

# EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DEL ARROZ BAJO RIEGO POR ASPERSIÓN

Antonio Martínez Cob<sup>1</sup> y Olga Pérez Coveta<sup>2</sup>

## Resumen:

La evapotranspiración del arroz ( $ET_{arroz}$ ) bajo riego por aspersión se determinó mediante el método de la renovación de la superficie aplicado a distintas alturas de medida en el valle medio del Ebro (Zaragoza) en 2001 y 2003. Los valores semihorarios de flujo de calor latente (LE) determinados en las diferentes alturas fueron significativamente diferentes entre sí ( $\alpha = 0.95$ ). Estas diferencias no fueron sistemáticas; a escala diaria, se produjeron con una incertidumbre similar a la de otros métodos micrometeorológicos (alrededor del 10 %). Los valores diarios de  $ET_{arroz}$  fueron relativamente altos debido al riego frecuente que necesita este cultivo. En 2003, más caluroso, fueron algo mayores que en 2001, con valores estacionales de 799 mm en 2001 y 812 mm en 2003. La fase inicial del cultivo fue muy larga (50-60 días), mientras que las fases de crecimiento, máximo desarrollo y final fueron de unos 20, 50 y 20-30 días, respectivamente. Los valores de coeficiente de cultivo (Kc) en la fase inicial fueron aproximadamente de 0.90, con oscilaciones importantes causadas por los frecuentes precipitaciones y riegos. Durante la fase de máximo desarrollo, los valores de Kc fluctuaron entre 1.10 y 1.15; durante la fase final, los valores se aproximaron a 0.90. Aún deben resolverse diversos problemas agrónomos para este cultivo y sistema de riego. Por ello, estos valores de  $ET_{arroz}$  y Kc deben considerarse con precaución. Son convenientes campañas posteriores de medidas para confirmar o mejorar estos resultados.

**Palabras clave:** Arroz, Aspersión, Evapotranspiración, Micrometeorología, Renovación de la superficie, Balance de energía

## INTRODUCCIÓN

En España, la superficie de cultivo del arroz ha aumentado notablemente, de 47900 ha en 1993 a 113200 ha en 2001 (MAPA, 2001). Las zonas tradicionalmente productoras de arroz son Andalucía, Cataluña, Comunidad Valenciana y Extremadura. El resto de superficie arroceras española se localiza en Aragón, seguida de Navarra, Murcia y Castilla la Mancha. En los últimos años, la superficie cultivada en Aragón también ha aumentado, de 5972 ha en 1993 a 14171 ha en 2001 (DGA, 2001).

Tradicionalmente, el arroz se cultiva bajo riego por inundación, generalmente continuo. En Aragón, los suelos de cultivo tradicional del arroz son frecuentemente salino-sódicos, lo que favorece la dispersión y taponamiento de los poros y, por tanto, reduce las pérdidas de agua por percolación profunda. El uso de este tipo de suelos para otros cultivos es inviable por su estabilidad estructural baja, con tendencia al encharcamiento y anoxia. El auge del cultivo de arroz en los últimos años está causando su expansión a suelos más permeables lo que podría generar pérdidas por percolación profunda y salinización de suelos por ascenso de capas freáticas.

<sup>1</sup> Lab. Asociado Agronomía y Medio Ambiente (DGA – CSIC), Dpto. Genética y Producción Vegetal (EEAD), Apartado 202, 50080 Zaragoza, España. Teléfono: 976716086. Fax: 976716145. Correo electrónico: [macoan@eead.csic.es](mailto:macoan@eead.csic.es)

<sup>2</sup> Unidad de Regadíos, Subdirección de Estructuras Agrarias, Servicio Provincial de Zaragoza (DGA), San Pedro Nolasco 7, 50071 Zaragoza, España. Teléfono: 976714783. Correo electrónico: [operez@aragob.es](mailto:operez@aragob.es)

Artículo recibido el 12 de mayo de 2004, recibido en forma revisada el 29 de julio de 2005 y aceptado para publicación el 19 de septiembre de 2005. 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.

Su cultivo en tierras de potencial agronómico alto, bajo riego por aspersión, podría ser una alternativa de interés frente a otros cultivos, como el maíz, por una reducción potencial de costes y una mayor rentabilidad. Además podría suponer un menor consumo de agua de riego regulada respecto al riego tradicional.

La cuantificación de la evapotranspiración del arroz es necesaria para mejorar el diseño y la programación del riego, conocer sus necesidades hídricas y realizar un uso más eficiente del agua. Varios trabajos han realizado medidas de la evapotranspiración del arroz bajo riego por inundación, a menudo sólo durante parte de su ciclo de cultivo (Dueñas y López, 1984; Harazono et al., 1998; Renaud et al., 1999; Sha y Edling, 2000; Shih et al., 1982; Tyagi et al., 2000). En España no existen datos medidos y los escasos estudios disponibles sólo se refieren a consumos totales de agua de riego regulada (Tolosa, 1990). El cultivo del arroz bajo riego por aspersión se ha realizado en EE.UU., Brasil, Australia e Italia. En España, ya se ha utilizado este sistema en Extremadura, donde se han cuantificado consumos medios de agua de riego de  $9600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Junta de Extremadura, 1999). Sin embargo, no existen trabajos que hayan realizado medidas de evapotranspiración bajo este sistema de riego, excepto el estudio preliminar de Pérez Coveta y Martínez Cob (2002).

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo presentar los resultados de dos campañas de determinación de la evapotranspiración del arroz bajo riego por aspersión en el clima semiárido del valle medio del Ebro. Asimismo, se presentan los resultados de la determinación de coeficientes de cultivo del arroz bajo este sistema de riego.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se realizó durante las campañas de 2001, en una parcela experimental de 1.0 ha del Centro de Investigación y Tecnología Agraria (Gobierno de Aragón), y 2003, en una parcela experimental, también de 1.0 ha, de la Estación Experimental de Aula Dei (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), situada a unos 2 Km al noreste de la anterior. Ambas parcelas se localizan en las terrazas del río Gállego, cerca de su desembocadura al río Ebro, en el término municipal de Zaragoza. Sus coordenadas geográficas son  $41^{\circ}43'$  de latitud N y  $0^{\circ}49'$  de longitud O y la

altitud es de 225 m. La precipitación media anual en la zona es de unos 330 mm (Faci et al., 1994) y los suelos de las dos parcelas se definen como Typic Xerofluvent.

En 2001, la parcela se sembró el 18 de mayo con 4 variedades (Guadamar, Ganao, Goliat, Ballilla x Sollana) en bandas este-oeste y se cosechó el 24 de octubre. Se realizaron 45 riegos a lo largo del ciclo (intensidad media de  $15.8 \text{ mm riego}^{-1}$ ). En 2003, la parcela se sembró el 28 de abril con la variedad Guadamar y se cosechó el 29 de septiembre. Se realizaron 57 riegos a lo largo del ciclo (intensidad media de  $13.9 \text{ mm riego}^{-1}$ ).

