

## RESUMEN

El presente trabajo describe el desarrollo de una estación micrometeorológica automática basada en un microcontrolador programable de bajo coste para la medición de los siguientes parámetros climáticos: humedad relativa, temperatura del aire, temperatura del perfil de suelo a 3 profundidades, radiación solar instantánea, velocidad de viento y precipitación (intensidad y cantidad). El coste actual total de dicho equipo es menor de las 200.000 pts (=US \$1500) lo que supone un considerable ahorro frente a equipos existentes en el mercado. Los sensores climáticos se seleccionaron en virtud de su calidad y coste. El trabajo consistió en el desarrollo del programa informático del controlador, circuitos acondicionadores de señal para los sensores, unidad central de control y estructura de soporte para el montaje del equipo en campo. Se desarrolló un programa de PC para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) según el método modificado de Penman-Monteith a partir de los datos descargados de la estación. El equipo diseñado ofrece las siguientes ventajas: flexibilidad en la fijación de los intervalos de medida y número de sondas empleadas, gran capacidad de memoria, bajo consumo, protección frente a cortes de electricidad, alimentación en campo con una batería portátil, fácil descarga de datos y obtención de la ETo mediante un PC portátil y bajo costo.

Palabras clave: Estación micrometeorológica, Instrumentación automática, Evapotranspiración, Riego, Hidrología.

## ABSTRACT

This paper describes the development of a micro-meteorological station based on a low cost programmable microcontroller to monitor the following parameters: relative humidity, air temperature, soil temperature at three depths, instantaneous solar radiation, wind speed, and rainfall (total and intensity). The total cost of the system is around US \$1500, much lower than current commercially available systems. The climatic sensors used were selected attending to quality and cost. The work undertaken comprises the following: development of the micro-controller's software, design of the electronic circuits for signal conditioning, design of the central processing unit and the field system's supporting structure. A PC program was developed to convert raw data into reference evapotranspiration (ETo) following the modified Penman-Monteith method. The resulting device presents the following advantages: flexibility in setting up the reading schedule and number of sensors used, extensive data storage, low power requirements, power failure protection, and simple PC data downloading and ETo calculation. The paper includes details on the construction, cost, and application examples of the micro-meteorological station.

# Diseño de una estación micrometeorológica automática de bajo coste para el cálculo de la evapotranspiración de referencia

Muñoz Carpena R.<sup>1</sup> (P), Fernández Galván D.<sup>1</sup>, González Tamargo, G.<sup>1</sup>, Harris, P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), Apdo. 60 La Laguna, 38200 Tenerife.

<sup>2</sup> Bio. & Agricultural Engineering Dept., North Carolina State University, Box 7625, Raleigh NC 49625-7625, U.S.A.

## Introducción

La instalación y diseño de los sistemas de riego y drenaje agrícolas tiene como objetivo corregir situaciones de déficit o exceso de agua en la zona radicular del cultivo para optimizar sus condiciones de crecimiento y

umentar la productividad. Un buen sistema de riego o drenaje debe basarse en una estimación correcta de esas necesidades hídricas del cultivo (caso del riego) o la cantidad de agua a evacuar de la zona radicular (caso del drenaje), para lo que es necesario establecer un balance hidrológico lo más pre-

\*Artículo presentado en las XIII Jornadas Técnicas Sobre Riegos, Puerto de la Cruz (Tenerife), Junio 1995

ciso posible. El término evapotranspiración (ET) agrupa los componentes de dicho balance que implican una salida de agua de un volumen controlado de suelo por efecto de la evaporación superficial y consumo de las plantas (transpiración). El término ET se relaciona con las necesidades de riego mediante diferentes métodos de cálculo (Doorenbos y Pruitt, 1976; Jensen et al, 1990).

