



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**“OBTENCION DE UN MODELO MATEMATICO PARA LA ESTIMACION DE
BATIMETRIA Y TIPO DE SUSTRATO EN LAGUNAS COSTERAS, EN BASE
AL ANALISIS DE IMAGENES DE SATELITE LANDSAT, SENSOR (TM).”**

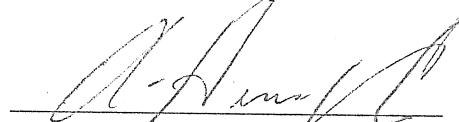
**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
PRESENTA
CESAR GARCIA GUTIERREZ**

Ensenada, Baja California, Junio de 1997.

"OBTENCION DE UN MODELO MATEMATICO PARA LA ESTIMACION DE
BATIMETRIA Y TIPO DE SUSTRATO EN LAGUNAS COSTERAS, EN BASE
AL ANALISIS DE IMAGENES DE SATELITE LANDSAT, SENSOR (TM)."

T E S I S
QUE PRESENTA
CESAR GARCIA GUTIERREZ

Aprobada por:



Director
M.C. Alejandro Hinojosa Corona



Sinodal
M.C. Jorge Ledesma Vazquez



Sinodal
M.C. Gregory Hammann

DEDICATORIA

A LA MEMORIA DE MI MADRE Q.E.P.D.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar deseo agradecer a mi familia por su apoyo y confianza, a los Gutiérrez, Corderos, Peinados y Rodríguez.

A mi director de tesis M.C. Alejandro Hinojosa Corona por su apoyo, paciencia, comprensión, confianza y su acertado asesoramiento en el apasionante viaje a través del Espectro Electromagnético realizado en la presente tesis, sin que nos hayan afectado los rayos U.V. ni las memorias de Coulomb y Maxwell.

A mis maestros y compañeros de Geología de la F.C.M. (Memo, Rigo, Luis, etc.) y mis alumnos, con quienes he compartido la oceanología.

A el M.C. Jorge Ledesma por su apoyo y comprensión y al Dr. Eduardo Santa Maria por su mano dura pero firme que me impulso a seguir el reto de la maestría.

A el Depto. de Geología de CICESE principalmente al M.C. Luis Delgado por su apoyo.

A la empresa BIOPESCA, especialmente al Dr. Gregory Hammann por su apoyo con la información para la realización del presente trabajo.

A mis compañeros y amigos de la casita de palo (CICESE) principalmente a los del cubo, Manuel, Carnalla, Israel y Abel, por su agradable compañía y compartir esta etapa que sin duda será un parteaguas en nuestras vidas.

A Gaby por su paciencia y apoyo en la revisión de mi tesis con un espíritu de aprendizaje y compañerismo, por su apoyo en momentos difíciles y confiar en mí.

A Alejandro Bravo y Gaby por su apoyo en el análisis desedimentos y compartir momentos tan valiosos. Há y al Jack aunque siempre me ladra.

A mis compañeros y amigos de natación Katia, Gaby, Alejandro y Abel, por compartir en cada brazada agua nueva y en cada minuto, lo valioso de aprovechar el tiempo.

A mi tía Jóse por la valiosa herencia que me ha brindado a través de sus consejos.

A Cris por su apoyo desde siempre y para siempre siendo un puntal para la familia y para mi formación.

A Beto y Ale, por compartir conmigo su amistad y cariño, por ayudarme a comprender el reto y deber que tenemos los profesionistas de hoy por nuestro país y por los niños, que el día de mañana serán quienes continuen nuestra obra, la cual deberá ser buena.

A mis amigos de Ramón, Leopoldo, Alejandro y Eduardo, por siempre y siempre.

A Erika por el trecho que ambos caminamos juntos, por su apoyo y amistad.

A el Dr. Salvador Rodriguez por sus palabras de aliento en los momentos difíciles y su apoyo.

A mis amigos y compañeros de planeación, especialmente al Arq. Pablo Renau, Luis A. Valles, Eleazar Acuña, Benjamín Peña, Luis, Juan Carlos, Ubaldo, Felipe, y los Rubensote y Ruben.

A Beto, Fabian y Rosa por su apoyo y consejos, por los momentos compartidos.

Y a todas las personas que de una manera muy especial han influido en mi vida y me han apoyado.

RESUMEN

Se realizó una revisión de los métodos para estimar profundidad y tipo de sustrato, en los que la mayoría consideran que la radiancia proveniente de la energía solar al penetrar la columna de agua se comporta como una función lineal del fondo y exponencial con respecto a la profundidad.

Para probar esta metodología se hizo un análisis de Laguna Guerrero Negro, B.C.S. México, apoyado en una imagen satelital multiespectral landsat TM de abril de 1993, batimetría del canal de acceso a la laguna realizada en enero y febrero de 1994 y otra de la parte somera laguna adentro, así como la toma y análisis de muestras de sedimento y vegetación en agosto de 1996.

Para la identificación de tipos de sustrato, se realizaron dispersogramas del logaritmo natural de la radiancia registrada por el sensor del satélite, corregida por profundidad para las bandas 1,2 y 3 de la imagen satelital multiespectral Landsat TM, graficando banda 2 vs banda 1 y banda 3 vs banda 1, obteniéndose cúmulos de valores los cuales se depuraron para delimitar los diferentes tipos de sustrato tales como: sedimento, vegetación y aguas hipersalinas. A partir de la clasificación no supervisada de la imagen TM, posteriormente fue re-clasificada considerando los tipos de sedimento y vegetación obtenidos del análisis de muestras colectadas en agosto de 1996.

La profundidad (Z) se estimó aplicando un algoritmo a las bandas 1 y 2, basado en el modelo óptico simple (MOS) modificado para aguas someras (ec. 5), aplicando una corrección a la profundidad estimada (z) por tipo de sustrato.

INDICE GENERAL

Resumen

I INTRODUCCION	-----	1
I.1	Generales -----	2
I.2	Objetivo -----	3
II MARCO TEORICO CONCEPTUAL	-----	4
II.1	Antecedentes -----	4
II.1.1	Modelo Optico Simple -----	4
II.1.2	Espectro Electromagnético e Imagen Multiespectral -	6
II.1.3	Propiedades Opticas del Agua de Mar -----	8
II.2	Descripción del Area de Estudio -----	10
II.2.1	Ubicación Geográfica -----	10
II.2.2	Geomorfología -----	10
II.2.3	Mareas y Corrientes -----	12
II.2.4	Vegetación -----	13
II.2.5	Transporte y Distribución de Sedimento -----	14
II.2.6	Clima -----	15
II.2.7	Batimetría -----	15

III	METODOLOGIA	-----	16
III.1	Análisis de vegetación	-----	16
III.2	Análisis de Sedimento	-----	16
III.3	Análisis de Batimetría y Tipo de Sustrato	-----	20
IV	RESULTADOS	-----	24
IV.1	Estimación de Vegetación	-----	24
IV.2	Estimación de Sedimento	-----	25
IV.3	Estimación de Tipo de Sustrato	-----	27
IV.4	Estimación de Batimetría	-----	33
V	DISCUSIONES	-----	39
VI	CONCLUSIONES	-----	43
VII	LITERATURA CITADA	-----	45

INDICE DE FIGURAS

1	Características de la Reflectancia Espectral -----	7
2	Ubicación del área de estudio -----	11
3	Perfil de marisma en Laguna Guerrero Negro indicando el nivel de mar -- marea al momento de la toma de la imagen satelital multiespectral Landsat TM.	13
4	Imagen en falso color (RVA) de la imagen satelital multiespectral ----- Landsat TM.	17
5	Ubicación de sitios de muestreo para vegetación, sedimento ----- y batimetría.	18
6	Ubicación de puntos de batimetría usados para el cálculo de los coeficientes de atenuación. ----	21
7	Estratificación vertical de vegetación. -----	25
8	Reclasificación de tipos de sustrato de la imagen satelital ----- multiespectral Landsat TM a partir de la clasificación no-supervisada.	29
9	Dispersogramas (X 2 vs X1) para las diferentes clases de sustrato. ----	30
10	Dispersogramas (X3 vs X1) para las diferentes clases de sustrato-----	31

11	Regresión lineal de $\ln (D_n - D_{nap})$ vs Z -----	34
12	Batimetría derivada de la imagen satelital multiespectral Landsat TM. -----	35

INCICE DE TABLAS

1	Separación de clases para la obtención del factor aditivo (M) y el multiplicativo (t) para la corrección de profundidad. ---	36
---	--	----

ANEXO

I	Ubicación de datos batimétricos y sus valores de profundidad y (D_n) correspondientes a Enero - Febrero de 1994.
	Ubicación de datos batimétricos y sus valores de profundidad y (D_n) correspondientes a Agosto de 1996
II	Parámetros estadísticos del análisis granulométrico correspondientes a (Phleger, 1962) y al muestreo de agosto de 1996.

I INTRODUCCION

I.1 GENERALES

Las lagunas costeras, cuyos procesos de formación pueden ser muy variados, presentan características muy singulares a diferencia del resto de la zona costera ya que son importantes ecosistemas transicionales. El crecimiento y desarrollo de los diversos centros de población en contacto con éstas, así como el incremento en las actividades económicas y la demanda de bienes de consumo requieren de un manejo eficiente de sus diversos recursos naturales. En este sentido nuestro país cuenta con aproximadamente 11,500 km de litoral en los cuales existen del orden de 125 lagunas costeras distribuidas a lo largo del Océano Pacífico, Golfo de California, Golfo de México y Mar Caribe, lo cual hace evidente la necesidad de desarrollar y eficientizar nuevas técnicas y metodologías para el estudio y aprovechamiento de sus abundantes recursos naturales.

La utilización de imágenes multiespectrales de satélite para el estudio de lagunas costeras se inicia a finales de los 70's Lizenga (1978), posteriormente en los 80's Lyzenga (1981), Philpot (1989) continuando en la actualidad Ji Wei (1992) et al, Bierwirth (1993) et al y Maritorena (1994); Maritorena (1996), estos métodos han sido aplicados a lagunas con características tales como: aguas claras, poco profundas menores a 25 m y una estratificación homogénea de sólidos suspendidos, con muy buenos resultados, siendo una herramienta de apoyo a técnicas convencionales de batimetría,

debido a que se obtienen imágenes que muestran la superficie del fondo, pudiendo abarcar grandes extensiones geográficas.

En el caso de nuestro país, no se cuenta con antecedentes de estudios realizados con este tipo de imágenes, por lo cual es importante el desarrollo del presente trabajo y su aplicación a Laguna Guerrero Negro, B.C.S.

I.2 OBJETIVO

Obtener y corroborar un modelo matemático para la estimación de batimetría y tipos de sustrato en lagunas costeras, en base al análisis de imágenes de satélite landsat, TM. y su aplicación en Laguna Guerrero Negro, B.C.S.

II MARCO TEORICO CONCEPTUAL

II.1 ANTECEDENTES

II.1.1 Modelo Optico Simple (MOS).

Lyzenga (1978), realizó estudios de tipo de fondo en cuerpos de aguas someras, mediante el uso de fotografía aérea, en los cuales concluyó que distinguir los tipos de fondo por su color no es fácil, ya que se puede llegar a tener confusión. Así mismo desarrolló diversos algoritmos para llegar a determinar la profundidad y el tipo de fondo. En 1981, desarrolló un modelo para estimar los parámetros de atenuación de la radiancia con la profundidad del agua y la reflectancia del fondo, asumiendo que las propiedades ópticas del agua serán uniformes sobre el área de una escena dada. Además discutió que la señal grabada por un sensor multiespectral puede ser combinada para obtener información de la atenuación de la radiancia en el agua y la reflectancia del fondo sin tener previo conocimiento de la profundidad, lo cual depende de las características del sistema y de las bandas multiespectrales utilizadas. Finalmente concluyó que los datos multiespectrales pueden ser utilizados para inferir coeficientes relativos de atenuación en el agua corroborados con datos de profundidad y del tipo de sustrato.