La evapotranspiración semihoraria del arroz a lo largo de su ciclo de cultivo se determinó mediante cierre de la ecuación del balance de energía (Allen et al., 1996):

$$LE = Rn - G - H \quad (1)$$

donde:  $LE$ , flujo de calor latente;  $Rn$ , radiación neta;  $G$ , flujo de calor en el suelo; y  $H$ , flujo de calor sensible (valores medios semihorarios, todos expresados en  $\text{W m}^{-2}$ ). Para obtener la evapotranspiración del arroz ( $ET_{\text{arroz}}$ ), expresada en términos de altura de agua (mm),  $LE$  se dividió por el calor latente de vaporización del agua. Los valores semihorarios de  $ET_{\text{arroz}}$  se sumaron para obtener valores diarios de esta variable.

La radiación neta se midió con dos radiómetros netos (marca Radiation and Energy Balance Systems, modelos  $Q-6$  en 2001 y  $Q-7$  en 2003) colocados a 1.5 m sobre la superficie del suelo.  $G$  se midió con dos placas de flujo de calor (marca Hukseflux Thermal Sensors, modelo  $HFP001$ ), enterradas a 0.08 m de profundidad, y cuatro termopares (marca Campbell, modelo  $TCAV$ ), a 0.03 y 0.06 m de profundidad. Las lecturas de las placas se corrigieron en función de los cambios de temperatura del suelo según describen Allen et al. (1996). Para realizar estas correcciones se consideró que el suelo en sus primeros 10 cm se encontraba cerca de capacidad de campo ( $0.27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) debido a los riegos frecuentes realizados durante el ensayo. Todas las lecturas de  $Rn$  y  $G$  se tomaron cada 10 s y se promediaron cada 30 minutos.

Por su parte,  $H$  se determinó mediante el método de renovación de la superficie (Spano et al., 1997, 2000), el cual se basa en la existencia de unas estructuras coherentes que describen las fluctuaciones de alta frecuencia de temperatura

del aire (Gao et al., 1989). Estas estructuras se caracterizan por dos parámetros, su amplitud ( $A_T$ ) y su frecuencia ( $\tau_T$ ) entre dos amplitudes consecutivas. Los valores semihorarios de  $H$  se obtuvieron según la expresión (Spano et al., 1997, 2000):

$$H = \alpha_{SR} c_p \rho_a \frac{A_T}{\tau_T} z \quad (2)$$

donde:  $c_p$ , calor específico del aire a presión constante,  $1.013 \text{ J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\rho_a$ , densidad del aire,  $1.194 \text{ g m}^{-3}$ ;  $z$ , altura de medida de la temperatura del aire;  $\alpha_{SR}$ , factor de ponderación cuyo valor es 1.0 cuando las medidas de temperatura se realizan muy por encima de la cubierta vegetal en cultivos de poca altura (Spano et al., 1997).

En 2001, las lecturas de temperatura se realizaron con cuatro termopares de hilo fino de cromo-constantán, de  $76 \mu\text{m}$  de diámetro (marca Campbell Scientific, modelo *TCBR-3*), colocados a 1.3, 1.7, 2.1 y 2.5 m de la superficie del suelo. En 2003, se utilizaron tres termopares *TCBR-3* que se colocaron inicialmente a 0.3, 0.6 y 0.9 m de la superficie del suelo. Estas alturas se subieron a medida que el cultivo fue creciendo, manteniendo una distancia mínima de 0.3 m entre la altura de medida más baja y la parte superior de la cubierta vegetal. Al final del ciclo de cultivo, los termopares se encontraban a 1.0, 1.4 y 1.7 m de la superficie del suelo.

En ambos años, las lecturas de temperatura del aire se realizaron cada 0.75 s; cada 30 minutos se determinaron los momentos 2, 3 y 5 de las diferencias de temperatura entre lecturas consecutivas; a partir de estos momentos, los parámetros  $A_T$  y  $\tau_T$  se calcularon según describe Van Atta (1977). Por tanto, para cada altura de medida y cada periodo semihorario se calcularon 4 valores de  $H$  en 2001 y 3 en 2003 mediante la ecuación (2) y los correspondientes de  $LE$  aplicando la ecuación (1).

Para determinar los coeficientes de cultivo ( $Kc$ ) del arroz bajo riego por aspersión se calcularon los valores diarios de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) con el método FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Para ello se utilizaron los datos meteorológicos medios diarios registrados en una estación agrometeorológica automática situada en una parcela de festuca (1.2 ha) adyacente a la parcela de arroz utilizada en 2001. Los valores diarios de  $Kc$  se obtuvieron dividiendo cada valor diario de  $ET_{arroz}$  por la estima diaria de  $ET_0$  correspondiente.

En distintas fechas de 2001 y 2003 durante el ciclo de cultivo, se realizaron medidas de radiación fotosintéticamente activa ( $PAR$ ) interceptada por el cultivo ( $PAR_{int}$ ). Se utilizó un *ceptometer* (*Sunscan Canopy Analysis System* de la casa Delta-T), una barra de 1.0 m de longitud con 64 fotocélulas sensibles a esa radiación electromagnética. En cada fecha, y en varios puntos dentro de la parcela experimental, se realizaron de 2 a 4 lecturas por encima de la cubierta vegetal y 10 lecturas a ras de suelo. De esta forma, el  $PAR_{int}$  en cada fecha se calculó como:

$$PAR_{int} = 100 - \frac{PAR_i}{PAR_e} 100 \quad (3)$$

donde:  $PAR_i$ ,  $PAR$  medio medido a ras de suelo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $PAR_e$ ,  $PAR$  medio medido por encima del cultivo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

Asimismo, se obtuvieron estimas del índice de área foliar ( $LAI$ ) mediante la ecuación de Beer (Flénet et al., 1996):

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{PAR_i}{PAR_e}\right)}{-k} \quad (4)$$

donde:  $k$ , coeficiente de extinción; para arroz, se consideró un valor de  $k = 0.60$  (Kropff y Lotz, 1993).

Las comparaciones estadísticas entre los distintos conjuntos de valores semihorarios y diarios de  $LE$  se realizaron mediante análisis de regresión simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y análisis de errores, con el cálculo de los estadísticos error medio de estimación ( $MEE$ ) y raíz cuadrada del error cuadrático medio ( $RMSE$ ), tal como se describe en Willmott (1982), y error relativo ( $RE$ ), el cociente entre  $RMSE$  y la media de la variable  $x$ .

