

## **DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LOS HUMEDALES DEL RÍO JARAMA ENTRE 1988 Y 1992 Y EVALUACIÓN DE ESTADO TRÓFICO DE LAS LAGUNAS DEL CAMPILLO, EL PORCAL Y LAS MADRES EN 1992 MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT TM.**

José Antonio Domínguez Gómez. Antonio Sastre Merlín (\*). Ramón Peña Martínez (\*\*)

(\* Universidad de Alcalá de Henares, Ctra. de Barcelona, km 33,600 E-28871 ALCALÁ DE HENARES

(\*\*) Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3, 28005 MADRID

**ABSTRACT:** La actividad humana es la causante del cambio del medio natural, en el que origina nuevos aspectos como las lagunas de graveras. El control y la vigilancia de estas lagunas es de gran importancia en el sureste de la CAM, al encontrarse en la actualidad dentro del Parque Regional del Sureste. Para poder eliminar las barreras terrestres y temporales en su observación y estudio proponemos la utilización de la teledetección mediante el satélite Landsat TM.

**ABSTRACT:** Human activity makes the environment change and creates new aspects in it, such as gavelled lagoons. Control and vigilance of these lagoons is very important in the Southeast of Madrid province, since nowadays they are part of the Regional Park of the Southeast. The use of TM Landsat imagery is suggested in this article in order to eliminate land and time barriers in its study and observation.

### **INTRODUCCIÓN.**

Una de las principales zonas de actividad minera de la Comunidad de Madrid es la vega media y baja del río Jarama, cuyo cauce recorre el este de la CAM de norte a sur.

El substrato del territorio está dominado por dos tipos litológicos principales:

-Los materiales detríticos aluviales cuaternarios vinculados al río Jarama (gravas y cantos poligénicos, arenas y arenas limo-arcillosas), que forman la llanura aluvial así como un interesante sistema de terrazas, de las cuales las bajas y/o medias son encajadas, lo que tiene decisiva trascendencia en cuanto a la conexión hidráulica entre ellas, así como con la llanura aluvial y con el Jarama.

-Las formaciones yesíferas y margo-yesíferas miocenas que constituyen el límite de la unidad anterior, así como el muro de la misma.

Entre una y otra unidad, aunque de forma discontinua, se observan por un lado coluviones y depósitos de pie de talud (gravas y cantos poligénicos, arenas arcillosas, fangos, limos yesíferos con cantos y bloques) y, por otro, conos de deyección (gravas y cantos poligénicos, arenas arcillosas y fangos).

Los sedimentos de llanura aluviales y los del complejo de terrazas bajas y medias, así como los coluvionares y de cono de deyección constituyen el acuífero aluvial, cuyo espesor varía entre 10 metros- en las inmediaciones del curso del Jarama- y los 20 metros en las zonas centrales de la vega. El nivel freático se dispone a una profundidad variable comprendida entre 5 y 14-16 metros. (Sánchez, Sastre y Martínez, 1994).

Distinguimos cuatro tipos básicos de explotación:

a.- Canteras de Ladera para la extracción de yeso, cuya extensión generalmente es muy pequeña.

b.- Canteras de Ladera para la extracción de áridos.

c.- Graveras por encima del nivel freático.

d.- Graveras por debajo del nivel freático, amplias superficies de explotación superior a 10 ha cuya profundidad varía dependiendo de la explotación, llegando a alcanzar los 10 metros de profundidad. A las lagunas que se forman debido al "afloramiento" del nivel freático se les denomina lagunas residuales o de graveras.

En los últimos años la Universidad de Alcalá de Henares ha realizado diversos estudios sobre impacto medioambiental y problemas ambientales relacionados con la explotación de áridos. Desde que en 1990 el CEDEX publicó los primeros resultados del reconocimiento limnológico de todos los embalses del Tajo ha seguido utilizando el tratamiento de imágenes del satélite Landsat TM. Ambas experiencias han originado el siguiente trabajo: Detección de Cambios en los Humedales del Río Jarama entre 1988 y 1992 y Evaluación de Estado Trófico de las Lagunas del Campillo, el Porcal y las Madres en 1992 mediante imágenes Landsat TM.

### **MATERIAL Y MÉTODOS DE TRABAJO.**

Para la realización de este proyecto se dispone de: imágenes Landsat TM de 1988 y 1992 de la zona de estudio (en esas fechas las lagunas de graveras se situaban a ambos márgenes del río Jarama, entre Mejorada del Campo y San Martín de la Vega), software de teledetección (versión 6.0 de PCI), datos de muestreo del estado trófico de las lagunas del Campillo, el Porcal y las Madres de 1992, software estadísticos (STATPRO y Microsoft EXCEL) e información auxiliar (mapas, fotografías aéreas de 1984, estudios sobre la zona, etc).

La metodología utilizada difiere si se estudia la detección de cambios en los humedales del Río

Jarama entre 1988 y 1992 o la evaluación del estado trófico de las Lagunas del Campillo, el Porcal y las Madres en 1992.

Un primer análisis visual de la superposición de bandas entre las dos fechas nos llevó a utilizar las siguientes técnicas de análisis multitemporal: análisis multitemporal de imágenes clasificadas, redes neuronales artificiales, análisis lineal de mezclas espectrales y análisis de componentes principales multitemporales.

