

ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE AGUA USADO EN UNA ZONA DE RIEGO MEDIANTE UNA IMAGEN DE SATÉLITE E INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

ESTIMATION OF WATER VOLUME USED IN AN IRRIGATION ZONE THROUGH A SATELLITE IMAGE AND COMPLEMENTARY INFORMATION

Martín Bolaños-González¹, Enrique Palacios-Vélez¹, Christopher Scott² y Adolfo Exebio-García¹

¹Especialidad de Postgrado en Hidrociencias. IRENAT. Colegio de Postgraduados. 56230, Montecillo, Estado de México. Tel.: (5) 954 29 77, (martinb72@yahoo.com). ²Instituto Internacional del Manejo del Agua. Plaza del Claustro 457. Colonia Las Plazas. 36620, Irapuato, Guanajuato

RESUMEN

En México alrededor de 2.8 millones de ha (46%) de la superficie con infraestructura para riego corresponde a unidades de riego o pequeña irrigación; sin embargo, debido al gran número de unidades registradas (22 734) (CNA, 1998) no es posible medir y controlar las superficies cultivadas y los volúmenes de agua aplicados en cada una por métodos directos. Por ello, se evaluó una metodología que incorpora el uso de imágenes de satélite *Landsat Thematic Mapper* para estimar superficies cultivadas y, con información complementaria sobre el consumo de los cultivos y los volúmenes de agua aplicados. Esta metodología consistió en tomar muestras en siete unidades de riego del suroeste del estado de Guanajuato, México, para obtener información de campo, la cual se relacionó con la información de la imagen de satélite y se integró un inventario de cultivos. También se usó información complementaria sobre el consumo de agua, para lo cual se midieron las láminas de riego aplicadas a diferentes cultivos y las eficiencias de conducción en siete unidades de riego. Con estos datos se calcularon los volúmenes de agua aplicados. Mediante la clasificación de la imagen de satélite se identificaron once clases, de las cuales cuatro corresponden a cultivos: trigo/cebada (*Triticum aestivum/Hordeum vulgare*) 137 000 ha; hortalizas 84 000 ha; alfalfa (*Medicago sativa*) 41 000 ha y brócoli (*Brassica oleracea*) 152.6 ha. Las láminas de riego aplicadas fueron 0.97 m para trigo/cebada, 0.64 m para hortalizas, 1.10 m para alfalfa y 0.40 m para brócoli. La eficiencia de conducción promedio fue 74.3% y el volumen estimado de agua aplicado fue $3.113 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Palabras clave: Imagen de satélite, unidades de riego.

INTRODUCCIÓN

Mediante instrumentos de teledetección se capta la reflectancia de los objetos, y es posible conocer las características y rasgos de dichos objetos de la superficie terrestre, mediante el estudio de

ABSTRACT

In Mexico about 2.8 million ha (46%) of the total area with irrigation infrastructure corresponds to irrigation units or small irrigation. However, due to the large number of irrigation units registered (22 734) (CNA, 1998), it is not possible to measure and control the cultivated surface and water volumes applied on each one of them by direct methods. Therefore, the objective of the present work was to evaluate a methodology that incorporates the use of satellite images Landsat Thematic Mapper to estimate the cultivated surface, and with complementary information of crops water consumption and water volumes applied to them. In this methodology samples were taken from seven different irrigation units in the southwest zone of Guanajuato State, México, to obtain field information, which was related with information from the satellite image and the result was a crop inventory. Complementary information on crop water consumption was also utilized. To that end, irrigation depths applied to different crops and the conveyance efficiencies in each irrigation unit was measured. This data was used to calculate water volumes applied to crops. Through the classification of the satellite image, eleven classes were identified and four of them are: wheat/barley (*Triticum aestivum/Hordeum vulgare*) 137 000 ha; vegetable crops 84 000 ha; alfalfa (*Medicago sativa*) 41 000 ha and broccoli (*Brassica oleracea*) 152.6 ha. The irrigation depths applied were 0.97 m for wheat/barley, 0.64 m for vegetable crops, 1.10 m for alfalfa and 0.40 m for broccoli. Average conveyance efficiency was 74.3% and water volume applied was $3.113 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Key words: Satellite image, irrigation units.

INTRODUCTION

Remote sensing instruments capture the reflectance of objects, and hence the characteristics and features of the objects in the land surface, throughout the study of both radiation reflected and emitted. A detailed knowledge of the reflectance of an object allows the identification of these characteristics and the discrimination of different land

Recibido: Diciembre, 1999. Aprobado: Diciembre, 2001.

Publicado como ENSAYO en *Agrociencia* 35: 589-597. 2001.

su radiación reflejada, emitida o de ambas. El conocimiento detallado de la reflectancia de un objeto permite identificar sus características de interés y separar tipos de cultivos, bosques y yacimientos minerales (Chuvienco, 1990).

