



Investigaciones Geográficas (Mx)

ISSN: 0188-4611

edito@igg.unam.mx

Instituto de Geografía

México

Aguirre Gómez, Raúl

Caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez

Investigaciones Geográficas (Mx), núm. 46, diciembre, 2001, pp. 78-97

Instituto de Geografía

Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56904607>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez

Raúl Aguirre Gómez\*

Recibido: 28 de marzo de 2000  
Aceptado en versión final: 18 de abril de 2001

**Resumen.** En este trabajo se muestra la caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez en los periodos de agosto de 1992 y diciembre del mismo año. Esta caracterización se logró mediante la aplicación de un espectroradiómetro, en el que se midió la reflectancia volumétrica  $R(\lambda)$  y el coeficiente de atenuación difusa  $K_d(\lambda, z)$ , desde una pequeña embarcación. Se hallaron zonas con diferencias ópticas mediante un análisis estadístico de cúmulos. Las diferentes zonas ópticas determinadas con esta metodología corresponden a regiones bio-ópticas claramente delimitadas.

**Palabras clave:** Caracterización óptica, reflectancia, lagunas costeras, percepción remota marina.

## Optical characterization of the Coyuca de Benítez coastal lagoon

**Abstract.** This paper describes the optical characterization of the Coyuca de Benítez coastal lagoon during August 1992 and December 1992. Such characterization was achieved by using a spectroradiometer, measuring both the volumetric reflectance  $R(\lambda)$  and the diffuse attenuation coefficient  $K_d(\lambda, z)$  from a small boat. Areas with optical differences were identified through a statistical cluster analysis. The different optical areas identified by this methodology correspond to clearly delimited bio-optical regions.

**Key words:** Optical characterization, reflectance, coastal lagoons, marine remote sensing.

### INTRODUCCIÓN

Las primeras mediciones cuantitativas del color del océano fueron iniciadas con los trabajos de Jerlov (1974), quien definió el "índice de color" como el cociente de la radiancia observada al nadir en la región azul (450 nm) y la observada en la región verde (520 nm) del espectro electromagnético (EEM). Para ello utilizó dos tubos tipo Gershun con filtros de interferencia azul y verde para medir la radiación proveniente de la superficie marina. Posteriormente, Neuymín *et al.* (1982) hicieron un ajuste espectral al índice de color de Jerlov, eligiendo un nuevo par de longitudes de onda: 440 nm (región azul) y 550 nm (región verde). La selección de estas longitudes de onda presenta la ventaja de que el cociente entre ellas es particularmente sensible a la

detección de pigmentos presentes en algas. Por consiguiente, este par de longitudes de ondas se ha utilizado ampliamente en la percepción remota del fitoplancton oceánico.

Bukata *et al.* (1988) diseñaron un radiómetro que podría realizar mediciones ópticas desde una altura de 4.5 m, instalado en la cubierta de las embarcaciones. Con este instrumento se efectuaron mediciones de radianza al nadir en cuatro bandas espectrales, localizadas en las regiones del azul, verde, rojo e infrarrojo cercano y, simultáneamente, se midió la irradiancia solar incidente en las mismas cuatro bandas, por lo que, en consecuencia, fue posible obtener mediciones de sus reflectancias.

En México se han realizado pocos estudios sobre la caracterización óptica de lagos,

\*Instituto de Geografía, UNAM, Cd. Universitaria, 04510, Coyoacán, México, D. F. E-mail: [raguirre@igiris.igeograf.unam.mx](mailto:raguirre@igiris.igeograf.unam.mx)

lagunas o presas (e.g. Lemus *et al.*, 1978), la mayor parte efectuados en las lagunas costeras del estado de Guerrero (Aguirre *et al.*, 1989; Ruiz *et al.*, 1989).

El objetivo de este trabajo es caracterizar espacialmente a la laguna de Coyuca de Benítez en dos temporadas diferentes, a fin de observar su comportamiento reflectivo en condiciones distintas. El primer período de estudio correspondió a la época de lluvias y fue realizado en agosto de 1992. La segunda temporada analizada correspondió a la época de secas en diciembre del mismo año.

La caracterización óptica de la laguna de Coyuca se logró utilizando un espectroradiómetro hiperspectral para medir la reflectancia  $K(\lambda)$  y el coeficiente de atenuación difusa  $K_d(\lambda, z)$ , parámetros indispensables en la caracterización óptica de cuerpos de agua utilizando sensores remotos.

## CONSIDERACIONES TEÓRICAS

La reflectancia volumétrica  $K(\lambda)$  se expresa generalmente en términos de dos propiedades ópticas inherentes al medio: coeficiente de absorción ( $a$ ) y coeficiente de retrodispersión ( $b_b$ ; Preisendorfer, 1960), mediante modelos de transferencia radiativa (Morel y Prieur, 1977; Gordon y Morel, 1983). Los coeficientes  $a$  y  $b_b$  están determinados por las características ópticas del agua marina pura y de las sustancias presentes en ella en cantidades variables. Estas sustancias están divididas en cuatro categorías: a) fitoplancton; b) material detrítico; c) partículas terrígenas y sedimentos resuspendidos; d) materia orgánica disuelta (sustancia amarilla).

En 1977, Morel y Prieur propusieron una relación simple para el cálculo de la reflectancia  $K(\lambda)$  en aguas oceánicas:

$$R \equiv 0.33 \frac{b_b}{a} \quad (1)$$

Sin embargo, el factor 0.33 puede variar en función del ángulo cenital de la luz incidente (Kirk, 1984) y la forma de la función de fase (Gordon *et al.*, 1988). Esta ecuación es válida en aguas donde  $b_b \ll a$ . Datos experimentales y teóricos indican que esta desigualdad se cumple en la mayoría de los casos y que los valores de  $b_b$  decrecen monótonicamente conforme aumenta la longitud de onda (Gordon y Morel, 1983). Ahn *et al.* (1992), al realizar mediciones directas de  $b_b$  en cultivos de fitoplancton, encontraron que en la mayoría de los grupos de algas analizados, el valor de este coeficiente era insignificante comparado con el coeficiente de absorción de los mismos cultivos. Considerando estos elementos, es posible mostrar que las variaciones espectrales en  $K(\lambda)$  reflejan, principalmente, las variaciones espectrales del coeficiente de absorción  $a$  (Aguirre *et al.*, 1999). Sin embargo, en términos operacionales e instrumentales, es sabido que los cambios intrínsecos en el color del mar están determinados por las variaciones espectrales de la reflectancia  $K(\lambda)$  de la superficie marina, la cual puede alternativamente definirse como:

$$K(\lambda) = \frac{E_{u,r}(\lambda, 0)}{E_d(\lambda, 0)} \quad (2)$$

Donde  $E_{u,r}(\lambda, 0)$  y  $E_d(\lambda, 0)$  corresponden a la energía electromagnética incidente en y retro-dispersada por la superficie marina, a longitud de onda  $\lambda$ , y a profundidad  $z = 0$ , respectivamente. La cantidad  $E_{u,r}(\lambda, 0)$  contiene información sobre el agua marina y los materiales particulados y disueltos en ella. Este enfoque es el utilizado en el presente análisis.

Entre los principales objetivos de los estudios sobre el color del océano con técnicas de percepción remota, está el de correla-

cionar la concentración de los diferentes elementos presentes en el agua marina con diversas combinaciones de bandas espectrales usando cocientes y diferencias. Estos algoritmos son las opciones más viables cuando se tienen bandas espectrales poco angostas. Los datos proporcionados por sensores remotos de alta resolución espectral instalados en aviones (e.g. AVIRIS, CASI, MIVIS) pueden servir para generar nuevos algoritmos destinados a analizar las propiedades de absorción del fitoplancton. Alternativamente, esta tarea puede ser realizada usando radiómetros instalados en buques. Los datos provenientes de este tipo de sensores pueden simular aquellos obtenidos mediante sensores instalados en satélites y aviones. El empleo de estos datos es más adecuado, de acuerdo con ciertas circunstancias, ya que, por un lado, proporcionan un nivel de confianza más alto con los parámetros medidos *in situ* y por el otro, los efectos atmosféricos presentes están minimizados. Consecuentemente, las propiedades ópticas *in situ* pueden ser relacionadas con las observaciones de color del océano a través de valores de reflectancia  $K(\lambda)$  en la superficie marina.

El coeficiente de atenuación difusa  $K(\lambda)$  de los cuerpos de agua naturales es un ejemplo de una propiedad óptica que puede ser inferida del color del mar y, por consiguiente, ser percibida por un sensor remoto. Este coeficiente ha sido usado por Jerlov (1976), Smith y Baker (1978), así como por otros investigadores, para clasificar los cuerpos de agua. Este coeficiente posee una gran significación biológica en una variedad de problemas asociados con la penetración de la luz natural en los cuerpos de agua, y es también una variable importante en la evaluación de la propagación de la luz natural y artificial en el agua marina, usando diferentes sistemas de observación.