La cartografía temática de eutrofización de las lagunas mediante teledetección se desarrolla en las siguientes fases :

1.- Toma de muestras en las lagunas, coincidiendo con el paso del satélite (13 de agosto de 1992), de temperatura superficial, transparencia mediante la observación de la profundidad de Sacchi y toma de muestra de agua con la que se obtiene la concentración de clorofila.

2.- Determinación de la concentración de clorofila en el laboratorio mediante la metodología descrita en el libro ANALYSE DE L'EAU (Rodier, 1984, 702-704).

3.- Análisis estadístico con el cual se obtiene una extrapolación válida de los datos de campo obtenidos para unos píxeles determinados a toda la superficie lagunada o a cada laguna en particular. La extrapolación para obtener los valores de transparencia, disco de Sacchi, y clorofila se realiza mediante una correlación múltiple de los valores muestreados como variables dependientes y los niveles digitales de la bandas TM como variables independientes. La ecuación de correlación entre la banda térmica TM y la temperatura se realiza mediante la calibración lineal en función de los factores atmosféricos (humedad relativa, la temperatura del aire, presión) correspondientes a la fecha (PRICE, 1983) respecto a unas ecuaciones que relacionan los valores detectados en la banda térmica TM con las temperaturas, debido a una calibración de los conteos (BARTOLUCCI, 1985).

#### DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LOS HUMEDALES ENTRE 1988 Y 1992.

El análisis mediante imágenes categorizadas se ha realizado mediante la clasificación de las imágenes del 88 y 92 con el mismo número de categorías, 12, y éstas se ordenaron de igual forma en cada clasificación. Una vez clasificadas las imágenes se realizó una matriz de cambios, con 144 tipos de cambio. Sólo se consideraron los cambios en los cuales interviene la categoría agua, aunque esta matriz puede sugerir multitud de futuras investigaciones. La clasificación realizada fue una clasificación mixta ; primero se realizó una clasificación supervisada cuyo criterio de asignación fue el de máxima probabilidad completa con las doce categorías. Posteriormente se intentó mejorar con una clasificación no supervisada utilizando el algoritmo ISODATA, con un número de categorías

superior al anterior; se realizaron las pruebas con 20, 17 15, y 13 categorías, que posteriormente se agrupaban para identificar zonas homogéneas y distinguibles volviendo a obtener las 12 categorías de la clasificación supervisada, con lo se aceptó esta doce categorías y su orden como el idóneo :

1°.- Agua, correspondiente a las lagunas.

2°.- Regadío (aquellas zonas que estaban siendo regadas en el momento del paso del satélite).

3°.- Cultivos Herbáceos y/o Viñedos y/o Girasoles (lugares donde existen viñedos, girasoles y cultivos herbáceos de regadío que en ese momento no eran regados).

4°.- Coníferas (áreas de dicho bosque).

5°.- Frondosas (zonas donde existe bosque de frondosas).

6°.- Erial (zonas improductivas y con aspecto de abandono).

7°.- Matorral (áreas con vegetación constituida por plantas leñosas de pequeña talla, ramificadas desde la base : arbustos y matas).

8°.- Pastizal (zonas con abundante pasto o plantas propias para el alimento del ganado).

9°.- Suelo Desnudo (zonas de afloramiento de yeso).

10°.- Suelo con Vegetación Escasa (áreas de yesos en las cuales existe poca vegetación).

11°.- Urbano Disperso (en la que englobamos todo tipo de construcción entre la cual no existen espacios abiertos, como por ejemplo zonas residenciales, asentamientos chabolistas, etc).

12°.- Urbano Denso (esta categoría reúne todo tipo de construcción entre la cual no existan espacios abiertos, como por ejemplo núcleos urbanos, polígonos industriales, etc).

Las imágenes clasificadas de ambas fechas sufren un proceso de verificación de resultados, homogeneización mediante la aplicación de filtros modal 3\*3, convirtiéndose en mapas temáticos de 1988 (fig.3) y 1992 (fig.2). Estos mapas nos permiten establecer una comparación entre las coberturas del suelo de ambas fechas. Con las relaciones en las cuales interviene la categoría 1 (agua) se realiza un mapa de evolución de la misma entre ambas fechas, observando en él los cambios producidos (fig.6).

El PCI dispone de un módulo de redes neuronales. Esta red utiliza el algoritmo "La regla delta generalizada para el aprendizaje supervisado", procedente del libro de Pao,Y.H (1989)"Modelo Adaptado del Conocimiento & Redes Neuronales", Addison-Wesley Publishing Company. Se configuró dicha red con una capa de entrada en la que indicamos los canales de entrada, nuestras bandas, una intermedia u oculta, cuyas unidades deben estar comprendidas entre el número de unidades de entrada y el número de categorías, y la capa de salida. Se indica el control ejercido en la red mediante los parámetros: error máximo normalizado, error máximo individual y número de

