

Estimación de la evapotranspiración de cebada y maíz a través de imágenes del satélite NOAA en Castilla-La Mancha

ANTONIO BRASA RAMOS [*]
VICENTE CASELLES MIRALLES [**]
FRANCISCO MARTÍN DE SANTA OLALLA MAÑAS [*]

RESUMEN Este estudio presenta una metodología sencilla desarrollada para el seguimiento de la evapotranspiración a nivel regional así como su aplicación a los cultivos de maíz (*Zea mays* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) en Castilla-La Mancha, una región semiárida de España, para su posible utilización en programación de riegos y análisis de la productividad regional, a partir de un mapa de evapotranspiración. La metodología aplicada se basa en dos modelos ampliamente difundidos para tales fines establecidos por Caselles y Delegido (1987) y por Jackson *et al.* (1977).

ESTIMATION OF THE EVAPOTRANSPIRATION OF BARLEY AND CORN IN THE CASTILLA-LA MANCHA REGION, USING IMAGES FROM THE NOAA 11 SATELLITE.

ABSTRACT This paper shows how to use an easy-to-follow methodology developed for the assessment of regional evapotranspiration and its application to barley and maize crops in Castilla-La Mancha, a semi-arid region of Spain, to monitor irrigation scheduling and determine crop yield in the region, by using a map of evapotranspiration. The methodology followed is based on two widely discussed models established by Caselles and Delegido (1987) and by Jackson *et al.* (1977).

Palabras clave: Regadíos; Teledetección; Satélite; Tratamiento digital de imágenes; Evaporación; Transpiración; Cereales; España.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo perseguido en este trabajo es aplicar una metodología sencilla pero eficaz que permite realizar un seguimiento diario de la evapotranspiración del maíz (*Zea mays* L.) y de la cebada (*Hordeum vulgare* L.) a escala regional en la zona de Barrax (Albacete), utilizando imágenes proporcionadas por el satélite NOAA 11 (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) a través del sensor AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*).

Se podrá confeccionar entonces balances hídricos regionales más precisos con un doble interés agronómico y medioambiental. Desde el punto de vista agronómico, se consigue optimizar los métodos más utilizados para la programación de riegos que son los que establecen un balance hídrico en el sistema suelo-planta-atmósfera. Hasta ahora, en esta zona se ha venido estimando la evapotranspiración a escala local con una precisión aceptable con métodos de medida *in situ*. Vía teledetección, se superan las dos dificultades más importantes de estos métodos para aplicarlos a escala regional, que son la necesidad de disponer de una densa red de medi-

das en tierra y la heterogeneidad de las superficies vegetales (Seguín, 1978).

Desde el punto de vista medioambiental, conocer la evapotranspiración a escala regional incide en la predicción de los procesos de desertización. Así, este trabajo de investigación se enmarca dentro del proyecto europeo EFEDA (*ECHIVAL Field Experiment in a Desertification-threatened Area*), EPOC-CT90-0030, cuyo objetivo es el estudio de las interacciones hidrológicas y climáticas entre la vegetación, la atmósfera y la superficie terrestre bajo las condiciones ambientales de un clima semiárido (Bolle *et al.*, 1993).

Muchos son los métodos utilizados para la determinación de la evapotranspiración. No se trata aquí de buscar un método más preciso que otros, sino de poner a punto una metodología sencilla y práctica basada en las técnicas de teledetección que nos permita hacer una estimación de la evapotranspiración de la cebada y el maíz a escala regional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LA ZONA DEL ESTUDIO

La zona de estudio está situada en la provincia de Albacete, 20 km al oeste de la capital (39° 3'N, 2° 6'W, 700 m), a 8 km de Barrax; el relieve es llano; el clima puede considerarse como semiárido; la precipitación media anual es del orden de 360-400 mm; las temperaturas mínimas de invierno muy

[*] Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, ETSIA Albacete, Universidad de Castilla-La Mancha.

[**] Departamento de Termodinámica, Facultad de Física, Universidad de Valencia.

bajas y máximas en verano elevadas. El suelo de las parcelas de ensayo se clasifica como *Calcixerollic-Petrocalcic Xerochrepts*, de textura francoarcillosa, y sin restricciones al crecimiento radicular hasta los 60 ó 70 cm, donde existe un horizonte más o menos cementado de carbonato cálcico.

