

UTILIZACIÓN DE SENSORES AEROPORTADOS EN APLICACIONES DE CALIDAD DE AGUA: EVALUACIÓN DE VERTIDOS TÉRMICOS EN EL RÍO TAJO Y DIFUSIÓN DE SEDIMENTOS EN LOS RÍOS ESERA Y CINCA

R. Peña*, A. Fernández-Renau**, E. de Miguel**, J.A. Gómez**, M.L. Serrano*, A. Ruiz-Verdú*

* Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, Spain

** Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain

Palabras clave: Teledetección aeroportada, calidad de aguas, vertidos térmicos.

Resumen. El Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y el INTA han colaborado en trabajos de aplicación de la teledetección aeroportada a estudios de calidad del agua en ríos. Se ha estudiado el efecto de los vertidos térmicos sobre el río Tajo y la difusión de sólidos en suspensión en los ríos Esera y Cinca (cuenca del Ebro). Los trabajos se han llevado a cabo en los años 1994, 1995 y 1996 utilizando el sensor multispectral ATM Daedalus 1268, del INTA, seleccionando una resolución espacial de 3.5 m en el nadir. Gracias a la utilización de sensores de alta resolución es posible ampliar el campo de aplicación de la teledetección a los ríos españoles, cuya anchura no permite su estudio a través de sensores de satélite, de menor resolución.

Abstract. Several studies on water quality in spanish rivers using airborne remote sensing, have been accomplished in a common project between CEDEX and INTA. The two main objectives were the study of thermal pollution in the Tajo river and the analysis of suspended solids diffusion in the rivers Esera and Cinca (river Ebro basin). The works were carried out in 1994, 1995 and 1996 using the INTA's Daedalus 1268 (ATM) multispectral scanner and selecting a nominal pixel size of 3.5 m at nadir. The results show the utility of airborne remote sensing to analyse water quality in the spanish rivers, usually too narrow to be studied with satellite imagery.

I. Introducción.

Desde hace algunos años el Centro de Estudios hidrográficos del CEDEX viene desarrollando estudios de calidad de agua de embalses, en los que se evalúa el estado trófico a través de metodología convencional y utilizando la teledetección (Ortiz y Peña, 1989; Peña y Serrano, 1992; Peña y Serrano, 1994). Hasta el momento los trabajos se habían llevado a cabo haciendo uso de imágenes del sensor TM de Landsat, cuya resolución espacial resulta adecuada para el estudio de los embalses. Cuando se plantearon estudios cuyo ámbito de aplicación eran ríos, se consideró que las imágenes obtenidas por sensores a bordo de aviones constituirían la mejor herramienta a utilizar, debido a que proporcionan mayor resolución espacial. Existen numerosos trabajos publicados que utilizan sensores aeroportados para la estimación de parámetros de calidad de aguas (Grenier et al., 1991; Hamilton et al., 1992; Melack y Gastil, 1992; Jupp

et al., 1992; Dekker y Donze, 1994; Dierber y Carriker, 1994). Con este objetivo el CEDEX y el INTA firmaron un convenio de colaboración, para la obtención y tratamiento de imágenes digitales del sensor ATM orientadas a estudios de calidad hídrica mediante técnicas de teledetección aeroportada. Una recopilación de los sistemas aéreos y espaciales utilizados en este campo se presenta en Kirk (1983) y de teledetección aeroportada en Hilton (1984) y Danson y Plummer (1995).

