

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

COMPARACION Y DINAMICA DE LA PLAYA
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

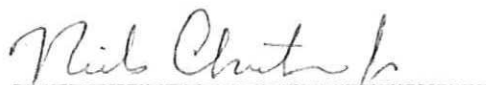
T E S I S
MAESTRIA EN CIENCIAS

LUIS MIGUEL GONZALEZ REAL

RESUMEN de la Tesis de Luis Miguel González Real, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en OCEANOGRAFIA con opción en OCEANOGRAFIA FISICA. Ensenada, Baja California, México. Septiembre de 1983.

CONFIGURACION Y DINAMICA DE LA PLAYA,
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

Resumen aprobado por:


Dr. Niels Christensen
Director de Tesis.

Se describe objetivamente la configuración de la parte Norte de la playa situada en el interior de la Bahía de Todos Santos, en Ensenada, Baja California. Como herramienta se utilizan los dos primeros modos de una descomposición en funciones empíricas ortogonales de los contornos del fondo. En el primer modo se encuentran evidencias de topografía rítmica u ondulaciones de la línea de la playa. Estas ondulaciones en la playa se presentan como una configuración estable en el intervalo 1976-1980. Se interpreta este resultado mediante un modelo teórico de la dinámica de la zona litoral [Holman y Bowen, (1982)], y se propone que la variabilidad espacial observada puede ser el producto de la interacción entre dos ondas marginales de la misma frecuencia.

CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE
EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISION DE OCEANOLOGIA

CONFIGURACION Y DINAMICA DE LA PLAYA,
ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para
obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS presenta

LUIS MIGUEL GONZALEZ REAL

Ensenada, B.C. Septiembre de 1983

TESIS APROBADA PARA SU DEFENSA POR:

Niels Christensen

Dr. Niels Christensen, Director del Comité

Hugo Peña

M.C. Hugo Gustavo Peña, Membro del Comité

C. Nava B.

M.C. Cuauhtemoc Nava Button, Miembro del Comité

Francisco Suárez Vidal

M.C. Francisco Suárez Vidal, Miembro del Comité

Maria Luisa Argote de Lavin

Dra. María Luisa Argote de Lavin, Directora de la División de Oceanología

Enrique Carrillo Barrios-Gómez

Dr. Enrique Carrillo Barrios-Gómez, Director Académico

Tesis presentada en octubre 11, 1983.

DEDICATORIA

Al Dr. Saúl Alvarez Borrego.

Su Generosidad y Firmeza, cualidades del Espíritu Mexicano.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Niels Cristensen por su orientación y sus enseñanzas que hicieron posible la culminación de este trabajo.

A los Dr. Michael K. Gaughan y Robert O. Plaisted (Q.E.P.D.) por su interés y su guía.

A la Dra. Matilde R. de González por su estímulo.

Al Ing. Marco A. Uribe.

A los M. en C. Cuauhtémoc Nava y Hugo Peña por su apoyo durante la realización de este trabajo.

Al CICESE y al MIDA por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO	Página
I.-INTRODUCCION	1
I.1.-Antecedentes	1
I.2.-Objetivos	4
II.-LOS DATOS	6
II.1.-Estaciones en la costa	6
II.2.-Perfiles de la playa	9
II.3.-Contornos del fondo	12
III.-TEORIA	25
III.1.-Funciones Empíricas Ortogonales	25
III.2.-Ondas marginales como agentes modificadores del perfil de la playa	29
IV.-RESULTADOS Y DISCUSION	36
IV.1.-Estructura espacial de la playa	36
IV.1.1.-Primer modo	37
IV.1.2.-Segundo modo	46
IV.2.-Ondas marginales y topografía rítmica	53
IV.3.-Descomposición espacio-temporal	58
V.-CONCLUSIONES	65
LITERATURA CITADA	67

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
1	Características del perfil de la playa. Tomado de Winant et al. (1975).	2
2	Bahía de Todos Santos. Ensenada, Baja California, México. Área de Estudio.	7
3	Localización de las estaciones sobre las cuales se midieron los perfiles de playa. Poligonal de referencia.	8
4	Esquema que muestra el sistema de coordenadas utilizado en este trabajo, así como el plano de referencia y varias estaciones.	10
5	Contornos del fondo para Enero 29 de 1976. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	14
6	Contornos del fondo para Agosto 24 de 1976. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	15
7	Contornos del fondo para Febrero 1 de 1977. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	16
8	Contornos del fondo para Febrero 22 de 1978. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	18
9	Contornos del fondo para Agosto 24 de 1978. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	19
10	Contornos del fondo para Marzo 23 de 1979. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del	20

LISTA DE FIGURAS (cont.)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
	sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	
11	Contornos del fondo para Agosto 20 de 1979. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	21
12	Contornos del fondo para Marzo 12 de 1980. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	22
13	Contornos del fondo para Julio 20 de 1980. Descritos con isolíneas en los niveles o cotas: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del sistema de coordenadas coincide con la estación 30 de la Figura 3.	24
14	Topografía generada por las interacciones entre los modos cero y uno (0,1), cero y dos (0,2), uno y dos (1,2), y la interacción triple (0,1,2). Tomado de Holman y Bowen (1982).	35
15	Primer modo de las funciones de la coordenada 'y': $Y_1(y)$. Gráfico secuencial para el intervalo 1976-1978 (ver texto). La escala vertical mide diferencias relativas entre puntos de una misma curva.	38
16	Primer modo de las funciones de la coordenada 'y': $Y_1(y)$. Gráfico secuencial para el intervalo 1979-1980 (ver texto). La escala vertical mide diferencias relativas entre puntos de una misma curva.	40
17	Perfiles de playa medidos el 29 de Enero de 1976 en las estaciones 6-10 y 10-13 (ver texto).	43
18	Perfiles de playa medidos el 29 de Enero de 1976 en las estaciones 16-19 y 19-22.	44
19	Primer modo de las funciones de la coordenada 'h': $H_1(h)$. Para todas las descomposiciones en el intervalo 1976-1980. La amplitud de H_1 se	45

LISTA DE FIGURAS (cont.)

<u>Figura</u>		<u>Página</u>
	grafica en el eje horizontal para conservar el concepto del perfil de la playa.	
20	Segundo modo de las funciones de la coordenada 'y': $Y_2(y)$. Para las descomposiciones en el intervalo 1976-1978.	47
21	Segundo modo de las funciones de la coordenada 'h': $H_2(h)$ para todas las descomposiciones en intervalo 1976-1980. La amplitud de H_2 se grafica en el eje horizontal para conservar el concepto del perfil de la playa.	49
22	Reconstrucción del perfil de la playa. El trazo con línea punteada muestra el perfil medido. Con 'PR' (línea continua y triángulo) se identifica la reconstrucción hecha con sólo el primer modo. Con 'SG' (línea continua y círculo) se muestra la reconstrucción hecha con la suma del primero y el segundo modo. Para las estaciones 02 (arriba) y 03 (abajo), el 29 de Enero de 1976.	50
23	Reconstrucción del perfil de la playa. El trazo con línea punteada muestra el perfil medido. Con 'PR' (línea continua y triángulo) se identifica la reconstrucción hecha con sólo el primer modo. Con 'SG' (línea continua y círculo) se muestra la reconstrucción hecha con la suma del primero y el segundo modo. Para las estaciones 04 (arriba) y 08 (abajo), el 29 de Enero de 1976.	52
24	Segundo modo de las funciones de la coordenada 'y': Y_2 . Para las descomposiciones en el intervalo 1979-1980.	53
25	Esquema del espectro de las ondas marginales forzadas por el oleaje incidente. Con una dispersión angular igual a cero se fuerzan una secuencia de modos (líneas verticales). Con una dispersión angular pequeña pero finita, se predice una ampliación de los picos modales (líneas a trazos). Tomado de Holman y Bowen (1982).	56
26	Primer modo de las funciones de la coordenada 'y': $Y_1(y)$. Para los cinco niveles o alturas. Escalado con el primer eigenvalor de la forma	60

LISTA DE FIGURAS (Cont.)

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
siguiente: $(\rho_{1ny})^{\frac{1}{2}}\gamma_1$.	
27 Primer modo de las funciones de la coordenada 't': $T_1(t)$, para los cinco niveles o alturas.	62
28 Perfiles de playa observados en la estación 11 en el intervalo 1976-1980. Notar la estacionalidad.	64

LISTA DE TABLAS

TABLA

Página

I	Fechas en que se midieron los perfiles de playa.	12
II	Porcentaje del valor cuadrático medio explicado por las primeras 3 eigenfunciones. $n_h = 5$, $n_y = 28$.	39
III	Porcentaje del valor cuadrático medio explicado por las primeras tres eigenfunciones. $n_t = 9$, $n_y = 28$.	61

CONFIGURACION Y DINAMICA DE LA PLAYA, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

I.- INTRODUCCION

I.1.- Antecedentes

El conocer las características del movimiento de los sedimentos en la zona costera es conveniente para la planeación de cualquier actividad en la costa. Desde la construcción de una estructura de protección hasta el diseño de medidas para la conservación del medio.

Uno de los métodos que se utilizan para estudiar el movimiento de la arena en la costa involucra la medición de secciones transversales en las playas. Es decir, se mide el perfil de la playa. En la Figura 1 se muestra un esquema de un perfil de playa típico.

El trabajo de investigación que se ha hecho con los perfiles de playa se puede dividir en dos áreas. Por un lado el énfasis se ha puesto en la observación, descripción y posterior desarrollo de modelos teóricos de los cambios con el tiempo de los perfiles y su relación con el oleaje. Tenemos que en 1950, Shepard publica uno de los primeros trabajos en que se documentan los cambios estacionales de los perfiles de playa y su relación con el oleaje incidente.

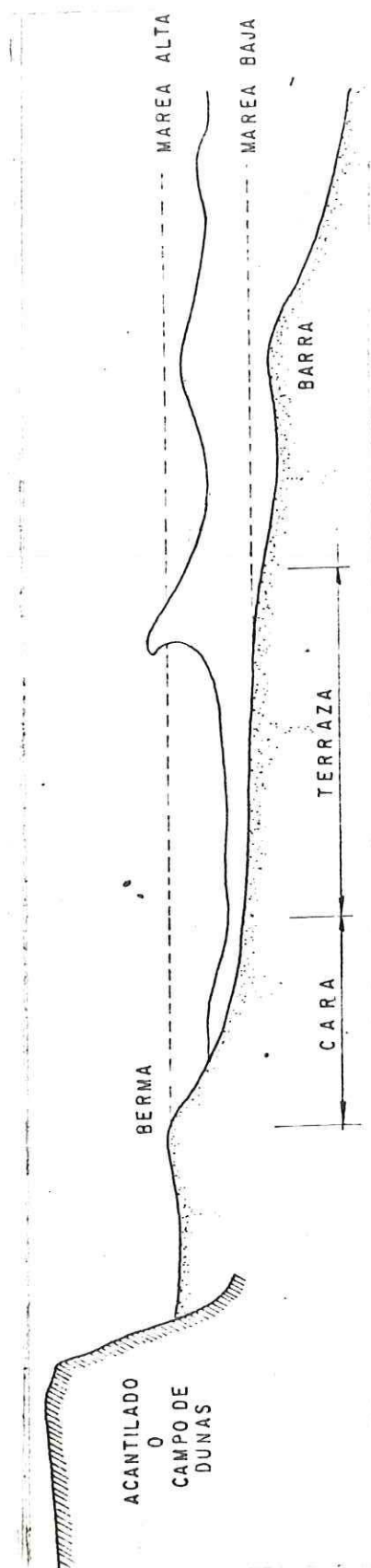


FIGURA 1. Características del perfil de la playa. Tomado de Winant et al. (1975).

Este trabajo muestra que en verano hay acumulación de arena cerca de la orilla mientras que en invierno, con oleaje de frecuencia más alta y más energético, la arena se mueve hacia partes más profundas de la playa. Aubrey (1978) propone un método para predecir, empleando técnicas estadísticas, los cambios temporales del perfil de playa usando distintas parametrizaciones del oleaje incidente. Otros autores, como Bailard (1981), han planteado modelos del perfil utilizando consideraciones energéticas y de flujo de momento.

Otro grupo de estudios de los procesos litorales han sido dedicados a la descripción y modelación de los cambios en la configuración de los perfiles como una función de la distancia paralela a la orilla. Es decir, la naturaleza tridimensional de las playas. Es posible observar, en la mayoría de las playas, estructuras sedimentarias con morfología variable a lo largo de la orilla y en diferentes escalas. Esto es, la configuración de una sección transversal (un perfil) cambia a lo largo de la orilla. Estos depósitos de sedimento, muchas veces periódicos a lo largo de la orilla, se clasifican de varias maneras. Dolan et al. (1974), después de una revisión de la literatura pertinente encontraron que las observaciones discriminaban entre periodicidades entre 3 y 30 metros, conocidas como lunetas de playa ('beach cusps'), y periodicidades entre 100 y 3000 metros conocidas como ondulaciones de la línea de playa o topografía rítmica ('sand waves'). Las lunetas se

forman en la parte superior de la playa mientras que la topografía rítmica es mucho mayor y se observa también en partes más profundas de la playa. Dolan et al. (1974) reportan que la duración de estas ondulaciones (en la topografía rítmica) es de entre semanas y años.

En una publicación reciente (Holman y Bowen, 1982) se presenta un desarrollo teórico que modela la generación de estructuras sedimentarias complejas en la playa. El modelo se apoya en la interacción entre ondas marginales producidas por el oleaje incidente. Estos autores muestran como la interacción entre dos o tres modos de la misma frecuencia resulta en la generación de morfologías complejas en la playa.

La hipótesis de que la presencia de ondas marginales en la zona litoral resulta en modificaciones de la configuración de la playa, nos conduce al estudio de las frecuencias bajas del espectro. En el tiempo, se trata de movimientos con períodos entre 30 y 300 segundos (Holman, 1981).

I.2.- Objetivos.

La Sección de Procesos Litorales del CICESE inició en Agosto de 1975 un estudio con el objeto de registrar los cambios en la configuración de las playas locales. Se midió el perfil de la playa a fines de invierno y a fines de verano en una serie de puntos a lo largo de la costa (capítulo II). La densidad espacial de los muestreos, en los años 1976-1980,

hace que el conjunto de datos obtenidos sea adecuado para registrar la presencia de topografía rítmica en la playa.

Como objetivos de este trabajo se plantea la descripción, análisis e interpretación de los cambios en la configuración de la playa que sean observables en el conjunto de datos disponibles. Con el fin de hacer un análisis objetivo de los cambios en los perfiles de playa se utiliza una descomposición en funciones empíricas ortogonales. Con este método es posible separar la variabilidad espacial de la temporal. De manera similar, es posible separar los cambios en dirección paralela a la orilla de los cambios en dirección perpendicular a la orilla. Este método de análisis fue aplicado por primera vez a los perfiles de playa por Winant et al. (1975). En el trabajo de Winant et al. (1975) no se trata la tridimensionalidad de la playa.

II.- LOS DATOS

El estudio se llevó a cabo en la playa que existe en el interior de la Bahía de Todos Santos en Ensenada B.C. (Fig. 2).

Esta playa tiene una extensión de 16 km aproximadamente. En este trabajo se reportan y discuten observaciones realizadas en los primeros 6 km a partir del extremo Norte de la playa, en donde están localizados 2 espigones (Cementos California) separados entre si por 500 metros aproximadamente.

II.1.- Estaciones en la costa .

Se disponía (hasta 1980) de un sistema de puntos de referencia que en Agosto de 1975 consistía de 30 estaciones colocadas a lo largo de la costa y localizadas por medio de una poligonal abierta apoyada en el primer espigón de cementos (Fig. 3). La distancia promedio entre mojoneras era de 200 metros.

La poligonal que une y localiza las estaciones se construye midiendo el ángulo que determinan, centrado en una estación, las visuales a las estaciones anterior y posterior. Estas medidas se hicieron con un teodolito marca Rossbach modelo TH-210. Es necesario medir también las distancias entre estaciones. Esto se hizo utilizando una cinta de

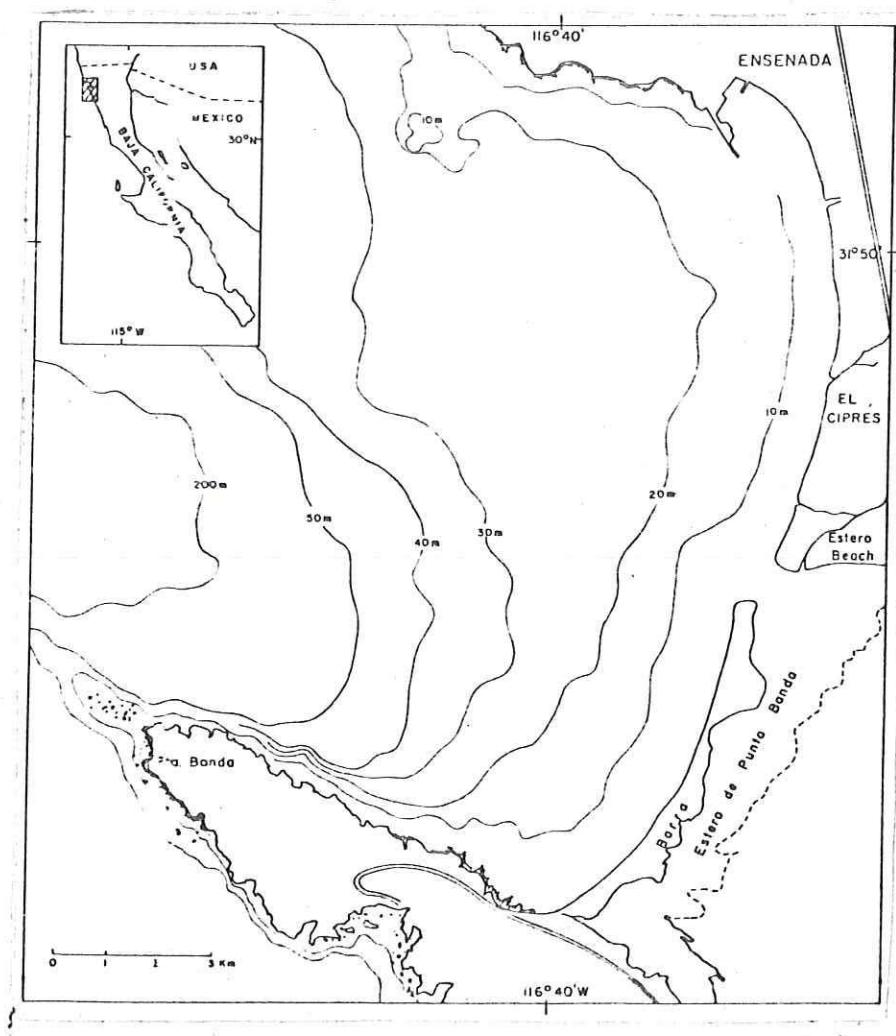


FIGURA 2. Bahía de Todos Santos. Ensenada, Baja California, México. Area de Estudio.