El uso de lisímetros en campo permite la medición de los componentes del balance hidrológico a nivel de suelo, esto es, incremento del contenido de humedad ( $\Delta W$ ) y percolación profunda fuera de la zona radicular (D). Conocida la precipitación, en forma de lluvia o riego (P), y asumiendo no-escorrentía podemos estimar la ET del cultivo creciendo en el lisímetro. Las dificultades de instalación y manejo, y alto coste de los lisímetros hace que normalmente se recurra a métodos indirectos de cálculo para la estimación de la ET del cultivo. Existen muchos métodos cuya discusión cae fuera del ámbito de este trabajo (Jensen et al, 1990). Uno de los métodos de cálculo de ET de mayor aceptación actualmente es la revisión de la fórmula combinada de Penman-Monteith (Smith et al 1991), método recomendado actualmente por FAO. Dicho método requiere la medida de valores medios diarios (o mensuales) de las siguientes variables climáticas: temperatura (T) máxima y mínima; humedad relativa (HR) máxima y mínima; radiación solar (Rad); y velocidad del viento (U). Existe una variante del método que permite el cálculo de la ETo a intervalos inferiores al día.

En el campo de la hidrología de contaminantes (movilidad de sustancias contaminantes en la zona no saturada/saturada del suelo) el conocimiento de la ET es fundamental para la solución numérica de las ecuaciones que describen el movimiento del agua y contaminantes, y sus transformaciones en el suelo. Estos estudios normalmente requieren valores de ET a intervalos muy inferiores a los diarios, especial-

mente en períodos próximos a la entrada de agua o soluto en el suelo.

La aplicación de la microelectrónica ha permitido la reducción del tamaño y coste del equipo necesario para la medición de las variables climáticas señaladas, mediante el uso de estaciones micrometeorológicas "in-situ". El objeto del presente trabajo es describir el diseño de una estación automática de gran flexibilidad y bajo costo.

## 2. Materiales y Métodos.

### 2.1. Micro-controlador programable y Unidad Central de Control

Se eligió el Micro440e de Blue Earth Research (USA). Este aparato tiene las prestaciones de un microcontrolador programable de bajo consumo (tecnología CMOS) y viene cargado de dispositivos para la adquisición de datos y control que le convierten en un auténtico sistema de adquisición de datos (Eglowstein, 1993). Las características técnicas son: como CPU un 83C51B a 12 MHz; 2 puertos de entrada/salida RS232C de alta velocidad; 8 entradas analógicas 0-5VDC (convertidor A/D de 8 bits de alta velocidad); 14 entradas/salidas digitales; 32K de memoria RAM para programas y datos mantenida por batería de litio (protegida contra cortes eléctricos); 32K de memoria EPROM con un intérprete de BASIC, ensamblador y "debugger"; regulador de voltaje de 5 VDC (admite voltajes externos de 7-16VDC); y un reloj calendario externo (RTC). El microcontrolador tiene un modo de espera de bajo consumo del que se recupera por señales del RTC (intervalos de tiempo para toma de datos en nuestro caso) o señales externas (línea Pl.1). El reloj calendario interno de la CPU se puede emplear como contador de pulsos externos conectados al P3.4. Se utilizó un módulo adicional (ST-I/O de Blue Earth) que se conecta a la salida del Micro440e y presenta las ventajas de conectores tipo tornillo, diodos LED para líneas digita-

***“La aplicación de la microelectrónica permite la reducción del tamaño y coste del equipo necesario para el cálculo de la evapotranspiración de referencia mediante el uso de estaciones micrometeorológicas “in-situ””***

les, protección de entradas analógicas mediante transistores, enchufe de alimentación y puerto en serie para el PC (figura 1).

La Unidad Central de Control (UCC) es una caja que contiene el Micro440e, conexiones de los sensores y circuitería adicional. Se diseñó de manera que en su interior impermeable se alojaran todos los componentes sensibles y en su exterior se localizaran conectores estándar tipo DIN para los sensores, que facilitarían el montaje de la estación, un botón para descarga de datos (conectado Pl.1), y un puerto en serie para el PC (Fig. 1).