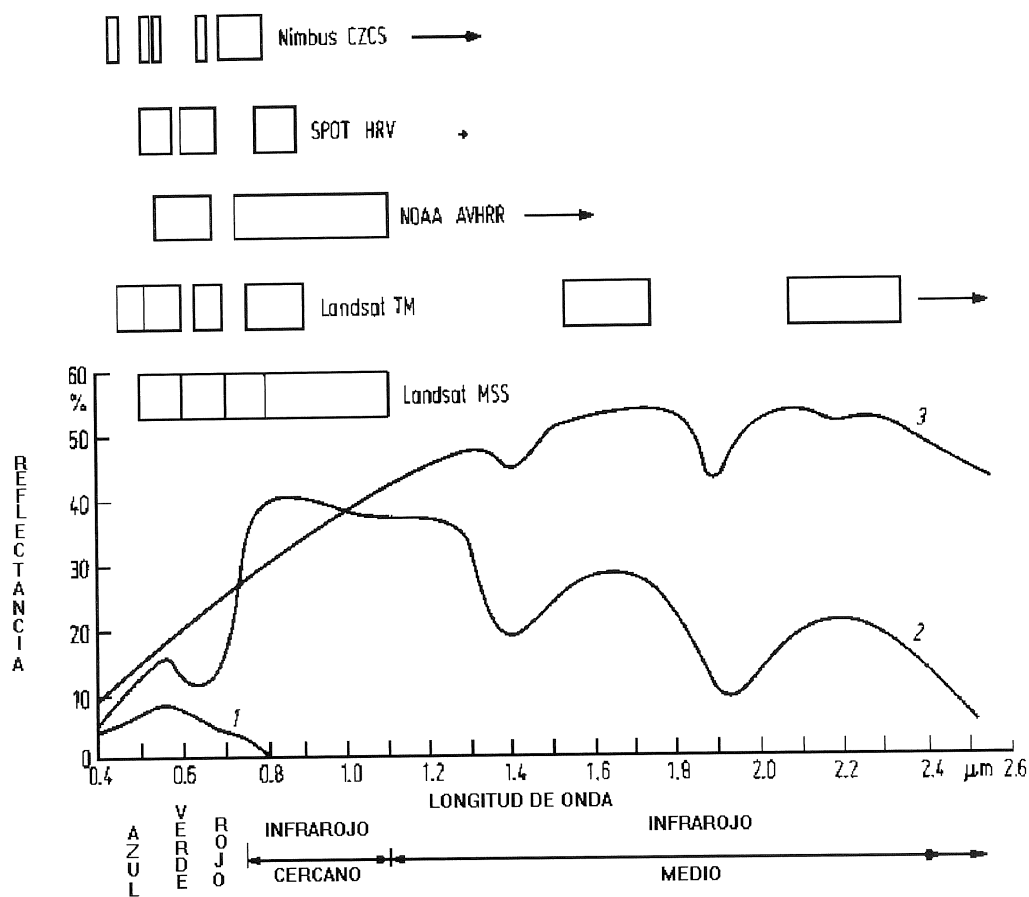
Philpot (1989), realizó un mapeo batimétrico en base a imagen multiespectral, en el cual consideró que las condiciones atmosféricas son invariantes sobre la escena y bajo esta condición ambos profundidad y atenuación efectiva fueron calculados sobre diferentes tipos de fondo. No obstante, cuando las escenas son más complejas con tipos de agua cambiante y condiciones atmosféricas variables es necesario contar con información espacial y temporal del área de estudio.

Ji et. al. (1992), desarrollaron un nuevo mecanismo para el modelaje de batimetría revisando las deficiencias observadas en trabajos previos con respecto a las propiedades inherentes del agua de mar e indicaron que las observaciones espectrales de la radiancia emergente son dominadas por la dispersión en la columna de agua más que por la reflexión del fondo. Concluyeron que su modelo es válido en aguas someras con fondos altamente reflectivos o aguas muy claras.

Bierwirth et. al. (1993), abordó un nuevo método que depura la influencia exponencial de la profundidad en cada pixel mediante el empleo de un modelo matemático que deja un residuo multiespectral, el cual representa la reflectancia relativa. El inicio del proceso son los datos multiespectrales crudos y el coeficiente de atenuación del agua derivado del coanálisis de la batimetría conocida, obteniéndose imágenes de reflectancia del sustrato correspondiente a las bandas de entrada y una imagen de profundidad en escala de grises.

II.1.2 Espectro electromagnético e imagen Multiespectral

Los sensores remotos Multi Spectral Scanner (MSS) y Thematic Mapper (TM) del satélite Landsat 4, registran la energía emitida por la superficie de la tierra principalmente en el rango de 0.4 a 12 μm del espectro electromagnético, abarcando del rango del visible 0.45 - 0.75 μm a la porción anterior al infrarojo cercano. Cada longitud de onda dentro del espectro es característica ya que puede resaltar los diferentes rasgos tales como agua, vegetación, litología, suelos, etc. (Fig. 1) la cual muestra como reflejan la energía solar los tres materiales dominantes sobre la superficie terrestre (1.- agua, 2.- vegetación, 3.- suelos) y su relación con las bandas del sensor TM, destacándose que las bandas uno, dos y tres corresponden al azul, verde y rojo respectivamente, y la banda cuatro se encuentra en la frontera del visible e infrarojo cercano. Se observa que el agua refleja al rededor de un 10% o menos en el rango del azul-verde, un porcentaje más pequeño en el rojo y prácticamente nulo en el infrarojo (Richards, 1986).



Tomada de Richards (1986).

Figura (1) Características de la reflectancia espectral de los rasgos característicos de la superficie terrestre, abarcando del visible al infrarojo cercano a medio. Se muestran las líneas correspondientes a:

1 agua, 2 vegetación y 3 suelos.

II.1.3 Propiedades Ópticas del Agua de Mar.

Las características de la columna de agua están definidas en función de sus propiedades ópticas, siendo éstas de dos tipos:

Inherentes- cuando las características del agua en un punto no varían ante los cambios de distribución de radiancia en el mismo, a su vez, especifican el comportamiento de dispersión y absorción del medio, son dependientes de la materia disuelta y suspendida en el agua y de las propiedades electromagnéticas del medio.

Aparentes- son aquellas en las que las características en un punto dado, dependen de la distribución de radiancia en el mismo, siendo de particular importancia cuando se considera la penetración de energía radiante en el océano. Pudiendo ser relacionadas con las propiedades inherentes por medio de la teoría de transferencia radiativa, (Preisendorfer 1976; Tyler, 1977; Lillesand, 1979; Smith y Baker, 1981; Iqbal, 1983; Falk, 1986).

El modelo (MOS) de transferencia radiativa utilizado, es el desarrollado por Lyzenga (1978) y (1981), apoyado en Preisendorfer (1976) y empleado por Philpot (1989), Ji et. al. (1992) y Bierwirth et. al. (1993). Este modelo considera la atenuación de

la energía radiante al penetrar a la columna de agua, el tipo de sustrato y la asunción de homogeneidad vertical de las propiedades ópticas del agua, el modelo es como sigue:

$$L_d = L_f \cdot e^{-kz} + L_a$$

donde :

L_d = Radiancia observada en el detector

L_f = Término de la radiancia que es sensitivo a la reflectancia del fondo

k = Coeficiente de atenuación del agua

z = Profundidad de la columna de agua

L_a = Radiancia observada sobre agua ópticamente profunda (considerándose para el área de estudio el valor de radiancia más pequeño en las aguas profundas fuera de la laguna).

A partir de éste modelo se aplica una linearización usando el logaritmo natural para llegar a obtener la profundidad (z) y el tipo de fondo (L_f).

II.2 DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

II.2.1 Ubicación Geográfica

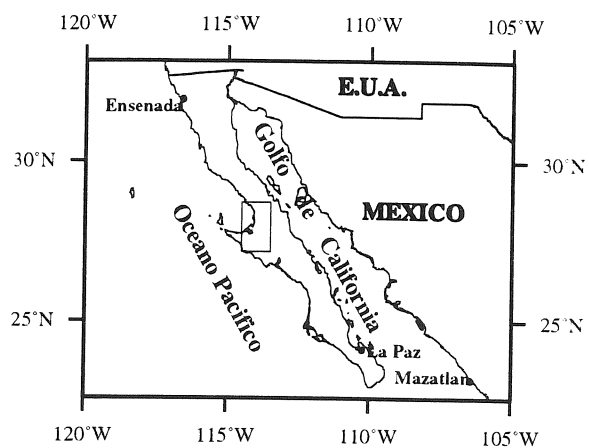
Laguna Guerrero Negro se localiza en las costas occidentales de la península de Baja California, forma parte del complejo lagunar Bahía Sebastian Vizcaino integrado al norte por Laguna Manuela, al centro por Laguna Guerrero Negro y al sur por Laguna Ojo de Liebre, B.C.S. (Fig. 2). Sus coordenadas Geográficas son: $27^{\circ} 54'$ a $28^{\circ} 07'$ latitud Norte y $114^{\circ} 00'$ a $114^{\circ} 10'$ longitud Oeste.

II.2.2 GEOMORFOLOGIA

La laguna está considerada como tipo III-A según la clasificación de Lankford (1970) es decir; es un cuerpo de agua somero semiprotegido por una barra arenosa, con dirección predominante de transporte de sedimento es a lo largo de la línea de costa.

La barra principal de la laguna con una longitud aproximadamente de 27 km y una orientación suroeste- noreste, se extiende desde la porción norte de la boca de acceso Laguna Ojo de Liebre hasta la boca de Laguna Guerrero Negro.

a)



b)

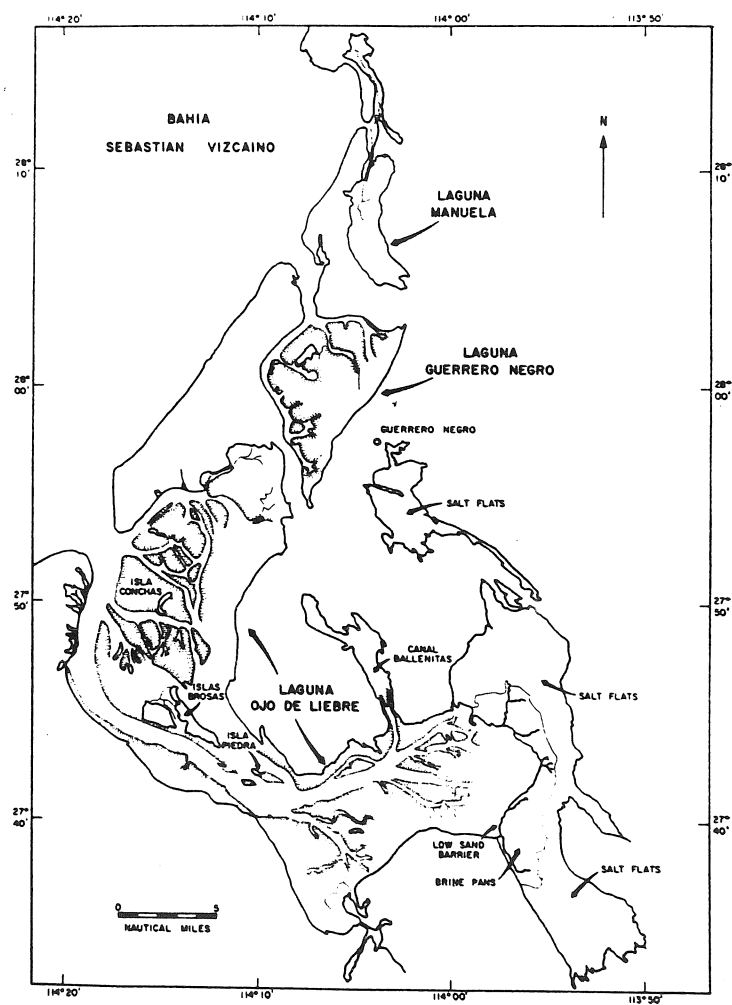


Figura 2. a) Ubicación del área de estudio, b) Complejo lagunar; Bahía Sebastian Vizcaino (Phleger, 1969).

Comparada con las otras dos lagunas, su tamaño es intermedio, midiendo 12.5 km de longitud y de 4 a 8 km de ancho, con un área aproximada de 121 km².

II.2.3 MAREAS Y CORRIENTES

Las mareas presentes son semidiurnas. El máximo intervalo se presenta en primavera, de aproximadamente 2.75 m (de 0.45 a 2.28 m), no obstante, este intervalo extremo no ocurre en todas las mareas de primavera. El intervalo mínimo es menor a los 0.60 mts. y el promedio es de 1.21 a 1.52 m Phleger (1965).

Las mareas inducen corrientes que acarrear partículas de sedimento suspendido y pueden llegar a mantener el canal de acceso libre de la deposición, los canales más anchos y/o profundos están relacionados con las corrientes de mayor energía; estos a su vez actúan como el canal principal para la corriente de mareas, inundando las planicies intermareales y marismas.

Para la fecha y hora a la que se tomó la imagen de satélite TM, la marea se encontraba en ascenso con una altura aproximada de 1.09 m, sobre el nivel medio del mar (s.n.m.m.), cubriendo gran parte de la marisma (Fig. 4). Los datos de batimetría tomados en campo, se corrigieron por mareas (anexo 1).

