

Desarrollo de un modelo predictivo de la calidad de aguas del Mar Menor con técnicas de teledetección

*Javier Gilabert^{1,2} - Alejandro Bel-Lan² - Angel Pérez Ruzafa¹
Victoriano Moreno² - Concepción Marcos¹ - Rufino Barco² - José A. Gómez³*

(1) Departamento de Ecología y Medio Ambiente
Facultad de Biología. Universidad de Murcia

(2) INISEL ESPACIO

(3) Laboratorio de Teledetección

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Madrid

RESUMEN

Se presentan los primeros resultados de una campaña sincronizada aire-mar efectuada sobre el Mar Menor. Las imágenes se obtuvieron con un sensor de configuración similar al CZCS a bordo de un avión. Las muestras de agua y sustrato fueron obtenidas desde embarcación. Se discuten algunos problemas surgidos de la georreferencia de las imágenes y técnicas utilizadas en el tratamiento de las mismas. El coeficiente de determinación (r^2) de los valores de temperatura observados desde el avión y los tomados en el mar fue de 0.90. El mapa temático de este parámetro permite ver el efecto de los vertidos de aguas residuales y el intercambio de agua con el Mediterráneo a través de los canales de comunicación. Se desarrolla un nuevo método capaz de estimar la concentración de clorofila a a partir de los valores de la reflectancia del sustrato.

ABSTRACT

The first results from a flight and samples analysis of water and substrate synchronized in the Mar Menor (SE of Spain) coastal lagoon are shown. The images were obtained from a sensor which spectral configuration was similar to CZCS. Samples from water and substrate were obtained from ship. Some problems arisen from geographic reference and image analysis are discussed. The determination coefficient of temperature observed from airborne and that from water was 0.90. The thematic map of this parameter allows us monitoring effects such as exchange of water from the Mediterranean Sea through its communication channels and waste waters input in the lagoon. A new method developed is able to determine chlorophyll a concentrations in water from substrate reflectance values.

Introducción

La teledetección ha proporcionado evidentes ventajas para el desarrollo de las ciencias acuáticas y la efectiva conservación y mantenimiento de los recursos naturales. Permite medir propiedades de los ecosistemas que tienen una particular expresión en el espectro electromagnético (Smith, 1983; Asrar, 1989) utilizando amplias escalas espaciotemporales de observación (Gower, 1981; Hoobs y Mooney, 1990). Estas ventajas adquieren especial relevancia cuando se aplica a ecosistemas costeros altamente productivos; tales como lagunas costeras, estuarios o zonas húmedas en general. Sin embargo, esta aplicación puede resultar de poca utilidad sin un conocimiento integrado del ecosistema (Roughgarden, 1991).

La información que captan los sensores pasivos multispectrales de las masas de agua es la resultante de una interacción compleja de los efectos que proporcionan cada uno de sus componentes, por lo general, de diferente procedencia. El principal reto que presentan estas aplicaciones, sobre el que se basa su capacidad predictiva, es el de diferenciar la contribución de cada uno de ellos sobre la radiación que emerge del agua y asignarla, cuantitativa y cualitativamente, a cada uno de sus componentes.

En las lagunas costeras confluyen un gran número de intereses: turísticos, ecológicos, paisajísticos, pesqueros o educacionales. Son unos de los ecosistemas marinos más productivos (Odum, 1971; Barnes, 1980), pero, a su vez, son extremadamente sensibles a los cambios ambientales. En ellas resulta necesario evaluar la calidad de las aguas para determinar correctamente el impacto de la actividad humana. El efecto de las perturbaciones ajenas al sistema, de origen tanto natural como antrópico, resulta difícilmente predecible. En este aspecto el Mar Menor constituye un buen ejemplo (Ros, 1987; Pérez-Ruzafa et. al., 1991). Es la laguna costera más extensa de la Península Ibérica y de ella se han estudiado diversos aspectos: geomorfología litoral y submarina (Díaz del Río, 1990), hidrografía (Arévalo, 1988; Pérez-Ruzafa, 1989), comunidades bentónicas (Pérez-Ruzafa, 1989), fitobentos (Pérez-Ruzafa, 1989), producción y crecimiento de las praderas que cubren el fondo (Terrados, 1991), composición taxonómica del fitoplancton (Ros y Miracle, 1984), distribución de tamaños y estructura trófica planctónica (Gilabert et. al., 1990; Gilabert, 1992), ictioplancton y pesquerías (Barcaña, en preparación). De estos trabajos se desprende la necesidad de un conocimiento integrado de la laguna a un nivel de observación que comprenda toda su extensión. Los efectos que producen fenómenos localizados, como el intercambio de aguas con el Mediterráneo o la influencia de los vertidos urbanos o agrícolas, sólo son apreciables a una escala global y la teledetección es la herramienta más idónea para su observación.

El objetivo principal de este trabajo es establecer las bases de un modelo de calidad de aguas de la laguna y proporcionar los primeros resultados del tratamiento de

imágenes multispectrales tomadas desde avión y contrastadas con muestras tomadas simultáneamente desde embarcaciones. En posteriores publicaciones se presentarán los resultados de aspectos más particulares utilizando técnicas de teledetección más específicas en cada uno de ellos.

La observación en diversos ecosistemas con sensores remotos ha permitido estimar con precisión los parámetros de calidad de aguas, tanto en aguas epicontinentales como en aguas costeras, particularmente temperatura, clorofila a (López-García y Caselles, 1990; Peña, 1987), materiales en suspensión (Doerffer et al., 1989) y materia orgánica disuelta. En el Mar Menor estas técnicas fueron también aplicadas por Hernández y Ríaza (1991) con imágenes TM y MESSR, no obstante, su interpretación queda limitada en algunos aspectos al no estar las imágenes contrastadas con muestras de campo.

Las aguas se pueden clasificar según sus propiedades ópticas en: Caso I, cuando el mayor efecto sobre la absorción y dispersión de la luz lo ejercen pigmentos fotosintéticos como la clorofila a; o Caso II, cuando otros materiales influyen en la absorción y dispersión (Prieur y Sathyendranath, 1981). En la reflectancia de aguas Caso I, representadas típicamente por aguas oceánicas, influyen un menor número de elementos que en aguas Caso II, en las que adquiere mayor importancia el efecto de los materiales en suspensión y materia orgánica disuelta -también llamadas sustancias amarillas-.

El aumento de la concentración de clorofila a produce el efecto de cambiar el color del agua pasando del azul al verde. El cambio de las propiedades reflectivas del agua a diferentes longitudes de onda debidas a este pigmento se utiliza para calcular su concentración desde sensores remotos en aguas Caso I (Hovis et al., 1980; Gordon y Morel, 1983 para una revisión). También se han elaborado algoritmos para determinar la concentración de materiales en suspensión cuando esta covaría con la concentración de clorofila (incluyendo la de feopigmentos como feofitina a, no distinguibles por los sensores). En cambio, en aguas Caso II, donde la señal es algo más compleja, estos varían independientemente de la clorofila -cuando son aportados por otras vías diferentes a la planctónica tal como ocurre por ejemplo en zonas estuáricas-, los algoritmos no proporcionan resultados satisfactorios. La cuestión no resulta sencilla de resolver porque la absorción y reflexión de la luz por el material particulado también depende ampliamente de su composición y tamaño (Tassan y Sturm, 1986). Los análisis de cromaticidad se presentan como una solución alternativa (Lindell et al., 1986; Gallie y Murtha, 1993), pero, no obstante, todavía resulta necesario aplicarlos a un mayor número de ecosistemas y determinar su sensibilidad en rangos de concentraciones relativamente pequeños. El problema también se complica cuando la concentración de sustancias amarillas varía (Bricaud y Morel, 1981; Ferrari y Tassan, 1992).

