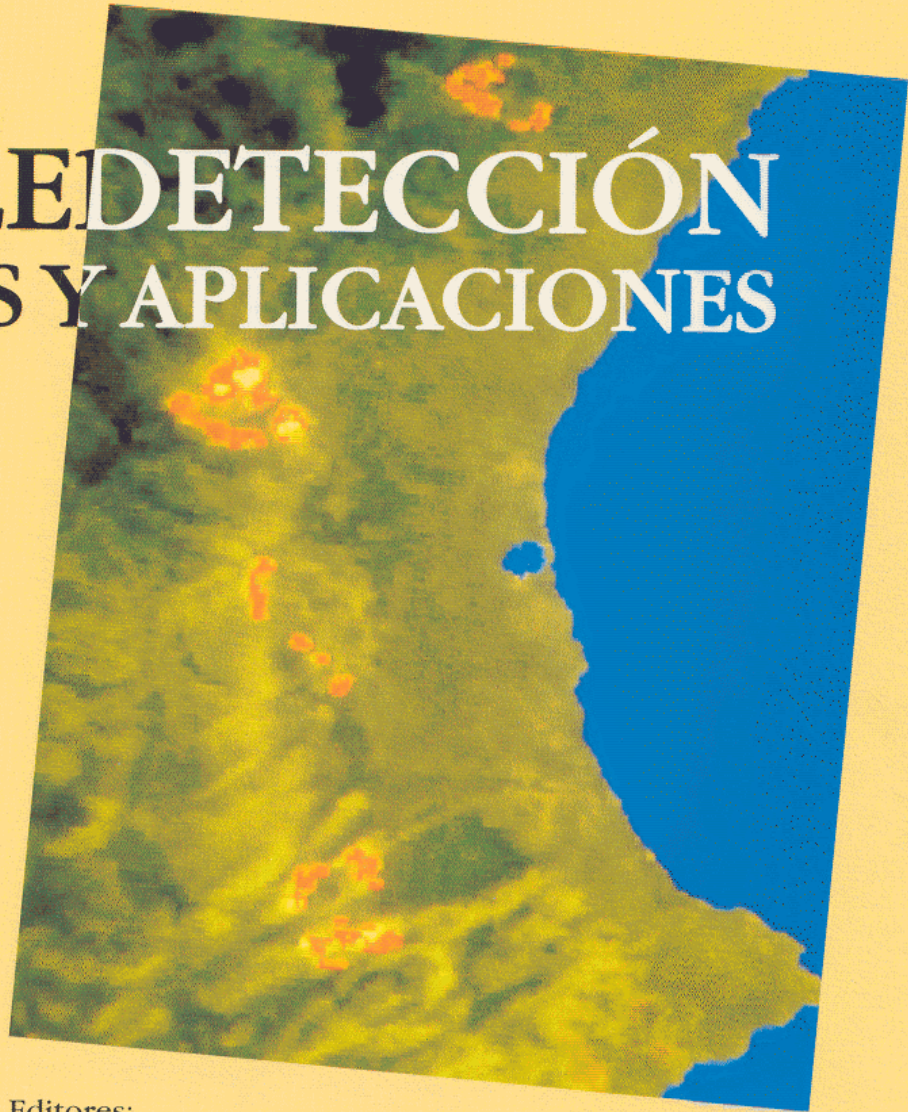


TELEDETECCIÓN USOS Y APLICACIONES



Editores:

JOSÉ LUIS CASANOVA

JULIA SANZ JUSTO

UNIVERSIDAD DE
VALLADOLID

METODOLOGÍA PARA EL SEGUIMIENTO MULTITEMPORAL DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS COSTERAS EN ANDALUCÍA A TRAVÉS DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES LANDSAT-TM.

A. Fernández-Palacios Carmona y J. M. Moreira Madueño

Servicio de Evaluación de Recursos Naturales. Dirección General de Planificación y Participación. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Pabellón de Nueva Zelanda. Avenida de las Acacias, s/n. Isla de la Cqrtuja. Sevilla, 41092. Tel. (95)4480217. Fax (95)4480222.