## 2.2. Sensores

### 2.2.1. Temperatura

Se emplearon termistores Keystone de precisión ( $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$  de  $0-75^{\circ}\text{C}$ ) que no

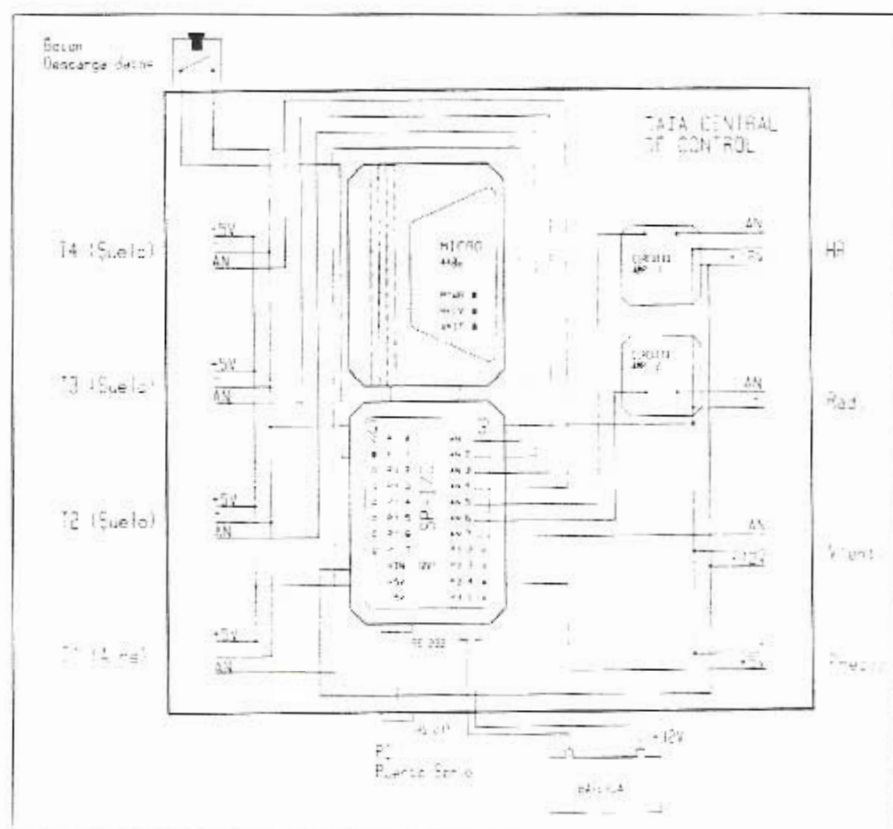


Figura 1. Diseño de la Unidad Central de Control (UCC).

requieren calibración. Los termistores se dispusieron en un circuito potenciométrico (Fraile y García, 1987) alimentado por los +5VDC regulados del Micro 440e (Fig. 2). Para las sondas de suelo se prepararon unas cápsulas de acero inoxidable donde se alojó e impermeabilizó el circuito para su colocación posterior.

### 2.2.2. Humedad relativa

Se eligió un Vaisala HUMITTER 50. El sensor se basa en el concepto de condensador variable con la HR. La cápsula del condensador es intercambiable y no necesita calibrado. Mide en el rango de 0-100% completo con una exactitud de  $\pm 1\%$  y una estabilidad superior al  $\pm 1\%$  anual. Requiere alimentación 7-28 VDC y ofrece una salida analógica lineal de 0-1 VDC. Se construyó un circuito de amplificación de señal (Fraile y

García, 1987; Horn, 1994) basado en un amplificador operacional (ganancia de 3.92) (Fig. 2) con la idea de igualar el valor 0-100% HR a la lectura de 0-100 bits (0.196 VDC) que se almacena directamente en memoria y no necesita conversión.

### 2.2.3. Radiación

Se emplea un piranómetro LI-COR 200 SZ con montura para nivelación. El sensor mide radiación solar global más radiación del cielo. La respuesta del sensor fotodiódico de silicio empleado es de 280-2800 nm (Kerr et al. 1967). Se empleó una resistencia de 100  $\Omega$  entre los cables del sensor para transformar la salida en voltaje (0-12.14 mV por 0-1300 W/m<sup>2</sup>). Se diseñó un circuito amplificador con ganancia de 822 para la transformación de 0-5 VDC a 0-1300 W/m<sup>2</sup> (Fig. 2).