La aplicación más viable y de mayor e interés económico en la agricultura, es la estimación de superficies cultivadas mediante el uso de técnicas convencionales para tomar muestras con técnicas de teledetección espacial. El Servicio de Estadística Agrícola de los Estados Unidos ha aplicado dicha metodología de 1977 a 1988 en ocho estados, con resultados altamente satisfactorios respecto a la oportunidad, precisión y costo de los mismos. En Canadá, Australia, Francia e Italia se han desarrollado experiencias similares que parecen confirmar la validez e idoneidad de dicha metodología (González *et al.*, 1990).

El uso de imágenes de satélite permite detectar las áreas cultivadas en zonas agrícolas, y mediante una calibración con muestreo de campo se relaciona la reflectancia con las características de las áreas cultivadas y regadas. Conociendo la superficie sembrada de los cultivos y las láminas de riego utilizadas en cada uno, se determina el volumen de agua utilizado en el riego, lo cual, aunado a la evaluación de la precisión y oportunidad de la metodología generada, son los objetivos del presente trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La zona donde se realizó el muestreo de campo se ubica en el suroeste del Estado de Guanajuato, entre 20° 20' y 20° 45' N, 101° 20' y 102° 00' O y una altitud promedio de 1 700 m. Dentro de esta zona se eligieron siete unidades de riego para el muestreo de campo, en el cual se midieron las eficiencias de conducción y las láminas de riego aplicadas a los cultivos. El muestreo de campo se hizo de diciembre de 1998 a abril de 1999. En el Cuadro 1 se muestran las principales características de dichas unidades.

Materiales

Para el estudio se usó una imagen de satélite del tipo LANDSAT TM, adquirida el 22 de marzo de 1998, la cual cubre el área de estudio. El procesamiento y clasificación digital de la imagen se realizó con el Sistema de Información Geográfica (SIG) IDRISI V.2.0 para Windows.

Para medir los caudales en cada unidad de riego se utilizó el método de sección y velocidad, para lo cual se usó un molinete digital marca Global Water modelo FP201 para medir las velocidades promedio.

covers such as crops, forest and mineral deposits (Chuvienco, 1990).

The application with major economic interest in agriculture is the estimation of cultivated areas using conventional techniques to take samples in the field, combined with spatial remote sensing techniques. The Agricultural Statistic Service of the United States of America has applied this technology from 1977 to 1988 in eight states, with results highly recommended, regarding opportunity, precision and cost of the method used. In Canada, Australia, France and Italy, similar experiences have been carried out, which seem to validate this methodology (Gonzalez *et al.*, 1990)

The use of satellite images allows the detection of cultivated areas in agricultural zones. The detection is based on the calibration of the reflectance by using field measurements of different crop areas. With the data related to irrigated crop areas and estimates of water depths applied to each crop, the volume of water supplied for irrigations may be calculated. The test of this methodology, by comparing results with official reports about irrigated area and water volume is the main objective of this research.

MATERIALS AND METHODS

Research's site

The study area is located at the Southeast of the State of Guanajuato, between 20° 20' and 20° 45' N, 101° 20' and 102° 00' W, with an average altitude of 1 700 m. Seven irrigation units were selected in this area for the present study. The efficiency of conveyance of water and irrigation depths for different crops was measured. The samples were taken from December 1998 to April 1999. Table 1 displays the main characteristics of those units.

Materials

For this study a LANDSAT TM satellite image acquired on March 22, 1998 was used. The digital image processing and classification were carried out by means of the Geographical Information System (GIS) IDRISI V.2.0 software for Windows.

The method used to measure the volumes of water in each irrigation unit, was by section and velocity using a digital mill (Global Water model FP201) to measure average water speed.

Classification of the satellite image

Previously to image classification, the following procedures were used to facilitate the visual analysis. Contrast adjustment, color compositions, digital filters and the generation of vegetation indices. The digital classification of the image was based on the supervised method, which comprises three phases: Training, assignation and verification.

Cuadro 1. Principales características de las unidades de riego visitadas durante el muestreo de campo.
Table 1. Main characteristics of irrigation units included in the field sampling.

| Unidad | Municipio | Tipo de aprovechamiento | Gasto (lps) [†] | Capacidad de almacenamiento (m ³) | Superficie regada (ha) |
|-----------------|-----------|-------------------------|--------------------------|---|------------------------|
| La Golondrina | Pénjamo | Gravedad | — | 7 150 000 | 560 |
| Mariano Abasolo | Pénjamo | Gravedad | — | 21 000 000 | 2 066 |
| El Aguacate | Cuerámaro | Mixta | — | 3 000 000 | 770 |
| La Alberca | Cuerámaro | Mixta | — | 4 000 000 | 780 |
| Arandas | Irapuato | Bombeo | 199 | — | 203 |
| La Caja | Irapuato | Bombeo | 134 | — | 199 |
| San Fernando | Abasolo | Bombeo | 54 | — | 49 |

Fuente: Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural del Estado de Guanajuato ♦ Source: Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Rural del Estado de Guanajuato.

