspiración acumulada para cada día por los métodos indicados, con respecto a la medida en el lisímetro de pesada, la cual se utilizó como referencia. Los resultados indican que la evapotranspiración calculada por el método de Penman-Monteith, el Balance de energía y la medida

con el Sistema de Bowen fueron los que mejor estimaron la ET.

**Palabras clave:** *Lisímetro de pesada, balance de energía, método Thornthwaite-Holzman, método aerodinámico, Relación de Bowen, método Penman-Monteith.*

## **SUMMARY**

The present work was realized to compare several micrometeorological methods to estimate evapotranspiration (ET) in corn crop (*Zea mays L.*): Thornthwaite-Holzman, Aerodynamic, Energy balance (Bowen ratio), Bowen system and Penman-Monteith, with the weighted lysimeter as reference. The study was conducted in the experimental field of the 'Colegio de Postgraduados' in the plot around the agrometeorological station. To determine the meteorological variables used in each of the mentioned methods to estimate the ET, we installed two automatic stations at 5 m from the weighted lysimeter on east and west sides. The meteorological stations were equipped with humidity, temperature, and wind velocity sensors at a height of 1.5 and 2.5 m above ground level. The lowest sensor was 0.25 m above the top of the corn crop. Soil temperature was measured at 0.02 and 0.12 m soil depth in the CR10 station; and for the Bowen system we measured at 0.02, 0.06, and 0.08 m soil depth. Both stations were programmed to register the meteorological average values every 20 minutes. The total ET estimated by each method were compared with the ET measured by the lysimeter; results show that the Penman-Monteith, Energy balance methods and the ET measured by the Bowen system, best estimated ET.

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, México.

<sup>‡</sup> ltijerina@colpos.colpos.mx)

Recibido: Febrero de 1999. Aceptado: Mayo de 2001.  
Publicado en Terra: 19: 281-291.

**Index words:** *Weighted lysimeter, energy balance, Thornthwaite-Holzman method, aerodynamic method,*

*Bowen ratio, Bowen system, Penman-Monteith method.*

## INTRODUCCION

El desarrollo de un país depende, en gran medida, de sus posibilidades para alcanzar una producción agrícola que le permita satisfacer sus necesidades y obtener excedentes para exportación. Para lograr esas cantidades de producción, el agua juega un papel importante, siempre y cuando sea suministrada de manera eficiente. El agua representa 80% o más del peso de las plantas herbáceas y alrededor de 50% de las leñosas, es decir, una vez absorbida por las raíces, el agua es transferida a la atmósfera a través de los estomas de las hojas como resultado del gradiente de presión de vapor entre las cavidades estomáticas y la atmósfera (Palacios, 1995).

El conocimiento de los valores de la evapotranspiración es importante por las aplicaciones que se pueden derivar. López (1989) y Aguilera y Martínez (1996) indicaron las siguientes aplicaciones: a) Para determinar el área que puede regarse con un determinado volumen de agua disponible. b) Es la base para elaborar calendarios teóricos de riego de cultivos. c) Estimar los volúmenes de agua que sean necesarios para auxiliar a los cultivos en caso de que la lluvia sea insuficiente para su buen desarrollo. d) Para determinar en grandes áreas o cuencas, volúmenes de agua que se requieran drenar. e) Para seleccionar los cultivos más adecuados en zonas de agricultura de temporal. f) Permite determinar la lámina adicional de riego necesaria para la prevención de problemas de ensalitramiento de los suelos. g) Permite determinar, en forma general, la eficiencia con la que se está aprovechando el agua y, por lo mismo, planear debidamente el mejoramiento y la superación de todo el conjunto de actividades que se generan en los Distritos de Riego para proporcionar el agua a los cultivos oportunamente. Es importante señalar, además, que los principales factores climáticos que afectan la evapotranspiración, según Ludlow (1970), son: radiación solar, temperatura, brillo solar, humedad atmosférica, precipitación y velocidad del viento. Tijerina (1992) citó que los principales factores de las plantas que afectan la evapotranspiración son: el grado de cobertura, el área foliar, la altura del cultivo, la rugosidad de la cobertura y el control estomático de la transpiración. El mismo autor señaló que los factores del suelo que afectan la evapotranspiración son: el contenido de

humedad, la profundidad del manto friático y la salinidad.

En la actualidad existe una gran cantidad de métodos indirectos que permiten estimar la evapotranspiración a partir de variables meteorológicas (López *et al.*, 1991). Dichos métodos involucran el empleo de ecuaciones empíricas, las cuales requieren de información climatológica fácil de conseguir y, por lo tanto, tienen gran utilidad en la planeación agrícola.

Aguilera y Martínez (1996) indicaron que existen varios métodos para estimar la evapotranspiración, los cuales se han clasificado en métodos directos e indirectos. Los directos proporcionan información directa del total de agua requerida por los cultivos, utilizando para ello instrumentos para la determinación, y proporcionan valores muy apegados a la realidad y, a la vez, sirven para ajustar los parámetros de los métodos empíricos. Entre éstos pueden señalarse: el método gravimétrico, lisimétrico y el evapotranspirómetro de Thornthwaite. Los indirectos proporcionan una estimación del requerimiento de agua a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas; los mismos se han clasificado en climatológicos y micrometeorológicos. Los climatológicos estiman la evapotranspiración en períodos mínimos de una semana, dentro de éstos tenemos: Penman modificado, evaporación del tanque tipo "A", Turc, Jensen-Haise, Stephens, Blaney-Criddle, Thornthwaite, Doorenbos-Pruitt, Ivánov y Papadakis. Actualmente, los avances tecnológicos en la construcción de estaciones automatizadas para el registro y almacenamiento de datos, en conjunto con el manejo de sistemas de computación para la programación del riego en tiempo real, cada vez son más comunes. Los agricultores han reconocido las ventajas que tiene el disponer de la información meteorológica oportuna y en tiempo real para la toma de decisiones en la planeación y operación de sus actividades agropecuarias. Los métodos micrometeorológicos estiman la evapotranspiración (ET) en cortos intervalos de tiempo (menores que 30 min), por lo que permiten estimar este parámetro en tiempo real (Rosenberg, 1974). Dentro de estos métodos se encuentran los que se basan en el Balance de energía, como el método de la Relación de Bowen; dentro de los Aerodinámicos podemos mencionar los que se basan en el transporte de masa como es el caso del método de Thornthwaite-Holzman, los