2.2. MODELOS PROPUESTOS

Se proponen dos modelos para determinar la evapotranspiración mediante el uso combinado de la teledetección y medidas en tierra, escogidos por la precisión que tienen y por la facilidad de obtener los parámetros que intervienen en ellos.

La aplicación de ambos modelos se lleva a cabo en dos fases:

1ª Ajuste del modelo a la zona de estudio.

2ª Aplicación sistemáticamente por medio de técnicas de teledetección.

Modelo 1: Estimación de la evapotranspiración máxima a partir de ET de referencia

El modelo desarrollado por Caselles y Delegido (1987) permite el cálculo de la evapotranspiración máxima, ET_m , a partir del valor de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_r , mediante la expresión que tiene en cuenta los coeficientes de cultivo, k_c , que incorporan los efectos del suelo, de la fenología de la planta y las técnicas culturales a lo largo del ciclo agronómico (Doorenbos y Kassam, 1986):

$$ET = k_c ET_r \quad [1]$$

La evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_r , se calcula mediante la ecuación:

$$ET_r = AR_g T_a^{max} + BR_g + C \quad [2]$$

obtenida a partir de una modificación del método de Penman, y donde A, B y C son coeficientes empíricos que dependen de parámetros climáticos y que deben ser determinados para cada región. R_g es la radiación global diaria y T_a^{max} es la temperatura máxima del aire.

Modelo 2: Estimación directa de la evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración en los cultivos de cebada y maíz se obtiene directamente con el modelo propuesto por Jackson (1977), utilizado por distintos autores para distintos cultivos (Jackson *et al.*, 1977; Seguin e Itier, 1983; Nieuwenhuis *et al.*, 1985; Vidal y Ferrier, 1990):

$$ET = R_n + D(T_s - T_a) \quad [3]$$

en donde ET es la evapotranspiración del cultivo y R_n la radiación neta, ambos expresados en mm de agua por día, T_s es la temperatura de la superficie del cultivo, T_a es la temperatura del aire, mientras que D es un coeficiente semiempírico que hay que determinar para cada cultivo. La determinación de D puede hacerse mediante dos procedimientos:

i) Determinación experimental:

De la expresión [3] se deduce que puede obtenerse el valor medio del coeficiente D estadísticamente por regresión lineal de los valores de (ET/R_n) frente a las correspondientes medidas de $(T_s - T_a)$ (Jackson *et al.*, 1977).

Se llevó a cabo una campaña de campo sobre maíz y sobre cebada en 1992. Los valores diarios de evapotranspiración calculada según el método de Penman (Doorenbos y Kassam, 1986) y de radiación neta se recogen en la estación agromete-

orológica automática de Las Tiesas. La temperatura ambiente (T_a) se mide con un termómetro de mercurio de 0,2° C de precisión y la temperatura superficial (T_s) con el radiómetro portátil Thermopoint TPT80 mod. LTSC (AGEMA, Danderyd, Suecia), diariamente, en torno a las 16,30 horas, en coincidencia con el paso del satélite NOAA 11.

Para obtener temperaturas termométricas de las superficies de cebada y maíz a partir de las radiométricas en campo, es necesario realizar correcciones de emisividad, y se sigue el método elaborado por Badenas y Caselles (1992).

ii) Determinación teórica:

El coeficiente D se calcula de acuerdo con un modelo de resistencias para explicar el intercambio de calor por convección en la cebada y el maíz (Caselles y Hurtado, 1992):

$$D = \frac{R_{ad}}{R_{ai}} \frac{\rho c_p}{L(r_{ai} + r_s)} \quad [4]$$

donde R_{ad} es el flujo de radiación neta, ρ es la densidad del aire (kg m^{-3}), c_p es el calor específico del aire ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), r_s es la resistencia aerodinámica (s m^{-1}), r_{ai} es la resistencia del cultivo, que es la suma de la resistencia aerodinámica de las hojas y la resistencia estructural debida a la estratificación de las hojas en el cultivo, que es función de la velocidad del viento, la estabilidad de la atmósfera junto al suelo y la naturaleza de la superficie. Los subíndices "d" e "i" denotan valores diarios o instantáneos respectivamente.

2.3. APLICACIÓN SISTEMÁTICA A LA TELEDETECCIÓN

Modelo 1: Estimación de la evapotranspiración del cultivo a partir de ET de referencia.

