

SIMULACIÓN DE LA EVAPORACIÓN HORARIA A PARTIR DE DATOS METEOROLÓGICOS

V. Martínez Álvarez, J.M. Molina Martínez y M.M. González-Real y A. Baille

Resumen:

En este artículo se proponen y validan dos modelos, con distinto grado de complejidad, para simular la evaporación a escala horaria en pequeños cuerpos de agua, concretamente en tanques evaporímetros clase A. En primer lugar se ha desarrollado un modelo multicapa, basado en la discretización del volumen de agua en varios estratos. Se han establecido las ecuaciones del balance de energía, tanto en la capa superficial como en las sucesivas capas consideradas, y se ha resuelto el sistema de ecuaciones que configuran el balance energético del tanque mediante aproximaciones iterativas. La validación de este modelo a escala horaria, con datos experimentales obtenidos en Cartagena (España), confirma la existencia de un proceso de mezcla convectivo en el tanque, que produce una homogeneización de la temperatura del agua incluso durante el periodo diurno. Para modelizar correctamente este fenómeno se ha propuesto y validado una función del viento que actúa sobre el coeficiente de mezcla convectivo en el seno del tanque.

En una segunda etapa, se ha desarrollado un modelo numérico simplificado que asume un funcionamiento isoterma del tanque. Los resultados obtenidos son similares a los proporcionados por el modelo multicapa, aunque algo menos precisos.

Palabras clave: Tanque evaporímetro, evaporación, balance de energía, coeficiente de mezcla

INTRODUCCIÓN

El manejo de recursos hídricos y ecosistemas acuáticos continentales requiere cada día de estimaciones más precisas de la evaporación en cuerpos de agua superficiales, sobre todo en regiones áridas y semiáridas, donde los recursos hídricos son más escasos y la componente de evaporación adquiere mayor importancia. En ingeniería hidráulica, la estimación de la evaporación resulta imprescindible para establecer el balance hídrico, necesario tanto para el diseño de nuevas infraestructuras de almacenamiento como para el manejo y gestión de las existentes. Los métodos desarrollados y experimentados durante los últimos 50 años (Allen *et al.*, 1998) para estimar la evaporación en cuerpos de agua (Penman, 1948) y terrenos naturales (Monteith, 1965) se basan en el uso de datos meteorológicos (radiación, temperatura, velocidad del viento y humedad relativa).

Además de este tipo de planteamientos, el método basado en la medida de la tasa de evaporación en un tanque de agua, E_{pan} , también ha sido utilizado habitualmente como una alternativa en las zonas donde se carece de registros de las variables climáticas necesarias. A pesar de que el empleo de registros en tanques evaporímetros se encuentra ampliamente extendido, son pocas las iniciativas que se han llevado a cabo con el fin de estudiar el balance de masa y energía en estos equipos, así como su comportamiento dinámico respecto a las diferentes variables, parámetros y procesos que determinan la tasa de evaporación. Los esfuerzos generalmente se han orientado a determinar coeficientes empíricos, K_{pan} , con el fin de obtener la tasa de evaporación de referencia, E_0 , o de evapotranspiración, ET_0 , tanto con fines agrícolas (Doorenbos and Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 1998)

Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola de la Universidad Politécnica de Cartagena. E.T.S.I. Agrónomos. Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena (Murcia). España. Teléfono: 968 32 54 73; e-mail: victoriano.martinez@upct.es

Artículo recibido el 24 de septiembre de 2004, recibido en forma revisada el 13 de diciembre de 2004 y aceptado para su publicación el 23 de diciembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

como hidrológicos (Linsley, 1958; Linsley *et al.*, 1992). La información de E_{pan} está disponible y se emplea generalmente a escala diaria o semanal. Sin embargo, un mejor conocimiento del balance de masa y energía de los tanques evaporímetros permitiría mejorar tanto la interpretación de los datos de evaporación diaria como los criterios y procedimientos que se aplican actualmente para extrapolar los valores de E_{pan} a superficies de agua de mayor tamaño y terrenos agrícolas. También resulta interesante destacar que el registro de valores de E_{pan} , tanto en redes con fines agrícolas como hidrológicos, es objeto de numerosos errores e incertidumbres, de modo que resulta interesante contrastar los valores registrados con valores de E_{pan} obtenidos a partir de datos meteorológicos, procedimiento que puede ser empleado como criterio para evaluar la calidad de las medidas.

Son muy escasas las referencias orientadas a describir el comportamiento de tanques evaporímetros mediante modelos mecanicistas. El trabajo más destacable es el presentado por Jacobs *et al.* (1998) que, a nuestro juicio, representa el primer intento riguroso orientado específicamente a investigar y modelizar los procesos físicos que justifican la evolución diaria de variables como la temperatura superficial del agua en el tanque, T_s , o la temperatura a distintas profundidades. Los trabajos anteriores (Wartena y Borghorst, 1961; Thom *et al.*, 1981; Pereira *et al.*, 1995) se caracterizan por plantear modelos que no permiten caracterizar los procesos físicos y los intercambios energéticos que tienen lugar en el tanque.

En el caso de estudios de cuerpos de agua mayores, como lagos o embalses, se han propuesto numerosos modelos que describen su comportamiento energético a escala mensual o incluso diaria (Harleman, 1982). Entre ellos cabe destacar los *modelos de difusión* propuestos por Losordo y Piedrahita (1991), ya que proporcionan una descripción detallada de los procesos de intercambio energético, tanto con la atmósfera circundante como en el seno del cuerpo de agua. El balance energético en los modelos de difusión para cuerpos de agua difiere bastante del de otros tipos de superficies dado que la radiación solar incidente es absorbida a lo largo de la columna de agua y no sólo en su superficie.

El principal objetivo de este estudio ha sido desarrollar y validar modelos de evaporación en tanque evaporímetro clase A a escala horaria.

Para ello se ha partido de la estimación de T_s mediante un balance de masa y energía en el tanque para, posteriormente, aplicar ecuaciones de transferencia de masa (tipo Dalton) obtenidas experimentalmente en la estimación de la E_{pan} a partir de T_s y de las variables ambientales habitualmente registradas en las estaciones meteorológicas. Nuestra perspectiva de cara al futuro es adaptar este modelo para la predicción de la evaporación en embalses de regulación de riego y validarlo mediante la experimentación en este tipo de infraestructuras agrarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estación experimental

Para obtener los datos experimentales necesarios en la evaluación y validación de los modelos se ha empleado la instalación implementada en la Estación Universitaria de Investigación Agraria y Alimentaria Tomas Ferro (Cartagena, España). Esta instalación, descrita por Molina *et al.* (2002a), dispone de la instrumentación necesaria para registrar las variables ambientales y la evaporación en dos tanques evaporímetros clase A localizados en una parcela no cultivada.

