

Desarrollo y puesta en marcha de un equipo para la medida de la evapotranspiración real basado en la razón de Bowen

Escarabajal, D., Molina, JM., Fernández-Pacheco, D.G.

Grupo I+D+i Ingeniería Agromótica y del Mar. DIAEA. Área de Ingeniería Agroforestal.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)
Teléfono: 968 32 59 29 Fax: 968 32 70 31
E-mail: david.escarabajal@upct.es

Resumen. La estimación de los requerimientos de agua de los cultivos es un elemento indispensable para un uso eficiente del agua en la agricultura de regadío, especialmente en regiones áridas y semiáridas. Tradicionalmente esta estimación se realiza utilizando la aproximación de multiplicar una evapotranspiración de referencia (ET_0) por un coeficiente de cultivo (K_C) que, se asume, comprende el estado del cultivo y el estado de humedad del suelo. No obstante, la utilización de este método suele estar condicionada por la disponibilidad de los coeficientes para diferentes regiones climáticas, lo que ha llevado al desarrollo y puesta en marcha de equipos que permitan encontrar el valor adecuado de K_C mediante la determinación de la evapotranspiración real del cultivo. En este sentido, el método de la Razón de Bowen-Balance de Energía (RBBE), en el cual está basado el equipo desarrollado, se muestra como un método robusto y de aceptable precisión, que ya sido utilizado en diferentes condiciones ambientales.

1 Introducción

La evapotranspiración (ET de aquí en adelante), término que engloba la evaporación del agua almacenada en la capa superficial del suelo, la interceptada por las plantas y la pérdida de agua a través de la superficie de las plantas (Jensen *et al.*, 1990), principalmente de las hojas, es una medida de la pérdida de agua en una zona determinada, dando lugar a un intercambio de energía entre el suelo y la atmósfera. Su estimación es de gran interés pues se considera un descriptor muy importante de la climatología de un lugar, además de una de las fases principales del ciclo hidrológico.

En la actualidad existe una gran cantidad de métodos indirectos que permiten estimar la ET a partir de variables climáticas. Dichos métodos proporcionan una estimación de los requerimientos de agua a través de todo el ciclo vegetativo mediante la utilización de fórmulas empíricas, las cuales requieren de información meteorológica fácil de conseguir y, por lo tanto, tienen gran utilidad en la planificación agrícola.

Dentro de estos métodos se encuentran los basados en el Balance de Energía, como el método de la Razón de Bowen. La determinación de la ET por el método de la Razón de Bowen-Balance de Energía (RBBE) consiste en estimar la cantidad de calor latente necesario para la evaporación del agua evapotranspirada por medio de un balance de energía. Se trata de un diseño simple, económico, con base en gradientes de temperatura y vapor de agua entre dos alturas, con bajos requerimientos de 'fetch'. Se considera un sistema robusto que ha sido validado sobre diferentes coberturas vegetales con resultados de aceptable precisión.

El método de la Razón de Bowen presenta, entre otras, las ventajas de no requerir información acerca de las características aerodinámicas de la superficie ni de la velocidad del y de poder obtener valores medios horarios, o semihorarios, de los flujos de una forma continua. Por el contrario, el método se muestra inestable e impreciso cuando los flujos de calor sensible y latente se hacen aproximadamente iguales y de signo contrario, normalmente al alba y en el ocaso del sol.

El objetivo de esta comunicación es describir el equipo desarrollado para determinar la ET in situ de cultivos hortícolas, a partir del método de la Razón de Bowen-Balance de Energía (RBBE), así como estimar los coeficientes de cultivo K_C , adaptados a las condiciones locales y a las técnicas de cultivo mediante la comparación de la ET real del cultivo estimada y la ET del cultivo de referencia que establece la ecuación Penman-Monteith versión FAO-56 (Allen *et al.*, 1998).

2 Materiales y Métodos

2.1 Parcela experimental

El trabajo se desarrolló durante un periodo de 116 días, desde octubre de 2010 hasta febrero de 2011, sobre un cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L., var. longifolia) con producción comercial ubicado en Fuente Álamo (latitud 37°42'35"N, longitud 1°10'20"W y altitud 125 m), provincia de Murcia, España. La parcela tiene una superficie aproximada de 6,5 ha, con plantas colocadas sobre surcos de 50 cm de ancho y orientados en la dirección norte-sur, dispuestas al tresbolillo con una densidad de plantación de 5 plantas/m². La parcela está equipada con un sistema de riego localizado por medio de mangueras de polietileno de 16 mm con goteros

interlínea de 4 l h⁻¹ espaciados 0,60 m. En el centro de la parcela, y cumpliendo con los requerimientos de 'fetch' en la dirección de los vientos dominantes, se ha instalado el equipo RBBE desarrollado.

