

## Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: a case study in the Ésera—Isábena watershed, central Spanish Pyrenees, with WATEM/SEDEM

L.C. Alatorre <sup>(1)</sup>, S. Beguería <sup>(2)</sup> and J.M. García-Ruiz <sup>(1)</sup>

(1) Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Campus de Aula Dei, Apdo 202, 50080 Zaragoza, España. e-mail: lalatorre@ipe.csic.es

(2) Estación Experimental de Aula Dei, CSIC, Av. Montañana, 1005, 50059, Zaragoza, España.

### ABSTRACT

Soil erosion and sediment delivery to streams is an important environmental problem and a major concern for sustainable development. The spatial nature of soil erosion and sediment delivery, as well as the variety of possible soil conservation and sediment control measures, require an integrated approach to catchment management. A spatially-distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) was applied to the watershed of the Barasona Reservoir (1504 km<sup>2</sup>; central Spanish Pyrenees), which is drained by the Ésera and Isábena rivers. Several input data layers with a 20 x 20 m resolution were derived using a GIS package comprising a digital terrain model (DTM), and stream network, land use, rainfall erosivity, soil erodibility and crop management factors. Validation of the model was based on the depositional history of the Barasona Reservoir using data on suspended sediment obtained over three years (May 2005 to May 2008) at the outlet of the Isábena River. This enabled estimation of the average annual sediment yield to the reservoir, as well as the relative contribution of each river. Almost 70% of the sediment yield to the reservoir was derived from the Ésera River, which coincided with the relative size of its sub-catchment. Large spatial variability in hillslope sediment delivery was found within the catchment, with major sediment sources being located in the lower part of the watershed (agricultural fields), and in the badlands on Eocene marls located in the middle part of the watershed (Pyrenean Inner Ranges), which are strongly eroded over convex hillsides with a moderately inclined slope.

**Key words:** badlands, marls, regolith, statistical sensitivity and specificity.

### INTRODUCTION

Soil erosion and sediment yield to streams are counted between the geomorphology processes of greater potential risk, because they affect to a great superficial, and they are recognized like a key question for the conservation of environment in the century XXI. Global estimates indicate that one-sixth of land in the world is affected by accelerated water erosion. In a continuously globalizing world human activities have an increasingly important impact on the environment and global change. The main objective of this paper is the validation and performance of a simplified spatially distributed sediment yield model in mountain catchments. The validation of the model has been performed by means of the depositional history of the Barasona reservoir and the short-term by means of 3-years (May 2005 to May 2008) of suspended sediment gauged in Capella station (outlet of Isábena river basin), this dates were used to calculate long term sediment yield for the whole period of the Barasona reservoir (1955 to 2008).

### STUDY AREA

Barasona Watershed is drained by two major rivers: Ésera and its major tributary, Isábena (Fig. 1). Both catchments occupy a surface of 1504 km<sup>2</sup> (1066 km<sup>2</sup> and 438 km<sup>2</sup>, respectively), are localized in the Central Spanish Pyrenees and belong to the Ebro basin (fig. 1). The Barasona reservoir was built in 1932 for irrigation purposes and power generation (Fig. 1). The initial water capacity was 71 hm<sup>3</sup>. A seismic survey in 1995 indicated that the reservoir had lost about one third of its initial water storage capacity, the volume of

accumulated sediment in the reservoir was about 16–18 hm<sup>3</sup>, with a maximum thickness of 20–25 m near the dam wall (Sanz Montero et al., 1996). The principal characteristics of study area can see in the figure 2.

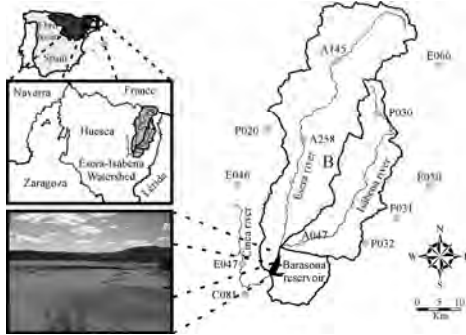


Figure 1. Location of the study area: Barasona watershed; rain gauge stations; Capella flow gauge station (A047); and a photograph showing silting of the Barasona Reservoir.