iteraciones. Si en algún momento del entrenamiento de la red se supera el valor de estos parámetros la red da por terminado su entrenamiento. Entonces se obtiene una imagen clasificada y a partir de este momento le aplicamos la misma metodología que a la clasificación anterior para la obtención del mapa temático. El proceso de entrenamiento se realizó para obtener una imagen clasificada mediante red neuronal de 1988 (fig.5) y otra de 1992 (fig.4). Las imágenes difieren según el método de clasificación empleado, lo cual no debería suceder ya que las imágenes clasificadas mediante redes neuronales deben ser iguales a las imágenes obtenidas mediante la clasificación mixta. La imagen obtenida mediante la red neuronal confunde zonas correspondientes a las categorías de: erial, matorral y pastizal; coníferas y frondosas; suelo con vegetación escasa y suelo desnudo. En las zonas cercanas a los núcleos confunde las categorías, sobre todo las que corresponden a zonas urbanas dispersas en la imagen supervisada. Se considera que la red neuronal realiza una buena clasificación en las categorías correspondientes a regadío y agua, aunque asigne algunos píxeles a otra categoría (al tratarse de un número reducido y difícil de detectar lo consideramos aceptable). La explicación de estas diferencias y semejanzas de las imágenes generadas por una metodología tradicional de clasificación supervisada y la nueva metodología de redes neuronales se encuentra si se hace un análisis de las curvas espectrales de las cubiertas con las que hemos realizado las clasificaciones (fig.1). Esta red realizará una buena clasificación cuando las categorías utilizadas en las fases de entrenamiento tengan diferencias significativas en algunas de las bandas, como ocurre con el agua en las bandas 4, 5 y 7. Este problema se resuelve al utilizar un número menor de categorías. En consecuencia con los mapas de redes neuronales de 1988 y 1992 sólo se puede realizar un mapa de estabilidad, ganancia y pérdida de agua sin poder indicar cambios entre categorías. El análisis lineal de mezclas espectrales (ALME) extrae información sobre el grado de mezcla que existe en cada píxel. El módulo del PCI que realiza este análisis guarda en un canal el grado de mezcla y en otro el error cuadrático medio. Este análisis se realiza con segmentos con estadísticas puras como agua, suelo, vegetación y de la misma fecha. Sin embargo, al disponer de un fichero pix (fichero con el cual trabaja el PCI) se tienen todos los canales de las dos fechas corregidos geoméricamente, con lo cual un píxel correspondiente a canales de fechas diferentes indica el mismo lugar en cada una de las fechas. Se utilizan segmentos de estadísticas puras correspondientes al agua en cada una de las fechas. En el canal que guarda la información correspondiente al grado de mezcla del agua del 92 y del 88 se genera una imagen

confusa; sin embargo en el canal del error cuadrático medio se obtiene una imagen del grado de agua en 1992. Se repite el proceso realizando el grado de mezcla del agua del 88 y del 92, que genera una imagen confusa en el canal de mezcla, mientras que en el canal del error cuadrático medio aparece el grado de agua de 1988. A ambos canales que contienen el error cuadrático medio se les aplica un filtro modal para homogeneizar las imágenes, ya que aparecen algunos píxeles desperdigados. Una composición en falso color de los dos canales filtrados nos da el grado de humedad de los píxeles de cada fecha. Aquellos píxeles que tengan un valor superior a 60 corresponden al agua en cada una de las fechas e indican las zonas de agua en una y otra fecha, así como los cambios. También aparecen zonas cuyo grado de agua es inferior a 60, lo que indica zonas cuyo grado de humedad es elevado (fig.9).

El análisis de componentes principales (ACP) multitemporales permite obtener la información común en los primeros componentes principales y los cambios en los últimos componentes, lo cual nos lleva a intentar obtener el mayor número posible de componentes principales, que es igual al número de bandas utilizadas. Como se utilizan todas las bandas de 1988 y 1992, a excepción de las bandas térmicas de cada fecha, se tienen un total de 12 bandas y, en consecuencia, se pueden obtener un máximo de 12 componentes principales (los cuales han sido calculados). El estudio de la matriz de autovectores indica aquellos componentes más significativos que detectan cambios o estabilidad y la matriz de autovalores proporciona el grado de información en tanto por ciento. Una elección adecuada de los componentes principales mediante el análisis de las matrices de autovalores y autovectores y la composición coloreada de los mismos generará una imagen en falso color en la cual se visualizarán las zonas de cambio de los humedales. Se eligieron para la composición coloreada los componentes principales 12, 11 y 7. El componente 12 indica un cambio favorable hacia 1992, con un 0.03% de información. La imagen del componente 12 identifica claramente en blanco las zonas correspondientes a la laguna del Campillo y al humedal del Porcal, formado por la laguna del Porcal y sus vecinas. Con mayor dificultad se detectan todos los cuerpos lagunares de 1992. El componente 11 no muestra cambios en la banda 1 entre las dos fechas, es decir, nos indica las zonas estables de agua. En la imagen correspondiente a este componente percibimos en tonos oscuros las zonas estables de agua (la laguna del Campillo y del humedal del Porcal en 1988). El componente principal 7 representa un cambio hacia 1992 en las bandas 4 y 5, lo que indica que se verá en tonos claros la ganancia producida en la cobertura de suelo y la pérdida de vegetación entre las dos fechas (la más clara es la carretera nacional

N-III Madrid - Levante). La composición coloreada de los tres componentes (fig.10) dará una mayor claridad a la hora de conocer los cambios de los humedales. En color naranja aparecen las zonas húmedas estables; los lugares de cambio de agua se muestran en la transición entre el naranja y el amarillo muy claro, prácticamente blanco. La laguna del Campillo aumenta su tamaño en 1992, como indica el color amarillo, pero no en gran cantidad, al ser muy intenso y no prácticamente blanco. Lo mismo sucede en la laguna de Velilla. El humedal del Porcal y del Sotillo son los más significativos, ya que aparecen zonas estables en naranja y zonas de un gran aumento de agua en tonos amarillos claros. Los tonos verdes corresponden a zonas estables de vigor vegetal; los verdes claros, de pérdida de vigor vegetal, generalmente corresponden a explotaciones, algunas de las cuales se han convertido en lagunas, como las correspondientes a las graveras del Sotillo, o ha aumentado en tamaño alguna que ya existía, como la laguna del Porcal.