J. Ojeda Zújar, E. Sánchez Rodríguez e I. Vallejo Villalta

Departamento de Geografía Física y AGR. Facultad de Geografía e Historia. Universidad de Sevilla. C/María de Padilla, s/n. Sevilla, 41004. Tel. (95)4551366. Fax (95)4551351. E-mail: zujar@obelix.cica.es

RESUMEN.- En el marco del Programa de seguimiento de la dinámica y calidad de las aguas litorales en Andalucía desarrollado por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía se engloban una serie de experiencias a través de las que se pretenden testear las posibilidades de cuantificación de parámetros de calidad del agua utilizando datos de sensores remotos y tomas de muestras sobre el agua. Esta comunicación presenta una serie de reflexiones acerca de la posibilidad de cuantificar los parámetros de calidad del agua a partir solamente de las imágenes de satélite, sin disponer de muestras recogidas simultáneamente. Este método, multitemporal tiene indudable interés para la vigilancia ambiental, pero a su vez presenta una serie de dificultades a las que también se hará referencia.

ABSTRACT.- This paper describes two different approaches to the multitemporal analysis of water quality parameters from satellite images. Some conclusions about the possibility of quantifying water quality parameters from TM images without "in situ" samples are presented, and some of the difficulties are described.

1.- INTRODUCCIÓN

La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, como organismo competente en el control de vertidos al litoral, viene desarrollando desde hace cuatro años una serie de trabajos destinados a la definición de una metodología que permita la cuantificación y cartografía de parámetros de calidad de aguas a partir de imágenes de satélite, mediante un Convenio con el Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional de la Universidad de Sevilla (Ojeda Zújar et al, 1994). El objetivo fundamental es minimizar en lo posible la toma de muestras "in situ" que hasta el momento era la única fuente de información sobre la calidad de las aguas litorales. En realidad, el objetivo inicial y más ambicioso es intentar desarrollar un algoritmo que permita cuantificar parámetros de calidad del agua que sea aplicable en toda la zona litoral de nuestra región y en cualquier fecha. Una vez desarrollado (para lo cual es necesario disponer de datos sobre estos parámetros de calidad del agua obtenidos de muestras tomadas "in situ" de forma simultánea a la adquisición de la imagen), sería posible cuantificar y realizar cartografía de los diferentes parámetros de calidad del agua en cualquier momento sin necesidad de realizar más campañas de muestreo "in situ", con el consiguiente ahorro de tiempo y simplificación del proceso de control y seguimiento de la calidad de las aguas litorales, con la ventaja añadida de proporcionar información continua en el espacio.

En la práctica, este objetivo inicial es imposible de realizar. Tal como ha quedado demostrado en numerosos trabajos (Robinson, 1985), en cada zona litoral los parámetros de calidad del agua tienden a relacionarse entre sí de formas diferentes, influyendo de manera distinta en la respuesta espectral del agua, por lo que las ecuaciones derivadas para la cuantificación de parámetros de calidad del agua tienden a ser específicas y diferentes para cada zona.

Si no se puede conseguir un algoritmo universal, que parece ser una utopía, el objetivo sería al menos definir un algoritmo que permita cuantificar los parámetros de calidad del agua de interés en una zona litoral concreta y en cualquier fecha. El objetivo concreto es entonces definir un algoritmo multitemporal, ya que ello también reduciría bastante la necesidad que existe hasta ahora de realizar campañas de muestreo "in situ" para obtener información sobre la calidad de las aguas que después pueda ser extrapolada espacialmente utilizando una imagen adquirida simultáneamente. De ahí que se especifique que se pretende minimizar "en lo posible" la toma de muestras "in situ": serán necesarias como punto de partida para el desarrollo del algoritmo en cada zona litoral diferenciada, pero no una vez que se haya encontrado la ecuación más adecuada para la cuantificación de los parámetros de calidad del agua en cada una.

