

## La teledetección en la gestión del agua de riego

*M<sup>a</sup> A. Casterad, J. Herrero y P.M. Barbosa*

Servicio de Investigación Agraria  
Diputación General de Aragón

### RESUMEN

Se emplea la teledetección para estimar el volumen de agua de riego utilizado por cada uno de los principales cultivos de regadío en 26313 ha (Flumen, Huesca). A tal fin, las superficies de estos se aforan mediante muestreo de marco arcolar y estimador por regresión en base a la clasificación supervisada de dos imágenes Landsat TM. Estos aforos se combinan con datos sobre las necesidades medias de agua de riego. Se estima así un volumen total de riego de 129 hm<sup>3</sup>, que concuerda con lo facturado (140 hm<sup>3</sup>) por la Confederación Hidrográfica del Ebro en una superficie similar aunque no exactamente coincidente.

### ABSTRACT

Crop irrigation water consumption was estimated for the main crops in an irrigation district of 26313 ha in North Eastern Spain. The acreage of these crops is obtained by area frame sampling and regression estimator based on the supervised classification of two Landsat TM images (spring and summer). These surfaces were merged with the mean irrigation water requirement values. The whole irrigation water volume estimated by this procedure, 129 hm<sup>3</sup>, agrees with the 140 hm<sup>3</sup> provided to this irrigation district by the basin water authority.

### Introducción

El manejo de la red de canales y presas en una cuenca hidrográfica requiere conocer la disponibilidad y la demanda de agua. El riego supone casi un 90% de la demanda en la cuenca del Ebro. En esta cuenca hay datos acerca de las necesidades de agua de los cultivos (Faci, 1992) que permitirían estimar el consumo de agua en un polígono de riego si se conociera la superficie ocupada por cada cultivo.

La predicción temprana de los consumos de agua en cada polígono de riego es clave para programar las operaciones de embalse, desembalse y distribución en la cuenca. El conseguir, incluso a posteriori, un desglose de las superficies de los distintos cultivos por polígonos de riego, permitiría evaluar la eficiencia global del sistema de distribución de agua y detectar anomalías o desviaciones del uso del agua.

La mayoría de los precedentes en el uso de datos de satélite para la estimación de superficies de cultivos (Meyer-Roux et al., 1983; Hanuschak et al., 1982; Delincé, 1988; Germain y Julien, 1988; SERN, 1990; González, 1991) se refieren a demarcaciones mucho mayores que un polígono de riego. Estos trabajos utilizan los datos de satélite para mejorar, mediante un estimador por regresión, las estadísticas obtenidas de encuestas realizadas por marco areolar.

La Unidad de Suelos y Riegos adaptó esta metodología a pequeñas áreas (Casterad et al. 1992; Barbosa, 1993), haciéndola aplicable a unidades de manejo o polígonos de riego. En esta línea, el presente trabajo utiliza la estadística de las superficies de cultivos en un pequeño regadío para estimar sus consumos de agua.

### ***Material y métodos***

La zona de estudio han sido 26313 ha del regadío de Plumen (Huesca). Se han aforado las superficies de los principales usos y cultivos mediante muestreo por marco areolar y estimador por regresión en base a la clasificación supervisada de imágenes de Landsat-5 TM. El consumo de agua se ha estimado combinando los aforos de las superficies de cultivos con las necesidades de riego de estos en un año medio. El volumen de agua así calculado se compara con el suministrado por la Confederación Hidrográfica del Ebro.

### ***Obtención de verdad-terreno***

Mediante muestreo aleatorio simple se seleccionaron 36 unidades de muestreo o segmentos de unos 500 x 500 metros.

La falta de cartografía adecuada llevó a seleccionar dichos segmentos a partir de los contactos de un vuelo con escala aproximada 1:12.000. Se utilizó la parte central de cada foto, para minimizar las distorsiones. Se visitaron los segmentos, delineando los usos y cultivos sobre transparente superpuesto a una fotocopia del contacto ampliada al 150%. Tras su corrección geométrica sobre la imagen de satélite, resultó un tamaño medio de segmento de 28.79 ha, lo que supone una tasa de muestreo del 4%.