[†] Litros por segundo ♦ Liters per second.

Clasificación de la imagen de satélite

Antes de la clasificación de la imagen, se realizaron los siguientes procesamientos de tipo digital para facilitar el análisis visual de la misma: ajuste de contraste, composiciones en color, filtrado digital y cálculo de índices de vegetación. El proceso de clasificación de la imagen fue uno de los aspectos más importantes. En el presente trabajo se utilizó el método supervisado, que comprende las fases de entrenamiento, asignación y verificación.

Etapa de entrenamiento

La clasificación digital se inicia definiendo cada una de las categorías que pretenden discriminarse, por lo que es necesario seleccionar una serie de píxeles de la imagen que representen adecuadamente a las clases o categorías de interés. Estas zonas se denominan campos de entrenamiento. Para seleccionar los campos de entrenamiento se realizaron recorridos de campo basados en cartas topográficas del INEGI (1980) a escala 1:50 000 y en composiciones en color verdadero obtenidas de la imagen de satélite, se ubicaron puntos de control dentro de las unidades de riego visitadas, principalmente caminos, carreteras y ríos. Se utilizaron también impresiones del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), para ubicar las parcelas de cultivo identificadas en la imagen.

A partir de los Niveles Digitales (ND) de todos los píxeles incluidos en los campos de entrenamiento asignados a cada clase, se calcularon las estadísticas elementales de cada categoría: media, varianza, desviación típica, y matriz de varianzas y covarianzas. Se utilizaron 40 campos de entrenamiento (24 en clases correspondientes a cultivos), que comprenden 29 954 píxeles.

Etapa de asignación

En esta fase se adscribe cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases previamente seleccionadas. Esta asignación se realiza en función de sus ND para cada una de las bandas que intervienen en el proceso. Para el presente caso fueron seis bandas, ya que de las siete que componen una imagen LANDSAT TM no utilizó la banda

Training stage

Digital classification starts by defining the categories to be discriminated. This is done by selecting a set of pixels from the image that adequately represent the classes or categories of interest. These zones are called training fields. In order to select the training fields, field transects were planned on topographic sheets from INEGI (1980) at a 1:50 000 scale and in the true color composition obtained from the satellite image; control points were located within the irrigation units, identifying rural and paved roads and rivers. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used to locate the parcels of the crop identified in the image.

Based on the Digital Levels (DL) of all the pixels included in the training fields assigned to each one of the classes, basic statistics were calculated for each category: Mean, variance, standard deviation and variance and covariance matrix. Forty training fields were used (24 in classes corresponding to crops), which comprises 29 954 pixels.

Asignation stage

In this stage each one of the pixels in the image was ascribed to one of the classes previously selected. This assignment was done in function of its DN, and for each one of the bands that intervene in the process. For the present case, from the seven bands available in the TM image, only six were used, because band six had a greater spatial resolution (120 m) than the other ones, and also because this band did not have reflective characteristics, since it contains information of the temperature of the soil crust (Scott, 1996).

To carry on the assignment stage, the method used was maximum likelihood, in which the pixel is assigned to class where more likely belongs. Assuming a Normal distribution of data, the probability (P) that a pixel belongs to a specific class is calculated according to equation 1 (Scott, 1996):

$$P = (2\pi)^{-1/2n} |C|^{-1/2} \exp \left[-1/2 \left((X-M)' C^{-1} (X-M) \right) \right] \quad (1)$$

where n = Number of bands; C = Variance and covariance matrix of the class; M = Class' mean; X = Pixel.

seis, por tener una resolución espacial mayor a las demás (120m) y por no tener características reflectivas, ya que ésta contiene información de la temperatura de la cubierta terrestre (Scott, 1996).

Para llevar a cabo la fase de asignación se utilizó el método de máxima verosimilitud, en el cual el pixel se asigna a aquella clase a la que es más probable que pertenezca. Suponiendo que los datos se distribuyen normalmente, la probabilidad (P) de que un pixel pertenezca a una clase dada se calcula de acuerdo con la ecuación 1 (Scott, 1996):

$$P = (2\pi)^{-1/2n} |C|^{-1/2} \exp -[1/2 (|X-M|' C^{-1} |X- M|)] \quad (1)$$

donde n = Número de bandas; C = Matriz de varianzas y covarianzas de la clase; M = Media de clase; X = Pixel.

Etapa de verificación

Para verificar la clasificación obtenida, se hizo un muestreo de campo de diciembre de 1998 a abril de 1999, donde una serie de áreas prueba (polígonos) permitieron obtener una medición independiente de la correspondencia entre el mapa y la realidad. Para el análisis estadístico del muestreo se utilizó la matriz de confusión o matriz error. A partir de la matriz de confusión se calcularon los siguientes índices que miden la precisión de la clasificación obtenida (Chuvieco, 1990): Precisión total: es el cociente del número de pixeles clasificados correctamente dividido por el número total de pixeles en la muestra de control.