En la presente comunicación se exponen las dos aplicaciones para las que se han adquirido imágenes. En primer lugar, el estudio de la difusión de los vertidos térmicos de las principales instalaciones de producción de energía eléctrica que vierten agua de refrigeración, de forma directa o indirecta, al río Tajo. En segundo lugar, la evaluación de la difusión de sólidos en los ríos Esera y Cinca, aguas abajo del embalse de Barasona (Joaquín Costa) como consecuencia de los vaciados que se realizaron para reparar las compuertas de fondo de la presa. Para el estudio de vertidos térmicos en el Tajo se llevaron a cabo campañas a lo largo de los veranos de 1994, 1995 y 1996. Las zonas afectadas por el estudio son las de vertido de las centrales nucleares de Trillo (Guadalajara) y Almaraz (Cáceres) (1994 y 1995), central nuclear "José Cabrera" de Zorita de los Canes (Guadalajara) (1995 y 1996) y de la central térmica de Aceca (Toledo) (1994 y 1995). El objetivo es la estimación de la variación de la temperatura en el río Tajo a consecuencia del vertido de agua a alta temperatura. Así mismo se incluyen otros parámetros como concentración de clorofila *a* y sólidos en suspensión. Para el estudio de la difusión de sólidos en el río Cinca se efectuaron campañas en otoño de 1995 y 1996, programándose los vuelos en cada caso, antes y después del vaciado. Los parámetros estimados fueron los sólidos en suspensión y la temperatura.

II. Materiales y métodos

Descripción de las campañas de vuelo y preproceso de las imágenes.

Para las campañas de Barasona se definieron cuatro zonas de vuelo (zonas 1-4) que corresponden a cuatro

tramos fluviales comprendidos entre el Embalse de Barasona y la confluencia del río Cinca con el Segre. Además se definieron otras dos zonas (zonas 6 y 7) en el embalse de Ribarroja. Las campañas fueron realizadas en julio de 1994, septiembre, octubre y noviembre de 1995 y septiembre y octubre de 1996.

Para las campañas de vertidos térmicos se definió una zona de vuelo que ocupaba tramos de río aguas abajo y aguas arriba de cada central. En la campaña de Zorita de 1996 se definieron dos zonas de vuelo, una en la central y otra aguas abajo, en el embalse de Almoguera. Paralelamente a la adquisición de la imagen se efectuaron campañas de toma de información "in situ" de los parámetros a estimar, en las que se obtuvieron datos de temperatura en diversos puntos lo largo del tramo de río a estudiar y muestras de agua para la determinación de sólidos en suspensión y clorofila.

El sensor utilizado es el sensor de barrido multiespectral DAEDALUS 1268 que de tipo pasivo, instalado en un avión CASA 212 modificado, que separa la radiación recibida de la superficie terrestre en once canales espectrales desde el azul hasta el infrarrojo térmico, dependiendo de la configuración espectral seleccionada. Además permite obtener imágenes de distinta resolución espacial. Para los presentes trabajos se ha escogido un tamaño de píxel de 3.5 m en el nadir. El sensor se ajusta y se calibra en un banco especialmente diseñado para esta tarea situado en el laboratorio de teledetección del INTA. Antes de su utilización para la obtención de mapas temáticos, las imágenes son deconmutadas mediante un sistema de conversión específico que estructura los datos en formato ELAS sobre cintas magnéticas compatibles. Posteriormente se someten a una corrección panorámica utilizando un algoritmo desarrollado en el INTA de acuerdo con las consideraciones geométricas definidas por el propio sistema de adquisición.

Proceso de datos.

Para sólidos en suspensión y clorofila, se lleva a cabo un análisis estadístico de datos, consistente en regresiones lineales múltiples mediante un procedimiento de iteración selectiva (Verdin, 1984). Como variables independientes figuran los valores de ND registrados en los puntos de muestreo localizados en los canales espectrales, mientras que la variable dependiente es la concentración de sólidos en suspensión o clorofila medida en dichos puntos. Los canales utilizados para las ecuaciones son el 2, 3, 5, 7 y 9 del sensor ATM que emulan a las bandas 1, 2, 3, 4 y 5 del sensor TM de Landsat respectivamente.

Para la conversión de los niveles digitales que proporciona el sensor a valores de temperatura, se utilizan los dos cuerpos negros (emisividad > 0,99) de referencia, frío y caliente, para los cuales se dispone de pares Temperatura - ND registrados para cada línea de imagen. Estos pares se promedian y los dos puntos así obtenidos definen una recta que permite obtener el valor de temperatura (T) para cada nivel digital (ND):

$$T = ND * m + n \quad (1)$$

Hay que tener presente que T es la temperatura aparente del terreno, sin considerar interferencia atmosférica ni la emisividad de la superficie. Para todas las campañas, $m = 0.18$, representando la resolución térmica de las imágenes en ausencia de ruido instrumental.

