

# Sensibilidad del método de Bowen para estimación de la evapotranspiración al empleo de RTD y termopares

Escarabajal, D.<sup>(1)</sup>, Molina, JM.<sup>(1)</sup>, Ruiz-Peñalver, L.<sup>(1)</sup>, Ruiz-Canales, A.<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Grupo I+D+i Ingeniería Agromótica y del Mar. DIAEA. Área de Ingeniería Agroforestal. ETSIA Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica. Paseo Alfonso XIII, 48, 30203 Cartagena (Murcia)  
E-mail: david.escarabajal@gmail.com

<sup>(2)</sup> Agua y Energía para una Agricultura Sostenible. Escuela Politécnica Superior de Orihuela. Universidad Miguel Hernández de Elche. Ctra. de Beniel, km 3.2, 03312 Orihuela (Alicante)

**Resumen.** El método de Bowen está basado en el balance energético aplicado sobre la superficie del cultivo, forzando su cierre mediante el empleo de la razón de Bowen, calculada en base a gradientes de temperatura y presión de vapor de agua. Los equipos comerciales desarrollados para este método emplean termopares para la medida de los gradientes de temperatura. Además, deben ir provistos de otro tipo de instrumentación para medir los gradientes de presión de vapor de agua. La existencia en el mercado de sondas combinadas de temperatura y humedad, consistentes en una resistencia metálica de platino –“Resistance Temperature Detector (RTD)”– y una sonda capacitiva de humedad, permite obtener los gradientes requeridos en la razón de Bowen con un instrumento más simplificado, económico y de menor mantenimiento. En el presente trabajo se evaluó la respuesta de ambos sistemas de determinación de los gradientes de temperatura, termopares y RTD, y su sensibilidad en los valores de evapotranspiración estimados por el método de Bowen. Se detectaron diferencias significativas entre ambos sistemas, presentando el empleo de RTD en la estimación de la ET el mejor ajuste, por lo que quedó demostrada una mayor idoneidad de las RTD para su empleo en la estimación de la ET mediante balance de energía, por presentar una mayor precisión y estabilidad frente a los termopares.

## 1. Introducción

La determinación de la ET por el método de la Razón de Bowen-Balance de Energía (RBBE) se usa a menudo para obtener coeficientes de cultivo y evaluar modelos desarrollados para el cómputo de la ET. La razón de Bowen ( $\beta = \gamma \Delta T / \Delta e$ ) [2] y la ecuación de balance de energía son las bases del método RBBE para la determinación de la ET, afianzándose como un método preciso con un diseño simple y económico, hechos que han llevado al desarrollo y puesta en marcha de nuevos equipos y justifica los esfuerzos dedicados a su optimización.

Generalmente, en los equipos comerciales basados en la razón de Bowen existentes en el mercado, los gradientes requeridos por Bowen son medidos por medio de termopares (por ejemplo de cromo-constantan) y un higrómetro de alta precisión. La existencia en el mercado de sondas comerciales combinadas de temperatura y humedad, consistentes en un sensor termométrico con resistencia metálica y una sonda capacitiva de humedad, permite obtener estos gradientes con el empleo de un dispositivo más simplificado, económico y que requiere un menor mantenimiento. Además, este tipo de sondas presentan ciertas ventajas frente a los sistemas comúnmente utilizados tales como su alta precisión y mejor estabilidad y linealidad.

El objetivo de este trabajo es la evaluación del comportamiento de ambos sistemas de determinación de los gradientes de temperatura requeridos por la razón de Bowen, termopares y resistencias metálicas,

y su repercusión en los valores de evapotranspiración estimados por el método RBBE, en comparación con otros métodos como la lisimetría y el método de Penman-Monteith versión FAO-56 [1].

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Parcela experimental

El trabajo fue realizado en la finca experimental ‘Las Tiasas’, gestionada por el Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP) de Albacete, España.

El periodo comparativo comprendió 40 días, desde el 10 de septiembre al 19 de octubre de 2011 sobre un cultivo de referencia (*Festuca arundinacea* Schreb.) sembrado en una parcela de protección de 100 x 100 m, periódicamente segado y regado con un sistema automatizado de riego por aspersión mediante cobertura total enterrada, evitando con ello, cualquier tipo de restricción hídrica. Esta superficie es usada de forma rutinaria para las medidas de ET<sub>0</sub> mediante una estación de lisimetría de pesada continua.