En las masas de agua someras se encuentra un problema adicional por el efecto de la reflectancia del sustrato. El efecto que éste produce sobre la reflectancia que emerge del agua depende linealmente del tipo de sustrato y exponencialmente de la profundidad (Z) y del coeficiente de extinción de la luz (K) en la columna de agua. El poder de penetración de la luz en el agua es inversamente proporcional a la longitud de onda (Jerlov, 1976) pero está fuertemente influido por los elementos que la componen, particularmente el fitoplancton.

Existen métodos capaces de resaltar las diferencias en la reflexión del sustrato. Lyzenga (1981) estimó un índice de reflectancia basado en una relación entre los coeficientes de extinción de la luz a dos longitudes de onda. Al enfrentar el \ln de la reflectancia de dos bandas espectrales para una misma masa de agua, se encuentra que los puntos se sitúan en torno a líneas rectas paralelas que corresponden a diferentes tipos de sustrato. La pendiente de las rectas resultantes es un cociente entre K_j y K_1 , donde los subíndices indican las longitudes de onda enfrentadas. Este método no puede proporcionar valores absolutos de la reflectancia. Recientemente se ha elaborado otros métodos (Bierwirth et al., 1993) que, a partir de las relaciones de Jerlov (1976) y Jupp (1988), hacen depender el valor de la reflectancia del sustrato únicamente del coeficiente de extinción de la luz y de la profundidad. Estos parámetros pueden obtenerse a partir de la información del sustrato, pero su aplicación a ecosistemas con características peculiares requiere hacer asunciones que restan precisión a los resultados.

El objetivo del proyecto que en este artículo se presenta es obtener un modelo que permita visualizar los parámetros de calidad de aguas del Mar Menor. Nuestra propuesta es deducirlos a partir de la reflectancia del sustrato. El hidrodinamismo y la batimetría de la laguna sugieren una heterogeneidad espacial relevante, especialmente en la distribución de la clorofila a . La resolución espacial y espectral que proporcionan los diferentes sensores a bordo de satélites resulta actualmente un factor limitante para visualizar estos parámetros a escala global. La influencia del intercambio con el Mediterráneo a través de los canales de comunicación o el de los vertidos, tanto urbanos como agrícolas, sobre la total extensión de la laguna son sólo apreciables cuando aumenta la resolución. Para la obtención de las imágenes se utilizó un sensor Daedalus configuración CZCS (Coastal Zone Color Scanner) a bordo de un avión TR12A-S del Escuadrón 403 del Centro Cartográfico del Ejército del Aire sobrevolando a una altura de 2.743 m. para obtener una resolución de 6.8 x 6.8 m. por píxel. Se tomaron muestras simultáneamente desde embarcación en seis estaciones de muestreo. Esta primera campaña sincronizada aire-mar nos permitirá localizar los principales problemas a resolver y diseñar un plan de trabajo para la consecución de los objetivos del proyecto contemplando las fuentes potenciales de error y variabilidad de las medidas.

También se han descrito métodos para deducir la batimetría a partir de los datos multiespectrales (Nordman et al., 1990; Bierwirth et al., 1993). A través de estudios multitemporales estos algoritmos pueden ser de gran utilidad para visualizar cambios resultantes de procesos a medio plazo, tal como puedan ser la colonización por algas y macrófitos de los diferentes tipos de fondos, o procesos a más largo plazo como la velocidad de colmatación de la laguna.

Metodología

Lugar del estudio

El Mar Menor es en extensión la mayor laguna costera del litoral ibérico. Está situada entre los 37°38' y 37°50' de latitud N y los 0°42' y 0°52' de longitud O. Su superficie es aproximadamente de 135 km² y su profundidad media se sitúa entre 3 y 4 m., la máxima es de 6,6 m. Pueden diferenciarse tres tipos de sedimentos en la laguna: fangosos, arenosos y los constituidos por arcillas de origen terrígeno. Los primeros cubren la mayor parte de la zona central de la cubeta y las áreas someras con escaso hidrodinamismo. Los arenosos ocupan los márgenes de la cubeta y las ensenadas de las islas. La vegetación de los sedimentos blandos está compuesta de *Caulerpa prolifera* formando densas praderas monoespecíficas a profundidades mayores de 2 m. Por lo general los fondos de arena, situados entre 1,5 y 2 m., están cubiertos de praderas mixtas *Cymodocea nodosa* y *C. prolifera*.

El tiempo de residencia de las aguas se estima entre 1 y 2 años. Su salinidad es más elevada que la del Mediterráneo y oscila a lo largo del año entre 41 y 45‰. Su hidrodinamismo está forzado por las diferencias del nivel del mar con el Mediterráneo y los vientos dominantes. Cuando estos soplan con cadencias cortas e intensidades fuertes mantienen sedimentos en suspensión y se aportan nutrientes a la columna de agua que favorecen una mayor biomasa de fitoplancton. Estas circunstancias caracterizan un tipo de aguas más turbias, con mayores concentraciones de materiales en suspensión y clorofila *a* -se han observado cambios desde una concentración media de 0.5 a 4 ug-L⁻¹ (Gilabert, 1992) y un consecuente aumento del coeficiente de extinción de la luz. Estas características, que son típicamente estivales y se prolongan aproximadamente desde julio a finales de septiembre, proporcionan una estructura trófica planctónica propia de aguas mesotróficas. Por el contrario en el invierno, exceptuando los días de tormentas que son relativamente escasos, la ausencia de vientos fuertes y constantes hace que la resuspensión sea mínima y la concentración de nutrientes disminuya. En estos períodos, conocidos como *fases de aguas limpias*, suelen encontrarse densidades relativamente altas de organismos filtradores, fundamentalmente copépodos, que impiden un elevado crecimiento del fitoplancton.

Obtención de imágenes

La toma de imágenes desde avión se efectuó el día 25 de noviembre de 1992 desde las 11.30 a las 13 horas cubriendo el área de estudio con cinco pasadas, dos de ellas en dirección Norte-Sur y las otras tres en dirección Sur-Norte. El día estuvo despejado y la mar en calma. Las características técnicas del vuelo y la resolución espectral del sensor se resumen en la tabla 1.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VUELO	
Altura de vuelo	2.743 m.
Velocidad de vuelo respecto terreno	140 kt.
Velocidad de barrido	12.5 r.p.s.
Resolución en el nadir	6,88 m.
Cobertura transversal	5.127 m.
Solape longitudinal	16%
Solape transversal	3040
Field of View (FOV)	85.92°
Instantaneous Field of View	2.5 mrad
Configuración espectral	CZCS 3-5 μm / 8.5-13 μm
Número de pasadas	5
Longitud aproximada de las pasadas	15 km
Corrección de roll	automática
Corrección de deriva	automática

Banda	CONFIGURACION ESPECTRAL		
	Rango de Longitudes de onda (μm)		
1	0.42	-	0.45
2	0.45	-	0.52
3	0.52	-	0.60
4	0.60	-	0.62
5	0.63	-	0.69
6	0.69	-	0.75
7	0.76	-	0.90
8	0.91	-	1.05
9	1.55	-	1.75
10	2.08	-	2.35
11	8.50	-	13.00

TABLA 1

Características técnicas del vuelo y configuración espectral del sensor utilizado para la obtención de las imágenes

Obtención y análisis de muestras

Durante el mismo día se tomaron muestras de agua subsuperficial (aproximadamente a 2,0 m. de la superficie) desde una embarcación entre las 10.15 y las 16.30 h. Las estaciones de muestreo se localizaron tomando los rumbos con respecto a cinco puntos en tierra firme con sextante (Fig. 1). En la estación E3 se tomaron muestras también a cada metro de profundidad para obtener un perfil de distribución vertical de cada uno de los parámetros. La temperatura del agua y la concentración de oxígeno disuelto se midió con un sensor Orbisphere 2607 previamente calibrado. Una muestra de 250 ml. de agua se mantuvo en frasco con cierre hermético hasta la determinación de la salinidad con salinómetro Beckman RS 7B tres días después de la campaña. Las muestras para la determinación del contenido de nutrientes se almacenaron a -20°C hasta el análisis la semana posterior a la campaña. Se midió el contenido en nitritos con el método de Bendschneider y Robinson (1952) tal como se indica en Parsons et al. (1984), el de nitratos con columna reductora (Morris y Riley, 1963) y el de fósforo reactivo soluble en forma de ortofosfato según el método de Murphy y Riley (1962). Todas las muestras para el análisis de nutrientes fueron previamente filtradas por filtros de fibra de vidrio Wathman GF/C. La cantidad de materiales en suspensión se determinó filtrando 250 ml. de agua por filtros Wathman GF/C de 250 mm. de diámetro previamente mantenidos durante 2 horas a 60°C en estufa y pesados en balanza de precisión. Para determinar la concentración de clorofila a se utilizó el método fluorométrico de Yentsch y Menzel (1963) con extracto de acetona utilizando un espectrofluorómetro Kontron. Los valores se dan en % de fluorescencia relativa.