El inventario de campo constó de: (i) una encuesta de terreno (19 al 27 de junio), cuando aún están en pie los cereales de invierno y ya han emergido el maíz y el girasol, y (ii) una verificación (26 al 31 de julio) de si en las parcelas de cebada, trigo y terreno arado se había sembrado otro cultivo.

### **Estimación de superficies de cultivo**

#### ***Expansión directa***

Las superficies de los cultivos y usos en los segmentos inventariados se obtiene mediante su digitalización, llevada a cabo tras la corrección geométrica de los segmentos. Ello requirió, para cada segmento, buscar puntos identificables tanto en la imagen de satélite corregida como en la fotografía aérea donde estaba el segmento, a fin de establecer la correspondiente función de transformación. No fue posible localizar puntos de la imagen en nueve segmentos, que hubieron de corregirse sobre mapas topográficos.

La superficie ocupada por cada cultivo en toda el área de estudio se estima por expansión directa, es decir, multiplicando el porcentaje medio de ocupación del cultivo en los segmentos por la superficie total de la demarcación. Estas cifras podrían obtenerse tan pronto se hayan efectuado todas las siembras, sin esperar a que el ciclo de los cultivos (Fig. 1) componga la imagen de satélite adecuada. El avanzar estas superficies, incluso no mejoradas por la teledetección, es útil para una temprana toma de decisiones acerca del agua embalsada.

#### ***Proceso de imagen***

Se procesaron dos imágenes Landsat 5 TM, del 20 de mayo y del 24 de agosto de 1991. Para la corrección geométrica se eligieron puntos de control con los que se generó un polinomio de transformación de segundo grado. Tras aplicar la transformación, se remuestreó a píxeles de 25 m por el método del vecino más próximo.

La corrección radiométrica de los efectos atmosféricos consistió en un desplazamiento del histograma por sus valores mínimos, seguido de la conversión del valor digital a reflectividad (Pons y Solé, 1993).

Se hizo una clasificación supervisada multitemporal de diez bandas (todas excepto la 1 y la 6). La selección de áreas de entrenamiento fue interactiva, en base a la verdad-terreno delineada en los segmentos. Se aplicó el clasificador de máxima verosimilitud y un agrupador de contexto. El resultado de la clasificación se evaluó mediante matrices de confusión en los segmentos.

#### ***Estimador por regresión con datos de satélite***

Las superficies estimadas por expansión directa se corrigen con los datos obtenidos en la clasificación, utilizando el estimador por regresión (Cochran 1977); las fórmulas pueden encontrarse en Casterad et al. (1992).