#### ESTADO TRÓFICO DE LAS LAGUNAS

Un primer análisis estadístico tuvo como objetivo conseguir una extrapolación válida de los datos de campo obtenidos en los píxeles determinados a toda el área lagunada de la imagen. Esto no fue posible debido al gran error que presentaba la extrapolación. Sin embargo dicha extrapolación resulta si se realiza en particular para cada laguna en la que se tomaron las muestras, obteniendo un coeficiente de determinación  $R^2$  prácticamente de 100% y un error estándar de estima nulo. Por lo que sólo podemos determinar el estado trófico de las lagunas del Campillo, el Porcal y las Madres (fig.11-19)

#### CONCLUSIONES

La teledetección por satélite es una técnica aplicable al estudio de cambios de humedales y estado trófico de lagunas de graveras con la única restricción de la resolución espacial del sensor. La técnicas aplicadas: ALME, Clasificaciones (Supervisada y Redes Neuronales) y ACP, son válidas. La Clasificación Supervisada es la más completa, ya que manifiesta la evolución entre categorías. Las demás sólo detectan ganancia, pérdida y estabilidad. El ALME es la más rápida y sencilla, ya que no se realiza ningún tipo de análisis, sólo una composición en falso color. La peor es la Clasificación mediante Redes Neuronales, por la complejidad que lleva su proceso. Las aguas de la laguna del Campillo son turbias debido a material orgánico (presente en gran parte de la laguna) y a material inorgánico (en su extremo noreste, en el cual la concentración de clorofila y transparencia son bajas y la temperatura es alta). Se destaca en el centro de esta zona dos píxeles que no cumplen

estas características, y que se podrían considerar como una zona en contacto con el nivel freático. Del mismo modo las aguas de la laguna del Porcal son turbias, pero bastantes homogéneas, ya que la transición entre zonas es continua y no sufre saltos bruscos, aunque cada una de sus partes tiene sus propias características. Las lagunas de las Madres tienen unas aguas transparentes, correspondientes a un proceso de recuperación anterior a la fecha de estudio de 1992. Es en estas lagunas donde se percibe con claridad el problema de la resolución espacial del sensor.

#### BIBLIOGRAFÍA

- CHUVIECO, E. (1996): *Fundamentos de teledetección espacial*, Rialp, Madrid.
- ENGMAN, E.T., GURNEY, R.J. (1991): *Remote Sensing in Hydrology*, Chapman and Hall, London.
- HEWITSON, B.C., GRANE, R.G. (1994): *Meural Net: Applications in Geography*, Hewitson, B.C., Grane, R.G., Netherlands.
- PEÑA, R. (1991): "Proceso de imágenes para teledetección por satélites Landsat en embalses españoles", *Jornadas sobre eutrofización de embalses e Indicadores biológicos de la calidad de las aguas de los ríos*, pp.107-135, CEDEX, Madrid.
- PEÑA, R., SERRANO, M.L. (1992) "Evaluación del estado trófico de los embalses mediante imágenes digitales", *Ingeniería Civil*, nº86, pp. 37-44, CEDEX, Madrid.
- PEÑA, R., SERRANO, M.L. (1994) "Seguimiento del estado trófico de los embalses del alto Tajo por teledetección", *Limnética*, vol. 10, nº1, pp. 69-81, Asociación Española de Limnología, Madrid.
- RYDING, S-O., RAST, W. (1992): *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*, PIRAMIDE, Humanes (Madrid).
- SÁNCHEZ, A., SASTRE, A., MARTÍNEZ, S. (1994): "Reconocimiento de los problemas ambientales relacionados con la extracción de áridos en la vega del Jarama (sector Arganda - San Martín de la Vega). Descripción del futuro Parque Regional del Sureste", *Análisis de la contaminación de las aguas subterráneas*, vol.III, pp.74-79, Antonio Sastre Merlín, Alcalá de Henares.