2.2 Cálculo de la ET real

El método de la Razón de Bowen (Bowen, 1926), en el cual está basado el equipo desarrollado, plantea el siguiente balance de energía:

$$R_n - G = LE + H \quad [1]$$

donde R_n es el flujo de radiación neta, G define el flujo de calor en el suelo, LE representa el flujo de calor latente, es decir, la evapotranspiración, y H indica el flujo de calor sensible. Para unas mismas condiciones de R_n y G , la energía disponible se transfiere convectivamente hacia la atmósfera en forma de calor y de vapor de agua. El método fuerza su cierre mediante el empleo de la relación H/LE , conocida como razón de Bowen (β) (Bowen, 1926), que informa sobre el reparto de la energía disponible ($R_n - G$) entre los flujos de calor sensible (H) y latente (LE).

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad [2]$$

A partir de las ecuaciones [1] y [2], se calculan los flujos turbulentos de la forma:

$$LE = \frac{(R_n - G)}{1 + \beta} \quad ; \quad H = \frac{\beta (R_n - G)}{1 + \beta} \quad [3]$$

Los valores de R_n y G se miden directamente mediante sensores, mientras que el parámetro β se estima a partir de las ecuaciones flujo-gradiente para definir LE y H . El método de la RBBE (Bowen, 1926) da por válida la analogía del transporte turbulento de vapor y calor sensible en el aire con la difusión molecular, y considera aceptable la hipótesis de igualdad de difusividades turbulentas para el calor y el vapor, aceptando la igualdad de coeficientes de transporte turbulento ($K_h = K_w$) (Dyer, 1974), pudiendo expresarse el ratio de Bowen de la forma:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad [4]$$

donde $\gamma = C_p p / \epsilon \lambda$ es la constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), C_p es el calor específico del aire a presión constante ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$), p es la presión atmosférica (kPa), $\epsilon = 0.622$ es la relación entre los pesos moleculares del agua y del aire, λ es el calor latente de vaporización del agua ($\approx 2.45 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ a 20 °C), y ΔT (°C) y Δe (kPa) se corresponden con los gradientes de temperatura y presión de vapor medidos entre dos niveles, respectivamente.

El método se muestra particularmente inestable e impreciso cuando los flujos H y LE se hacen aproximadamente iguales y de signo contrario. En general, esto ocurre en momentos del día en que los flujos H y LE suelen ser pequeños (al amanecer, a la caída del sol y durante la noche). En ese caso $\beta \rightarrow -1$,

y las expresiones en [3] tienden a infinito, lo que obliga a descartar a efectos de cómputo los periodos en que esta eventualidad se produce.

2.3 Adquisición de datos climáticos

La radiación neta (R_n) fue medida por medio de un radiómetro neto NR-LITE (Campbell Sci. Inst., USA), ubicado a 2 m sobre el suelo. Los valores de flujo de calor en el suelo (G) se midieron en un lugar representativo del suelo, y los valores se calcularon con el método combinado (Payero *et al.*, 2005), el cual corrige los flujos térmicos medidos por los platos enterrados, evaluando la capacidad térmica del suelo superficial midiendo el cambio en su temperatura en el tiempo y el efecto del contenido de humedad en el suelo. Para ello se ubicaron dos platos HFP01 (Hukseflux, Holanda) enterrados a 8 cm y separados 1 m, y cuatro termopares (2+2) de cromo-constantán (TCAV, Tipo E) instalados sobre la vertical de los platos térmicos, a 2 y 6 cm de profundidad, junto a un reflectómetro de humedad volumétrica CS616 (Campbell Sci. Inst., USA).

El método RBBE requiere calcular la energía disponible ($R_n - G$) y los gradientes de temperatura y humedad sobre el cultivo. Los gradientes fueron evaluados con sensores en dos brazos, dispuestos en el sentido de la hilera de plantas y separados 1,10 m entre sí. El brazo inferior se ubicó 50 cm sobre el suelo. El gradiente de temperatura se evaluó con dos termopares de hilo fino tipo E (cromo-constantán) de 76 μm de diámetro, aspirados y protegidos de la radiación directa. A su vez, el gradiente de humedad se comprobó mediante un espejo de punto de rocío ALMEMO® tipo FHA64DTC1 (Ahlborn Mess. und R., Alemania), compartido por ambos brazos y alimentado alternativamente desde cada altura mediante dos bombas independientes.



Figura 1. Equipo RBBE instalado en finca experimental sobre cultivo de lechuga.

3 Resultados

Durante los días en los que se desarrolló el ensayo (23/10/10 al 15/02/11) las condiciones climatológicas fueron muy variadas. Muchos de estos días estaban además acompañados de eventos de precipitación, llegándose a registrar hasta 19.2 mm día^{-1} (día 27/11/10), lo que obligó a descartarlos del análisis para evitar valores de evapotranspiración influenciados por la humedad de la vegetación.