Cobertura y biomasa vegetal que cubre el fondo

Buceadores con escafandra autónoma midieron la profundidad con profundímetro e identificaron el porcentaje de cobertura del fondo de cada una de las especies presentes sobre una superficie de 1 m². Las muestras que se tomaron para determinar la biomasa vegetal fueron tamizadas previamente *in situ* con un tamiz de luz de malla de 0,5 mm. En el laboratorio se separó la biomasa animal y la fracción vegetal se mantuvo durante 24 horas a 400°C para ser pesada posteriormente con balanza de precisión.

Procesado de las imágenes

Como una primera aproximación en el tratamiento de las imágenes, y tras la correcta situación geométrica de las estaciones de muestreo, se utilizaron únicamente técnicas que involucran procesos aritméticos con los valores radiométricos. Las imágenes fueron suministradas en CCTs con ficheros separados para cada pasada y cada banda. A estos ficheros no se les aplicó previamente tratamiento ninguno para corregir la distorsión panorámica de las zonas más alejadas a derecha e izquierda del nadir. Este efecto queda corregido cuando se georreferencian las imágenes (Baker y Mikhail, 1975). Se estimó que omitiendo el primer proceso se obtendrían los valores más exactos de la radiancia que emerge del agua, dado los márgenes relativamente pequeños que se obtienen.

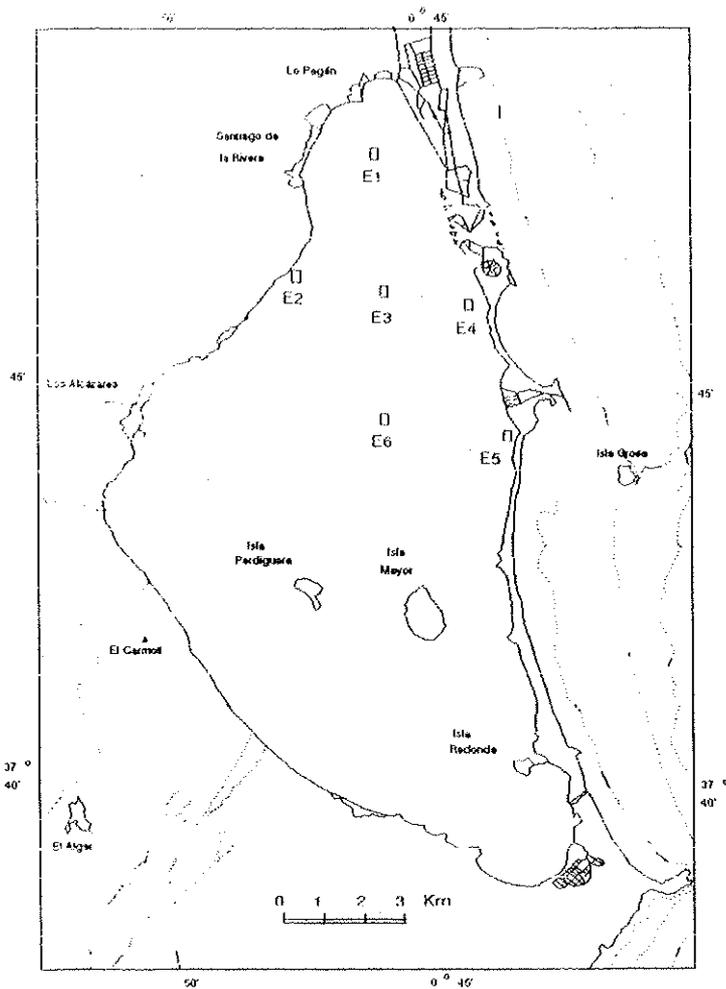


FIGURA 1
Localización del Mar Menor y de las estaciones de muestreo

No se aplicó corrección atmosférica ninguna asumiendo que su efecto es reducido y homogéneo en toda la zona. El área observada por el sensor cubre en este caso una superficie relativamente pequeña, de 135 km², y la altura de vuelo fue de 2.743 m.

La reflectancia equivale a la tasa entre la radiancia emergente y la irradiancia total. En este caso particular es también posible asumir que la irradiancia total no varía de un punto a otro de la laguna dado que el tiempo de vuelo es reducido. Resulta entonces una proporcionalidad entre radiancia y reflectancia que permite considerar

la reactividad como un valor proporcional al registrado por el sensor. La ganancia de éste se mantuvo constante para cada banda.

Para obtener las imágenes georreferenciadas se construyeron ficheros multispectrales de cada pasada. La georreferencia se realizó sobre una imagen SPOT P nivel 1A georreferenciada previamente (Bel-lan, 1993) con polinomios de tercer grado y un RMS de 17 m.

La utilización de imágenes SPOT georreferenciadas como base para la fusión de imágenes obtenidas con diversos sensores facilita la operación de corrección y, en casos donde se tienen superficies de cierta entidad como en la zona de agua, sin puntos de referencia, permite aumentar los GCPs para conseguir resultados más satisfactorios.

La corrección se realizó utilizando polinomios de tercer grado con interpolación por el vecino más próximo y con un RMS similar que se usó para la imagen SPOT. Con esta técnica no varían los valores radiométricos originales situándose los pixels correctamente respecto a una proyección cartográfica (UTM).

También se encontró una ligera diferencia de brillo entre las pasadas debida fundamentalmente a los pequeños cambios de orientación que no son apreciables por los mecanismos de control del avión. Esta diferencia de brillo fue eliminada una vez georreferenciadas las imágenes y antes de componer el mosaico mediante el siguiente procedimiento: 1) se calculó la mediana de una fracción de la imagen de 200 columnas por 250 líneas tomada de la zona de solapamiento entre cada par de pasadas adyacentes en la que no se apreciaba tierra firme para cada una de las bandas, 2) se calculó la diferencia de la mediana entre cada una de las pasadas y la mínima de las medianas, respectivamente, para cada banda y 3) se restó a cada pasada un valor constante equivalente a la diferencia de medianas, también respectivamente, para cada banda.

Las estaciones de muestreo se situaron sobre las imágenes en los puntos determinados por los rombos tomados en la embarcación para cada una de ellas. La localización de las estaciones más próximas a la costa fue situada con mayor precisión contrastándose con otros parámetros como la profundidad y tipo de fondo y añadiendo además otra información como la distancia a determinados puntos de referencia en la costa.

Mapa temático de temperatura

Los mapas temáticos de temperatura superficial del agua fueron elaborados utilizando el canal 11 en el infrarrojo térmico (8.50 - 13.00 μm).

donde M es la tasa de aumento de la reflectancia del sustrato para la banda j . C la concentración de clorofila a y los subíndices 2 y 1 hacen referencia a los puntos de mayor y menor concentración de clorofila respectivamente utilizados en la corrección.