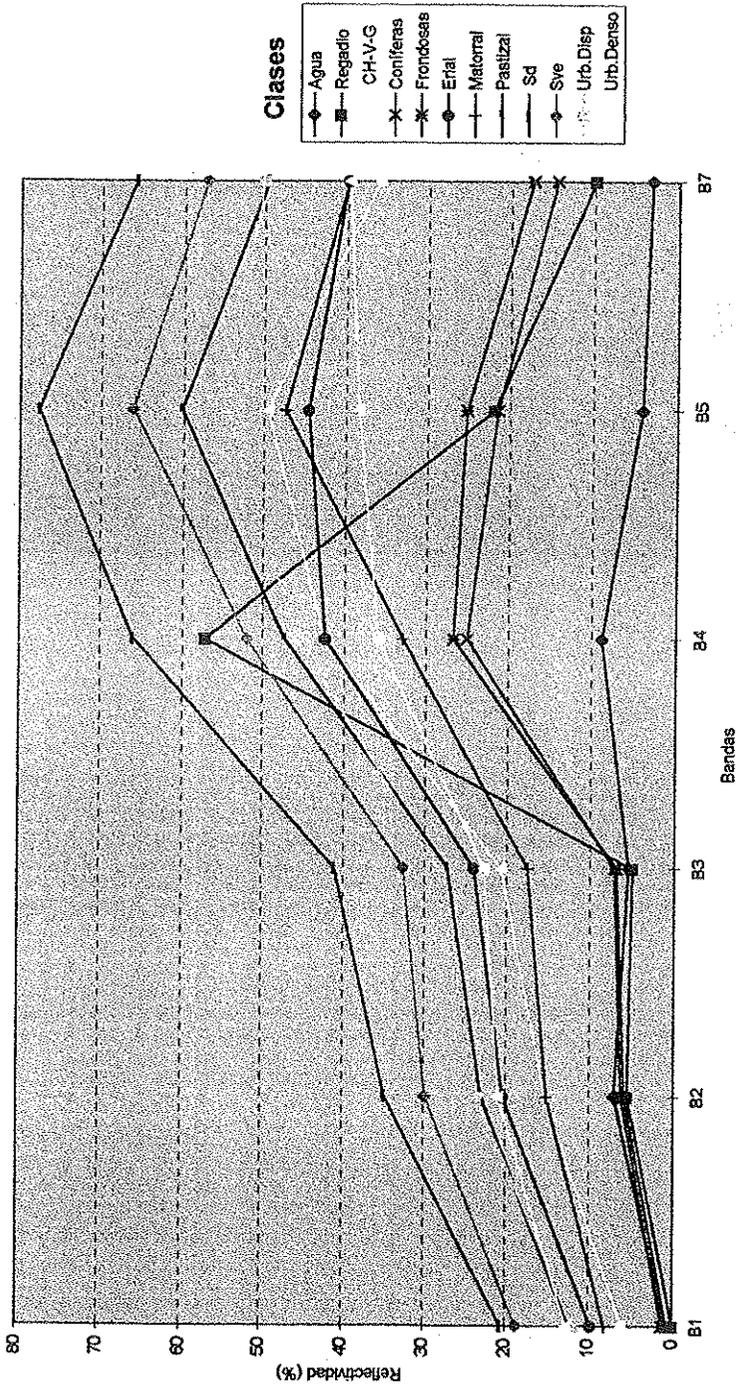


Figura 1

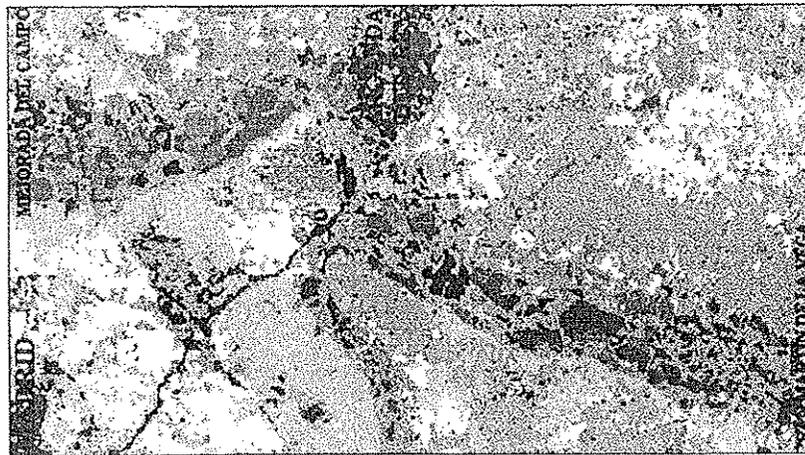
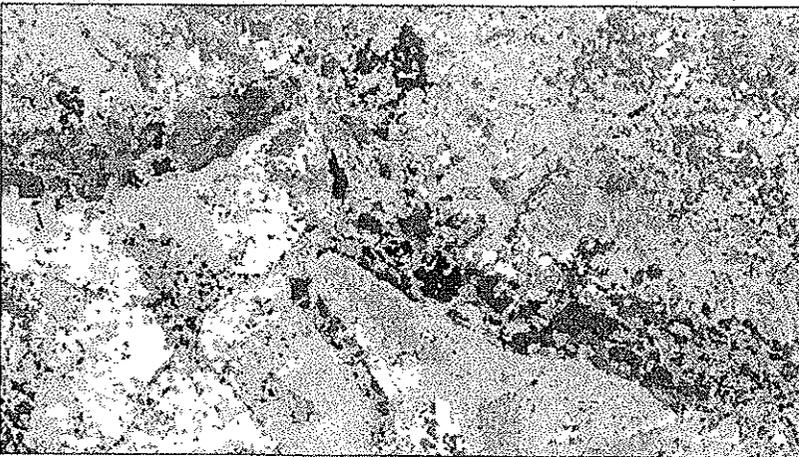


Figura 2 - Clasificación Supervisada de 1992



Figura 3 - Clasificación Supervisada de 1988



- Agua
- Regadío
- Cultivos Herbáceos y/o Viñedos y/o Girasoles
- Coníferas
- Frutales
- Erial
- Matorral
- Pardal
- Suelo Descuberto
- Suelo con Vegetación Escasa
- Urbanos Densos
- Urbanos Pocos