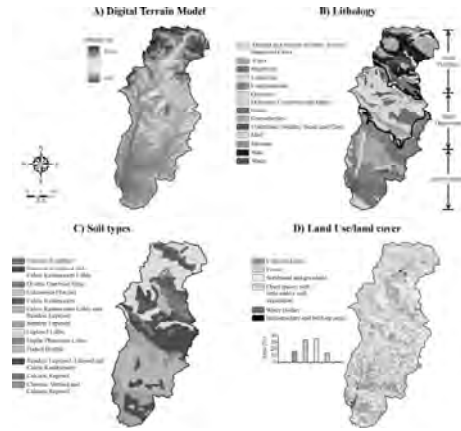


Figure 2. Description of the study area: A) digital terrain model (DTM); B) lithologic map (DGA, 2006) and structural geomorphologic units of the Ésera—Isábena watershed; C) soil types; and D) land use map derived from CORINE (2000) land cover data.

**DATA AND METHODS**

WATEM/SEDEM is a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model, which we used to estimate the flux of sediment from the hillslopes to the Ésera—Isábena watershed river network. A detailed description of the model can be revised in Van Oost et al. (2000), Van Rompey et al. (2001) and Verstraeten et al. (2002). The input data layers generated are: a digital terrain model (DTM), a new drainage network derived from DTM with 1 km<sup>2</sup> area threshold, land use map derived from CORINE (CLC,2000) Land Cover data, rainfall erosivity map (R-factor in RUSLE), soil erodibility map (K-factor in RUSLE) and the crop management map (C-factor in RUSLE). For this study we used a spatial resolution of 20 x 20 m. The calibration of the model for Ésera—Isábena watershed has been performed by means of three years (May 2005 to May 2008) record of suspended sediment gauged at Capella flow gauge station, outlet of the Isábena river (Table 1), and using the mean observed rainfall erosivity factor (R-factor) for each one of the years. These dates were used to calculate the annual sediment yield that produce Isábena river, conserving the same ratio between the two transport capacity coefficient values (i.e. ktcmax/ktcmin = 3.33), and changed the value of both parameters jointly.

Table 1. Average annual sediment delivery data for the Ésera and Isábena basins.

Drainage basin	Size (km <sup>2</sup> )	Observed period (y)	Obs. Method*	SY (Mg yr <sup>-1</sup> )	SSY (Mg km <sup>-2</sup> yr <sup>-1</sup> )
Ésera-Isábena (1932-1996)	1504	64	WD	-	350
Isábena (May 2005 to May 2006)	438	1	GS	90,410	203
Isábena ((May 2006 to May 2007)	438	1	GS	250,290	562
Isábena ((May 2007 to May 2008)	438	1	GS	212,070	477

\*Observation method: WD: measurement of water depths in the Barasona Reservoir in 1996 (Sanz Montero et al., 1996); GS: measurement at the gauge station in the Isábena River (López-Tarazón et al., 2009). SY: sediment yield (Mg yr<sup>-1</sup>); SSY: average annual area-specific sediment yield (Mg km<sup>-2</sup> yr<sup>-1</sup>).



Figure 3. Map of predicted sediment delivery from hillslopes to the stream network in the Ésera—Isábena watershed, and principal sediment sources: A) predicted SY and SSY for the entire study area; B) Axial Pyrenees; C) Inner Depression (badlands on Eocene marls); and D) pre-Pyrenean sector (dryland crops).