A partir de imágenes de satélite, se construyen mapas de temperatura máxima diaria del aire. Aplicándose entonces la relación [2] se obtienen imágenes de evapotranspiración diaria del cultivo de referencia. Mediante la relación [1] podremos obtener imágenes de evapotranspiración máxima diaria. Para ello necesitamos construir una imagen de coeficientes de cultivo, k_c , de la región. Se sigue la siguiente metodología:

- Imagen de temperatura: se obtiene a partir de la radiación terrestre, que los satélites captan en la banda de longitudes de onda entre 10,5 y 12,5 μm . A estos valores hay que realizarles dos tipos de correcciones: emisividad y atmosférica. El modelo *Split-window* permite efectuarlas a la vez.
- Imagen de radiación global: de entre los diversos métodos existentes se ha elegido el propuesto por Dedieu *et al.* (1987), que nos permite estimar la radiación global incidente a partir de la radiación extraterrestre, el albedo planetario y el albedo de la superficie. Los valores de albedo se pueden obtener con ayuda del método de Saunders (1990).
- Imagen de cultivos y su fenología: digitalizando un mapa de usos del suelo. Con la ayuda de las fotografías aéreas del vuelo del M.A.P.A. de octubre de 1987, se elaboró un mapa de cultivos de la zona de 10x10 km^2 , escala 1:25.000 mediante dos campañas de visitas al campo en enero y abril de 1991.

Modelo 2: Estimación directa de la evapotranspiración del cultivo.

La ecuación [3] nos permite construir el mapa de la evapotranspiración de la cebada y el maíz a partir de una imagen de temperatura de satélite usando el método de *split-window*.

Se aplica el modelo sobre una zona extensa y homogénea en la que predomina la cebada o el maíz, dependiendo de la fecha de la imagen. Entonces, la temperatura del aire y la radiación neta se mantienen constantes en toda ella.

Para construir entonces el mapa de evapotranspiración, se parte de la imagen de temperatura superficial (T_s) obtenida al mediodía, y se construye la imagen de evapotranspiración de acuerdo con [9]. ET_{max} se obtiene de la estación de Las Tiesas.

$$ET = ET_{max} - D(T_a - T_{min})$$

donde ET_{max} se obtiene de la estación de Las Tiesas, T_a es la temperatura superficial y T_{min} es el menor valor de temperatura de la imagen, que corresponde al valor máximo de evapotranspiración.

3. RESULTADOS

Modelo 1: Estimación de la evapotranspiración del cultivo a partir de ET de referencia

Las constantes A y B se determinan por regresión usando una serie de 7 años (1985-1991) de datos de temperatura máxima diaria del aire, T_a^{max} , radiación global diaria, R_g , y evaporación de cubeta, a partir de la cual se estima la evapotranspiración de referencia, ET_r , recogidas en el Centro Meteorológico de Albacete. Como la estación de Las Tiesas empezó a operar en 1989, la serie de datos de evapotranspiración era insuficiente, por lo que el coeficiente C tuvo que ser ajustado aplicando la ecuación obtenida en Albacete a los datos hasta el momento disponibles en la estación de Las Tiesas, obteniéndose:

$$ET_r = [(5,99 \times 10^{-4}) T_a^{max} - (1,40 \times 10^{-3})] R_g + 1,54 \quad [6]$$

Modelo 2: Determinación del coeficiente D.

i) Determinación experimental:

De la ecuación [3], puede obtenerse el valor medio de D estadísticamente por regresión lineal de valores de $(ET_r - R_n)$ frente a las correspondientes medidas de $(T_a - T_s)$:

$$D = \frac{ET_r - R_n}{T_a - T_s} \quad [7]$$

El valor medio obtenido junto con el error ($\pm$ desviación estándar) es:

Cebada: $D = 0,57 \pm 0,21 \text{ mm día}^{-1} \text{ K}^{-1}$, para 16 días de toma de datos.

Maíz: $D = 0,76 \pm 0,19 \text{ mm día}^{-1} \text{ K}^{-1}$, para 19 días de toma de datos.

y la ecuación [3] toma entonces las siguientes formas:

$$\text{Cebada: } ET = R_n + 0,57 (T_a - T_s) \quad [8]$$

$$\text{Maíz: } ET = R_n + 0,76 (T_a - T_s) \quad [9]$$

Se han comparado estos resultados (ET) con los calculados según Penman (ET_{Pen} y ET_{max}), de Las Tiesas. Los valores medios de las diferencias $(ET - ET_{Pen})$ y $(ET - ET_{max})$ son:

Cebada: $ET - ET_{Pen} = 0,13 \pm 0,79 \text{ mm}$ ($n = 16$ observaciones)