Aerodinámicos, propiamente dicho los métodos de correlación de transporte turbulento y, finalmente, los mixtos que consideran tanto el Balance de energía como el componente Aerodinámico; entre éstos se pueden mencionar los métodos de Penman, Van Bavel y los que involucran, además, la resistencia de la planta al transporte de vapor de agua, como es el caso del método de Penman-Monteith.

La programación del riego en tiempo real requiere de la estimación de la evapotranspiración en períodos cortos y es por ello que en la presente investigación se planteó como objetivo estimar la evapotranspiración en intervalos de 20 min, y obtener el acumulado para cada día, mediante los siguientes métodos micrometeorológicos: Thornthwaite-Holzman, Aerodinámico, Balance de energía, Sistema de Bowen y Penman-Monteith, y comparar los valores de la ET estimada por cada uno de ellos con los medidos en el lisímetro de pesada para los mismos intervalos.

En el presente estudio se estableció como hipótesis que no hay diferencia a nivel diario entre la evapotranspiración calculada por cada uno de los métodos y la observada para el mismo período en el lisímetro de pesada.

Se asumió que la ubicación del lisímetro de pesada y de las estaciones automatizadas cumplen con requerimientos de "fetch" para permitir que se forme el perfil logarítmico de la velocidad del viento; éstos son: 1) que la superficie sembrada por el cultivo es lo suficientemente extensa, sobre todo en la dirección del viento dominante, que permite el establecimiento del perfil logarítmico de la velocidad del viento; 2) que durante el período de observación se presentan condiciones de estabilidad neutral, que permitan que los coeficientes de transporte turbulento en dirección vertical son iguales para el caso del transporte del momento, vapor de agua y calor sensible; 3) que los instrumentos utilizados son los suficientemente sensibles para detectar diferencias en temperatura, humedad y velocidad del viento a dos alturas.

## MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se realizó en los terrenos de la estación agrometeorológica del Colegio de Postgrados en Montecillo, estado de México, localizada a una latitud de 19°21' norte y una longitud de 98°54' oeste, a una altitud de 2240 m. Los suelos del área experimental se clasifican dentro de la serie Montecillos, poseen una textura franco arenosa, capacidad de campo de 20.7%, punto de marchitez

permanente de 10.3% y densidad aparente de 1.3 g cm<sup>-3</sup>; son suelos profundos y presentan poca variabilidad en sus diferentes capas (Zermeño, 1984). La variedad de maíz (*Zea mays L.*) fue un híbrido experimental, el cual proporcionó la Especialidad de Producción de Semilla del Instituto de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Postgrados. La siembra fue directa a una separación entre hileras de 0.80 m y de 0.40 m entre plantas, obteniéndose una densidad de siembra de 60 000 plantas ha<sup>-1</sup>.

El período de observación se llevó a cabo cuando el cultivo tenía aproximadamente 1 m de altura y se hicieron las observaciones hasta que la altura de los tripiés donde se colocan los sensores de las estaciones automáticas lo permitieron; en este artículo, únicamente se ilustra el cálculo para cuatro días: 9, 10, 11 y 14 de julio de 1998.

La evapotranspiración se midió con un lisímetro de pesada el cual consta de un monolito de suelo inalterado de 1.80 m de largo por 1.80 m de ancho y 1.50 m de profundidad, sus lados están orientados aproximadamente en la dirección de los puntos cardinales, el contenedor está instalado sobre un sistema de pesada electrónico que tiene la capacidad de registrar diferencias en peso de 50 g, equivalente a una lámina de 0.0154 mm. Las lecturas del peso se obtuvieron continuamente en un registrador digital (Peña, 1974).

A ambos lados del lisímetro de pesada, a 5 m en direcciones este y oeste, se instalaron dos estaciones meteorológicas automáticas marca Campbell Scientific, modelo CR10, y otra estación integrada conocida comercialmente como Sistema de Bowen, modelo 21X, la cual permite calcular la evapotranspiración directamente. La estación automática, modelo CR10, consta de: dos sensores para medir la temperatura del aire y la humedad atmosférica, uno modelo vaisala Helsinki HMP35C y el otro modelo 207, ambos colocados a 1.50 y 2.50 m sobre el nivel del suelo; dos anemómetros de copa, ambos marca Met One, colocados a las mismas alturas que los anteriores; dos geotermómetros modelo 107 B para medir la temperatura del suelo a 2 y 12 cm de profundidad, con estos datos se calculó el flujo de calor del suelo. Finalmente se instaló un sensor para medir la radiación solar, marca Licor, modelo LI200, el cual se colocó a 2 m sobre el cultivo de maíz.