Medida de la evaporación

La tasa de evaporación en los dos tanques evaporímetros clase A se ha medido mediante un sistema de vasos comunicantes que conecta cada uno de ellos a un depósito auxiliar, situado sobre una balanza electrónica (Sartorius BP 4100, precisión = 0,1 gr), donde mediante pesada continua se ha registrado su peso. Las pesadas en las balanzas se han convertido en tasa de evaporación considerando las características geométricas del depósito auxiliar. Con el fin de que el intercambio térmico entre el agua del tanque y la de llenado interfiera lo mínimo posible en el proceso de evaporación, se ha diseñado un sistema de llenado con control automático (Molina *et al.*, 2003). Este sistema ha permitido el llenado del tanque en función del nivel de agua, de forma que siempre se encuentre entre los valores máximos y mínimos, además de controlar el momento del día en que se debe producir el aporte de agua (6.00 horas). Las paredes y el fondo de los tanques se encuentran aisladas térmicamente del entorno mediante lana de vidrio con pantalla de vapor en el exterior (10 cm de espesor en la base y 5 cm en el perímetro). Los tanques se han recubierto con mallas antipájaros.

SIMULACIÓN DE LA EVAPORACIÓN HORARIA A PARTIR DE DATOS METEOROLÓGICOS

Otras variables monitorizadas en los tanques han sido la temperatura del agua en la superficie (T_s) y en el fondo (T_f). Para estas medidas se han empleado dos sondas RTD Pt100 con vaina de acero inoxidable de 0,15 y 0,3 m, para sumergir en agua.

Datos meteorológicos

Para la monitorización de las variables meteorológicas se ha instalado un mástil de 2 m de altura junto a uno de los tanques y se han instalado los sensores necesarios para registrar las siguientes variables: temperatura del aire (T_a) y humedad relativa (HR) a 0,15 m sobre la superficie del agua y a 2 m sobre el terreno, radiación solar global, tanto incidente (S) como reflejada (aS , donde a es el albedo del agua), radiación neta (R_n), velocidad del viento a dos alturas (2 m sobre el terreno con un anemómetro de cazoletas, u_{200} , y 0,15 m sobre la superficie del agua con un anemómetro de hilo caliente, u_{15}) y dirección del viento a 2 m.

Los datos de todas las variables se han registrado cada 10 segundos, almacenándose las medias cada 30 minutos en un *data-logger* (PC con tarjeta de adquisición de datos PCI-9111/HR). Los datos se han recogido semanalmente y se han procesado en gabinete.

Bases de los modelos

La evaporación desde cuerpos de agua depende directamente del gradiente de presión de vapor entre su superficie (a la temperatura T_s) y el aire que la rodea (a la temperatura T_a). Por tanto, el conocimiento de T_s es un requisito previo para predecir correctamente la tasa de evaporación de cualquier superficie de agua, ya sea un tanque evaporímetro o un embalse de regulación de riego. Dado que T_s puede variar considerablemente a lo largo del día, sobre todo en función de la radiación incidente y el balance de energía en la superficie, el primer objetivo del estudio ha sido

desarrollar modelos dinámicos a escala horaria, partiendo de las medias horarias de las variables climáticas implicadas en el proceso, y asumiendo condiciones permanentes durante dichos intervalos de 1 hora.

Los modelos presentados se basan en la formulación matemática de los principios físicos fundamentales que rigen los intercambios de masa y energía, partiendo de las formulaciones propuestas por Losordo y Piedrahita (1991) y Jacobs *et al.* (1997). Las condiciones de contorno iniciales han sido modificadas y adaptadas al caso particular de un tanque evaporímetro. Concretamente, se ha asumido que las pérdidas de calor por convección y conducción a través del fondo y paredes del tanque eran despreciables. Esta suposición fue considerada en nuestros experimentos, dado que tanto las paredes del tanque como el fondo fueron térmicamente aislados del entorno.

En primer lugar, el modelo se planteó con una estructura multicapa a lo largo de la profundidad del tanque, lo cual permitió considerar tanto los efectos de mezcla producidos por los movimientos convectivos del agua como la estratificación térmica.

Modelo multicapa

La figura nº1 muestra un esquema de los distintos flujos de energía intercambiados entre el cuerpo de agua y el ambiente circundante durante el día (Fig. 1a) y la noche (Fig. 1b). El cuerpo de agua se ha considerado dividido en 5 capas o estratos de igual espesor δ (m).

Teniendo en cuenta estos intercambios de masa y energía, el balance de energía en la primera capa de agua (estrato superficial) se ha descrito como:

$$S_{ab} + L_n + H_s - \lambda E - G_w - \Delta Q_{w1} = 0 \quad (1)$$

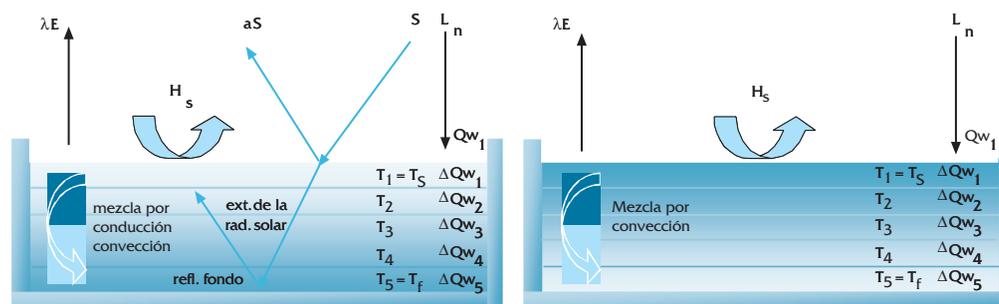


Figura nº1. Intercambios de energía en el sistema considerado (tanque evaporímetro): a) durante el día y b) durante la noche

donde:

- S_{ab} representa la radiación de onda corta (solar) absorbida en la capa ($W m^{-2}$)
- L_w la radiación neta de onda larga ($W m^{-2}$)
- H_s es el calor sensible intercambiado con la atmósfera ($W m^{-2}$)
- E es la tasa de evaporación desde la superficie ($kg_{agua} m^{-2} s^{-1}$) y λ es el calor latente de vaporización ($J kg^{-1}$)
- G_w es la suma del calor intercambiado por conducción y convección con la capa adyacente ($W m^{-2}$)
- ΔQ_w es la variación de calor almacenado en la primera capa durante el intervalo de tiempo considerado.

Para el resto de capas el balance de energía es:

$$S_{ab} - G_w - \Delta Q_w = 0 \quad (2)$$

Determinación de la radiación absorbida de onda corta S_{ab}

La radiación de onda corta absorbida en la capa superficial, $S_{ab}(1)$, se ha calculado como:

$$S_{ab}(1) = S(1-a) \left[\beta + (1-\beta) \left(1 - e^{-\frac{\epsilon \delta}{\cos(\theta)}} \right) \right] \quad (3)$$

donde S es la radiación solar incidente en la superficie, ϵ es el coeficiente de extinción del agua limpia ($\epsilon = 12 m^{-1}$, Weast, 1980; Jacobs *et al.* 1998), δ es el espesor de la capa de agua, $\cos(\theta)$ es el factor de corrección para tener en cuenta el ángulo cenital de los rayos del sol en cada momento, θ , y β es la fracción de la radiación de onda corta inmediatamente absorbida en la primera capa, calculada como $\beta = 0,45 [S(1-a)]$ (Orlob, 1983; Octavio *et al.*, 1977; Jacobs *et al.*, 1998). Considerando el mismo espesor y el mismo coeficiente de extinción, el valor de S_{ab} para el resto de capas viene determinado por la siguiente ecuación:

$$S_{ab}(n) = S(1-a)(1-\beta) e^{-\frac{\epsilon(n-1)\delta}{\cos(\theta)}} \left(1 - e^{-\frac{\epsilon \delta}{\cos(\theta)}} \right) \quad (4)$$

donde n es el número de la capa que varía desde 2 hasta 5.