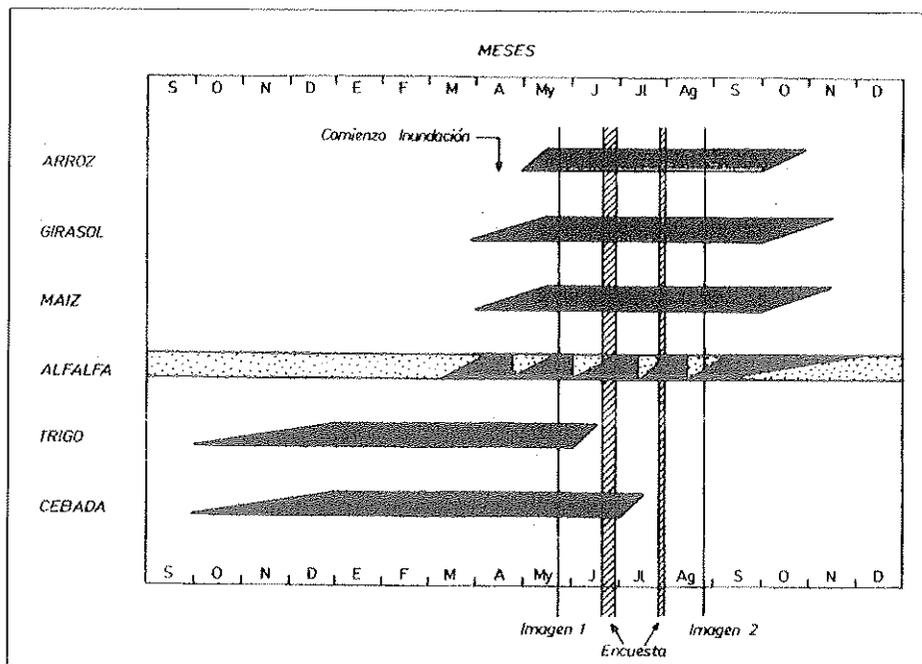


Figura 1

Ciclo de los principales cultivos en el regadío de Flumen (Huesca) en 1991, junto con las fechas de las imágenes de satélite utilizadas y del trabajo de campo.

El estimador de la superficie media ocupada por cada clase en los segmentos depende de la pendiente de la recta de regresión de la verdad-terreno sobre la clasificación en los segmentos. Dicha superficie media se multiplica por el número de segmentos posibles en el área de estudio para obtener la superficie total.

Se ha calculado el coeficiente de variación (C.V.) como indicador de la precisión final alcanzada, y la eficiencia relativa,  $E.R. = (1-r^2)^{-1}$ , donde  $r^2$  es el coeficiente de determinación de la regresión citada en el párrafo anterior. E.R. indica cuántas veces debería aumentarse la tasa de muestreo para lograr la misma precisión si se utilizase únicamente la expansión. En los cultivos cuya muestra seguía una distribución normal se han calculado los intervalos de confianza (I.C.) al 95%.

### *Estimación de consumos de agua*

Los consumos de agua se han estimado a partir de las necesidades de riego de los cultivos para el año medio en la zona de Flumen, según los cálculos de Faci (1992) y

de Faci y Martínez-Cob (1991). Dichos cálculos se basan en la propuesta de FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen y Pruitt, 1986), y se pueden esquematizar en tres etapas:

- Cálculo de la evapotranspiración de los cultivos (ETc), que constituye las necesidades hídricas brutas de los cultivos para un desarrollo óptimo. La ETc está determinada por el clima y por las características del cultivo.
- Cálculo de las necesidades hídricas netas de los cultivos (NHn). Se obtiene descontando al valor de ETc la precipitación efectiva, es decir la fracción de la precipitación que contribuye a satisfacer las necesidades de evapotranspiración.
- Cálculo de las necesidades de agua de riego. A la NHn del cultivo se le añade, además de la fracción de lavado del suelo, la pérdida de agua asociada al sistema de riego. En Flumen el riego es por inundación y se ha tomado una eficiencia del riego de 0.8 a nivel de parcela.

Los consumos de agua de riego para un determinado cultivo se han estimado con la fórmula:

$$CR = NR * Y * 10^{-6}$$

donde CR es el consumo de agua de riego en hm<sup>3</sup>, NR son las necesidades de riego en m<sup>3</sup>/ha, e Y es la superficie del cultivo en ha que en este artículo son las obtenidas mediante estimador por regresión.

### **Resultados y discusión**

El Cuadro 1 presenta los aforos de las superficies de los principales cultivos por expansión directa y con intervención de los datos de satélite. Estos mejoran las estimaciones, como lo denota la disminución de los C.V. y de los I.C.

En aquellos cultivos para los cuales se rechazó la hipótesis de normalidad de la muestra, caso del arroz y del girasol, no se han podido calcular los intervalos de confianza. Estos cultivos presentan a su vez mayores coeficientes de variación.