El Sistema de Bowen se compone de los siguientes sensores: dos platos térmicos que miden directamente el flujo de calor del suelo y éstos se

instalaron en dos sitios diferentes a aproximadamente 4 m del trípiede que soporta los demás sensores de la estación y a 8 cm de profundidad; sobre la vertical donde se instalaron los platos térmicos se colocaron dos termocoplos para medir la temperatura del suelo, a 2 y 6 cm de profundidad y, posteriormente, el sistema calcula el flujo de calor del suelo entre esas profundidades; un radiómetro neto, el cual se colocó a 2 m a partir de la superficie del suelo; un anemómetro y una veleta para medir la velocidad y dirección del viento, ambos se colocaron a 2 m con respecto al suelo; dos termocoplos de cromo-constantano, para medir la temperatura del aire, colocados a dos alturas sobre el cultivo (1.5 y 2.5 m, con respecto al suelo); dos psicrómetros de precisión ubicados a dos alturas sobre el nivel del cultivo, para medir la humedad atmosférica; los mismos están dotados de un sistema integrado para medir el flujo de vapor de agua contenido en el aire, el cual consiste en un sistema de bombeo para colectar aire, el cual al pasar por un espejo, cuya función es enfriar el aire, se determina la temperatura del punto de rocío y calcula la presión de vapor actual y a saturación; con estos datos se cuantifica el gradiente de presión de vapor entre las dos alturas. Dichas estaciones se programaron para que registraran el promedio de cada una de las variables meteorológicas utilizadas en la investigación, cada 20 minutos. Posteriormente, se procesó la información para calcular la evapotranspiración a nivel diario.

### Método de Thornthwaite-Holzman

Thornthwaite y Holzman (1942), tomando en cuenta que los coeficientes de transporte turbulento de momento y vertical son iguales ( $K_m = K_v$ ), propusieron que la evaporación puede determinarse a través de la siguiente ecuación:

$$E = \rho_a k^2 \frac{(q_2 - q_1)(U_2 - U_1)}{[\ln(Z_2/Z_1)]^2} \quad (1)$$

Donde: E = Evaporación (cal  $\text{cm}^{-2}$  dia $^{-1}$ );  $\rho_a$  = Densidad del aire ( $\text{g cm}^{-3}$ ); k = Constante de Von Karman 0.4 (adimensional);  $q_i$  = Humedad específica a las alturas 1 y 2 ( $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{aire}}$ );  $U_i$  = Velocidad del viento a las alturas 1 y 2 ( $\text{cm s}^{-1}$ ); ln = Logaritmo natural;  $Z_2$  y  $Z_1$  = Alturas a las que se hacen las observaciones, medidas desde la superficie del suelo (cm).

### Método Aerodinámico

Según Rosenberg (1974), la ecuación de transporte de flujo de calor latente de evaporación es función de la densidad del aire, del coeficiente de transporte turbulento vertical  $k_v$  y del gradiente de humedad específica a dos alturas. Está dado por la siguiente ecuación:

$$E = \rho_a K_v \frac{\delta q}{\delta z} \quad (2)$$

Donde: E = Evaporación (cal  $\text{cm}^{-2}$  dia $^{-1}$ );  $\rho_a$  = Densidad del aire ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $K_v$  = Coeficiente de transporte turbulento para vapor de agua ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ );  $\delta q$  = Diferencia de humedad específica a dos alturas ( $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}_{\text{aire}}$ );  $\delta z$  = Diferencia entre las dos alturas de observación (cm).

Para determinar el coeficiente de transporte turbulento es necesario determinar el momento  $\tau$ , mediante la siguiente ecuación:

$$K_v = \left( \frac{\tau}{\rho_a} \right) \left( \frac{dU}{dZ} \right)^{-1} = \frac{\tau (Z_2 - Z_1)}{\rho_a (U_2 - U_1)} \quad (3)$$

Donde:  $K_v$  = Coeficiente de transporte turbulento vertical del vapor de agua ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ );  $\tau$  = Momento (dinas  $\text{cm}^2$ );  $\rho_a$  = Densidad del aire ( $\text{g cm}^{-3}$ );  $Z_i$  = Distancia vertical medida desde la superficie del suelo (cm);  $U_i$  = Velocidad del viento medida a la altura i ( $\text{cm s}^{-1}$ ).

### Método del Balance de Energía o (Relación de Bowen)

Bowen, citado por Rosenberg (1974), indicó que este método considera para la determinación de la evapotranspiración el balance de energía, la presión atmosférica, las diferencias de temperatura y la concentración de vapor de agua en el aire. Este autor citó, además, que este método ha sido ampliamente usado por diferentes investigadores para estimar el flujo de vapor de agua a partir de superficies evaporantes. El flujo de vapor de agua se calcula para períodos cortos (por ejemplo, cada media hora o menos), partiendo de la ecuación del balance de energía mediante la siguiente ecuación:

$$Rn = -(\lambda E + H + S + M + F) \quad (4)$$

Donde:  $R_n$  = Radiación neta medida ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ );  $\lambda E$  = Flujo de calor latente de evaporación ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ );  $S$  = Flujo de calor del suelo ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ).