El valor de M depende de la profundidad. Esta dependencia puede ser formulada describiendo el ajuste entre ambos valores. Para ello se utilizó el ajuste por mínimos cuadrados entre los algoritmos de M y Z para los puntos a partir de los que se deduce K . La ecuación resultante adquiere la forma

$$M = a Z^b \quad (4)$$

donde a y b son constantes y Z es conocida, aunque también puede ser derivada de los valores de R_{cj} según la formulación de Bierwirth et al. (1993). Conociendo el valor de la reflectancia que emerge del agua y la concentración de clorofila de dos puntos de la laguna es posible entonces obtener un mapa temático de clorofila a .

Resultados

Georreferencia

Como se ha comentado anteriormente, a los ficheros originales de las imágenes no se les corrigió previamente el efecto de la distorsión panorámica.

El RMS obtenido una vez situados los GCPs se mantuvo entre 18 y 36 m. Se llegó a obtener un RMS menor en aquellas pasadas efectuadas sobre una mayor porción de tierra firme, puesto que se pudieron situar más puntos y distribuirlos más homogéneamente. Las mayores dificultades en la composición del mosaico se encontraron en la pasada que contiene una franja amplia del Mediterráneo donde no se pudieron situar GCPs en el mar.

Parámetros ambientales y biológicos tomados en el mar

La tabla 2 resume los parámetros obtenidos de las estaciones de muestreo. En la parte inferior se detallan los valores obtenidos del perfil vertical realizado en la estación E3 a las 12.30 h. Este perfil sugiere un estado de mezcla en la columna de agua a excepción de la interfase plancton-bentos que constituye un microambiente peculiar.

*Desarrollo de un modelo predictivo de la calidad
de aguas del Mar Menor con técnicas de teledetección*

COBERTURA DEL SUBSTRATO

Estaciones	Peso Seco Veg. (gr. 400 cm-2)	Especie	Cobertura (%)
E1	4.0372	Caulerpa prolifera	100
E2	6.7695	<i>Chaetomorpha</i> imulm	90
E3	10.5322	Caulerpa prolifera	100
E4	18.7700	Chaetomorpha Caulerpa	50
E5	10.6753	Caulerpa prolifera	100
E6	17.1415	Caulerpa prolifera	100

PARAMETROS AGUA ESTACIONES SUPERFICIALES

Ests.	Prof. (m)	Temp. (°C)	Sal. (‰)	Oxig. (mg/L)	Nutrientes (lg-atm/L)			M.S (mg/mL)	Clorofila a (% frei.)
					NO ₃	NO ₂	PO ₄		
E1	4	15.7	43.235	9.48	0.35	0.00	0.05	0.07	128.4
E2	1.4	15.3	44.112	10.18	6.11	0.00	0.03	0.10	141.8
E3	5	16.4	44.280	9.66	0.48	0.00	0.10	0.07	154.8
E4	1.8	15.8	41.801	9.76	0.22	0.00	0.05	0.08	112.5
E5	1.5	15.9	43.476	9.75	2.15	0.00	0.07	0.09	98.5
E6	6	16.1	44.320	9.76	0.28	0.00	0.03	0.09	86.4

PERFIL VERTICAL ESTACION E3

Ests.	Prof. (m)	Temp. (°C)	Sal. (‰)	Oxig. (mg/L)	Nutrientes (lg-atm/L)			M.S (mg/mL)	Clorofila a (% frei.)
					NO ₃	NO ₂	PO ₄		
E3-0	0	16.4	44.280	9.66	0.48	0.00	0.10	0.07	154.8
E3-1	1	16.2	44.269	9.76	0.31	0.00	0.11	0.09	106.3
E3-2	2	16.1	44.262	9.85	0.07	0.00	0.11	0.10	124.9
E3-3	3	16.1	44.269	9.88	.13	0.00	0.05	0.09	145.2
E34	4	16.1		9.85					
E3-F	5	16.6	44.482	9.87	1.18	0.00	0.07	0.09	270.7

TABLA 2

Datos del medio obtenidos en la campaña de campo: cobertura del sustrato, parámetros del agua en las estaciones superficiales y perfil vertical de la estación E3

La temperatura permanece ligeramente mayor en la capa de agua más profunda debido a la inercia térmica de la laguna. En las primeras horas del sol la superficie comienza a calentarse tras el enfriamiento de la noche. La capa más profunda todavía mantiene parte del calor acumulado durante el día anterior. La salinidad de esta capa de agua es algo mayor impidiendo la tendencia ascendente de las aguas que tienen una mayor temperatura. En este ambiente, donde la concentración de nitratos resulta comparativamente elevada ($1.18 \mu\text{g-atm-L}^{-1}$) se favorece la presencia de células fotosintéticas, tales como diatomeas y algas epífitas, que proporcionan a estas aguas unos valores de clorofila *a* sensiblemente superiores a las de las capas más superficiales. Los valores de oxígeno disuelto mantienen una gradación con la profundidad debido a la acción fotosintética de la pradera que cubre el fondo. Los días previos a la toma de muestras no hubo vientos fuertes y consecuentemente la resuspensión de sedimentos no fue grande, tal como lo indican las concentraciones de materiales en suspensión, tanto en el perfil como en las demás estaciones. Por el mismo efecto de inercia térmica las estaciones de muestreo superficial se mantiene una temperatura ligeramente más elevada en las estaciones situadas en la parte central de la cubeta que tienen una mayor profundidad.

Para el Mar Menor se ha sugerido que el factor limitante del crecimiento para el fitoplancton es el nitrógeno en lugar del fósforo (Gilabert, 1992). El hecho de que en la estación E2 se encuentre la mayor concentración de nitratos ($6.11 \mu\text{g-atm L}^{-1}$) también indica una mayor presencia de células fotosintéticas. La concentración de clorofila *a* para esta estación es la más elevada (a excepción de la que se observa en la capa más profunda de la estación E3) y consecuentemente el valor de oxígeno disuelto también se eleva ($10.18 \mu\text{g-atm-L}^{-1}$). La cobertura vegetal del sustrato en este punto es en un 90% de alga filamentososa *Chaetomorpha linum*, propia de ambientes eutróficos. La temperatura es la mínima registrada a pesar de que la estación está situada en una zona somera. Estos parámetros definen la influencia de vertidos en la estación E2, próxima a una fuente de emisión.

Mapa temático de temperatura superficial

El coeficiente de determinación de la regresión entre el log(ND) y el log de la temperatura de las seis estaciones de muestreo fue de 0.90 (Fig. 2). La fotografía IA representa la zona más al norte de la laguna donde se pueden observar las salinas de San Pedro del Pinatar y las golas (o canales someros de comunicación con el Mediterráneo). El color rojo más intenso representa la temperatura más elevada y los colores verdosos y azul celeste temperaturas menores. La fotografía IB pone de manifiesto que la cubeta sur, cuyo tiempo de residencia del agua es mayor que el de la cubeta norte, mantiene una temperatura sensiblemente más elevada que ésta. Habitualmente se encuentran diferencias también en la salinidad entre las dos cubetas del orden de un 1,2‰. La temperatura del Mediterráneo es ligeramente superior como se mues-