Se considera que en el fondo del tanque el coeficiente de reflexión del acero inoxidable es $\alpha_s = 0.05$ (Weast, 1980). De esta forma, la radiación solar que alcanza el fondo del tanque es reflejada hacia las capas de agua superiores, siendo tratada de la misma forma que la radiación incidente (ecuación n°4).

Variación del calor almacenado, ΔQ_w

La cantidad de calor almacenado o cedido por una determinada capa, ΔQ_w , viene dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta Q_w = c_w \delta \frac{\Delta T_w}{\Delta t} \quad (5)$$

donde c_w es la capacidad calorífica volumétrica del agua ($J m^{-3} K^{-1}$) a la temperatura de la capa (T_w) y $\Delta T_w / \Delta t$ es la variación de la temperatura del agua durante el periodo de tiempo Δt .

Calor intercambiado en el seno del agua, G_w

El calor intercambiado entre las diferentes capas G_w tiene lugar tanto por conducción como por convección. Se ha considerado que los flujos convectivos dependen de (i) la diferencia de densidad del agua debido a la estratificación térmica y (ii) los movimientos de agua en el seno del tanque provocados por las fuerzas de arrastre del viento (Bloss y Harleman, 1979). G_w se ha expresado como:

$$G_w = -c_w K_w(z) \frac{\Delta T_w}{\Delta z} \quad (6)$$

donde $K_w(z)$, es la difusividad efectiva ($m^2 s^{-1}$) a la profundidad z (m). En una primera aproximación, $K_w(z)$ se estimó como una función del número de Richardson del agua, $Ri_w(z)$, que tiene en cuenta tanto la estratificación térmica a la profundidad z (m) como la velocidad de fricción w^* ($m s^{-1}$). Su valor viene dado por:

$$Ri_w(z) = \frac{\alpha_w g z^2 \Delta T_w}{w^{*2} \Delta z} \quad (7)$$

donde g es la aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$), $\Delta T_w / \Delta z$ es el gradiente de temperatura entre las capas de agua sucesivas y α_w (K^{-1}) es el coeficiente de expansión del agua, que se ha expresado como una función de la temperatura T_w (K):

$$\alpha_w = 1,5 \cdot 10^{-5} (T_w - 277) - 2 \cdot 10^{-7} (T_w - 277)^2 \quad (8)$$

En esta primera aproximación, el cálculo de $K_w(z)$ se ha realizado mediante las siguientes expresiones:

- Para la transferencia de calor por turbulencia ($K_{0,z}$), siguiendo la relación propuesta por Sundaram y Rehm (1973):

$$K_{0,z}(z) = 2,82 \cdot 10^{-2} w^* \quad (9)$$

donde el valor de w^* se ha obtenido a partir de la

expresión (Henderson-Sellers, 1984):

$$w^* = \sqrt{\frac{\rho_a C_z(z) u^2}{\rho_w}} \quad (10)$$

donde ρ_a y ρ_w (kg m^{-3}) son la densidad del aire y el agua respectivamente, u es la velocidad del viento a 2 m de altura y $C_z(z)$ es el coeficiente de arrastre para superficies de agua ($C_z = 0,0016$; Condie y Webster, 1997).

- Para incluir el efecto de la estratificación térmica, se ha empleado la corrección sugerida por Sundaram y Rehm (1973):

$$K_w(z) = \frac{K_{0,z}(z)}{1 + \sigma_1 R_{j_w}(z)} \quad (11)$$

donde σ_1 es una constante ($= 0.05$).

Como se justifica en el epígrafe de resultados y discusión, posteriormente se ha propuesto y validado una nueva formulación para modelizar la transferencia interna de calor por convección y conducción, G_w , más sencilla y que ofrece mejores resultados.

Determinación del calor sensible intercambiado con la atmósfera, H_s

El calor sensible intercambiado en la interfase aire-agua ha sido calculado como:

$$H_s = h_c \rho_a C_p (T_a - T_s) \quad (12)$$

donde C_p es el calor específico del aire ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T_a y T_s son la temperatura del aire y de la superficie de agua, respectivamente, y h_c es el coeficiente de difusividad térmica del aire (m s^{-1}). El valor h_c puede aproximarse al valor del coeficiente de transporte de vapor, h_v , el cual ha sido determinado de forma experimental para los tanques evaporímetros empleados en este estudio (Molina, 2004):

$$h_v = 0,0037 u_{200} + 0,0024 \quad (13)$$

donde u_{200} es la velocidad del viento medida a 2 m.

Determinación de la tasa de evaporación, E

La tasa de evaporación en el tanque, E_{pan} (mm h^{-1}), ha sido obtenida por medio de una ecuación empírica tipo Dalton, la cual se ha determinado experimentalmente para los tanques evaporímetros empleados en este estudio (Molina, 2004):

$$E_{pan} = (0,095 u_{200} + 0,0858) (e_s - e_{200}) \quad (14)$$

donde e_s (kPa) es la presión de vapor saturante a la temperatura T_s , y e_{200} (kPa) la presión de vapor del aire medida a 2 m.

Determinación de la radiación neta de onda larga, L_n

La radiación neta de onda larga ha sido calculada como:

$$L_n = L_i - L_o \quad (15)$$

donde L_i y L_o (W m^{-2}) son, respectivamente, la radiación emitida por la atmósfera y la radiación emitida por la capa superficial de agua. Estos dos componentes se han estimado mediante la ley de Stefan-Boltzmann considerando:

- La emisividad del agua como $\epsilon_w := 0,97$ (Miro-Granada, 1984)
- La emisividad de la atmósfera, ϵ_a , calculada mediante la expresión propuesta por Brutsaert (1975):

$$\epsilon_a = 0,56 + 0,2529 \sqrt{e_{200}} \quad (16)$$

Por tanto, la expresión final empleada para el cálculo de L_n ha sido:

$$L_n = ((1 - \rho) \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_w \sigma T_w^4) C_F \quad (17)$$

donde ρ es el albedo del agua para onda larga ($= 0,03$, Miro-Granada, 1984), y C_F representa el coeficiente de forma, que tiene en cuenta las particularidades del entorno (geometría del tanque) en las proximidades de la superficie de agua. En este estudio se ha asumido $C_F = 0,95$ (Oroud, 1998).