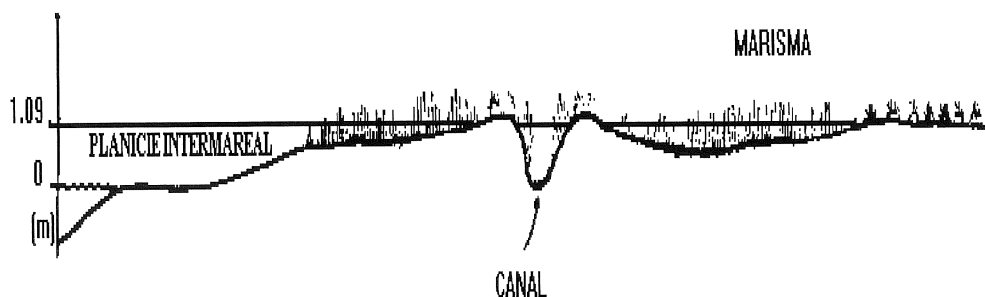


Figura 3. Perfil de la marisma en Laguna Guerrero Negro, indicando el nivel aproximado de marea al momento de capturar la imagen de satélite landsat, TM. modificado de Phleger (1965).

II.2.4 VEGETACION

La distribución de vegetación se da en función del perfil vertical de profundidad y la distancia a la boca de acceso, pudiendo variar su cobertura temporalmente a lo largo del año. Otro factor es la energía de la corriente de mareas ya que en las planicies donde se tiene una menor energía permite depositación de sedimento que sirve como sustrato para la fijación de especies de pastos marinos y algunos tipos de algas.

Phleger (1965), reportó para el área, que la vegetación dominante en las marismas es Spartina sp. encontrándose entre 0.91 y 1.37 mts. sobre el nivel de baja mar medio inferior, y en zonas de marisma menos expuestas a inundación se desarrolla Salicornia sp. pudiendo ser encontradas entremezcladas en profundidades intermedias.

II.2.5 TRANSPORTE Y DISTRIBUCION DE SEDIMENTO

El sedimento es suministrado a la barra arenosa por la corriente litoral (Marinone, 1979), y a través del viento al campo de dunas de la barra y canales principales de la laguna, siendo distribuidos laguna adentro por la corriente de mareas. La distribución presente es: arenas gruesas cerca de la boca de acceso a la laguna y material medio a fino-muy fino laguna adentro principalmente en las zonas someras y áreas que presentan una mayor cobertura de vegetación.

Los sedimentos en las marismas están dominados por arenas finas a muy finas, ocurriendo en una proporción muy pequeña limos y arcillas. Numerosos canales atraviesan las marismas en los cuales tienden a concentrarse limos y arcillas, producto del transporte de material fino en suspensión por el flujo de mareas y depositado en zonas de baja energía (Phleger, 1965).

De los datos del análisis granulométrico realizado por (Phleger, 1962), se observa una distribución de arenas medias a finas en la boca de acceso y hacia el inicio de los canales principales, y de los resultados obtenidos en agosto de 1997, la tendencia hacia arenas muy finas canal adentro y planicies intermareales, donde se presenta una mayor predominancia de vegetación la cual promueve la depositación de sedimento fino.

II.2.6 CLIMA

El clima es árido, la precipitación pluvial generalmente es baja, aproximadamente de 70 mm en 25 meses durante 1956 - 58. Desde 1960 las tormentas han sido significativamente más grandes con una estimación de 25 -150 mm / año. El máximo intervalo de temperatura está entre 0° y 40°C con una media mensual en un intervalo de 5° a 29°C. Phleger (1965). El área de la laguna es influenciada por el viento frío del Pacífico y como resultado las temperaturas del aire son mezcladas en el área costera, el viento sopla principalmente del nor-noroeste, debido al flujo de calor ascendente del desierto central y al desplazamiento del aire frío del Pacífico sobre la península. La condición usual es viento comenzando en la mañana un poco tarde, alcanzando su máximo al mediodía, calmándose al atardecer; ocasionalmente el viento sopla constante.

II.2.7 BATIMETRIA

Phleger, 1962 describe la batimetría como una boca de acceso con bajos arenosos de 2 m, un canal principal en la boca de acceso con profundidades promedio de 9 m disminuyendo gradualmente hasta los 2 m a través de los canales intermedios y someros. La planicie intermareal con profundidades de 2 m y finalmente las áreas de halófitas de profundidades menores a 2 m y la zona de marisma hasta 0.5 m sobre el n.m.m.

III METODOLOGIA

III.1 ANALISIS DE VEGETACION

Para el análisis de distribución de vegetación se identificaron los diferentes tipos de cobertura en un realce en falso color de la imagen multiespectral de satélite Landsat TM la cual se adquirió georeferenciada y proyectada en coordenadas Universales Transformadas de Mercator (UTM) y registrada a una dimensión de pixel de 25 m (Fig. 4

Se colectaron en agosto de 1996 muestras de vegetación en tres estaciones ubicadas en base a la (Fig. 4), georeferenciándolas con Geoposicionador de stélite (GPS) y midiendo la profundidad con ecosonda (Fig. 5), para las profundidades menores a 1.5 m se uso estatal. Se pusieron en bolsas y se guardaron en el congelador a -4°C para ser posteriormente identificadas en laboratorio.

III.2 ANALISIS DE SEDIMENTO

Para el análisis de tipos de sedimento se tomaron ocho muestras en agosto de 1996 utilizando tubos de plástico, georeferenciando la posición con GPS y su profundidad con ecosonda. Se virtieron en bolsas de hule, se etiquetaron y se conservaron en congelador a -4 °C . Posteriormente se secaron y pesaron para eliminar materia orgánica usando



Figura 4. Imagen multiespectral de satélite Landsat TM, en falso color (rva) usando las bandas 3,2,1 respectivamente para agua y tierra. Al norte se aprecia Laguna Guerrero Negro y al suroeste, Laguna Ojo de Liebre, B.C.S.

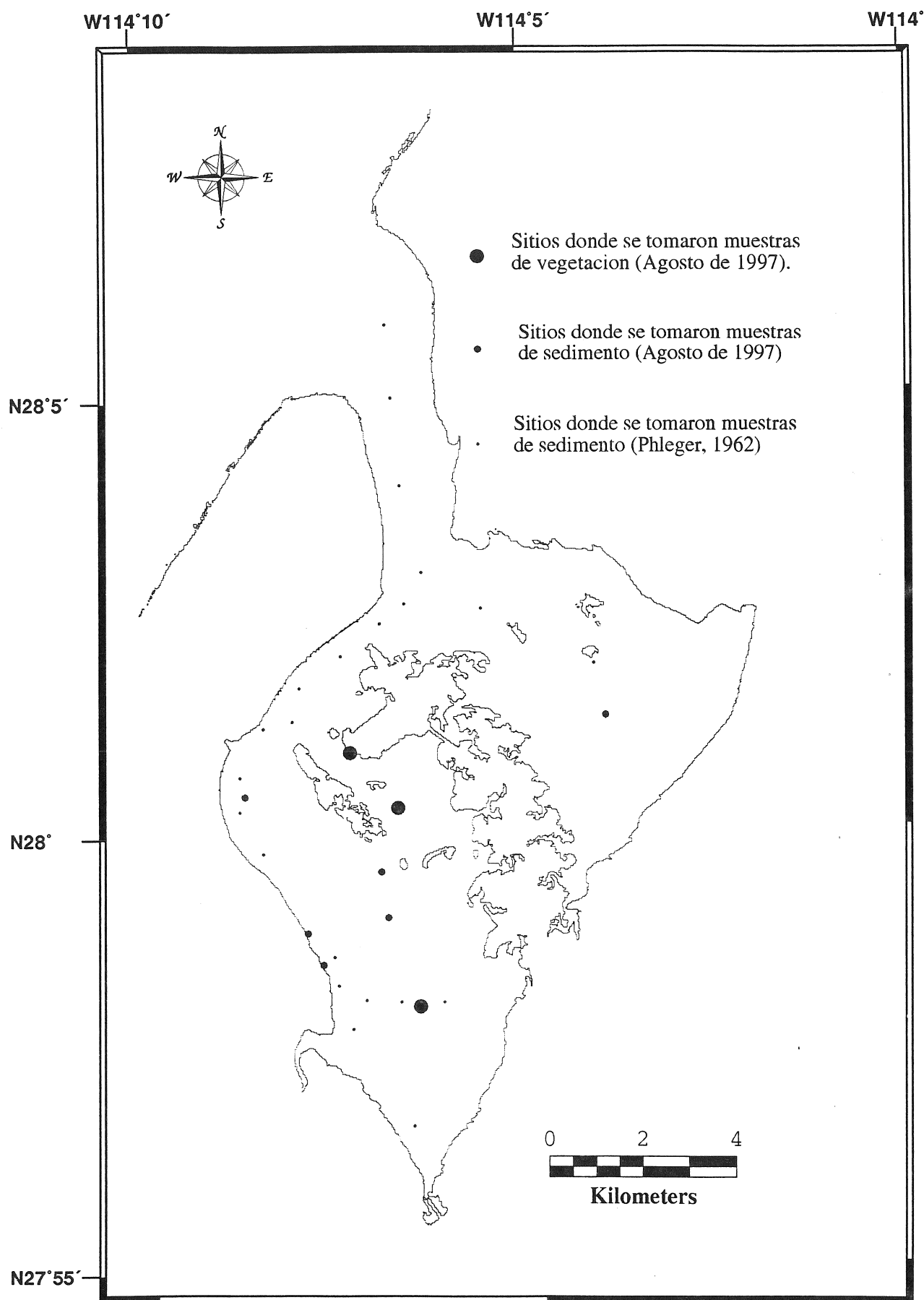


Figura 5. Ubicación de sitios de muestreo de vegetación y sedimento en Laguna Guerrero Negro correspondientes a agosto de 1996 y Phleger, 1962.

peróxido de hidrógeno y se eliminaron sales con agua destilada. Para el análisis granulométrico se utilizó el método de tubo de Emery con agua destilada a 22 °C y muestras de 3.5 a 4.5 gr.

Los resultados del análisis granulométrico se muestran en el (anexo 2), a estos valores se aplicaron las formulas del método de momentos de Folk y Ward (1977), descritas por Friedman y Sanders (1978), para la obtención de los parámetros estadísticos como sigue:

$$\text{Media} \quad (M_z) = \varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84} / 3 \quad (1)$$

$$\text{Desviación Estandar} \quad (\sigma) = \varphi_{84} - \varphi_{16} / 4 + \varphi_{95} - \varphi_5 / 6.6 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Asimetría} \quad (SK) = & (\varphi_{84} + \varphi_{16} - 2\varphi_{50}) / 2(\varphi_{84} - \varphi_{16}) + \\ & (\varphi_{95} + \varphi_5 - 2\varphi_{50}) / 2(\varphi_{95} - \varphi_5) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{Kurtosis} \quad (K) = (\varphi_{95} - \varphi_5) / 2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25}) \quad (4)$$

III.3 ANALISIS DE BATIMETRIA Y TIPO DE SUSTRATO

La batimetría utilizada fue realizada por la empresa Asesores en Biología Pesquera, S.A. de C. V. en dos salidas de campo: una del 6 al 8 de Enero y otra del 4 al 7 de Febrero de 1994; los datos corresponden principalmente al canal de acceso a la laguna y se realizaron de manera aleatoria en tiempo y distancia obteniéndose 447 muestras en el primer muestreo y 414 para el segundo, de ambos muestreos se seleccionaron 132 mediciones (anexo 1), en las cuales se observó coinciden con la profundidad medida y el tipo de sustrato al que corresponden, esto debido a la imprecisión del GPS, por lo cual algunas mediciones no coinciden con la profundidad del tipo de sustrato en el que se encuentran (Fig. 6). El equipo de muestreo utilizado en el primer evento fue un posicionador de satélite Magellan NAV5000DX y un ecosonda gráfico-Digital Furuno MR-10 (multi-rango). Para el segundo el mismo posicionador y un Video Sonda SI-TEX LCS-180 (multi-rango). Los sondeos batimétricos fueron referidos al nivel medio del mar n.m.m., aplicando una corrección por marea correspondiente a los días y horas de la toma de datos.