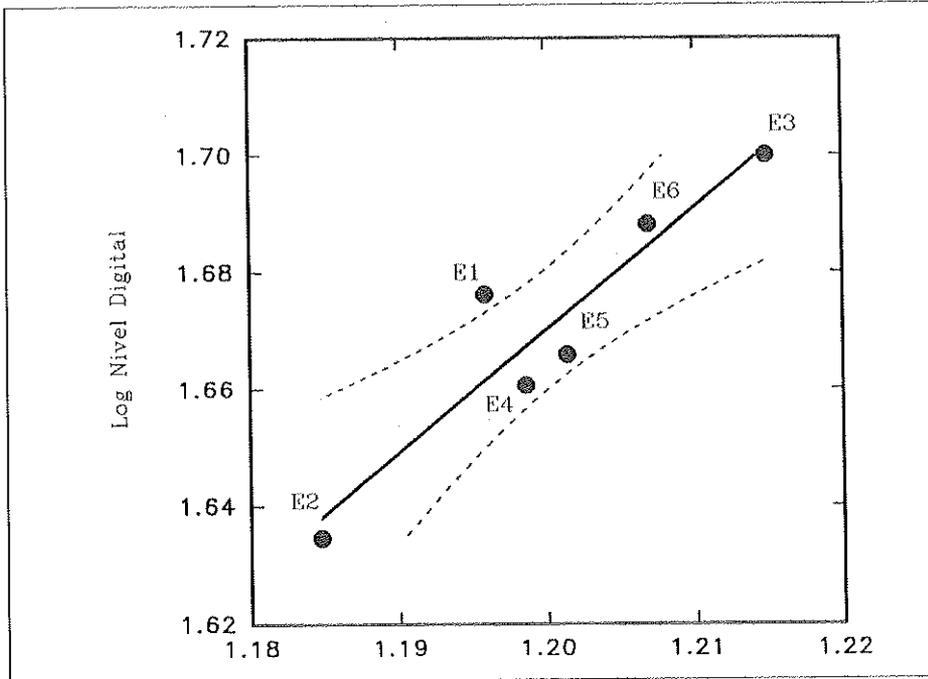
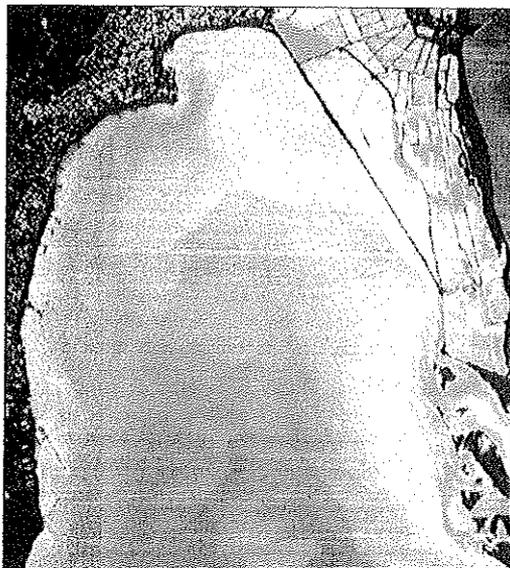


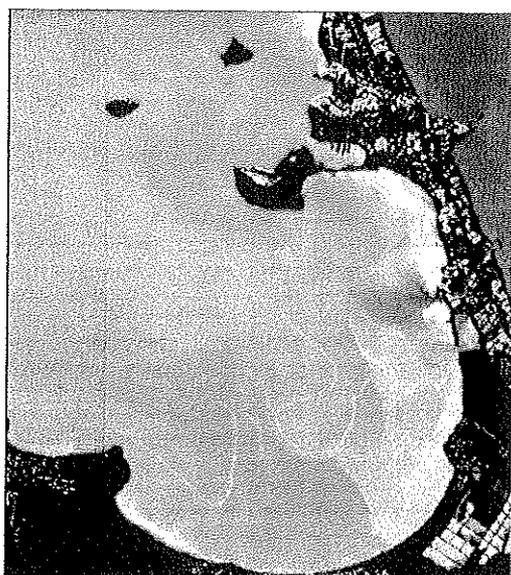
FIGURA 2

Regresión entre los log del nivel digital en la banda II y la temperatura media en el agua.
La línea de trazos representa el límite de confianza al 95%.
Los puntos representan las estaciones de muestreo

tra en las fotografías IB y IC donde se puede apreciar la influencia del intercambio de agua con la laguna a nivel superficial. En IB se puede observar la pluma de influencia directa del Mediterráneo sobre el Mar Menor a través de la gola de Marchamalo. La progresiva colmatación de esta gola hacía pensar que su influencia en la cubeta sur no merecía especial atención. Esta imagen sugiere que posibles cambios en su morfología tendrían repercusiones importantes en esta zona. La fotografía IC es un detalle del canal de El Estacio que constituye la principal vía de comunicación con el Mediterráneo. En la actualidad presenta una sección aproximada de 8 x 4 m. En la fotografía ID se puede apreciar una de las zonas de influencia de vertidos donde se situó la estación E2.



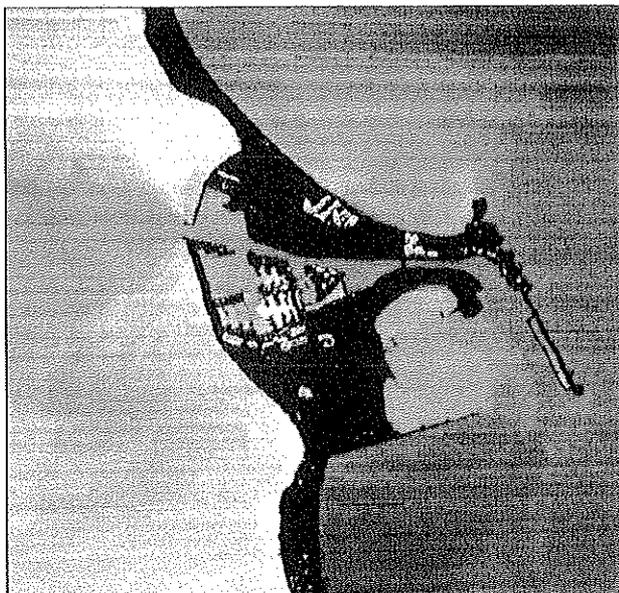
A) Zona Norte. (A. 19)



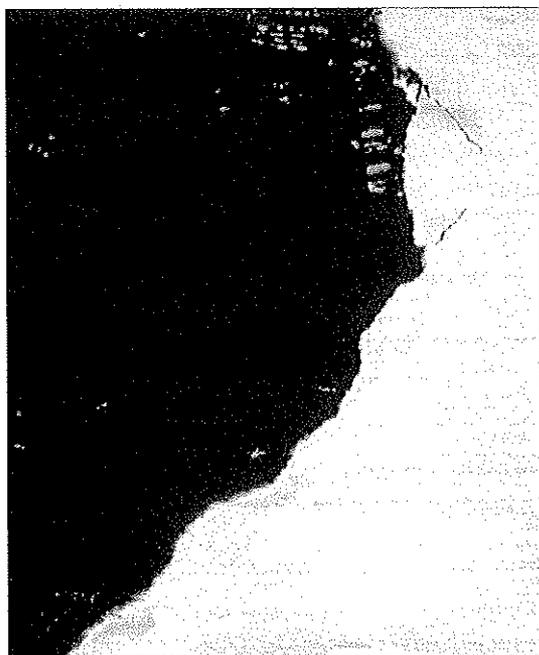
B) Zona Sur. (A. 20)

FOTOGRAFIAS

Detalle del mapa temático de temperatura de algunas zonas del Mar Menor



C) Canal de El Estacio. (A. 21)



D) Ribera de la zona frente al Aeropuerto de San Javier. (A. 22)

Estima del coeficiente de extinción de la luz, reflectancia del sustrato y clorofila a

El efecto de la absorción y dispersión de la luz por la clorofila se utiliza en los algoritmos que estiman la concentración de clorofila a en el océano (Hovis et al., 1980). Las longitudes de onda que detectan estos cambios se centran en 443, 520, 560 y 670 nm. En nuestro caso, donde tratamos de deducir la concentración de clorofila a partir de los cambios de color del sustrato debidos a la concentración de este pigmento en la columna de agua, la banda que proporciona resultados más favorables es la que se centra sobre los 560 nm (banda 4). Los valores de K para esta banda, corregidos con los valores de reflectancia de las estaciones E6 y E3, fueron respectivamente 0.438 y 0.682 m^{-1} ($r^2 = 0.78$ y 0.70 también respectivamente; $n = 13$).

La figura 3 (A y B), muestran la relación potencial entre R_s y Z cuando R_8 se calcula con los valores de K obtenidos para las estaciones E6 y E3 respectivamente. Estas relaciones presentan un r^2 de 0.98 y 0.99 respectivamente ($n = 13$).