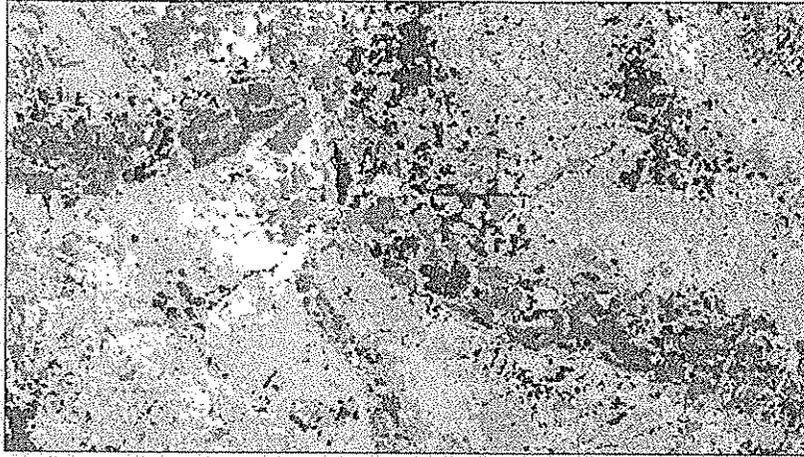


Figura 4 - Clasificación de 1992 mediante Red Neuronal

Figura 5 - Clasificación de 1988 mediante Red Neuronal

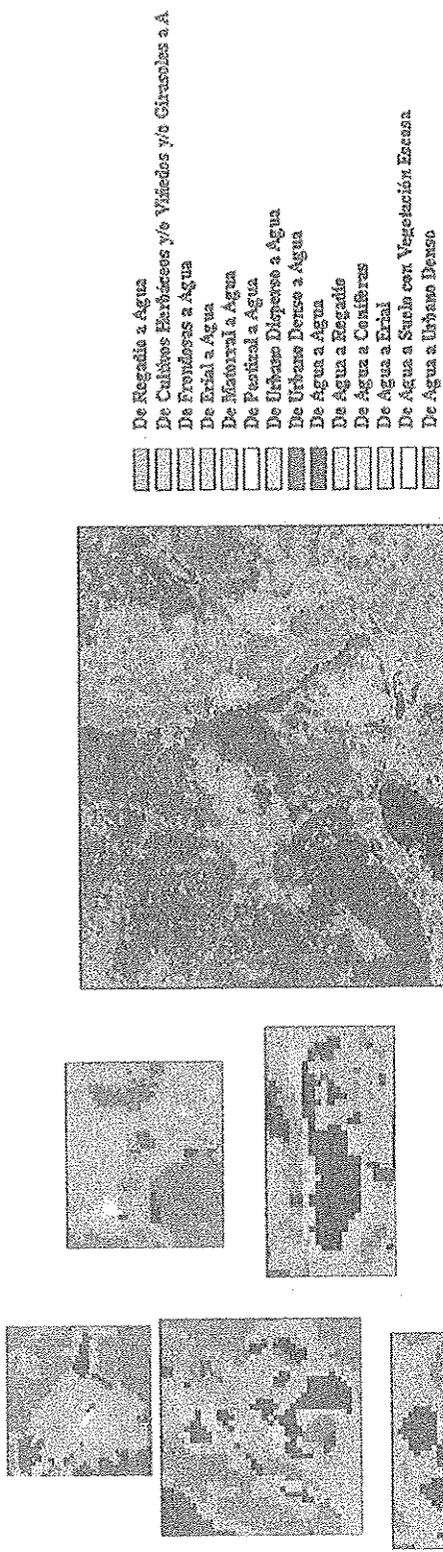
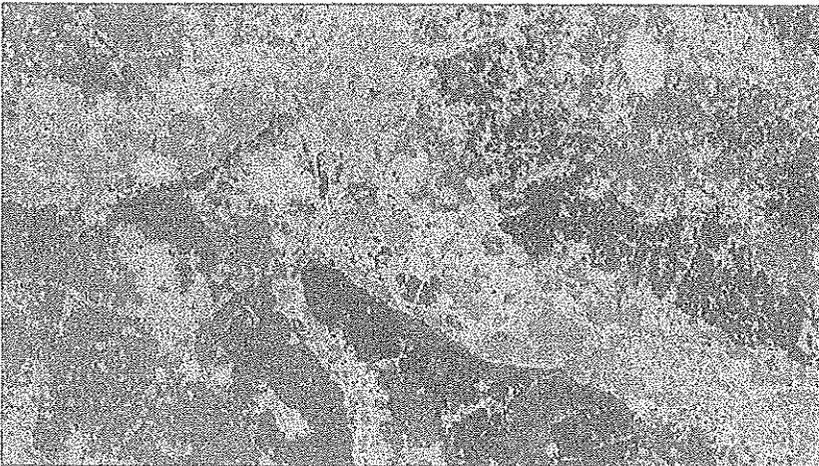


Figura 6 -Evolución de las masas de Agua 1988 - 1992 (Imágenes Clasificadas)



- De Regadío a Agua
- De Cultivos Herbáceos y/o Viñedos y/o Girasoles a Agua
- De Frutíferas a Agua
- De Eñel a Agua
- De Mahorral a Agua
- De Pastizal a Agua
- De Urbano Disperso a Agua
- De Urbano Densos a Agua
- De Agua a Regadío
- De Agua a Coníferas
- De Agua a Eñel
- De Agua a Suelo con Vegetación Escasa
- De Agua a Urbano Densos