Las metodologías revisadas por (Lyzenga, 1978 y 1981; Philpot, 1989; Ji et. al., 1992; Bierwirth et al. 1993; Maritorea, 1994 y 1996), coinciden en que las técnicas para estimación de profundidad y tipo de sustrato en aguas someras parten de un modelo óptico simple, con la asunción de que los cuerpos de agua sobre los que se aplican son:

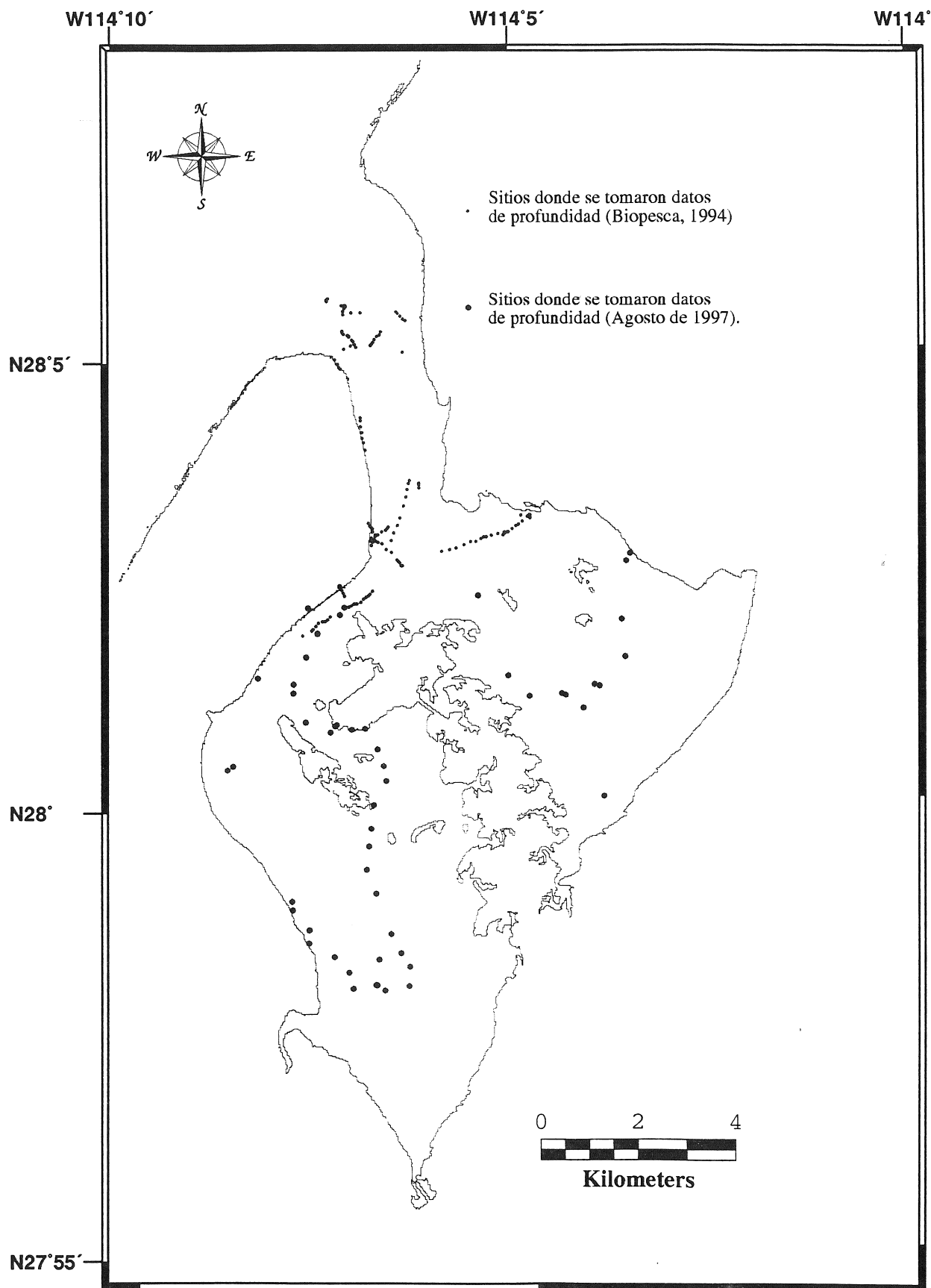


Figura 6. Ubicación de puntos de batimetría usados para el cálculo de los coeficientes de atenuación, correspondientes a enero - febrero de 1994 y agosto de 1996.

claros, someros, con una distribución homogénea de sólidos suspendidos a través de la columna de agua y que la radiancia reflejada por el fondo es una función lineal de la reflectancia del fondo y exponencial de la profundidad del agua.

Los diferentes autores inician con un modelo óptico simple para aguas someras como sigue:

$$L_d = L_f \cdot e^{-kz} + L_{ap} \quad (5)$$

En el presente estudio se considera dicho modelo, introduciendo dos elementos en la exponencial del modelo óptico simple; uno aditivo y otro multiplicativo lo cual coincide con Philpot, (1989) como sigue:

$$L_d = L_f e^{-ktz + M} + L_{ap} \quad (6)$$

donde :

L_d = es la radiancia registrada por el sensor

L_f = término de la radiancia que es sensitivo a la reflectancia del fondo

M = es un factor aditivo el cual permite ajustar los valores de (Z) para los sustratos opacos tales como vegetación los cuales presentan valores pequeños de (Dn) . Pudiendo ser positivo o negativo segun sea el caso.

k = es el coeficiente de atenuacion del agua

t = es un factor que nos permite ajustar los valores de (Z) arrojados por el modelo óptico simple a las variaciones en el tipo de sustrato. Funciona como un modulador de valores de z en respuesta a los cambios en el tipo de sustrato.

z = Profundidad de la columna de agua

L_{ap} = es la radianza observada sobre agua ópticamente profunda

(considerándose para el área de estudio el valor de radiancia más pequeño en aguas profundas fuera de la laguna).

El procedimiento usual es la linearización de la (ec. 6) como sigue:

$$-k_t z + M = \ln(L_d - L_{ap}) - \ln(L_f) \quad (7)$$

Esta transformación, conocida como ajuste por agua profunda, lineariza el efecto de atenuación exponencial de la radiancia con la profundidad, resaltando los efectos del fondo los cuales se pueden visualizar enmascarando en la escena todo aquello que no este cubierto por agua y elaborando dispersogramas con las tres primeras bandas de la imagen de satélite TM corregidas por profundidad.

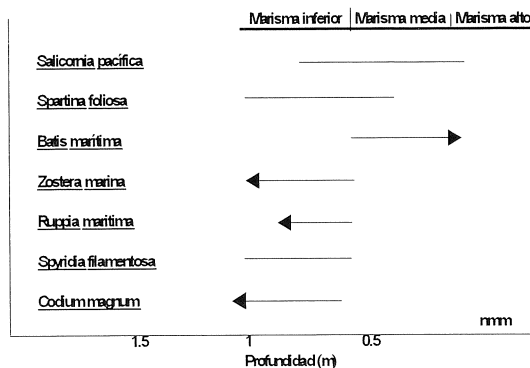
Suponiendo a D_{nap} constante en la (ec. 3) y apoyándonos en profundidades conocidas para algunos puntos, se pueden calcular los coeficientes de atenuación k y el efecto del fondo $\ln(L_f) + M$. Con estos parámetros, invirtiendo la (ec. 3) podemos estimar z de la siguiente manera:

$$z = 1 / 2 \sum_{i=1}^2 - \frac{1}{k_t} [\ln(L_d - L_{ap})_i - \ln(L_f)_i - M] \quad (8)$$

IV RESULTADOS

IV.1 ESTIMACION DE VEGETACION

Del muestreo de campo realizado en agosto de 1996 se observó una distribución espacial extensa con un perfil de tres estratos de vegetación respecto al nivel medio del mar (nmm) como sigue: **Marisma.-** de 0 a 0.24 m de profundidad, donde predomina Salicornia pacífica, encontrándose también Spartina foliosa y Batis marítima. **Pastos Marinos.-** hasta 0.44 m en los cuales predomina Zostera marina y en menor proporción Ruppia marítima. Y **Algas.-** al rededor de los 1.52 m en adelante, en las cuales se encontraron entremezclados Spyridia filamentosa y Codium magnum, además del pasto marino Zostera marina. Lo anterior coincide por el perfil descrito por Warne (1969) mostrado en la (Fig. 7).



Modificado de Warne (1969).

Figura 7. Muestra la estratificación vertical de vegetación en la laguna en base al análisis de muestras colectadas en agosto de 1996. Las flechas y líneas muestran el rango de distribución de cada especie.

IV.2 ESTIMACION DE SEDIMENTO

Considerando los resultados del análisis granulométrico de sedimentos realizado por (Phleger, 1962), (anexo 2) se tiene que en la boca de acceso a la laguna e inicio de los canales internos, presentan arena-media pobremente clasificada con asimetría negativa y hacia los canales internos más someros y planicie intermareal, arena muy fina moderadamente bien clasificada.

En las muestras colectadas en agosto de 1996, principalmente en los canales internos y planicie intermareal, del análisis granulométrico (anexo 2) se observan arenas medias a finas moderadamente bien clasificadas con asimetría negativa en el canal principal e inicio de los canales internos, tendiendo hacia arenas muy finas bien

clasificadas con asimetría positiva en los canales someros y planicies intermareales. En las áreas de marisma superior y halófitas se presenta arena muy fina con asimetría positiva, muy probablemente debido a que la vegetación actúa como trampa de sedimento.

La kurtosis se presenta como leptocúrtica caracterizada por una desviación estandar pequeña, lo cual evidencia una tendencia de sedimento a arena bien clasificada.

Al complementar los resultados obtenidos del muestreo de agosto de 1996 con los de (Phleger, 1962), se observa una tendencia en el comportamiento de los parámetros estadísticos del tamaño de sedimento, de lo cual se infiere que la boca de acceso es estable y la laguna presenta una tendencia hacia el equilibrio interno en la dinámica sedimentaria, regulada por el flujo y reflujo de mareas.

IV.3 ESTIMACION DE TIPO DE SUSTRATO

Utilizando el paquete de computación ER-mapper 5.2 se aplicó a la imagen de satélite TM un realce en falso color rojo-verde-azul (rgb) empleando las bandas 3,2,1 respectivamente, para resaltar las características del fondo (Fig. 3), lo cual es de utilidad en la elaboración de clasificaciones no-supervisadas y supervisadas de tipos de sustrato, ya que permite distinguir rasgos de la laguna tales como cobertura de: canales, planicies, vegetación y salina. Asimismo se resaltan las características del continente como son la cobertura de vegetación, suelo rocoso, sedimentos y el poblado Guerrero Negro, B.C.S.

Para efecto de separar los diferentes tipos de sustrato convirtiendo la imagen multispectral en clases de información temática, se procedió a elaborar una clasificación no-supervisada (isoclas) en la cual se agrupan automáticamente las categorías de píxeles que presentan firmas espectrales similares. Se inició con el cálculo de la estadística a los valores de la imagen de satélite TM corregida por profundidad (X) considerando la linearización de la radiancia con respecto a la profundidad propuesta por (Lyzenga, 1981), mediante la (ec. 6), es decir, $X_i = \ln(D_n - D_{npi})$ $i=1,2,3$. Se aplicó para las tres bandas (X_i), un máximo de 22 clases, una desviación estandar de 0.8 y una distancia mínima de clase de 1.5. Dando como resultado 22 clases de sustrato y su cobertura individual, así como una total de 9381.21 has, las cuales fueron posteriormente reagrupadas en 11 clases (Fig. 8) quedando como sigue:

	Clase	Area (has)
1.-	Mar profundo	1.06
2.-	Salina	18.43
3.-	Arena somera	807.43
4.-	Canal profundo con arena media	3474.62
5.-	Canal intermedio con arena fina	122.31
6.-	Planicie intermareal sedimento - vegetación	960.00
7.-	Planicie intermareal vegetación - sedimento	1241.00
8.-	Halófitas	284.81
9.-	Planicie intermareal con arena muy fina	1802.12
10.-	Marisma superior	664.31
11.-	Canal somero con arena muy fina	5.12

Posteriormente para visualizar los distintos tipos de sustrato, se elaboraron dispersogramas mediante la generación de un compuesto en falso color (r,g,v) con X3, X2 y X1 respectivamente. Estos muestran la gráfica de los valores de X como sigue X2 vs X1 y X3 vs X1 (Figs. 9 a y 10 a), mostrando cúmulos de valores de píxeles correspondientes a los diferentes tipos de sustrato. En ambas figuras se identifica fácilmente en el margen superior derecho los valores correspondientes a la salina, en la parte inferior derecha los valores que corresponden sedimentos tipo arena y en el margen inferior izquierdo a vegetación y sedimento fino.