2.- METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente trabajo se ha dispuesto de información procedente de tres campañas de muestreo realizadas en la Ría de Huelva simultáneamente a la adquisición de imágenes por el sensor TM embarcado en el satélite Landsat-5. Las fechas, situaciones hidrodinámicas y parámetros muestreados aparecen en la Tabla I, aunque el presente trabajo se centra únicamente en tres de estos parámetros: turbidez, sólidos en suspensión y clorofila a, que han demostrado en trabajos previos ser los que principalmente influyen en la respuesta espectral del agua en este tipo de medios.

Nº MUESTRAS	ESCENA Y FECHA	CONDICIONES DE MAREA	RANGO DE LOS PARÁMETROS ANALIZADOS
27	TM 202-34-3 10/10/89	Altura: 2,69 metros Coeficiente: 0,69 Dif. hora bajamar: -6h 23m	Sólidos susp.: 13,6-80,1 mg/l
22	TM 202-34-3 15/06/93	Altura: 2,57 metros Coeficiente: 0,57 Dif. hora bajamar: +5h 56m	Turbidez. 4,5-33,5 UT Sólidos susp.: 15,2-58,9 mg/l Clorofila a: 1,2-32,1 ppb
39	TM 202-34-3 25/11/94	Altura: 1,44 metros Coeficiente: 0,49 Dif. hora bajamar: -1h 59m	Turbidez. 0,05-25 UT Sólidos susp.: 18,3-55,5 mg/l Clorofila a: 2,05-105 ppb

Tabla I: Datos utilizados en el estudio

La metodología empleada ha sido discutida en trabajos previos (Fernández Palacios et al, 1993, 1994), por lo que aquí sólo se hará referencia a la cadena de procesamiento que se ha seleccionado finalmente como más adecuada para, desarrollar un algoritmo de cuantificación de parámetros de calidad del agua a través de imágenes de satélite, que es la siguiente:

1. Georreferenciar los puntos de muestreo a través de un GPS de forma simultánea a la toma de las muestras.
2. Corrección geométrica de la imagen de satélite, con polinomio de primer grado e interpolación radiométrica por el método del vecino más próximo.
3. Normalización radiométrica de la imagen respecto a la imagen seleccionada como referencia puesto que se van a utilizar en estudios multitemporales (López y Caselles, 1987).
4. Extracción de los valores digitales de la imagen, como medias de ventanas de 3x3 píxeles centradas en el que contiene el punto de muestreo.
5. Análisis de regresión múltiple entre los valores del parámetro de calidad del agua y los extraídos a partir de la imagen en todas las bandas excepto la térmica. Así se obtiene la ecuación que nos permite cuantificar el parámetro de calidad del agua en cuestión a partir de los valores digitales de la imagen.

Frente a una aplicación que podemos llamar "monotemporal", que consiste en derivar una ecuación para cada fecha y parámetro, y que tiene como principal aportación permitir la extrapolación espacial a partir de los datos obtenidos de las muestras, con la cual se consiguen resultados óptimos (coeficientes de correlación muy elevados y errores empíricos reducidos), la aplicación multitemporal se puede realizar de dos formas diferentes, cada una de ellas con sus ventajas y limitaciones:

1. Ecuación derivada a partir de los datos de una sola fecha (Choubey y Subramanian, 1992). Esta aproximación metodológica consiste simplemente en aplicar la ecuación de cuantificación de los parámetros de calidad del agua derivada a partir de los datos de una experiencia concreta a una imagen de otra fecha previamente normalizada. Al disponer de datos tomados "in situ" para todas las fechas, existe la posibilidad de comprobar empíricamente los resultados que produce esta aproximación metodológica, lo cual es su principal ventaja.
2. Ecuación derivada a partir de los datos de todas las fechas. En el análisis de regresión se incluyen los valores de los parámetros de calidad del agua y los extraídos de las imágenes en todas las fechas, dando como resultado una ecuación única para cada parámetro, aplicable en todas las fechas. Su principal ventaja es que, al introducir condiciones más variadas, la ecuación resultante no es específica para una sola situación hidrodinámica, consiguiendo así minimizar el efecto de la variabilidad ambiental. Otra importante ventaja es que se dispone de más valores para realizar el análisis de regresión, por lo que los resultados, aunque se espera que sean menos precisos, son más fiables.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este tipo de trabajos, los resultados que se obtienen y que permiten validar su utilidad son básicamente de dos tipos:

1. Resultados estadísticos o numéricos, que proporcionan por una parte una estimación de la fuerza de la relación que existe entre los valores digitales de las imágenes y los valores de los parámetros de calidad del agua y por otra una estimación del error en la cuantificación de los parámetros de calidad del agua que se introduce mediante el uso de las ecuaciones predictivas.
2. Resultados gráficos: a las imágenes previamente tratadas y convertidas en mapas de los diferentes parámetros de calidad del agua, se les pueden superponer los valores reales de dichos parámetros en cada uno de los puntos de muestreo para evaluar la precisión con que las ecuaciones son capaces de estimarlos, así como la distribución espacial de los errores.

Se discutirán en primer lugar los resultados del primer método multitemporal, y posteriormente los que se consiguen al derivar una única ecuación a partir de los datos de todas las fechas.

3.1.- Ecuación derivada a partir de los datos de una sola fecha.

En general, tanto en los resultados numéricos (Tabla II) como en los gráficos (Figura 1, color) se observa un desacuerdo mucho mayor con los datos reales que el que se suele obtener en los trabajos monotemporales, lo cual era de esperar desde el momento en que los datos de la propia imagen no han intervenido en el desarrollo de las ecuaciones de cuantificación. Aún así, de la comparación de los resultados obtenidos en las diferentes combinaciones ecuación-imagen se pueden obtener algunas conclusiones, como es la indudable influencia de las condiciones hidrodinámicas de las diferentes fechas. Se observa que el error numérico y espacial es menor entre las imágenes del 89 y 93 que cuando entran en el proceso los datos del 94. Al ser similares los rangos de los parámetros en las tres fechas, el factor que parece condicionar ese diferente comportamiento son las condiciones hidrodinámicas, especialmente la fase y el coeficiente de marea, que eran muy similares los días 10/10/89 y el 15/06/93, y bastante distintos para el 25/11/94 (Tabla I).

PARÁMETRO	FECHA IMAGEN	FECHA PARA LA QUE SE DERIVA LA ECUACIÓN	ERROR EMPÍRICO
Sólidos en suspensión	10/10/89	15/06/93	Máximo: 18,3 mg/l Medio: 8,8 mg/l
Sólidos en suspensión	15/06/93	25/11/94	Máximo: 21 mg/l Medio: 9,19 mg/l
Clorofila a	15/06/93	25/11/94	Máximo: 24 ppb Medio: 10 ppb
Turbidez	15/06/93	25/11/94	Máximo: 20,1 UT Medio: 14 UT

Tabla II: Resultados de la primera aproximación multitemporal: algunos ejemplos de los errores obtenidos al aplicar a una imagen las ecuaciones derivadas para otra fecha.

Como conclusión, se observa que los resultados que produce esta aproximación metodológica son inferiores a los que proporciona la monotemporal. Sin embargo, como método para el seguimiento de la calidad de las aguas litorales presenta la ventaja evidente de no necesitar la recogida de muestras de agua simultánea a la adquisición de la imagen. Lo que sí parece ser importante es aplicar a cada imagen una fórmula que haya sido derivada para una situación hidrodinámica parecida a la reinante en el momento de su adquisición, por lo que es posible que no baste con desarrollar una ecuación para cada zona litoral, sino que sea necesario desarrollar una para cada zona y cada una de las situaciones hidrodinámicas más típicas en ella. Por otra parte, como método para la validación de este tipo de algoritmos parece óptimo, ya que permite una comprobación totalmente empírica de los resultados.