### 2.2. Estación de lisimetría

Para las medidas de ET se empleó un lisímetro de pesada continua de dimensiones 2,3 x 2,7 m de lado y 1,7 de profundidad, con una masa total de 14,5 tn, instalado en el centro de la parcela, que dispone del equipamiento necesario para realizar un balance hídrico completo y evaluar con precisión tanto los aportes (lluvia y riego) como las pérdidas (evapotranspiración y drenaje profundo) [4]. Está cultivado con la misma especie, de modo que las

plantas situadas dentro del cajón están en las condiciones lo más parecidas posibles a un cultivo normal que realice cualquier agricultor.

### 2.3. Penman-Monteith FAO-56

Además de los datos de ET proporcionados por el lisímetro, ésta también fue calculada aplicando la ecuación de Penman-Monteith versión FAO-56 [1]. Los datos meteorológicos fueron recogidos por una estación meteorológica situada sobre el cultivo de referencia, controlada por un datalogger (modelo CR10X, Campbell Scientific, Logan, UT) y dotada de sensores para la medida de la temperatura y humedad relativa del aire (sonda MP100, Campbell Scientific, Logan, UT), la radiación solar (piranómetro CM14, KIPP&ZONEN Delft, Holanda), la velocidad y dirección del viento (anemómetro A100R y veleta W200P, Vector Instruments Ltd., UK) y precipitación (pluviómetro ARG100, Campbell Scientific, Logan, UT). La sonda de humedad y temperatura y los sensores de viento se situaron a 1,5 y 2 m de altura sobre la superficie, respectivamente.

### 2.4. Método de Bowen

Para realizar el estudio comparativo entre termopares y RTD en la estimación de la ET, se instaló una estación Bowen equipada con un radiómetro neto NR-LITE (Campbell Sci. Inst., USA), ubicado a 2 m sobre el suelo, un anemómetro de cazoletas A100 (Campbell Sci. Inst., USA), un pluviómetro RAIN-O-MATIC (Campbell Sci. Inst., USA), dos platos de flujo de calor en el suelo HFP01 (Hukseflux, Holanda) y un reflectómetro de humedad volumétrica CS616 (Campbell Sci. Inst., USA).

Los sensores comparados se instalaron a 0,55 y 1,19 m y fueron dos termopares de hilo fino tipo E (cromo-constantan) de 76 µm de diámetro y dos sensores CS215 (Campbell Sci. Inst., USA) constituidos por una sonda termométrica para la medida de la temperatura del aire, constituida por una resistencia metálica de platino de 1000 Ω, y un sensor capacitivo de humedad relativa. Los valores de ET se determinaron por duplicado: por un lado, empleando en los cálculos de la razón de Bowen los valores de ΔT procedentes de los termopares, y por otro, los procedentes de las RTD.

## 3. Resultados

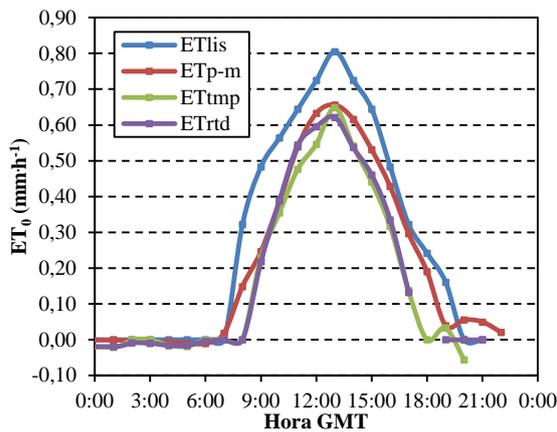
En la Tabla 1 se presentan los componentes del balance de energía en la superficie. El flujo  $LE_{lis}$  es el medido por lisimetría. En la última columna se incluye un “índice de advección” medio diario ( $I_a$ ), obtenido de dividir el flujo de calor latente por  $R_n - G$ . Habrá evidencia de advección siempre que este índice sea superior a la unidad, y cuanto mayor sea su valor, mayor será el aporte de calor sensible que contribuye a alimentar el flujo de LE. El análisis del balance de energía evidencia un proceso de advección de calor sensible (H), el cual se produjo casi a diario. Así, exceptuando algunos días, el índice de advección es siempre mayor que uno, con varios

días en los que el fenómeno es especialmente severo, llegando la advección de calor sensible a aportar hasta el 64% de la energía consumida en el proceso de evapotranspiración (día 288).