En la Figura 2 se presentan las frecuencias de exclusión del ratio de Bowen β para cada una de las horas del día de los 91 días completos analizados. Aunque la frecuencia de horas descartadas es relativamente pequeña, no se ha despreciado el flujo de ET en estas horas descartadas, y su valor ha sido estimado mediante el empleo del método de Penman-Monteith versión FAO-56 (Allen *et al.*, 1998). Se ha podido comprobar que en el cómputo total diario de ET la cantidad de agua evapotranspirada durante las horas descartadas no ha superado en ninguno de los días analizados el 2% de la ET total diaria.

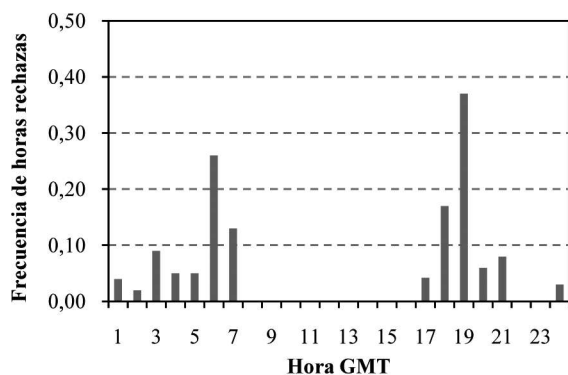


Figura 2. Frecuencia de horas rechazadas durante los 91 días muestreados en función de la hora (GMT) del día.

Para la estimación de los coeficientes de cultivo K_C , mediante el empleo del método de la RBBE se seleccionaron los datos correspondientes a los 91 días distribuidos a lo largo de los meses de octubre de 2010 a febrero de 2011, una vez descartados los días en los que acontecieron precipitaciones. La Figura 3 muestra los valores de K_C del cultivo, obtenidos con el método del RBBE y los valores de ET_0 proporcionados por la estación El Campillo del Servicio de Información Agraria de Murcia (SIAM) y el coeficiente de cultivo K_C sugerido por la FAO-56. Los valores de K_C medios derivados para la etapa inicial (1 d.d.t. a 30 d.d.t.) y etapa media (70 d.d.t. a 115 d.d.t.), fueron de 0.69 y 1.02 respectivamente, muy similares a los sugeridos por FAO-56 (0.70 para la etapa inicial y 1.00 para la etapa media), con un error cuadrático medio de 0.22 y 0.26 respectivamente. No obstante, aunque los valores promedio coinciden casi a la perfección con los valores de la FAO-56, los límites de precisión son muy elevados, lo que sugiere que aunque se pueden seguir empleando los coeficientes FAO para estimar la ET en cultivo de lechuga, es necesario revisar la precisión de los aparatos del equipo desarrollado.

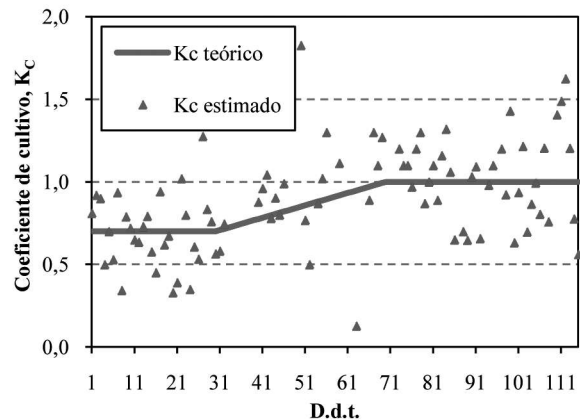


Figura 3. Coeficientes de cultivo K_C estimados con el método RBBE para el cultivo ensayado y coeficientes sugeridos por FAO-56.

4 Conclusiones

El método de la Razón de Bowen-Balance de Energía (RBBE) se afianza como un método robusto para la determinación de la evapotranspiración, habiendo sido evaluado y utilizado como referencia frente a otros métodos de medida, como la lisimetría y covarianza de torbellinos, entre otros, llegando a convertirse en una técnica estándar para la medida de flujos sobre una superficie. El empleo del equipo desarrollado para la estimación de la ET real del cultivo de lechuga durante el periodo considerado ha permitido contrastar los valores del coeficiente de cultivo K_C estimados con los coeficientes estándares (FAO).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación Séneca de la Región de Murcia la financiación de este trabajo de investigación mediante los proyectos 8729/PI/08 y 08754/PI/08.

Referencias

- [1] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56. Roma
- [2] Bowen, J.S., 1926. *The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface*. Phys. Rev., 27: 779-787.
- [3] Dyer, A.J., 1974. *A Review of flux profile relationships*. Boundary-Layer Meteorol., 7: 363-372.
- [4] Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. (ed), 1990. *Evapotranspiration and water irrigation requirements*. Committee on irrigation Water Requirements, Irrigation and Drainage Division of ASCE, Manual n° 70. ASCE, N.Y.
- [5] Payero, J.O., Neale, M.U., Wright, J.L., 2005. *Estimating soil heat flux for alfalfa and clipped tall fescue grass*. Appl. Eng. Agric., 21: 401-409.