Maíz: $ET - ET_{max} = 0,16 \pm 1,01 \text{ mm}$ ($n = 19$ observaciones)

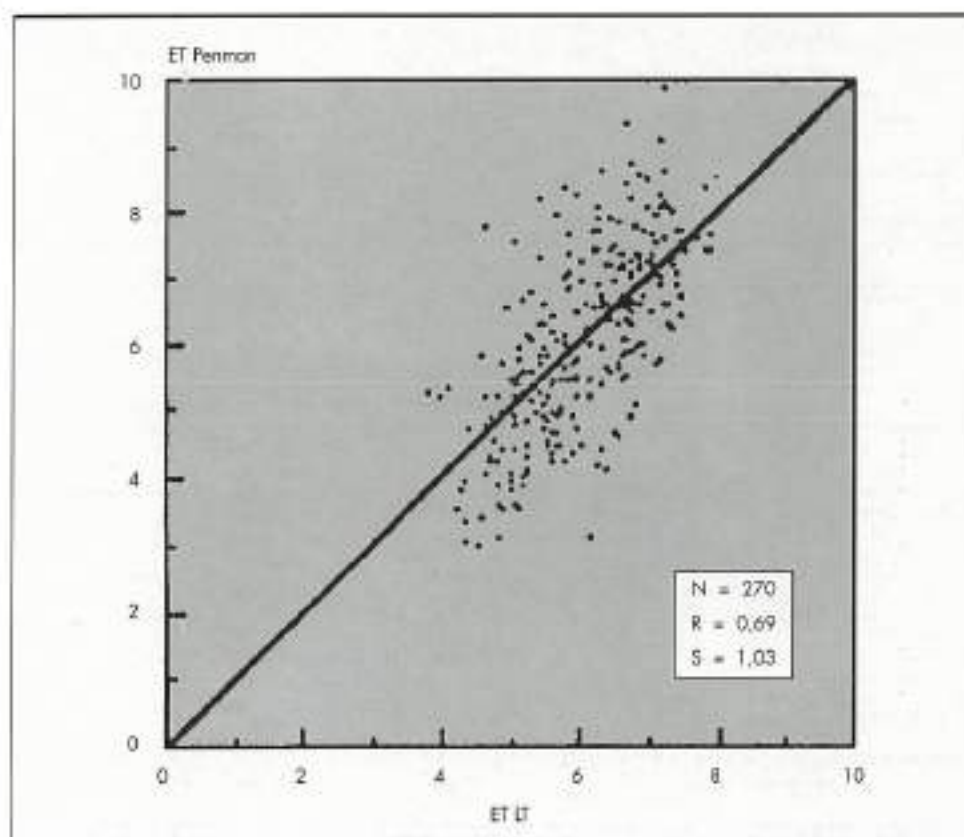


FIGURA 1. Valores de la evapotranspiración de referencia, ET_{Penman} , calculados a partir del método de Penman modificado por la FAO en la estación de Las Tiesas, frente a los valores de evapotranspiración calculados a partir de la expresión [10], ET_{LT} , ambas expresadas en mm día^{-1} . Se indica también el número de días considerados, N, el coeficiente de correlación, R, y el error de estimación, S.

CEBADA					
FECHA	$T_a - T_s$	R_n	ET	ET_{sat}	$ET - ET_{sat}$
08/V/92	4,4	4,38	6,89	5,46	1,43
11/V/92	5,3	4,21	7,23	6,41	0,82
14/V/92	3,5	3,67	5,67	6,83	-1,16
18/V/92	5,2	4,03	6,99	7,10	-0,11
19/V/92	1,7	4,49	5,46	5,94	-0,48
20/V/92	2,3	4,51	5,82	6,27	-0,45
22/V/92	2,9	4,07	5,72	6,18	-0,46
25/V/92	2,4	4,81	6,18	6,23	-0,05
26/V/92	6,3	3,39	7,18	6,55	0,63
27/V/92	5,0	3,83	6,66	5,94	0,74
29/V/92	2,4	2,57	3,94	3,43	0,51
30/V/92	4,6	3,11	5,73	4,47	1,26
01/VI/92	3,3	2,49	4,37	4,94	-0,57
08/VI/92	3,2	3,18	7,00	8,04	-1,04
10/VI/92	5,1	4,83	7,74	7,02	0,72
16/VI/92	3,4	3,20	5,14	4,81	0,33
MEDIA	3,8	3,94	6,11	5,98	0,13