Asumiendo que la energía consumida en fotosíntesis ( $F$ ) y la energía metabólica ( $M$ ) es despreciable, el Balance de energía queda como:

$$R_n = -(\lambda E + H + S) \quad (5)$$

Bowen propuso que siendo  $\lambda E$  y  $H$  los flujos de energía más importantes, para determinar el flujo de calor latente de evaporación propuso la relación  $\beta = \lambda E / H$  que es conocida como Relación de Bowen y puede determinarse de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{(R_n - LE - S)}{\lambda E} = \frac{PG_p \left( \frac{Kh}{Kv} \right) \left( \frac{\partial T / \partial z}{\partial e / \partial z} \right)}{\lambda E} = \frac{PG_p (\Delta T)}{\lambda E (\Delta e)} \quad (6)$$

por lo tanto:

$$\lambda E \approx \frac{(R_n - S)}{(1 + \beta)} \quad (7)$$

Donde:  $\beta$  = Relación de Bowen (adimensional);  $P$  = Presión atmosférica (mbar);  $\lambda$  = Calor de vaporización del agua ( $580.4 \text{ cal g}^{-1}$  a  $30^\circ\text{C}$ );  $\epsilon$  = Relación de masa del vapor de agua y aire 0.622 (adimensional);  $\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre dos alturas ( $T_2 - T_1$ ),  $T_2$  y  $T_1$  es la temperatura del aire ( $^\circ\text{C}$ );  $\Delta e$  = Diferencia de presión de vapor de agua entre dos alturas ( $e_2 - e_1$ ),  $e_2$  y  $e_1$  es la presión de vapor calculada a partir de la humedad relativa (mbar);  $C_p$  = Capacidad calorífica del aire seco ( $0.24 \text{ cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Este método considera que los coeficientes de transporte turbulento vertical para calor y vapor  $Kh$  y  $Kv$ , respectivamente, son iguales ( $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ). Siempre y cuando la altura a la que se instalan los sensores en la estación estén localizados dentro de la capa de frontera interna a partir del borde del cultivo, la superficie sea lo suficientemente extensa para promover la formación de la capa de frontera, y que predomine el flujo en masa en lugar de la difusión molecular y se presenten condiciones de estabilidad neutral.

Rosenberg (1974) citó que el cálculo del flujo de calor está dado por la siguiente ecuación:

$$S = K (dT/dZ) \quad (8)$$

Donde:  $K$  = Conductividad térmica del suelo (suelo ligero con raíces) ( $2.70 \times 10^{-4} \text{ cal cm}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1}$ );  $dT$  = Diferencia de temperatura del suelo ( $^\circ\text{C}$ );  $dZ$  = Diferencia de altura entre los sensores (cm).

### Descripción de la Estación Automática 21X (Sistema de Bowen)

Con base en el instructivo de Campbell Scientific (1995), este sistema obtiene directamente la evapotranspiración, utilizando para la determinación los siguientes parámetros:

$$BR = \frac{P * Cp * AVG.dT}{[0.622 * EW * (D.V.P.)]} \quad (9)$$

Donde:  $BR$  = Relación de Bowen (adimensional);  $P$  = Presión atmosférica calculada a partir de la elevación (kPa);  $Cp$  = Calor específico del aire ( $1.01 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );  $AVG.dT$  = Promedio de la diferencia de temperatura del aire a dos alturas ( $^\circ\text{C}$ );  $0.622$  = Peso del vapor del aire (adimensional);  $EW$  = Calor latente de evaporación ( $\text{kJ/kg}$ );  $D.V.P.$  = Diferencia de vapor de presión ( $\text{W m}^{-2}$ ).

La presión atmosférica puede calcularse a partir de la elevación, asumiendo una atmósfera estándar (Wallace y Hobbs, 1977).

$$P = 101.325 \left[ 1 - \frac{E}{44307.69231} \right]^{5.25328} \quad (10)$$

Donde:  $P$  = Presión atmosférica (mbar);  $E$  = Elevación sobre el nivel del mar (m)

$$S = \frac{dT_s}{T * D * BD * (CS + W * CW)} \quad (11)$$

Donde:  $S$  = Calor almacenado del suelo ( $\text{W m}^{-2}$ );  $dTs$  = Diferencia de temperatura del suelo ( $^\circ\text{C}$ );  $T$  = Tiempo de ejecución (20 min);  $D$  = Profundidad de los platos (0.08 m);  $BD$  = Densidad del suelo ( $1300 \text{ kg m}^{-3}$ );  $CS$  = Calor específico del aire seco ( $830 \text{ J/kg }^\circ\text{C}^{-1}$ );  $W$  = Contenido gravimétrico de agua en el suelo ( $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{Soil}}$ );  $CW$  = Calor específico del agua ( $\text{J/kg }^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Según el instructivo, el flujo de calor del suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$G = F + S \quad (12)$$

Donde: G = Flujo de calor del suelo ( $\text{W m}^{-2}$ ); F = Flujo de calor del suelo medido a 8 cm de profundidad ( $\text{W m}^{-2}$ ); S = Calor almacenado ( $\text{W m}^{-2}$ ).

$$LE = \frac{(Rn - G)}{(1 + BR)} \quad (13)$$

Donde: LE = Flujo de calor latente de evaporación ( $\text{W m}^{-2}$ ); Rn = Radiación neta ( $\text{W m}^{-2}$ ); G = Flujo de calor del suelo ( $\text{W m}^{-2}$ ).

### Método de Penman-Monteith

Allen y Jensen, citados por el Servicio de Conservación del Suelo del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (1997), consideraron en la estructura de la ecuación el balance de energía, el término aerodinámico y la resistencia de la planta al transporte del vapor de agua. Se recomienda este método cuando se dispone de información sobre: temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. El método también puede ajustarse a las características físicas de una estación meteorológica local. Este método está dado por la siguiente ecuación:

$$ETo = \left( \frac{1}{\lambda} \left[ \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) R_n - S \right] + \left( \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) 0.622 \frac{K_1 \lambda_p}{P} \frac{(e_s - e_a)}{r_a} \right] \quad (14)$$

Donde: ETo = Evapotranspiración del cultivo de referencia ( $\text{cm dia}^{-1}$ );  $\lambda$  = Calor latente de vaporización del agua ( $\text{cal cm}^{-2}$ ); Rn = Radiación neta ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ); S = Flujo de calor del suelo ( $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{mbar}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\gamma$  = Constante psicrométrica ( $\text{mbar}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $\gamma'$  = Constante psicrométrica ajustada ( $\text{mbar}^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  $K_1$  = Coeficiente de proporcionalidad para asegurar que ambos términos tienen las mismas unidades; P = Presión barométrica media (mbar);  $e_s$  = Presión de vapor media a saturación (mbar);  $e_a$  = Presión de vapor actual (mbar);  $r_a$  = Resistencia aerodinámica al calor sensible y la transferencia de vapor ( $\text{día km}^{-1}$ ).