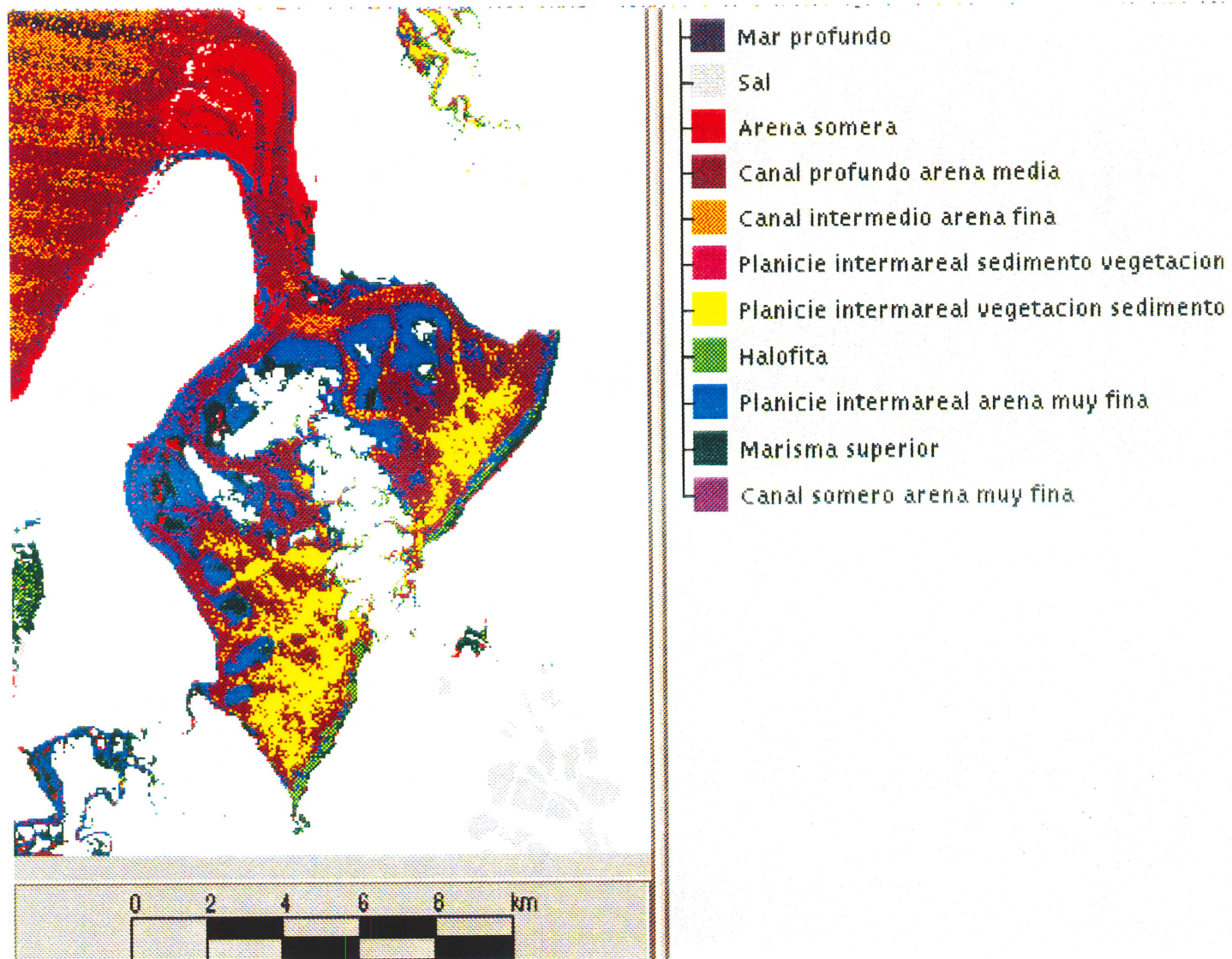


Figura 8. Reclasificación de tipos de sustrato de la imagen multiespectral Landsat TM a partir de la clasificación no-supervisada.

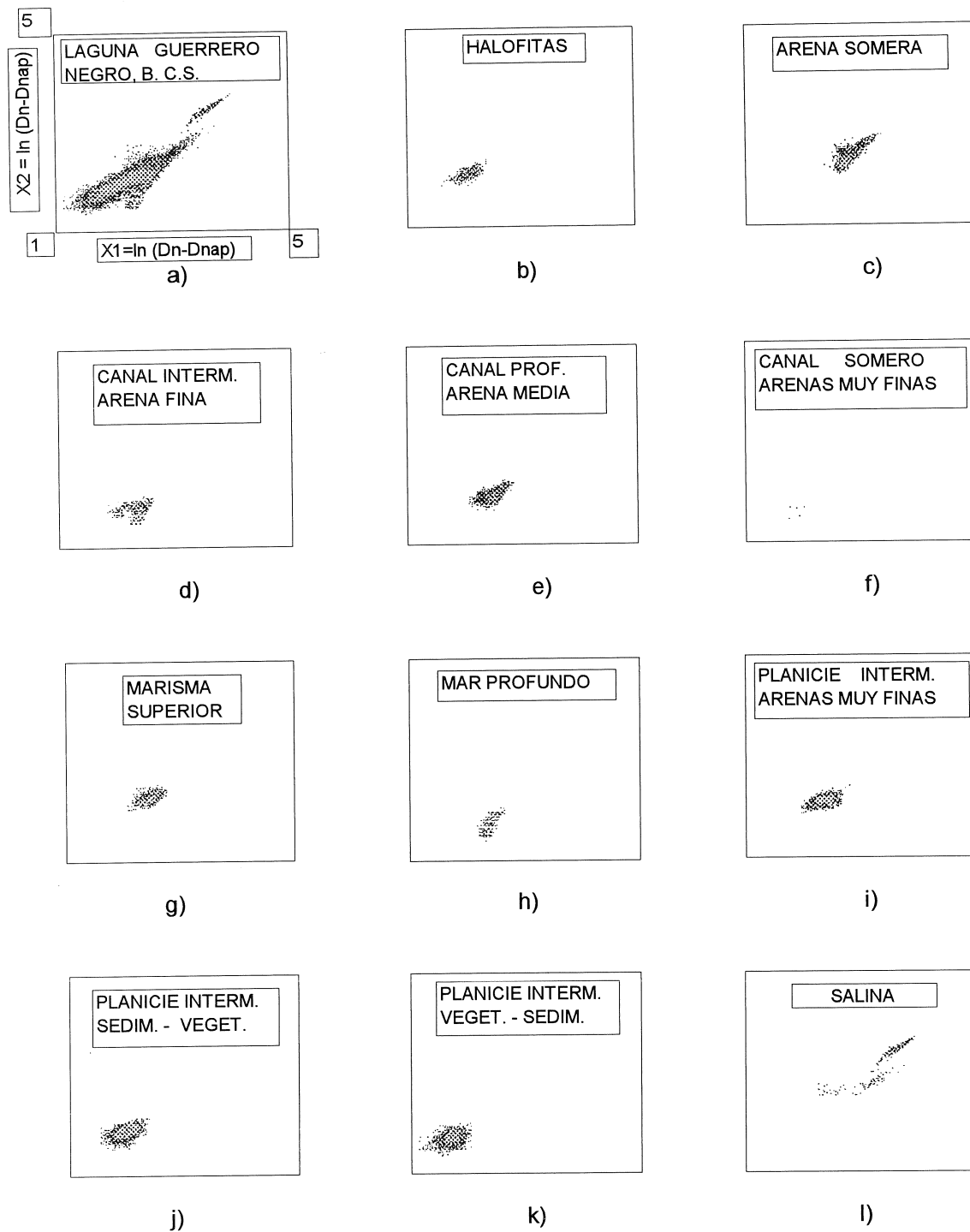


Fig. (9) Dispersogramas de X_2 vs X_1 para la subescena Laguna Guerrero Negro, B.C.S. y las 11 clases de sustrato producto de reagrupar la clasificación no-supervisada.

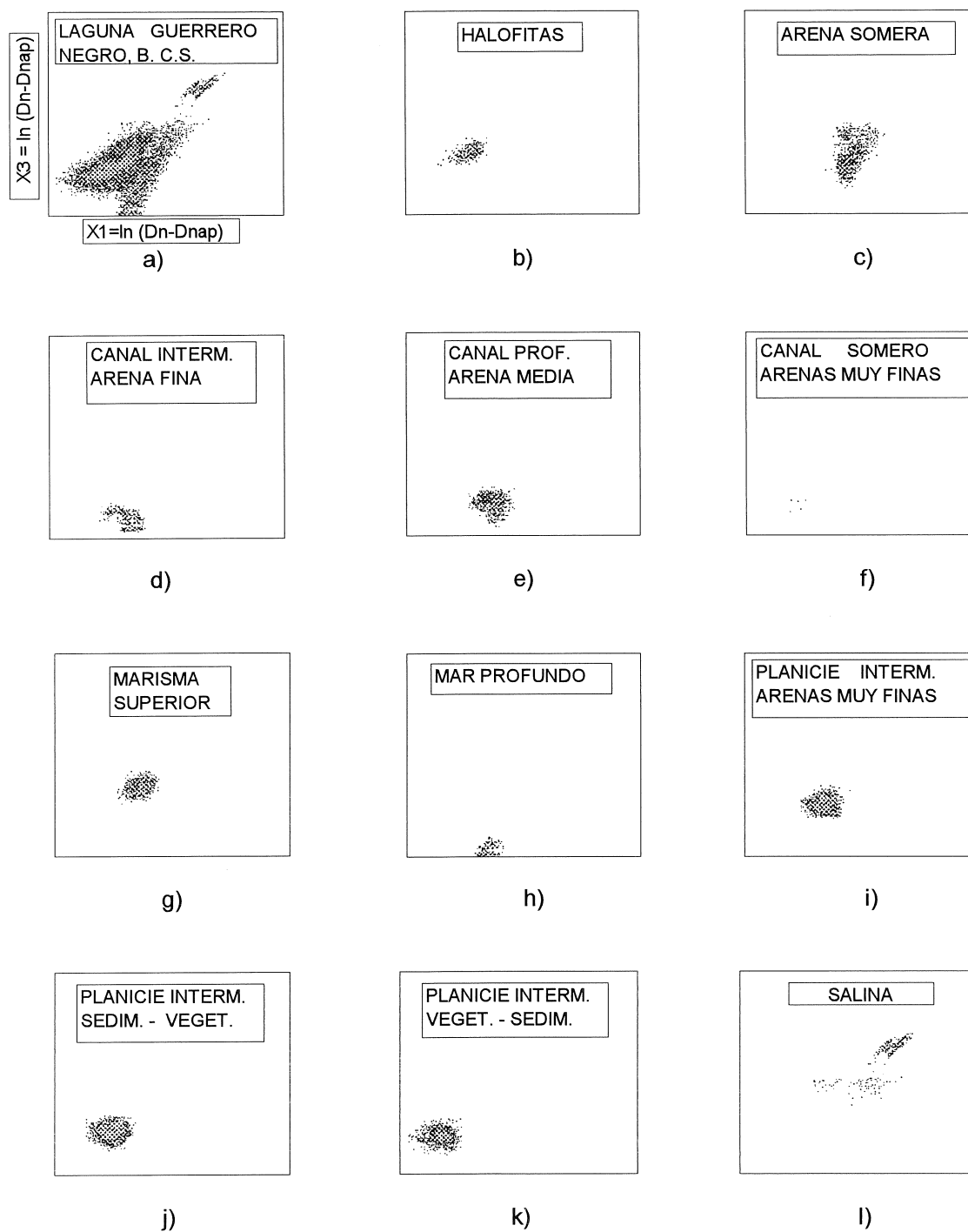


Fig. (10) Dispersogramas de $X3$ vs $X1$ para la subescena Laguna Guerrero Negro, B.C.S. y las 11 clases de sustrato producto de reagrupar la clasificación no-supervisada.

Una vez obtenidos los dispersogramas con todas las clases de X se elaboró un compuesto en falso color (r,g,v) conteniendo (X3,X2,X1) y una capa de intensidad con la clasificación no-supervisada, reclasificada. A partir de lo cual se depuraron las 11 diferentes clases enmascarando todas aquellas celdas que no pertenecen a la clase en cuestión, haciendo evidente su agrupación en nubes de puntos con propiedades similares, y se realizaron dispersogramas para cada una, (Figs. 9 y 10).

En la figuras 9, c,d,e,h,i se observan las clases que conforman al cúmulo correspondiente a sedimento en la figura 9 a, variando acorde a la profundidad paulatinamente de canal profundo con arena media - canal intermedio con arena fina - planicie intermareal con arenas muy finas a planicie intermareal sedimento vegetación. Las figuras 9, b,g y k corresponden a vegetación dispuesta en función del perfil de distribución mostrado en la (Fig. 7), finalmente la (Fig. 9 l), muestra con los valores más altos correspondientes a la salina.

Los dispersogramas correspondientes a la (Fig. 10) presentan una tendencia similar a las de la (Fig. 9), no obstante, se observa una mayor dispersión de los puntos debido a que la banda 3 resalta los rasgos de sedimento y vegetación y presenta una menor penetración en la columna de agua a diferencia de la banda 1 y 2.