$$MEE = \frac{\sum(y_i - x_i)}{n} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - x_i)^2}{n}} \quad (6)$$

donde  $y_i$  y  $x_i$  son los valores de las variables  $y$  y  $x$ , respectivamente, en el periodo (semihorario o diario)  $i$ ;  $n$  es el número de pares de valores comparados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 lista los resultados de los análisis de regresión y los errores de la comparación entre los 4 conjuntos de valores semihorarios de  $LE$  obtenidos en 2001 con el método de la renovación de la superficie. La Figura 1 muestra la comparación gráfica entre las estimas semihorarias de  $LE$  estimadas para la altura  $z_1$  y las obtenidas para las alturas  $z_2$  y  $z_3$ . La correlación entre las estimas de  $LE$  obtenidas a las distintas alturas de medida fue bastante alta como indican los coeficientes de determinación, superiores a 0.94 en todos los casos. Sin embargo, todas las ordenadas en el origen y todas las pendientes de regresión fueron significativamente distintas de 0 y 1 ( $\alpha = 0.95$ ), respectivamente, lo que indica que los valores semihorarios de  $LE$  obtenidos en las distintas alturas de medida fueron significativamente diferentes entre sí. De hecho, esas diferencias fueron de cierta magnitud ya que los valores de  $RMSE$  variaron entre 24.1 y 36.8  $W m^{-2}$ , que, en términos relativos ( $RE$ ), representan incertidumbres medias de entre el 17 y el 25 %. Aún así, no se observó tendencia a sobrestimar ni a subestimar puesto que los valores de  $MEE$  fueron bastante pequeños, entre 1.0 y 3.0  $W m^{-2}$  (Tabla 1). Estos resultados fueron consecuencia en parte de las pequeñas dimensiones de la parcela experimental (1.0 ha), algo habitual en muchos ensayos, de manera que la distancia a barlovento hasta el borde de la parcela en la dirección más frecuente del viento en la zona (noroeste) fue de unos 65 m. De acuerdo con las alturas de medida empleadas en 2001 y la altura del cultivo a lo largo de su ciclo, sólo en el caso de las medidas realizadas a 1.3 m se cumplieron aproximadamente las condiciones de fetch estimadas según la ecuación propuesta por

Allen et al. (1996). No obstante, hay que señalar que estos autores indican que, en condiciones de inestabilidad atmosférica, imperantes durante buena parte de los periodos diurnos cuando las tasas de evapotranspiración son máximas, las necesidades de fetch se reducen. Asimismo, Monteith y Unsworth (1990) señalan que es suficiente una relación entre fetch y altura de medida de entre 20:1 y 70:1 en vez de la relación 100:1 que señalan otros autores y que las necesidades de fetch son menores cuanto menor es la diferencia de altura entre el cultivo de interés y los que le rodean (en este trabajo, praderas y maíz). En definitiva, probablemente, alguna de las alturas de medida se encontró por encima de la subcapa inercial de la capa límite ajustada de la atmósfera, dentro de la cual se cumplen las condiciones de flujos constantes de calor y vapor de agua con la altura (Monteith y Unsworth, 1990). Aún así, para las alturas de 1.3 y 1.7 m, la proporción de flujo de calor sensible generado dentro del fetch y detectado por los equipos de medida fue de alrededor del 80 % (Allen et al., 1996).

En 2003, se decidió disminuir las alturas de medida para que éstas estuvieran más en consonancia con las dimensiones de la parcela experimental. Sólo se usaron tres alturas de medida para evitar que la más alta estuviera por encima de la subcapa inercial. Esta reducción de alturas conlleva el riesgo de realizar medidas muy cerca del suelo, dentro de la subcapa rugosa de la capa límite de la atmósfera donde tampoco se esperarían flujos constantes de calor latente y vapor de agua (Monteith y Unsworth, 1990). Por ello, se decidió subir las alturas de medida según el cultivo creciera con el fin de intentar en todo momento estar por encima de la subcapa rugosa.

Tabla 1. Análisis de regresión simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y errores de la comparación entre los valores semihorarios de  $LE$  obtenidos con el método de renovación de la superficie a distintas alturas en 2001 y 2003.

x	y	N	R <sup>2</sup> %	b <sub>0</sub> W m <sup>-2</sup>	b <sub>1</sub> Dimensionless	MEE W m <sup>-2</sup>	RMSE W m <sup>-2</sup>	RE %
<b>2001</b>								
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>2</sub> )	6475	0.976	7.39 <sup>(1)</sup>	0.957 <sup>(2)</sup>	1.1	24.1	16.6
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	6476	0.960	11.90 <sup>(1)</sup>	0.931 <sup>(2)</sup>	1.9	31.4	21.6
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>4</sub> )	6151	0.944	15.07 <sup>(1)</sup>	0.917 <sup>(2)</sup>	3.0	36.8	25.3
LE (z <sub>2</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	6519	0.970	5.85 <sup>(1)</sup>	0.967 <sup>(2)</sup>	1.0	25.9	17.6
LE (z <sub>2</sub> )	LE (z <sub>4</sub> )	6182	0.957	9.03 <sup>(1)</sup>	0.954 <sup>(2)</sup>	2.2	31.1	21.1
LE (z <sub>3</sub> )	LE (z <sub>4</sub> )	6232	0.965	4.57 <sup>(1)</sup>	0.977 <sup>(2)</sup>	1.2	27.5	18.6
<b>2003</b>								
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>2</sub> )	5837	0.987	2.59 <sup>(1)</sup>	0.968 <sup>(2)</sup>	-2.4	21.3	13.8
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	6022	0.983	4.21 <sup>(1)</sup>	0.967 <sup>(2)</sup>	-1.1	24.1	15.1
LE (z <sub>2</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	5992	0.982	3.00 <sup>(1)</sup>	0.990 <sup>(2)</sup>	1.5	24.2	15.6

<sup>(1)</sup> significativamente diferente de 0; <sup>(2)</sup> significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0.95$ ).

x, variable independiente; y, variable dependiente; N, tamaño muestral (número de periodos semihorarios); R<sup>2</sup> coeficiente de determinación; b<sub>0</sub>, ordenada en el origen; b<sub>1</sub>, pendiente de regresión; MEE, error medio de estimación; RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio; RE, error relativo.