La buena clasificación del arroz (bondad de clasificación 83.2%; significancia temática 96.3%) se refleja en la gran mejora del coeficiente de variación al realizar la regresión, así como en la elevada eficiencia relativa.

| CLASES          | Expansión |       |             | Regresión    |       |             |      |
|-----------------|-----------|-------|-------------|--------------|-------|-------------|------|
|                 | (ha)      | I.C.  | C.V.<br>(%) | Yreg<br>(ha) | I.C.  | C.V.<br>(%) | E.R. |
| Arroz           | 3010      | —     | 31.5        | 2447         | —     | 6.6         | 34.4 |
| Alfalfa+forraje | 3908      | ±1461 | 18.4        | 4382         | ±737  | 8.3         | 3.9  |
| Cereal invierno | 8044      | ±1890 | 11.6        | 7783         | ±805  | 5.1         | 5.5  |
| Trigo           | 3366      | ±1283 | 18.8        | 3084         | ±1047 | 16.7        | 1.5  |
| Cebada          | 4681      | ±1602 | 16.9        | 4791         | ±1147 | 11.8        | 2.0  |
| Girasol         | 1521      | —     | 38.2        | 1224         | —     | 29.3        | 2.6  |
| Maíz            | 2021      | ±897  | 21.8        | 2230         | ±447  | 9.9         | 4.0  |

C.V.= Coeficiente de variación.

I.C.= Intervalo de confianza al 95%.

E.R.= Eficiencia relativa

#### Cuadro I

Superficies de cultivos estimadas mediante expansión y mediante estimador de regresión con los datos de clasificación multitemporal, en 26313 ha del regadío de Flumen (Huesca) para 1991

Se ha obtenido una estimación de la superficie de girasol, pero no puede darse un intervalo de confianza. Además, la precisión de su estimación en regresión es muy inferior a la del resto de los cultivos (C.V. de 29.3% frente al 16.7% del trigo que es el siguiente cultivo con peor C.V.). Por todo ello tal resultado se considera no suficientemente fiable. A diferencia del arroz, la bondad de clasificación (58.4%) y la significancia temática (40.9%) son bajas, y aconsejan no utilizar tampoco la superficie de girasol obtenida por clasificación.

Las matrices de confusión para los segmentos muestreados indican que la cebada y el trigo se confundían mutuamente en la clasificación. En efecto, un 42.8% de todo el trigo inventariado se clasifica como tal, mientras que un 25.0% lo hace como cebada; en el caso de la cebada un 50.1% del total se clasifica como cebada y un 26.5% como trigo. La estimación para ambas clases unidas como cereal de invierno (Cuadro I) obtiene una mayor precisión.

Con las clases alfalfa y forraje ha ocurrido algo similar. En el área de estudio, las forrajeras se asocian a ganadería semiestabulada y están poco representadas. Además, en la encuesta de campo pudo haber confusiones mutuas entre alfalfa y forraje.

sobre todo si algún corte (Fig. 1) era reciente, o si la especie pratense dominante en el momento de la encuesta tenía apariencia similar a la alfalfa. Ello, junto a la difícil discriminación espectral de ambas clases, llevó a fusionarlas desde el principio en una clase denominada alfalfa + forraje.

El Cuadro 2 recoge los consumos de agua de riego estimados para toda la demarcación, y para cada uno de los cultivos cuyo aforo se considera fiable. También incluye los datos utilizados para el cálculo, es decir, las necesidades locales de agua de riego para un año medio y las superficies de cada cultivo.

La estimación del consumo de agua en el caso del cereal de invierno se ha realizado tomando el 40% de la superficie como trigo y el 60% como cebada. Ello conduce a la misma cifra de 35 hm<sup>3</sup> que la estimación por separado, si bien el intervalo de confianza para el cereal de invierno es más estrecho.

Para la clase alfalfa + forraje se toman como necesidades de agua las de la alfalfa, al ser similares en ambos cultivos y presentarse la alfalfa en mayor proporción.

| CULTIVOS        | Superficie <sup>(1)</sup><br>(ha) | Representación<br>(% respecto al<br>perímetro estudiado) | Necesidad media<br>de agua de riego <sup>(2)</sup><br>(m <sup>3</sup> /ha) | Consumo estimado<br>de riego en 1991<br>(hm <sup>3</sup> ) |
|-----------------|-----------------------------------|--|--|--|
| Arroz           | 2447                              | 9.3  | 15000  | 37   |
| Maíz            | 2230                              | 8.5  | 7710   | 17   |
| Alfalfa+forraje | 4382                              | 16.7   | 9130   | 40   |
| Cereal invierno | 7783                              | 29.6   | 4502   | 35   |
| Trigo           | 3084                              | 11.7   | 4940   | 15   |
| Cebada          | 4791                              | 18.2   | 4210   | 20   |
| <b>Total</b>    | <b>16842</b>                      | <b>64.0</b>  | —  | <b>129</b>   |