IV.4 ESTIMACION DE LA BATIMETRIA

Se inició con la corrección por profundidad para los números digitales (D_n) de la imagen de satélite TM, graficando el logaritmo natural de D_n corregido por profundidad, es decir $X = (D_n - D_{nap})$ para las bandas 1, 2 y 3 contra los valores de profundidad medidos en el campo, para elaborar una regresión lineal y obtener los coeficientes de atenuación “ k ” de la radiancia con respecto a la profundidad (pendiente de la regresión) y el término correspondiente a la reflectancia del fondo “ L_f ” (ordenada al origen) (Fig. 11). Una vez calculados los coeficientes de atenuación se aplicó el estimado de la (ec. 8), obteniendo una imagen con la distribución de profundidades (Fig. 12), presentándose la mayor profundidad en el canal de acceso, disminuyendo laguna adentro a través de los canales internos hasta llegar a la planicie intermareal y zona de halófitas donde la profundidad es menor a 2 m. La consideración en la (ec. 8) de los términos aditivo (M) y multiplicativo (t) se debe a la baja intensidad de la radiancia en sustratos de sedimento fino y vegetación, y a la falta de datos de profundidad en estos, lo cual da como resultado la sobre-estimación de z . Para efecto de encontrar los valores de “ M ” y “ t ” que permitan ajustar nuestros datos al modelo, se separaron las clases de sustrato en dos grupos como se muestra en la tabla 1, y se obtuvieron de manera empírica los valores para “ M ” y “ t ” encontrándose que el modelo se ajusta en las bandas 1 y 2 para los valores calculados de k y L_f en sustratos claros. Y para sustrato oscuro en la banda 1 el término “ M ” tiene un valor de -0.7 y en ambas bandas se aplica un valor de “ t ” igual a 3.

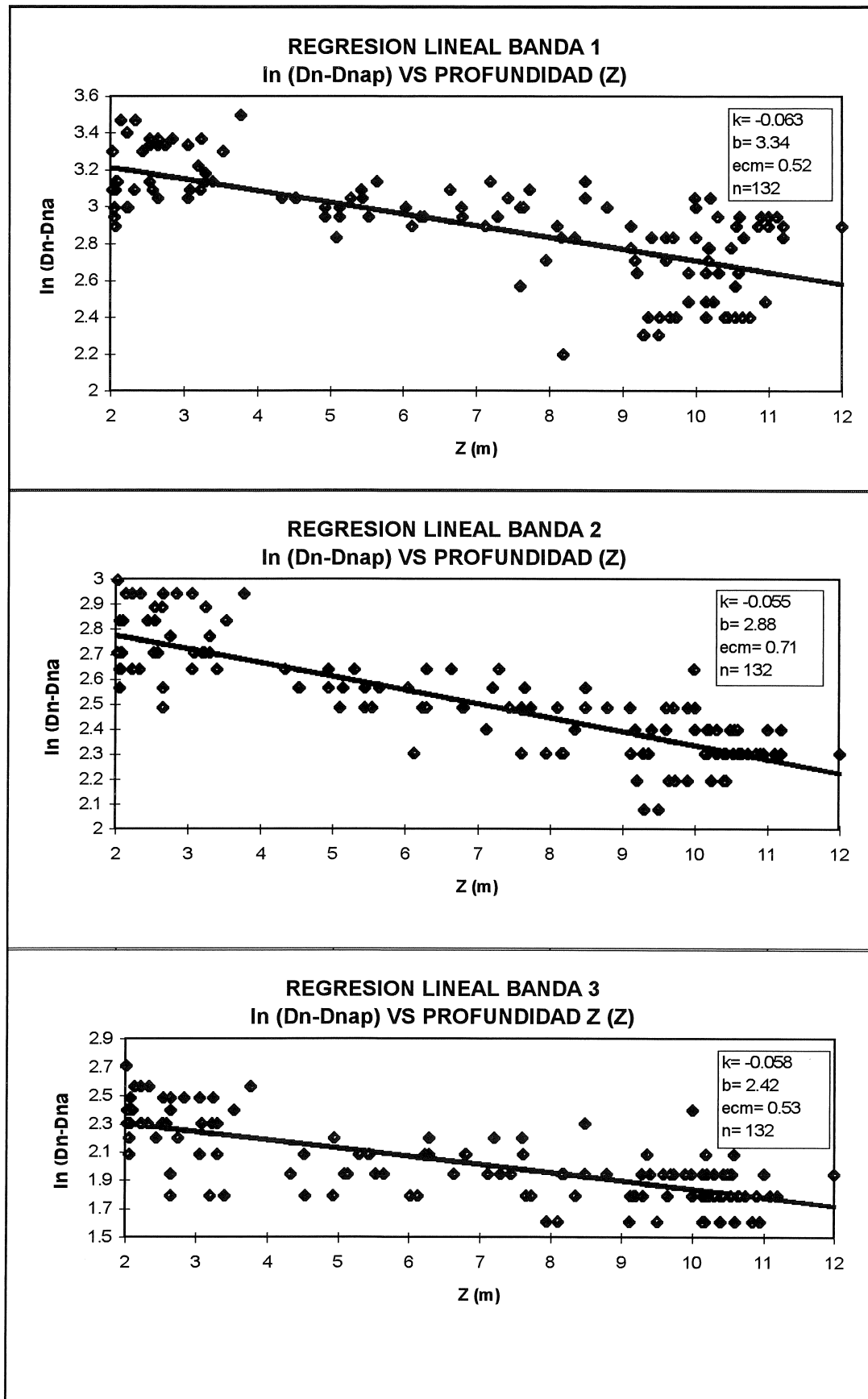


Figura (8) Regresión lineal de $\ln (Dn-Dnap)$ vs Z para los valores conocidos de profundidad, aplicado a las bandas 1,2 y 3. Usando la fórmula $y = kx + b$

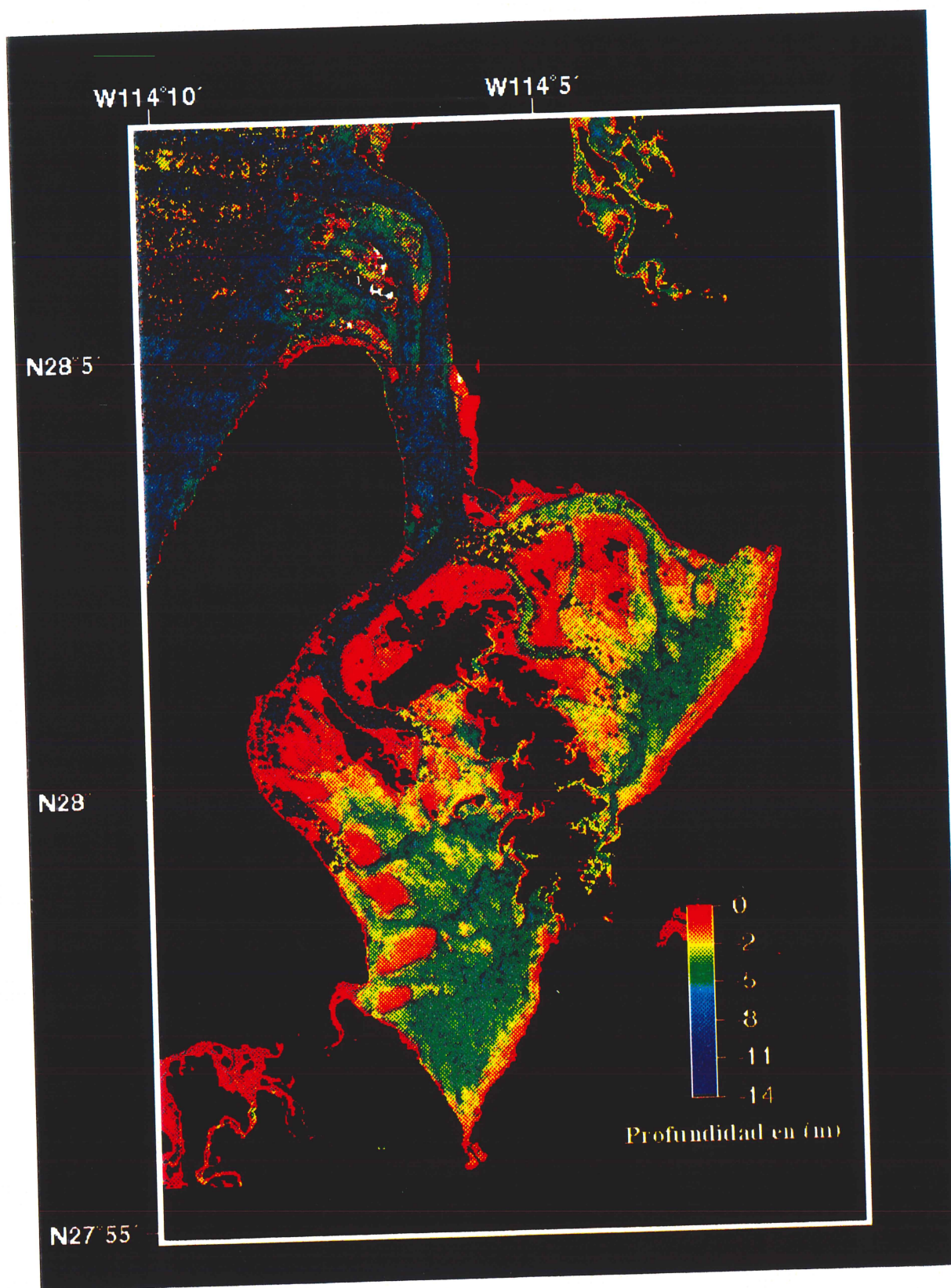


Figura 12. Iluminación artificial desde el noroeste de la batimetría derivada de imagen multiespectral Landsat TM, en Laguna Guerrero Negro, B.C.S. y texturizada con una escala de profundidad en color.

La salina se excluye debido a los valores de radiancia que presenta y que contrastan con las otras clases de sustrato al aplicar el (MOS) modificado.

CLASE	Banda 1				Banda 2			
	La	k	M	t	La	k	M	t
CLAROS (50.92% DE COBERTURA)								
MAR PROFUNDO	3.34	-0.063	0	1	2.88	-0.055	0	1
ARENA SOMERA	3.34	-0.063	0	1	2.88	-0.055	0	1
CANAL PROFUNDO ARENA MEDIA	3.34	-0.063	0	1	2.88	-0.055	0	1
CANAL SOMERO ARENA MUY FINA	3.34	-0.063	0	1	2.88	-0.055	0	1
OSCUROS (49.08% DE COBERTURA)								
CANAL INTERMEDIO ARENA FINA	3.34	-0.063	-0.7	3	2.88	-0.055	0	3
PLANICIE INTERMAREAL SEDIMENTO VEGETACION	3.34	-0.063	-0.7	3	2.88	-0.055	0	3
PLANICIE INTERMAREAL VEGETACION SEDIMENTO	3.34	-0.063	-0.7	3	2.88	-0.055	0	3
HALOFITAS	3.34	-0.063	-0.7	3	2.88	-0.055	0	3
PLANICIE INTERMAREAL ARENA MUY FINA	3.34	-0.063	-0.7	3	2.88	-0.055	0	3
MARISMA	3.34	-0.063	-0.7	3	2.88	-0.055	0	3
SALINA	na	na	na	na	na	na	na	na

Tabla 1.- Muestra la separación de las clases en dos grupos; los correspondientes a sustrato claro (arenas) y a sustrato oscuro (sedimento fino y vegetación).

Una vez obtenida la figura 12, se seleccionaron los valores de (z) medidos en campo y sus coordenadas UTM, con los correspondientes de (z) obtenidos al aplicar el (MOS) modificado. Para realizar una regresión lineal y obtener la correlación entre los valores de (z) medida en campo vs (z) calculada (Fig. 13). A los resultados de la regresión $y = kx + b$ se les aplicó un análisis de correlación de dos variables cuantitativas para obtener el coeficiente de correlación denominado Producto-momento de Pearson obteniéndose $r = 0.4996$.

Considerando para $n > 100$ y r crítico = 0.12 a una $(P) < 0.5$; se tiene un valor calculado de $r = 0.4996$. Por lo cual, el coeficiente de correlación de los valores de (z) sí

es significativo, y el valor positivo implica una correlación positiva tendiendo hacia uno, es decir, a medida que aumenta el valor en x, se incrementa también en y.