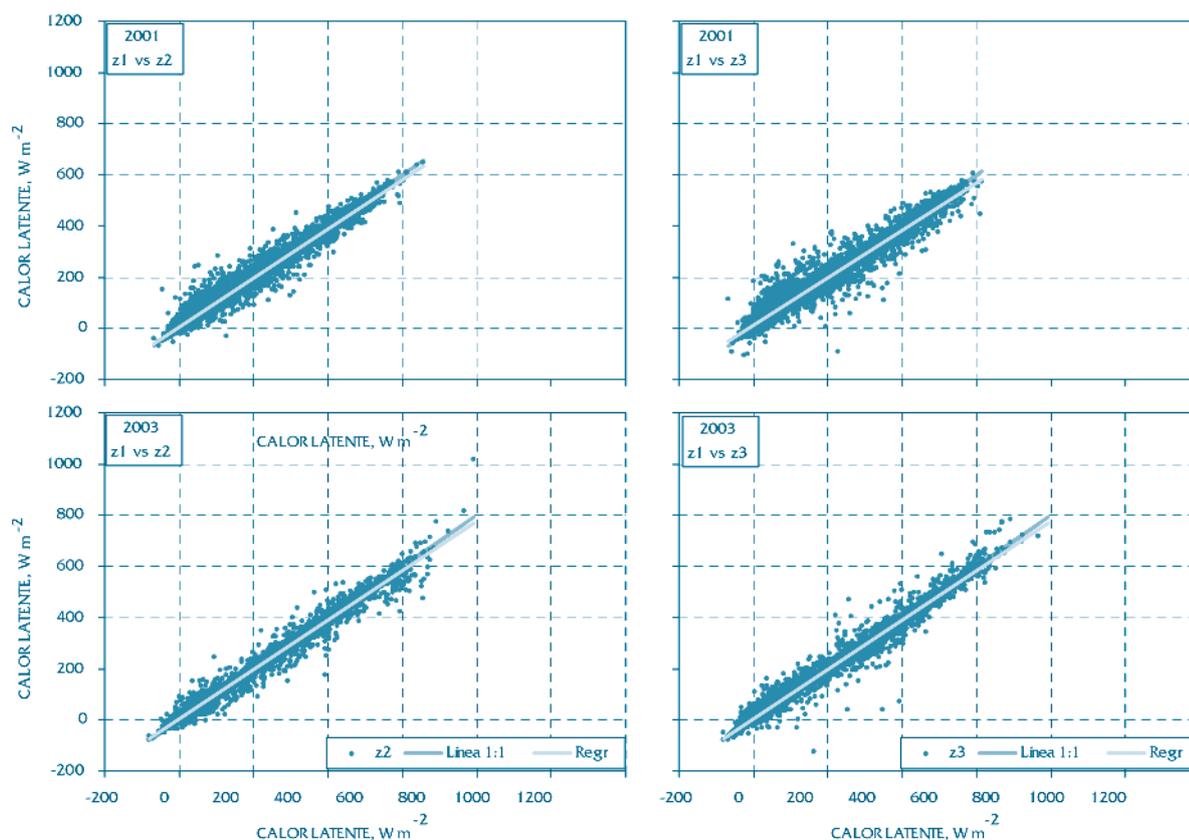


Figura 1. Calor latente semihorario estimado para la altura  $z_1$  (eje x) frente al estimado para las alturas  $z_2$  y  $z_3$  en los años 2001 y 2003 con el método de la renovación de la superficie.

En 2003, el fetch disponible en la dirección del viento más frecuente (noroeste) fue de unos 75 m. En este caso, de acuerdo con las alturas de medida y la altura del cultivo a lo largo de su ciclo, se estimó que las condiciones de fetch se cumplieron prácticamente en todo momento de acuerdo con la ecuación propuesta por Allen et al. (1996). Además, en 2003 los cultivos que rodearon a la parcela experimental fueron arroz y trigo. La proporción de flujo de calor sensible generado dentro del fetch y detectado por los equipos de medida fue superior al 94 % en el caso de la altura de medida más baja y del 85 o más en el caso de las otras dos alturas. Por tanto, las medidas realizadas en 2003 se llevaron a cabo dentro de la subcapa inercial de la capa límite ajustada en su mayor parte.

La Tabla 1 y la Figura 1 muestran los análisis de regresión y los errores correspondientes de las comparaciones entre los 3 conjuntos de valores semihorarios de  $LE$  obtenidos en 2003. Asimismo, los coeficientes de determinación fueron muy altos, superiores a 0.98. Pero las ordenadas en el origen y las pendientes de regresión fueron significativamente diferentes de 0 y 1, respectivamente ( $\alpha = 0.95$ ), lo

que nuevamente indica que los valores semihorarios de  $LE$  fueron distintos entre sí. Los valores de  $RMSE$  fueron más bajos que en 2001 y variaron entre 21.3 y 24.2  $W m^{-2}$ , al igual que los de  $RE$ , que variaron entre el 14 y el 16 %. Asimismo, los valores de  $MEE$  (entre  $-2.4$  y  $1.5 W m^{-2}$ ) sugieren que no hubo tendencia a sobrestimar ni a subestimar.

En consecuencia, esa falta de subestimación o sobrestimación sugiere que, a escala diaria, las diferencias entre los valores de  $LE$  obtenidos en las distintas alturas de medida deben ser menores. La Tabla 2 y la Figura 2 listan los correspondientes análisis de regresión y los errores obtenidos al comparar los promedios diarios de  $LE$  en ambos años. Los coeficientes de determinación (entre 0.91 y 0.95) fueron algo menores que en el caso de los valores semihorarios. Sin embargo, las ordenadas en el origen se aproximaron más a 0; así, 7 de las 9 ordenadas en el origen calculadas no fueron significativamente diferentes de 0 ( $\alpha = 0.95$ ). Asimismo, ninguna pendiente de regresión fue significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0.95$ ). Los valores de  $RMSE$  en 2001 fueron menores que en el caso de los valores semihorarios;

Tabla 2. Análisis de regresión simple ( $y = b_0 + b_1 x$ ) y errores de la comparación entre sí de los valores diarios de LE obtenidos con el método de renovación de la superficie a distintas alturas en 2001 y 2003.

x	y	N	R <sup>2</sup> %	b <sub>0</sub> W m <sup>-2</sup>	b <sub>1</sub> Dimensionless	MEE W m <sup>-2</sup>	RMSE W m <sup>-2</sup>	RE %
<b>2001</b>								
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>2</sub> )	154	0.944	4.46 <sup>(2)</sup>	0.985 <sup>(3)</sup>	2.3	11.9	8.2
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	155	0.950	6.04 <sup>(1)</sup>	0.978 <sup>(3)</sup>	2.9	11.3	7.8
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>4</sub> )	149	0.906	5.23 <sup>(2)</sup>	0.988 <sup>(3)</sup>	3.5	16.1	11.0
LE (z <sub>2</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	154	0.949	5.70 <sup>(1)</sup>	0.965 <sup>(3)</sup>	0.5	11.2	7.6
LE (z <sub>2</sub> )	LE (z <sub>4</sub> )	148	0.913	4.78 <sup>(2)</sup>	0.977 <sup>(3)</sup>	1.4	15.3	10.3
LE (z <sub>3</sub> )	LE (z <sub>4</sub> )	149	0.936	1.05 <sup>(2)</sup>	0.999 <sup>(3)</sup>	0.9	13.0	8.8
<b>2003</b>								
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>2</sub> )	145	0.917	1.23 <sup>(2)</sup>	0.957 <sup>(3)</sup>	-5.7	15.0	9.5
LE (z <sub>1</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	145	0.921	-2.68 <sup>(2)</sup>	1.030 <sup>(3)</sup>	2.0	14.6	9.2
LE (z <sub>2</sub> )	LE (z <sub>3</sub> )	145	0.909	3.91 <sup>(2)</sup>	1.024 <sup>(3)</sup>	7.6	17.2	11.3

<sup>(1)</sup> significativamente diferente de 0; <sup>(2)</sup> no significativamente diferente de 0; <sup>(3)</sup> no significativamente diferente de 1 ( $\alpha = 0.95$ ).  
 x, variable independiente; y, variable dependiente; N, tamaño muestral (número de días); R<sup>2</sup>, coeficiente de determinación; b<sub>0</sub>, ordenada en el origen; b<sub>1</sub>, pendiente de regresión; MEE, error medio de estimación; RMSE, raíz cuadrada del error cuadrático medio; RE, error relativo.