### 2.2.4. Velocidad de viento

Se emplea un sensor Met One Instruments 014, con salida analógica 0-5 VDC para el rango 0-45 m/s, con 3 cazoletas de respuesta rápida (constante de distancia < 1.5 m). Tiene una exactitud del 1.5% y rango de operación de -50 a 85°C. Se alimenta con 12VDC.

### 2.2.5. Pluviómetro

Se emplea un TE525MM de Campbell Scientific. Este es del tipo balancín del Weather Bureau, con una precisión del 1% para intensidades de lluvia inferiores a 50 mm/h. El sensor actúa como un interruptor que genera pulsos al cerrarse y que son leídos por el contador interno del Micro 440e. Para disminuir la duración del pulso en la caída del balancín se usa un circuito integrador CR (Tooley, 1988) (Fig. 2). Cada pulso equivale a 0.1 mm de preci-

**“La estación micrometeorológica presentada no sólo tiene un coste inferior a las del mercado sino que ofrece ventajas adicionales que la convierten en una herramienta útil y accesible para estudios de hidrología y necesidades de agua de los cultivos.”**

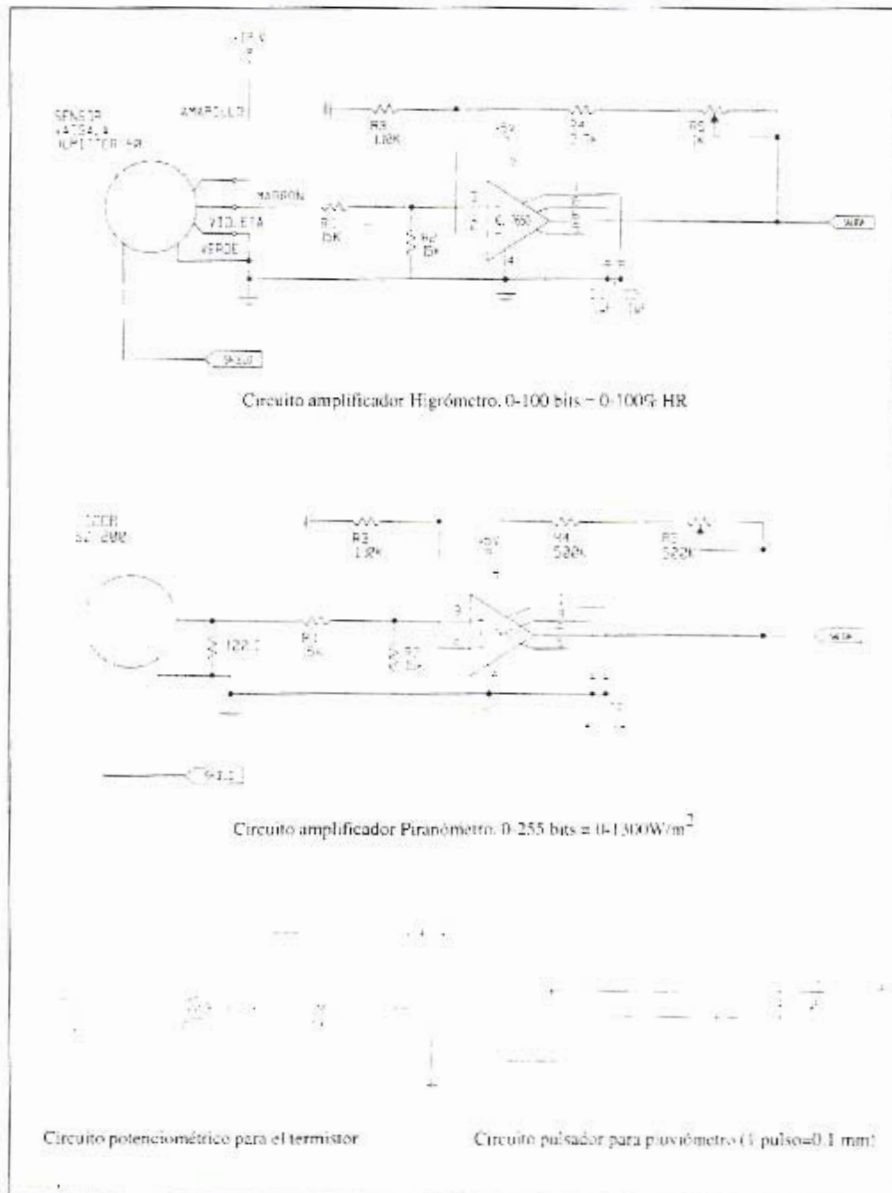


Figura 2. Esquemas de los circuitos acondicionadores de señal.

pitación. La intensidad de lluvia será pues el número de pulsos recibidos en el transcurso del último intervalo de medida (15 min).

### 2.3. Estructura de soporte

Se diseñó una estructura de soporte en forma de cruz con tubo galvanizado de 1" de diámetro. (Fig. 3). Los sensores se dispusieron de manera que no

interfirieran en las lecturas (efectos de "sombra"). La envergadura de la cruz es de 2 m y la altura de la estación estándar 2 m. Para cultivos altos (caso de la platanera) la estructura se eleva a 3.5 m. El soporte se fija mediante vientos y una pequeña zapata de hormigón. El diseño se completó con la adición de alojamientos para la UCC y batería, así como una pequeña mesa auxiliar.



Figura 3. Vista general de la estación en cultivo de platanera (Tenerife).