## RESULTS

WATEM/SEDEM predicts that the total hillslope SY to all river channels for Ésera—Isábena watershed is of  $0.56 \times 10^6 \text{ Mg y}^{-1}$ . The predicted SSY and SSY values for the whole period were very close to that inferred from the bathymetrical record in the Barasona reservoir ( $\text{SSY} = 350 \text{ Mg km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ ) (Sanz Montero et al., 1996). This is a relevant result because it validates the calibration performed using only three year long data series, representing only a sub-catchment of the whole area. In order to analyze the Sediment Delivery Ratio ( $\text{SDR} = \text{SY}/\text{Gross erosion rate}$ ) for Ésera—Isábena watershed we calculated gross soil erosion rate (RUSLE-2D;  $\text{Mg y}^{-1}$ ) as the sum of netto soil from the whole study area (total sediment production). The predicted SDR value in the outlet of the watershed is approximately of the 10%. This is a high value, but not extreme. A visual identification showed that the principal sediment sources are situated in the low part (fields under dryland crops) and in the badlands on Eocene marls situated in the middle part (Inner Depression) strongly eroded over convex hillsides with a moderately inclined slope (Fig. 3 A, for moor details see, B, C and D). For more details the principal sediment sources for land uses / land cover were analyzed (CLC, 2000). The principal sediment sources were only four categories: the areas of badlands (CARCA), dryland crops (CUSEC), scrubland in sparse coniferous forest (MTBOP), and bare soil (SUDES), with SY values ranging between 49,000 to 86,000  $\text{Mg y}^{-1}$ , accounting for approximately 55% of the total SY in the watershed (Fig. 4). A total of 23 sub-catchments in the Barasona reservoir, corresponding to the main rivers and tributaries, were also analyzed (Fig. 5). The head sub-catchments in the Axial Pyrenees had the lowest values of SY, with an average of 7,200  $\text{Mg y}^{-1}$  ( $s = \pm 6,800 \text{ Mg y}^{-1}$ ). In second place are the sub-catchments in the Inner Depression, with an average of 30,900  $\text{Mg y}^{-1}$  ( $s = \pm 16,200 \text{ Mg y}^{-1}$ ). It is in this sector where the badlands on Eocene marls are located. Finally, the sub-catchments in the pre-Pyrenean sector showed highest values of SY, with an average of 46,450  $\text{Mg y}^{-1}$  ( $s = \pm 29,000 \text{ Mg y}^{-1}$ ). In this sector the largest extensions of dryland crops are located. Finally, the plots of SDR versus catchments area, after separate between the different structural geomorphologic units, show that the sub-catchments of Inner Depression and pre-Pyrenean sector have the best correlations, since WATEM/SEDEM explained the 80% and 72% of the variance predicted. The sub-catchments of Axial Pyrenees only explained 52% of the variance (Fig. 6).

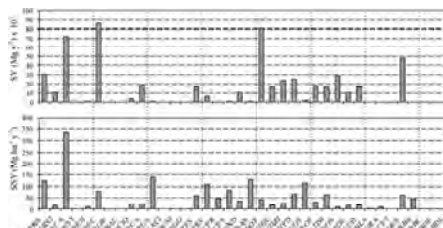


Figure 4. Sediment sources in the Ésera—Isábena watershed, for land uses / land cover (see text, CLC, 2000).

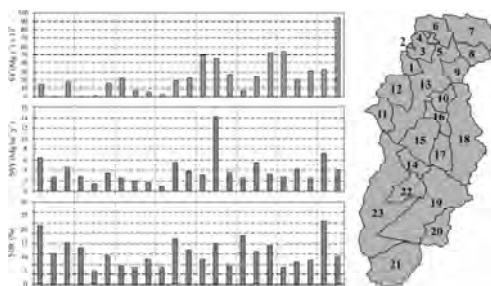


Figure 5. Sediment sources in the Ésera—Isábena watershed, for sub-catchments.

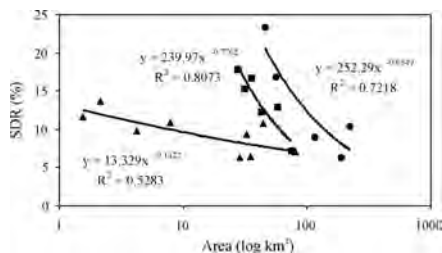


Figure 6. Changes in the sediment delivery ratio throughout the Ésera—Isábena watershed: sub-catchments in the Axial Pyrenees (triangles); sub-catchments in the Inner Depression (squares); sub-catchments in the pre-Pyrenean sector (circles).