La formulación resultante para el valor de M fue:

$$M = 5.06 Z^{1.2} \quad (r^2 = 0.99; n = 13)$$

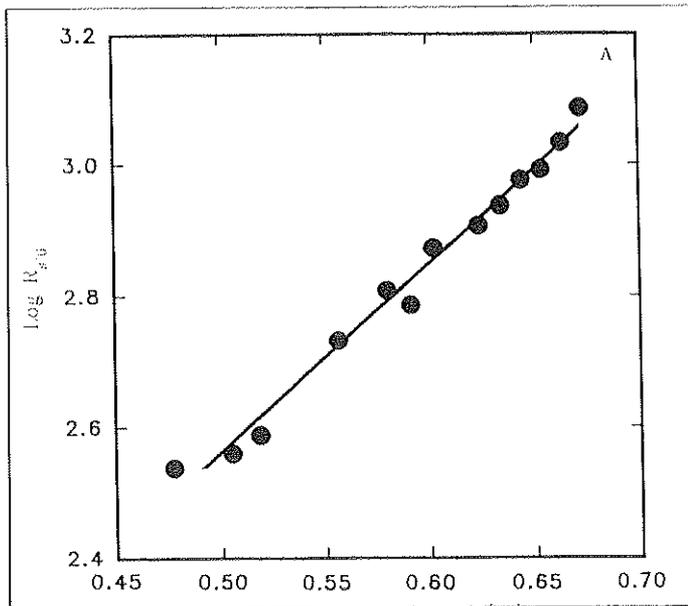
La concentración de clorofila estimada para la estación de muestreo cuya profundidad era menor de 5 m. se obtuvo calculando el valor de R_s^{-1} con el coeficiente de extinción de la estación E6 y multiplicándolo por el valor de M resultante de sustituir Z de cada una de ellas en la expresión (5). El logaritmo de los valores así calculados se enfrentó al de los valores obtenidos en el laboratorio para la clorofila. El coeficiente de determinación de esta regresión resultó de 0.57 (Fig. 4).

Discusión

Los modelos de calidad de aguas han resultado herramientas imprescindibles para el adecuado mantenimiento de aguas interiores y costeras. La adquisición de estos modelos elaborados únicamente a partir de las observaciones obtenidas desde embarcaciones resulta excesivamente costoso e imposible de integrar en una imagen que cubra toda la extensión del ecosistema. Para conseguir este objetivo resulta imprescindible el uso de técnicas de teledetección. Para una correcta interpretación de las imágenes obtenidas con estas técnicas es necesario contrastar los algoritmos utilizados con modelos ópticos de la realidad en el mar.

La principal dificultad que presentan estas técnicas, cuando se aplican a masas de agua, reside en la complejidad de la señal recibida por el sensor que se compone de los efectos no lineales de los diferentes elementos de la masa de agua. Junto con el desa-

A)



B)

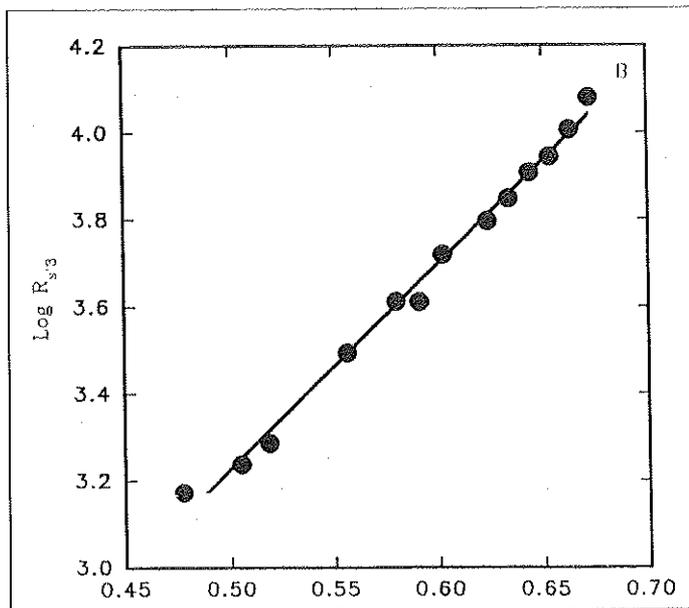


FIGURA 3

Regresiones entre los Log de la reflectancia de substrato a 0 m. y la profundidad.
A) corregido con el coeficiente de extinción de la estación E6. B) con el de estación E3

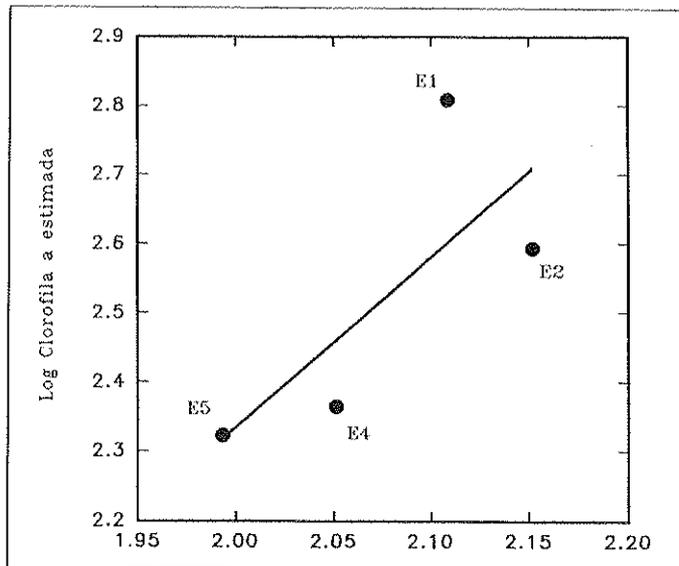


FIGURA 4

Regresión entre los Log de la clorofila a estimada desde el avión y la observada en el mar

rollo de los modelos ópticos resulta imprescindible desarrollar nuevos algoritmos y métodos capaces de discriminar estos efectos a partir de la información multiespectral. Estos algoritmos, no obstante, son en numerosas ocasiones empíricos y para su aplicación a diferentes ecosistemas necesitan ser adaptados a sus características propias.

La aplicación de estos métodos a las aguas someras encuentra la dificultad de la influencia de la profundidad y de la reflectancia del substrato. Algoritmos previamente descritos permiten determinar esta reflectancia. Para calcular la concentración nosotros hemos utilizado únicamente un tipo de substrato, la pradera de *Caulerpa*, en el Mar Menor y sólo hemos trabajado con los valores obtenidos, tanto desde embarcaciones como desde avión, en los puntos de muestreo. En esta ocasión la campaña de campo se limitó a un número reducido de estaciones por lo que algunos de los resultados deben ser interpretados con cierta cautela. No obstante permiten visualizar la tendencia de los datos y han servido para elaborar un método nuevo de calibración a la vez que han aportado información valiosa para el diseño de posteriores campañas.

Recursos potenciales de variabilidad y necesidad de los modelos ópticos

a) Procedentes de la localización de las estaciones de muestreo

Una fuente de error potencial puede derivarse de la georreferencia de las imágenes. Los problemas discutidos anteriormente sugieren la necesidad de utilizar siste-

mas de posicionamiento global (GPS), tanto en la embarcación como en el avión. En el avión resulta particularmente interesante por la posibilidad de situar GCPs en la superficie del mar.