### Determinación de las Condiciones de Estabilidad

Las condiciones de estabilidad atmosférica son función de la magnitud de los gradientes de temperatura y velocidad del viento entre dos alturas. Según Rosenberg (1974), el número de Richardson (Ri) se calcula para determinar las condiciones de estabilidad atmosférica, el cual indica: si es positivo existen condiciones estables, si es cero hay condiciones de estabilidad neutral y si es negativo prevalecen condiciones de inestabilidad; este parámetro se calculó para cada uno de los días (9, 10, 11 y 14 de julio de 1998 de 0 a 24:00 h), mediante la siguiente ecuación:

$$Ri = \left[ g \left( \frac{d\theta}{dz} \right) \right]^* \left[ Ta \left( \frac{dU}{dZ} \right)^2 \right]^{-1} \quad (15)$$

Donde: g = Aceleración de la gravedad ( $980 \text{ cm s}^{-2}$ );  $d\theta/dZ$  y  $dU/dZ$  = Gradientes de temperatura potencial y velocidad del viento, respectivamente; Ta = Temperatura promedio medida a dos alturas (K).

### Medición de la Evapotranspiración con el Lisímetro de Pesada

En el Cuadro 1 se presentan las observaciones de la evapotranspiración registradas por el lisímetro de pesada cada media hora para las 24 horas del 9 de julio de 1998. La evapotranspiración se calculó a través del balance hídrico, teniendo en cuenta que la evapotranspiración es igual al peso inicial, menos el peso final, más la lluvia, menos el drenaje. Este procedimiento se realizó para todos los demás días que se reportan en este artículo (10, 11 y 14 de julio de 1998).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Obtención de la Evapotranspiración con los Diferentes Métodos

Con las variables meteorológicas, medidas en las estaciones automáticas descritas, para cada uno de los días de la investigación, se procedió en primer lugar a verificar el balance de energía y, posteriormente, se calculó la evapotranspiración con cada uno de los métodos:

**Cuadro 1.** Cálculo utilizado para obtener la evapotranspiración por diferencia de peso (en  $\text{mm h}^{-1}$ ) mediante el lisímetro, para el día 9 de julio de 1998, de 0 a 24:00 h. Montecillo, Edo. de México.

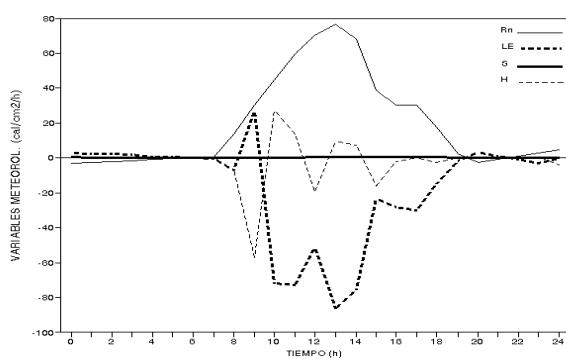
Hora	Peso	Dif.		Lluvia	Lámina	
		salida	entrada		mm $\text{h}^{-1}$	mm $\text{d}^{-1}$
	kg			mm		
0:00	1070.5	0.0		0.00	0.15	6.87
0:30	1070.0	-0.5		0.15		
1:00	1070.0	0.0		0.00	0.15	
1:30	1069.5	-0.5		0.15		
2:00	1069.5	0.0		0.00	0.15	
2:30	1089.0	-0.5		0.15		
3:00	1069.0	0.0		0.00	0.15	
3:30	1068.5	-0.5		0.15		
4:00	1068.5	0.0		0.00	0.15	
4:30	1068.0	-0.5		0.15		
5:00	1068.0	0.0		0.00	0.15	
5:30	1068.0	0.0		0.00		
6:00	1067.5	-0.5		0.15	0.15	
6:30	1067.5	0.0		0.00		
7:00	1067.5	0.0		0.00		0.00
7:30	1067.0	-0.5		0.15		
8:00	1067.0	0.0		0.00	0.15	
8:30	1087.0	0.0		0.00		
9:00	1066.5	-0.5		0.15	0.15	
9:30	1066.5	0.0		0.00		
10:00	1085.5	0.0		0.00	0.00	
10:30	1065.0	-0.5		0.15		
11:00	1063.0	-2.0		0.62	0.77	
11:30	1063.0	0.0		0.00		
12:00	1061.5	-1.5		0.46	0.48	
12:30	1060.0	-1.5		0.46		
13:00	1058.5	-1.5		0.46	0.93	
13:30	1057.5	-1.0		0.31		
14:00	1057.0	-0.5		0.15	0.46	
14:30	1058.0	-1.0		0.31		
15:00	1055.0	-1.0		0.31	0.62	
15:30	1053.5	-1.5		0.46		
16:00	1053.0	-0.5		0.15	0.62	
17:00	1052.0	-1.0		0.31	0.31	
17:30	1050.5	-0.5		0.15		
18:00	1050.0	-0.5		0.15	0.31	
18:30	1051.0		1	0.35	0.04	
19:00	1050.0	-1.0			0.31	0.35
19:30	1049.5	-0.5			0.15	
20:00	1050.5		1	0.35	0.04	0.20
20:30	1049.5	-1.0			0.31	
21:00	1049.5	0.0			0.00	0.31
21:30	1049.5	0.0			0.00	
22:00	1049.5	0.0			0.00	0.00
22:30	1049.0	-0.5			0.15	
23:00	1049.0	0.0			0.00	0.15
23:30	1049.0	0.0			0.00	
24:00	1049.0	0.0			0.00	0.00