El coeficiente  $K(\lambda)$  se determina frecuentemente a través de mediciones de perfiles

verticales de la irradiancia incidente. Sin embargo, en el desarrollo de los algoritmos usados en percepción remota, los valores de  $K(\lambda)$  se han asociado con la (ir)radiancia emergente (ascendente). Esto se debe a dos razones fundamentales: a) los coeficientes de la radiación emergente son menos afectados por la "posición solar" y la profundidad de las mediciones y, por consiguiente, pueden estar más estrechamente asociados con las propiedades ópticas del mar; b) debido a que el cambio en la radiación emergente es menor en función del ángulo y a que la variación en el campo luminoso es menos propensa a las fluctuaciones causadas por la refracción de la luz solar en aguas en movimiento, las mediciones de la radiación emergente del campo luminoso y, por consiguiente, de los valores de  $K(\lambda)$ , tienden a ser más precisas.

El uso de técnicas de percepción remota en la determinación de  $K(\lambda)$  implica la existencia de una relación entre la (ir)radiancia emergente percibida por el sensor remoto y la  $K(\lambda)$ . Austin y Petzold (1981) desarrollaron un método utilizando la relación entre  $K(\lambda)$  y el cociente de las radiancias provenientes del cuerpo de agua a dos longitudes de onda. La relación determinada por estos autores procede de datos espectrales obtenidos en diferentes localidades oceánicas por varios investigadores. Esta relación tiene la siguiente forma:

$$K(\lambda) - K_w(\lambda) = A(\lambda)R(1,3)^{B(\lambda)} \quad (3)$$

donde  $K(\lambda)$  es el coeficiente de atenuación difusa para el cuerpo de agua a la longitud de onda  $\lambda$ , y  $K_w(\lambda)$  es el valor del coeficiente de atenuación difusa para el agua pura (i.e. agua de mar que no contiene material suspendido, disuelto o absorbente);  $A(\lambda)$  y  $B(\lambda)$  son parámetros derivados empíricamente que relacionan las radiancias emergentes del agua a las longitudes de onda 490 y 520 nm (aunque no limitada a éstas) con el

coeficiente de atenuación residual, el cual se debe al material disuelto y suspendido en el agua y  $R(1,3)$  es el coeficiente entre las radiancias emergentes a las longitudes de onda 490 y 520 nm o bien a las bandas 1 y 3 del sensor *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS). Los valores de los parámetros  $K_w$ , A y B se muestran en la Tabla 1.

Jerlov (1976) compiló y clasificó las propiedades ópticas de varios tipos de sistemas acuáticos de acuerdo con un esquema que los dividía en aquellos de tipo oceánico (tipos I a III) y los de origen costero (tipos 1 a 9), basándose en la transmisividad de la irradiancia en los primeros 10 m a partir de la superficie. Esta representación es un método conveniente para caracterizar la claridad de los cuerpos, aunque no del todo preciso. No obstante, es una representación de tipo estándar usada ampliamente.

Austin y Petzold (1986) modificaron ligeramente esta representación al utilizar en lugar de la irradiancia, los coeficientes de atenuación espectral difusa  $K(\lambda)$ . Así, las aguas oceánicas claras se catalogan como tipo I. El índice decrece conforme disminuyen los valores de  $K(\lambda)$ .

El mismo argumento aplica Jerlov para las

aguas de origen costero, donde las más claras se caracterizan con el número 1 y las más turbias se representan con el número 9.

### ÁREA EN ESTUDIO

La laguna de Coyuca de Benítez (Figura 1) es un cuerpo de agua somero de volumen variable, dependiente de las épocas de secas y de estío. Posee un fondo predominantemente fangoso y características topográficas y superficiales muy irregulares (Yáñez, 1977). Cuenta con una superficie de 34 km<sup>2</sup> (Yáñez, 1978), una longitud máxima de 10.6 km, un área máxima de 2 954 ha, un área mínima de 2 900 ha, una anchura promedio de 2.78 km y una línea de costa de 26.7 km (Klimek, 1978). Se localiza en el conjunto de lagunas costeras del estado de Guerrero entre los 16°54'N y los 100°03'W. Posee dos pequeñas islas: la Montosa y la Pelona (Möller, 1973). La laguna se abre al mar a través de un canal meándrico, lo cual le proporciona una dimensión especial.

De acuerdo con la clasificación de Wetzel y Likens (1979), la laguna de Coyuca se considera un sistema acuático mesotrófico con base en las concentraciones de clorofila *a*, que se ubican en el intervalo 0.017 – 18.083 mg m<sup>-3</sup>.

Tabla 1. Parámetros de K en relación con el cociente (490 y 520) de la ecuación 3

$\lambda$ (nm)	$K_w$ (m <sup>-1</sup> )	A(m <sup>-1</sup> )	B
490	0.022	0.0883	-1.491
520	0.044	0.0663	-1.398



Figura 1. Localización del área en estudio.

Este cuerpo de agua presenta un régimen biestacional (*i.e.* por periodos de cada dos estaciones las condiciones ambientales y biológicas se mantienen con características similares) que llega a modificar la densidad del sistema acuático a través del incremento de la materia orgánica particulada (Delgadillo, 1986) y de la concentración de la clorofila *a* durante la época de estiaje (Monreal, 1991).

La vegetación circundante a la laguna es muy diversa y está formada predominantemente por plantas halófitas, entre las que se encuentran asociaciones de tular, carrizal, manglar, huizachal y palmar. Dentro de la laguna se puede encontrar la presencia de lirio acuático diseminado a través del canal (Guzmán y Rojas, 1976).

La laguna tiene el aporte de los ríos Coyuca, Las Cruces y el Conchero que le proporcionan cantidades importantes de materia orgánica, sales disueltas y sedimentos que contribuyen al azolvamiento paulatino de la laguna. La Figura 1 muestra las características del área en estudio.

La planicie costera donde se encuentra enclavada la laguna presenta un clima tropical subhúmedo, con lluvias en verano y sequías en invierno, con canícula o sequía estival (García, 1988).

La época de lluvias ocurre entre mayo y octubre, con un intervalo de precipitación que oscila entre 15 y 235 mm, alcanzando un máximo hacia julio.

Durante el periodo de primavera-verano se presentan vientos dominantes del sureste, con velocidad promedio de  $4.6 \text{ m s}^{-1}$ , y dominantes del norte durante el invierno (Ayala, 1966). Durante el periodo de agosto a octubre se pueden presentar perturbaciones ciclónicas que penetran al territorio a través de esta costa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en dos periodos de una semana, en agosto de 1992 (temporada de lluvia) y diciembre del mismo año (temporada de secas). Las fechas de muestreo correspondieron a las semanas:

a) del 17 al 21 de agosto; b) del 7 al 11 de diciembre. Para su estudio, la laguna fue dividida en quince puntos de muestreo, mediante una distribución que la cubría a lo largo y ancho (Figura 2). Esta distribución de estaciones ha sido utilizada en estudios radiométrica, de transparencia, salinidad, temperatura y se colectaron muestras de agua a diferentes profundidades para su posterior análisis hidrobiológico en laboratorio. Las mediciones ópticas y la colecta de las muestras se realizaron utilizando una pequeña embarcación.

La hora de los muestreos en los dos periodos estudiados se mantuvo dentro del intervalo comprendido entre las 9:17 h y las 13:44 h, distribuyéndose en forma homogénea. La elección de este intervalo tuvo como fin minimizar el efecto de la variación de la "posición solar" en la radiación incidente (Jerlov, 1976).

### Coefficiente de reflectancia

Simultáneamente a la colecta, se realizó el registro de datos de reflectancia sobre la superficie del agua de la laguna utilizando el espectroradiómetro Spectrascan PR-650 (Photo Research, California, EUA). Este instrumento es portátil, multiespectral y de barrido rápido. Tiene un rango espectral que abarca de los 380 a los 780 nm con una precisión espectral de  $\pm 12$  nm.