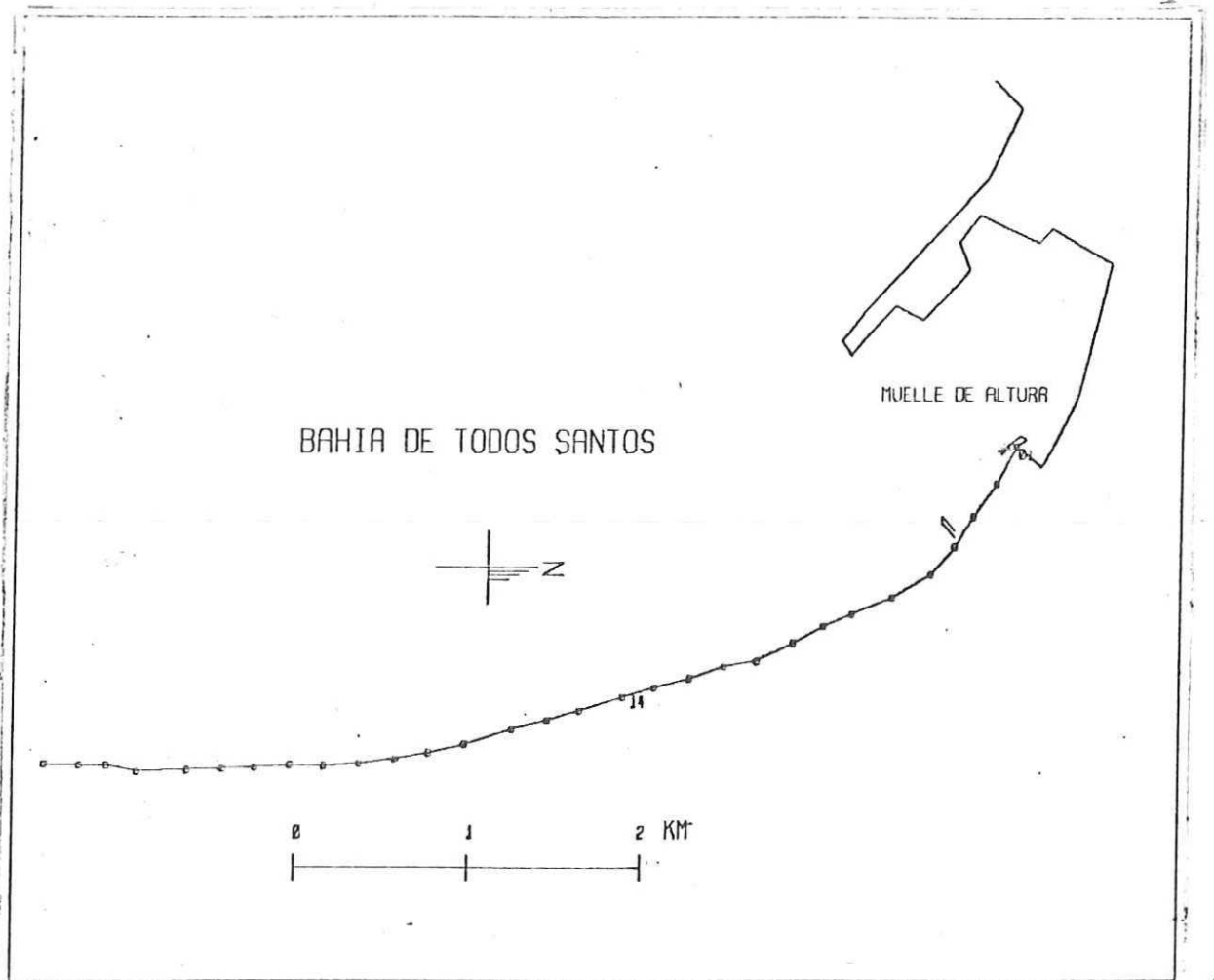


FIGURA 3. Localización de las estaciones sobre las cuales se midieron los perfiles de playa. Poligonal de referencia.

topógrafo y fichas (Davis y Kelly, 1980).

A fines de Septiembre de 1976 se hizo la extensión de la poligonal hasta cubrir toda la playa. En Febrero de 1978 se reconstruyó la poligonal. Los pequeños monumentos iniciales, que marcaban cada estación, se cambiaron por unos mayores y más permanentes. La mayoría quedó en el mismo lugar. Se restituyó esta poligonal, desafortunadamente, las observaciones y/o el registro no fue adecuado. Se cuenta con estimaciones (F. Plaza, comunicación personal) de la magnitud y dirección del movimiento de las estaciones que se relocalizaron en el período Febrero de 1978 a Marzo de 1980.

II.2.- Perfiles de la playa.

Las secciones transversales (perfiles) de la playa se obtuvieron por medio de nivelación diferencial. Esta es una técnica de topografía con la cual es posible conocer la distancia vertical que existe entre un plano de referencia imaginario (el nivel de bajamar media inferior: NBMI, en este trabajo) y un punto cualquiera sobre la superficie del terreno, la playa en este caso (Fig. 4). La lectura de distancias verticales o cotas se hace en diferentes puntos sobre una perpendicular a la orilla para ir trazando el perfil (Davis y Kelly, 1980). Como referencia se utilizó un banco de nivel (punto cuya elevación y situación son conocidas) que mantiene la Secretaría de Marina en el patio

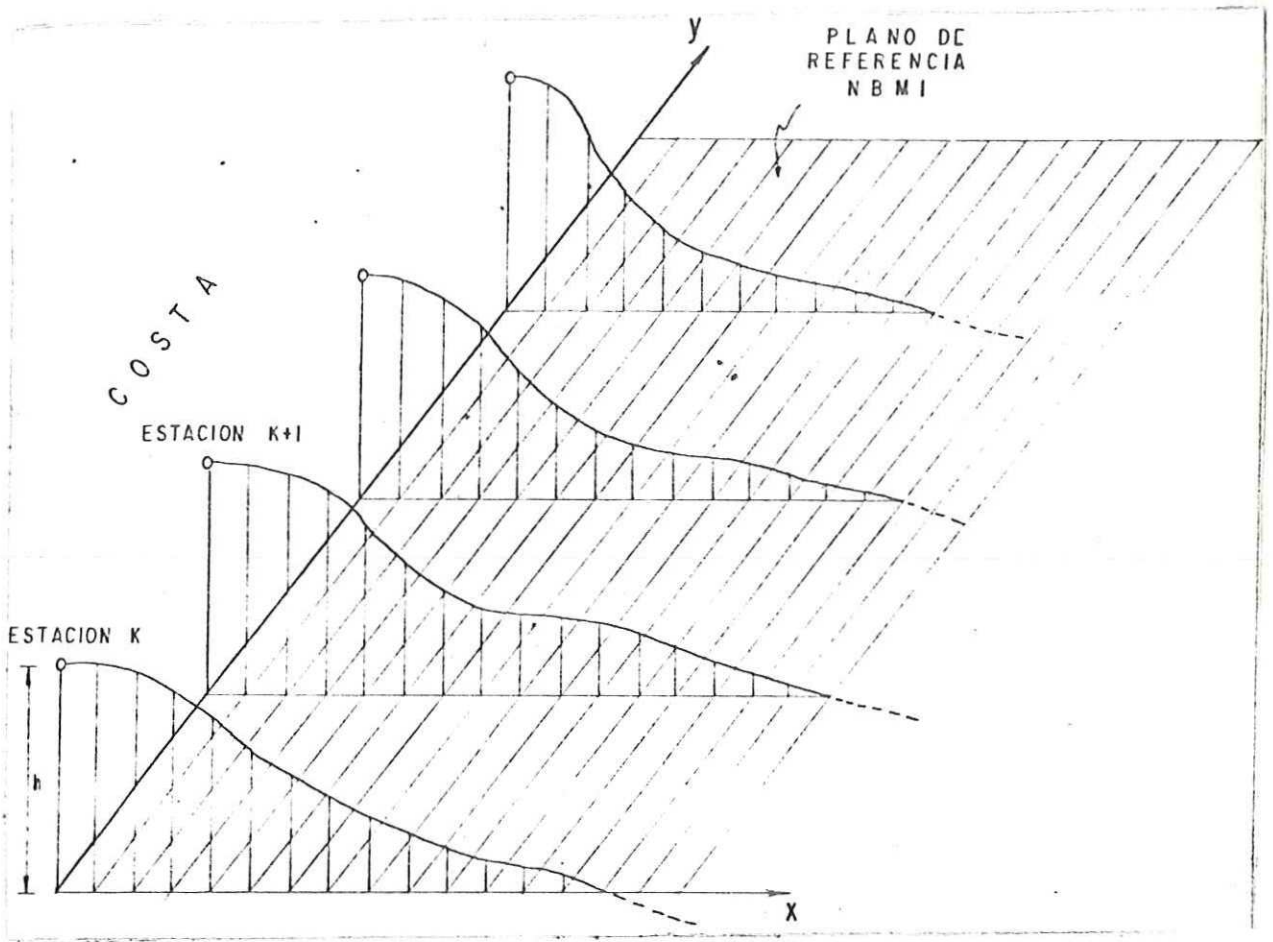


FIGURA 4. Esquema que muestra el sistema de coordenadas utilizado en este trabajo, así como el plano de referencia y varias estaciones.

del Hotel Bahía de esta ciudad. Para hacer las observaciones se utilizó un nivel basculante marca Rossbach modelo NB-5. El error estimado de estas medidas es de 4 cm. La orientación del perfil se registró con una brújula de mano. La distancia entre puntos del perfil se midió con una cinta de topógrafo y con un error estimado de 3 cm. Las cotas se midieron cada 5 metros ó cada 10 metros, durante los años 1976 y 1977. En los años siguientes el intervalo de muestreo fue irregular. En promedio este fue cada 20 metros (y en los cambios bruscos de pendiente).

El movimiento perpendicular a la orilla de algunas de las estaciones que se relocalizaron en 1978 se tomó en cuenta, cuando fue necesario comparar los perfiles, sumando una constante a las distancias horizontales. Esta constante es el movimiento horizontal estimado.

Las fechas en que se midieron los perfiles de playa se encuentran en la Tabla I.

TABLA I. Fechas en que se midieron los perfiles de playa.

AÑO	MES	DIA
1976	Enero	29
	Agosto	24
1977	Febrero	1
1978	Febrero	22
	Agosto	24
1979	Marzo	23
	Agosto	20
1980	Marzo	12
	Julio	20

La estación No. 01, situada sobre el espigón (Fig. 3), se utilizó únicamente para ligar la poligonal a un punto con coordenadas geográficas establecidas. En la estación No. 07 (desembocadura del arroyo El Gallo) no fue posible hacer observaciones debido a las descargas de aguas negras en el lugar.

II.3.- Contornos del fondo.

Para el análisis de los datos se procedió de la siguiente manera: En cada estación se calculó, con interpolación lineal, la distancia horizontal X , entre la vertical que pasa por el monumento que marca la estación y la intersección del perfil con una altura (h) o cota determinada. Las cotas que se utilizaron fueron: 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 metros. (El nivel medio del mar se encuentra a 0.822 m sobre el plano de referencia o cota cero.). En la Figura 4 se definen X y h .

El resultado de estos cálculos es que para cada nivel o

altura (h) tenemos una serie espacial de observaciones $X = f(y)$. Si unimos con segmentos de recta los datos en cada nivel, obtenemos una isolínea para cada altura. Además los perfiles cambian con el tiempo así que en realidad es: $X = f(h, y, t)$.

Para mostrar los contornos del fondo (las isobatas) así como para presentar los resultados del análisis (ver capítulo IV) se hizo la simplificación de eliminar la curvatura de la costa. Además el origen del sistema de coordenadas se colocó en la estación 30 (Fig. 3).

En la Figura 5 se muestran los contornos del fondo observados el 29 de Enero de 1976. En general, se puede apreciar que todas las isolíneas contienen la misma información y que la varianza de las mismas disminuye en los niveles altos. Destacan en esta gráfica dos máximos bien definidos registrados uno en 0.5 km y el otro en 4.1 km. Se observa un máximo de menor amplitud sobre 2.4 km. Las isolíneas tienden a alejarse de la costa en la zona de los espigones (extremo Norte, entre 5.0 km y 6.0 km).

En la Figura 6 se presentan los contornos del fondo registrados el 24 de Agosto de 1976. Se puede ver aquí que todas las isolíneas describen una variabilidad similar y con los máximos registrados en las mismas zonas que en Enero de 1976. Todas las isolíneas se han alejado de la costa.

La Figura 7 muestra los contornos del fondo registrados el 1 de Febrero de 1977. Las isolíneas varían juntas en toda el

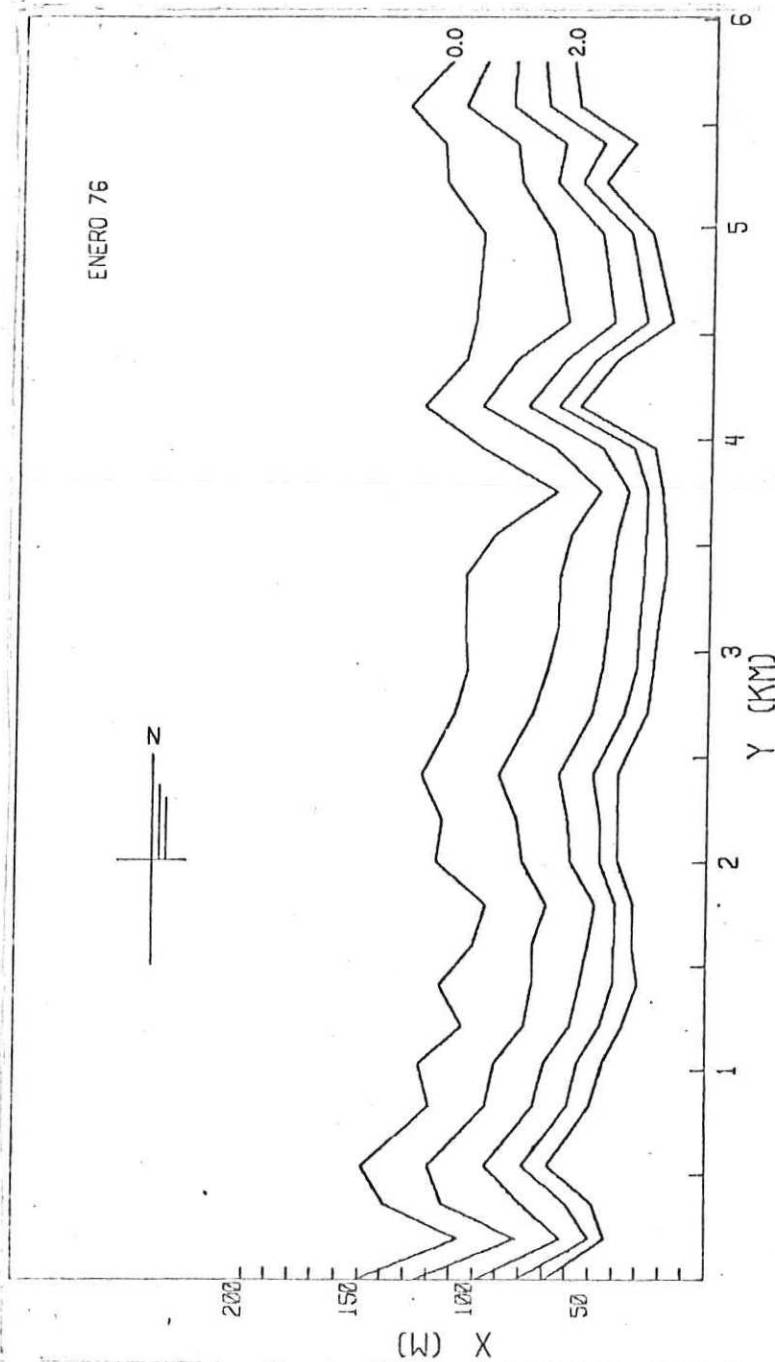


FIGURA 5. Contornos del fondo para Enero 29 de 1976.

Descritos con isolíneas en los niveles o cotas:
 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del
 sistema de coordenadas coincide con la estación
 30 de la Figura 3.