Precisión del productor: es el cociente del número de pixeles clasificados correctamente en una clase entre el número total en esa clase, y mide errores de omisión.

Precisión del usuario: es el cociente del número de pixeles clasificados correctamente en una clase, dividido por el número total clasificado en esa clase; y mide también errores de omisión.

Coefficiente Kappa: es un indicador multivariado discreto basado en elementos sobre y fuera de la diagonal de la matriz de errores, ayuda a medir la precisión espacial de la clasificación entera (análoga a la precisión total), y simultáneamente evalúa la precisión de clase individual (análoga a la precisión del productor y del usuario). El coeficiente se calcula generalmente como K para todas las filas r en la matriz, de acuerdo a la ecuación 2 (Scott, 1996):

$$K = \frac{N \sum_{ii} x_{ii} - \sum (xR_i * xC_i)}{N^2 - \sum (xR_i * xC_i)} \quad (2)$$

donde N = Número total de puntos de control; x_{ii} = Número de puntos de control en la fila i , columna i ; xR_i = Total diagonal de la fila i ; xC_i = Total diagonal de la columna i ; r = Filas de la matriz.

Para evaluar la clasificación se utilizaron 41 polígonos que corresponden a 23 511 pixeles.

Estimación de eficiencias de aplicación

Esta eficiencia mide la cantidad de agua que queda disponible para los cultivos en relación con la aplicada a las parcelas. La eficiencia de aplicación (Ea) se calculó utilizando la ecuación 3.

Verification stage

In order to verify the classification obtained, a field sampling was done from December 1998 to April 1999, where a series of training fields (polygons) allowed the obtention of an independent measure of the relationship between the map and the reality. For the statistical analysis of the sample the confusion or error matrix was used. From the confusion matrix the following indices that measure the precision of the obtained classification (Chuvieco, 1990) were calculated:

Total Precision: Is the quotient of the number of pixels correctly classified divided by the total numbers of pixels in the control sample.

Precision of the producer: is the quotient of the number of pixels correctly classified in a class divided by the total number in that class, and it measures omission errors.

Users' precision: It is the quotient of the number of pixels correctly classified in a class, divided by the total number classified in that class; it measures also omission errors.

Kappa Coefficient: is a multivariate discrete indicator based on elements over and out of the diagonal of the error's matrix, which guides the measurements of the spatial precision of the whole classification (it is analog to the total precision) Usually the coefficient is calculated as K for all the lines r in the matrix, according to equation 2 (Scott, 1996):

$$K = \frac{N \sum_{ii} x_{ii} - \sum (xR_i * xC_i)}{N^2 - \sum (xR_i * xC_i)} \quad (2)$$

where N = Total number of control points, x_{ii} = Number of control points in row i , column i ; xR_i = Total in diagonal row i ; xC_i = Total in diagonal column i ; r = Number of matrix's rows.

In order to evaluate the classification 41 polygons were used; they correspond to 23,511 pixels.

Estimation of application efficiency

This efficiency measures the amount of water available for the crops in relation to the water applied to the parcels. The application efficiency (Ea) was calculated with equation 3:

$$Ea = (Lrr/Lra)*100, \quad (3)$$

if $Lra > Lrr$, where Ea = Application efficiency (%), Lrr = Required irrigation depth (L) an Lra = Applied irrigation depth (L).

When $Lrr > Lra$, $Ea > 100\%$, which means that the crop requires a larger quantity of water than the applied; and consequently presents an hydric deficit.

Applied water depths

To estimate water depths applied to each crop, water level records were made at the entrance of each parcel in order to estimate the flows

$$Ea = (Lrr/Lra) * 100, \quad (3)$$

si $Lra > Lrr$, donde Ea = Eficiencia de aplicación (%); Lrr = Lámina de riego requerida, (L); Lra = Lámina de riego aplicada (L).

Cuando $Lrr > Lra$, $Ea > 100\%$, lo que significa que el cultivo requiere una mayor cantidad de agua que la aplicada, por lo que presenta déficit hídrico.

Láminas de riego aplicadas

Para estimar las láminas de riego aplicadas se realizaron aforos a la entrada de las parcelas determinando el gasto utilizado para regar la superficie y el cultivo en cuestión. El gasto se midió por el método de sección y velocidad. Por otra parte se tomó el dato de tiempo de riego, y suponiendo que el gasto no varía a través del tiempo, se puede calcular el volumen de agua aplicado con la ecuación

$$VA = Tr \cdot Q \quad (4)$$

donde VA = Volumen de agua aplicado (L^3); Tr = Tiempo de riego (T); Q = Gasto que ingresa la parcela ($L^3 T^{-1}$).