Figura 7- Evolución de Agua mediante Clasificación Mixta

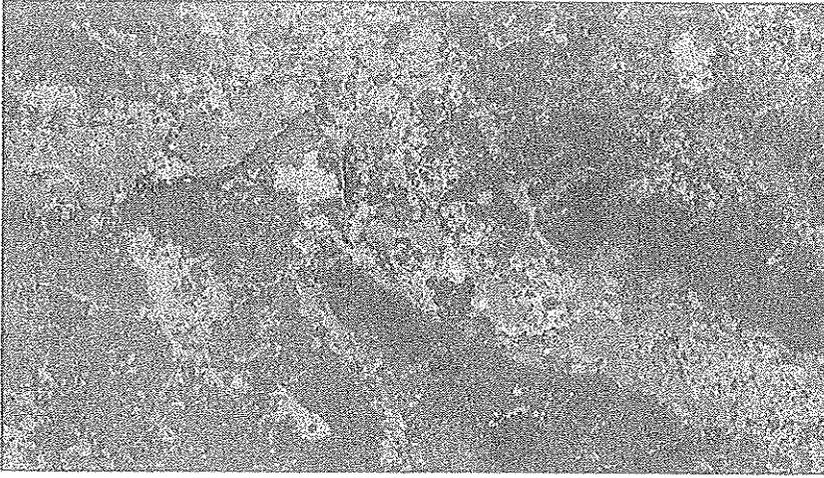


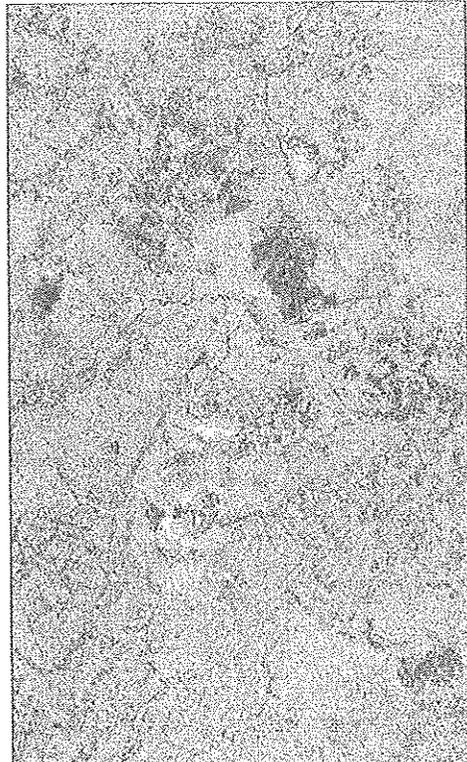
Figura 8 - Evolución de Agua mediante Redes Neuronales



■ Sin Cambios de Agua  
 ■ Ganancia de Agua  
 ■ Pérdida de Agua  
 Tonos Grises Azulados Zonas de Ganancia de Humedad  
 Tonos Rosados Zonas de Pérdida de Humedad

*Figura 9 - Cambios de Agua entre 192 y 1988 mediante Análisis Lineal de Mezclas Espectrales (ALME).*

*Figura 10 - Cambios mediante el Análisis de Componentes Principales (RGB:11-7-12)*



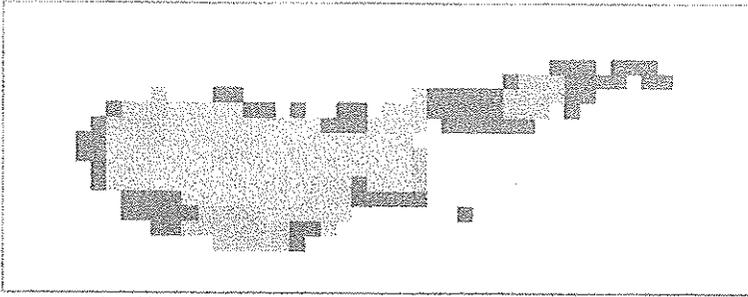


Figura 11 - Mapa de Temperatura de la Laguna del Campillo

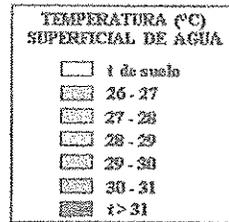
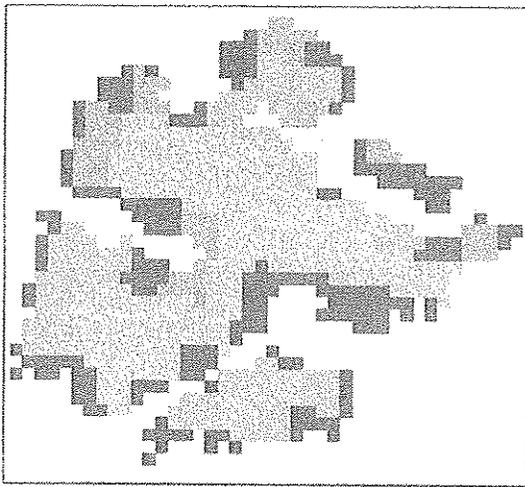