Las mediciones de reflectancia fueron hechas utilizando el método BRF (*Bi-directional Reflectance Factor*) postulado por Swain y Davis (1978). Este método se basa en la utilización de un panel de referencia de Lambert (i.e. un difusor y reflector perfecto) para comparar con la radiación emergente de la superficie a medir. La reflectancia medida a través del método BRF se define del siguiente modo:

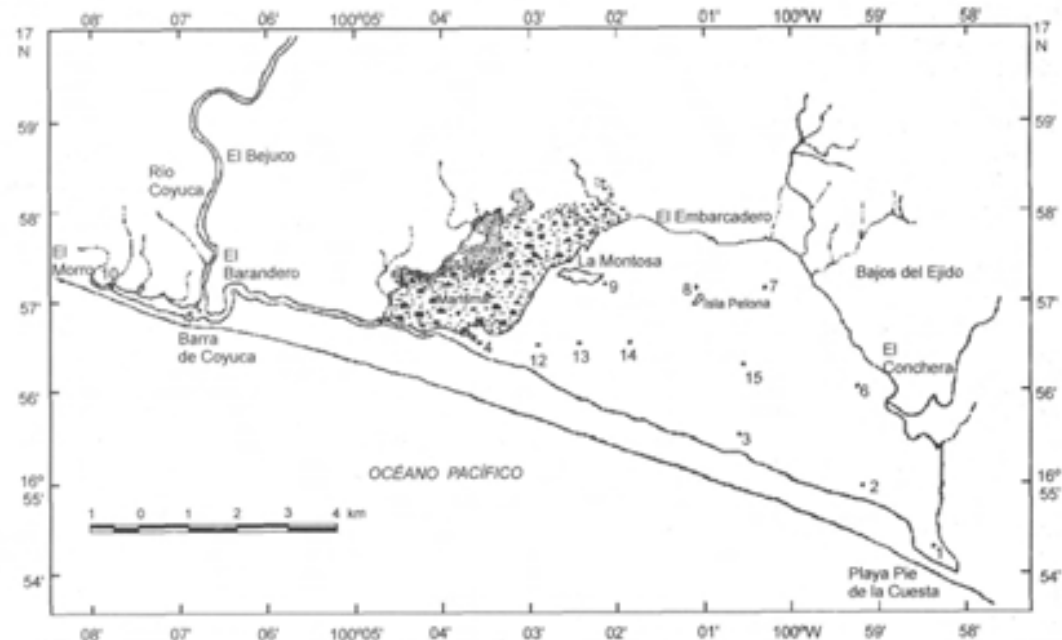


Figura 2. Mapa de la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, y localización de las estaciones de muestreo.

$$R(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_o(\theta_i, \varphi_i)}{dL_p(\theta_r, \varphi_r)} k(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (4)$$

donde  $dL_o$  es la radiancia del objeto medido y  $dL_p$  es la radiancia del panel de referencia bajo las mismas condiciones específicas de iluminación y observación, y  $k$  es el factor de corrección del panel, el cual depende de la configuración angular  $(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ , dado que en la práctica los paneles lambertianos no existen.

Las radiaciones incidente y emergente fueron medidas tres veces en forma secuencial y posteriormente promediadas para cada punto de muestreo. La medición de la radiación emergente fue realizada evitando el efecto de sombra de la embarcación, la cual puede producir errores de hasta un 30% en las lecturas de irradiancia (Gordon, 1985). El sensor fue configurado con una visión al nadir para medir la superficie de la laguna. Esto reduce significativamente (ir)radiancias no deseadas de la luz reflejada, que son independientes de las propiedades ópticas del agua (Shifrin, 1988). Esto garantiza que la luz retrodispersada por el agua, sea la principal contribuyente de la señal, brindando información de los elementos presentes en este medio.

La radiación incidente se midió apuntando el sensor al panel de referencia, el cual está construido con halón (politetrafluoretileno). Este material es resistente e hidrofóbico (i. e. lavable e insensible a cambios de humedad), propiedades que lo hacen adecuado para el trabajo de campo (Weidner y Hsia, 1981).

Los espectros de reflectancia fueron obtenidos haciendo inicialmente un barrido de la superficie lagunar y luego midiendo secuencialmente sobre el panel de halón. Los barridos del agua y el panel fueron divididos usando la ecuación (4) y multiplicados por un factor de corrección  $k = 0.99$  de acuerdo con la manufactura del instrumento. Los espectros de reflectancia fueron corregidos por los

reflejos solares sustrayendo la reflectancia a los 750 nm a los espectros de reflectancia de cada punto de muestreo. Esta operación es válida asumiendo que el agua de la laguna ha absorbido totalmente la radiación incidente a esta longitud de onda particular.

#### Coefficiente de atenuación difusa $K_d$

Este coeficiente fue calculado mediante un programa escrito en lenguaje Matlab, utilizando la relación (3) a partir de los datos de reflectancia y empleando los coeficientes de la Tabla 1. Los valores de los coeficientes se obtuvieron mediante una interpolación a las longitudes de onda 490 y 520 nm en el espectro de reflectancia, utilizando una función de interpolación cúbica.

#### Análisis estadístico

Los datos de reflectancia y de atenuación difusa fueron sometidos al análisis estadístico conocido como "Análisis de Cúmulos" (Swain, 1973). Este análisis se utiliza en algoritmos de clasificación multispectral de imágenes digitales, aunque puede ser extendido a cualquier conjunto de datos multispectrales, como los considerados en este artículo. El análisis de cúmulos consiste en mapear los diferentes valores multispectrales en un espacio  $n$  - dimensional ( $n$  es el número de bandas o longitudes de onda utilizados). Este mapeo origina que datos similares se agrupen formando cúmulos. Existen varios métodos para identificar cúmulos en el espacio multispectral. Entre éstos se eligió el algoritmo "K - medias", el cual se utiliza en la llamada clasificación no supervisada. El tratamiento matemático de este procedimiento ha sido presentado por diversos autores (Swain y Savi, 1978).

La definición de un algoritmo de cúmulos depende de la especificación de dos medidas de distancia: a) Euclidiana (medida de distancia entre datos puntuales) y



a) del 17 al 21 de agosto; b) del 7 al 11 de diciembre. Para su estudio, la laguna fue dividida en quince puntos de muestreo, mediante una distribución que la cubría a lo largo y ancho (Figura 2). Esta distribución de estaciones ha sido utilizada en estudios radiométrica, de transparencia, salinidad, temperatura y se colectaron muestras de agua a diferentes profundidades para su posterior análisis hidrobiológico en laboratorio. Las mediciones ópticas y la colecta de las muestras se realizaron utilizando una pequeña embarcación.

La hora de los muestreos en los dos períodos estudiados se mantuvo dentro del intervalo comprendido entre las 9:17 h y las 13:44 h, distribuyéndose en forma homogénea. La elección de este intervalo tuvo como fin minimizar el efecto de la variación de la "posición solar" en la radiación incidente (Jerlov, 1976).

### Coefficiente de reflectancia

Simultáneamente a la colecta, se realizó el registro de datos de reflectancia sobre la superficie del agua de la laguna utilizando el espectroradiómetro Spectrascan PR-650 (Photo Research, California, EUA). Este instrumento es portátil, multiespectral y de barrido rápido. Tiene un rango espectral que abarca de los 380 a los 780 nm con una precisión espectral de  $\pm 12$  nm.

Las mediciones de reflectancia fueron hechas utilizando el método BRF (*Bi-directional Reflectance Factor*) postulado por Swain y Davis (1978). Este método se basa en la utilización de un panel de referencia de Lambert (*i.e.* un difusor y reflector perfecto) para comparar con la radiación emergente de la superficie a medir. La reflectancia medida a través del método BRF se define del siguiente modo:

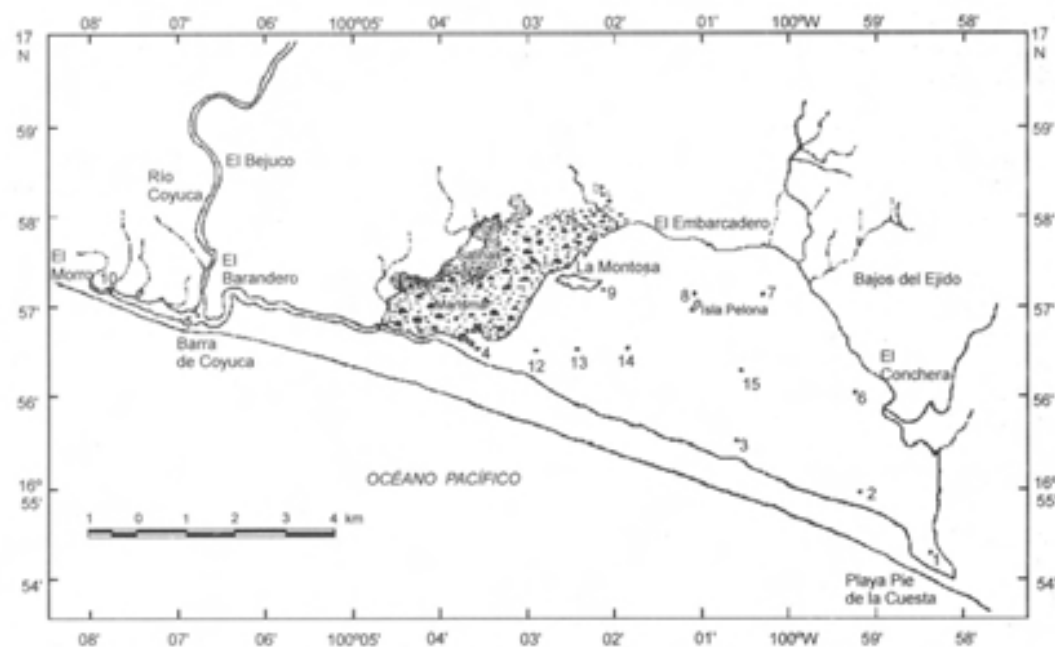


Figura 2. Mapa de la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, y localización de las estaciones de muestreo.

$$R(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_e(\theta_i, \phi_i)}{dL_p(\theta_r, \phi_r)} k(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) \quad (4)$$

donde  $dL_e$  es la radiancia del objeto medido y  $dL_p$  es la radiancia del panel de referencia bajo las mismas condiciones específicas de iluminación y observación, y  $k$  es el factor de corrección del panel, el cual depende de la configuración angular  $(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$ , dado que en la práctica los paneles lambertianos no existen.