La elaboración de mapas temáticos de sólidos en suspensión y clorofila consiste en la aplicación de las regresiones múltiples obtenidas a partir de los canales de sensor. En el caso de la temperatura se aplica la ecuación la canal 12 (infrarrojo térmico), corregida en cada imagen con los datos de campo. Las imágenes de estos canales se cargan en un Sistema de Información Geográfica con módulo de tratamiento de imágenes en el que cada canal opera como una capa de información obteniéndose mapas resultado de clorofila, sólidos en suspensión o temperatura en función de la ecuación aplicada. La metodología se describe en trabajos anteriores (Serrano y Peña, 1997).

III. Resultados.

Vertidos térmicos al río Tajo

Se han obtenido ecuaciones de clorofila y sólidos en suspensión para cada una de las fechas de estudio. Los resultados de las regresiones obtenidas muestran valores de coeficiente de determinación superiores a 0,7, excepto la ecuación de clorofila obtenida en la zona de la central de Aceca el 13 de junio de 1995 ($r^2=0.65$) y las de sólidos en suspensión obtenidas en Almaraz el 13 de junio de 1995 ($r^2=0.53$) y en Zorita el 21 de junio de 1995 ($r^2=0.66$). La ecuación de temperatura aplicada se ha obtenido según la metodología descrita en el apartado II. A partir de las ecuaciones se han obtenido los mapas temáticos finales en los que se aprecia de forma clara la influencia en el río Tajo de la descarga de agua a temperaturas muy superiores a las aguas receptoras. El aumento de temperatura del río, en las dos fechas estudiadas, es prácticamente inapreciable en el caso de la central nuclear de Trillo y alcanza hasta 8 °C en la zona de vertido de la central nuclear de Almaraz. En todos los casos, la influencia de estos incrementos de temperatura se extiende incluso a zonas situadas aguas arriba del punto de vertido. El impacto sobre la producción primaria

(incremento de concentración de clorofila) y sobre los sólidos en suspensión es inapreciable y en todo caso no atribuible a los vertidos térmicos, excepto en la central de Aceca en la que el aumento de temperatura sí se traduce en un aumento de la concentración de clorofila y sólidos en suspensión en las imágenes de los años 1994 y 1995.

Difusión de sólidos en los ríos Esera y Cinca

Se han obtenido ecuaciones de regresión para los sólidos en suspensión en cada una de las pasadas de avión. Estas ecuaciones y sus coeficientes de determinación (r^2) se resumen en la tabla 1.

Tabla 1

Fecha	Zona	Ecuación	r^2
27/09/95	1,2,3,4	[ss] = 72.05-2.16*B2+2.57*B5-0.82*B9	0.67
16/10/95	1,2,3,4	[ss] = 371.48*B3-1218.66	0.76
28/11/95	1,3,4	[ss] = 418.01*B2-15658.60	0.87
28/11/95	6	[ss] = 7.84*B2-324.48	0.97
28/11/95	7	[ss] = 0.51*B3-0.24*B2-0.06	0.99
25/09/96	1,3,4	[ss] = 4.14*B2-96.04	0.89
25/09/96	6	[ss] = 0.60*B5-11.53	0.83
10/10/96	1,3,4	[ss] = 80.67*B3-2.57.09	0.92
10/10/96	6	[ss] = 0.9203*B5-15.92	0.83

Las ecuaciones sirven de base para la elaboración de los mapas temáticos. Se puede observar en los mapas resultantes que el primer vaciado del embalse de Barasona, realizado en el otoño de 1995, produjo un gran aumento de la concentración de sólidos en suspensión en el río Cinca. De una concentración que oscilaba entre 20 y 100 mg/l se pasó a una concentración de 5 a 10 g/l, e incluso superior en algunos tramos. En el año 1996 los incrementos fueron algo menores, alcanzándose valores entre 1 y 4 g/l (figura 1). Los mapas obtenidos muestran que estos valores se mantienen a lo largo del río Cinca hasta después de la confluencia con el río Segre. Después, la concentración de sólidos en suspensión disminuye progresivamente conforme el agua del Cinca se introduce en el embalse de Ribarroja, hasta alcanzar valores de unos 100 mg/l (figura 2). Esta última zona es, posiblemente, el lugar donde sedimentan la mayor parte de los sólidos procedentes del embalse de Barasona.