## CONCLUSIONS

In this study, sediment yield data derived from depositional history of the Barasona reservoir ( $SSY = 350 \text{ Mg km}^{-2} \text{ y}^{-1}$ ) and three years (May 2005 to May 2008) of suspended sediment gauged in Capella station (outlet of Isábena river basin) were used to calibrate the spatially distributed soil erosion and sediment delivery model, WATEM/SEDEM. It can be concluded that a rather simple model with only elementary process descriptions can be used to predict the sediment delivery by surface runoff from hillslopes to rivers at regional scales with an acceptable accuracy. It should be kept in mind that model parameterization is scale-dependent or in other areas. Therefore the parameters have to be recalibrated if the model is run on another grid-size or other regions.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was financially supported by the projects “Processes and sediment balances at different spatial scales in Mediterranean environments: Effects of climate fluctuations and land use changes” (CGL2006-11619/HID) and “Soil erosion and the Carbon dynamics in Mediterranean agro-ecosystems: radioisotopic modeling at several spatial and temporal scales” (CGL2008-00831/BTE), funded by CICYT, Spanish Ministry of Education and Science. The contribution of the first author has been possible thanks to a scholarship granted by The National Council for Science and Technology of México (CONACYT).

## REFERENCES

- ❖ Alatorre, L.C., Beguería, S. & García-Ruiz, J.M., in prep. Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: a case study in the Barasona reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *Journal of Hydrology*.
- ❖ López-Tarazón, J.A., Batalla, R.J., Vericat, D. & Francke T. 2009. Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: the river Isábena (Central Pyrenees). *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph.2009.03.003.
- ❖ Sanz-Montero, M., Cobo-Rayán, R., Avendaño-Salas, C. & Gómez-Montaña, J. 1996. *Influence of the drainage basin area on the sediment yield to Spanish reservoirs*. In: Proceedings of the First European Conference and Trace Exposition on Control Erosion.
- ❖ Van Oost, K., Govers, G. & Desmet, P.J.J. 2000. Evaluating the effects of landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15 (6), 579–591.
- ❖ Van Rompaey, A.J.J., Verstraeten, G., Van Oost, K., Govers, G. & Poesen, J. 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1221–1236.
- ❖ Verstraeten, G., Van Oost, K., Van Rompaey, A., Poesen, J. & Govers, G. 2002. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management* 18, 386–394.

## Análisis espacio-temporal de los cambios de usos del suelo en la Cuenca del Río Segura

F. Alonso Sarría, F. Gomariz Castillo, F. Cánovas García, J. Moreno Brotóns

Instituto del Agua y Medio Ambiente, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, 30.001 Murcia (España). E-mail: fgomariz@um.es

### ABSTRACT

Land use change is a dynamic process that affects heavily to different environmental processes. In this work, a GIS application is designed to analyse land use changes from landsat imagery since 1976 to 2007, a period with important socioeconomic and land use changes in River Segura Basin.

This work describes the methodology used to obtain a yearly series of land cover maps of the Demarcación Hidrográfica del Segura (River Segura basin in South East Spain). In order to analyze this great amount of information for a large (more than 18,000 km<sup>2</sup>) and heterogeneous area, a unified methodology has been developed.

It has been used a supervised classification improved by a previous not supervised classification using both spectral (4 or 6 landsat solar spectrum bands depending on the sensor available, MSS or TM, ETM) and two textural variables. The last ones were obtained estimating the semivariogram frunction from the albedo and NDVI layers. Having used two images from different seasons, the total number of variables included in the classification is 12 or 16 depending on the year.

Preliminary results show a reduction of the surfaces with traditional dry crop uses and the important increase of irrigation lands during the first half of the 1980s decade. The increase in bare soil areas also reflects the abandonment of traditional crops. Finally, it has been observed an increase in urban areas attributable to demographic trends.