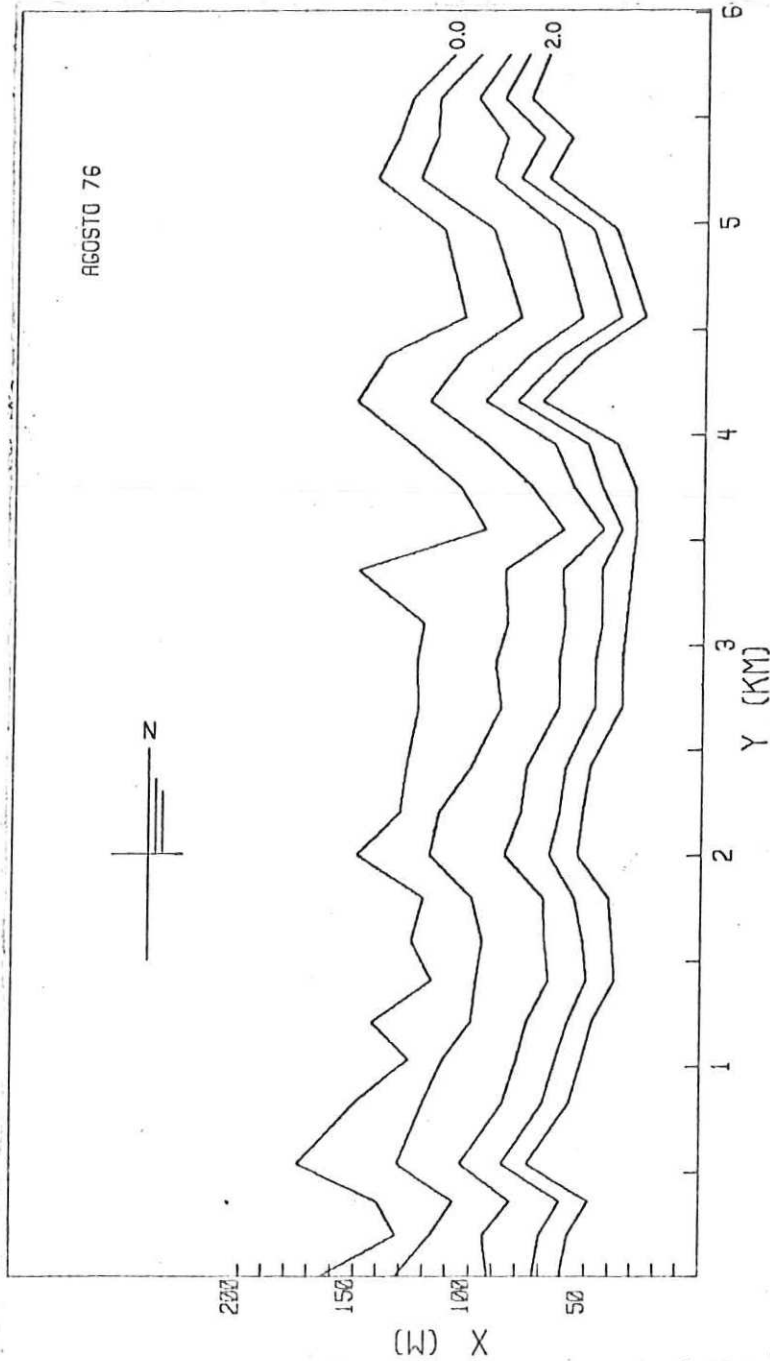


FIGURA 6. Contornos del fondo para Agosto 24 de 1976.

Descritos con isolíneas en los niveles o cotas:
0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del
sistema de coordenadas coincide con la estación

30 de la Figura 3.

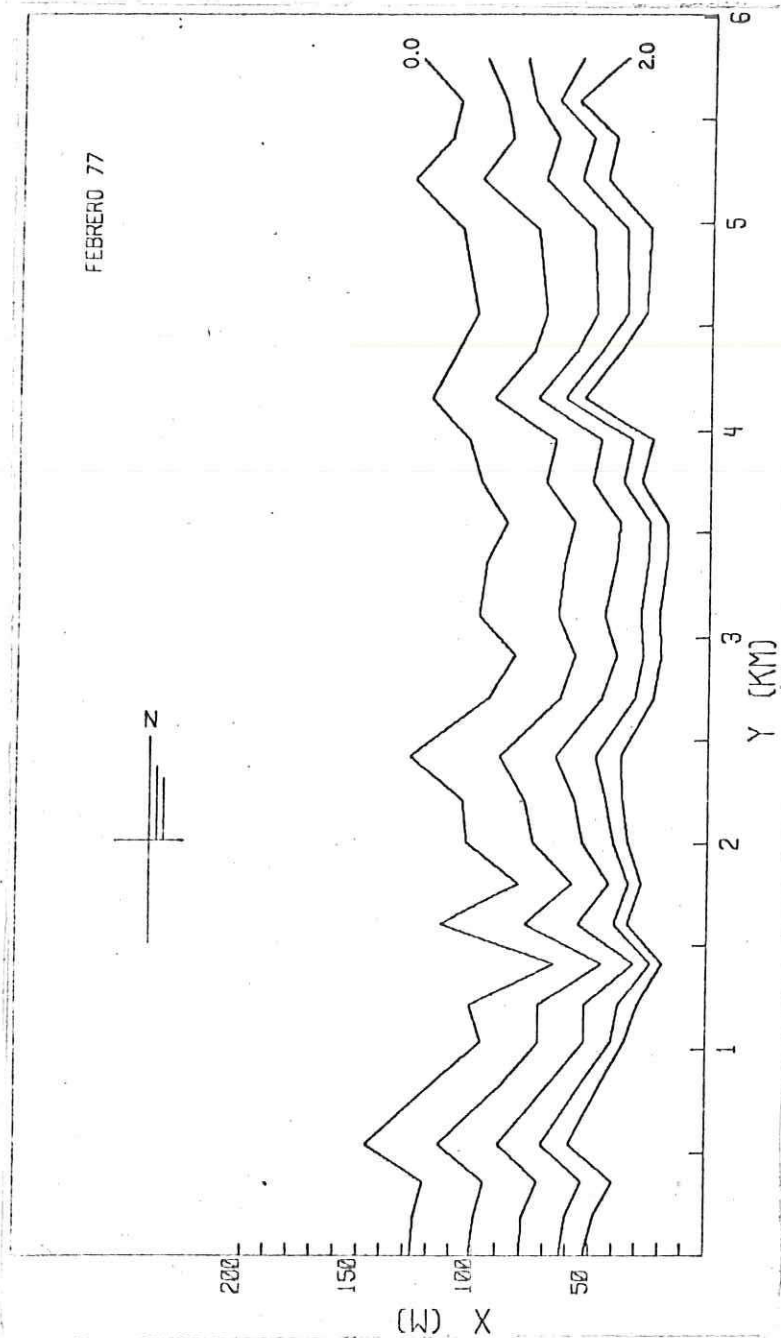


FIGURA 7. Contornos del fondo para Febrero 1 de 1977.

Descritos con isollneas en los niveles o cotas:
 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del
 sistema de coordenadas coincide con la estación
 30 de la Figura 3.

Área de estudio. Son observables los máximos registrados en las fechas anteriores así como un máximo adicional hacia 1.6 km. Las isolíneas se han acercado nuevamente a la costa.

En la Figura 8 se muestran las observaciones para el 22 de Febrero de 1978. En la mayor parte de la zona las isolíneas se juntan notablemente y se aproximan mucho a la costa. Los máximos mencionados anteriormente siguen bien definidos.

En la Figura 9 se puede ver el registro del 24 de Agosto de 1978. De nuevo isolíneas se alejan de la costa. Los máximos mencionados anteriormente se encuentran muy bien definidos.

La Figura 10 muestra los contornos del fondo correspondientes al 23 de marzo de 1979. Las isolíneas en los niveles bajos se han acercado un poco a la orilla. Los máximos descritos en líneas anteriores se encuentran presentes. Además hacia 3.1 km se localiza un máximo notable.

En la Figura 11 se pueden ver los contornos del fondo correspondientes al 20 de Agosto de 1979. Se han separado las isolíneas en el centro y en el Sur del área. La separación es particularmente notable entre las isolíneas que corresponden a las cotas de 1.5 y 1.0 m. Se observa un máximo hacia 3.4 km. Los máximos descritos para las fechas anteriores se encuentran presentes.

En la Figura 12 se presentan los contornos del fondo registrados el 12 de Marzo de 1980. En general, se observa

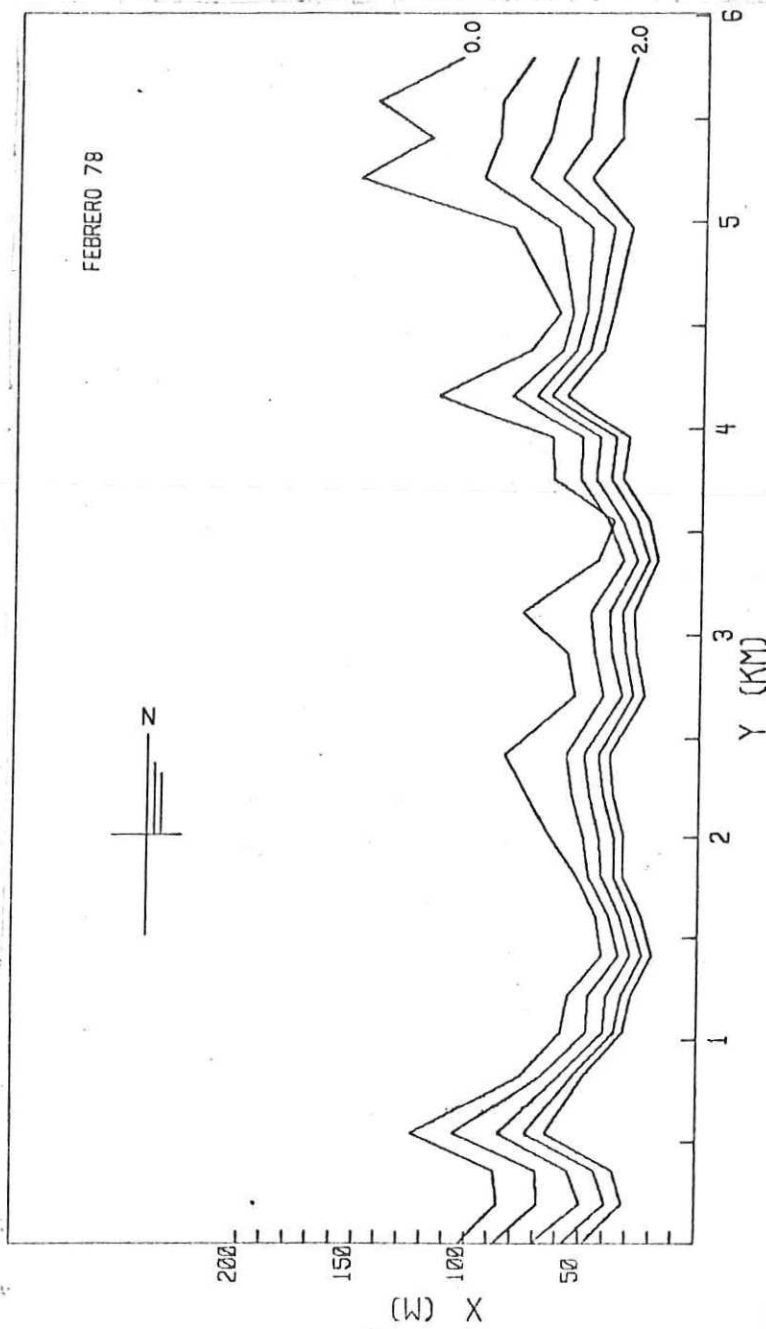


FIGURA 8. Contornos del fondo para Febrero 22 de 1978.

Descritos con isolíneas en los niveles o cotas:
 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del
 sistema de coordenadas coincide con la estación
 30 de la Figura 3.

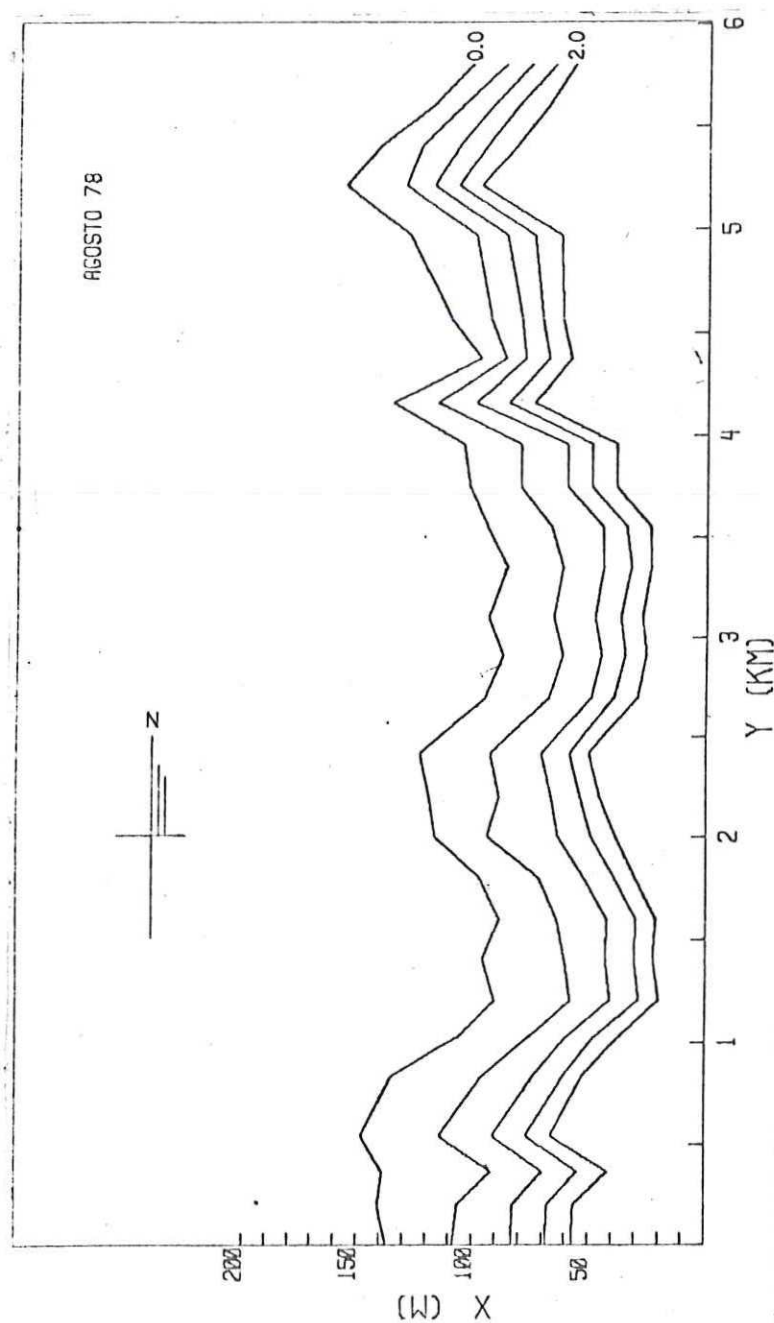


FIGURA 9. Contornos del fondo para Agosto 24 de 1978.

Descritos con isolíneas en los niveles o cotas:

0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del

sistema de coordenadas coincide con la estación

30 de la Figura 3.

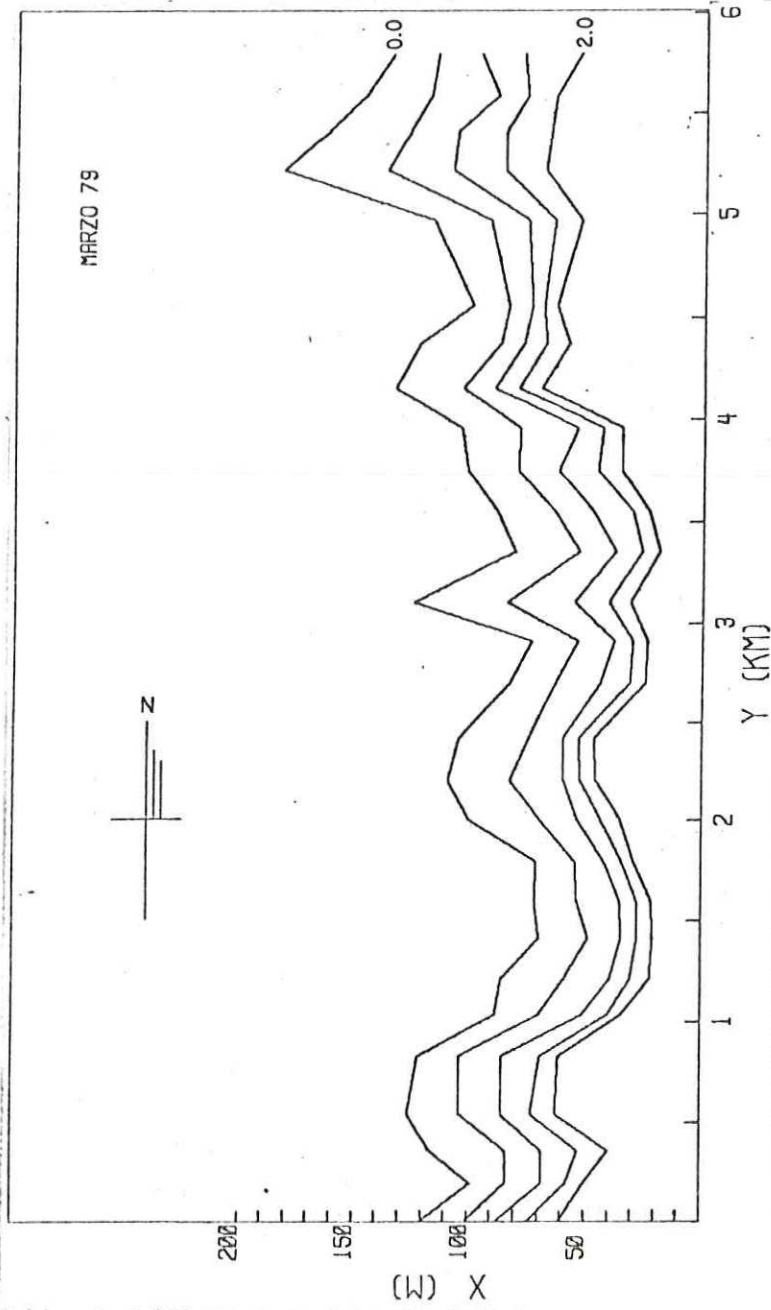


FIGURA 10. Contornos del fondo para Marzo 23 de 1979.

Descritos con isolíneas en los niveles o cotas:
 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del
 sistema de coordenadas coincide con la estación
 30 de la Figura 3.