Las radiaciones incidente y emergente fueron medidas tres veces en forma secuencial y posteriormente promediadas para cada punto de muestreo. La medición de la radiación emergente fue realizada evitando el efecto de sombra de la embarcación, la cual puede producir errores de hasta un 30% en las lecturas de irradiancia (Gordon, 1985). El sensor fue configurado con una visión al nadir para medir la superficie de la laguna. Esto reduce significativamente (ir)radiancias no deseadas de la luz reflejada, que son independientes de las propiedades ópticas del agua (Shifrin, 1988). Esto garantiza que la luz retrodispersada por el agua, sea la principal contribuyente de la señal, brindando información de los elementos presentes en este medio.

La radiación incidente se midió apuntando el sensor al panel de referencia, el cual está construido con halón (politetrafluoretileno). Este material es resistente e hidrofóbico (*i. e.* lavable e insensible a cambios de humedad), propiedades que lo hacen adecuado para el trabajo de campo (Weidner y Hsia, 1981).

Los espectros de reflectancia fueron obtenidos haciendo inicialmente un barrido de la superficie lagunar y luego midiendo secuencialmente sobre el panel de halón. Los barridos del agua y el panel fueron divididos usando la ecuación (4) y multiplicados por un factor de corrección  $k = 0.99$  de acuerdo con la manufactura del instrumento. Los espectros de reflectancia fueron corregidos por los

reflejos solares sustrayendo la reflectancia a los 750 nm a los espectros de reflectancia de cada punto de muestreo. Esta operación es válida asumiendo que el agua de la laguna ha absorbido totalmente la radiación incidente a esta longitud de onda particular.

#### Coefficiente de atenuación difusa $K_d$

Este coeficiente fue calculado mediante un programa escrito en lenguaje Matlab, utilizando la relación (3) a partir de los datos de reflectancia y empleando los coeficientes de la Tabla 1. Los valores de los coeficientes se obtuvieron mediante una interpolación a las longitudes de onda 490 y 520 nm en el espectro de reflectancia, utilizando una función de interpolación cúbica.

#### Análisis estadístico

Los datos de reflectancia y de atenuación difusa fueron sometidos al análisis estadístico conocido como "Análisis de Cúmulos" (Swain, 1973). Este análisis se utiliza en algoritmos de clasificación multiespectral de imágenes digitales, aunque puede ser extendido a cualquier conjunto de datos multiespectrales, como los considerados en este artículo. El análisis de cúmulos consiste en mapear los diferentes valores multiespectrales en un espacio  $n$ -dimensional ( $n$  es el número de bandas o longitudes de onda utilizados). Este mapeo origina que datos similares se agrupen formando cúmulos. Existen varios métodos para identificar cúmulos en el espacio multiespectral. Entre éstos se eligió el algoritmo "K-medias", el cual se utiliza en la llamada clasificación no supervisada. El tratamiento matemático de este procedimiento ha sido presentado por diversos autores (Swain y Savis, 1978).

La definición de un algoritmo de cúmulos depende de la especificación de dos medidas de distancia: a) Euclidiana (medida de distancia entre datos puntuales) y

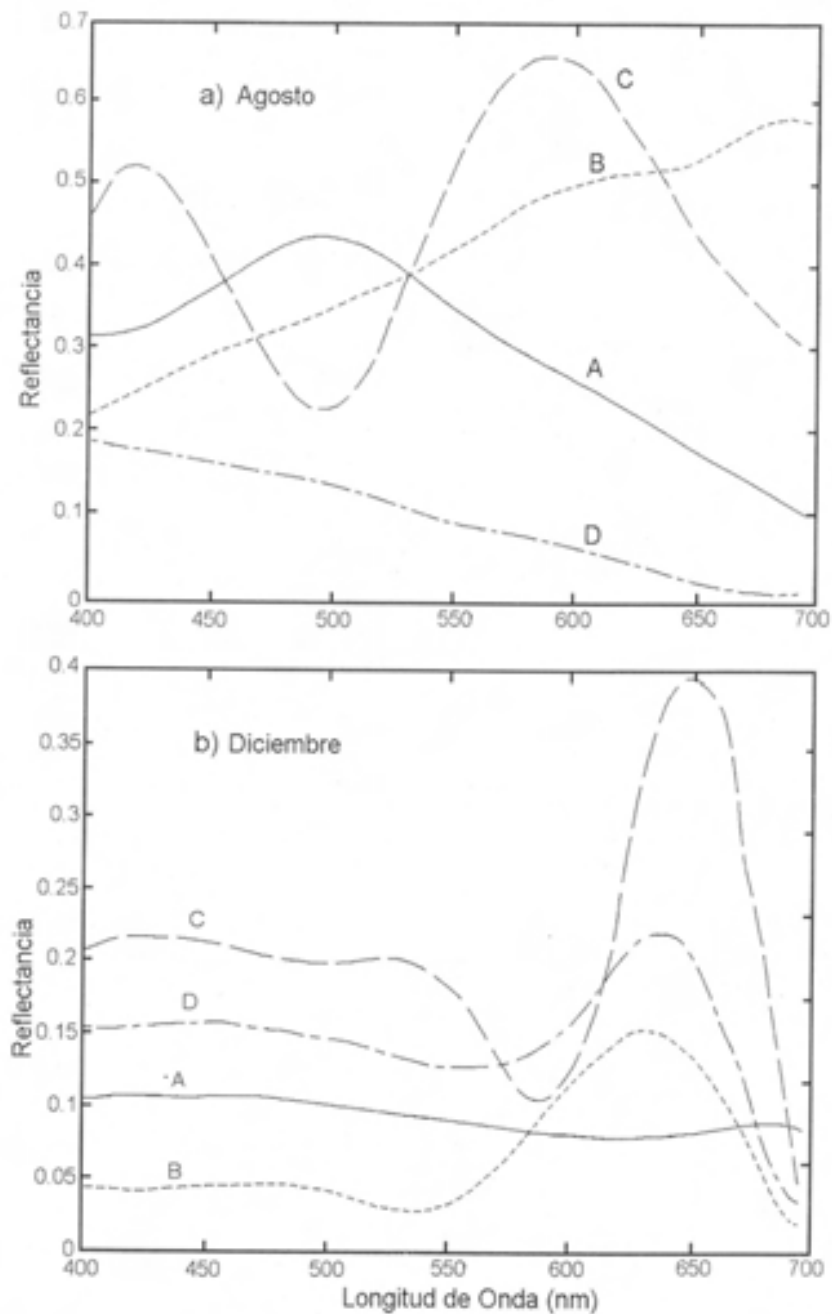


Figura 3. Espectros de reflectancia característicos de cuatro diferentes zonas ópticas en la laguna: zona A(-); zona B(- -); zona C(- · -); zona D(- - -), medidos durante: a) agosto de 1992; b) diciembre de 1992.