Figura 12 - Mapa de Temperatura de la Laguna del Porcal

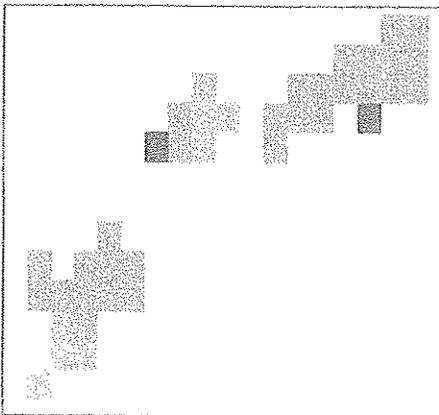


Figura 13 - Mapa de Temperatura de las Lagunas Las Madres

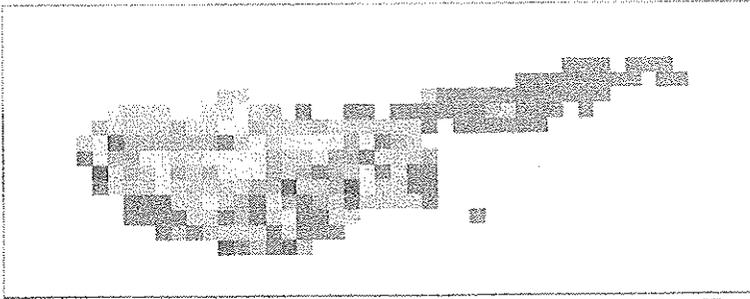


Figura 14 - Mapa de Concentración de Clorofila a de la Laguna del Campillo

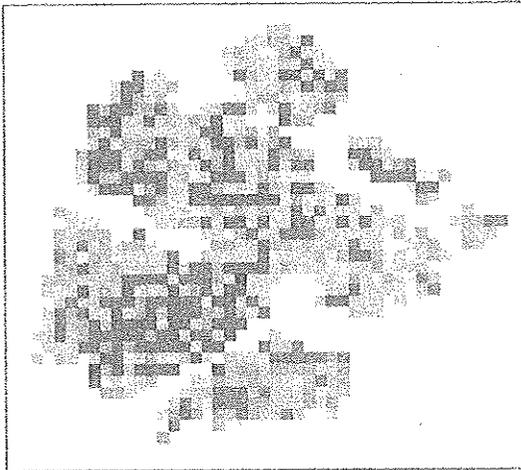


Figura 15 - Mapa de Concentración de Clorofila a de la Laguna del Porcal

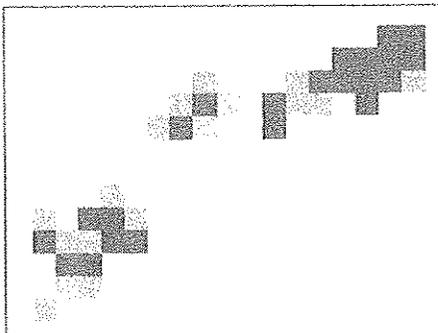
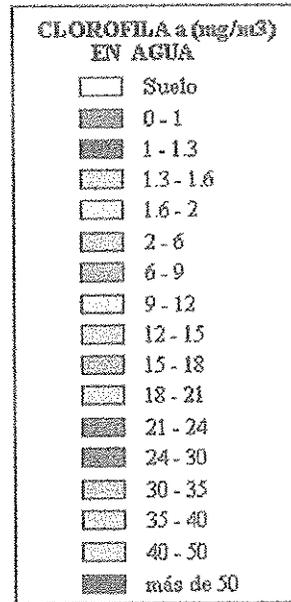
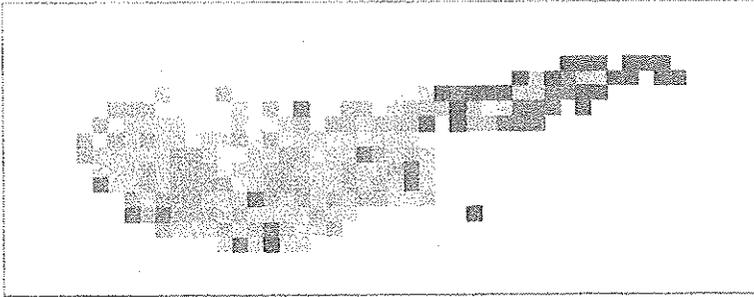
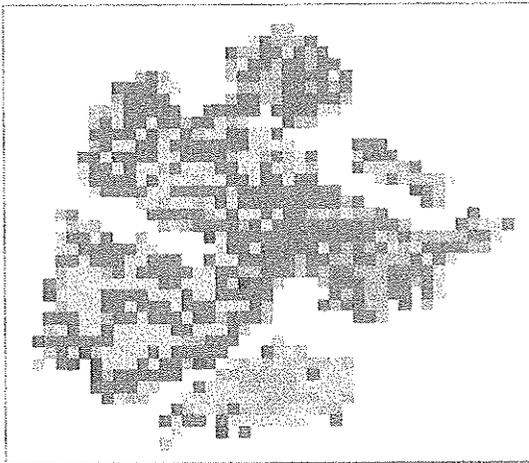


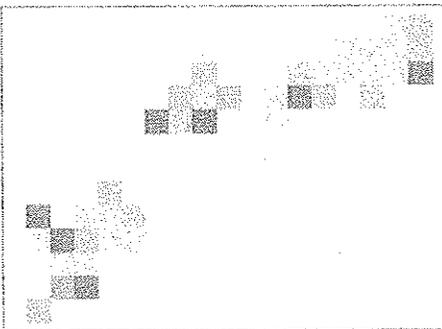
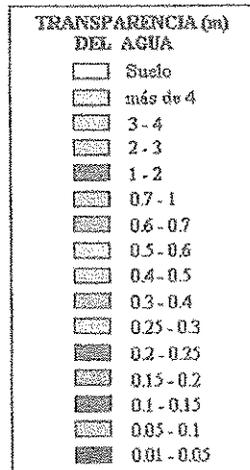
Figura 19 - Mapa de Concentración de Clorofila a de las Lagunas Las Madres



*Figura 16 - Mapa de Transparencia de la Laguna del Campillo*



*Figura 17 - Mapa de Transparencia de la Laguna del Porcal*



*Figura 18 - Mapa de Transparencia de las Lagunas Las Madres*