### Balance de Energía

Para verificar el comportamiento del balance de energía se aplicó la Ecuación 5. En la Figura 1 se presentan las gráficas de los flujos de radiación neta,

calor latente de evaporación, calor sensible y calor del suelo, para cada hora del día 9 de julio de 1998.

En la Figura 1, se observa que durante el período de las 0 a las 7:00 h los flujos de radiación neta y calor sensible son negativos, en tanto que los flujos de



**Figura 1.** Balance de energía correspondiente al día 9 de julio de 1998, de 0 a 24:00 h. Montecillo, Edo. de México.

calor latente de evaporación, y el flujo de calor del suelo fueron positivos, lo que indicó que la superficie del suelo se estaba enfriando, y durante este período ocurre condensación sobre la cobertura del cultivo siendo más evidente entre las 8:00 y las 9:00 h. De las 7:00 a 19:00 h, el flujo de radiación neta fue positiva, y el flujo de calor latente de evaporación fue negativo. Respecto al calor sensible, se observa que para ese día estuvo cambiando de positivo a negativo debido a la nubosidad que se presentó, mientras que el flujo de calor del suelo permaneció casi sin cambio. Después de las 19:00 a las 24:00 h, la radiación neta fue ligeramente negativa, esto indica que en la noche el aire de la superficie cercana al suelo se enfrió.

Los cálculos para cada una de las metodologías se hizo por intervalos de una hora, ya que el lisímetro se programó para que registrara las lecturas cada 30 minutos.

#### Determinación de la Evapotranspiración por el Método de Thornthwaite-Holzman

Con la Ecuación 1 se estimó la evapotranspiración, observándose en los Cuadros resumen del 2 al 5 que este método estimó la evapotranspiración en  $\pm 85\%$  respecto al lisímetro de pesada; esta variación fue motivada principalmente porque no se presentaron condiciones de estabilidad neutral y a la mala ubicación de la estación, ya que por los obstáculos existentes a los alrededores del área de estudio no se da oportunidad a que se forme el perfil logarítmico de la velocidad del viento y también probablemente a la falta de precisión de los sensores de velocidad del viento que no registran velocidades del viento menores que  $10 \text{ cm s}^{-1}$  y a que no se

**Cuadro 2.** Evapotranspiración estimada por diferentes métodos para el día 9 de julio de 1998, de 0 a 24:00 h. Montecillo, Edo. de México.

Método	Evapotranspiración mm dia <sup>-1</sup>	%
Método de Thornthwaite-Holzman	2.80	- 59
Método Aerodinámico	3.24	- 53
Método del Balance de energía (Relación de Bowen)	7.33	+ 7
Método del Sistema de Bowen obtenido directamente	5.64	- 18
Método de Penman-Monteith	7.32	+ 7
Método del Lisímetro <sup>†</sup>	6.87	Referencia

<sup>†</sup> Método de referencia.

presentaron condiciones de estabilidad neutral, condiciones requeridas para la aplicación de este método. La sobreestimación de la evapotranspiración que puede observarse en los Cuadros 3 y 4 superó 100% a la registrada en el lisímetro de pesada, para los días 10 y 11 de julio, esto se debió a las condiciones de inestabilidad que prevalecieron durante los días de observación. Esto se comprueba con el número de Richardson que se muestra en el Cuadro 6, con los valores negativos de las 9:00 a las 23:00 h; durante las horas diurnas se tuvieron valores negativos, lo que indicó que existió inestabilidad atmosférica.

#### Determinación de la Evapotranspiración por el Método Aerodinámico

Mediante la Ecuación 2 se estimó la evapotranspiración para los días de estudio; en los Cuadros 2, 3 y 5 se muestra que este método subestima la evapotranspiración en 53, 26 y 79% respecto al método lisímétrico, para los días 9, 10 y 14 de julio, respectivamente. La subestimación se

**Cuadro 3.** Evapotranspiración estimada por diferentes métodos para el día 10 de julio de 1998, de 0 a 24:00 h. Montecillo, Edo. de México.

Método	Evapotranspiración mm dia <sup>-1</sup>	%
Método de Thornthwaite-Holzman	10.58	+ 105
Método Aerodinámico	3.83	- 26
Método del balance de energía (Relación de Bowen)	4.70	- 9
Método del Sistema de Bowen obtenido directamente	6.68	+ 29
Método de Penman-Monteith	10.19	+ 97
Método del Lisímetro <sup>†</sup>	5.17	Referencia

<sup>†</sup> Método de referencia.

**Cuadro 4.** Evapotranspiración estimada por diferentes métodos para el día 11 de julio de 1998 de 0 a 24:00 h. Montecillo, Edo. de México.