**Tabla 1.** Componentes del balance de energía e “índices de advección” durante el ensayo:  $R_n$ : Radiación neta;  $G$ : Flujo de calor hacia el suelo;  $LE_{lis}$ : Evapotranspiración medida en el lisímetro;  $I_a$ : Índice de advección.

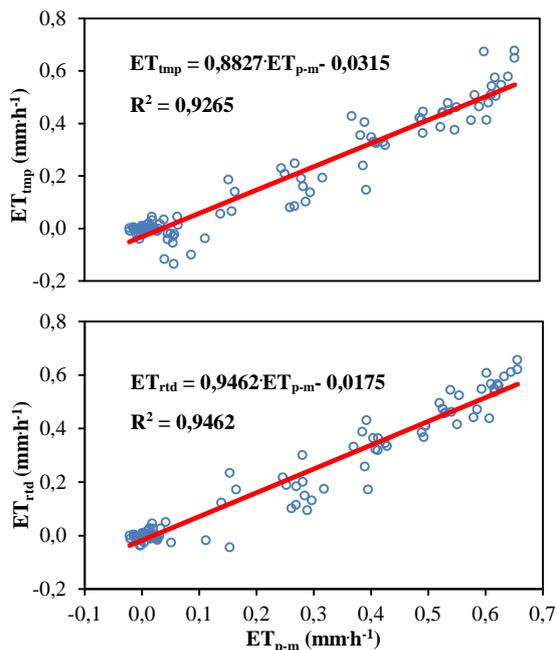
| Día | $R_n$<br>( $W \cdot m^{-2}$ ) | $G$<br>( $W \cdot m^{-2}$ ) | $LE_{lis}$<br>( $W \cdot m^{-2}$ ) | $I_a$<br>(-) |
|-----|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|--------------|
| 253 | 124,53                        | 3,38                        | 173,73                             | 1,43         |
| 254 | 110,50                        | 0,23                        | 150,72                             | 1,37         |
| 255 | 127,90                        | 2,90                        | 160,12                             | 1,28         |
| 256 | 127,27                        | 1,37                        | 171,87                             | 1,37         |
| 257 | 128,70                        | 2,08                        | 172,25                             | 1,36         |
| 258 | 143,74                        | 7,05                        | 164,09                             | 1,20         |
| 259 | 115,20                        | 1,21                        | 143,59                             | 1,26         |
| 260 | 137,60                        | 7,49                        | 157,41                             | 1,21         |
| 261 | 85,41                         | -4,41                       | 105,69                             | 1,18         |
| 262 | 108,09                        | -1,01                       | 148,96                             | 1,37         |
| 263 | 112,02                        | 1,03                        | 158,59                             | 1,43         |
| 264 | 102,83                        | -2,57                       | 130,79                             | 1,24         |
| 265 | 104,78                        | 0,50                        | 101,23                             | 0,97         |
| 266 | 92,43                         | 1,92                        | 110,56                             | 1,22         |
| 267 | 117,36                        | 6,00                        | 141,25                             | 1,27         |
| 268 | 119,36                        | 5,72                        | 106,24                             | 0,93         |
| 269 | 133,08                        | 7,08                        | 118,94                             | 0,94         |
| 270 | 103,38                        | -1,87                       | 118,82                             | 1,13         |
| 271 | 99,11                         | 0,07                        | 134,19                             | 1,35         |
| 272 | 95,74                         | 1,31                        | 114,26                             | 1,21         |
| 273 | 94,43                         | -1,05                       | 117,88                             | 1,23         |
| 274 | 91,73                         | 1,11                        | 114,49                             | 1,26         |
| 275 | 121,62                        | 6,53                        | 112,31                             | 0,98         |
| 276 | 106,22                        | 1,88                        | 104,24                             | 1,00         |
| 277 | 95,57                         | -1,16                       | 130,84                             | 1,35         |
| 278 | 97,17                         | 0,93                        | 108,39                             | 1,13         |
| 279 | 101,58                        | 1,46                        | 133,80                             | 1,34         |
| 280 | 42,68                         | -7,39                       | 53,68                              | 1,07         |
| 281 | 80,81                         | -3,37                       | 125,99                             | 1,50         |
| 282 | 97,87                         | 4,77                        | 113,92                             | 1,22         |
| 283 | 80,46                         | -3,36                       | 93,35                              | 1,11         |
| 284 | 75,89                         | -2,91                       | 117,79                             | 1,49         |
| 285 | 80,44                         | -0,42                       | 118,11                             | 1,46         |
| 286 | 84,36                         | 1,23                        | 134,55                             | 1,62         |
| 287 | 66,56                         | -5,11                       | 75,42                              | 1,05         |
| 288 | 71,60                         | -0,56                       | 118,47                             | 1,64         |
| 289 | 58,08                         | -7,97                       | 83,32                              | 1,26         |
| 290 | 53,54                         | -7,58                       | 87,71                              | 1,44         |
| 291 | 59,94                         | -5,58                       | 64,71                              | 0,99         |
| 292 | 51,11                         | -6,07                       | 72,58                              | 1,27         |