Las estaciones más próximas a la costa fueron situadas conforme a los rumbos obtenidos. Esta situación se confirmó contrastando otros parámetros como la profundidad y el tipo de fondo, además de otra información adicional como distancia a determinados puntos de referencia en la costa. Se considera entonces que la localización de estas estaciones (E2, E4 y E5) tiene un alto grado de fiabilidad. Estas estaciones tienen una profundidad entre 1,4 y 1,8 m. mientras que la de las tres restantes (E1, E3 y E6) oscila entre 4 y 6 m. En las estaciones con menor profundidad la influencia de las corrientes superficiales sobre la interfase planctonbentos puede ser importante, en cambio en las estaciones con mayor profundidad se mantienen unas características más estables. La influencia de esta diferente estructura vertical del agua sobre el color del sustrato no ha sido considerada y puede ser otra fuente potencial de variabilidad en las estimas de clorofila. La desviación que presenta la estación E1 tanto en las figuras 1 como en la 4, sugieren la consideración de una posible desviación en la localización de la muestra. De otra parte, el valor utilizado para cada punto corresponde al valor medio de una matriz de 3 x 3 píxels con el valor de la estación centrado. Esto elimina en parte el posible error de la localización pero también influye en que el valor observado es la integración de una superficie algo mayor de 400 m².

b) Procedentes de la composición del agua

La reflexión de la luz por los materiales en suspensión depende tanto de su composición como de su tamaño y resulta difícil determinar ambos cuando estos son de origen orgánico (por ejemplo Nyquist, 1979). Los valores de peso seco obtenidos en el laboratorio también sugieren la necesidad de un aumento en el número de muestras y en la sensibilidad de las medidas.

El desarrollo de los modelos ópticos ha permitido comprobar la absorción de la luz por las poblaciones de fitoplancton depende de la relación clorofila biomasa y esta, a su vez, de la composición específica y del estado fisiológico. En último término el llamado efecto de empaquetamiento de la clorofila (Kirk, 1983) es el responsable de estas relaciones y ha sido puesta también de manifiesto la relación entre la absorción y el tamaño celular (Agustí, 1991).

Los pigmentos accesorios como carotenoides o ficoeritrinas no suelen ser frecuentemente considerados. Su efecto puede ser relevante y la información que proporcionan sobre el estado trófico de las aguas adquiere especial interés en aguas oligotróficas. La concentración de ficoeritrina (pigmento presente en células fotosinté-

ticas menores de 1 μm de diámetro) suele ser elevada en este tipo de aguas donde se favorece el crecimiento de células de pequeño tamaño configurando una determinada estructura trófica del ecosistema

Un factor determinante para la mejora de los resultados obtenidos es el aumento de los valores de r^2 para K utilizando un mayor número de puntos en la regresión $\text{Log}(R_{\phi})$ vs. Z . Para poder utilizar un gran número de ellos está en elaboración una imagen digital de la profundidad a partir de la información de las cartas náuticas y datos de campo.

También se ha mostrado recientemente la importancia de los organismos heterótrofos en la absorción y dispersión de la luz. El efecto de este elemento deberá ser también considerado en los modelos ópticos para obtener una estima precisa de los parámetros tradicionales de calidad de agua.

En mar abierto la materia orgánica disuelta suele estar compuesta por productos de la exudación de fitoplancton. En aguas sometas donde existen praderas densas puede suponerse que la mayor parte procede de estas. Resulta entonces difícil llegar a evaluar la variabilidad debido a estas sustancias.

Los sensores de observación actuales no permiten determinar la variabilidad que introducen estos parámetros. Sensores experimentales como por ejemplo el AVIRIS y los satélites de nueva generación para observaciones marinas como el SeaWiFS, de mayor resolución espectral en el rango del espectro visible, ofrecen grandes esperanzas de desarrollo en cuanto a métodos basados en datos multiespectrales.

Tratamiento de las imágenes

En este trabajo se ha presentado sólo una primera aproximación al tratamiento de las imágenes. Posteriormente se utilizarán técnicas específicas adecuadas a cada tipo de problema abordado.

Con nuestros métodos resulta evidente la necesidad de localizar y tratar por separado cada tipo de sustrato. Diferencias significativas en éste, como por ejemplo entre arena y pradera, sí quedan en evidencia, pero un estudio más detallado es necesario para determinar si el método es capaz de discriminar entre sustratos relativamente similares como el de la pradera de *Caulerpa* y el de *Chaetomorpha*. Nuestros resultados parecen indicar que es difícil alcanzar esta sensibilidad. No obstante, si este estudio más detallado diera resultados positivos también existiría la capacidad de determinar la variabilidad debida al estado fisiológico de la pradera mediante un estudio multitemporal.

Efectos en los cambios del sustrato, como por ejemplo la colonización de algas o macrófitos o el desplazamiento de masas de algas filamentosas sobre sustratos arenosos, pueden ser visualizados. En el Mar Menor se ha observado una colonización progresiva de *Caulerpa prolifera* desde que en 1973 se ampliara el canal de El Estacio y en ocasiones las masas de *Chaetomorpha linum* quedan a la deriva en las zonas de ribera.

Un proceso natural en las lagunas costeras, que se realiza a escala de siglos, es su colmatación. No obstante este proceso puede ser acelerado por diferentes actuaciones. Un estudio multitemporal de la profundidad a partir de los datos multiespectrales permitiría también un seguimiento de este tipo de procesos.

El efecto de la composición del agua sobre el sustrato sólo puede ser considerado en las zonas cuya profundidad es menor que aquella a la que penetra la luz. Este hecho obliga a un tratamiento por separado de las zonas más somera y las más profundas. En las primeras se estudia el efecto de los componentes del agua a partir de los valores de la reflectancia del sustrato, en las segundas los algoritmos a aplicar se deducirían directamente de los valores de la reflectancia que emerge del agua. En este segundo caso, y en función del estado de las aguas, los análisis de cromaticidad se muestran capaces de determinar el valor de la concentración de materiales en suspensión. Estos análisis se basan en la reflexión de la luz y esta propiedad puede ser útil para discriminar el efecto debido a estos materiales de aquel que proporcionan el resto de componentes de la masa de agua. No obstante estos análisis han sido desarrollados para aguas con un rango de concentración de materiales en suspensión más elevados de los que se suelen encontrar en la laguna y para composiciones cuya procedencia es más bien de origen terrígeno. En nuestro caso donde mayormente son de origen orgánico se requiere previamente probar la validez y sensibilidad de estos métodos. En aguas someras donde se deducen los componentes del agua a partir de la reflectancia del sustrato surge la cuestión de si estos análisis pueden ser utilizados con éxito. La reflectancia del sustrato no se debe únicamente a la absorción de la luz por el mismo, sino que tiene un componente importante de reflexión de la luz. Si este componente se solapa con el de los materiales en suspensión se requeriría una calibración similar a la aquí utilizada para la clorofila *a*.

Conclusiones

En suma, la aplicación de técnicas de teledetección para el mantenimiento de zonas de especial interés ecológico como las lagunas costeras se muestra como una herramienta idónea. El desarrollo de estas técnicas permite localizar y encontrar soluciones a problemas medioambientales a partir de la información multiespectral. No obstante es necesario disponer de una calibración fiable en estos métodos y ésta es

proporcionada por los modelos ópticos de la verdad del mar. El desarrollo de estos modelos y el de nuevos algoritmos para el tratamiento de las imágenes proporcionará una herramienta de gran valor para el mantenimiento y explotación racional de los recursos de la laguna.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo prestado para la realización de este trabajo a INISEL ESPACIO, por las facilidades prestadas en el tratamiento de las imágenes; al Laboratorio de Teledetección del INTA, por la información y discusión sobre el vuelo; al Centro Costero del Mar Menor del Instituto Español de Oceanografía, por su apoyo logístico en la campaña de campo; y al personal del Departamento de Ecología y Medio Ambiente de la Universidad de Murcia que intervino en la campaña. Este trabajo ha sido realizado durante una estancia postdoctoral en INISEL ESPACIO de J. Gilabert con una ayuda para el intercambio de personal investigador entre centros públicos e industrias del MEC. También se ha beneficiado parcialmente del proyecto AM/OM PIB-93/61 de la Comunidad Autónoma de Murcia.