(1) Superficie estimada por encuesta de marco areolar y estimador por regresión (clasificación supervisada de las imágenes Landsat TM del 20 de mayo y 24 de agosto de 1991).

(2) Fuente: para el arroz, Tolosa (1990); para el resto de los cultivos calculado por Faci y Martínez-Cob (1992) con una eficiencia de riego por inundación del 80% e incluidas necesidades de lavado.

Cuadro 2

Superficie, representación y consumos medios estimados de agua de riego de los principales cultivos en regadíos de la zona del Flumen (Huesca) durante 1991

Se ha estimado en 129 hm<sup>3</sup> el agua de riego que hubieran utilizado en un año medio los principales cultivos aforados, que cubren el 64 % de la demarcación. Esta cifra parece acorde con los 140 hm<sup>3</sup> que, medidos en compuerta de salida del canal del Flumen, sirvió en 1991 la Confederación Hidrográfica del Ebro para una superficie similar aunque no exactamente coincidente. En este sentido, a la cifra de 129 hm<sup>3</sup> cabría añadir el consumo de agua de otros cultivos no aforados por este método o cuya estimación no se considera fiable. Si se toma como orientativa la superficie de 1224 ha obtenida por regresión para el girasol, y una necesidad anual media de 6980 m<sup>3</sup>/ha (Faci y Martínez-Cob, 1992), el consumo estimado de este cultivo sería de 9 hm<sup>3</sup>.

Cuando en las estadísticas se dispone de intervalos de confianza, cabe expresarlos como consumos de agua de un hipotético año medio. Así la estimación en hm<sup>3</sup> sería: maíz, 17±3; alfalfa + forraje, 40±7; cereal de invierno, 35±4. Estos intervalos deberán cuantificarse frente al efecto sobre los consumos achacable tanto a la meteorología del año estudiado, como al comportamiento hídrico de los distintos suelos y a las prácticas de riego. A falta de estos últimos datos, se podría incorporar la estima de evapotranspiración también por teledetección (Caselles et al., 1993; Moran y Jackson 1991).

Se está emprendiendo el cálculo de necesidades de agua para cada uno de los años de que se dispone de aforos de superficies, a fin de compararlos con las cifras de volúmenes de agua facturados por Confederación Hidrográfica del Ebro. Ello permitirá calibrar y afinar el método para su aplicación futura, antes de y durante la campaña de riego.

### **Conclusiones**

Los mejores aforos de superficies de cultivos en el regadío de Flumen (Huesca) se han obtenido al aplicar el estimador por regresión mediante datos de satélite. Estos aforos han permitido estimar los volúmenes de agua de riego utilizados por los principales cultivos.

La discriminación entre alfalfa y forrajeras no ha sido posible. La fusión de ambas clases en alfalfa+forraje, es apropiada para la predicción de necesidades de agua y da una estimación de superficie satisfactoria. En el caso del trigo y la cebada también es útil la fusión en cereal de invierno, al mejorar la precisión de la estimación.

Los datos de necesidades anuales medias de riego de los cultivos han bastado para una estimación de consumos de agua acorde con los volúmenes de agua de riego facturados. Y ello pese a no haber estimado el agua consumida por cultivos no aforados con este método o cuya estimación no se considera fiable (caso del girasol).

Para una predicción temprana de las necesidades de agua de riego deberán utilizarse imágenes de satélite tan tempranas como lo permita el ciclo de los cultivos presentes. La mejora de dichas predicciones podría basarse en las necesidades de agua de riego durante el año meteorológico en curso, en las reservas hídricas de cada suelo y en el estadio de desarrollo del cultivo.