En todos los días analizados, y especialmente, en aquellos en los que el fenómeno de la advección era más severo, las medidas lisimétricas de ET fueron subestimadas por las obtenidas por el método del RBBE (Fig. 1). Este resultado coincide con los obtenidos por Gavilán y Berengena (2007), quienes, en condiciones de advección, encontraron que el método de Bowen tiende a subestimar las medidas lisimétricas de ET.



**Figura 1.** Evolución horaria de los valores de ET según varios métodos de estimación: lisimetría ( $ET_{lis}$ ), ecuación de Penman-Monteith ( $ET_{p-m}$ ), método de Bowen con empleo de termopares ( $ET_{tmp}$ ) y con el empleo de RTD ( $ET_{rtd}$ ).

El análisis de regresión efectuado para los valores horarios de ET por Penman-Monteith, y las ET del método de Bowen (termopares y RTD) indica que ambos sistemas, subestimaron la evapotranspiración, siendo esta subestimación mayor para valores en torno a  $0,2 - 0,5 \text{ mm h}^{-1}$ .



**Figura 2.** Comparación de los valores de ET horarios estimados por el método basado en la RBBE mediante el empleo de termopares ( $ET_{tmp}$ ) y resistencias metálicas ( $ET_{rtd}$ ) frente a los calculados empleando la ecuación de Penman-Monteith versión FAO-56 ( $ET_{p-m}$ ).

El coeficiente de regresión obtenido con las RTD (0,9462) no resultó significativamente diferente a 1, ni la ordenada en el origen (-0,0175) lo fue de cero (Fig. 2), no obstante, tal no fue el caso de los

termopares, que comportaron un peor ajuste. La raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE) para el caso de los termopares ( $0,088 \text{ mm h}^{-1}$ ) fue notablemente superior al correspondiente al caso de las RTD ( $0,072 \text{ mm h}^{-1}$ ), evidenciando el empleo de las RTD un mejor comportamiento en el cálculo de la ET mediante el método RBBE, atribuible a la mayor precisión y estabilidad (10 veces mayor) de las RTD.

## 4. Conclusiones

Al comparar los valores de evapotranspiración estimada con el método del Ratio de Bowen, en cualquiera de las dos modalidades estudiadas, con los valores medidos en el lisímetro, el método de Bowen subestimó el flujo evapotranspiratorio, permitiendo detectar un proceso de advección de calor sensible, considerado como una importante fuente de energía que incrementa la evapotranspiración del cultivo. No obstante, no se prestó mayor atención al fenómeno, por diferir del objetivo del estudio. La advección de calor sensible y su influencia en la medida y la estimación de la evapotranspiración fue estudiada por Gavilán y Berengena (2007), quienes consideran que puede aportar hasta un 40% del total de la energía usada en la evapotranspiración.

La comparación de los valores horarios de ET calculados aplicando la ecuación de Penman-Monteith versión FAO-56 [1], con los estimados por el método del RBBE, tanto empleando termopares como RTD para la medida de los gradientes de temperatura, evidenció que ambos sistemas subestimaron la evapotranspiración, existiendo diferencias significativas entre ambos sistemas. Si bien, los valores de ET procedentes del método RBBE con el empleo de RTD comportaron un mejor ajuste, evidenciando una mayor idoneidad para su empleo en la razón de Bowen, por presentar mayor precisión y estabilidad frente a los termopares.

## 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] Gavilán, P., Berengena, J., 2007. *Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment*. Irrigation Sci. 25:127-140.
- [4] López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., Moratalla, A., 2006a. *Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate*. Agric. Water Manage. 85:15-26.