Modelo simplificado

Se ha comprobado experimentalmente que la diferencia entre la temperatura superficial del agua, T_s , de un tanque evaporímetro y la temperatura del fondo, T_p , es insignificante (Jacobs *et al.*, 1998; Molina *et al.*, 2002b). Esta circunstancia indica que el tanque es isotermino y, por tanto, se puede considerar que T_s es igual a la temperatura de todo el volumen de agua, T_w . Considerando este hecho, el modelo ha sido simplificado mediante un planteamiento monocapa en el balance de masa y energía, por lo que la ecuación n°1, que ahora representa dicho balance para el conjunto del tanque, se ha expresado de la siguiente forma:

$$R_n + H_s - \lambda E - \Delta Q_w = 0 \quad (18)$$

donde R_n ($W m^{-2}$) representa la radiación neta en la superficie de agua.

$$R_n = (1 - a) S + L_n \quad (19)$$

El valor de a habitualmente considerado para agua limpia es $a = 0,08$ (Weast, 1980; Jacobs *et al.*, 1997). La ecuación nº18 es similar a la propuesta por Chow *et al.* (1999) para establecer el balance de energía de un tanque evaporímetro.

El conjunto de ecuaciones previamente descrito, tanto para el modelo multicapa como para el modelo simplificado, ha sido resuelto mediante un planteamiento de aproximaciones iterativas programado en *Visual BasicTM* e implementado en la hoja de cálculo *Microsoft Excel*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evidencia experimental del comportamiento isoterma del tanque

Las mediciones de la temperatura del agua en la superficie del tanque y el fondo del tanque evaporímetro muestran una distribución prácticamente homogénea de la temperatura en el tanque, como puede observarse en la figura nº2 para los cuatro días seleccionados, uno en cada estación del año:

- 1 de mayo de 2003 y 4 de agosto de 2002, ambos caracterizados por un cielo despejado y condiciones de viento moderadas, sin exceder los $5 m s^{-1}$ en ningún momento.

- 17 de octubre de 2002, caracterizado por un ambiente nublado hasta el mediodía y viento moderado.

- 7 de enero de 2003, con condiciones soleadas y fuertes rachas de viento durante todo el día.

Los valores reflejados en la figura nº2 indican que, para cualquier época del año, no existen evidencias de estratificación térmica en el cuerpo de agua. Durante el día, la estratificación que pudiera formarse desaparece como consecuencia de la turbulencia inducida por el viento que incide en la superficie. Durante la noche, donde frecuentemente nos encontramos condiciones de viento muy débiles, la mezcla por convección natural como consecuencia del enfriamiento del agua superficial resulta suficiente para mantener homogénea la temperatura del cuerpo de agua. Este mismo fenómeno también se puso de manifiesto en investigaciones anteriores (Losordo y Piedrahita, 1991; Jacobs *et al.*, 1997, 1998) que avalan la hipótesis de comportamiento isoterma del tanque. Otro resultado a destacar es la inercia térmica del tanque, que alcanza los máximos diarios de temperatura sobre las 16h, con un retraso de 3 a 4 horas con respecto al máximo de radiación solar interceptada (12h).

Modelo multicapa

Los resultados iniciales del modelo han simulado en todos los casos la aparición de una fuerte estratificación térmica, que no se corresponde con los resultados experimentales registrados durante los cuatro días seleccionados.

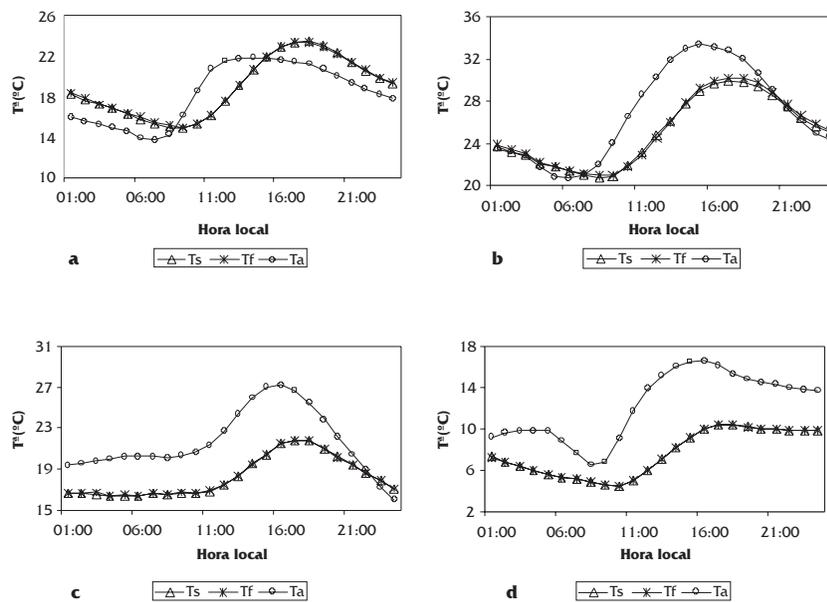


Figura 2. Valores horarios de temperatura del agua superficial del tanque (T_s), del fondo (T_f) y del aire a 2 m de altura (T_a): a) 1 de mayo de 2003, b) 4 de agosto de 2002, c) 17 de octubre de 2002, d) 7 de enero de 2003

Este mismo resultado fue observado por Jacobs *et al.* (1998), quien concluyó que la forma del tanque y, en particular, el efecto de la turbulencia inducida por el borde del tanque tienen una gran influencia en la intensidad de la mezcla. Por esta circunstancia, se ha modificado la formulación descrita en la ecuación n°6 para definir los procesos de transferencia interna de calor por convección y conducción. En esta segunda aproximación, se ha supuesto que el flujo por convección interna dentro del cuerpo de agua es una función lineal de la velocidad del viento: $g(u) = \alpha u_{200}$. El intercambio de calor por conducción se ha expresado como $Q_{cd} = K_{cd} \Delta T_w / \Delta z$, donde K_{cd} ($W m^{-1} K^{-1}$) es la conductividad térmica del agua. Por lo tanto, la nueva formulación para la transferencia interna de calor por convección y conducción se ha expresado de la siguiente forma:

$$G_w = (g(u) + K_{cd}) \frac{\Delta T_w}{\Delta z} \quad (20)$$

Con el fin de determinar el valor de la función $g(u)$, se han realizado ajustes sucesivos del parámetro α hasta que las temperaturas modelizadas se encontraron en el entorno de $\pm 0,1$ °C respecto a las temperaturas observadas para todas las capas. La función optimizada deducida ha sido la siguiente:

$$g(u) = 12 u_{200} \quad (21)$$

$g(u)$ proporciona el orden de magnitud de la intensidad del proceso de mezcla con respecto al intercambio de calor por conducción. Para $u_{200} = 5$ $m s^{-1}$, $g(u) = 60$, lo que implica que el proceso de mezcla es mucho más efectivo que el de conducción ($K_{cd} = 0,586$ a 20 °C) en la homogeneización del campo de temperaturas en el tanque. Los resultados obtenidos con esta nueva formulación del modelo se recogen en la figura n°3 para el día de primavera (1 de mayo). Puede observarse el buen ajuste existente entre los valores de la temperatura modelizados para todas las capas y los observados (recogidos en la figura n° 2a).