## 2.4. Programas informáticos

### 2.4.1. Programa del microcontrolador

El programa, escrito en BASIC, reside en la memoria interna del procesador y se autoejecuta tras una interrupción de corriente. El programa, controlado por el reloj calendario externo (RTC) coloca el microprocesador en modo de espera (bajo consumo) hasta que una señal de reloj (o botón de descarga) lo levanta. El RTC provoca la lectura de los sensores cada minuto que son almacenadas en memoria auxiliar. Cada 15 minutos el programa hace media de los valores de cada sensor y los almacena en la memoria de descarga de datos junto a la fecha y hora de lectura. El procesador dispone de 16Kb para almacenamiento de datos, esto es, unas 2 semanas de datos con intervalo de almacenamiento de 15 min.

Tras conectar el PC a la Unidad Central a través del puerto en serie (Fig. 4) se accede al Micro440e a través de un programa de comunicaciones y apretando el botón se inicia la secuencia de descarga de datos (Fig 5a). Al final de la descarga se incluye información del estado de la batería y se ofrece la posibilidad de borrado de los datos de memoria o continuación desde el último punto de almacenamiento.

El ordenador mantiene en memoria no volátil la última posición de almacenamiento lo que le permite, en caso de fallo de corriente, continuar desde la última posición de memoria sin pérdida de datos.

2.4.2. Programa de procesado de datos y cálculo de la ETo de Penman-Monteith

El procesado de los datos se realiza sobre el PC con el ánimo de no restar memoria de datos al Micro440e (pro-

grama más corto) ni tiempo de procesamiento. Para ello se elaboró un programa en FORTRAN que lee el archivo de descarga de datos y lo transforma en una tabla (Fig. 5b) que incluye los valores de la ETo de Penman Monteith (ET<sub>PM</sub>) para cada periodo de 15 min, así como resúmenes diarios de ET<sub>PM</sub> y precipitación.

El programa está basado en los algoritmos de cálculo de la ETo horaria propuestos por Smith et al. (1991) y

Campbell Sci. Ltd. (1994). La dificultad del cálculo de la ET<sub>PM</sub> a intervalos inferiores al día consiste en la estimación de la radiación isotérmica neta de onda larga (Lnl). Monteith y Unsworth (1990) mostraron que la Lnl está correlacionada con la temperatura y un factor de nubosidad función de la relación entre la radiación solar medida y la potencial. La radiación solar potencial depende de la posición terrestre y del tiempo de medida en cada momento. El



Figura 4. Descarga de datos con microordenador.