La lámina de riego aplicada se obtiene utilizando la ecuación

$$Lra = VA/S \quad (5)$$

donde Lra = Lámina de riego aplicada (L); S = Superficie regada (L^2).

Se midieron 46 láminas de riego en las unidades incluidas en el muestreo de campo. El cultivo en el que se midió el mayor número fue el trigo, debido fundamentalmente a que en el ciclo otoño-invierno es el principal cultivo en la zona de muestreo. El segundo cultivo en importancia es la alfalfa, para el cual se midieron siete láminas.

Láminas de riego requeridas

Para estimar la lámina de riego requerida se utilizaron datos de la estación meteorológica de Irapuato, Guanajuato, y fueron analizados con el Software Cropwat 5.7 que utiliza el método de Penman-Monteith para el cálculo de evapotranspiración potencial (ET_p) (FAO, 1992).

Estimación de las eficiencias de conducción

Las eficiencias de conducción (Ec) se definen como las relaciones existentes entre el gasto o volumen entregado por la fuente de abastecimiento y el gasto o volumen recibido a la entrada de las parcelas de riego, por lo que para estimarlas se aforó en ambos puntos. La Ec se obtuvo mediante la ecuación

$$Ec = (Qr/Qs) 100 \quad (6)$$

donde Ec = Eficiencia de conducción (%); Qs = Gasto a la salida de la fuente de abastecimiento ($L^3 T^{-1}$); Qr = Gasto recibido en la entrada de las parcelas ($L^3 T^{-1}$).

required to irrigate each parcel. The flow was measured with the method of section and speed. Also, the time used for irrigation of each parcel was taken, and supposing that flow does not change with time, the volume of water applied was calculated with the equation:

$$VA = Tr \cdot Q \quad (4)$$

where VA = Volume of supplied water (L^3); Tr = Irrigation time (T); Q = flow at the entrance of the parcel

The irrigation depth supplied was estimated with the equation:

$$Lra = VA/S \quad (5)$$

where Lra = Irrigation depth supplied (L); S = Irrigated surface (L^2).

Forty-six irrigation depths were measured in the units selected for field sampling. The crop with more measurements was wheat. This was because wheat is the main crop during the cycle Spring-Summer in the sampled area. Alfalfa is the second most important crop, for which seven measurements were made.

Required irrigation depths

To estimate the required irrigation depths, climatic data from the meteorological station of Irapuato, Guanajuato were used. Data were analyzed using Software CROPWAT 5.7 which uses the Penman Monteith method to calculate potential evapotranspiration (ET_p) (FAO, 1992).

Estimation of conveyances' efficiencies

Conveyance's efficiencies (Ec) are defined as the relations between the flow or volume served supplied from the source of supply and the flow or volume received at the entrance of the irrigated parcel, and for that reason, to estimate them, water level was registered in both places. Ec was obtained using the equation:

$$Ec = (Qr/Qs) 100 \quad (6)$$

where Ec = Conveyance efficiency (%); Qs = flow from the source of supply ($L^3 T^{-1}$), Qr = flow in the parcel ($L^3 T^{-1}$).

Estimation of water applied volumes

Based on the average water depths applied to crops and conveyance and application efficiency, as well as the irrigated areas evaluated by remote sensing, the volumes of water for irrigation supplied to each crop were estimated by the multiplication of these two numbers, and, later, the total amount of water used for irrigation was calculated

RESULTS AND DISCUSSION

Satellite's image classification

In accordance with the distribution of the reflectance values and digital numbers (DN) of the satellite image,

Estimación de los volúmenes de agua aplicados

Con base en las láminas de riego aplicadas y las eficiencias de conducción medidas, se estimaron las láminas de riego extraídas de las fuentes de abastecimiento. Con este dato y las superficies de los cultivos identificados en el área que abarca la imagen de satélite, producto de la clasificación, se estimaron los volúmenes de riego aplicados a cada cultivo multiplicando ambos datos y, posteriormente, el total de agua utilizada en el riego.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación de la imagen de satélite

De acuerdo con la distribución de los valores de reflectancia, los niveles digitales (ND) presentes en la imagen utilizada permitieron detectar y diferenciar 13 clases espectrales, con las cuales se llevaron a cabo tres clasificaciones utilizando diferentes opciones que proporciona el *Software* IDRISI. Posteriormente, mediante una reclasificación, se compactaron las 13 clases espectrales en 11 clases temáticas y se aplicó un filtro digital de 3x3 basado en la mediana, el cual toma en cuenta el valor asignado al pixel central y a sus ocho pixeles vecinos. Con estos datos calcula el valor de la mediana y se lo asigna al pixel central. Este filtro se utilizó para homogeneizar las clasificaciones resultantes. De las tres clasificaciones se seleccionó la que mayor precisión de usuario y productor proporcionó en las clases correspondientes a cultivos. Los resultados de las superficies obtenidas para esta clasificación se muestran en el Cuadro 2.