La intensidad del proceso de mezcla en el cuerpo de agua fue también considerada por Jacobs *et al.* (1998) mediante la corrección del coeficiente de arrastre (*drag coefficient*) para superficies libres de agua, C_d , en la ecuación n°10, pero no pudieron evitar pequeñas discrepancias con los valores extremos de temperatura observados para todas las capas. La comparación entre los valores estimados ($T_{s,e}$) y los valores medidos ($T_{s,m}$) de la temperatura superficial del agua para los cuatro días seleccionados (figuras n°4 y n°5) muestran que el empleo

de la función $g(u)$ (i) proporciona una predicción realista del comportamiento térmico del tanque en cualquier época del año (día de primavera en la figura n°4, y días de verano, otoño e invierno en la figura n°5) y (ii) mejora significativamente la predicción de los valores extremos con respecto a las propuestas del modelo de Jacobs.

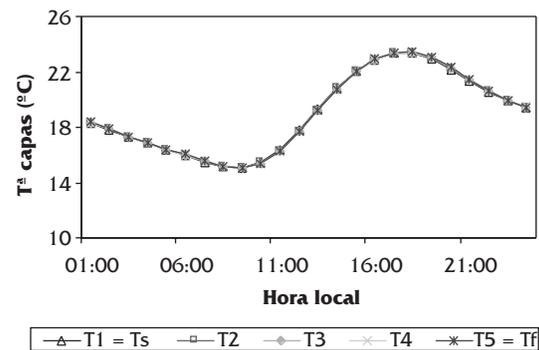


Figura 3. Evolución de las temperaturas modelizadas en las diferentes capas del tanque (1 de mayo de 2003)

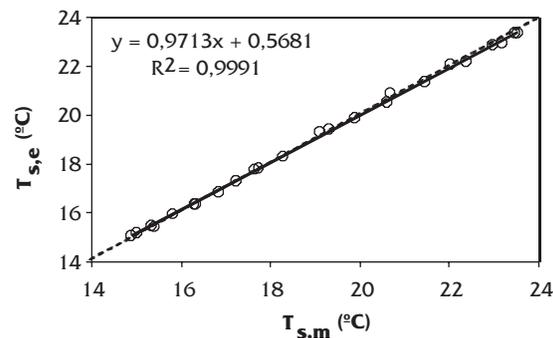


Figura 4. Correlación entre la temperatura superficial estimada ($T_{s,e}$) y medida ($T_{s,m}$) en el tanque (1 de mayo de 2003)

Modelo simplificado

La comparación entre los valores estimados ($T_{w,e}$) y medidos ($T_{w,m}$) de la temperatura del agua también se ha realizado empleando el modelo simplificado (figura n°6). Teniendo en cuenta la simplicidad de este modelo, el ajuste entre $T_{w,e}$ y $T_{w,m}$ resulta muy satisfactorio, a pesar de ser ligeramente menos preciso que el proporcionado por el modelo multicapa. La pérdida de precisión es más evidente durante el día de otoño (17 de octubre), para el que se observa una máxima diferencia de aproximadamente 0,7 °C al amanecer. Considerando simultáneamente los datos horarios correspondientes a los 4 días estudiados, la regresión lineal entre $T_{w,e}$ and $T_{w,m}$ proporciona una pendiente de 0,97 y una desviación estándar de 0,23 °C.

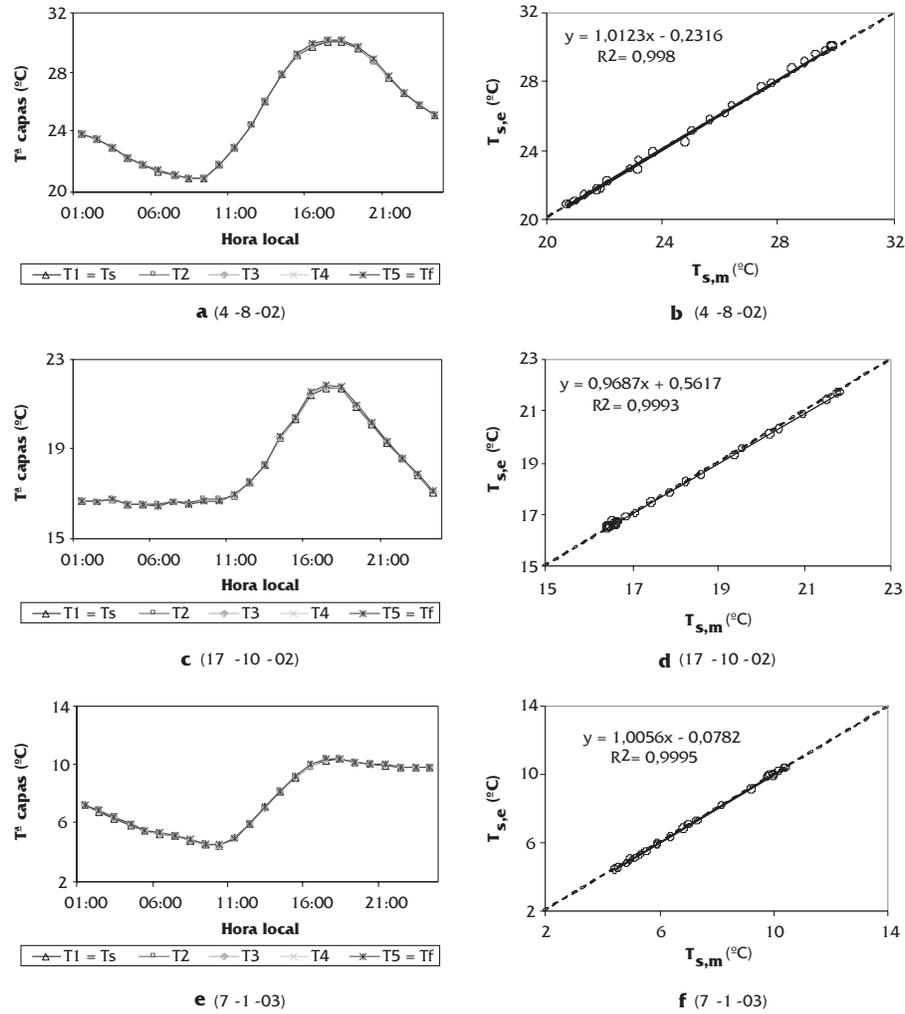


Figura 5. Evolución horaria de la temperatura superficial estimada ($T_{s,e}$) y medida ($T_{s,m}$) y ajuste por regresión lineal entre ellas: 4 de agosto de 2002 (a, b); 17 de octubre de 2002 (c, d) y 7 de enero de 2003 (e, f)