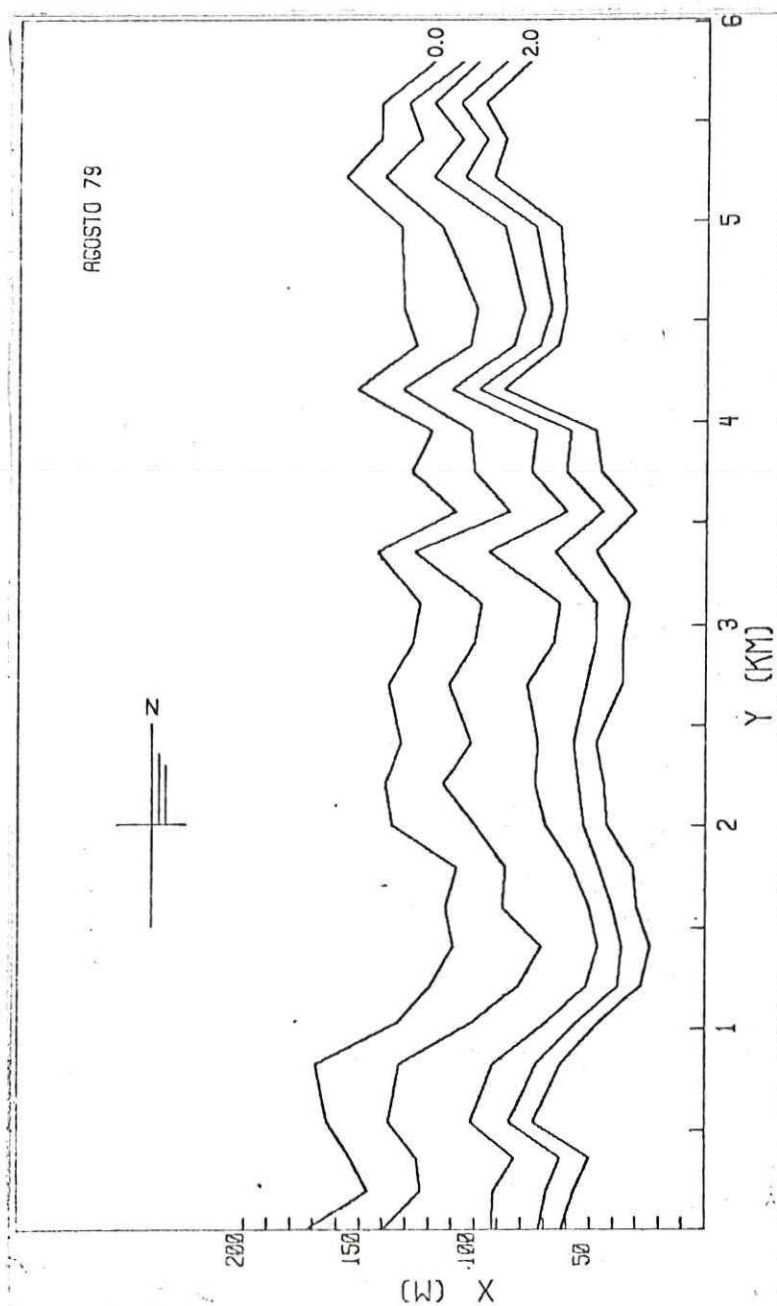


FIGURA 11. Contornos del fondo para Agosto 20 de 1979.

Descritos con isolíneas en los niveles o cotas:

0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del

sistema de coordenadas coincide con la estación

30 de la Figura 3.

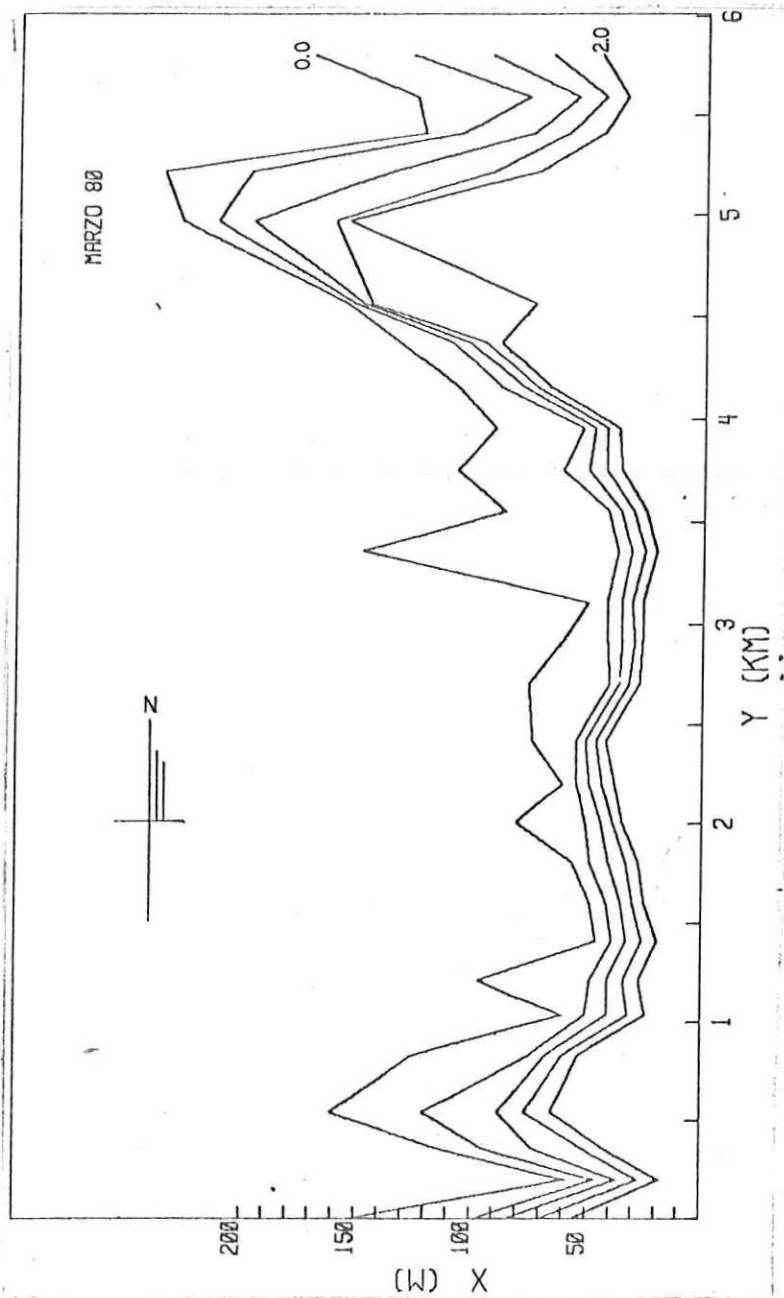


FIGURA 12. Contornos del fondo para Marzo 12 de 1980.

Descritos con isollneas en los niveles o cotas:
 0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del
 sistema de coordenadas coincide con la estación
 30 de la Figura 3.

que las isolíneas se juntan y se mueven hacia la orilla. El movimiento muy marcado hacia el mar de todas las isolíneas en la zona situada entre 4.5 y 5.2 km puede ser en parte debido a que por estas fechas hubo maquinaria moviendo sedimento en la zona. En la mayor parte del área la cota cero tiene un comportamiento irregular en relación a las demás. Se encuentran presentes los máximos sobre 0.5 km, 2.4 km y 4.1 km.

En la Figura 13 se muestran los contornos del fondo medidos el 20 de Julio de 1980. Se observa una separación de las isolíneas en la mayor parte del área. Hay un máximo bien definido hacia 3.6 km. Como en los casos anteriores, es posible ubicar máximos en 0.5 km, 2.4 km y 4.1 km.

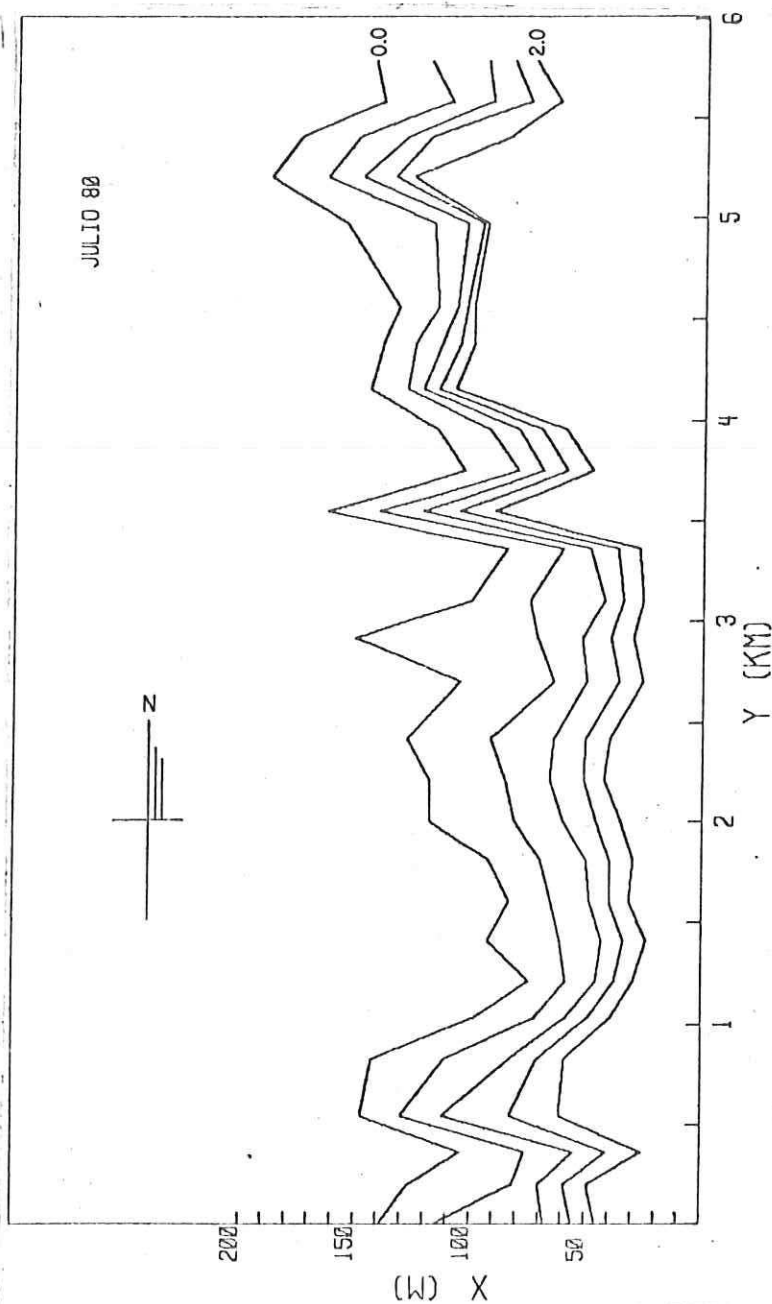


FIGURA 13. Contornos del fondo para Julio 20 de 1980.

Desarrollos con isolíneas en los niveles o cotas:

0.0, 0.5, 1.0, 1.5, y 2.0 metros. El origen del

sistema de coordenadas coincide con la estación

30 de la Figura 3.

III.- TEORIA

En este capítulo se describe el método de análisis utilizado. Se detalla la aplicación de la descomposición en funciones empíricas ortogonales a los contornos del fondo, que constituyen los datos de este estudio.

Se presentan también algunas ideas acerca de la dinámica que se puede esperar en la zona litoral si las ondas marginales de baja frecuencia constituyen parte importante del espectro de energía. Así como ideas sobre los cambios en la configuración de la playa que resultan de la interacción entre estas ondas marginales.

III.1.- Funciones Empíricas Ortogonales

Deseamos una descripción objetiva de la configuración de la playa y de los cambios en el tiempo de esta configuración. El método que usaremos para conseguirlo se puede plantear de la siguiente manera (Winant et al., 1975 b Aubrey, 1978).

Para examinar la configuración de la playa utilizamos las observaciones, esto es, las distancias horizontales $X(h,y)$ para generar 2 conjuntos de funciones ortogonales: $Y_k(y)$, $H_k(h)$. Estas funciones se calculan de manera tal que se consigue separar en ellas los modos (o las formas) dominantes de variabilidad correspondientes a cada eje (h,y) .

Pretendemos que con estas funciones, y para cada fecha sea posible representar los datos con una expansión como la que sigue:

$$X(h, y) = \sum_{k=1}^N A_k Y_k(y) H_k(h) \quad (1)$$

donde A_k son los factores de normalización, $Y_k(y)$ son las funciones de la coordenada 'y', $H_k(h)$ son las funciones de la coordenada 'h'. Los factores de normalización se determinan con:

$$A_k = (\rho_k n_h n_y)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

donde ρ_k es el eigenvalor asociado con la k-esima eigenfunción, n_h es el número de puntos en la coordenada 'h' usados para formar la expansión, n_y es el número de puntos en la coordenada 'y' usados en la expansión. La suma se hace sobre 'n' términos, donde n es igual al menor de n_h y n_y .

Para separar los modos de organización (o estructuras) que caracterizan la variabilidad en el eje 'y' de aquellos relacionados con el eje 'h', formamos matrices haciendo productos cruzados entre los datos y sumando sobre una de las variables. Debido a que uno de los objetivos de este estudio es el de mostrar las condiciones promedio no se centraron los datos, esto es, no se eliminaron las medias. Lo que indica que las matrices de productos cruzados resultantes son

matrices de covarianza (con respecto al origen).

Las funciones de la coordenada 'h' son los eigenvectores asociados con la siguiente matriz de covarianza:

$$a_{ij} = (n_h n_y)^{-1} \sum_{y=1}^{28} X_{iy} X_{jy} \quad (3)$$

De manera similar, la matriz de covarianza asociada a la coordenada 'y' tiene como elementos:

$$b_{ij} = (n_h n_y)^{-1} \sum_{h=1}^5 X_{hi} X_{hj} \quad (4)$$

Como una alternativa para el cálculo de las funciones $Y_k(y)$, se efectúa el producto punto entre las funciones $H_k(h)$ y los datos $X(h,y)$ y se divide entre el factor de normalización. Es decir:

$$Y_k = A_k^{-1} X H_k \quad (5)$$

Los eigenvalores ρ_k y los eigenvectores $H_k(h)$ se definen con la siguiente ecuación:

$$A H_k = \rho_k H_k \quad (6)$$

donde A es la matriz de covarianza cuyos elementos están dados por la ecuación (3).

En este trabajo, las funciones $Y_k(y)$ se calcularon usando

la ecuación (5) con A_k dado por la ecuación (2).

Se puede probar que la suma de los eigenvalores es igual a la traza de la matriz de covarianza, que en nuestro caso es el valor cuadrático medio de todos los datos [promedio en las dos coordenadas (h,y)]. Esto permite clasificar las eigenfunciones de acuerdo al porcentaje del valor cuadrático medio que representa el eigenvalor asociado.

Para obtener las características temporales de las isolíneas procedemos de una manera similar a lo expuesto en las líneas anteriores. Con la diferencia de que, para hacer el análisis, fijamos ahora la altura (h_i) y trabajamos con las coordenadas (y,t) . En la misma forma en que, en el caso anterior, fijábamos una fecha o tiempo (t_i) y trabajábamos con las coordenadas (h,y) . Ahora la expansión que buscamos tiene la forma:

$$X(y,t) = \sum_{k=1}^N B_k Y_k(y) T_k(t), \quad (7)$$

donde, como en la ecuación (1), B_k son los factores de normalización, $Y_k(y)$ son las funciones de la coordenada 'y', $T_k(t)$ son funciones del tiempo. Los factores de normalización se calculan con:

$$B_k = (\rho_k n_y n_t)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

ρ_k son los eigenvalores, n_y y n_t son el número de puntos

en el eje 'y' y en el eje 't' respectivamente.

Las funciones del tiempo $T_k(t)$ son los eigenvectores de la matriz de covarianza que tiene como elementos:

$$c_{ij} = (n_y n_t)^{-1} \sum_{y=1}^{28} X_{yi} X_{yj} \quad (9)$$

Y se definen, junto con los valores ρ_k , por medio de la ecuación:

$$CT_k = \rho_k T_k \quad (10)$$

Como en el caso anterior, las funciones de la coordenada 'y' se obtienen haciendo el producto de los datos con las funciones $T_k(t)$:

$$Y_k = (B_k)^{-1} X T_k \quad (11)$$

Es decir que en las funciones $T_k(t)$ encontramos la variabilidad asociada con el tiempo para cada nivel, mientras que en las funciones $Y_k(y)$ se han separado los cambios relacionados con la coordenada 'y'.

III.2.- Ondas marginales como agentes modificadores del perfil de la playa.

Las ondas marginales son ondas atrapadas en la costa. Es

decir, son perturbaciones o movimientos ondulatorios periódicos con la energía atrapada en la orilla (Leblond y Mysak, 1978). Pueden propagarse a lo largo de la orilla o existir como ondas estacionarias. Para los propósitos de este trabajo, son importantes las ondas marginales que tienen en el oleaje incidente su mecanismo generador. Estas ondas están asociadas con la banda de 0.003 Hz a 0.03 Hz, en el espectro de energía (Holman, 1981). La dinámica de estas ondas se trata generalmente con la teoría de las ondas largas. En el resto de este inciso se presenta un planteamiento reciente que modela la generación de morfologías complejas en la playa y que se apoya en la interacción entre ondas marginales.

Holman y Bowen (1982) desarrollan el concepto de que las ondas marginales son un factor importante para la formación de topografía compleja en la playa.

Cerca de la orilla, en agua poco profunda, las ecuaciones lineales para agua somera constituyen una aproximación razonable al movimiento ondulatorio (Holman y Bowen, 1982). Para ondas de frecuencia σ el potencial de velocidad ϕ está dado por:

$$(h\phi_x)_x + (h\phi_y)_y + \sigma^2 \phi / g = 0 \quad (12)$$

donde 'x' es positivo hacia el mar, 'y' es la coordenada a lo largo de la orilla, 'h' es la profundidad del agua y 'g' es

la aceleración de la gravedad.

Se ha probado que, en una playa plana de pendiente α , las soluciones de la ecuación (12) para ondas marginales que se propagan en la dirección 'y' tienen la siguiente forma:

$$\phi_n = a_n g \sigma^{-1} \phi_n(x) \text{EXP}[-i(\rho_n y - \sigma t)] \quad (13)$$

donde 'n' es el número modal, a_n es la amplitud y ρ_n es el número de onda (Eckart, 1951).