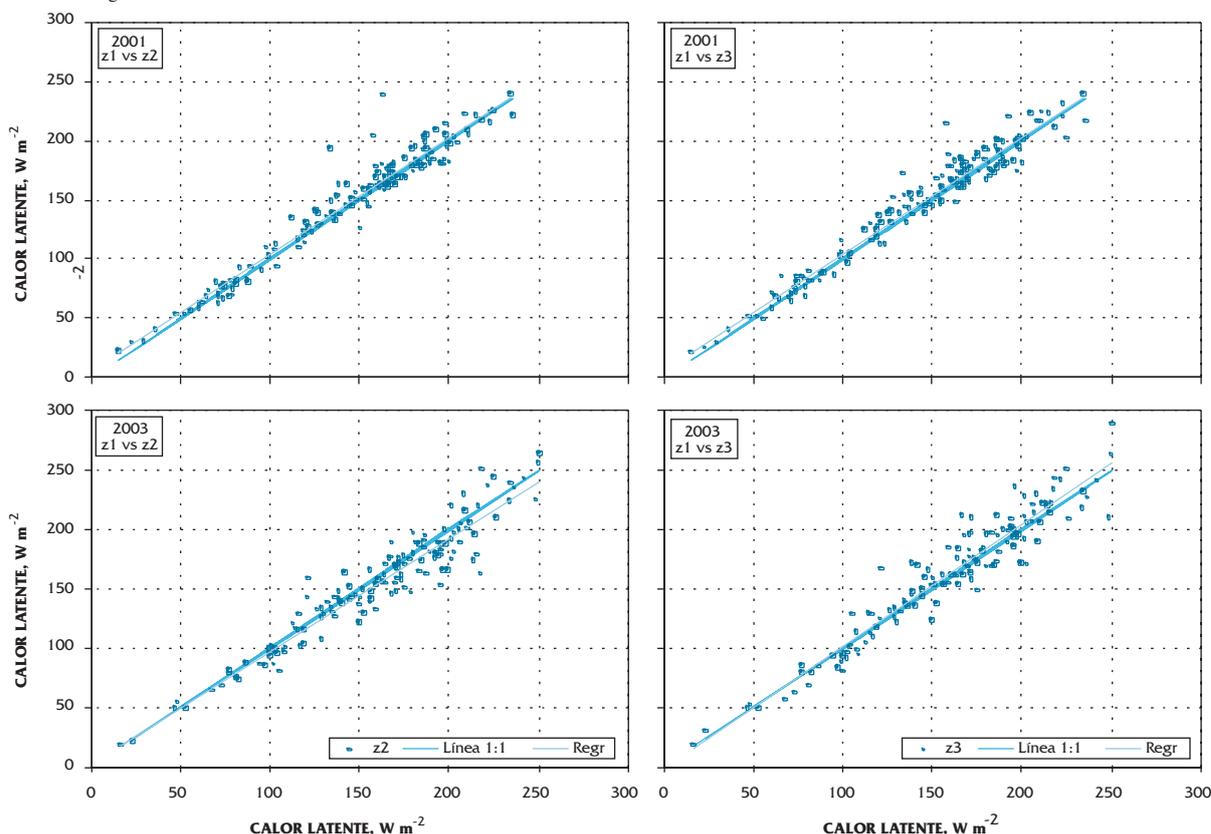


Figura 2. Calor latente diario estimado para la altura z<sub>1</sub> (eje x) frente al estimado para las alturas z<sub>2</sub> y z<sub>3</sub> en los años 2001 y 2003 con el método de la renovación de la superficie.

en 2003, los valores de RMSE fueron similares a los observados para los valores semihorarios. Aún así, en todos los casos, los valores de RE fueron claramente menores que para el caso de valores semihorarios y variaron entre el 8 y el 11 %. Esta incertidumbre es similar a la asociada a cualquier método micrometeorológico (Allen et al., 1996).

Por ello, parece razonable suponer que, a pesar de las diferencias observadas en los valores semihorarios de LE entre las distintas alturas de medida, a escala diaria esas diferencias desaparecen en gran medida y, por tanto, esos distintos conjuntos de valores de LE se pueden suponer como razonablemente similares.

Por tanto, para cada media hora, los valores semihorarios de  $LE$  calculados para cada altura de medida se promediaron para obtener un único valor semihorario de  $LE$  y, sumando los 48 valores semihorarios, obtener un valor diario de evapotranspiración de arroz ( $ET_{arroz}$ ). La Figura 3 muestra los valores diarios de  $ET_{arroz}$  así como los de  $ET_0$  obtenidos con el método FAO-56 Penman-Monteith. En líneas generales, se observa que las variaciones de  $ET_{arroz}$  a lo largo del ciclo de cultivo fueron muy similares a las de la  $ET_0$ . Aproximadamente hasta unos 50-60 días después de siembra, los valores de  $ET_{arroz}$  fueron algo menores que los de  $ET_0$ ; posteriormente fueron algo mayores y tan sólo en los últimos días del ciclo los valores de  $ET_0$  volvieron a ser ligeramente mayores que los de  $ET_{arroz}$ .

En ambos años, el cultivo del arroz tardó en implantarse en campo, su crecimiento durante la fase inicial del ciclo de cultivo fue muy lento y no se produjo una cobertura de suelo de alrededor del 10-20 % hasta unos 50-60 días después de siembra. Durante esta etapa inicial fue necesario realizar riegos frecuentes, casi diarios, durante el primer mes para conseguir la implantación del cultivo. En consecuencia, los valores de  $ET_{arroz}$  durante la fase inicial del cultivo fueron casi iguales a los de la  $ET_0$ . Los problemas de implantación del cultivo fueron mayores en 2001 que en 2003 debido al menor número de riegos realizado en 2001 y al mejor control de malas hierbas en 2003. Así, los valores de  $PAR$  interceptado y, sobre todo, de  $LAI$  fueron mayores en 2003 (Figura 4). Hacia la

segunda mitad del ciclo de cultivo, particularmente entre los 80 y 120 días después de siembra, los valores de  $ET_{arroz}$  de 2003 fueron claramente superiores a los obtenidos en 2001. En esas fechas, el año 2003 fue más caluroso que el año 2001, aunque algo menos ventoso (Figura 5). Los valores de  $ET_0$  en 2001 y 2003 mostraron un comportamiento similar (Figura 3).

Al final del ciclo de cultivo, los valores de  $ET_{arroz}$  en 2003 fueron apreciablemente mayores que en 2001, pero las altas temperaturas registradas en el verano de 2003 y el adelanto de la fecha de siembra originaron un cierto acortamiento del ciclo de cultivo de modo que la fase final del mismo en 2003 fue en septiembre mientras que en 2001 fue en octubre, mes más frío y en el que la demanda evaporativa es bastante menor. En 2001, desde siembra a cosecha, el ciclo de cultivo duró 158 días mientras que en 2003 duró 153 días. También, en 2003, el mayor  $LAI$  observado contribuyó a unos valores de  $ET_{arroz}$  algo más altos. Entre el 64 % (en 2001) y el 67 % (en 2003) de todos los valores diarios de  $ET_{arroz}$  fueron superiores a 5.0 mm día<sup>-1</sup>. La Tabla 3 lista los valores medios mensuales y los valores totales de  $ET_{arroz}$  obtenidos en los dos años. Salvo en el mes final del ciclo de cultivo, los valores medios mensuales de  $ET_{arroz}$  superaron los 5.0 mm día<sup>-1</sup>. En total, en 2001 la  $ET_{arroz}$  fue de 799 mm y en 2003 de 812 mm. A pesar de acortarse el ciclo de cultivo, las mayores temperaturas y el mayor desarrollo del cultivo de 2003 ocasionaron una  $ET_{arroz}$  estacional algo mayor (Tabla 3).