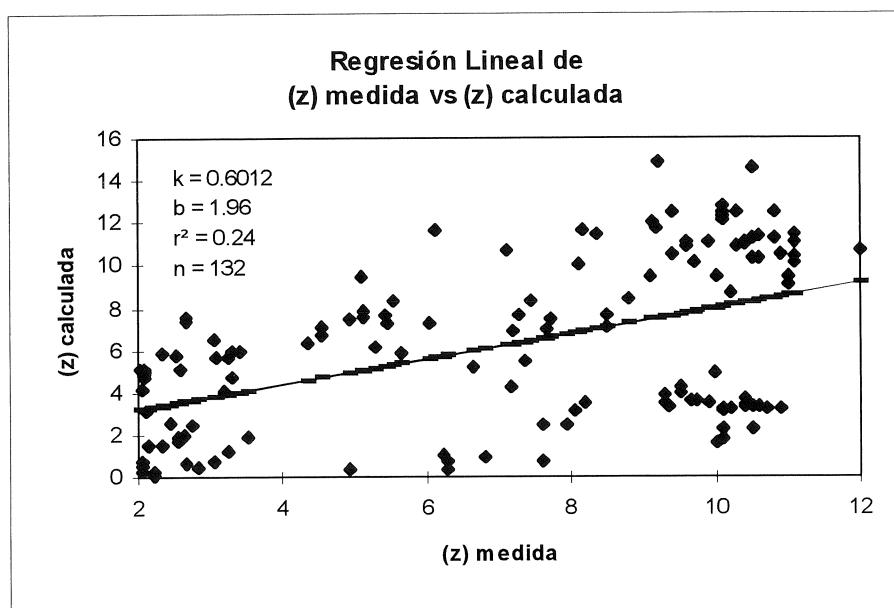


Figura 13. Regresión lineal de (z) medida en el campo vs (z) obtenida de aplicar el (MOS) modificado.

Para efecto de analizar de otra manera el valor de r , se realizó un análisis estadístico aplicando una prueba Z debido a que el número de datos es mayor de 30; partiendo de la hipótesis de trabajo $r \neq 0$, se tiene que:

$$Z = r/s \quad (\text{ec. 9})$$

donde S_r es el error estandar, por lo tanto;

$$S_r = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \quad (\text{ec. 10})$$

Contrastándose con el valor crítico de Z al 95% de confianza, es igual a 1.96.

El resultado de $Z = 5.87$, por lo tanto como $Z_{\text{obs.}} > Z_{\text{crítico}}$, se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que r es significativamente diferente de cero, por lo tanto, existe una correlación entre los datos tendiendo hacia uno.

El valor del error cuadrático $r^2 = 0.24$, lo cual implica que el 24% de la varianza está explicado por el modelo.

V DISCUSIONES

La metodología empleada por la mayoría de autores, (Lyzenga 1978 y 1981; Philpot, 1989; Ji et. al., 1992; Bierwirth et al., 1993; Maritorena et. al. 1994 y 1996), está sustentada en un (MOS) para la obtención de profundidad y tipo de sustrato (ec. 5), tomando en consideración condiciones tales como aguas claras, poco profundas y una estratificación homogénea de materia particulada y disuelta en la columna de agua.

Al aplicar el (MOS) al presente trabajo, los resultados se ajustan principalmente en áreas donde se contó con la mayor cantidad de datos de profundidad medidos en el campo y que presentan fondo claro (arenas) como es el caso del canal profundo, canal intermedio y bajos de arena (Fig. 6).

En el caso de áreas someras con presencia de sedimento fino y vegetación, debido a que presentan valores de radiancia pequeños y a que no se contó con suficientes datos de profundidad, al aplicar el modelo óptico se obtuvo una sobre-estimación de la profundidad (z), por lo cual se propone un modificador del (MOS) que considera dos términos adicionales (ec. 6); uno aditivo (M), el cual está en función del tipo de sustrato y otro multiplicativo (t), que funciona como un modulador de valores de z en respuesta a los cambios en el tipo de sustrato. Los valores para los términos " M " y " t " se encontraron de manera empírica tabla 1, lo cual permite estimar la profundidad, coincidiendo con lo reportado por (Philpot 1989).

El empleo del promedio de las bandas uno y dos corregidas por profundidad para estimar la batimetría aplicando la (ec. 8), dió buenos resultados, ya que la banda uno se caracteriza por tener una mayor profundidad de penetración en la columna de agua y la banda 2 permite distinguir los rasgos de sedimento y vegetación.

La clasificación no supervisada de las bandas corregidas por profundidad (X1,X2, X3) y su posterior re-clasificación, permitió estimar clases discretas de tipos de sustrato, con lo cual fue posible ajustar las estimaciones de profundidad obtenidas al aplicar el (MOS) modificado.

Para efecto de distinguir los diferentes tipos de sustrato en la laguna, la elaboración de una clasificación no supervisada de (X1, X2 y X3) es de gran utilidad ya que agrupa sistemáticamente valores de píxeles que presentan características en común, a diferencia de hacer una clasificación supervisada de manera visual. Referente a la reclasificación, la toma y análisis de muestras de sedimento y vegetación fue de mucha ayuda en la reagrupación de los tipos de sustrato obtenidos, pudiendo distinguirse incluso áreas de cobertura . A partir de la reclasificación, se elaboraron dispersogramas correspondientes a cada clase de sustrato (Figs. 9 y 10), siendo de utilidad para identificar las áreas correspondientes a cada cúmulo de puntos asociado a la clase a que corresponde y a su sitio en los dispersogramas.

La utilidad de obtener los dispersogramas individuales por clase, es observar el comportamiento de los diferentes tipos de sustrato, lo cual servirá en estudios subsecuentes que se realicen en áreas donde no se tiene conocimiento referente al fondo,

dando de esta manera una visión sinóptica a diferencia de técnicas convencionales para la identificación de características del fondo las cuales se ven limitadas a una clasificación muy general. Así mismo a diferencia de otros autores los cuales separan rasgos generales de tipo de fondo tales como sedimento y vegetación, en el presente trabajo se llegó a la identificación de 11 clases de sustrato incluyendo variaciones en el tamaño de sedimento mediante el análisis de muestras de sedimento usando técnicas convencionales como el análisis granulométrico utilizando el tubo de Emery.

Para estimar profundidad es necesaria la medición de profundidades en campo y su georeferenciación, y elaborar la regresión lineal de $\ln(D_n - D_{nap})$ vs profundidad (z); para obtener los valores correspondientes a las características del sustrato (ordenada al origen) y coeficiente de atenuación (pendiente de la regresión). Al respecto, la estimación de profundidad funcionó adecuadamente para las zonas cuyo sustrato es el mismo que el de los puntos con los cuales se realizó la regresión lineal y en el caso de fondos opacos tales como vegetación en los cuales no se contó con suficiente información, se aplicó un factor aditivo (M) que estuviera en función del tipo de sustrato y un factor multiplicativo (t) que funciona como modulador de valores de z ante los cambios en el tipo de sustrato, (tabla 1).

El considerar el factor aditivo y multiplicativo permitió ajustar las profundidades en clases de sustrato tales como canal intermedio arena fina, planicie intermareal sedimento vegetación, planicie intermareal vegetación sedimento, halófitas, planicie intermareal arena muy fina y marisma, dando buenos resultados al compararlos con las mediciones en

campo. Para el caso de las clases canal profundo arena media, arena somera y canal somero arena muy fina, la aplicación del modelo óptico se ajustó a la realidad debido principalmente a la cantidad de puntos tomados en los sondeos batimétricos y por presentar fondo claro, como es el caso de las clases, canal profundo arena media, canal somero arena muy fina y arena somera. Por lo anteriormente mencionado es importante contar con suficientes datos de sondeos batimétricos de sitios pre-establecidos a partir del realce de características del fondo logrado del realce en falso color (r,g,b) de la imagen multiespectral de satélite Landsat, T.M. (Fig. 4). Esto permitirá calibrar el modelo de tal manera que el factor aditivo (M) y (t) tiendan a disminuir e incluso a ser excluidos.

En lo referente a la exactitud de la posición tomada con el geoposicionador de satélite (± 100 m), debe ser mayor que el la dimensión del pixel que en el caso de la imagen es de 25 m, ya que esto puede afectar los resultados.

La presencia del bandeo en la imagen multiespectral Landsat TM, es debido a que los sensores del satélite fueron diseñados para la adquisición de datos en tierra, por lo cual la información en cuerpos de agua se encuentra muy cerca del umbral de sensibilidad del sensor, dejando un bandeo perpendicular a la trayectoria del sensor. Este efecto es fácil de corregir cuando la imagen no está georeferida ni proyectada en coordenadas (UTM).

Es importante para obtener resultados satisfactorios, que exista contemporaneidad de los datos medidos en campo y la imagen multiespectral, para efecto de evitar posibles fuentes de error.

VI CONCLUSIONES

El uso de imágenes de satélite multiespectrales para estimar profundidad y tipo de sustrato en aguas someras es de utilidad especialmente cuando no se cuenta con cartas batimétricas, ya que aporta una aproximación a la realidad delineando claramente en una imagen de superficie del fondo, mostrando rasgos tales como: canales de acceso, canales internos, planicies intermareales y zonas de marisma.

A diferencia de las técnicas convencionales para elaboración cartas batimétricas a partir de sondeos puntuales de profundidad en las cuales pueden omitirse rasgos importantes. El uso de imágenes multiespectrales de satélite TM, permite obtener una imagen continua de profundidad que resalta los principales rasgos tales como canales, planicies, bajos y áreas con vegetación.

Las técnicas aplicadas en el presente trabajo son una herramienta alternativa para el estudio de cuerpos de aguas claras y poco profundas con una estratificación de materia orgánica disuelta y particulada homogénea. A su vez, permiten el estudio de amplias regiones a un costo menor que las técnicas convencionales.

La consideración en el modelo óptico simple de un factor aditivo (M) y uno multiplicativo (t) funciona para sustratos opacos y áreas de las cuales no se tiene suficiente información de profundidad, para efecto de calcular el coeficiente de atenuación (k) y las características del fondo (Lf) que permitan estimar la profundidad con mayor precisión.

La aplicación del Modelo Optico Simple modificado para la estimación de profundidad funcionó con muy buenos resultados en el área de estudio.

La elaboración de dispersogramas apoyados en la imagen de reclasificación de tipos de sustrato, permite a diferencia de la mayoría de autores, resaltar las características de los cúmulos de pixeles correspondientes a cada clase. Lo cual es una herramienta importante a utilizar en zonas donde no se cuenta con información de los tipos de fondo.

Finalmente, las posibles fuentes de error en la estimación de profundidad pueden ser; el bandeo presente en la imagen multiespectral Landsat TM, la imprecisión en la ubicación los puntos de batimetría (± 100 m) con respecto a las dimensiones del pixel (25 m) y la no contemporaneidad en la medición de puntos de profundidad y adquisición de la imagen multiespectral.

VII LITERATURA CITADA

Bierwirth, N.P., T.J. Lee, & V.R. Burne. 1993. Sallow Sea-Floor Reflectance and Water Depth Derived by Unmixing Multispectral Imagery, *Photogrametric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 59, No. 3, 331-338

Falk D., Brill D. y Stork D. 1986. Seeing the Light, Optics in Nature Photography, Color, Vision and Holography.
John Wiley & Sons, Inc. 8-23

Friedman, G.M. & Sanders, J.E. 1978. Principles of Sedimentology
Jhon Wiley & Sons, 70-81

Iqbal M. 1983. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press.
29-42

Jerlov, N.G. 1976. Marine Optics, Oceanography Series Volume 14
Elsevier Scientific Publishing Company. 1-25

Ji Wei, Civco D.L. y Kennard W.C. 1992. Satellite Remote Bathymetry: A new Mechanism for modeling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 58, No. 5, 545-549.