El número de onda a lo largo de la orilla se determina con la relación de dispersión:

$$\sigma^2 = g |\rho_n| (2n+1) \alpha \quad (14)$$

La estructura perpendicular a la orilla se obtiene con:

$$\phi_n(x) = L_n(2\rho_n x) \text{EXP}[-\rho_n x] \quad (15)$$

donde L_n es el polinomio de Laguerre de orden n , n es el número de cruces por cero de $\phi_n(x)$.

Para examinar la interacción entre los dos modos de la misma frecuencia Holman y Bowen (1982) escogen de la literatura el siguiente modelo (Hunt y Johns, 1963): si el campo de velocidades encima de la capa límite se define como

$$u = U(x, y) \text{EXP}[i\sigma t], \quad v = V(x, y) \text{EXP}[i\sigma t],$$

entonces la velocidad de transporte de masa b velocidad de deriva en la tapa de la capa límite del fondo se calcula con:

$$u_1 = (1/4\sigma)[U\partial U^*/\partial x(3+5i) + U\partial V^*/\partial y(2+3i) + V\partial U^*/\partial y(1+2i)] \quad (16a)$$

$$v_1 = (1/4\sigma)[V\partial V^*/\partial y(3+5i) + V\partial U^*/\partial x(2+3i) + U\partial V^*/\partial x(1+2i)] \quad (16b)$$

donde $*$ indica conjugado complejo.

Para calcular las velocidades de deriva asociadas con las ondas marginales en el caso de interacción bimodal, se utilizan las ecuaciones (13), (14) y (16). Posteriormente para evaluar estas velocidades como agentes modificadores del perfil de la playa utilizan un modelo de transporte de sedimentos del tipo energético (Bagnold, 1963) y que se expresa mediante:

$$i_s = \epsilon_s (\tau \cdot \underline{u}) \underline{u} / (w - \underline{u} \cdot \underline{s}) \quad (17)$$

donde: i_s es el transporte de sedimento en suspensión, ϵ_s es un factor de eficiencia, τ es el esfuerzo en el fondo, w es la velocidad de caída de los sedimentos, $\underline{s} = (\partial h / \partial x, \partial h / \partial y)$ es la pendiente del fondo. Con esto suponen que el

transporte predominante es en suspensión.

Suponen luego que el campo de velocidades está formado por el oleaje incidente, el proceso dominante, más las ondas marginales. Si las olas inciden con las crestas aproximadamente paralelas a la orilla, el campo de velocidades se puede expresar como:

$$\underline{u} = (u_{oi} \cos \sigma_i t + u_{om} \cos \sigma_m t + \bar{u} + u_1, \\ u_{om} \cos \sigma_m t + v_1) \quad (18)$$

donde u_{oi} y u_{om} son velocidades orbitales típicas de las olas incidentes y las ondas marginales, $\bar{u}$ es una velocidad de deriva asociada con el oleaje incidente, u_1 y v_1 son las velocidades de deriva para las ondas marginales que se obtienen al evaluar la ecuación (16) suponiendo que el campo de velocidades asociado a las ondas marginales está dado por la suma de dos modos. El esfuerzo en el fondo lo definen con:

$$\underline{\tau} = C_D \rho |\underline{u}| \underline{u} \quad (19)$$

El criterio para que la playa esté en equilibrio es que la divergencia del transporte de sedimento sea cero:

$$\partial i_x / \partial x + \partial i_y / \partial y = 0, \quad (20)$$

donde i_x y i_y son los dos componentes del transporte de

sedimentos en suspensión. Evaluando los términos de la ecuación (20) los autores obtienen la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} dh_1/dx = & -(5wu_1/u^2_0) \\ & - (5w/4u^5_0) \int_{+\infty}^x u^3_0 \partial v_1 / \partial y . dx \end{aligned} \quad (21)$$

donde h_1 es la perturbación, debida a las ondas marginales, de la topografía de la playa plana de pendiente α que se usó para obtener la solución de onda marginal [ecuación (13)].

Holman y Bowen (1982) integran numéricamente la ecuación (21) con la condición de que h_1 tiende a cero afuera de la costa, y muestran gráficamente algunas de las diferentes morfologías que resultan de la interacción entre dos ondas marginales de la misma frecuencia. En la Figura 14 [tomada de Holman y Bowen, 1982] vemos la topografía que resulta de la interacción entre el modo cero y el modo uno, el modo cero y el dos, el modo uno y el modo dos, y la interacción triple (0,1,2). En esta Figura 14 las coordenadas horizontales son adimensionales. La amplitud de los depósitos de sedimento que se muestran depende de la velocidad de caída de los sedimentos, el ancho de la zona de rompientes y el tamaño relativo de las ondas marginales.

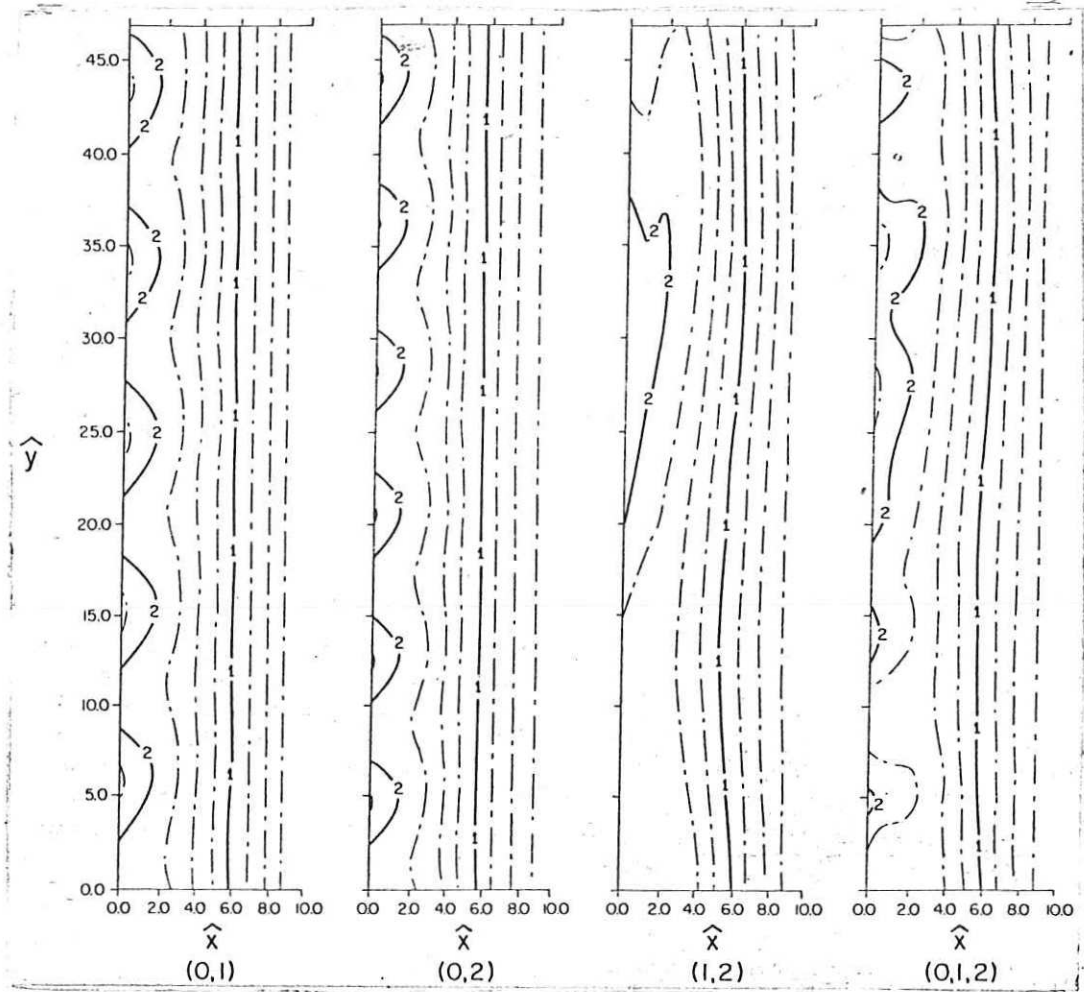


FIGURA 14. Topografía generada por las interacciones entre los modos cero y uno $(0,1)$, cero y dos $(0,2)$, uno y dos $(1,2)$, y la interacción triple $(0,1,2)$. Tomado de Holman y Bowen (1982).

IV.- RESULTADOS Y DISCUSION

IV.1.- Estructura espacial de la playa.

Se utilizó el método de análisis con funciones empíricas ortogonales para investigar la variabilidad espacial de la playa en Ensenada B.C.. Una particularidad del método de análisis es que no se asume nada a priori acerca de las funciones con las que se hace la expansión (en esto difiere del análisis de Fourier, donde se usan funciones senoidales). El conjunto de datos es el que determina las características de las eigenfunciones empíricas. Las funciones son ortogonales y cada una representa un cierto porcentaje del valor cuadrático medio de los datos (la varianza si se ha quitado el promedio). La eigenfunción asociada al eigenvalor más grande es la que mejor representa a los datos, usando el criterio de cuadrados mínimos. La eigenfunción asociada al eigenvalor que sigue es la que describe mejor el valor cuadrático medio restante. También con el criterio de cuadrados mínimos. Debido a que el describir la configuración promedio es uno de los objetivos de este trabajo, no se quitó la media al formar la matriz de covarianza (covarianza con respecto al origen). Esto quiere decir que en el primer modo encontraremos las estructuras espaciales más sobresalientes.

El hecho de que los dos conjuntos de funciones espaciales

$Y_k(y)$ y $H_k(h)$ sean ortogonales (ver capítulo III) indica que no hay dependencia lineal entre las diferentes funciones Y_k ó entre las diferentes funciones H_k . Esto a su vez implica que se puede considerar que cada grupo modal: (ρ_k, H_k, Y_k) representa un modo de variabilidad diferente ya que es linealmente independiente de cualquier otro.

IV.1.1.- Primer modo.

La descomposición espacial se hizo para cada una de las 9 fechas registradas (capítulo II). Los datos en cada fecha consistieron de 5 series espaciales, cada una en un nivel diferente, de distancias horizontales que definen la intersección del perfil de la playa con cada uno de los niveles mencionados (Figs. 5-13).

En la Figura 15 se muestra el primer modo de las funciones de la distancia a lo largo de la orilla, Y_1 . Este primer modo se presenta en esta figura para las fechas comprendidas en el intervalo 1976-1978. Las diferentes curvas se han graficado secuencialmente, sumándoles una constante, empezando con el 29 de Enero de 1976. Con la escala de la izquierda se pueden medir diferencias relativas entre los puntos de una misma curva.

En la Tabla II se encuentra el porcentaje del valor cuadrático medio explicado por las eigenfunciones graficadas en la Figura 15. Se puede ver aquí que el primer modo representa mas del 99.0% del valor cuadrático medio en todas

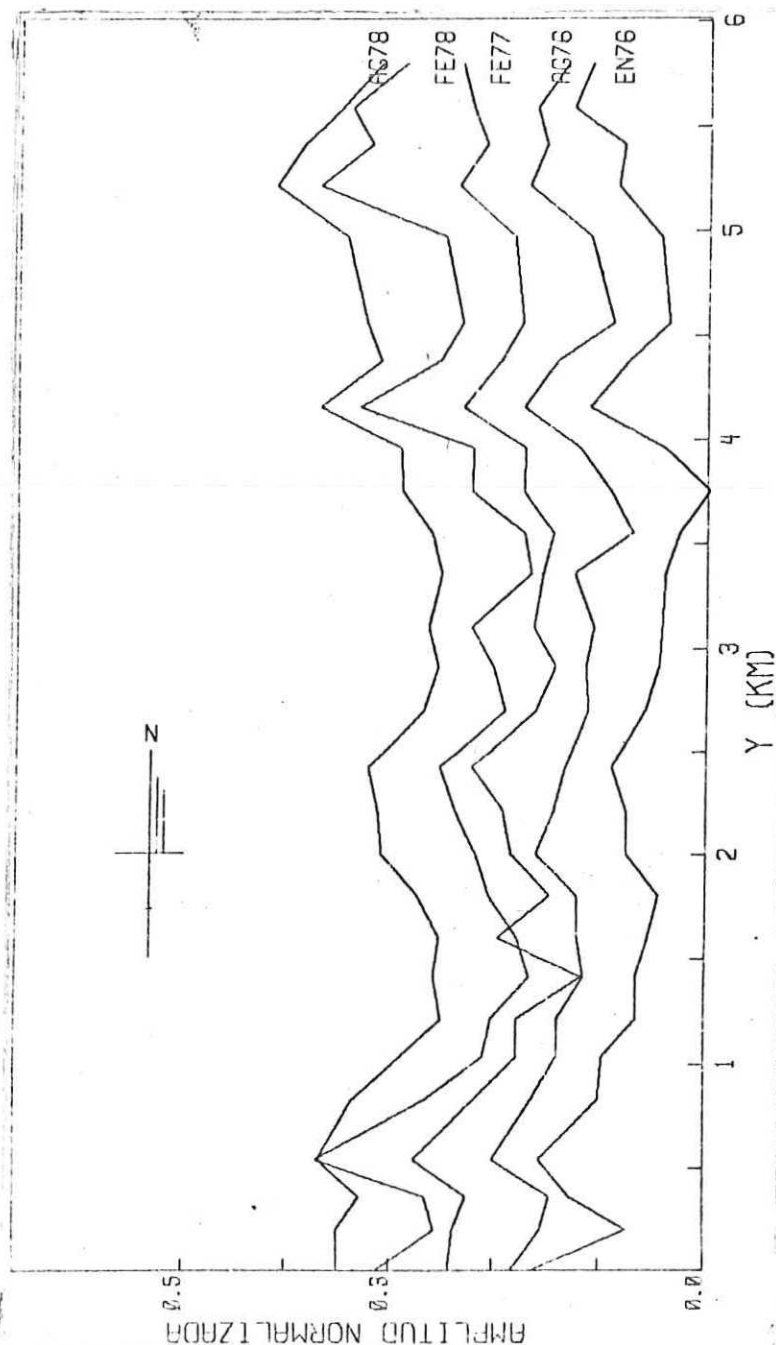


FIGURA 15. Primer modo de las funciones de la coordenada

'y': $Y_1(y)$. Gráfico secuencial para el intervalo 1976-1978 (ver texto). La escala vertical mide diferencias relativas entre puntos de una misma curva.

las fechas. La Figura 15 muestra que Y_1 tiene prácticamente la misma forma en todos los tiempos o fechas. En todas las curvas se aprecian máximos hacia 0.5 km, 2.4 km y 4.1 km. Así como en el extremo Norte, en la zona de los espigones.

TABLA II. Porcentaje del valor cuadrático medio

explicado por las tres primeras eigenfunciones.

$$n_h = 5, n_y = 28 .$$

Eigenf/Fecha	Enero 1976	Agosto 1976	Febrero 1977	Febrero 1978	Agosto 1978
1	99.24	99.36	99.5	99.16	99.06
2	0.73	0.56	0.46	0.75	0.91
3	0.02	0.07	0.04	0.09	0.03
	99.99	99.99	100.00	100.00	100.00
	Marzo 1979	Agosto 1979	Marzo 1980	Julio 1980	
1	99.41	98.93	97.62	98.52	
2	0.51	1.00	1.00	1.31	
3	0.05	0.05	0.04	0.12	
	99.97	99.98	99.82	99.95	

La Figura 16 muestra el gráfico de Y_1 para el intervalo

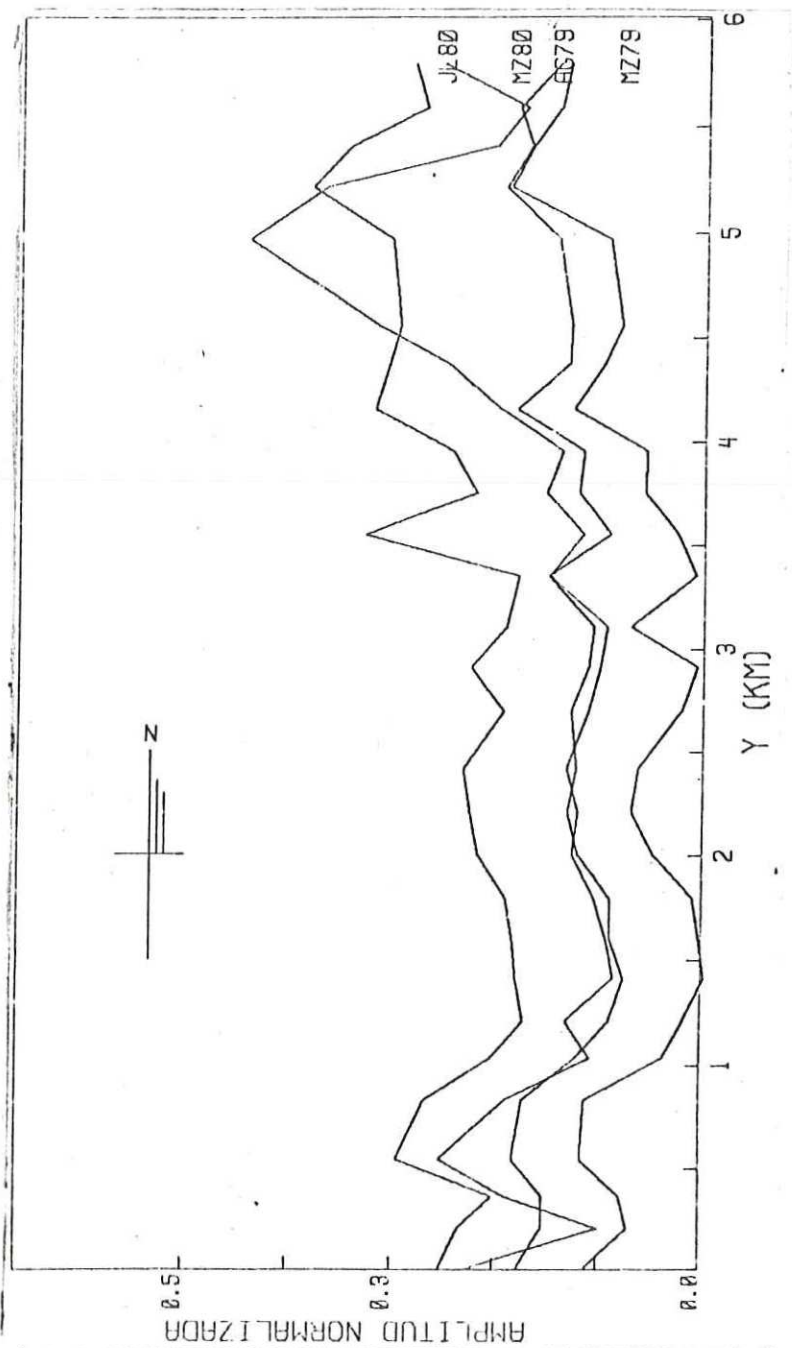


FIGURA 16. Primer modo de las funciones de la coordenada

'y': $Y_1(y)$. Gráfico secuencial para el intervalo 1979-1980 (ver texto). La escala vertical mide diferencias relativas entre puntos de una misma curva.