Bibliografía

- Agustí, S.: 1991. Allometric scaling of light absorption and scattering by phytoplankton cells. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 48:763-767.
- Arévalo, L.: 1988. El Mar Menor como sistema forzado por el Mediterráneo. Control hidráulico y agentes fuerza. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* 5(1):63-96.
- Asrar, G.: 1989. Theory and applications of optical remote sensing. John Willey & Sons. New York.
- Baker, J.R. y E.M. Mikhail.: 1975. Geometric analysis and reslilution of digital multispectral scanner data arrays. Laboratory for Applications of Remote Sensing, School of civil engineering, Purdue University, Lafayette, Indiana.
- Barcala, E.: En preparación. Estructura de las comunidades ictiológicas bentónicas del Mar Menor. Bames, R.S.K.: 1980. Coastal lagoons. Cambridge University Press.
- Bel-lan, A.: 1993. Fusión de datos de satélites de observación, ERS-I, cartografía temática y MNTs sobre imágenes SPOT. Jornadas técnicas sobre SPOT. AURENSA y SPOT IMAGE. Madrid. 12 pp.
- Bendschneiter, K. y R.J. Robinson.: 1952. A new spectrophotometric method for the determination of nitrate in seawater. *J. Mar. Res.* 11 :87-96.
- Bierwirth, P.N., T.J. Lee y R.V. Bume.: 1993. Shallow sea-floor reflectance and water depth derived by unmixing multispectral imagery. *PE&RS* 59(3):331 -338.
- Bricaud, A., A. Morel y L. Prieur.: 1981. Absorption by dissolved organic matter in the sea (yellow substances) in the UV and visible domains. *Limnol. Oceanogr.* 26:43-53.
- Díaz del Río, V.: 1990. Estudio ecológico del Mar Menor: GeologLa (proyecto nº 1005 (medio marino)). Inst. Esp. Oceanogr.
- Doerffer, R., J. Fischer, M. Stossel y C. Brockmann.: 1993. Analysis of the Thematic Mapper data for studying the suspended matter distribution in the coastal area of the German Bight (North Sea). *Remote Sens. Environ.* 28:61-73.

- Ferrari, G.M. y S. Tassan.:** 1992. Evaluation of the influence of yellow substance absorption on the remote sensing of water quality in the Gulf of Naples: a case study. In. *J. Remote Sensing*. 13(12):2177-2189.
- Gallie, E.A. y P.A. Munha.:** 1993. A modification of chromaticity analysis to separate the effects of water quality variables. *Remote Sens. Environ.* 44:47-65.
- Gilaben, J.:** 1992. Análisis del ecosistema planctónico del Mar Menor. Ciclo anual distribución de tamaños y red trófica. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Gilaben, J., J. Rodríguez y F. Jiménez-Montes.:** 1990. The planktonic size-abundance spectrum in an oligotrophic hypersaline coastal lagoon, the Mar Menor, Murcia, Spain. En: M. Barnes y R.N. Gibson. (Eds.). *Trophic relationships in the marine environment*. Proc. 24th E.M.B.S. Aberdeen University Press, Aberdeen. pp. 18-27.
- Gordon, H.R. y A. Morel.:** 1983. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. Springer Verlag. New York.
- Gower, J.R.F.:** 1981. *Oceanography from space*. Plenum Press. New York.
- Hernández, M. y A. Ríaza.:** 1991. Estimación de factores del medio marino litoral con imágenes TM y MOS MESSR en el ámbito del Mar Menor (Murcia). En: Moreira, J.M. (Ed.). *Teledetección y medio ambiente*. IV Reun. Soc. Esp. Teledetección. pp. 342-347.
- Hojerslev, N.K.:** 1980. On the origin of yellow substance in the marine environment. Rep. Inst. Phys. Oceanogr. Univ. Copenhagen. 42.
- Hoobs, R.J. y H.A. Mooney.:** 1990. Remote sensing of biosphere functioning. Springer Verlag. New York.
- Hovis, W.A., D.K. Aark, F. Anderson, R.W. Austin, W.H. Wilson, E.T. Baker, D. Ball, H.R. Gordon, J.L. Mueller, S.Z. El-Sayed, B. Stumm, R.C. Wrigley y C.S. YenLsch.:** 1980. Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: System description and initial imagery. *Science* 210:60-63.
- Jerlov, N.G.:** 1976. *Marine optics*. Elsevier. New York.
- Jupp, D.L.B.:** 1994. Background and extensions to Depth of Penetration (DOP) mapping in shallow coastal waters. Symposium on remote sensing of the coastal zone. Queensland.
- Kirk, J.T.O.:** 1981. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystem*. Cambridge University Press.
- Lindell, T., B. Karlsson, M. Rosengren y T. Alfoldi.:** 1986. A further development of the chromaticity technique for satellite mapping of suspended sediment load. *PE&RS* 52(9):1521-1530.
- López-García, M.J. y V. Casell.:** 1990. A multi-temporal study of chlorophyll-a concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data. In. *J. Remote Sensing* 11:301.
- Lyzenga, D.R.:** 1981. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. In. *J. Remote Sensing* 2(1):71-82.
- Nordman, M.E., L. Wood, J.L. Michalek y J.L. Christy.:** 1994. Water depth extraction from Landsat-5 imagery. Proceedings of the Twenty-Third International Symposium on Remote Sensing of Environment. pp. 1129-1139.
- Nyquist, G.:** 1979. Investigation of some optical properties of sea water with special reference to lignin sulfonates and humic substances. Tesis Doctoral, University of Göteborg.
- Morris, A.W. y J.P. Riley.:** 1963. The determination of nitrate in sea water. *Anal. Chim. Acta.* 29:272-279.
- Murphy, J. y J.P. Riley.:** 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta.* 27:319-3614.

- Nichol, J.E.:** 1993. Remote sensing of water quality in the Singapore-Johor-Riau growth triangle. *Remote Sens. Environ.* 43:139-148.
- Odum, E.P.:** 1971. *Fundamentals of Ecology*. Saunders, Philadelphia.
- Parsons, T.R. y Maita y C.M. Lalli.:** 1984. *A manual of chemical and biological methods for sea-water analysis*. Pergamon Press.
- Peña, R. y J.L. Ortiz:** 1987. Cartografía temática de embalses. Aplicaciones limnológicas de las imágenes Landsat. En: N. Clotet y L. Solé (Eds.). I Reunión Científica del grupo de trabajo de Teledetección. Generalitat de Catalunya, Barcelona. pp. 403-424.
- Pérez Ruzafa, A.:** 1989. Estudio ecológico y bionómico de los poblamientos bentónicos del Mar Menor (Murcia, SE de España). Universidad de Murcia. Tesis Doctoral.
- Pérez-Ruzafa, A., C. Mareos-Diego y J.D. Ros.:** 1991. Environmental and biological changes related to recent human activities in the Mar Menor (SE of Spain). *Mar. Pol. Bull.* 23:747-751.
- Pérez-Ruzafa, I.M.:** 1989. Fitobentos de una laguna costera. El Mar Menor. Universidad de Murcia. Tesis Doctoral.
- Prieur, L. y S. Sathyendranath.:** 1981. An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnol. Oceanogr.* 26:671-689.
- Ros, J.D.:** 1987. El Mar Menor: fisiografía y biótica acuática de una laguna hipersalina y su evolución reciente. *Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* 237-256.
- Ros, M. y M.R. Miracle.:** 1984. Variación estacional del fitoplancton del Mar Menor y sus relaciones con la de un punto próximo en el Mediterráneo. *Limnética.* 1:32-42.
- Roughgarden, J., S.W. Running y P.A. Matson.:** 1991. What does remote sensing do for ecology? *Ecology* 72(6):1918-1922.
- Smith, J.A.:** 1983. Matter-Energy interactions in the optical region. En: D.S. Simonett (Ed.). *Manual of Remote Sensing*. American Society of Photogrammetry, Fall Church, Virginia. pp. 61-116.
- Tassan, S. y B. Sturm.:** 1986. An algorithm for the retrieval of sediment content in turbid waters from CZCS data. In *J. Remote Sensing* 7:643-655.
- Terrados, J.:** 1991. Crecimiento y producción de las praderas de macrofitos del Mar Menor Murcia. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia.
- Yentsch, C.S. y D. Menzel.:** 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.* 10:221-231.