Tabla 3. Valores medios mensuales y valores totales de la evapotranspiración de arroz bajo riego por aspersión ( $ET_{arroz}$ ) en 2001 y 2003 en Zaragoza.

	mm día <sup>-1</sup>						mm
	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	
2001	6.2	5.8	6.0	6.2	4.7	2.4	799
2003	5.0	5.8	7.2	6.0	3.5		812

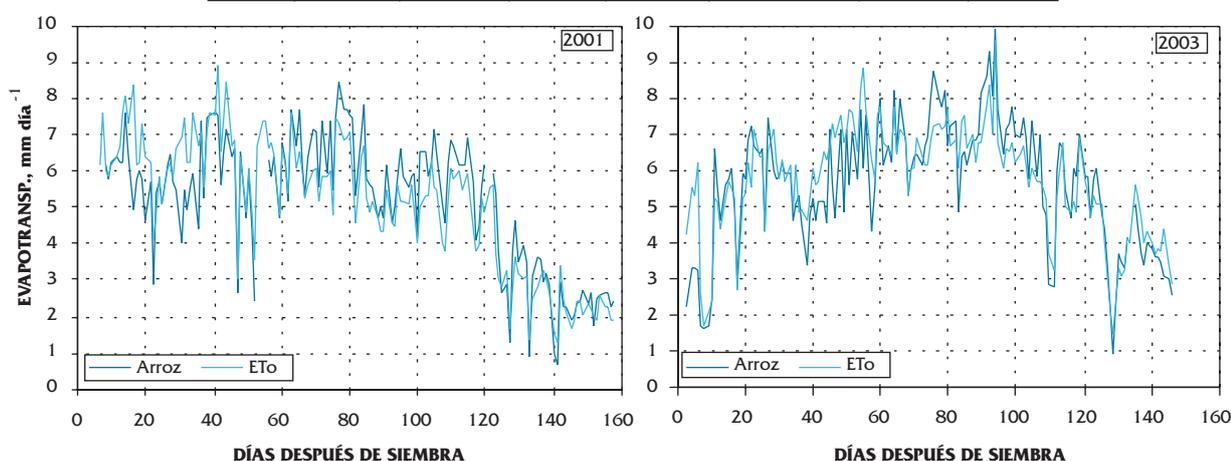


Figura 3. Valores diarios de evapotranspiración de arroz bajo riego por aspersión ( $ET_{arroz}$ ) y de referencia ( $ET_0$ ) obtenidos en 2001 y 2003 en Zaragoza.

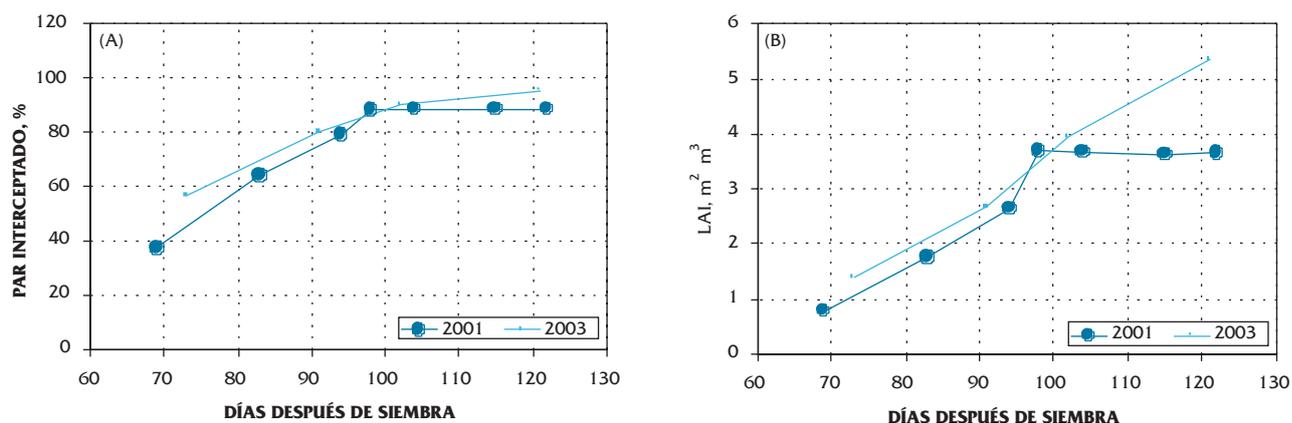


Figura 4. (A) Valores medidos de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada. (B) Valores estimados de índice de área foliar (LAI). Campañas 2001 y 2003 en Zaragoza.

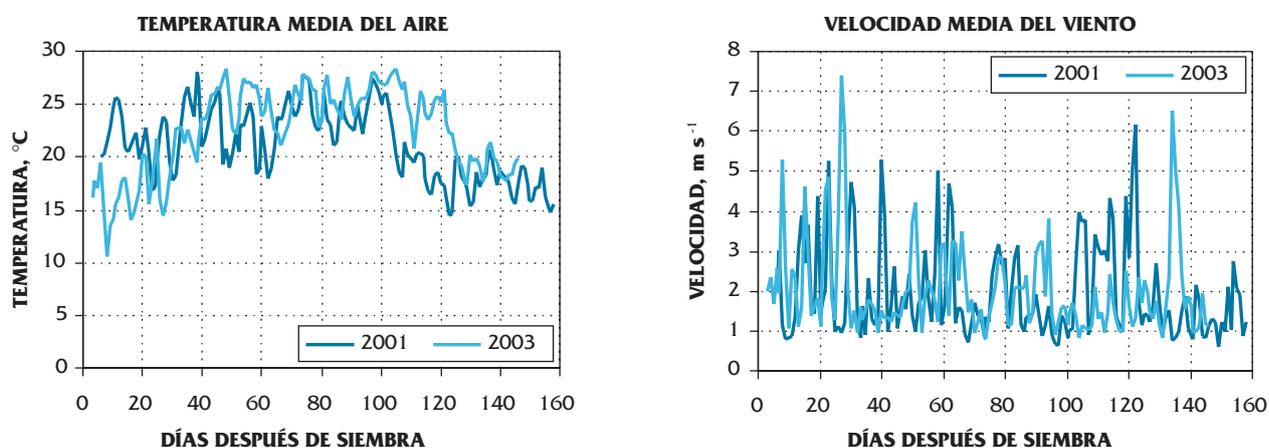


Figura 5. Valores diarios de la temperatura media del aire y de la velocidad del viento (a 2.0 m) registrados en 2001 y 2003 en Zaragoza.