3.2.- Ecuación derivada a partir de los datos de todas las fechas.

Los resultados numéricos, tanto los derivados del análisis estadístico (coeficiente de correlación y error standard de la estimación) como los obtenidos de la comprobación empírica a partir de la aplicación de las ecuaciones a puntos de las imágenes que no fueron utilizados en el análisis de regresión, aparecen en la Tabla III. Una muestra del tipo de ecuación resultados gráficos que se han obtenido aparece en la Figura 2 (color).

Como era de esperar, los coeficientes de correlación descienden respecto a los que se obtenían en la aproximación monotemporal, ya que se introducen valores procedentes de situaciones diferentes. Sin embargo, esa introducción de más valores tiene a su vez el efecto hacer más estable la ecuación. El coeficiente de correlación más alto se consigue para la clorofila, un parámetro que presentaba también una correlación muy alta con los datos de la imagen para cada una de las fechas que intervienen. En el otro extremo se sitúan los sólidos en suspensión, cuyos coeficientes de correlación con los datos de las imágenes por separado eran muy variables.

FECHAS QUE INTERVIENEN EN LA ECUACIÓN	PARÁMETRO	RESULTADOS
10/10/89 15/06/93 25/11/94	Sólidos en suspensión	Coef. de correlación = 0,68 Error standard = 8,09 Error empírico máximo = 8,90 Error empírico medio = 4,70
15/06/93 25/11/94	Clorofila a	Coef. de correlación = 0,85 Error standard = 8,60 Error empírico máximo = 13,90 Error empírico medio = 7,50
15/06/93 25/11/94	Turbidez	Coef. de correlación = 0,78 Error standard = 4,14 Error empírico máximo = 5,91 Error empírico medio = 3,21

Tabla III: Resultados multitemporales: ecuaciones derivadas utilizando los datos de todas las fechas.

Las ecuaciones derivadas para la cuantificación de cada uno de los parámetros de calidad del agua a partir de los datos de todas las imágenes son las siguientes (NDi hace referencia a los valores digitales de la imagen, previamente normalizada, en la banda i):

$$SS(\text{mg/l}) = 33.7026 + 3.2425\text{ND3} - 1.1793\text{ND1} + 1.5770\text{ND4}.$$

$$\text{Ca}(\text{ppb}) = -206.318 + 3.747\text{ND1} + 3.014\text{ND2} + 3.732\text{ND7} + 4.657\text{ND5} - 2.253\text{ND3}.$$

$$\text{TU}(\text{UT}) = -159.176 + 4.538\text{ND1} - 3.541\text{ND3} + 3.153\text{ND7} - 2.042\text{ND5}.$$

De la observación de los resultados gráficos obtenidos de aplicar estas tres ecuaciones a las tres imágenes (de los que un ejemplo aparece en la Figura 2), podemos obtener una serie de conclusiones:

- Respecto a los sólidos en suspensión, la aplicación de esta fórmula multitemporal parece producir los mejores resultados sobre la imagen del 94, en la que la distribución real y la estimada a partir de la fórmula coinciden bastante bien. La razón de este mayor ajuste en el 94, cuya situación hidrodinámica es muy diferente a la de las otras dos fechas, es probablemente que en el cálculo de la ecuación predictiva han participado bastantes más puntos de esta fecha que de ninguna otra, ya que la recogida de muestras fue más exhaustiva en esta experiencia.
- En cuanto a la clorofila a, la máxima coincidencia entre los valores estimados por la ecuación y los reales en los diferentes puntos de muestreo se obtiene en la imagen del 93. Ello se debe probablemente a la mayor relación que muestra en esta fecha la clorofila a con la respuesta espectral del agua ($r=0,92$ frente $r=0,73$ para la imagen del 25/11/94).