Evaluación de la clasificación

Los resultados de la evaluación se presentan en el Cuadro 3.

Tanto la precisión total como el coeficiente Kappa son mayores de 80%, lo que indica una alta confiabilidad de los resultados obtenidos (Scott, 1996). Respecto a la precisión del productor, en las clases correspondientes a cultivos, fue mayor de 95% en todos los casos y la precisión de usuario mayor de 85% excepto para brócoli.

Láminas de riego aplicadas

Para las láminas de riego aplicadas en trigo se obtuvo un coeficiente de variación alto (48%); esto se debe fundamentalmente a que las condiciones de las zonas de riego donde se realizó el muestreo de campo son muy variables. El factor que más influye en la variabilidad de las láminas de riego aplicadas es el relieve del terreno, por lo que en las parcelas donde se han nivelado las tierras y cuentan con pendientes adecuadas para riego, las láminas aplicadas son menores (15 a 20 cm); en cambio, en las

13 spectral classes were detected and differentiated. Based on these classes three classifications were made using the three classification's options available in IDRISI. Afterwards, using the reclassification function, the 13 spectral classes were reduced to 11 thematic classes. The reclassification was done using a digital filter 3x3 based on the median which uses the value allocated to the central pixel and the eight neighboring ones. With these data the median's value is calculated and assigned to the central pixel. This filter was used to homogenize the resultant classifications. Of the three classifications, the one with best usability and producer's precision error was chosen. The results for the obtained areas in the three classifications are shown in table 2.

Classification's evaluation

The results of the evaluation are shown in table 3.

Total precision, as well as Kappa's coefficient are over 80%, which indicates a high reliability of the obtained results (Scott, 1996). In relation with the precision of the producer in the classes corresponding to crops, the value was over 95% in all cases, and user's precision was over 85%, except for Broccoli.

Applied irrigation depths

Applied irrigation depths for wheat had a high variance coefficient (48%). This is mainly due to the conditions of irrigation in the sampled area. The most influencing factor on the variability of the irrigation depths applied is the relief of the terrain. In parcels that have been leveled and hence have adequate slope gradients irrigation's depths were low (15 to 20 cm); in contrast, in parcels with irregular relief irrigation depths increased twice or more.

Cuadro 2. Superficies clasificadas.

Table 2. Classified surfaces.

| Identificador | Clase | Superficie (ha) |
|---------------|----------------|-----------------|
| 0 | Sin clasificar | 620 400 |
| 1 | Agua | 6 445 |
| 2 | Urbano | 242 725 |
| 3 | Suelo desnudo | 6 363 |
| 4 | Matorral | 1 476 793 |
| 5 | Mezquital | 235 873 |
| 6 | Bosque | 199 291 |
| 7 | Baldío | 96 470 |
| 8 | Trigo/cebada | 136 837 |
| 9 | Hortalizas | 84 401 |
| 10 | Alfalfa | 41 056 |
| 11 | Brócoli | 152 |
| Total | | 3 146 808 |

Cuadro 3. Matriz error de la clasificación.**Table 3. Classification's error matrix.**

| Clase | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | Total | PU |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|--------|
| 0 | 0 | 133 | 21 | 0 | 33 | 203 | 0 | 16 | 11 | 19 | 12 | 448 | |
| 1 | 2990 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2990 | 1.000 |
| 2 | 0 | 1582 | 2120 | 66 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3768 | 0.420 |
| 3 | 0 | 0 | 1618 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1618 | 1.000 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 5837 | 2 | 62 | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5918 | 0.986 |
| 5 | 0 | 0 | 119 | 0 | 1730 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1850 | 0.935 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4460 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 4463 | 0.999 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 211 | 0 | 0 | 1 | 0 | 212 | 0.995 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1572 | 0 | 2 | 0 | 1574 | 0.999 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 0 | 453 | 2 | 0 | 472 | 0.960 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 156 | 0 | 157 | 0.994 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 41 | 41 | 1.000 |
| Total | 2990 | 1715 | 3878 | 5903 | 1765 | 4725 | 245 | 1588 | 468 | 181 | 53 | 23511 | |
| PP | 1.000 | 0.922 | 0.417 | 0.989 | 0.980 | 0.944 | 0.861 | 0.990 | 0.968 | 0.862 | 0.774 | PT=0.878 | K=0.85 |

Nota: Los identificadores para cada clase son los que aparecen en el Cuadro 2 ♦ Identifiers for each class are those shown in Table 2.

PU = Precisión del usuario ♦ Usuary's precision.

PP = Precisión del productor ♦ Producers' precision.

PT = Precisión total ♦ Total precision.

K = Coeficiente Kappa ♦ Kappa coefficient.

parcelas con relieve irregular éstas se incrementan al doble o más.