1979-1980. Como en el caso de la Figura 15, las curvas se dibujan secuencialmente sumándoles una constante. En la parte inferior de la Tabla II se presenta el porcentaje del valor cuadrático medio explicado por el primer modo en las descomposiciones de 1979-1980. Vemos en esta Tabla que el primer modo representa entre el 97.6% y el 99.4% del valor cuadrático medio para estas fechas. Como en la Figura 15, tenemos máximos definidos en las zonas hacia 0.5 km, 2.4 km y 4.1 km y en el extremo Norte, donde se ubican los espigones (Figs. 2 y 3). Se aprecia también en esta Figura algo que pudiera interpretarse como el desplazamiento de un máximo, de Sur a Norte, comenzando hacia 3.1 km en Marzo de 1979 y llegando hasta 3.6 km en Julio de 1980. En el extremo Norte, entre 4.5 km y 5.2 km, la curva correspondiente a Marzo de 1980 tiene un comportamiento extremo. Una posible causa se mencionó en el capítulo II en el sentido de que puede deberse a la interferencia de las actividades humanas.

Como se aprecia en la Tabla II el primer modo domina el porcentaje del valor cuadrático medio en todas las descomposiciones. Esto implica que los aspectos más sobresalientes de la configuración de la playa se pueden describir con la estructura de las funciones Y_1 y H_1 . Para ver esto un poco más de cerca analizaremos con más detalle la curva de Y_1 para el 29 de Enero de 1976 que se muestra en la Figura 15. Ya habíamos comentado al presentar la Figura 5 que en el gráfico de los datos para esta fecha se apreciaban

máximos hacia 0.5 km, 2.4 km, 4.1 km así como en el extremo Norte. Estas zonas en la costa, coinciden con las estaciones 27,18,10 y 3 respectivamente (Fig. 3).

En la Figura 17 se muestran los perfiles de playa como se midieron en la estación 10 y en varias estaciones al Sur y al Norte el 29 de Enero de 1976. Como se ve en esta Figura, los datos indican que en la estación 9 y sobre todo en la estación 10 se registró bastante más arena por encima del plano de Bajamar Media Inferior (cota cero) que la que se observó en las estaciones situadas inmediatamente al Norte y al Sur. Lo que explica el máximo en esta zona de las Figuras 5 y 15.

Con la Figura 18 podemos observar una situación parecida a la anterior pero sobre las estaciones 18, 19 y 20. Es decir, se puede apreciar que sobre estas estaciones se registró más arena sobre el plano de NBMI que la que se observó en estaciones al Sur y al Norte. Esta es otra zona donde se acumula la arena.

En las estaciones 27 y 28 se registró una situación completamente similar a las dos anteriores. Son estas zonas que pueden interpretarse como áreas de depósito.

En la Figura 19 se muestra el gráfico de H_1 (primer modo según el eje 'h') para todas las fechas. Esto es, el intervalo 1976-1980. En esta gráfica la variable dependiente, la amplitud del modo H_1 , se graficó en el eje horizontal para conservar el concepto de el perfil de la

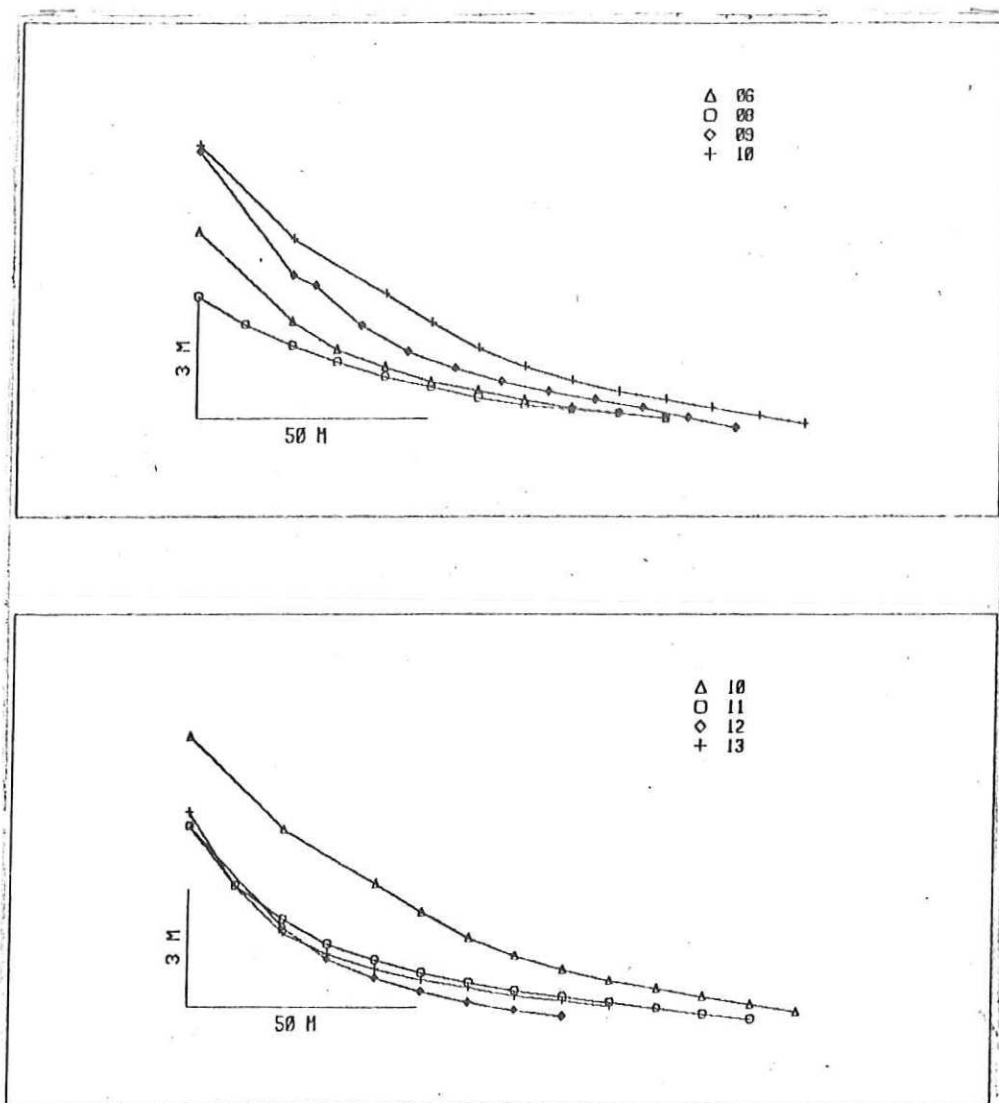


FIGURA 17. Perfiles de playa medidos el 29 de Enero de 1976 en las estaciones 6-10 y 10-13 (ver texto).

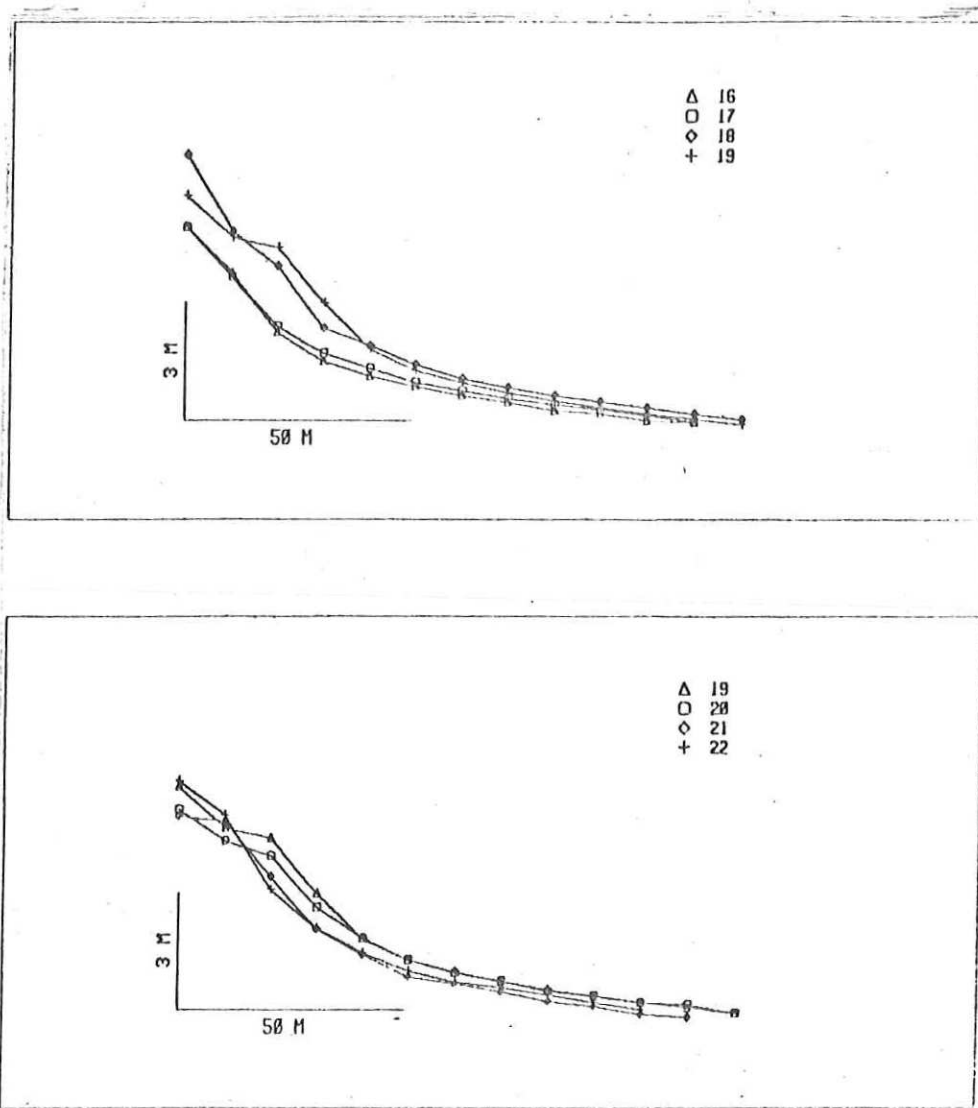


FIGURA 18. Perfiles de playa medidos el 29 de Enero de 1976 en las estaciones 16-19 y 19-22.

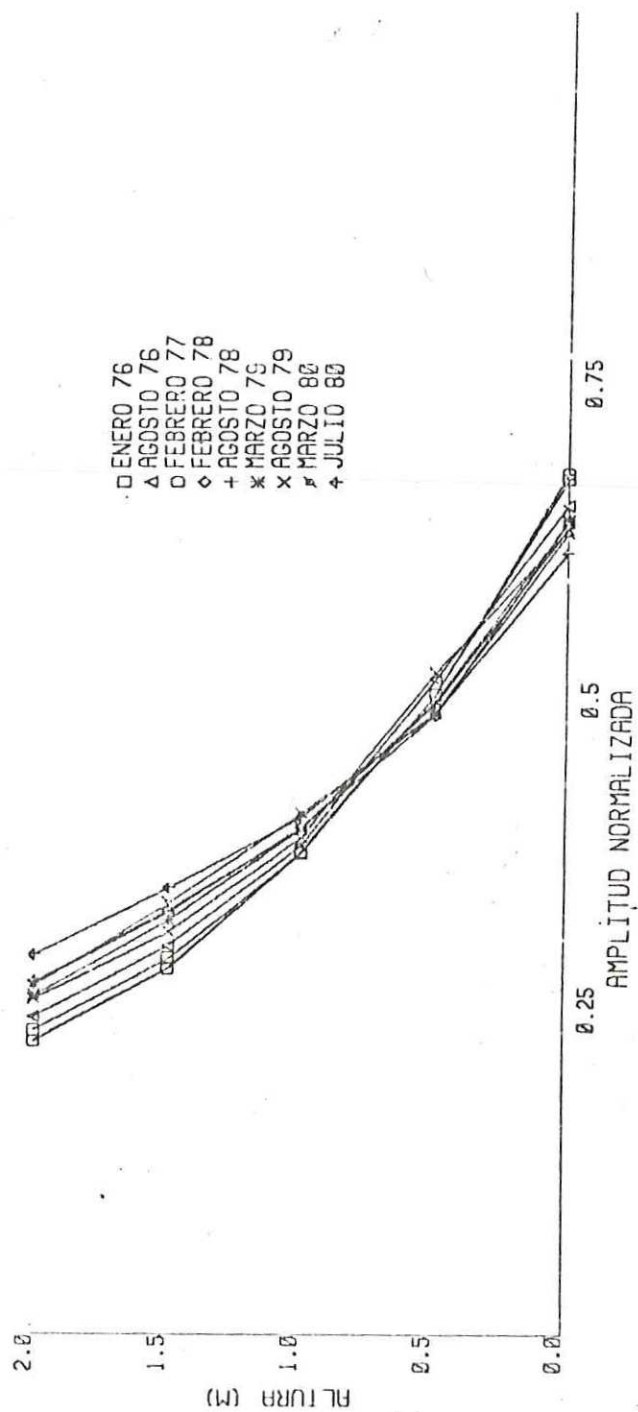


FIGURA 19. Primer modo de las funciones de la coordenada

'h': $H_1(h)$. Para todas las descomposiciones en el intervalo 1976-1980. La amplitud de H_1 se grafica en el eje horizontal para conservar el concepto del perfil de la playa.

playa. Es notable en esta Figura el hecho de que el perfil tiende a incrementar su pendiente. Hacia el nivel medio del mar, altura igual a 0.822 metros, encontramos lo que puede interpretarse como un punto pivotal. En los niveles superiores el perfil avanza hacia el mar, mientras que en los inferiores el perfil retrocede.

IV.1.2.-Segundo modo

En el inciso anterior discutimos los elementos del primer grupo modal (ρ_1, Y_1, H_1) . Encontramos que con este primer modo podíamos describir concisa y precisamente las características más salientes de la configuración de la playa. En las líneas que siguen mostraremos y discutiremos los elementos del segundo grupo modal (ρ_2, Y_2, H_2) y veremos que con este segundo modo se completa la descripción que perseguimos.

Como se aprecia en la Tabla II, la segunda eigenfunción es por lo menos un orden de magnitud mayor que la tercera. Esto quiere decir que la segunda eigenfunción domina el valor cuadrático medio residual.

El segundo modo nos permite afinar la descripción de la configuración de la playa. En la Figura 20 presentamos el gráfico de Y_2 (segunda función empírica según el eje 'y') para las fechas comprendidas entre el 29 de Enero de 1976 y el 24 de Agosto de 1978. Como se ve en esta Figura, la estructura de Y_2 es similar en casi todas las fechas. La

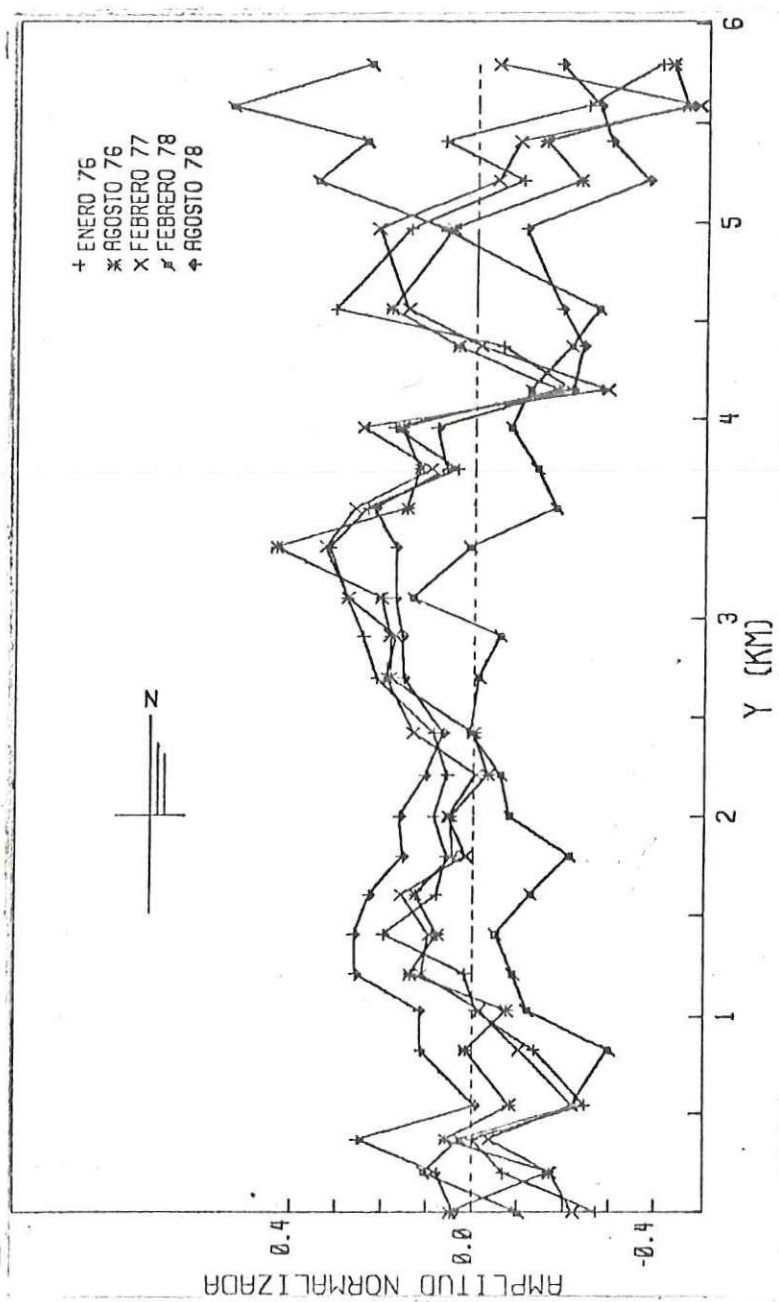


FIGURA 20. Segundo modo de las funciones de la coordenada 'y': $Y_2(y)$. Para las descomposiciones en el intervalo 1976-1978.

curva para Febrero de 1978 es la que muestra diferencias marcadas. En la Figura 21 encontramos la función H_2 (segundo modo según el eje 'h') para cada una de las descomposiciones (o expansiones) consideradas en este trabajo. Como en la Figura 19, la amplitud de H_2 se graficó en el eje horizontal de tal manera que permita la interpretación de la estructura de esta eigenfunción en términos del perfil de la playa.