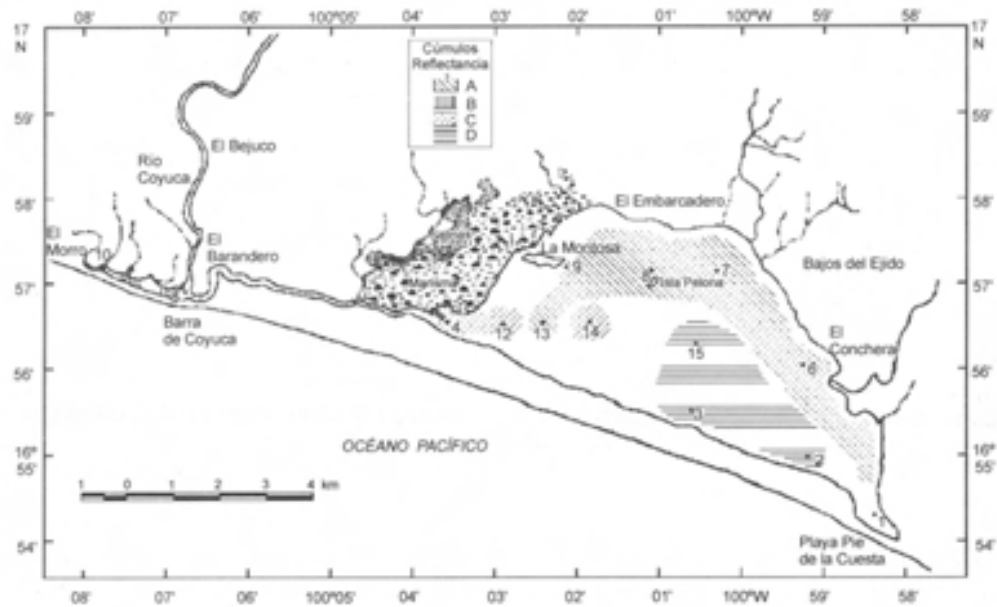


Figura 4. Mapa de las diferentes zonas ópticas determinadas mediante el análisis de cúmulos de la reflectancia medida durante agosto de 1992.

coloración característica que se percibe en la relativamente alta reflectancia en la región de los 600–700 nm.

Las estaciones de muestreo ubicadas en la región B se localizan en el margen occidental del canal. Son puntos someros y sus aguas muestran una mezcla con el fondo del canal. Presentan un espectro reflectivo típico de zonas poco profundas con una alta concentración de sedimentos provenientes de las descargas del río Coyuca en el canal Las Cruces.

Se observa en el espectro que la respuesta reflectiva se incrementa en forma cuasi-lineal en función de la longitud de onda. Estos puntos muestran un espectro característico de zonas totalmente dominadas por diversos tipos de sedimentos, principalmente arcillosos, lo cual explica el predominio reflectivo en la región del rojo (600–700 nm; Robinson, 1985). La respuesta reflectiva indica una coloración café-rojiza del agua en esta zona.

Los puntos de muestreo ubicados en el grupo C están localizados en el tramo final del canal y de su desembocadura al cuerpo de agua principal de la laguna. Estas estaciones muestran espectros interesantes con reflectancias relativamente altas en las regiones del azul (400–500 nm) y el rojo (600–700 nm) y una zona de absorción en la región del verde (500–600 nm). Dada la ubicación de estos puntos en la laguna, es posible observar a través de su respuesta reflectiva que se trata de una zona de transición, en la que se combina la influencia de aguas relativamente claras del cuerpo principal de la laguna y con un aporte alto de partículas dispersoras (región azul) y de transporte de sedimentos provenientes de la zona del canal (región roja).

La baja reflectancia en la región del verde es indicativo de este hecho al observarse la influencia dominante de los sedimentos sobre la respuesta espectral, virtualmente inhibida, del fitoplancton.

Finalmente, los puntos de muestreo ubicados en la región D presentaron una respuesta reflectiva menor, alcanzando su máximo en la región azul (400–500 nm). Esta zona está alejada de las influencias hidrológicas, oceánicas y terrígenas del sistema lagunar. La respuesta de la reflectancia en esta zona es baja y va disminuyendo en forma monótona en función de la longitud de onda. A este hecho contribuyen tanto el aislamiento mencionado como la batimetría de la zona que muestra que esta región coincide parcialmente con la zona más profunda de la laguna, localizada en las vecindades de los puntos de muestreo 14 y 15. Así, es explicable que la respuesta reflectiva esté fuertemente afectada por la absorción del agua, lo cual se evidencia en los niveles reflectivos bajos, virtualmente nulos, hacia la región de los 700 nm. En consecuencia, la coloración del agua en esta clase fue predominantemente azul.

El punto de muestreo 14 merece un comentario aparte, dado que se localiza en una zona de confluencia entre dos regiones ópticas diferentes, lo cual se manifiesta en una respuesta espectral combinada de las zonas A y C, aunque estadísticamente se ubica más cerca de esta última. Estas regiones ópticas tienen una gran semejanza con las determinadas por métodos biológicos en el análisis de la producción primaria fitoplanctónica en años anteriores (Pérez, 1986).

**Diciembre.** Los resultados obtenidos, utilizando el análisis de cúmulos, muestran la presencia de cuatro clases ópticas diferentes

para este período, así como variaciones importantes con respecto al muestreo anterior. En la Figura 3b se muestra la respuesta espectral típica de las clases. La Tabla 3 muestra las clases obtenidas y la Figura 5 ilustra la distribución de éstas dentro del sistema lagunar. El primer cúmulo, marcado como zona A, agrupa nueve puntos de muestreo (1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 13 y 15) dominado casi en su totalidad el cuerpo de agua, con excepción del punto de muestreo 12, perteneciente a la zona B y del punto 14 correspondiente a la clase D. Finalmente, el cúmulo marcado como zona C agrupa cuatro puntos de muestreo (4, 5, 10 y 11) con diferente respuesta óptica, ubicados en la zona del canal.

Los puntos de muestreo pertenecientes a la clase A se caracterizaron por una respuesta espectral relativamente alta en el intervalo de los 400–500 nm indicando una influencia óptica importante del fitoplancton, la cual es notoria en el pico de fluorescencia, debido a la clorofila *a*, centrado alrededor de los 680 nm, en la región roja del EEM. Asimismo, se percibe la absorción del agua en la región verde del espectro (500–600 nm) con un descenso de los niveles de la reflectancia  $R(\lambda)$ .

Los espectros de las clases B y D (puntos de muestreo 12 y 14) presentaron una reflectancia típica de zonas de transición. En la región azul se observaron valores reflectivos similares a los de la clase A. En la vecindad de los 550 nm se percibe un descenso reflectivo atribuible a la absorción del agua. A partir de este punto se nota la influencia de

Tabla 3. Resultados del análisis de cúmulos de los valores de los coeficientes de atenuación difusa  $K(490)$  y  $K(520)$  para cada período de muestreo

Muestreo/Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Agosto	A	A	A	B	A	D	B	C	B	A	B	B	B	A	B
Diciembre	A	A	A	C	C	A	A	A	A	C	C	A	B	A	B

sedimentos en la respuesta reflectiva, la cual se hizo evidente en la región de los 600–700 nm con picos centrados hacia los 640 nm, donde se alcanzaron niveles de 0.15 y 0.20, respectivamente.

La clase C muestra un patrón similar a los de las clases B y D, sin embargo, los niveles de reflectancia son mayores, sobre todo en la región de los 600–700 nm, en la que se localizó un pico centrado hacia los 640 nm con valor cercano a 0.40. El aumento en los niveles reflectivos y la invariancia de la forma espectral de esta clase en relación con las dos anteriores, fueron un indicativo de la influencia de la zona del canal en la respuesta óptica de los puntos de muestreo que conforman esta clase.

La diferencia entre los dos períodos estudiados se aprecia en la magnitud de los niveles reflectivos, la cual fue mayor durante la época de lluvia ( $\approx 0.7$ ).

Las variaciones espectrales durante este período respondieron a las condiciones dinámicas de la laguna que se pueden enmarcar en dos aspectos: i) el aporte de sedimentos arrastrados y transportados por los ríos y escorrentías hacia la laguna influyeron de manera importante en la óptica de la laguna, como se evidencia en los espectros de reflectancia de la Figura 3a y ii) la mezcla del agua salina de mar y dulce de la laguna y ríos generó un gradiente de salinidad de la barra hacia el centro de la laguna a través del canal, lo cual produjo una circulación en este sentido y propició un transporte de terrígenos procedentes del río Coyuca, afectando la penetración luminosa y, por ende, la reflectancia.

Por otro lado, en la época de secas, la similitud de los espectros de reflectancia obtenidos (exceptuando la clase A de este período) fue indicativa de la homogeneidad óptica de la laguna en este período. Esta situación puede interpretarse como resultado

de un proceso de sedimentación paulatino, que puede darse por dos causas principales, vinculadas a la ausencia de lluvias: a) disminución en el aporte de sedimentos por ríos y escorrentías y b) generación de una condición oligohalina homogénea al no existir entrada de agua marina en el cuerpo lagunar. Estos procesos trajeron como consecuencia una respuesta óptica similar en el cuerpo principal de la laguna, exceptuando las zonas conspicuas de la barra y el canal.