**Palabras clave:** Teledetección, Cuenca del Segura, Landsat, Sistemas de Información Geográfica.

### LOCALIZACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

La Cuenca del Segura, con una extensión de unos 19000km<sup>2</sup> (el 3,7% del territorio español), se encuentra ubicada en el Sureste de la Península Ibérica, incluyendo totalmente a la Región de Murcia y en parte a Andalucía, Comunidad Valenciana y Castilla-La Mancha.

Esta Cuenca se divide a su vez en 49 grandes subunidades hidrográficas (subzonas hidráulicas de la Demarcación Hidrográfica) que actúan para el presente trabajo como una de las unidades de estudio temporal fundamental.



Figura 1. Localización y emplazamiento. Subzonas Hidráulicas CHS.

**METODOS: TRATAMIENTO MEDIANTE TELEDETECCIÓN DE LOS DATOS**

**Georreferenciación y corrección geométrica**

Para la georreferenciación, considerada ésta como la sustitución del sistema de coordenadas basado en filas y columnas de la imagen por otro basado en un sistema de referencia espacial, se ha aplicado una rectificación empírica a partir de una serie de puntos de control con los que calibrar una ecuación de transformación polinómica.

Para la toma de puntos de control, se ha optado por utilizar una malla inicial de entre 25 y 50 puntos por imagen, tratando de utilizar siempre el mismo conjunto para simplificar la búsqueda en imágenes multitemporales y asegurar siempre el mismo ajuste entre ellas (DIEZ y NICOLAS, 2001). Una vez seleccionado el conjunto de puntos, se ha optado por emplear una transformación lineal al no mejorar polinomios de mayor grado el error medio y poder producir grandes deformaciones en espacios sin puntos de control.

**Cálculo de reflectividad: Corrección atmosférica y de iluminación.**

Para iniciar los trabajos, se ha creído conveniente el cálculo de las reflectividades frente al uso directo de los niveles digitales (ND), al tener esta variable un sentido más físico y ser más fácil de relacionar con los usos de suelo y otras variables (GILABERT et al, 1994; CHUVIECO, 2002). Para la corrección atmosférica y de iluminación se ha utilizado la metodología descrita por (RIAÑO et al, 2000):

Corrección atmosférica: Una vez convertidos los ND a radiancia ( $L_{sen,k}$ ) a partir de las especificaciones del sensor, se ha aplicado una corrección atmosférica mediante el método del mínimo del histograma de (CHÁVEZ, 1996) que asume que en cualquier imagen pueden detectarse píxeles oscuros (de irradiancia nula). Como se supone que la irradiancia de estos puntos es nula, si se recibe un valor mayor que cero se puede asumir que se debe a radiación difusa atmosférica. Estos valores se sustraen del histograma para las diferentes bandas ( $k$ ) para obtener una mejor estimación de la irradiancia procedente del suelo  $L_{sue,k}$  que  $L_{sen,k}$ . La siguiente ecuación muestra el procedimiento para obtener los valores de reflectividad a partir de la radiancia.

$$\rho_k = \frac{D_\pi (L_{sen,k} - L_{min,k})}{E0_k \cos \theta_i \tau_{k,i}} \quad (2)$$

En el denominador, se tiene en cuenta la atenuación de la radiación solar incidente por parte de la atmósfera multiplicando aquella por un valor de transmisividad ( $\tau_{k,i}$ ) que depende de la región del espectro electromagnético a que corresponda la banda analizada. Los valores para landsat TM proceden de (CHÁVEZ, 1996), (GILABERT et al, 1994) y (RIAÑO et al, 2000).

Corrección de iluminación: Este apartado trata de corregir el efecto de la modificación del ángulo de incidencia de los rayos solares por la pendiente y la orientación. Este efecto se solucionaría sustituyendo en la ecuación (2)  $\theta_i$  por  $\beta_i$ , a partir de:

$$\cos \beta_i = \cos \theta_c \cos \theta_n + \sin \theta_c \sin \theta_n \cos(\phi_c - \phi_n) \quad (3)$$

Donde  $\beta_i$  es el ángulo que forma la perpendicular de la pendiente a la superficie del pixel con los rayos del sol,  $\theta_c$  la pendiente del terreno,  $\theta_n$  el ángulo acimut solar y  $\phi_n$  la orientación del pixel.