Para mostrar el efecto del segundo modo en la configuración de la playa, nos referiremos a la expansión planteada en el capítulo III [ecuación (1)] y que repetimos aquí (para $n = 2$):

$$X(h, y) = A_1 Y_1(y) H_1(h) + A_2 Y_2(y) H_2(h)$$

A continuación graficamos (Fig. 22) para algunas estaciones (02 y 03) localizadas en la parte Norte del área de estudio la reconstrucción del perfil de la playa usando sólo el primer modo y usando la suma del primero y el segundo modo (para las observaciones del 29 de Enero de 1976). El trazo con línea punteada muestra el perfil medido. Con 'PR' (línea continua y triángulo) se identifica la reconstrucción hecha con sólo el primer modo. Con 'SG' (línea continua y círculo) se muestra la reconstrucción hecha con la suma del primero y el segundo modo. Es fácil ver en esta Figura 22 el efecto del segundo modo, que en la estación 02 consiste de

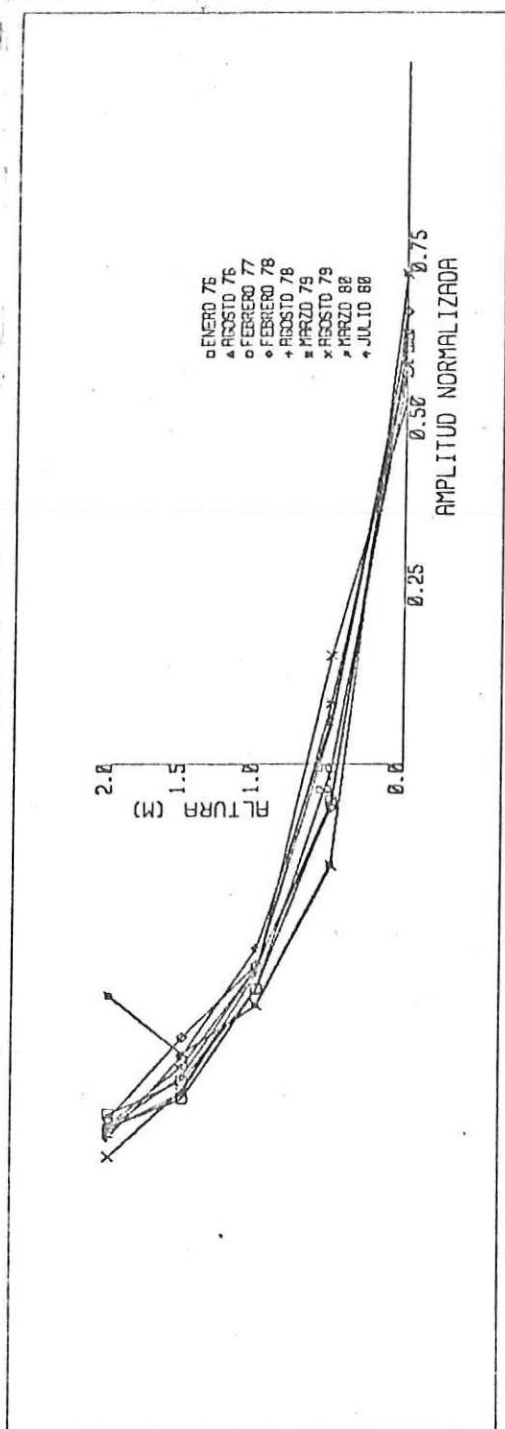


FIGURA 21. Segundo modo de las funciones de la coordenada 'h': $H_2(h)$ para todas las descomposiciones en intervalo 1976-1980. La amplitud de H_2 se grafica en el eje horizontal para conservar el concepto del perfil de la playa.

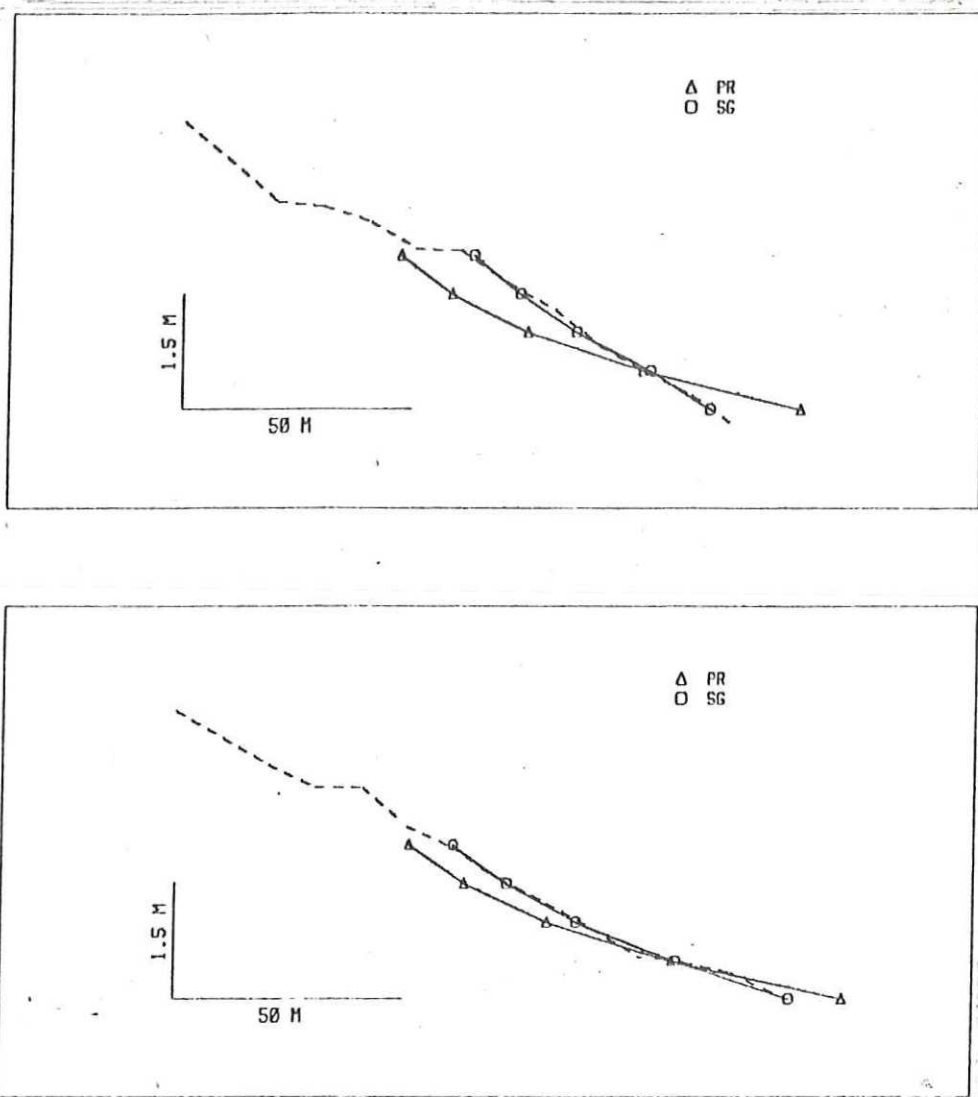


FIGURA 22. Reconstrucción del perfil de la playa. El trazo con línea punteada muestra el perfil medido. Con 'PR' (línea continua y triángulo) se identifica la reconstrucción hecha con solo el primer modo. Con 'SG' (línea continua y círculo) se muestra la reconstrucción hecha con la suma del primero y el segundo modo. Para las estaciones 02 (arriba) y 03 (abajo), el 29 de Enero de 1976.

aumentar la pendiente y disminuir la concavidad del perfil. Si regresamos a la Figura 20 veremos que la función Y_2 en Enero de 1976 y en la estación 02 tiene magnitud considerable y signo negativo. En esta Figura vemos que para la estación 03 (en Enero de 1976) Y_2 tiene todavía signo negativo pero con magnitud menor. Lo que se refleja, Figura 22, en un aumento en la pendiente pero el perfil no queda tan lineal como el caso anterior. En la estación 04, Figura 20, Y_2 en Enero de 1976 tiene ahora signo positivo pero de pequeña magnitud. En la Figura 23 vemos que el segundo modo disminuye la pendiente y acentúa la concavidad del perfil. Con la Figura 20 vemos que en la estación 08 Y_2 tiene magnitud considerable y signo positivo. En la Figura 23 vemos que la contribución del segundo modo disminuye la pendiente y hace más cóncavo el perfil. El patrón es similar para las demás estaciones. Es decir que el gráfico del segundo modo, Y_2 , para Enero de 1976 que se muestra en la Figura 20 se puede interpretar en el sentido de que valores negativos indican zonas de mayor pendiente y con el perfil de forma más lineal. Los valores positivos indican zonas de menor pendiente y donde la concavidad del perfil está más pronunciada.

Se observa también en la Figura 20 que esta distribución de pendientes y concavidad del perfil es similar para las observaciones de 1976, 1977 y Agosto de 1978. Febrero de 1978 se sale del patrón indicando grandes zonas con pendiente

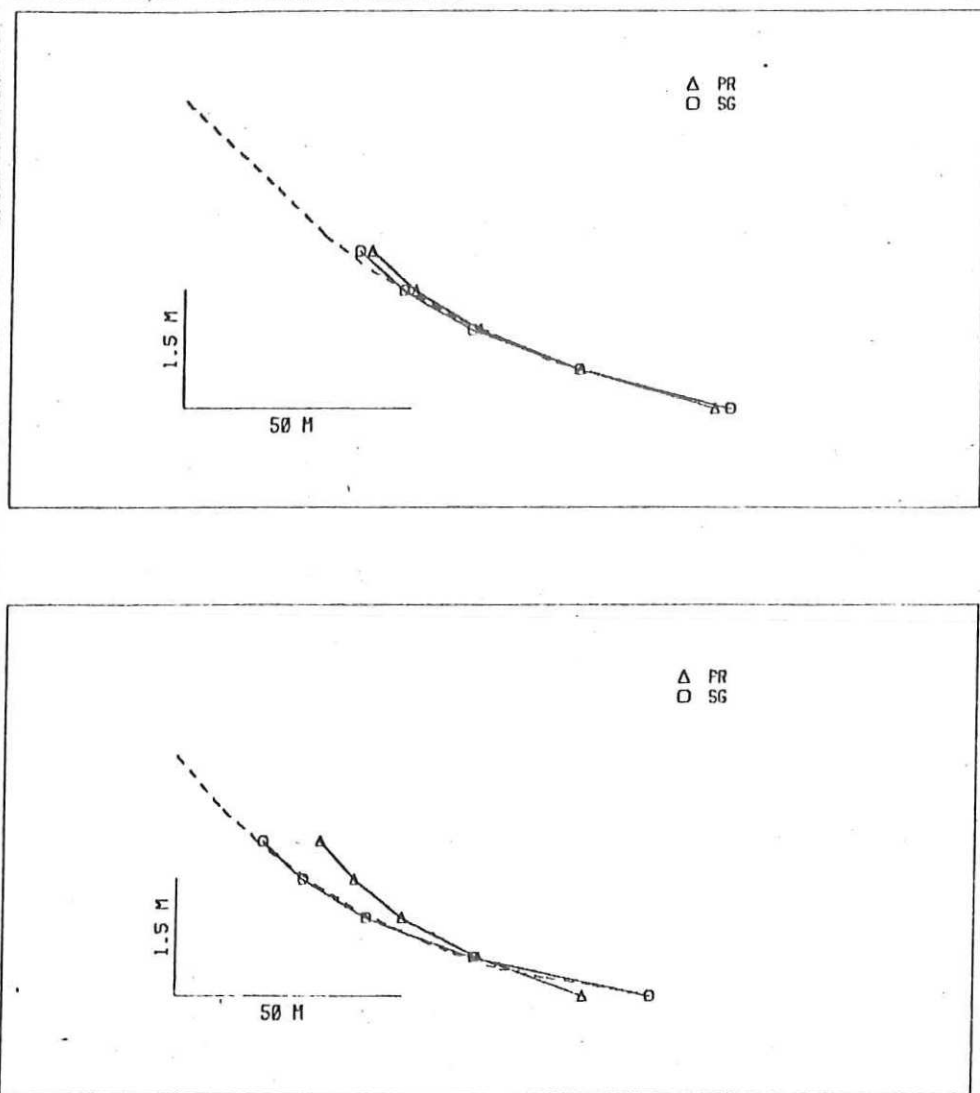


FIGURA 23. Reconstrucción del perfil de la playa. El trazo con línea punteada muestra el perfil medido. Con 'PR' (línea continua y triángulo) se identifica la reconstrucción hecha con solo el primer modo. Con 'SG' (línea continua y círculo) se muestra la reconstrucción hecha con la suma del primero y el segundo modo. Para las estaciones 04 (arriba) y 08 (abajo), el 29 de Enero de 1976.

pronunciada. En la Figura 24 tenemos la eigenfunción Y_2 para el intervalo 1979-1980. En términos generales, las curvas tienen la misma forma que las de la Figura 20, lo que indica que esta distribución de pendientes y concavidad del perfil constituye una característica de la configuración de la playa en el periodo 1976-1980.

IV.2.- Ondas marginales y topografía rítmica.

Para explicar el origen de la topografía rítmica se han planteado varias hipótesis. Destaca, por su base teórica y apoyo experimental, el desarrollo que se apoya en la interacción entre ondas marginales (Bowen e Inman, 1971b; Holman y Bowen, 1982). Las ondas marginales pueden ser generadas por varios mecanismos. El que nos interesa en este escrito se basa en el concepto de interacciones resonantes entre ondas (Bowen y Guza, 1978).

Holman y Bowen (1982) al discutir la relevancia de sus ideas acerca de la interacción entre ondas marginales tratan la generación de este tipo de ondas debido al espectro del oleaje incidente. Estos autores ofrecen la siguiente relación:

$$\sigma_n = 2\sigma_1 \sin \theta \sin(2n+1)\alpha \quad (22)$$

donde σ_n son las frecuencias donde son forzadas ondas

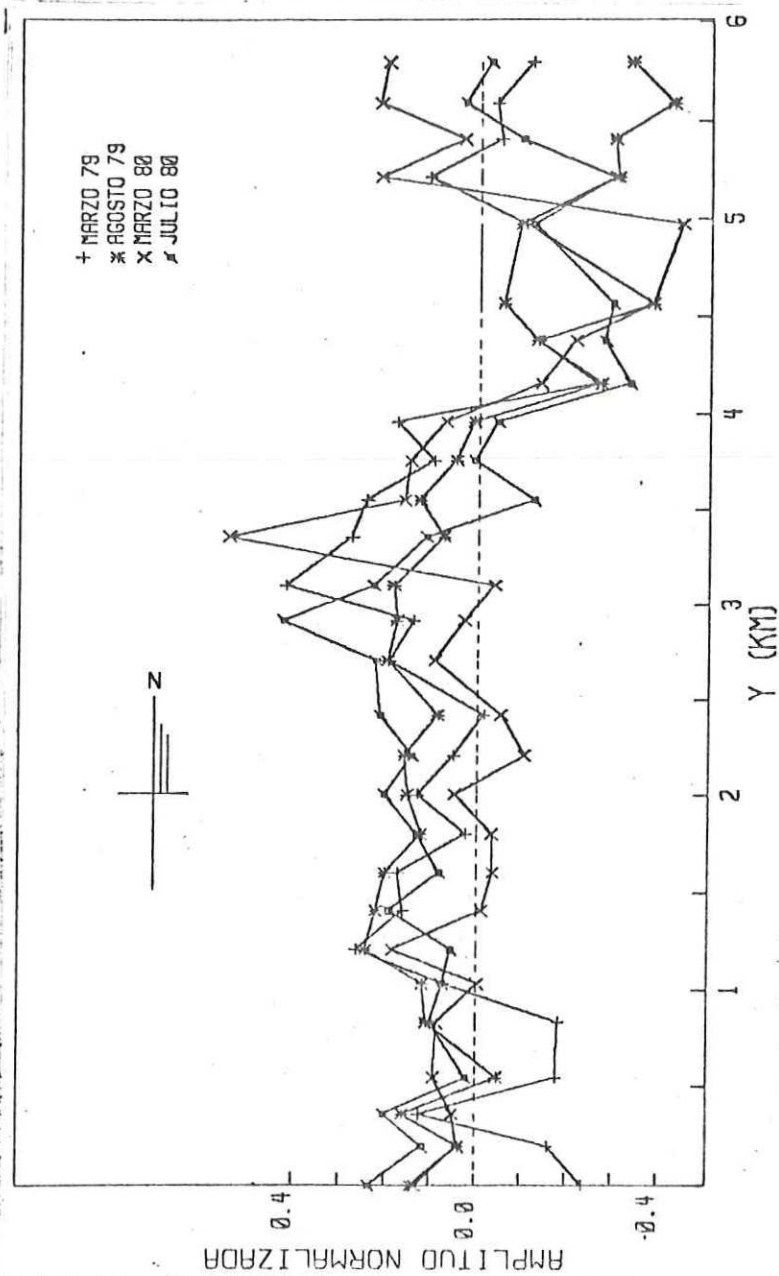


FIGURA 24. Segundo modo de las funciones de la coordenada

'y': Y_2 . Para las descomposiciones en el intervalo 1979-1980.

marginales, σ_i es la frecuencia central de las olas incidentes, θ es el ángulo con el que las olas se aproximan a la playa y α es la pendiente de la playa. En la Figura 25 se muestra, esquemáticamente, el espectro de ondas marginales resultantes. Una pequeña dispersión angular $\delta\theta$, en el espectro incidente, amplía las bandas de resonancia. Entonces se produce sobreposición, primeramente entre modos adyacentes. Lo que sugiere que las interacciones más frecuentes ocurren entre modos adyacentes.