#### Análisis del coeficiente de atenuación difusa $K_d$

Agosto. Los resultados del análisis para K(490) y K(8520) se muestran en la Tabla 3. Para este período, el análisis por cúmulos de este coeficiente proporcionó cuatro regiones ópticas diferentes: a) la región A abarcó los puntos de muestreo 1, 2, 3, 5, 10 y 14 con un valor promedio  $\mu = 0.147 \text{ m}^{-1}$  ( $\sigma = 0.01$ ) de los valores de K(490), mientras que para el caso de K(520) se obtuvo una  $\mu = 0.137 \text{ m}^{-1}$  ( $\sigma = 0.008$ ), b) los puntos de muestreo agrupados en la región B fueron el 4, 7, 9, 11, 12, 13 y 15 con una media de  $\mu = 0.103 \text{ m}^{-1}$  ( $\sigma = 0.014$ ) en los valores K(490) y de  $\mu = 0.104 \text{ m}^{-1}$  ( $\sigma = 0.011$ ) para los valores de K(520); c) la región C incluyó únicamente al punto de muestreo 8, el cual tuvo un valor K(490) =  $0.05 \text{ m}^{-1}$  y K(520) = 0.07; d) la región D abarcó el punto de muestreo 6 con valores de K(490) = 9.36 y K(520) = 0.28.

La Figura 6 muestra la ubicación de las estaciones de muestreo en sus respectivos cúmulos. De acuerdo con los valores obtenidos para cada coeficiente, se observa que la región más transparente fue la C con una penetración ligeramente mayor a los 490 nm. Esta zona estuvo afectada por la desembocadura de las escorrentías de temporal que descargan sus aguas en la zona norte de la laguna y, presumiblemente, por la circulación y por las corrientes internas en la laguna. Los aportes de estas entradas de

Caracterización óptica de la laguna costera de Coyuca de Benítez

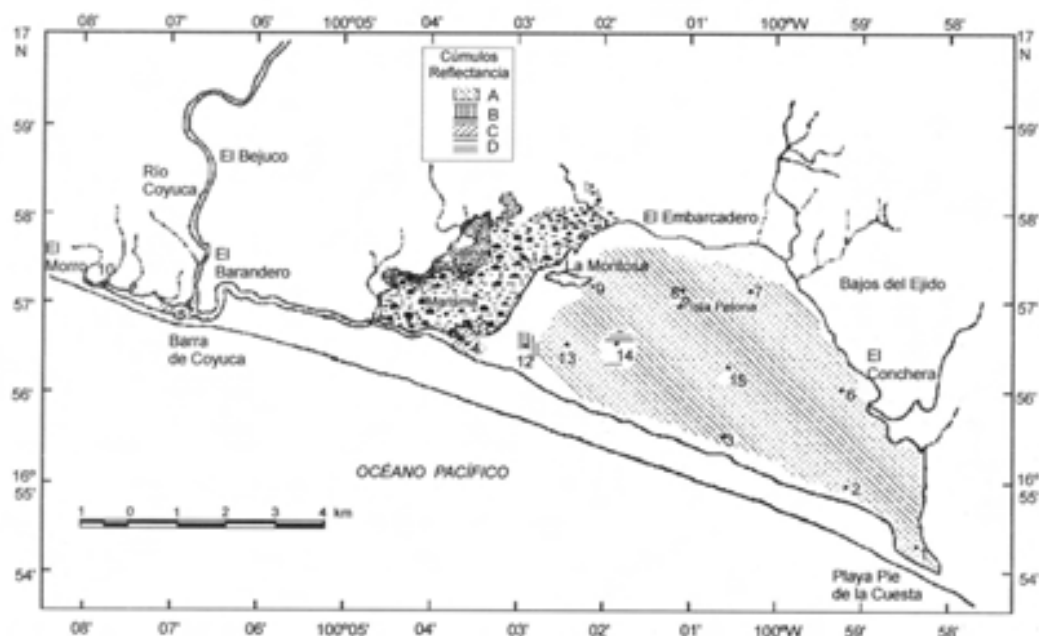


Figura 5. Mapa de las diferentes zonas ópticas determinadas mediante el análisis de cúmulos de la reflectancia medida durante diciembre de 1992.

agua influyen de forma importante en las características ópticas de esta zona durante la época de lluvia.

En segundo lugar se ubicó la región B, en la cual la penetración luminosa fue similar en ambas bandas. Los puntos de esta región se localizan en la desembocadura del canal meándrico (el cual transporta una gran cantidad de material suspendido), el sector occidental, y la región centro-norte de la laguna. En tercer lugar se tuvo a la región A con una penetración mayor en la región del verde (520 nm). La región está compuesta por puntos localizados en la parte sur-oriental y central de la laguna, zona alejada de influencias externas oceánicas y de ríos. Estas estaciones se agruparon en el mismo cúmulo dadas sus características similares, exceptuando los puntos 5 y 10, localizados sobre el canal y en la desembocadura del río Coyuca, respectivamente. Es difícil dar una

explicación bio-óptica a la presencia de estos dos puntos en esta clase. Sin embargo, es posible inferir que la combinación de diferentes factores influyó en la determinación de los coeficientes  $K(490)$  y  $K(520)$ , resultando su incorporación a una clase poco afín.

Finalmente, la región menos transparente fue la D, en la cual penetró mayormente la radiación a 520 nm. Esta región se vio afectada por la descarga directa del río Conchero, al estar ubicada en su desembocadura. Los aportes de esta entrada de agua influyen de forma importante en las características ópticas de esta zona durante la época de lluvia.

Los valores de los coeficientes  $K(\lambda)$  son indicativos de una alta turbiedad en la laguna de Coyuca en esta época del año. Por otro lado, la mayor penetración luminosa

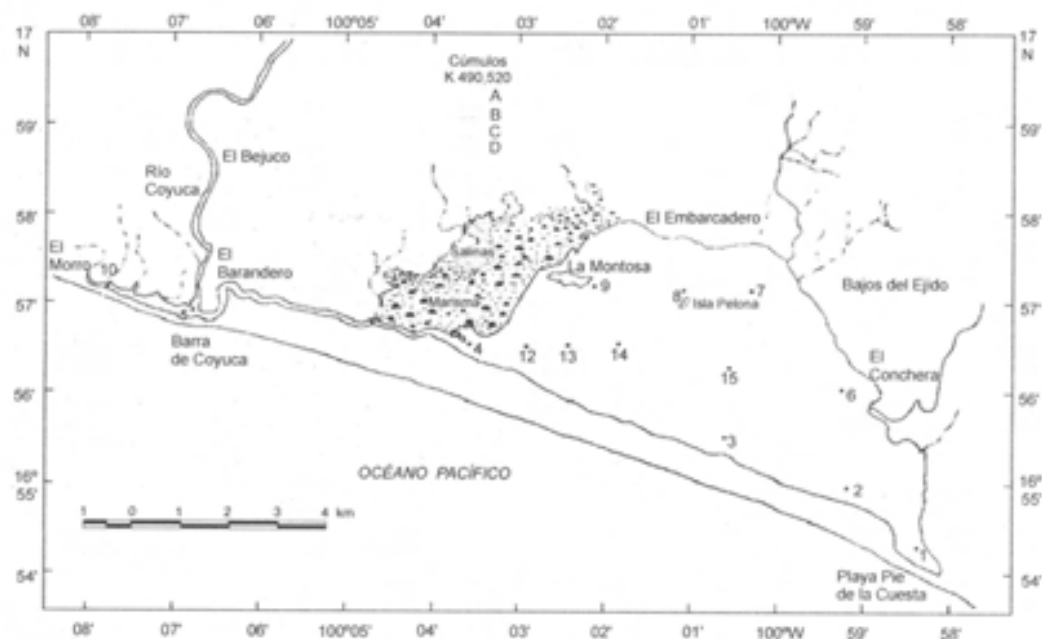


Figura 6. Mapa de la caracterización óptica de la laguna de Coyuca mediante el análisis de cúmulos para K(490) y K(520) en agosto de 1992.

a los 520 nm indica un predominio de la coloración verde en las zonas A y D; mientras que en las regiones ópticas B y C la penetración luminosa es similar en ambos casos. Estos aspectos particulares intervienen de manera importante en la caracterización óptica de la laguna de Coyuca.

Comparando los valores publicados por Austin y Petzold (1986) del coeficiente de atenuación difusa  $K(\lambda)$  ( $m^{-1}$ ) para las aguas Jerlov de diferentes tipos con los obtenidos en este análisis, las regiones ópticas definidas mediante este parámetro en la laguna de Coyuca permitieron clasificar como aguas Jerlov tipo I a la región A, correspondiente a aguas costeras claras, con la posible excepción de los puntos 5 y 10; como tipo 3 a la zona B, indicando aguas costeras turbias; como aguas Jerlov tipo III a la región C, representando aguas tipo oceánicas turbias; y como tipo II a la región D, lo cual

indica aguas oceánicas poco claras. La Figura 7a muestra la distribución de las clases halladas mediante el análisis por cúmulos.