IV. Conclusiones.

El planteamiento del Proyecto, el desarrollo de los trabajos y finalmente los resultados obtenidos, con la cartografía temática de las zonas de estudio, ponen de manifiesto la viabilidad de acometer este tipo de trabajos con una herramienta como las imágenes digitales adquiridas por sensores radiométricos a bordo de aviones. La teledetección con este tipo de información radiométrica utiliza todas las posibilidades de modelización de parámetros que suministran los sensores de los satélites pero incorporando

una resolución espacial que permite discriminar fenómenos más concretos, con más detalle, como en el caso de corrientes de agua superficiales.

La teledetección aeroportada es una herramienta más flexible en cuanto a periodicidad y elección de fechas ya que facilita la posibilidad de planificación de los vuelos. Ello es muy útil en aquellas áreas en las que la frecuente cobertura nubosa exige alta flexibilidad a la hora de adquirir las imágenes.

V. Referencias.

- Danson F.M., Plummer S.E.(ed.), 1995. *The Remote Sensing of Inland Water Quality*. Advances in Environmental Remote Sensing. 8:123-142.
- Dekker, A. G. y Donze, M., 1994. *Imaging Spectrometry as a research tool for inland water resources analysis*. En J. Hill(ed.). *Imaging Spectrometry - A tool For Environmental Applications*. Dordrecht: Kluwer Academic. pp. 295-318.
- Dierberg, F.E., Carriker N.E., 1994. *Field testing two instruments for remotely sensing water quality in the Tennessee Valley*. Environmental Science and Technology. 28:16-25.
- Grenier, M. et al. 1991 *Evaluation de la Qualité des eaux du fleuve Saint-Laurent par teledeteccion aeroportee*. Montreal: Centre Saint-Laurent Conservation et protection Environment Canada.
- Hamilton, M. et al., 1992 *Multiple dataset water-quality analysis in the vicinity of an ocean wastewater plume*. Proceedings of the 3rd Airborne Geosciences Workshop. Pasadena: JPL 92-14,63-65
- Hilton, J., 1984. *Airborne remote sensing for freshwater and estuarine monitoring*. Water Resources. 18:1195-1223.
- Jupp, D.L.B. et al., 1992. *The potential use of airborne scanning for monitoring algal blooms in the Murray Darling Basin*, Report to the Murray Darling Basin Commission: Airborne Remote Sensing of blue-green algae at Lake Mokoan. Canberra: CSIRO Division of Water Resources and CSIRO-OSSA.
- Kirk, J.T.O., 1983. *Light and photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge: Cambridge University Press
- Melack J.M., Gastil, M., 1992. *Seasonal and Spatial Variations in Phytoplanktonic chlorophyll in eutrophic Mono Lake, California, measured with the AVIRIS* Proceedings of the 3rd Airborne Geosciences Workshop. Pasadena: JPL 92-14,53-55.
- Ortiz, J.L. y Peña, R., 1989. *Water quality monitoring in Spanish Reservoirs by satellite remote sensing*. CEDEX.
- Peña, R. y Serrano, M.L., 1992. *Evaluación del estado trófico de los embalses mediante imágenes digitales*. Ingeniería Civil. 86:37-44.
- Peña, R. y Serrano, M.L., 1994. *Seguimiento del estado trófico de los embalses del alto Tajo por teledetección*. Limnética. 10:69-81.
- Serrano, M.L. y Peña, R., 1997. *Evolución del estado trófico de tres embalses del Júcar por teledetección*, En J.L. Casanova y J. Sanz Justo (Eds.). *Teledetección. Usos y aplicaciones*. Universidad de Valladolid. pp 223-229.
- Verdin, J.P., 1984. *Limnological applications of multispectral remote sensing*. USBR Report No.REC-ERC-85-2. 51p.