MAÍZ					
FECHA	$T_a - T_s$	R_n	ET	ET_{sat}	$ET - ET_{sat}$
13/VII/92	3,5	2,81	5,82	6,40	-0,58
15/VII/92	4,5	2,66	6,53	7,02	-0,49
16/VII/92	2,7	3,56	5,88	6,22	-0,34
17/VII/92	5,8	4,83	9,82	7,99	1,83
21/VII/92	5,5	4,85	9,58	8,91	0,67
22/VII/92	3,9	4,82	8,17	8,15	0,02
23/VII/92	5,4	4,93	9,57	8,68	0,89
24/VII/92	6,5	3,55	9,14	6,42	2,72
26/VII/92	5,5	4,54	9,27	9,08	0,19
27/VII/92	5,6	4,37	9,19	7,56	1,63
28/VII/92	7,7	4,41	11,03	7,75	3,28
30/VII/92	5,5	4,47	9,20	9,14	0,06
31/VII/92	4,4	4,22	8,00	8,06	-0,06
03/VIII/92	3,3	3,14	5,98	6,22	-0,24
04/VIII/92	4,8	3,63	7,76	7,11	0,65
05/VIII/92	5,6	3,30	8,12	8,35	-0,23
10/VIII/92	4,1	3,66	7,19	5,53	1,66
11/VIII/92	4,7	3,38	7,42	6,78	0,64
12/VIII/92	4,1	2,44	5,97	5,89	0,08
13/VIII/92	2,5	2,78	4,93	5,81	-0,88
MEDIA	4,9	3,87	7,60	7,44	0,16

TABLA 1. Valores para cada fecha de muestreo de la diferencia de temperaturas termométricas ambiente y superficial ($T_a - T_s$) expresada en K, radiación neta diaria (R_n), evapotranspiración diaria de la cebada (maíz) calculada por el método propuesto (ET), evapotranspiración diaria de la cebada (maíz) calculada según el método de Penman en la estación de Las Tiesas (ET_{sat}), y la diferencia ($ET - ET_{sat}$), expresadas en mm.

ii) Determinación teórica:

Para el cálculo teórico del coeficiente D se utilizan las medidas realizadas sobre cebada y maíz por el grupo de investigación de cultivos herbáceos de la Universidad de Castilla-La Mancha durante las campañas 1991 y 1992, correspondientes al proyecto EFEDA, en diversas parcelas de muestreo—cuatro de cebada y cinco de maíz—.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Cebada: $D = 0,57 \pm 0,08 \text{ mm día}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Maíz: $D = 0,76 \pm 0,25 \text{ mm día}^{-1} \text{ K}^{-1}$

4. CONSIDERACIONES FINALES

El trabajo desarrollado lo hemos concebido con una doble salida: climática (un solo valor de evapotranspiración para el conjunto de la zona de estudio) y agronómica (mapas de evapotranspiración que se podrán superponer a los mapas de cultivos elaborados en campo).

Para facilitar el análisis de los resultados en una zona heterogénea como la de Barrax se eligen imágenes de dos fechas concretas. Así, en mayo-junio la situación agronómica está dominada por los cereales de invierno, y muy particularmente cebada, mientras que el grado de cobertura de los de verano es muy bajo. Por el contrario, en julio-agosto la situación se invierte y los cultivos de regadío, en su mayor parte maíz, se adueñan del paisaje. Entonces, a través de estas dos épocas se podrá evaluar la variación en la evapotranspiración como consecuencia del cambio significativo que supone el paso de una situación agronómica dominada por los cultivos de invierno a una en la que predominan los regadíos de maíz, lo que proporciona la posibilidad de estudio de cuestiones agronómicas tales como la elaboración de balances hídricos regionales, estado hídrico de los cultivos de cebada en secano, nivel de estrés hídrico en los cultivos de regadío de ciertas áreas, previsiones de productividad, etc., temas en los que la combinación de los dos modelos desarrollados será fundamental, pues el cociente entre la evapotranspiración del cultivo y la máxima nos informa del estrés hídrico del cultivo y, en consecuencia, de la producción esperada.