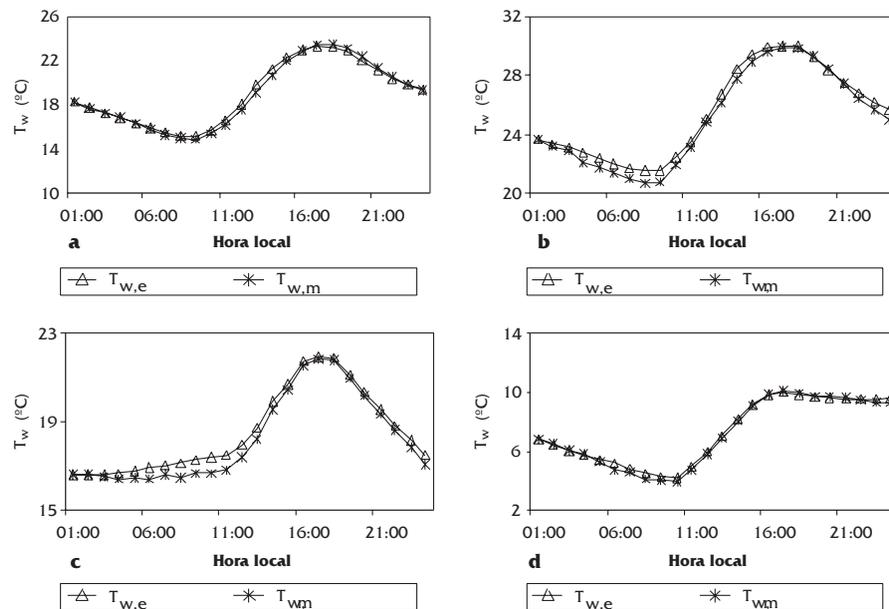


Figura 6. Evolución horaria de temperatura del agua estimada ($T_{w,e}$) y medida ($T_{w,m}$): a) 1 de mayo de 2003, b) 4 de agosto de 2002, c) 17 de octubre de 2002, d) 7 de enero de 2003

SIMULACIÓN DE LA EVAPORACIÓN HORARIA A PARTIR DE DATOS METEOROLÓGICOS

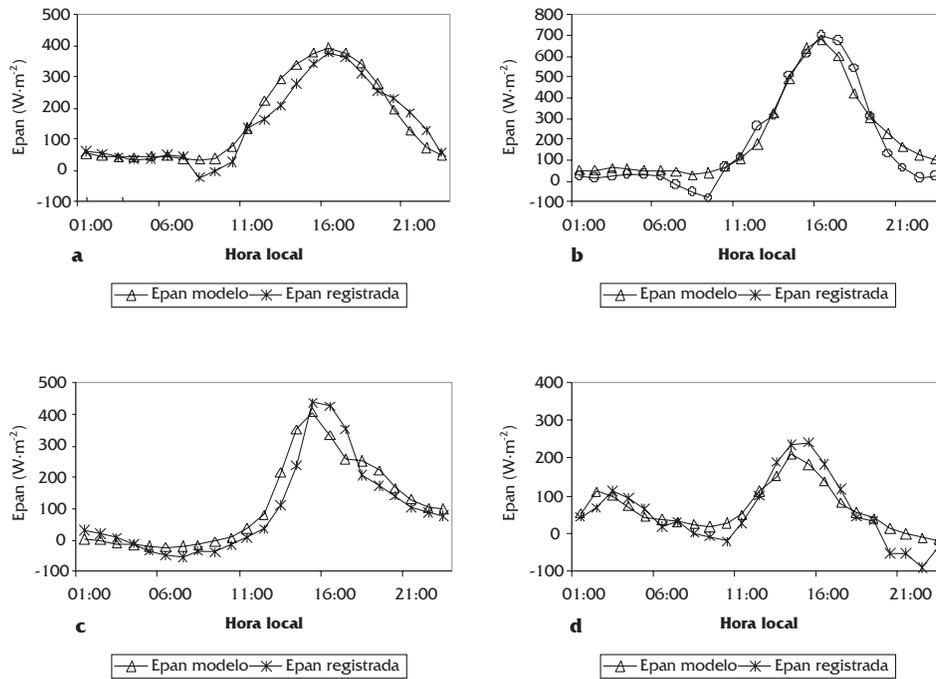


Figura nº7. Evolución horaria de la tasa de evaporación registrada y modelizada: a) 1 de mayo de 2003, b) 4 de agosto de 2002, c) 17 de octubre de 2002, d) 7 de enero de 2003

Los valores de $T_{w,e}$ se han empleado para predecir E_{pan} mediante la ecuación nº14, determinada para los tanques evaporímetros clase A usados en los experimentos. Los valores de E_{pan} obtenidos con un conjunto de datos independientes de los cuatro días seleccionados son relativamente satisfactorios, como se ilustra en la figura nº7. Se puede observar que la evolución de la tasa de evaporación a lo largo de las 24 horas del día es estimada correctamente, en particular el momento de ocurrencia del valor máximo de E_{pan} , así como su valor absoluto. El peor ajuste de E_{pan} corresponde al amanecer, momento en el que frecuentemente se producen fenómenos de condensación. Este mismo resultado se encontró con las estimaciones del modelo multicapa. Obviamente, ninguno de los modelos es capaz de reproducir correctamente el proceso de condensación, que está asociado a las condiciones ambientales concurrentes en la capa de aire inmediatamente próxima a la superficie de agua. Por tanto, las medidas de la temperatura y humedad del aire a 2 m de altura no son suficientemente representativas del microclima sobre la superficie del agua bajo condiciones de fuerte enfriamiento por radiación de dicha superficie, lo que explica la pobre capacidad predictiva de ambos modelos durante este periodo del día.

También resulta de interés estudiar el comportamiento del tanque evaporímetro frente a distintas condiciones climáticas. La figura nº8 presenta la

evolución de todos los flujos que intervienen en el balance de energía definido para el modelo simplificado. Los días de primavera y verano muestran un comportamiento similar (figura nº8a y 8b). Se puede observar durante estos días que, desde el amanecer hasta el momento en que se alcanza el máximo de radiación neta incidente, sólo una fracción relativamente pequeña de la radiación es empleada en el proceso de evaporación. La mayor parte de la energía solar se almacena en el cuerpo de agua, produciendo un incremento progresivo de la temperatura del agua que a su vez incrementa la tasa de evaporación. El flujo de calor sensible H_s es relativamente pequeño (entre 20 y 40 $W \cdot m^{-2}$) y presenta valores positivos durante el día, lo que implica que el aire suministra energía al cuerpo de agua. Durante la tarde, la evaporación representa el mayor flujo de energía perdido por el tanque. El momento con máximo valor de E_{pan} , alcanzado sobre las 16h (15h solares en otoño e invierno y 14h solares en primavera y verano), tiene lugar cuando E_{pan} excede la radiación neta. A partir de las 16h, el balance global de energía en el tanque es negativo y el cuerpo de agua pierde energía ($\Delta Q_w < 0$), con el consecuente descenso en la temperatura superficial (figura nº6) y en la tasa de evaporación. Durante la noche la energía necesaria para la evaporación es proporcionada por el calor almacenado en el agua, pero también se pierde este calor almacenado en forma de radiación de onda larga e intercambio de calor sensible con la atmósfera.