Método	Evapotranspiración	
	mm día <sup>-1</sup>	%
Método de Thornthwaite-Holzman	4.37	+ 145
Método Aerodinámico	7.96	+ 36
Método del Balance de energía (Relación de Bowen)	4.08	- 30
Método del Sistema de Bowen obtenido directamente	4.46	- 24
Método de Penman-Monteith	5.10	- 13
Método del Lisímetro <sup>†</sup>	5.87	Referencia

<sup>†</sup> Método de referencia.

debió principalmente a que esta ecuación únicamente considera los factores aerodinámicos que promueven la evapotranspiración y no toma en cuenta los factores energéticos como se ve más adelante con los siguientes métodos. La sobreestimación de 36% con respecto a la evapotranspiración del lisímetro para el día 11 de julio, y que se observa en el Cuadro 4, se puede explicar que es debida al funcionamiento inadecuado de los anemómetros y a las mismas razones explicadas en el método anterior.

#### Determinación de la evapotranspiración por el Método del Balance de Energía (Relación de Bowen)

Para estimar la evapotranspiración por esta metodología, se usó la Ecuación 7, observándose en el Cuadro 2 que este método sobreestimó en 7% al método lisímétrico, para el día 9 de julio de 1998; esta sobreestimación de la evapotranspiración se debió a que  $\beta$  está en función de las diferencias de temperatura del aire y la presión de vapor actual, por

**Cuadro 5.** Evapotranspiración estimada por diferentes métodos para el día 14 de julio de 1998 de 0 a 24:00 h. Montecillo, Edo. de México.

Método	Evapotranspiración	
	mm día <sup>-1</sup>	%
Método de Thornthwaite-Holzman	4.53	- 33
Método Aerodinámico	1.39	- 79
Método del Balance de energía (Relación de Bowen)	5.83	- 13
Método del Sistema de Bowen obtenido directamente	6.69	- 1
Método de Penman-Monteith	5.74	- 15
Método del Lisímetro <sup>†</sup>	6.74	Referencia

<sup>†</sup> Método de referencia.

lo que cuando la diferencia entre las temperaturas medidas a dos alturas es grande y las diferencias entre la presión de vapor actual medida también a dos alturas es pequeña, el valor de  $\beta$  se hace grande, entonces el método tiende a sobreestimar la evapotranspiración, ya que el mismo está principalmente en función de la temperatura. En los Cuadros 3, 4 y 5, también se puede observar que este método subestimó la evapotranspiración en 9, 30 y 13% para los días 10, 11 y 14 de julio de 1998, respectivamente, debido a que  $\beta$  resultó pequeño motivado por condiciones de inestabilidad atmosférica. Este método que, en promedio, estima la ET en más o menos 15% para los días de observación es uno de los métodos que mejor estimó la evapotranspiración para las condiciones del tiempo que se presentaron. Las diferencias en la estimación pueden deberse a que la localización de la estación no es adecuada para hacer las observaciones, ya que a menos de 100 m de su localización existen construcciones y árboles que interfirieron al no permitir que se formara el perfil logarítmico de la velocidad del viento. Para futuros trabajos se recomienda, cuando se tengan estos inconvenientes, obtener de alguna manera los coeficientes de transporte turbulento vertical para calor y vapor de agua y no considerar que son iguales.

#### Determinación de la Evapotranspiración por el Método del Sistema de Bowen

Este método utiliza para la estimación de la evapotranspiración una estación automática marca Campbell Scientific, modelo 21X. Esta estación también se programó para que registrara las variables meteorológicas cada 20 minutos. La estimación de la evapotranspiración se hizo con las Ecuaciones 9 a 13; se observa en los Cuadros 2 a 5 que este método estimó la ET en más o menos 18%, con respecto al método lisímétrico, para los días 9, 10, 11 y 14 de julio de 1998 de las 0 a las 24:00 h; estas variaciones en la estimación de la evapotranspiración se deben a condiciones de inestabilidad. Este método, al igual que el método del Balance de energía, fue el que mejor estimó la evapotranspiración para las condiciones del sitio donde se llevó a cabo la investigación, no obstante todas las condiciones adversas antes indicadas.

**Cuadro 6. Láminas acumuladas por cada método micrometeorológico correspondiente al día 9 de julio de 1998 de 0 a 24:00 h. Montecillo, Edo. de México.**

Hora	Ri	M.T-H	M.Aerod.	M.R.B. mm h <sup>-1</sup>	M.S.B.	M.Lis.
0	-0.5555	0.2178	0.0306	0.0462	-0.0067	-0.1543
1	0	0	0	0.0410	-0.0064	-0.1543
2	0	0	0	0.0381	-0.0080	-0.1543
3	0	0	0	0.0290	-0.0061	-0.1543
4	0	0	0	0.0119	-0.2060	-0.1543
5	0	0	0	0.0057	-0.0122	-0.1543
6	0	0	0	-0.0008	-0.0456	-0.1543
7	0	0	0	-0.0073	0.0397	0
8	0	0	0	-0.1242	-0.7000	-0.1543
9	-0.4527	0.1286	0.0181	0.4642	-0.1092	-0.1543
10	-1.1176	0.6102	0.0858	-1.2366	-0.6681	0
11	-1.0806	0.5490	0.4978	-1.2467	-0.4819	-0.7716
12	-0.1414	-0.0690	-0.0886	-0.8817	-0.4450	-0.4630
13	-0.8139	0.3509	0.7986	-1.4799	-0.6152	-0.9259
14	-2.2294	0.0300	-0.0535	-1.2916	-0.2182	-0.4630
15	-2.0403	-0.0600	0.0606	-0.3993	-0.2958	-0.6173
16	-2.4194	-0.3179	-0.1605	-0.4840	0.0223	-0.6173
17	-1.8104	0.0666	-0.0663	-0.5178	-0.4984	-0.3086
18	-2.2717	0.3265	0.5122	-0.2549	-0.6461	-0.3086
19	-2.9546	-0.8790	-0.9829	-0.0325	-0.0743	-0.3496
20	-2.2423	-0.8729	-0.9198	0.0513	-0.5676	-0.1953
21	-2.0411	-1.0809	-1.3131	0.0167	-0.0161	-0.3086
22	-2.0656	-1.2089	-1.1913	-0.0180	-0.0114	0
23	-1.8124	-0.5941	-0.4643	-0.0550	-0.0062	-0.1543
24	0	0	0	-0.0077	-0.0589	0
<b>Suma</b>		<b>-2.8032</b>	<b>-3.2366</b>	<b>-7.3339</b>	<b>-5.6414</b>	<b>-6.8721</b>