En alfalfa se midieron láminas de riego únicamente en la Unidad de Riego Arandas, ya que fue la única en que se encontró establecido este cultivo al momento de realizar el muestreo, por lo que las láminas analizadas presentan poca variabilidad (coeficiente de variación de 9%), como consecuencia de las condiciones similares tanto de las parcelas como de las prácticas de riego. Por lo tanto los datos obtenidos para el cultivo de alfalfa deben ser tomados con reserva, ya que son representativos únicamente para la unidad de riego antes mencionada.

Puesto que para los demás cultivos se cuenta con pocos datos, no fue posible realizar un análisis estadístico confiable, por lo que para estimar las láminas de riego aplicadas a cada uno se calculó sólo un promedio de los datos disponibles. En el Cuadro 4 se muestran las láminas promedio aplicadas por riego (LPAR), el número de riegos (NR) y las láminas aplicadas por ciclo agrícola (LAC).

Láminas de riego requeridas y eficiencias de aplicación

En el Cuadro 5 se muestran las láminas de riego requeridas y aplicadas, así como las Ea calculadas para los principales cultivos.

Eficiencia de conducción

Se calcularon 20 eficiencias de conducción en cinco unidades de riego, obteniendo una eficiencia media de conducción de 74.3%, la cual se consideró como

Irrigation's depths in alfalfa were measured only for Arandas' Irrigation Unit, because it was the only one in which this crop was established during the sampling period. For this reason, irrigation's depths analyzed in the present study show small variability (variation coefficient=9%). This low variance is a result of the similar conditions in both, parcels and irrigation practices. Hence, the data obtained for this crop should be taken with caution, since are representative only of Aranda's irrigation area.

Due to the limited amount of information available for other crops, a statistical analysis with an acceptable level of confidence was not possible. In consequence, the estimation of the irrigation depths was made with the mean of the available data. Table 4 shows the average of the irrigation depths supplied by irrigation event (LPAR), the number of irrigations (NR) and irrigation's depths applied during the year (LAC).

Required irrigation depths and application efficiency

Table 5 shows the required irrigation depths and the EA estimated for the main crops.

Conveyance efficiency

Twenty conveyance efficiencies were estimated for five irrigation units. The mean of these efficiencies was 74.3%, which was considered representative for all the cultivated area included in the satellite image.

The conveyance efficiencies in the irrigation units are, in general, higher than those observed in other areas. In

Cuadro 4. Láminas de riego aplicadas por ciclo agrícola.
Table 4. Applied water depth per agricultural cycle.

| Cultivo | LPAR m | NR | LAC m |
|---|-----------|----|----------|
| Trigo (<i>Triticum aestivum</i>) | 0.242 | 4 | 0.97 |
| Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>) | 0.091 | 12 | 1.10 |
| Garbanzo (<i>Cicer arietinum</i>) | 0.208 | 1 | 0.21 |
| Fresa (<i>Fragaria</i> spp) | 0.040 | 36 | 1.45 |
| Tomate (<i>Physalis</i> spp) | 0.158 | 5 | 0.79 |
| Jitomate (<i>Lycopersicum esculentum</i>) | 0.105 | 5 | 0.53 |
| Cebolla (<i>Allium cepa</i>) | 0.074 | 6 | 0.45 |
| Brócoli (<i>Brassica oleracea</i>) | 0.101 | 4 | 0.40 |
| Espárrago (<i>Asparagus officinalis</i>) | 0.277 | 3 | 0.83 |
| Maíz (<i>Zea mays</i>) | 0.104 | 7 | 0.73 |
| Ejote (<i>Phaseolus vulgaris</i>) | 0.116 | 4 | 0.46 |
| Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>) | 0.126 | 3 | 0.38 |

representativa para toda la superficie cultivada incluida en la imagen de satélite.

Las eficiencias de conducción en las unidades de riego son superiores, en general, a las registradas en otras zonas (en los distritos de riego del país la eficiencia de conducción promedio es del orden de 60%); (Palacios, 1994). Esto obedece fundamentalmente a que las longitudes de conducción y volúmenes de agua manejados en éstas son pequeños comparados con las longitudes y volúmenes manejados en otros distritos de riego, por lo que las pérdidas por infiltración y operación son menores, comparadas con las de las grandes zonas de riego. No obstante, las pérdidas medidas en las unidades estudiadas son de consideración.

Volúmenes de agua extraídos

Debido a que al clasificar la imagen de satélite únicamente fue posible discriminar los cultivos en cuatro clases (trigo/cebada, alfalfa, brócoli y hortalizas varias) pero con las muestras de campo se localizó un mayor número de cultivos y se realizó un ajuste para que ambas coincidieran. Los volúmenes de agua utilizados en el riego de la clase hortalizas se calcularon por el promedio de todos los cultivos encontrados en las muestras de campo, excepto trigo, alfalfa y brócoli, que pertenecen a clases separadas previamente. En el Cuadro 6 se muestran los resultados de la estimación de los volúmenes de riego aplicados a los cultivos existentes en el área comprendida en la imagen de satélite.