- En lo que se refiere a la turbidez, el mejor ajuste entre los valores estimados mediante la ecuación multitemporal y los valores reales para los puntos de muestreo se alcanza en la imagen correspondiente a la experiencia del 25/11/94. La razón de este mayor ajuste es probablemente la misma que en el caso de los sólidos en suspensión: el mayor peso relativo de los puntos de esta fecha en el cálculo de la ecuación predictiva.

Como conclusión se puede decir que, aunque los resultados son peores que los obtenidos para la aproximación monotemporal (Fernández Palacios et al, 1993), mejoran claramente los de la aproximación multitemporal con ecuaciones derivadas para una sola fecha. Además, si bien hasta ahora no han permitido la cuantificación sin utilizar datos de muestreos simultáneos a la adquisición de las imágenes, esta fórmula, derivada incluyendo diferentes situaciones hidrodinámicas podría producir resultados aceptables al aplicarla a fechas cuyos valores no hayan intervenido en el cálculo de la ecuación.

4.- CONCLUSIONES

- El análisis de los resultados de las experiencias llevadas a cabo confirman la operatividad de la utilización de las imágenes Landsat TM en el seguimiento de parámetros de calidad del agua con carácter multitemporal.
- De las dos aproximaciones aquí estudiadas ha quedado demostrada (con las reservas propias del escaso número de casos analizados) la mayor precisión de las estimaciones cuando se utilizan ecuaciones derivadas a partir de los datos de varias experiencias cuyas imágenes han sido normalizadas.
- Desde el punto de vista metodológico parece claro que las ecuaciones se estabilizan y reducen notablemente los errores cuando se calculan a partir de un número elevado de puntos. En este sentido se aconseja recoger más de 30 puntos en cada experiencia.
- Como futuras líneas de trabajo para el desarrollo de esta metodología se plantea realizar un análisis mucho más exhaustivo de la fiabilidad de ambas aproximaciones a partir de la realización de nuevas experiencias, incluyendo otras áreas del litoral andaluz que permitan validaciones más profundas mediante la comprobación empírica con puntos no utilizados en las regresiones que serán utilizados para ver la coherencia cuantitativa y espacial de las estimaciones.

Igualmente se sugiere la posibilidad de estudiar métodos más fiables de normalización de las imágenes y establecer ecuaciones apropiadas para cada situación estacional (ecuaciones de verano, invierno, etc.) que ayuden a minimizar los errores.

5.- REFERENCIAS

Choubey, V. K. and Subramanian, V. 1992. Estimation of suspended solids using Indian Remote Sensing Satellite-1A data: a case study from Central India. *International Journal of Remote Sensing*, **13**: 1473-1486.

Fernández-Palacios, A. et al. 1994. Evaluation of different methodological approaches for monitoring water quality parameters in the coastal waters of Andalucía, Spain. *EARSel Workshop on Remote Sensing and GIS for Coastal Zone Management, Delft, the Netherlands*, 24-26 Octubre 1994. pp 114-123.

Fernández-Palacios, A. et al. 1993. Correlaciones entre medidas de calidad de las aguas e imágenes multispectrales Daedalus ATM y Landsat TM. Aplicaciones al litoral de Huelva y Cádiz. Comunicación presentada en la *5º Reunión científica de la asociación española de teledetección*. Las Palmas de Gran Canaria, 10-12 de Noviembre, 1993.

López García, M. J. y Caselles, V. 1987. Un método alternativo de corrección atmosférica. *2ª Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*. Valencia. pp. 163-175.

Ojeda Zújar J. et al. 1994. Programa de seguimiento de la calidad y dinámica del espacio marino y litoral a través de imágenes de satélite. (Andalucía. Agencia de Medio Ambiente). *Revista de Teledetección*. Asociación Española de Teledetección. **3**. pp 9-15.

Robinson, I. S. 1985. *Satellite Oceanography*. Ellis Horwood, Southampton.

Cita bibliográfica:

FERNÁNDEZ, A.; OJEDA, J.; MOREIRA, J.M.; SÁNCHEZ, E. Y VALLEJO, I. 1995. Establecimiento de una metodología para el seguimiento multitemporal de la calidad de las aguas costeras en Andalucía a través de tratamiento de imágenes Landsat-TM. Actas de la 6ª Reunión Científica de la Asociación Española, de Teledetección. 20-22 de Septiembre 1995.