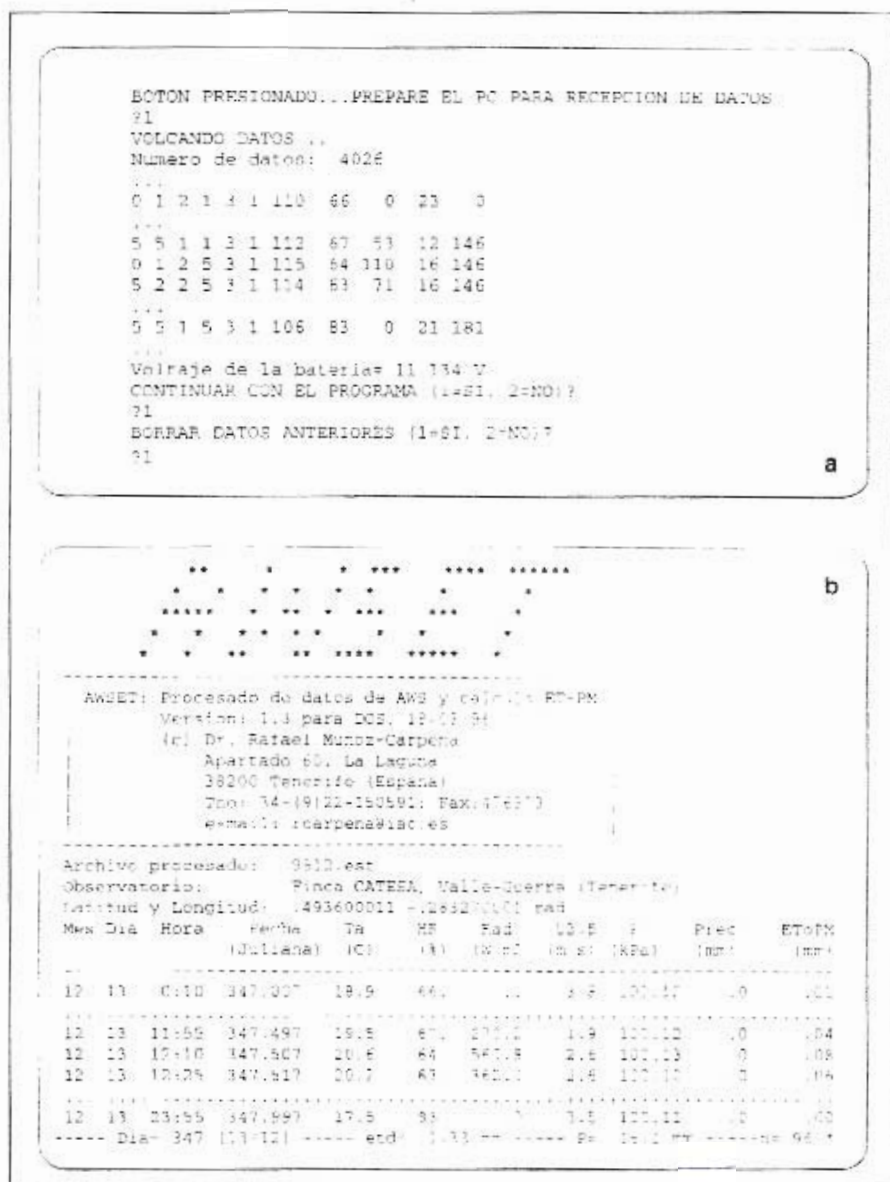


Figura 5. Secuencia de descarga de datos (a) y procesado posterior en el PC con AWSET (b)