Ri = Número de Richardson. M.T-H = Método de Thornthwaite-Holzman. M.Aerod. = Método Aerodinámico. M.R.B. = Método Relación de Bowen. M.S.B. = Método del Sistema de Bowen. M.Lis. = Método Lisimétrico.

### Determinación de la Evapotranspiración por el Método de Penman-Monteith

Con la Ecuación 14 se estimó la evapotranspiración. En los Cuadros 2 a 5 se muestra que este método estimó la evapotranspiración en más o menos 11.6% con respecto a la medida en el lisímetro de pesada, descartando el valor muy exagerado del día 10 de julio de 1998. Las variaciones de la evapotranspiración son motivadas por condiciones de inestabilidad tanto atmosféricas como de viento, ya que este método está compuesto por los componentes energético y aerodinámico y, además, considera, en forma genérica, la resistencia de la cubierta vegetal al transporte del vapor de agua a la atmósfera. Este método es el que mejor estimó la evapotranspiración durante los días de la investigación, es decir, para los días 9, 11 y 14 de julio.

### CONCLUSIONES

De los métodos micrometeorológicos analizados para estimar la evapotranspiración con respecto al lisímetro de pesada, el método de Penman-Monteith, el de Balance de energía (Relación de Bowen), así como el Sistema de Bowen proporcionaron una mejor predicción de la evapotranspiración (Cuadros 2 a 5).

Los métodos de Thornthwaite-Holzman y Aerodinámico subestiman y sobreestiman, respectivamente, la evapotranspiración en mayor proporción que los otros métodos estudiados.

Para mejorar los resultados del método del balance de energía es necesario estimar los valores del Kv y el Kh y no considerar que son iguales.

### RECOMENDACIONES

Dado que los métodos micrometeorológicos analizados subestiman y sobreestiman la evapotranspiración con respecto al lisímetro de

pesada, se considera necesario continuar con este tipo de estudios, en otros lugares en que las estaciones tengan suficiente Fetch (área libre de obstáculos) para que se forme el perfil logarítmico de la velocidad del viento.

Antes de dar inicio a una investigación de este tipo, es importante verificar la calibración, tanto del lisímetro de pesada como el instrumental meteorológico que vaya a ser utilizado. Se recomienda que las estaciones automáticas utilicen anemómetros más sensibles capaces de medir velocidades del viento bajas.

Es necesario que la persona que vaya a operar las estaciones automáticas tenga un previo entrenamiento en el manejo de las mismas, para prever cualquier anomalía que se presente en el desarrollo de la investigación; también es necesario hacer una precalibración para verificar el funcionamiento del equipo.

Se recomienda realizar este tipo de estudios en diferentes zonas agrícolas del país, con diferentes condiciones climáticas y con diferentes tipos de cultivos, con la finalidad de determinar cuáles de los métodos micrometeorológicos estiman mejor la evapotranspiración en la zona.

## LITERATURA CITADA

Aguilera, C. y R. Martínez E. 1996. Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

- Bowen, I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.* 2: 779-787.
- Campbell Scientific, Inc. 1995. Bowen ration system. Instruction manual. Logan, UT.
- Lopez E., J., L. Tijerina Ch., G. Haro A. y R. Arteaga R. 1991. Calibración de fórmulas de evapotranspiración mediante un cultivo de alfalfa como referencia en el área de Montecillo, Estado de México. *Agrociencia* 2: 55-72.
- Ludlow, M.M. 1970. Effect of oxygen concentration on leaf photosynthesis and resistances to carbon dioxide diffusion. *Plant* 91: 285-290.
- Palacios V., E. 1995. Curso gerencial sobre sistemas de riego presurizado. Colegio de Postgraduados. Distrito Federal, México.
- Peña P., E. 1974. Proyecto y construcción de un lisímetro de pesada y estructura inalterada. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Rosenberg, N.J. 1974. Microclimate. The biological environment. John Wiley. New York.
- Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. 1997. Capítulo 2, parte 623. Requerimientos de agua para riego. Traducido por la Comisión Nacional del Agua y el Colegio de Postgraduados. Distrito Federal, México.
- Thorntwaite, C.W. y B. Holzman. 1942. Measurement of evaporation from land and water surfaces. US Dept. Agr. Tech. Bull. 817: 75.
- Tijerina Ch., L. 1992. Uso eficiente del agua en unidades de riego para el desarrollo rural. Diplomado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Wallace, J.M. y P.V. Hobbs. 1977. Atmospheric science: An introductory survey. Academic Press. New York.
- Zermeño G., A., E. Palacios V. y C. Ramírez A. 1988. Respuesta de la cebada (*Hordeum vulgare* L.) a diferentes niveles de humedad aprovechable residual en el suelo en tres etapas fenológicas en su desarrollo. *Agrociencia* 73: 217-226.