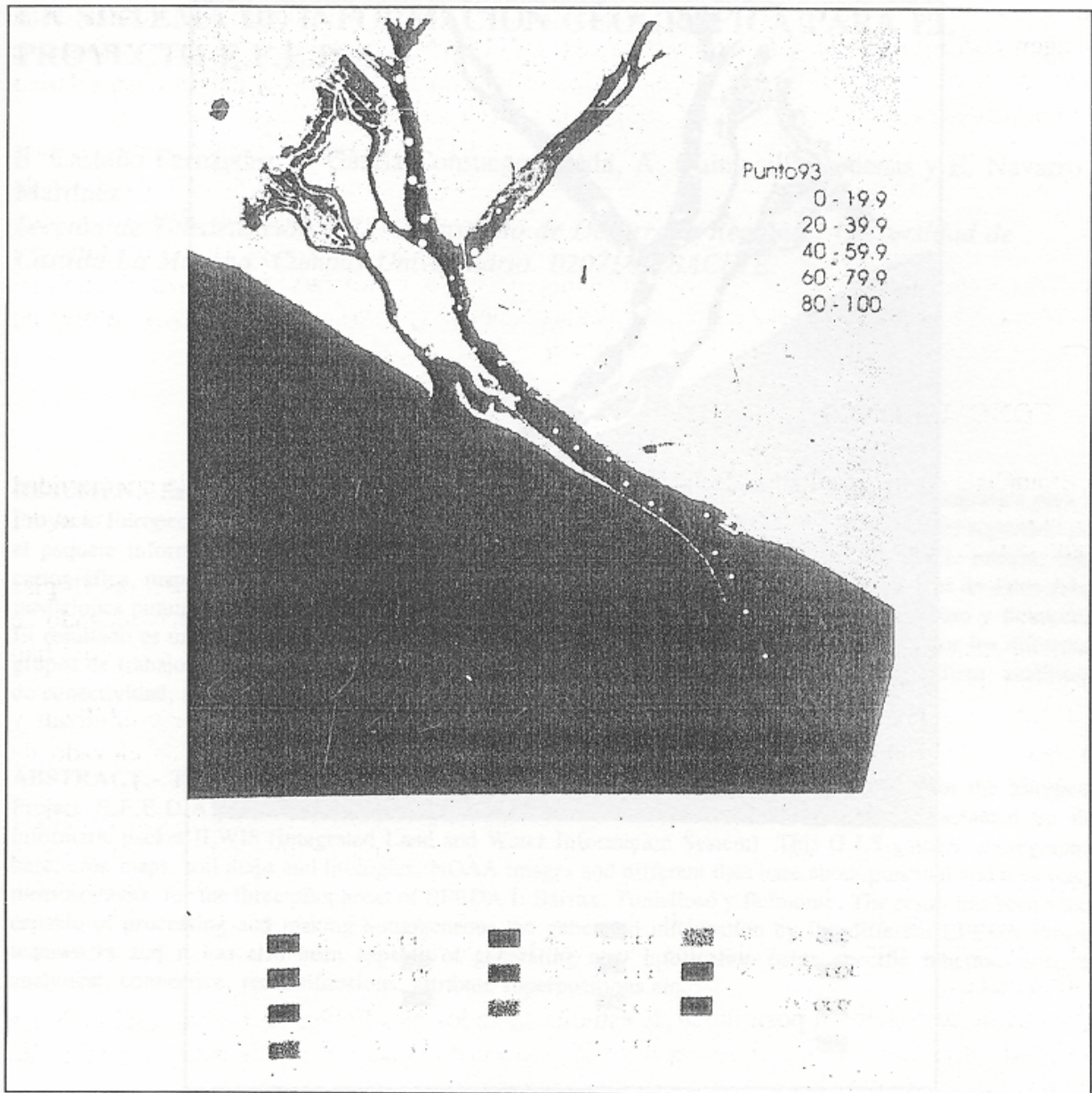


Figura 1.- Distribución espacial de la clorofila a para el 15/06/93. Sobre ella se han representado los valores reales para cada punto de muestreo. (La ecuación empleada para la cuantificación ha sido derivada a partir de los datos de la campaña realizada el 25/11/94) **(C. 29)**