Figura 1: Evolución de la concentración de sólidos en suspensión en el río Cinca. Año 1996

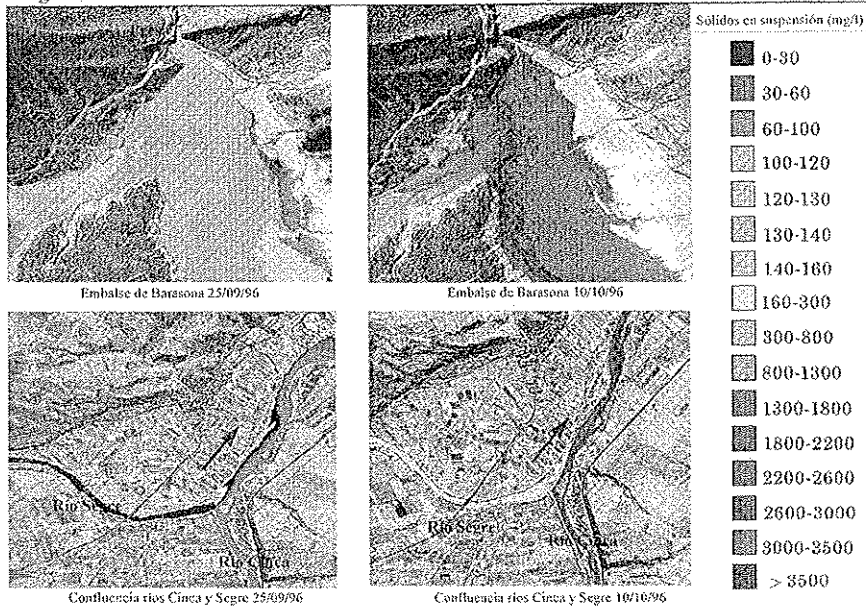
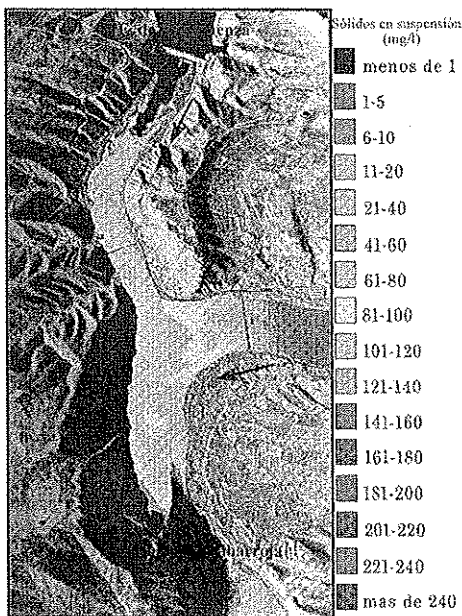
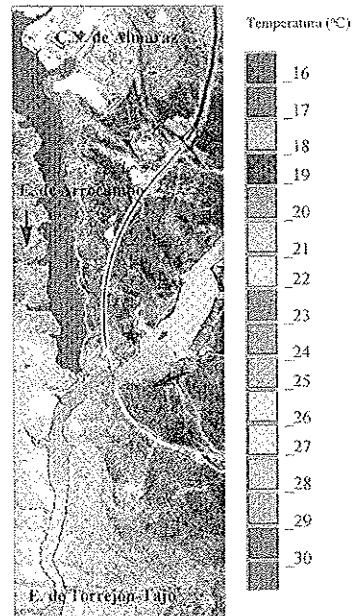


Figura 2: Vaciado del E. de Barasona. Año 1995



Entrada del agua del Cinca en el embalse de Ribarroja 28/11/95

Figura 3: Vertidos térmicos al río Tajo



Vertido de agua de refrigeración de la C.N. de Almaraz. Efecto sobre la T° del E. de Arrocampo y el E. de Torrejón-Tajo