**Diciembre.** Para este período el análisis de cúmulos mostró la presencia de tres clases diferentes: a) la zona A conformada por los puntos de muestreo 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 12 y 14 como una  $\mu = 0.071 m^{-1}$  ( $\sigma = 0.008$ ) para K(490), mientras que para K(520) se obtuvo una media  $\mu = 0.081 m^{-1}$  ( $\sigma = 0.008$ ); b) la zona B está compuesta por los puntos 13 y 15 cuyos coeficientes K(490) y K(520) fueron  $0.10 m^{-1}$ ; finalmente, la zona C incluye los puntos de muestreo 4, 5, 10 y 11 con valores promedios de  $\mu = 0.117 m^{-1}$  ( $\sigma = 0.09$ ) para ambos coeficientes K(490) y K(520).

Estos resultados muestran que, estadísticamente, la laguna fue ópticamente homo-



génea durante este periodo al agrupar al 60% de las estaciones en una misma región. Por otro lado, la diferencia en las  $\mu$  de las zonas B y C es poco significativa al haber un posible traslape entre ellas, considerando el valor de  $\sigma$ . Así, prácticamente la laguna mostró dos zonas ópticas diferentes, como son la zona del canal y dos puntos aislados y la zona del cuerpo principal de la laguna.

La Figura 8 muestra los resultados de esta clasificación. La separación óptica de estos grupos se debió, en gran medida, al proceso de sedimentación de los sólidos suspendidos acarreados y al aporte de agua dulce ocurrido durante la época de lluvia dentro del cuerpo principal de la laguna. Los valores de los coeficientes  $K(490)$  y  $K(520)$  indican que la región A fue la más transparente con una mayor penetración a los 490 nm.

La segunda región fue la zona B, la cual abarca los dos puntos aislados dentro del cuerpo principal. Finalmente la región C, correspondiente a la zona del canal, fue la menos transparente al tener valores de  $K(\lambda)$  más elevados. Esta región mantuvo una diferencia óptica apreciable debida a la poco

profundidad de la zona y al arrastre de sedimentos que todavía persistió, aunque en escala menor a la registrada en la época de lluvias. De acuerdo con los niveles del coeficiente de atenuación difusa  $K(\lambda)$  publicados por Austin y Petzold (1986) y los obtenidos en este estudio, las regiones ópticas (aguas Jerlov) determinadas mediante este parámetro en la laguna de Coyuca permiten clasificar como claras, lo cual fue también un indicativo del proceso de sedimentación ocurrido en la laguna entre los meses de agosto y diciembre de 1992. La Figura 7b muestra la semejanza entre los cúmulos determinados para el periodo de diciembre.

Los resultados del coeficiente  $K(\lambda)$  en ambos periodos muestran aspectos de interés. Por un lado, en la época de lluvias se observó un intervalo de variación más amplio que en la época de secas. Este hecho indica que se tuvieron condiciones más estables en diciembre, permitiendo observar características más homogéneas. Las variaciones de  $K(\lambda)$  permitieron evaluar la influencia de factores geológicos, hidrológicos, meteorológicos e hidrodinámicos en la penetración de la luz en los periodos estudiados.

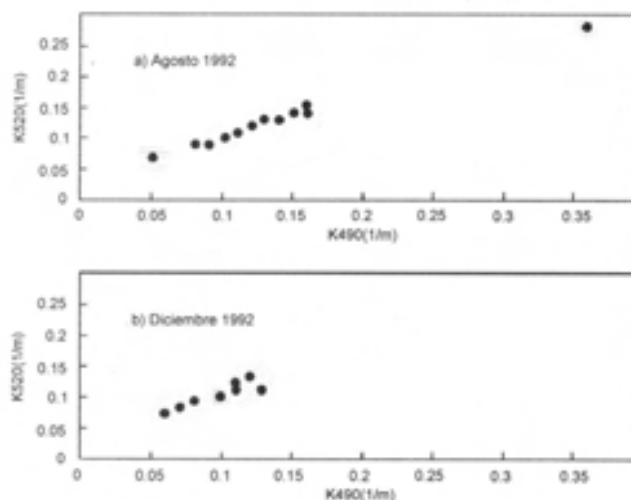


Figura 7. Diagrama del análisis de cúmulos bidimensional para  $K(490)$  y  $K(520)$  durante: a) agosto de 1992; b) diciembre de 1992.

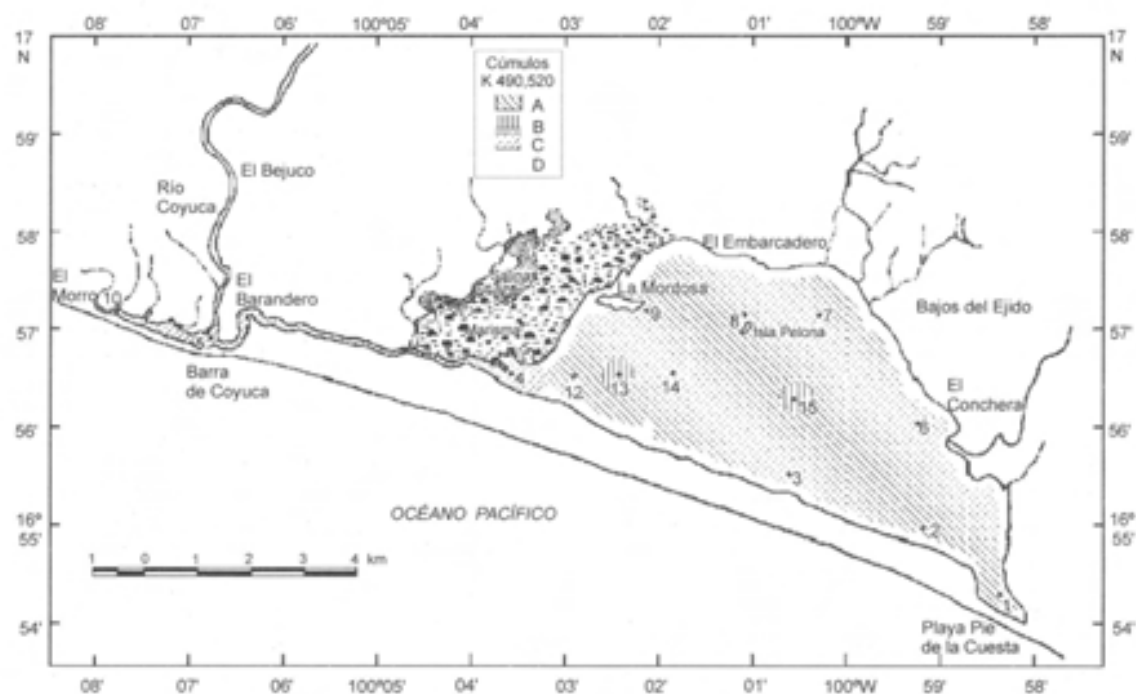


Figura 8. Mapa de la caracterización óptica de la laguna de Coyuca mediante el análisis de cúmulos para K(490) y K(520) en diciembre de 1992.

## CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue analizar el comportamiento óptico de la laguna costera de Coyuca de Benítez en dos diferentes temporadas, una correspondiente a la época de lluvias y la otra a la época de secas. El objetivo planteado se cumplió dado que los resultados mostraron una marcada diferencia entre los dos periodos analizados, tanto en el análisis de la reflectancia como en el del coeficiente de atenuación difusa  $K(\lambda)$ . Así, es evidente la variación en el comportamiento reflectivo de la laguna de Coyuca, tanto en magnitud como en firma espectral en cada periodo analizado. En la época de lluvias se observaron niveles reflectivos relativamente altos, con un máximo de 0.65 en la zona C, y una marcada diferencia en el comportamiento espectral de las clases represen-

tativas. En la época de secas los niveles reflectivos fueron menores, alcanzándose un valor máximo de 0.4 en la zona C, y las firmas espectrales de las clases presentaron un comportamiento similar. En relación con el coeficiente  $K(\lambda)$  se observaron también variaciones de interés. En la época de lluvias se observó un intervalo de variación mayor de  $K(\lambda)$ , alcanzándose los valores más altos (0.147 para la zona A) y más bajos de este coeficiente (0.05 para la zona C), lo cual se tradujo en una menor o mayor penetración luminosa en la laguna, respectivamente. En la época de secas, el intervalo de variación fue menor, lo cual representó una respuesta óptica homogénea en la mayor parte del cuerpo de agua. Las diferencias en los resultados se dan gracias a la influencia de factores hidrológicos, topográficos, biológicos y estacionales que muestran la com-