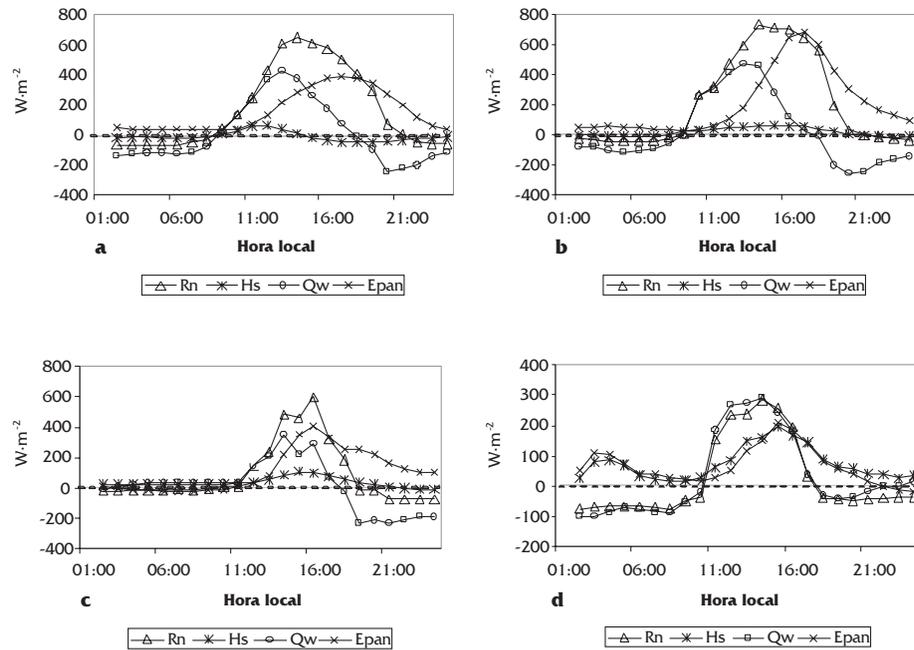


Figura nº8. Evolución diaria de los términos que intervienen en el balance de energía del tanque. Con el fin de facilitar la comparación, la energía perdida por evaporación, λE_{pan} , se ha representado con valores positivos: a) 1-5-03, b) 4-8-02, c) 17-10-02, d) 7-1-03

El día de otoño (17 de octubre) presenta la misma tendencia general que los días de primavera y verano (figura nº8c), excepto que, durante esta estación, la radiación neta en la superficie de agua es notablemente más baja. Puede observarse como la energía almacenada, ΔQ_w , evoluciona siguiendo las mismas fluctuaciones que la radiación neta, mientras E_{pan} no parece estar influenciada por estas fluctuaciones. Este resultado indica que la tasa de evaporación está claramente desvinculada de la radiación solar, a diferencia de lo que ocurre con la evapotranspiración de cultivos, que responde de forma rápida a cambios instantáneos de radiación.

El día de invierno (7 de enero) presenta un comportamiento distinto en los flujos de energía (figura nº8d) respecto al resto de días estudiados. Los intercambios de calor sensible por convección (H_s) suponen un flujo importante de energía ganada por el cuerpo de agua. Puede observarse cómo la evolución de H_s y E_{pan} , por un lado, y de Q_w y R_n por otro, son prácticamente idénticas en magnitud y presentan tendencias similares a lo largo del día. Este comportamiento sugiere que, durante el invierno, la cantidad de energía almacenada durante el día es aproximadamente la integral de la radiación neta, y la cantidad de energía perdida por evaporación es compensada por una ganancia equivalente de calor sensible aportado por la atmósfera circundante.

CONCLUSIONES

De los resultados presentados en el apartado anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- A pesar que durante el día se producen condiciones ambientales que favorecen la estratificación en el cuerpo de agua, ésta desaparece como consecuencia de la mezcla inducida por el viento. Durante la noche, al enfriarse más la superficie que el fondo del tanque, se produce un movimiento por convección natural que junto con la mezcla producida por el viento produce una homogeneización de la temperatura del tanque. Por ello se puede indicar, desde el punto de vista del comportamiento térmico, que el tanque evaporímetro Clase A es isotermo.
- El modelo multicapa utilizado inicialmente muestra una clara estratificación del tanque, por lo que no consigue definir correctamente su comportamiento térmico. Tras definir e incorporar una función de mezcla empírica $g(u)$ para modelizar el proceso de convección interna, se ha conseguido describir satisfactoriamente la evolución de la temperatura en el tanque, tanto en tiempo como magnitud.

- c) La aplicación del modelo multicapa requiere la definición de las condiciones iniciales, y en particular, el valor inicial de la temperatura del fondo del tanque. Esto supone una importante restricción si se pretende aplicar el modelo como una herramienta operacional, por lo que su mayor interés radica en que permite realizar un análisis detallado de los procesos de mezcla, lo que le convierte en una herramienta adecuada para simular los procesos de conducción y convección en el cuerpo de agua. Este tipo de modelos puede ser especialmente útil para el estudio de embalses y presas de mayor tamaño y profundidad.
- d) Con el fin de predecir la evaporación en tanques evaporímetros, el planteamiento de un modelo simplificado (monocapa) que asuma un campo homogéneo de temperaturas en el cuerpo de agua proporciona resultados satisfactorios, con la ventaja de ser mucho más manejable. El modelo simplificado propuesto permite, con los datos proporcionados por cualquier estación meteorológica, obtener de forma sencilla y robusta una estimación precisa de la temperatura superficial del agua, por lo que puede ser aplicado para estimar la evaporación aplicando ecuaciones de transferencia de masa tipo Dalton ajustadas experimentalmente.
- e) El modelo simplificado puede ser aplicado a otros cuerpos de agua de menor o mayor tamaño siempre que se cumpla la hipótesis de comportamiento isoterma. Sin embargo, el coeficiente de transferencia de masa, h_v , que depende de la velocidad del viento u , debe ser determinado para cada caso concreto. Este requisito supone el principal obstáculo para la generalización de la aplicación del modelo simplificado a otro tipo de tanques evaporímetros o a pequeños embalses. Estos aspectos serán tratados en trabajos futuros.
- f) Se ha mostrado el comportamiento del tanque evaporímetro a lo largo del día frente a diversas condiciones climáticas, analizando cómo evolucionan todos los términos que intervienen en el balance de energía. Del análisis de los distintos flujos del balance se deduce que, en los periodos invernales, cuando la radiación solar disminuye notablemente, es el calor sensible intercambiado con la atmósfera el que gobierna la evaporación del tanque.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Fundación Séneca mediante el proyecto PI-45/00851/FS/01 "Desarrollo y evaluación experimental de un modelo de evaporación de agua en lámina libre. Aplicación a la mejora del aprovechamiento del agua mediante el estudio de la eficiencia de técnicas reductoras de la evaporación en embalses de riego".