**Creación de capas de información textural**

Para tratar de incrementar la separabilidad entre clases, se ha incorporado como información adicional una capa textural que presenta la variación espacial del brillo de una imagen (BERBEROGLU et al, 2007), que resulta especialmente interesante en paisajes mediterráneos por la gran variedad y fragmentación de patrones espaciales. Ésta se ha

extraído a partir del primer componente de un análisis de componentes principales (ACP) sobre las capas de reflectividad, concretamente se han incorporado dos índices texturales basados en el funciones semivariograma:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^4 (b - b_i)^2}{8} \quad (4)$$

Asimismo, se ha aplicado también al índice normalizado de vegetación (NDVI) como capa de información adicional.

### Clasificación supervisada y no supervisada

Para la clasificación supervisada se han seleccionado un total de 574 áreas de entrenamiento atendiendo a una distribución más o menos homogénea en la cuenca, abarcando la totalidad de clases seleccionadas y tratando siempre que exista el mismo uso en los diferentes años, a partir del MCA77, el vuelo de 1987, Corine LandCover de 1990 y 2000, SIGPAC de 2004 e imagen Qickbird de 2005. Como resultado, se han obtenido una serie de Clases informacionales (CI) seleccionadas a priori. Para la clasificación no supervisada, basada en un análisis clúster que genera un conjunto de clases, se ha optado por usar el algoritmo ISODATA (CHUVIECO, 2002), que obtiene como resultado una serie de Clases Espectrales (CE). Una vez generadas las clasificaciones, se ha procedido a la integración combinando categorías empleando un algoritmo de agrupación jerárquico, utilizando como criterio de ordenación la divergencia entre ce y ci. La evaluación de similitud o disimilitud se ha efectuado a partir del índice aplicado en (THOMAS et al, 1987; CHUVIECO, 2002):

$$Div_{a,b} = \frac{Tr\{(V_a - V_b)(V_b^{-1} - V_a^{-1})\}}{2} + \frac{Tr\{(V_a^{-1} - V_b^{-1})(M_a - M_b)(M_a - M_b)^t\}}{2} \quad (5)$$

Donde  $M_a$  es el vector de medias de la clase  $a$ ,  $V_a$  la matriz de varianzas covarianzas,  $Tr$  la función traza de la matriz,  $t$  indica la matriz transpuesta y  $-1$  la matriz inversa.

### Asignación de píxeles a clases

Una vez obtenido el conjunto de clases óptimo y su caracterización estadística se ha asignado a cada píxel su clase. Para ello se ha utilizado en primer lugar el algoritmo de máxima verosimilitud por clase para obtener la probabilidad de pertenencia a dicha clase.

### Validación. Error de clasificación

Para comprobar la calidad de los resultados obtenidos se han realizado para cada año dos clases de validaciones: (a) validación cualitativa detallada basada en el conocimiento de la cuenca de estudio y (b) validación cuantitativa a partir de matrices de confusión, que obtiene una caracterización del error cometido y una media sobre la adecuación de la clasificación. Para este tipo de validación, se han digitalizado un total de 142 polígonos de validación, siguiendo los siguientes criterios: (a) localización espacial diferente a las áreas de entrenamiento, (b) homogeneización temporal y (c) definición de los límites de los polígonos inferior al polígono real, para evitar confusiones.

### Análisis espacio-temporal de la información

Para un análisis previo de la evolución de los usos del suelo se ha procedido a extraer la información de las superficies de cada clase para cada una de las subcuencas integrantes en la Cuenca del Segura. De este modo, se ha obtenido una evolución de usos del suelo para cada clase en función de la tasa de cambio respecto al valor considerado inicial. Esta evolución también ha servido como método de validación, al comparar las clases en cada subcuenca en las imágenes de 1977, 1990 y 2000 con el cruce entre estas cuencas y la información espacial referente al MCA de 1977 y el proyecto Corine LandCover.