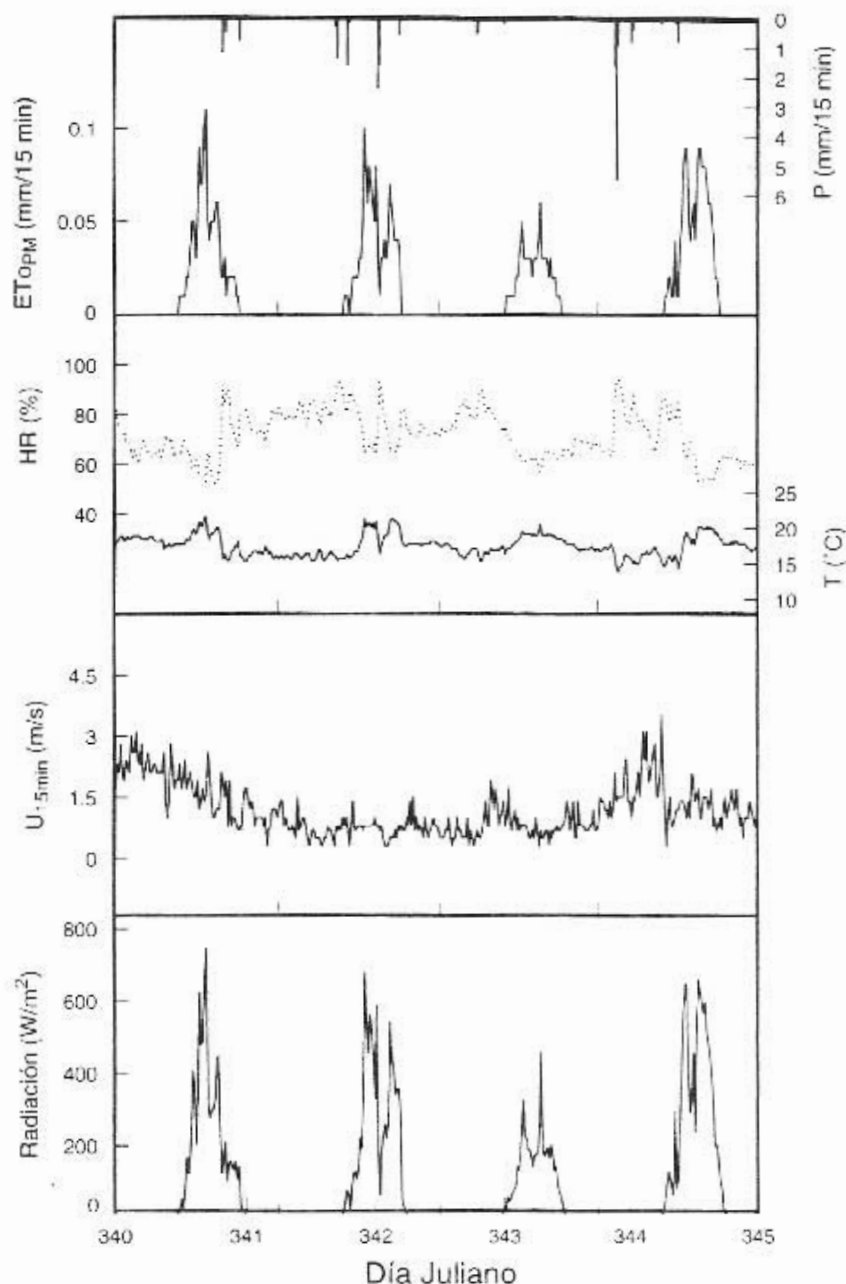


Figura 6. Ejemplo de datos obtenidos por la estación y ET<sub>OpM</sub> calculada con AWSET.

programa AWSET implementa estas variaciones en el cálculo de la ET<sub>OpM</sub>.