REFERENCIAS

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. y Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper n° 56, FAO (United Nations), Rome, p. 300.
- Bloss, G. y Harleman, R.F., 1979. Effect of wind-mixing on the thermocline formation in lakes and reservoirs. Technical Report 249, Ralph M. Parson Laboratory, MIT, Cambridge, MA, p. 68.
- Brutsaert, W., 1975. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, 11 (5): 742-744.
- Condie, S.A. y Webster, I.T., 1997. The influence of wind stress, temperature, and humidity gradients on evaporation from reservoirs. *Water Resources Research*, 33 (12): 2813-2822.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W., 1999. *Applied Hydrology*. Ed. McGraw-Hill, p. 584.
- Doorembos, J. y Pruitt, W.O., 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO (United Nations), Rome, p. 179.
- Harleman, D.R.F., 1982. Hidrotermal analysis of lakes and reservoirs. *Journal of the Hydrology Division, ASCE*, 108: 302-325.
- Henderson-Sellers, B., 1984. *Engineering Limnology*. Pitman Advanced Publishing Program, Boston, M.A., p. 356.
- Jacobs, A.F.G., Heusinkveld, B.G. y Lucassen D.C., 1998. Temperature variation in a class A evaporation pan. *Journal of Hydrology*, 206: 75-83.
- Jacobs, A.F.G., Jetten, Th.H., Lucassen, D.C., Heusinkveld, B.G. y Nieveen, J.P., 1997. Diurnal temperature fluctuations in a natural shallow water body. *Agriculture and Forest Meteorology*, 88: 269-277.
- Linsley, R.K., 1958. *Techniques for Surveying Water Resources*. World Meteorological Organization, Technical Note n° 26, 124 p.
- Linsley, R.K., Kohler, M.A. y Paulhus, J.L.H., 1992. *Evaporation and Transpiration*. Hydrology for Engineers. New York, McGrawHill, 508 p.
- Losordo, T.M. y Piedrahita, R.H., 1991. Modelling temperature variation and thermal stratification in shallow aqua-

culture ponds. *Ecological Modelling*, 54: 189-226.

Miro-Granada, J., 1984. Evaporación en Embalses. Instituto Nacional de Meteorología (INM). Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones, Madrid, p.139.

Molina, J.M., 2004. Caracterización y modelización de la evaporación en tanques evaporímetros y embalses de riego. Evaluación de los efectos de mallas de sombreado. *Tesis Doctoral*, Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola, Universidad Politécnica de Cartagena, España, p 207.

Molina, J.M., Martínez, V. y Górriz, B., 2003. Automatización con control horario del llenado de tanques evaporímetros clase A. 2º Congreso Nacional de Agroingeniería, Córdoba, España, 451-452.

Molina, J.M., Martínez, V. y Baille, A., 2002a. Estación experimental para el registro de las variables implicadas en la modelización del proceso de evaporación y el estudio de diferentes técnicas reductoras. XX Congreso Nacional de Riegos, Ciudad Real, España, 105-106.

Molina, J.M., Martínez, V. y Baille, A., 2002b. Modificaciones microclimáticas inducidas por mallas planas de sombreado empleadas para reducir la evaporación en embalses. VI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Barcelona, España, 261-262.

Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the environment. *Symposium of the Society of Experimental Biology*, 19: 245-269.

Octavio, K.A., Jirka, G.H. y Harlman, D.R.F., 1977. Vertical transport mechanism in lakes and reservoirs. Technical report No. 227, Ralph M. Parsons Laboratory, MIT Cambridge, M.A, p. 131.

Orlob, G.T., 1983. Models for stratified impoundments. In: Biswas, A.K. (Ed), *Models for Water Quality Management*, McGraw-Hill, New York, 273-313.

Oroud, I.M., 1998. The influence of heat conduction on evaporation from sunken pans in hot, dry environment. *Journal of Hydrology*, 210: 1-10.

Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Soc. London Proc. Ser. A*, 193:120-146.

Pereira, A.R., Villa Nova, N.A., Pereira, A.S. y Barbieri, V., 1995. A model for the class A pan coefficient. *Agriculture and Forest Meteorology*, 76: 75-82.

Sundaram, T.R y Rehm, R.G., 1973. The seasonal thermal structure of deep temperature lakes, *Tellus*, 25: 157-167.

Shuttleworth, W.J., 1982. Evaporation. *Handbook of Hydrology*. Chapter 4: 53.

Thom, A.S., Thony, J.L. y Vauclin, M., 1981, On the proper employment of evaporation pans and atmometers in estimating potential transpiration. *Quarterly Journal of the Royal Meteorology Society*, 107: 711-736.

Wartena, L. y Borghorst, A.J.W., 1961. The energy balance of an evaporation pan and the measurement of the reflectivity of its bottom. *Quarterly Journal of the Royal*

Meteorology Society, 87: 245-249.

Weast, R.C., 1980. *CRC. Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press, Boca Raton. FL. EEUU.

LISTA DE SIMBOLOS

α	Constante de la función de viento
α_{st}	Coefficiente de reflexión del acero inoxidable
α_w	Coefficiente de expansión del agua
ΔQ_w	Variación de calor almacenado en el agua
β	Fracción de la radiación de onda corta absorbida en la primera capa
δ	Espesor de las capas de agua del modelo
λ	Calor latente de vaporización del agua
ϵ	Coefficiente de extinción del agua
ϵ_a	Emisividad de la atmósfera
ϵ_w	Emisividad del agua
ρ	Albedo del agua para onda larga
ρ_a	Densidad del aire
ρ_w	Densidad del agua
σ_l	Constante
θ	Ángulo cenital de los rayos del sol
a	Albedo del agua
C_F	Coefficiente de forma
C_p	Calor específico del aire
C_z	Coefficiente de arrastre para superficies de agua
c_w	Capacidad calorífica volumétrica del agua
E	Tasa de evaporación desde la superficie de agua
E_0	Evaporación de referencia
E_{pan}	Tasa de evaporación en tanque evaporímetro
ET_0	Evapotranspiración de referencia
e_s	Presión de vapor saturante a la temperatura T_s
e_{200}	Presión de vapor del aire medida a 2m
G_w	Calor intercambiado por conducción y convección en el seno del agua
g	Aceleración de la gravedad
$g(u)$	Función de mezcla
H_s	Calor sensible intercambiado con la atmósfera
h_c	Coefficiente de difusividad térmica del aire
h_v	Coefficiente de transporte de vapor
K_{cd}	Conductividad térmica del agua
K_{pan}	Coefficiente empírico del tanque evaporímetro
$K_w(z)$	Difusividad efectiva del agua a la profundidad z
$K_{0,z}$	Transferencia de calor por turbulencia
L_i	Radiación emitida por la atmósfera
L_n	Radiación neta de onda larga
L_o	Radiación emitida por la capa superficial de agua
n	Número de la capa
Ri_w	Número de Richardson del agua
R_n	Radiación neta
S	Radiación solar global
S_{ab}	Radiación solar absorbida en la capa
t	Tiempo

SIMULACIÓN DE LA EVAPORACIÓN HORARIA A PARTIR DE DATOS METEOROLÓGICOS

T_a	Temperatura del aire
T_f	Temperatura del agua en el fondo del tanque
T_s	Temperatura superficial del agua en el tanque
$T_{s,e}$	Valores estimados de la temperatura superficial del agua en el tanque
$T_{s,m}$	Valores medidos de la temperatura superficial del agua en el tanque
T_w	Temperatura del agua
$T_{w,e}$	Valores estimados de la temperatura superficial del agua en el tanque
$T_{w,m}$	Valores medidos de la temperatura superficial del agua en el tanque
u_{15}	Velocidad del viento a 0,15m de altura
u_{200}	Velocidad del viento a 2m de altura
w^*	Velocidad de fricción