CONCLUSIONES

La información de campo obtenida mediante muestras en el estudio, es poco representativa para extrapolarla a más de 3 millones de hectáreas, por lo que los resultados son preliminares y deben afinarse cuando se disponga de

Cuadro 5. Eficiencias de aplicación.
Table 5. Application's efficiencies.

| Cultivo | Lrr (cm) | Lra (cm) | Ea (%) |
|----------|----------|----------|-----------------|
| Trigo | 47.56 | 97 | 49 |
| Alfalfa | 117.97 | 110 | 93 [†] |
| Jitomate | 47.08 | 53 | 88 |
| Cebolla | 41.93 | 45 | 93 |
| Maíz | 59.92 | 73 | 82 |

[†] Para este cultivo el dato representa la eficiencia de requerimiento, puesto que $Lrr > Lra$. ♦ For this crop data represent requirement efficiency, since $Lrr > Lra$.

irrigation districts throughout the country, the average conveyance efficiency is around 60%, (Palacios, 1994). This is mainly due to the length of the canals and the volume of water used in the irrigation units considered in this research, which are smaller to the ones in large irrigation districts. In small irrigation areas the infiltration and operational losses are smaller than in the larger irrigation zones. Notwithstanding, the measured losses in the irrigation units included in this study are considerable.

Withdrawn water volumes

The classification of the satellite image was limited to only four classes of crops (wheat/Barley, Alfalfa, broccoli and diverse vegetables). However, using field samples, several other crops were located and the data was adjusted to have similar sets of data. Water volumes used for the irrigation of the vegetable class, was estimated by the average depth of water applied to the crops found in the field samples (excepting wheat, alfalfa and broccoli that belongs to classes separated previously). Table 6 shows the estimated applied irrigation volumes for crops in the area included in the satellite image.

CONCLUSIONS

The field data obtained from the samples in this study are not representative enough to be extrapolated to more than 3 million ha, and consequently the results of this research are preliminary and should be refined when more information becomes available. The central point in this

Cuadro 6. Volúmenes de riego.
Table 6. Irrigation's volumes.

| Cultivo | Superficie, ha | Lámina aplicada, m | Lámina extraída, m | Volumen, m ³ |
|------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Trigo | 136 837 | 0.97 | 1.30 | 1 778 879 570 |
| Hortalizas | 84 401 | 0.64 | 0.86 | 725 846 450 |
| Alfalfa | 41 056 | 1.10 | 1.48 | 607 639 160 |
| Brócoli | 152 | 0.40 | 0.53 | 808 780 |
| Total | 262 446 | | | 3 113 173 960 |

mayor información. Lo importante de este estudio es que se ha aplicado una metodología práctica y económica que incorpora técnicas de sensores remotos y sistemas de información geográfica para estimar superficies cultivadas y volúmenes de agua utilizados con precisión aceptable y oportunidad en el riego de cultivos. Los resultados son congruentes con los obtenidos por otros métodos, principalmente con los que usan muestras de eficiencias de riego y censos agrícolas (Palacios, 1994).

study is the use of a practical and economic methodology, which includes remote sensing and geographical information systems to estimate irrigated areas and water volumes used, with acceptable precision and opportunity in the irrigation of crops. The results are compatible with the ones obtained by other methods; mainly with those that use field samples of efficiency in irrigated crops, or agricultural census (Palacios, 1994).

—End of the English version—

LITERATURA CITADA

CNA, (Comisión Nacional del Agua). 1998. Unidades de riego organizadas, resumen nacional, Montecillo, México. pp. 1-2.
 Chuvieco, S. E. 1990. Fundamentos de la Teledetección Espacial. Ediciones Rialp. Madrid, España. 427 p.
 FAO (Organización para la Agricultura y Alimentación). 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Roma, Italia. pp: 1-10.
 González A.F., S. S. López y G. J. Cuevas. 1990. Influencia de la información contenida en imágenes de satélite sobre la precisión de la estimación de la superficie cultivada de cereal en una zona piloto de la comunidad autónoma de Navarra. Madrid, España. pp: 1-10.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1980. Cartas topográficas F14C62, F14C71 y F14C72, escala 1:50000. México, D.F.
 Palacios V., E. 1994. Métodos de distribución y eficiencias en el uso del agua en los sistemas de riego. Diplomado en diagnóstico, planeación, uso eficiente del agua y la energía eléctrica y mejoramiento de las URDERAL. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp: 1-15.
 Scott, A.Ch. 1996. Hydrologic land use classification with thematic and spatial inputs. American Water Resources Association. New York U.S.A. pp:3-6.