AWSET es flexible (asignación de sensores a cada columna de datos, número de sensores procesados, variación de las constantes de posición y

tiempo, así como corrección de la altura de la estación a la de referencia para las diferentes aplicaciones) mediante un archivo de configuración. La figura 6 ilustra el tipo de datos obtenidos y el enorme potencial que ofrece la estación al ofrecer no sólo los valores dia-

**“Ventajas:  
flexibilidad en la  
fijación de los  
intervalos de  
medida y número  
de sondas  
empleadas,  
capacidad de  
memoria, bajo  
consumo,  
protección frente a  
cortes de  
electricidad,  
alimentación en  
campo con una  
batería portátil y  
fácil descarga de  
datos y cálculo de  
la  
evapotranspiración  
de referencia  
mediante un PC  
portátil.”**

rios de la ET<sub>OpM</sub> sino la variación a lo largo del día.

## 2.5. Coste del equipo

El desglose por componentes se incluye en la tabla a continuación. Los precios se reflejan en \$ USA pagado a los proveedores y su traducción a pesetas aproximada a 122pts/\$. Los precios reseñados no incluyen mano

## ARTÍCULOS TÉCNICOS

Cda	COMPONENTE	Precio Ud		Precio Total pis
		(US\$)	(US\$)	
1	Micro440e+ST-I/O Hw.pkg.	319.00	319.00	38.918
4	Sensor Temperatura	14.87	59.50	7.234
1	Sensor HR	179.26	179.26	21.869
2	Amplificadores de señal (HR y Rad)	6.84	13.68	1.669
1	Sensor de velocidad de viento	352.01	352.01	42.948
1	Sensor radiación	154.26	154.26	18.820
1	Pluviómetro	269.26	269.26	32.850
1	Caja, bastidor y otros	215.00	215.00	26.230
TOTAL =			1,561.77	190,535

de obra ni costes de diseño y desarrollo del equipo.

### 3. Conclusiones

La estación micrometeorológica descrita no sólo tiene un coste inferior a las encontradas en el mercado sino que ofrece ventajas adicionales como: flexibilidad en la fijación de los intervalos de medida y número de sondas empleadas, capacidad de memoria, bajo consumo, protección frente a cortes de electricidad, alimentación en campo con una batería portátil y fácil descarga de datos y cálculo de la evapotranspiración de referencia mediante un PC portátil. Estas ventajas le convierten una herramienta útil y accesible para estudios de hidrología y necesidades de agua de los cultivos.

### 4. Reconocimientos

El proyecto ha sido financiado con fondos del proyecto de la Unión Europea EV5V-CT93-0322 e INIA SC95-059. Agradecemos la colaboración prestada en las distintas etapas del proyecto a: Dr. J.E. Parsons, D. Isidro López Herrera y D. Antonio Pérez Regalado. Agradecemos a Tim Hess, del Silsoe College (Reino Unido) su apoyo en el desarrollo del software para el cálculo de la ETo.

### 5. Bibliografía

Campbell Scientific Ltd. 1991. On-line measurement of evaporation and potential evapotranspiration. Techn. note 13-94PI. Campbell:Leics (Reino Unido).

Doorenbos J. y Pruitt W.O. 1976. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 24. FAO: Roma.

Eglowstein, H. 1993. Small, portable data acquisition systems. BYTE magazine. 18(8):76-77.

Fraile Mora, J. y P. García Gutierrez. 1984. Instrumentación Aplicada a la Ingeniería. Universidad Politécnica de Madrid: Madrid.

Horn, D.T. 1994. Basic Electronics Theory. TAB Books, McGraw-Hill: Blue Ridge Summit.

Jensen, M.E., R.D. Burman, y R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE manuals no. 70. ASCE: Nueva York.

Kerr, J.P., G.W. Thurtell, and C.B. Tanner. 1967. An integrating pyranometer for climatological observer stations and mesoscale networks. Journal of Applied Meteorology. 6:688-697.

Monteith, J.L. y M.H. Unsworth. 1990. Principles of Environmental Physics, 2nd. Ed. Edward Arnold: Londres.

Smith M., R. Allen, J.L. Monteith, A. Pernier, y L. Santos Pereira. 1991. Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Reunión FAO, Roma. 28-31 Mayo 1990. FAO: Roma.

Tooley, M.H. 1988. Electronic Circuits Handbook: Design, Testing and Construction. Heinemann Professional Publishing, London.