## ÁREA TEMÁTICA 1: MODELIZACIÓN EN GEOGRAFÍA FÍSICA

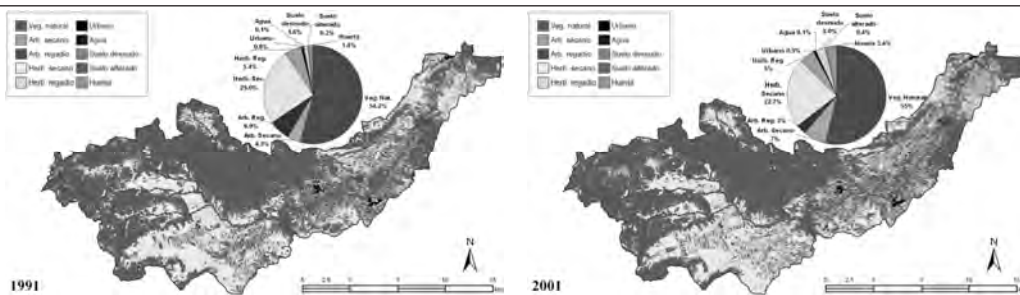


Figura 2. Clasificación de usos en la cuenca del Río Argos en el año 1985 y 2000

### CONCLUSIONES

En términos generales, se han conseguido los objetivos perseguidos de adquisición e integración de la serie temporal de imágenes, de gran interés para los estudios ambientales y en concreto relacionados con la erosión, desertificación, el recurso agua, etc. Este trabajo ha permitido la creación de una base de datos con información de radiancia, de gran interés al posibilitar la integración en gran cantidad de modelos tales como identificación de combustibles, aplicaciones agrícolas y forestales, reconocimiento de unidades geomorfológicas, etc... todos ellos evaluados a partir de índices o como parte de modelos empíricos. La clasificación preliminar de usos para cada año, ha sido un trabajo inédito hasta la fecha en el Sureste español. El resultado de la clasificación puede considerarse aceptable si se tiene en cuenta la escala de trabajo a la que se aplica (resoluciones entre 35 y 75 metros en función del sensor) y los objetivos perseguidos. En lo referente al análisis temporal de los usos del suelo, dentro del marco del proyecto se pretende iniciar la modelización estadístico-espacial de los cambios mediante "Cadenas de Markov" para el cálculo de matrices de confusión de probabilidad de cambio de estado y la generación de escenarios a partir de "autómatas celulares".

### AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo ha sido posible gracias al Proyecto de Investigación denominado "Análisis Multitemporal de Cambios de Uso del Suelo en la Cuenca del Segura. 1975-2007", financiado por la Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua (IEA).

### REFERENCIAS

- ❖ Berberoglu, S., Curran, P.J.; Lloyd, C.D., Atkinson, P.M.; 2007. *Texture classification of Mediterranean land cover*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 9:322-334.
- ❖ Chávez, P.S., 1996. *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote Sensing of Environment. 24:459-479.
- ❖ Chuvieco, E. 2002. Teledetección Ambiental. Ariel Ciencia, 586pp.
- ❖ Díez de Arribas, J.M., Nicolás, E. 2001. *Software de corrección geométrica automática de imágenes NOAA*. Proyecto de Fin de Carrera, U. de Alcalá.
- ❖ Gilbert, M.A., Conese, C., Maselli, F. 1994. *An Atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images*. International Journal of Remote Sensing, 15-10,:2065:2086.
- ❖ Riaño, D., Salas, J., Chuvieco, E. 2000. *Corrección atmosférica y topográfica, información multitemporal y auxiliar aplicadas a la cartografía de modelos de combustibles con imágenes Landsat-TM*. Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible. U. de Alcalá, 2000:222-239.
- ❖ Thomas, I.L., Ching, N.P., Benning, V.M., D'Aguzzo, J.A., 1987. *A review of multi-channel indices of class separability*. International Journal of Remote Sensing, 58:84-106.