Lankford R. 1970. Coastal Lagoons of México, Their Origin and Classification, UESCO Manual Geologist, Centro de Ciencias del Mar y Limnología, D.F., México. 10-25

- Lillesand T. M. & Kiefer R. W. 1979. Remote sensing and image interpretation, Wiley J. & Sons, New York. 2-29
- Lyzenga, D.R. 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, Vol. 17, No. 3, 379-383
- Lyzenga, D.R. 1981. Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and landsat data. *Int. J. Remote Sensing*, Vol 2, No. 1, 71- 82
- Marinone, M. 1979. Transporte litoral en las barras de las lagunas Ojo de Liebre y San José en Bahía Viscaíno. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas.
- Maritorena S. 1994. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo. *American Society of Limnology and Oceanography*, Vol. 37, No. 7, 1689-1703
- Maritorena S. 1996. Remote sensing of the water attenuation in coral reefs: a case study French Polynesia, *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 17, No. 1, 155-166
- Philpot D. William. 1989. Bathymetric mapping with passive multispectral imagery. *Applied Optics*, Vol. 28, No. 8, 1569-1578

- Phleger F.B. & Ewing G.C. 1962. Sedimentology and Oceanography of Coastal Lagoons in Baja California, México. Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla, Calif. Geological Society of America Bulletin, v. 73, p. 145-182
- Phleger F. B. 1965. Sedimentology of Guerrero Negro Lagoon, Baja California, México. Contribution No. 48, Foraminifera Laboratory. Scripps Institution of Oceanography, University of California. 205-235
- Phleger F. B. 1969. Some general features of coastal lagoons. Mem. Simp. Intern. Lagunas Ccostras, UNAM-UNESCO, D.F. 5-25
- Preisendorfer R.W. 1976. Hidrologic Optics, Volume I. Introduction. U.S. Department of Commerce, National Oceanic & Atmospheric Administration Environmental Reserch Laboratories. Honolulu Hawaii. 1-10
- Richards A.J. 1986. Remote Sensing Digital Image Analysis An Introduction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 2-4
- Smith Raymond C. & Baker Karen S. 1981. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm). Applied Optics, Vol. 20, No. 2, 177-184
- Tyler J.E. 1977. Light in the Sea
Downen, Hutchinson & Ross, Inc. 40-65

Warne J.E. 1969. Mugu Lagoon, Coastal Southern California: Origin, Sediments and Productivity. *Lagunas Costeras, un Simposio. Mem. Simp. Intern. Lagunas Costeras. UNAM-UNESCO, Nov. 28 - 30, 1967. México, D.F., 137- 154.*

ANEXO I

Ubicación de datos batimétricos corregidos por mareas, ubicados en proyección Universal Transversa de Mercator, y sus valores correspondientes de profundidad (z) y números digitales (Dn) para las bandas 1,2 y 3. (Enero y Febrero de 1994).

x	y	z	B1	B2	B3
783505.2	3107713.5	8.79	74	25	16
783474.6	3107866.8	8.49	75	25	16
783444.7	3107958.2	8.49	77	26	19
783441.8	3108081.5	7.6	74	25	18
783411.9	3108204.2	7.2	77	26	18
783408.9	3108327.2	6.8	74	25	17
783407.5	3108388.8	6.81	73	25	17
783208.1	3109863	2.75	82	29	18
783411.1	3110545.5	3.77	87	32	22
782721.2	3110806.8	3.3	77	28	17
782722	3110775.8	3.2	79	28	15
782748.2	3110838	3.4	77	27	15
783024.9	3110690.5	4.937	74	26	15
783079.7	3110691.8	4.54	75	26	15
783106.7	3110692.5	5.64	77	26	16
783107.4	3110661.8	6.64	76	27	16
783081.1	3110630.2	7.65	74	26	15
783054.9	3110567.8	2.65	75	26	15
783056.3	3110506.2	2.65	75	25	16
783830.1	3110155.2	4.53	75	26	17
783803.9	3110092.8	5.43	76	25	17
783749.8	3110060.5	5.53	73	25	16
783697.2	3109997.8	6.03	74	26	15
783671	3109935.8	6.23	73	25	17
783644.8	3109904	7.43	75	25	16
783617.7	3109872.8	7.731	76	25	15
784614.5	3107031.2	11	73	24	16
784615.2	3107000.2	11	72	24	16
784616.6	3106938.8	12	72	23	16
783979.9	3106122.5	3.05	75	27	17
783953.6	3106091	2.06	74	27	17
783927.4	3106059.5	2.06	73	26	18
783845.6	3106026.8	2.062	72	27	19
783765.2	3105963.2	2.06	76	30	20
783711.2	3105931.2	2.07	77	28	21
783685.6	3105869	2.07	76	28	20
783660.1	3105807	2.07	77	28	20
783633.8	3105744.5	2.08	77	28	19
783713.4	3105839	2.58	76	28	19
783768.9	3105809.5	3.08	76	28	19
783851.4	3105780.5	5.09	71	25	16
784047.1	3105600.2	2.1	77	30	20
784160.4	3105449	8.11	72	25	14
784188.1	3105419	9.11	72	25	14
784216.6	3105388.8	9.12	70	23	15
784245.1	3105327.5	7.12	72	24	16
784272.8	3105328.2	6.12	72	23	15
783655.6	3104821	8.17	71	23	16
783602.4	3104758	9.17	69	24	15
783576.1	3104726.8	10.17	69	23	15
783522	3104694.5	10.18	70	23	15
783468	3104662.5	10.18	70	23	15

Ubicación de datos batimétricos corregidos por mareas, ubicados en proyección Universal Transversa de Mercator, y sus valores correspondientes de profundidad (z) y números digitales (Dn) para las bandas 1,2 y 3. (Enero y Febrero de 1994).

x	y	z	B1	B2	B3
783414.6	3104599.5	10.18	69	24	15
783333.6	3104567	10.18	69	23	14
783278.8	3104565.8	11.19	72	24	15
783225.5	3104533.2	11.19	71	23	15
783171.4	3104501.2	10.19	70	24	17
783083.8	3104715	7.29	73	27	16
783055.3	3104776	6.29	73	25	17
783026.9	3104836.8	6.29	73	27	18
782997.6	3104897.8	5.29	75	27	17
782970.6	3104897	3.3	78	29	19
786362.1	3105963.8	8.19	63	23	16
786388.4	3105995	9.29	64	23	16
786442.5	3106027.2	10.4	65	23	14
786550.6	3106091.2	10.4	65	22	15
786630.9	3106155	9.9	66	22	16
786684.9	3106187	9.2	68	22	15
786765.2	3106250.5	9.5	64	21	14
786735.2	3106373.2	10	71	25	20
786872.5	3106345.8	9.3	64	21	15
786898.8	3106377	7.61	67	23	17
786926.6	3106377.8	10.31	68	24	16
786928.1	3106316.2	9.51	65	21	14
786470.2	3106027.8	10.43	65	22	15
786387.7	3106025.8	10.54	67	23	15
786251.9	3105991.8	10.74	65	23	15
786116	3105957.8	10.64	65	23	15
786008	3105924.2	10.44	65	23	16
785953.2	3105923	10.24	66	22	15
785899.1	3105891	9.74	65	22	16
785791.1	3105826.8	10.54	65	23	16
785682.2	3105824	10.15	65	23	15
785547.2	3105759.2	10.15	66	23	16
785384.3	3105694	9.65	65	22	15
785248.5	3105659.8	10.95	66	23	14
785085.6	3105625	7.95	69	23	14
783604.6	3105836.5	2.22	74	27	19
783630.1	3105898.5	2.32	76	27	19
783710.5	3105962	2.03	76	28	20
783655	3106022.2	2.03	76	28	19
783653.5	3106084	2.23	74	27	19
783625	3106114	3.23	76	28	19
783597.2	3106144.5	2.53	77	28	19
783000.8	3109396	2.02	81	33	24
782886.9	3109578	2.22	84	32	22
783073.1	3109798	3.53	81	30	20
783318.4	3109834.8	2.44	81	30	18
783289.2	3109895.5	2.54	83	30	19
783260.8	3109956.8	2.64	82	31	20
783233	3109986.8	2.54	82	31	21
783176.8	3110047	2.34	86	32	22
783176.4	3110062.2	2.14	86	32	22
783148.2	3110077.2	2.84	83	32	21

Ubicación de datos batimétricos corregidos por mareas, ubicados en proyección Universal Transversa de Mercator, y sus valores correspondientes de profundidad (z) y números digitales (Dn) para las bandas 1,2 y 3. (Enero y Febrero de 1994).

x	y	z	B1	B2	B3
783065.8	3110106.2	3.24	83	31	21
783038.1	3110136.2	2.65	83	32	21
783037.3	3110167	3.05	82	32	21
783219.9	3110541	9.99	75	27	16
784148.4	3110563	10	74	24	15
784176.1	3110532.8	11.1	73	23	15
784232.4	3110472.8	10.9	73	23	15
784288.6	3110412.5	10.3	73	23	15
784343.3	3110382.8	10.6	73	23	14
784276.9	3109734.2	10.2	75	24	16
784421.7	3107088.2	10.55	72	24	16
784396.1	3107026	10.65	71	23	15
784372.1	3106902	10.85	72	23	14
784348	3106747.5	10.15	68	23	14
784297.6	3106561.5	8.35	71	24	15
784221.6	3106313.2	4.34	75	27	16
784170.5	3106158	4.94	73	27	18
784092.4	3106002	5.44	75	26	17
784041.2	3105846.8	5.13	74	26	16
783936.9	3105659.5	5.13	73	26	16
782793.1	3104307.5	9.4	71	24	16
782739.8	3104244.8	9.6	71	24	16
782685.7	3104212.5	9.6	69	25	16
782631.6	3104211.2	9.9	68	25	16
782549.9	3104178.5	9.7	71	25	16
782497.2	3104115.8	10.59	68	24	17
782443.9	3104052.8	10.49	70	24	16
788910.1	3105435	9.36	65	23	17

Ubicación de datos batmétricos y sus valores correspondientes de profundidad (z)
y números digitales (Dn) para las bandas 1,2 y 3.para (Agosto de 1996).

x	y	z	B1	B2	B3
788991.6	3105588	1.07	67	26	21
788910.1	3105435	9.36	65	23	17
788820.1	3104268	1.64	62	22	16
788892.3	3103519	7.36	62	20	16
788358.6	3102928	1.2	63	22	17
788256.3	3102955	1.14	64	24	16
787659.4	3102737	3.84	64	23	15
787581.5	3102770	7.16	63	22	15
788025.0	3102474	6.88	64	24	16
788453.3	3100628	2.95	66	25	17
786913.5	3102715	0.91	69	27	20
786467.0	3103135	6.6	64	21	14
785835.0	3104734	1.06	65	22	16
782988.5	3104345	10.5	67	24	16
782533.2	3103968	9.39	69	23	16
782298.3	3103495	0.66	74	27	21
782035.8	3102942	2.85	67	24	16
782030.2	3102760	2.55	70	25	15
782290.4	3102162	4.34	67	24	16
782795.6	3101954	2.05	66	23	14
782886.0	3102085	4.95	72	30	26
782921.6	3102110	0.24	68	28	24
783225.7	3102012	5.1	71	27	22
783497.5	3102037	2.61	68	24	16
783755.5	3101603	4.83	66	23	15
783882.0	3101251	2.04	68	24	16
783933.7	3100936	0.44	70	26	20
783679.9	3100431	5.4	65	24	15
783627.4	3099944	0.81	67	24	17
783580.1	3099584	2.23	65	24	17
783532.3	3099108	2.03	59	20	15
783729.2	3098621	1.14	62	22	17
783790.6	3097271	2.75	68	27	21
784037.6	3097796	2.96	63	22	17
784243.8	3097407	3.28	62	20	15
784424.3	3097127	2.6	61	21	15
784410.8	3096727	1.52	63	23	16
783912.4	3096634	4.28	63	23	16
783725.9	3096748	2.29	69	26	20
783749.0	3096741	0.7	69	26	20
783255.0	3096672	2.11	68	25	19
783173.3	3097003	2.21	69	26	19
782875.3	3097323	3.42	65	22	15
782355.0	3097601	2.53	66	25	17
782365.2	3097868	4.73	65	23	15
782017.5	3098277	0.94	67	24	17
782003.5	3098453	8.05	65	23	17
780680.0	3101155	3.7	69	25	16
780792.8	3101239	0.64	71	26	19
781299.6	3103067	10.88	70	24	17
782337.5	3104477	7.0	88	40	34
783076.9	3104491	11.1	71	24	16

ANEXO II

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO
(Parámetros estadísticos)

Muestreo de Agosto del 96

Estación	Prof. (m)	Media	Asimetría	Desv. est.	Kurtosis
1 del 16	1.2	2.5	-0.2	0.34	1.77
1 del 17	0.24	2.86	0.44	0.31	0.4
3	2.23	3.03	-0.5	0.41	1.63
5	1.14	2.96	-0.15	0.35	0.98
6	1.52	3.03	-0.3	0.31	1.12
8	2.53	3.03	-0.26	0.3	1.02
9	0.94	3	0	0.214	
10	3.7	2.8	0	0.33	

Muestreo realizado por Phleger, 1962

Estación	Prof. (m)	Media	Asimetría	Desv. est.
25	9.14	2.65	-0.23	0.22
28	7.62	1.3	-0.25	1.42
31	5.8	2.95	-0.2	2.14
32	10.05	2.54	-0.3	0.43
33	7.9	3.05	0	0.2
34	6.7	2.92	-0.2	0.27
35	6.7	2.93	0	0.24
36	9.5	2.91	0	0.22
38	8.22	2.61	0	0.31
39	7	2.97	0	0.22
40	6.4	3.02	0	0.23
41	11.2	2.87	0	0.22
46	11.2	3.15	-0.15	0.31
47	11.2	3.17	-0.1	0.26
49	11.2	3.36	0	0.27
50	11.2	2.65	-0.75	1.88
51a	11.2	2.9	-0.12	0.34
51b	11.2	2.8	0	0.3
52	11.2	2.85	-0.1	0.26
53	8.5	2.45	-0.22	0.45
54	8.2	2.3	-0.55	1.17
60	7.6	3.1	-0.21	0.33
62	1.5	3.25	-0.23	0.22
63	2.43	3.04	-0.1	0.34