CULTIVO	AÑO	PARCELA	D
CEBADA	1991	BRCI	$0,56 \pm 0,09$
		BRCII	$0,50 \pm 0,05$
		BRCIII	$0,51 \pm 0,03$
	1992	BR2C	$0,63 \pm 0,05$
		Media de 1991-92	$0,57 \pm 0,08$
MAÍZ	1991	BMI	$0,77 \pm 0,34$
		BMI	$0,73 \pm 0,27$
		BMI	$0,52 \pm 0,07$
	1992	BR2M	$0,89 \pm 0,31$
		BR2M1	$0,80 \pm 0,26$
	Media de 1991-92		$0,76 \pm 0,25$

TABLA 3. Resumen de los valores del coeficiente D ($\text{mm día}^{-1} \text{ K}^{-1}$) para cada uno de las parcelas de cultivo estudiadas durante las dos campañas de campo de 1991 y 1992.

5. BIBLIOGRAFÍA

- BADENAS, C.; CASELLES V. (1992). A simple technique for estimating surface temperature by means of a thermal infrared radiometer. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (15), 2951-2956.
- BOLLE, H. J.; ANDRE, J. C.; ARRÉE, J. L.; BARTH, H. K.; BESSEMOULIN, P.; BRAS, A.; DE BRUIN, H. A. R.; CRUCES, J.; DUGDALE, G.; ENGMAN, E. T.; EVANS, D. L.; FANTECHI, R.; FIEDLER, F.; VAN DE GRIEND, A.; IMESON, A. C.; JOCHUM, A.; KABAT, P.; KRATZSCH, T.; LAGOUARDE, J. P.; LANGER, I.; LLAMAS, R.; LÓPEZ-BAEZA, E.; MELIÀ MIRALLÉS, J.; MUNIÓSGUEN, L. S.; NERRY, P.; NOILHAN, J.; OLIVER, H. R.; ROTH, R.; SAATCHI, S. S.; SÁNCHEZ DÍAZ, J.; MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; SHUTTLE WORTH, W. J.; SØGAARD, H.; STRICKER, H.; THORNES, J.; VAUCLIN, M.; WICKLAND, D. (1993). EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area. *Annales Geophysicae*, 11, 173-189.
- CASELLES, V.; DELEGIDO J. (1987). A simple model to estimate the daily value of the regional maximum evapotranspiration from satellite temperature and albedo images. *International Journal of Remote Sensing*, 8, (8), 1151-1162.
- CASELLES, V.; DELEGIDO, J.; SOBRINO, J. A.; HURTADO, E. (1992). Evaluation of the maximum evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 13, (5), 939-946.
- DEDIEU, G.; DESCHAMPS, P. Y.; KERR, Y. H. (1987). Satellite estimation of solar irradiance at the surface of the earth and of surface albedo using a physical model applied to Meteosat data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 79-87.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. (1986). Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudios FAO. Serie Riego y Drenaje, n° 33 (rev.). Roma.
- DOORENBOS J.; PRUITT W.O. (1976). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudios FAO. Serie Riego y Drenaje, n° 24. Roma.
- HURTADO, E. (1992). Estimación de la evapotranspiración del maíz en Albacete mediante técnicas de teledetección. Tesis Doctoral. Facultad de Física, Universidad de Valencia, Valencia.
- JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13, (3), 651-656.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA, F. (1986). Los consumos de agua de riego de los principales cultivos de la provincia de Albacete. Caja de Ahorros de Albacete, Albacete, 96.
- MARTÍN DE SANTA OLALLA, F.; DE JUAN, J. A. (1993). *Agronomía del Riego*. Ediciones Mundi-Prensa/Universidad de Castilla-La Mancha, Madrid.
- NIEUWENHUIS, G. J. A.; SMIDT, F. H.; THUNISSEN, H. A. M. (1985). Estimation of regional evapotranspiration of arable crops from thermal infrared images. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1319-1334.
- PERRIER, A. (1982). Land surface processes: vegetation. *Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models*. Cambridge University Press, Cambridge.
- SAUNDERS, R. W. (1990). The determination of broad band surface albedo from AVHRR visible and near-infrared radiances. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 49-67.
- SEGUIN, B. (1978). Modelisation des échanges d'énergie et de masse à l'interface sol-atmosphère. Problèmes posés par l'extension des modèles locaux à l'échelle régionale (100 km). Reunion A.S.P. Evolution des climats. Paris 11-12 décembre 1978. C.R. ed.F. Becker, Strasbourg.
- SEGUIN, B.; ITIER, B. (1983). Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 4, (2), 371-383.
- VIDAL, A.; PERRIER, A. (1990). Irrigation monitoring by following the water balance from NOAA-AVHRR thermal infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28, (5), 949-954.