plejidad de estudiar un sistema de este tipo. Los aportes de los ríos, el arrastre y transporte de sedimentos, la topografía de la laguna, la distribución y abundancia de fitoplancton, así como la ausencia o presencia de precipitación pluvial afectaron de manera importante la respuesta óptica de la laguna, como se evidencia en las agrupaciones de los puntos de muestreo en cúmulos con diferentes características ópticas. Los resultados encontrados son importantes para el entendimiento bio-óptico de esta laguna en particular. Con base en estos resultados es posible afirmar que el análisis por cúmulos es una herramienta poderosa en la clasificación óptica de los cuerpos de agua. Sin embargo, debe siempre considerarse que este es un tratamiento matemático que debe ser reforzado con variables adicionales para ofrecer una interpretación más confiable. Un análisis como el presentado en este trabajo sienta las bases para realizar estudios similares, aplicando la metodología presentada, no sólo a lagunas costeras, sino a lagos, presas y otros cuerpos de agua existentes en nuestro país. Finalmente, la caracterización óptica de cuerpos de agua puede servir como base para efectuar estudios bio-ópticos utilizando sensores remotos montados en otras plataformas, como pueden ser aviones y satélites con las ventajas espaciales y temporales que esto representa.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dra. J. Haigh del *Imperial College of London* el préstamo del espectroradiómetro; al Programa Universitario de Investigación y Desarrollo Espacial (PUIDE) de la UNAM por las facilidades otorgadas para la realización de los muestreos y al Ing. Agustín Fernández-Eguarte por el trabajo gráfico.

## REFERENCIAS

□ Aguirre, R., P. Ruiz y A. M. Pérez (1989), "Análisis comparativo de la variación reflectiva de

un cuerpo de agua", *Memorias del III Simposio Latinoamericano sobre Sensores Remotos*, SELPER, Instituto de Geografía-UNAM, México, pp. 62-68.

□ Aguirre, R., S. R. Boxall and A. R. Weeks (2001), "Detecting photosynthetic algal pigments in natural populations using a high spectral resolution spectroradiometer", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 15, pp. 2867-2884.

□ Ahn, Y. H., A. Bricaud y A. Morel (1992), "Light backscattering efficiency and related properties of some phytoplankters", *Deep - Sea Research*, 39 (11/12), pp. 1835-1855.

□ Austin, R. W. and T. J. Petzold (1981), "The determination of the diffuse attenuation coefficient of seawater using the Coastal Zone Color Scanner", in J. F. R. Gower (eds.), *Oceanography from Space*, Plenum, New York, pp. 239-256.

□ Austin, R. W. and T. J. Petzold (1986), "Spectral dependence of the diffuse attenuation coefficient of light in ocean waters", *Optical Engineering*, vol. 25, p. 471.

□ Ayala Castañares, A. (1966), "Algunos estudios de geología marina en lagunas litorales mexicanas y su posible proyección al Océano Pacífico en los países latinoamericanos", *I Seminario Latinoamericano sobre el Océano Pacífico*, Lima, Perú.

□ Bukata, R. P., J. H. Jerome and J. E. Bruton (1988), "Particulate concentrations in Lake St. Clair as recorded by a shipborne multispectral optical monitoring system", *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, pp. 201-229.

□ Delgadillo, E. (1986), *Evaluación de la materia orgánica particulada en la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, durante el ciclo otoño 1983-verano 1984 y su relación con percepción remota*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.

□ García, E. (1988), *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*, offset Laros, 4ª ed., México.

- [1] Gordon, H. R. (1985), "Ship perturbation of irradiance measurements at sea. 1: Monte Carlo simulations", *Applied Optics*, vol. 24(23), pp. 4172-4182.
- [2] Gordon, H. R. and A. Morel (1983), "Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery, a review", in *Lecture notes on coastal and estuarine studies*, Springer-Verlag, New York.
- [3] Gordon, H. R., O. B. Brown, R. H. Evans, J. W. Brown, R. C. Smith, K. S. Baker and D. K. Clark (1988), "A semianalytical radiance model of ocean color", *Journal Geophysical Research*, vol. 93, no. D9, pp. 10909-10924.
- [4] Guzmán, M. y G. Rojas (1976), "Ecología de las lagunas costeras (Coyuca de Benítez)", *Curso de Biología de Campo*, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- [5] Hawkes, J. B. and R. W. Astheimer (1974), "Optical properties of water in the neighborhood of 35° C", *Journal of Optics Society*, vol. 64.
- [6] Hedgpeth, T. W. (1957), "Estuaries and lagoons. II. Biological aspects", in Hedgpeth, T. W. (ed.), *Treatise on marine ecology and paleoecology*, Geological Society of America Memorandum.
- [7] Jerlov, N. G. (1974), "Significant relationships between optical properties of the sea", in Jerlov, N. G. and E. S. Nielsen (eds.), *Optical aspects of oceanography*, Academic Press, London.
- [8] Jerlov, N. G. (1976), *Marine optics*, Elsevier Oceanography Series 14, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- [9] Kirk, J. T. O. (1984), "Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude", *Limnology and Oceanography*, vol. 29, pp. 350-356.
- [10] Klimek, R. (1978), *Hidroquímica y productividad primaria de tres lagunas costeras del Pacífico*, tesis de Doctorado, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- [11] Lemus, L. J. Rodríguez and P. Ruiz (1978), "The infrared photography and the limnological study of the Brockman dam", *Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, ERIM, pp. 1611-1618.
- [12] Möller, H. (1973), "La desconocida Coyuca", *México desconocido*, INJUVE, México.
- [13] Monreal, A. (1991), *Evaluación de la concentración de clorofila a fitoplanctónica en la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, durante el ciclo estacional verano 1983-verano 1984 y su relación con técnicas de percepción remota*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- [14] Morel, A. and L. Prieur (1977), "Analysis of variations in ocean color", *Limnology and Oceanography*, vol. 22(4), pp. 709-722.
- [15] Neuymin, G. G., L. A. Zemlyanya, O. V. Martynov and M. V. Solov'ev (1982), "Estimation of the chlorophyll concentrations from measurements of the colour index in different regions of the ocean", *Oceanology*, vol. 22, pp. 280-283.
- [16] Pérez, A. (1986), *Productividad primaria fitoplanctónica de la laguna de Coyuca de Benítez, Guerrero, en el período de verano 1983-verano 1984 y su posible detección por percepción remota*, tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- [17] Preisendorfer, R. (1960), "Application of radiative transfer theory to light measurements in the sea", in Tyler, J. E. (ed.), *Light in the sea*, Hutchinson & Ross, Dowden.
- [18] Robinson, I.S. (1985), *Satellite Oceanography: an introduction for oceanographers and remote sensing scientist*, John Wiley and Sons, Ellis Horwood Limited.
- [19] Ruiz, P., R. Aguirre, A. M. Pérez y J. Pizá (1989), "Utilidad de las imágenes MSS y TM en los estudios de calidad del agua realizados en la costa del estado de Guerrero durante el período 1981-1987", *Memorias del III Simposio Latinoamericano sobre Sensores Remotos*, SELPER, Instituto de Geografía-UNAM, México, pp. 99-110.
- [20] Ruiz, P. y A. M. Pérez (1992), "Mapping salinity in an oligohaline tropical coastal lagoon

- with MSS and TM Landsat imagery", *Geofísica Internacional*, vol. 31(1), pp. 95-110.
- ☐ Shifrin, K. S. (1988), *Physical optics of ocean water*, American Institute of Physics (translation Series), New York.
- ☐ Smith, R. C. and K. S. Baker (1978), "Optical classification of natural waters", *Limnology and Oceanography*, vol. 23(2), pp. 260-267.
- ☐ Swain, P. H. (1973), *Pattern recognition: a basis for remote sensing data analysis*, LARS Information Note 111572, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- ☐ Swain, P. H. and S. Davis (1978), *Remote sensing: the quantitative approach*, McGraw-Hill, New York.
- ☐ Weidner, D. L. and J. J. Hsia (1981), "Reflection properties of pressed polytetrafluorethylene powder", *Journal of the Optical Society of America*, vol. 71, pp. 856-861.
- ☐ Wetzel, R. G. and G. E. Likens (1979), *Limnological analysis*, 4a ed., W. B. Saunders Company (ed.), Philadelphia.
- ☐ Yáñez Arancibia, A. (1977), "Taxonomía, ecología y estructura de las comunidades de peces en lagunas costeras con bocas efímeras del Pacífico de México", *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología*, vol. 2, UNAM, México, pp. 1-306.
- ☐ Yáñez Arancibia, A. (1978), "Patrones ecológicos y variaciones cíclicas de la estructura trófica de las comunidades neotónicas en las lagunas costeras del Pacífico mexicano", *Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología*, vol. 5, UNAM, México, 1:287-306.