### **Agradecimientos**

A la Confederación Hidrográfica del Ebro en la persona del Ing. T. Sancho, que nos entregó los datos de volúmenes de agua suministrados a los regantes. Al Dr. L. Solé que facilitó el tratamiento de imágenes en el Instituto Jaime Almera (CSIC).

Este trabajo es un resultado de los proyectos INIA 8525 y SC93056.

### **Bibliografía**

- Allen, R.G. and Pruitt, W.O.:** 1986. Rational use of the FAO-Blaney-Criddle Formula. *J. Irrig. and Drain. Eng.* ASCE 112: 139-155.
- Barbosa, P.M.:** 1993. *Estadística de los cultivos y de la salinidad en un regadío mediante teledetección*. Tesis Master of Science. C.I.H.E.A.M. Instituto Agronómico Mediterráneo, Zaragoza. 172 pp.
- Caselles, V., Delegido, J.V. and Hurtado, E.:** 1993. Teledetección: Aplicación a la determinación de la evapotranspiración. In: F. Martín y J.A. De Juan (Eds.) *Agronomía del riego*. Mundi Prensa. Madrid. pp 691-732.
- Casterad, M.A. et al.:** 1992. Estimación de superficies de cultivos en pequeños regadíos mediante encuesta de terreno y datos de satélite. *Agronomie*. 12: 661-668.
- Cochran, W.G.:** 1977. *Sampling techniques*. 3rd ed. N.Y. Wiley & Sons. 428 pp.
- Delince, J.:** 1988. The test site network of the agriculture projects. In *Proceedings of the 8th Earsel Symposium. Alpine and Mediterranean Areas: A Challenge for Remote Sensing*. Capri (Naples). 7 pp.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O.:** 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. *Irrigation and Drainage*. Paper nº 24. FAO. Roma. 94 pp.
- Faci, J.M.:** 1992. *Contribución a la medida y cálculo de la evapotranspiración de referencia en Aragón*. Institución Fernando el Católico, Zaragoza. 125 pp.
- Faci, J.M. and Martínez-Cob, A. 1991. *Cálculo de la evapotranspiración de referencia en Aragón*. Serie Estudios Agrarios. Diputación General de Aragón, Zaragoza. 115 pp.
- Faci, J.M. and Martínez-Cob, A.:** 1992. Necesidades de agua de riego de los cultivos en Aragón. *Riegos y Drenajes XXI (61)*: 34-38.
- Germain, M. and Julien, C.:** 1988. L'application de la télédétection à la estimation des superficies agricoles. *The Canadian Journal of Statistics*, 16 (supplement): 9-23.
- González, F., López, S. and Cuevas, J.:** 1991. Comparing two methodologies for crop area estimation in Spain using Landsat TM images and ground-gathered data. *Remote Sensing of Environment*. 35: 29-35.
- Hanuschak, G.A., Allen, R.D. and Wigton, W.H.:** 1982. Integration of Landsat data in the crop estimation programa of USDA's Statistical Reporting Service. In: *Machine Processing of Remotely Sensed Data Symposium*. Purdue University, West Lafayette, IN. 12 pp.

**Meyer-Roux, J., Fournier, P.H. and Touzelet, M.:** 1983. The remote sensing program of French Agricultural Statistic Service. In: *17 th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor. 12 pp.

**Moran, M.S. and Jackson, R.D.:** 1991. Assessing the spatial distribution of evapotranspiration using remotely sensed inputs. *J. Environ. Qual.* 20: 725-737.

**Pons, X. and Solé, L.:** 1993. A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data. *Remote Sensing Environment*. (en prensa).

**S.E.R.N.:** 1990. *El uso de las imágenes de satélite en el análisis de la distribución espacial de cultivos. Aplicación metodológica en el Bajo Guadalquivir*. Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla. 131 pp.

**Tolosa, M.:** 1990. El cultivo del arroz. *Informaciones técnicas DGPA*. Diputación General de Aragón. Zaragoza. 8 pp.