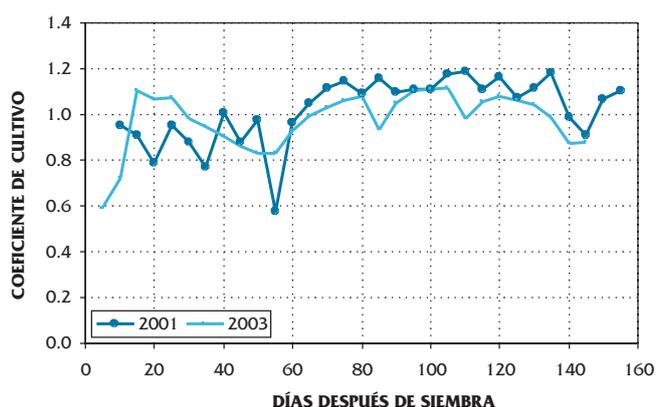


Figura 6. Coeficientes de cultivo (medias de 5 días) del arroz bajo riego por aspersión en Zaragoza obtenidos en 2001 y 2003.

La Figura 6 muestra los coeficientes de cultivo medios de cinco días obtenidos para el cultivo. En términos generales, en ambos años, los valores del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) variaron

entre 0.80 y 1.20. La mayor similitud entre los  $K_c$  de 2001 y los de 2003 se produjo en el período de 60 a 130 días después de siembra. La fase inicial del cultivo fue muy larga en ambos años y no se alcanzaron valores de alrededor del 10-20 % de suelo sombreado hasta unos 50-60 días después de siembra. Las mayores discrepancias entre los dos años se observaron antes de estos 60 días después de siembra. La longitud de la fase inicial fue debida a que al cultivo le costó implantarse en el campo. El arroz es una planta muy sensible al encostramiento de los suelos, un problema típico en el regadío aragonés, y a otros problemas, como la competencia de las malas hierbas. Por ello, fue necesario regar con frecuencia durante esta fase. En 2003 se realizaron algunos riegos más que en 2001, aconsejados por la experiencia de este último año. Además, en 2003, se registraron 99.2 mm de precipitación durante esta fase inicial, por sólo 12.6 mm en 2001. Todos estos factores llevaron a

un mayor desarrollo del cultivo en 2003 (Figura 4) lo que, junto a la mayor humedad del suelo, presumiblemente originó que en 2003 los valores de  $K_c$  durante la fase inicial fueran algo mayores y con menores fluctuaciones que en 2001. A partir del día 30 después de siembra, los valores de  $K_c$  de 2003, que habían alcanzado valores de hasta 1.10, descendieron hasta valores de 0.90, más parecidos a los obtenidos en 2001. Probablemente, este hecho se debió a que el 77 % de la precipitación registrada en la fase inicial del cultivo en 2003 tuvo lugar antes del día 30 después de siembra. Aun con la incertidumbre ocasionada por las diferencias entre los dos años, se podría decir que el coeficiente de cultivo del arroz bajo riego por aspersión en Zaragoza durante la fase inicial es de alrededor del 0.90, aunque este valor puede verse modificado sustancialmente en función de la humedad del suelo, que a su vez depende de las precipitaciones que se registren en la fase inicial.

A partir del día 60 después de siembra, el cultivo inició una rápida fase de crecimiento y en unos 20 días se pasó de un 10 % a un 70-80 % de suelo sombreado. Los valores de  $K_c$  subieron hasta alrededor de 1.10 en 2003 y 1.15 en 2001 (Figura 6). La fase de máximo desarrollo del cultivo también fue larga y duró unos 50 días, hasta unos 130 días después de siembra. Durante esta fase, los valores de  $K_c$  oscilaron, con ligeras fluctuaciones, alrededor de los valores antes indicados. No está clara la causa de que en 2001 los valores de  $K_c$  fueran ligeramente superiores a los de 2003. Por un lado, el desarrollo del cultivo fue mayor en 2003 (Figura 4) pero sin embargo, los valores de  $K_c$  fueron mayores en 2001. Por otra parte, a partir del día 60 después de siembra, los promedios de la humedad relativa mínima fueron del 33 % en 2001 y 27 % en 2003, mientras que los de la velocidad del viento fueron de  $1.9 \text{ m s}^{-1}$  en ambos años. Probablemente, estas diferencias en  $K_c$  en esta fase de máximo desarrollo sean consecuencia sobre todo de la incertidumbre de las medidas realizadas.

A partir de los 130 días después de siembra, los valores de  $K_c$  disminuyeron hasta 0.90 aproximadamente en ambos años, aunque en 2001 hubo un aumento después del día 145 después de siembra. Quizás este aumento sea simplemente un artefacto causado porque los valores de  $ET_{arroz}$  y  $ET_0$  en estos últimos días del ciclo de cultivo en 2001 fueron muy bajos (Figura 3) y, por ello, el comportamiento del cociente  $ET_{arroz}/ET_0$  fue más errático. No obstante, los resultados de la Figura 6 indican que la fase final del ciclo de cultivo del arroz bajo riego por aspersión duró unos 20-30 días.

Los rendimientos finales del cultivo en 2001 ( $5447 \text{ kg ha}^{-1}$ ) sólo fueron ligeramente menores a los obtenidos en 2003 ( $5641 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Estos rendimientos fueron aproximadamente un 75-80 % de los obtenidos en parcelas comerciales de cultivo de arroz bajo riego por inundación en el área de Grañén (Huesca) que es, de las zonas arroceras comerciales aragonesas, la más cercana a Zaragoza. Durante estos dos años de experiencia han existido algunos problemas agronómicos en el cultivo del arroz bajo riego por aspersión, como control de las malas hierbas, fechas y dosis de siembra más adecuadas, problemas de nascencia, etc. Estos problemas han afectado a los resultados aquí presentados en una cuantía no conocida. Gran parte de estos problemas se han debido al hecho de que aún existe poca experiencia en el cultivo del arroz bajo riego por aspersión. Por ello, los resultados de este trabajo deben considerarse con precaución. Sería conveniente que este trabajo se realizara durante algunos años más, tras resolver más adecuadamente los problemas apuntados, para obtener datos más sólidos sobre la evapotranspiración y los coeficientes de cultivo del arroz bajo riego por aspersión.

### CONCLUSIONES

Los valores semihorarios de  $LE$  obtenidos con el método de renovación de la superficie en distintas alturas de medida fueron significativamente diferentes entre sí en los dos años de trabajo ( $\alpha = 0.95$ ). Esas diferencias no fueron sistemáticas y, a escala diaria, se redujeron hasta unos niveles de incertidumbre similares a los de otros métodos micrometeorológicos (alrededor de un 10 %).

Los valores diarios de  $ET_{arroz}$  a lo largo del ciclo de cultivo siguieron una evolución similar a los de la  $ET_0$ , sobre todo a partir de los 50-60 días después de siembra. Estos valores fueron relativamente altos, como corresponde a un cultivo que requiere riego frecuente: entre un 64 y un 67 % de todos los valores diarios determinados fueron superiores a  $5.0 \text{ mm día}^{-1}$ .