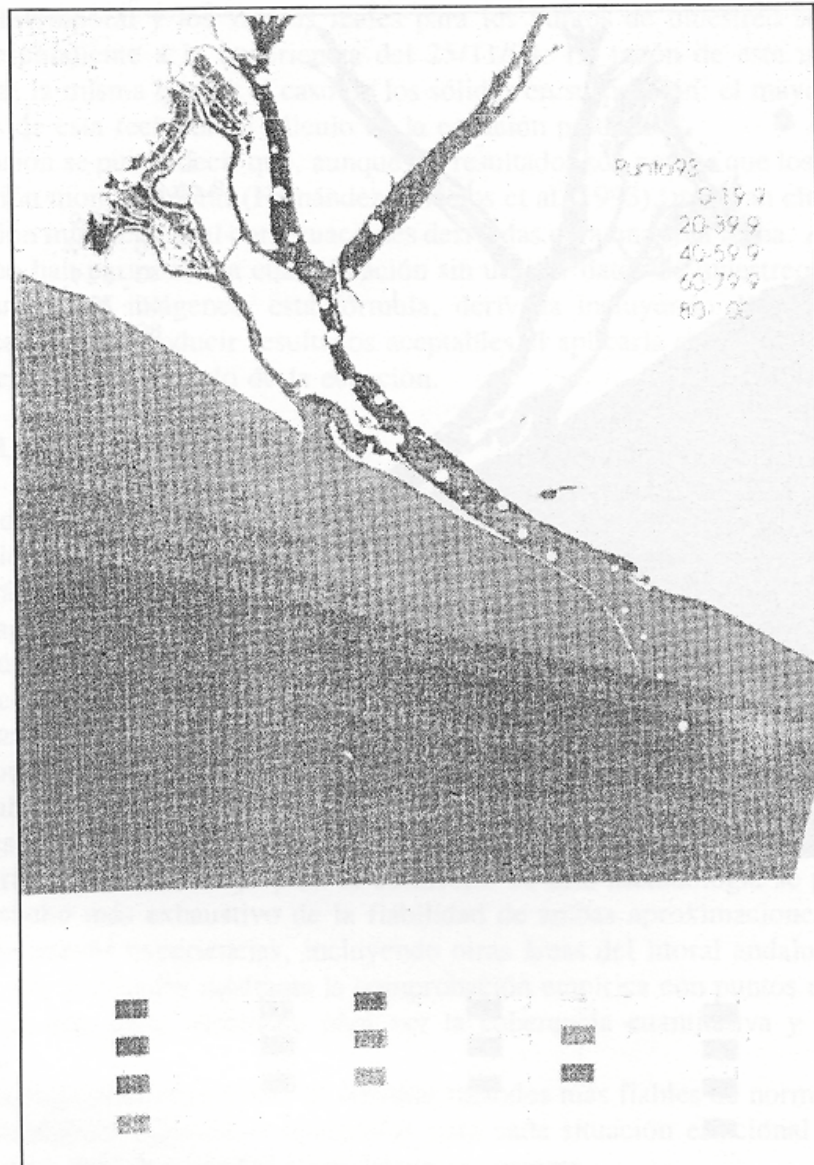


Figura 2.- Distribución espacial de los sólidos en suspensión para el 15/06/93. Sobre ella se han representado los valores reales para cada punto de muestreo. (La ecuación empleada para la cuantificación ha sido derivada a partir de los datos de las campañas realizadas el 10/10/89, 15/06/93 y 25/11/94) **(C. 30)**