La longitud de la fase inicial del cultivo fue bastante larga, de unos 50-60 días. La fase de crecimiento fue corta, de unos 20 días. La fase de máximo desarrollo duró unos 50 días y, por fin, la fase final duró unos 20-30 días. Los valores del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) en la fase inicial fueron de alrededor de 0.90 aunque estos valores mostraron fluctuaciones importantes ocasionadas por las pre-

cipitaciones y los riegos. Los valores de  $Kc$  de la fase de máximo desarrollo oscilaron entre 1.10 y 1.15 y los de la fase final fueron de alrededor de 0.90.

Estos resultados de  $ET_{arroz}$  y  $Kc$  deben considerarse con precaución. Se precisa resolver adecuadamente algunos problemas agronómicos que persisten en el cultivo del arroz bajo riego por aspersión. Será necesario realizar campañas ulteriores de medidas de la evapotranspiración de este cultivo bajo este sistema de riego.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_T$	Amplitud de las fluctuaciones de temperatura de alta frecuencia.
$b_0$	Ordenada en el origen en un análisis de regresión simple.
$b_1$	Pendiente en un análisis de regresión simple.
$c_p$	Calor específico del aire a presión constante.
$ET_0$	Evapotranspiración de referencia.
$ET_{arroz}$	Evapotranspiración del arroz.
$G$	Flujo de calor en el suelo.
$H$	Flujo de calor sensible.
$k$	Coefficiente de extinción.
$Kc$	Coefficiente de cultivo.
$LAI$	Índice de área foliar.
$LE$	Flujo de calor latente.
$MEE$	Error medio de estimación.
$N$	Tamaño muestral.
$PAR$	Radiación fotosintéticamente activa.
$PAR_e$	Radiación fotosintéticamente activa media medida a ras del suelo.
$PAR_{int}$	Radiación fotosintéticamente activa interceptada por el cultivo.
$PAR_s$	Radiación fotosintéticamente activa media medida por encima del cultivo.
$R^2$	Coefficiente de determinación en un análisis de regresión simple.
$RE$	Error relativo.
$RMSE$	Raíz cuadrada del error cuadrático medio.
$Rn$	Radiación neta.
$x$	Variable independiente en un análisis de regresión simple.
$y$	Variable dependiente en un análisis de regresión simple.
$z$	Altura de medida de la temperatura de alta frecuencia.
$\alpha$	Nivel de significación.
$\alpha_{SR}$	Factor de ponderación del método de renovación de la superficie.
$\rho_a$	Densidad del aire.
$\tau_T$	Frecuencia de las fluctuaciones de temperatura de alta frecuencia.

## REFERENCIAS

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. FAO, Roma, Italia. 300 pp.
- Allen R.G., Pruitt W.O., Businger J.A., Fritschen L.J., Jensen M.E., Quinn F.H. (1996). Evaporation and Transpiration. En: ASCE Hydrology Handbook (2ª ed.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 28. American Society of Civil Engineers (ASCE), Nueva York, EE.UU. 768 pp.
- DGA (2001). Datos estadísticos agrarios de Aragón. 1999 y 2000. Diputación General de Aragón (DGA), Zaragoza, España.
- Dueñas R., López A. (1984). Elementos fundamentales del régimen de riego en el cultivo del arroz. *Agrícola Verge*. 35: 635 – 639.
- Faci J., Martínez Cob A., Cabezas A. (1994). Agroclimatología de los regadíos del Bajo Gállego: doce años de observaciones diarias en Montañana (Zaragoza). Diputación General de Aragón, Zaragoza, España. 231 pp.
- Flénet F., Kiniry J.R., Board J.E., Westgate M.E., Reicosky D.C. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean, and sunflower. *Agronomy Journal*. 88: 185-190.
- Gao W., Shaw R.H., Paw U K.T. (1989). Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology*. 47: 349-377.
- Harazono Y., Kim J., Miyata A., Choi T., Yun J.L., Kim J.W. (1998). Measurement of energy budget components during the International Rice Experiment (IREX) in Japan. *Hydrological Processes*. 12 (13-14): 2081-2092.
- Junta de Extremadura (1999). Estudio del comportamiento agronómico de variedades de arroz con tratamientos hídricos diferenciados. Informe interno. SIA, Junta de Extremadura, Badajoz, España.
- Kropff M.J., Lotz L.A.P. 1993. Eco-physiological characterization of the species. En: *Modelling crop-weed interactions*. Kropff M.J., Van Laar H.H. (eds.). 83-104. CAB International and International Rice Research Institute. Wallingford, Reino Unido.
- MAPA (2001). Anuario de estadística agroalimentaria. Secretaría General Técnica. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación (MAPA), Madrid, España.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. 1990. Principles of environmental physics. Edward Arnold. Londres, Reino Unido. 291 pp.
- Pérez Coveta O., Martínez Cob A. 2002. Determinación de la evapotranspiración de arroz bajo dos sistemas de riego. XX Congreso Nacional de Riegos. Ciudad Real, 12-14 de junio. Junta de Comunidades de Castilla La Mancha, Toledo. 19-21.

- Renaud F., Ferguson J.A., Scott H.D., Miller D.M. (1999). Estimation of seasonal rice evapotranspiration. In B.R. Wells Rice Research Studies. Norman, R.J., Beyrouy, C.A. (eds.). 283-293 pp. Arkansas Agricultural Experiment Station, EE.UU.
- Shah S.B., Edling R.J. (2000). Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 126: 8-13.
- Shih S.F., Rahi G.S., Harrison D.S. (1982). Evapotranspiration studies on rice in relation to water use efficiency. *Transactions of the ASAE*. 25 (3): 702-707, 712.
- Spano D., Snyder R.L., Duce P., Paw U K.T. (1997). Surface renewal analysis for sensible heat flux density using structure functions. *Agricultural and Forest Meteorology*. 86: 259-271.
- Spano D., Snyder R.L., Duce P., Paw U K.T. (2000). Estimating sensible and latent heat flux densities from grapevine canopies using surface renewal. *Agricultural and Forest Meteorology*. 104 (3): 171-183.
- Tolosa M. (1990). El cultivo del arroz. *Informaciones Técnicas.1*. Diputación General de Aragón, Zaragoza, España. 8 pp.
- Tyagi N.K., Sharma D.K., Luthra S.K. (2000). Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter. *Agricultural Water Management* 45: 41-54.
- Van Atta C.W. (1977). Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Archives of Mechanics*. 29 (1): 161-171.
- Willmott C.J., (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of American Meteorological Society*. 63 (11): 1309-1313.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto AGL-2000-1775-C03-02, del Plan Nacional de I+D (Ministerio de Ciencia y Tecnología). Los autores agradecen a Jesús Gaudó, Miguel Izquierdo y Enrique Mayoral su ayuda impagable en la manufactura e instalación de las estructuras de soporte de la instrumentación y su asistencia en las tareas agrícolas; a Ignacio Clavería por su ayuda en la recopilación y almacenamiento informático de los datos de campo; y a José Cavero por su asistencia técnica en el tratamiento contra las malas hierbas.