Holman y Bowen (1979) afirman que con condiciones de tormenta, las ondas marginales de frecuencia baja constituyen una parte importante del espectro de energía.

En el área de estudio, la Bahía de Todos Santos, los registros del estado del mar son escasos, es decir, existen pocas mediciones del oleaje. Se cuenta sin embargo con las características del oleaje para una estación en agua profunda cerca de Ensenada (en 31.5N, 118.4W). Estos datos cubren 24 años de observaciones (1951-1974) y se obtuvieron por medio de cálculos a partir de los campos de viento adecuados ('wave hindcasting'). Un resumen de esta información se encuentra en la referencia (Anom. 1981). En una de las Tablas de este documento encontramos que para olas con una altura significativa de entre 3.0 y 5.0 metros el período asociado es de 9 segundos.

Entonces, para estimar las condiciones de resonancia locales se evaluó la ecuación (22) considerando como

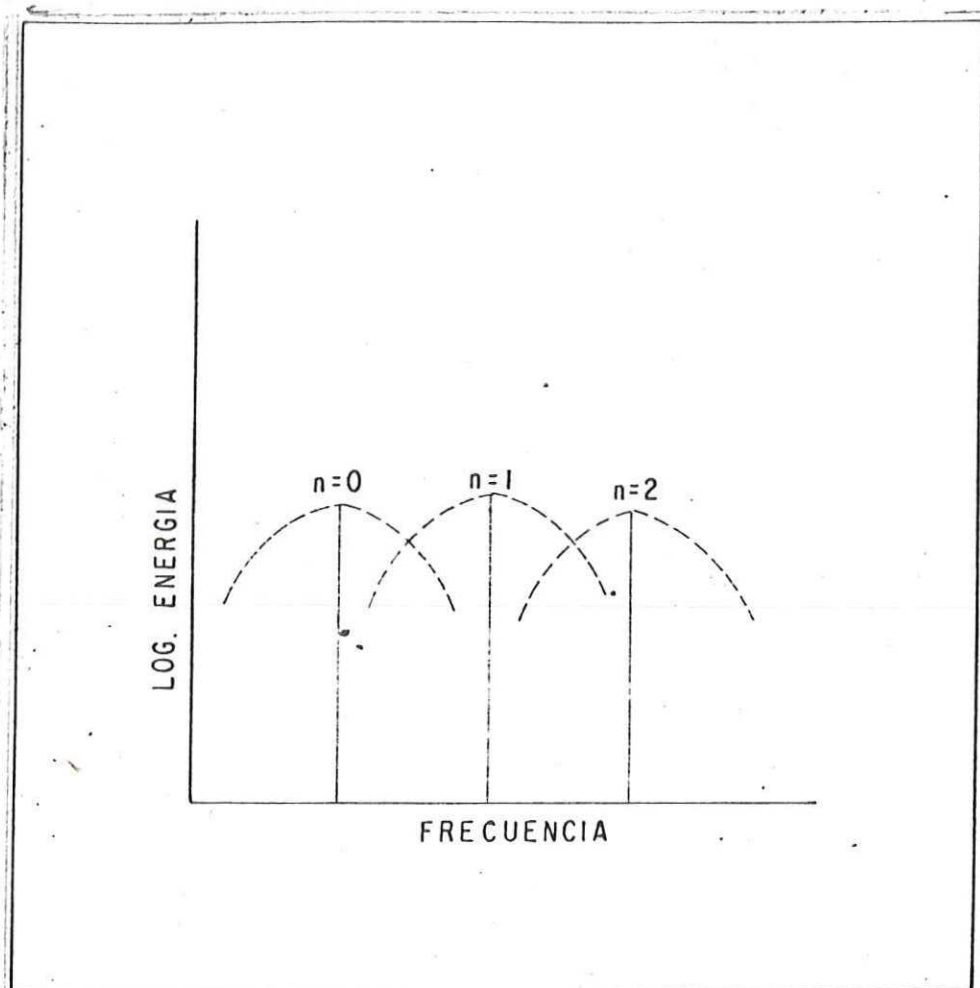


FIGURA 25. Esquema del espectro de las ondas marginales forzadas por el oleaje incidente. Con una dispersión angular igual a cero se fuerzan una secuencia de modos (líneas verticales). Con una dispersión angular pequeña pero finita, se predice una ampliación de los picos modales (líneas a trazos). Tomado de Holman y Bowen (1982).

razonables para el área de estudio los parámetros siguientes: un ángulo de incidencia de 15 grados ($\theta = 15$). La frecuencia central del oleaje incidente se estimó, a partir del período significativo de 9 s, utilizando una gráfica de Goda (1978). Este trabajo trata la distribución conjunta de alturas y períodos del oleaje. El resultado es $\sigma_1 = 0.143$ Hz. Para la pendiente de la playa se utilizó un promedio espacial para Agosto 1976 $\alpha = 0.025$. El resultado es: $\sigma_0 = 0.0018$ Hz para el modo más grave ($n = 0$) y $\sigma_1 = 0.0055$ Hz para el modo siguiente ($n = 1$).

En la Tabla I del trabajo de Holman y Bowen (1982) estos autores presentan la longitud de onda de la topografía (o estructura sedimentaria) generada por la interacción entre dos ondas marginales y para varias combinaciones modales. Para la interacción entre el modo cero y el modo uno, es decir la interacción (0,1), encontramos:

$$\rho_0 L / \pi = 3.0$$

donde L es la longitud de onda de la topografía generada y ρ_0 es el número de onda del modo más grave ($n = 0$) correspondiente a la frecuencia de la interacción (0,1).

Con los datos podemos estimar la longitud de onda L . En la Figura 15 vemos que L es aproximadamente 1.8 km. Entonces para estimar la frecuencia de la interacción bimodal que pudo haber dado origen a la topografía rítmica que se describe en

la Figura 15, usamos la relación de dispersión (ecuación 14) con $n = 0$ y $\alpha = 0.025$. Tenemos entonces que $\sigma = 0.0057$ Hz lo cual es consistente con los valores obtenidos con la ecuación (22).

Es decir, que con oleaje energético de dirección Oeste-Noroeste incidiendo en el área de estudio a un ángulo de 15 grados y cuya frecuencia central sea de $\sigma_i = 0.143$ Hz es posible la existencia de los modos cero y uno en la frecuencia $\sigma = 0.0057$ Hz.

Entonces, proponemos que el ritmo que se observa en la Figura 15 puede ser el producto de la interacción (0,1) entre dos ondas marginales. Esto es, se trata de un fenómeno similar al descrito en la Figura 14.

IV.3.- Descomposición espacio-temporal.

Hemos visto ya que, en la descomposición espacial, la función $Y_1(y)$ describe satisfactoriamente los aspectos sobresalientes de la configuración de la playa. Con las Figuras 15 y 16 se puede ver que la estructura de esta eigenfunción, Y_1 , es similar en todas las fechas o tiempos ' t_i '. Para investigar más a fondo el comportamiento temporal de la configuración de la playa y con el ánimo de hacer énfasis en los cambios que se presentan a lo largo de la orilla (eje ' y ') se aplicó el análisis con funciones empíricas ortogonales a las isolíneas (Figs. 5-13) nivel por

nivel. Es decir, que para cada nivel o altura (ver Figura 4) realizamos una expansión como la siguiente:

$$X(y, t) = \sum_{k=1}^N A_k Y_k(y) T_k(t)$$

donde A_k son los factores de normalización, $Y_k(y)$ son las funciones de la coordenada 'y', y $T_k(t)$ son las funciones del tiempo (ver inciso III.1).

En la Figura 26 tenemos graficado el primer modo $Y_1(y)$ para cada una de las descomposiciones, esto es, uno por cada nivel o altura. La estructura de estas eigenfunciones es la que esperábamos, es decir, la configuración promedio que describen es consistente con lo discutido en el inciso IV.1.1. Se observan claramente las 3 zonas de depósito que mencionamos antes: hacia 0.5 km, 2.4 km y 4.1 km.

En la Tabla III mostramos el porcentaje del valor cuadrático medio explicado por las tres primeras eigenfunciones. Vemos aquí que el primer modo representa más del 94.0% del valor cuadrático medio en todos los niveles.

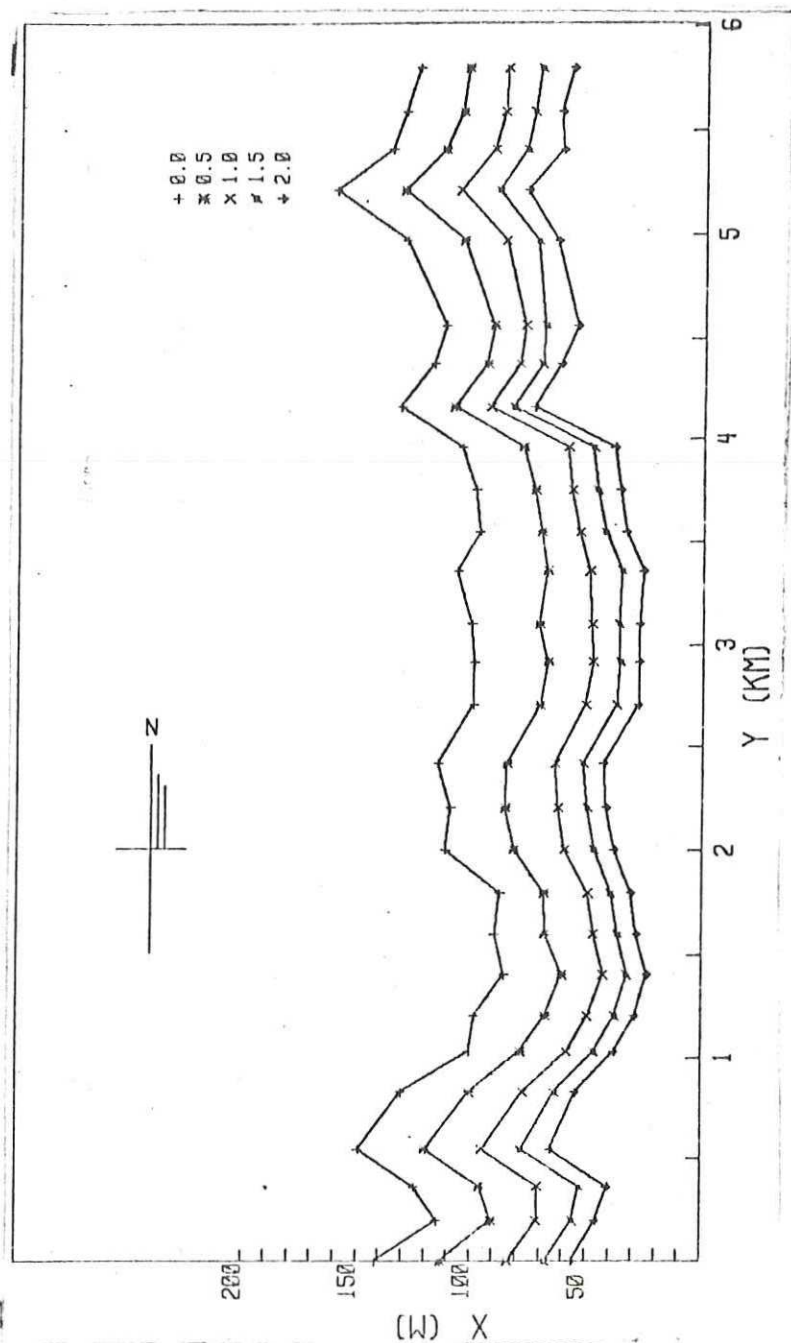


FIGURA 26. Primer modo de las funciones de la coordenada

'y': $Y_1(y)$. Para los cinco niveles o alturas.

Escalado con el primer eigenvalor de la forma

siguiente: $(\rho_{1ny})^{\frac{1}{2}} Y_1$.

TABLA III. Porcentaje del valor cuadrático medio
explicado por las tres primeras eigenfunciones

$$n_t = 9, n_y = 28 .$$

Eigenf/Altura	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0
1	97.27	96.72	95.96	95.30	94.30
2	1.57	2.20	2.62	3.03	3.42
3	0.52	0.48	0.80	1.02	1.32
	99.36	99.40	99.38	99.35	99.04

El movimiento de la arena, hacia el mar en invierno y hacia tierra en verano como respuesta al cambio estacional en las características del oleaje ha sido descrito en varios trabajos como Shepard (1950), Lizárraga (1971), Winant et al. (1975). En la Figura 27 se observa con claridad este hecho. Tenemos aquí graficado el primer modo de las funciones del tiempo. Es decir: $T_1(t)$, para cada una de las descomposiciones. Este gráfico nos dice que la amplitud de

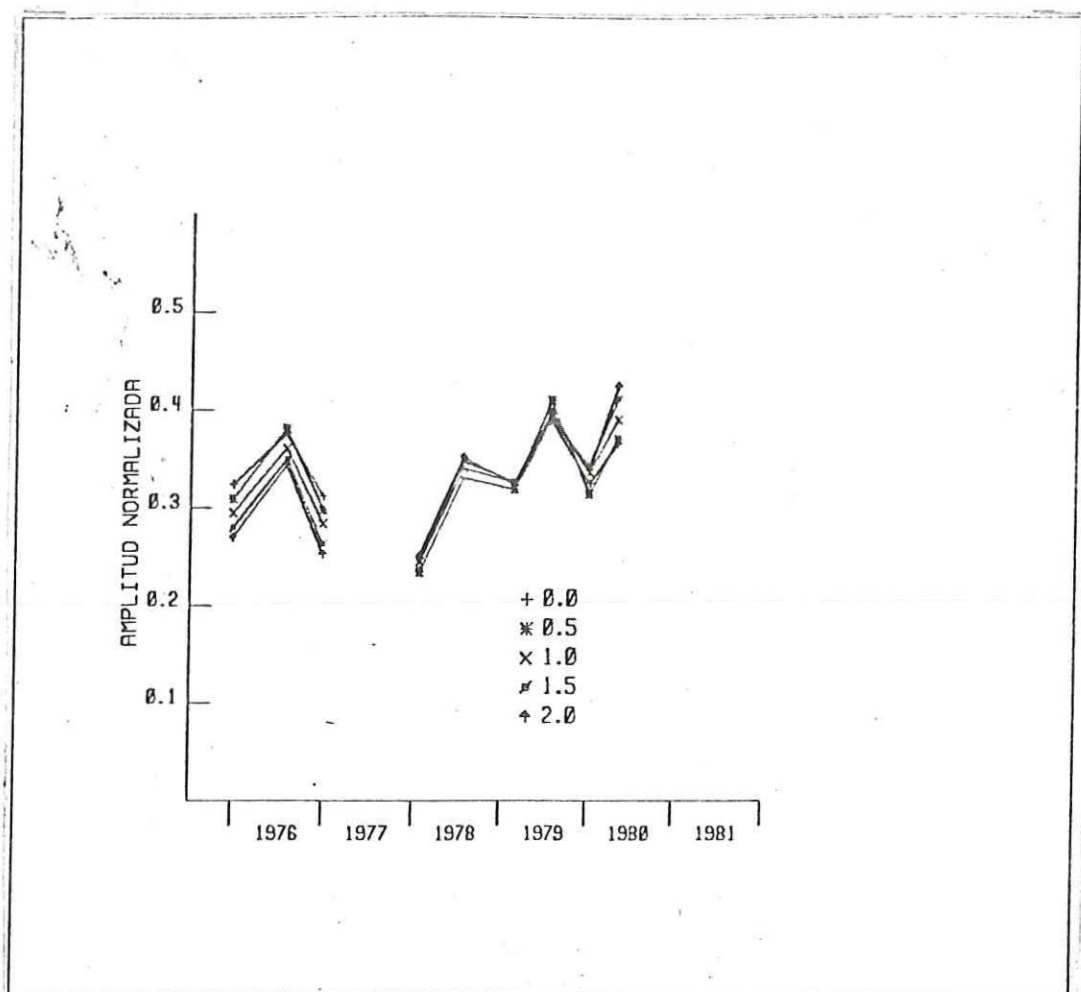


FIGURA 27. Primer modo de las funciones de la coordenada 't': $T_1(t)$, para los cinco niveles o alturas.

las curvas que describen la configuración característica temporal de la playa (Fig. 26), cambia con el tiempo. Siendo mayor la amplitud en verano que en invierno. Vemos que el comportamiento de T_1 es similar en cada una de las alturas o niveles.

El registro de este fenómeno, la estacionalidad, se muestra en la Figura 28 para la estación 11 situada hacia 4.0 km sobre el eje 'y' (Figura 3) y es típico para toda el área de estudio. Se ve aquí con claridad el ciclo anual que se extrae de los datos con el primer modo $T_1(t)$. Lizárraga (1971) describe este movimiento cíclico de la playa en la Bahía de Todos Santos utilizando registros mensuales durante un año.

Decidimos que, debido a algunas incertidumbres en la relocalización de varias estaciones [ver González et al. (1982)] la información que se encuentra en las eigenfunciones dos y tres es difícil de interpretar, de manera que no la presentamos aquí.

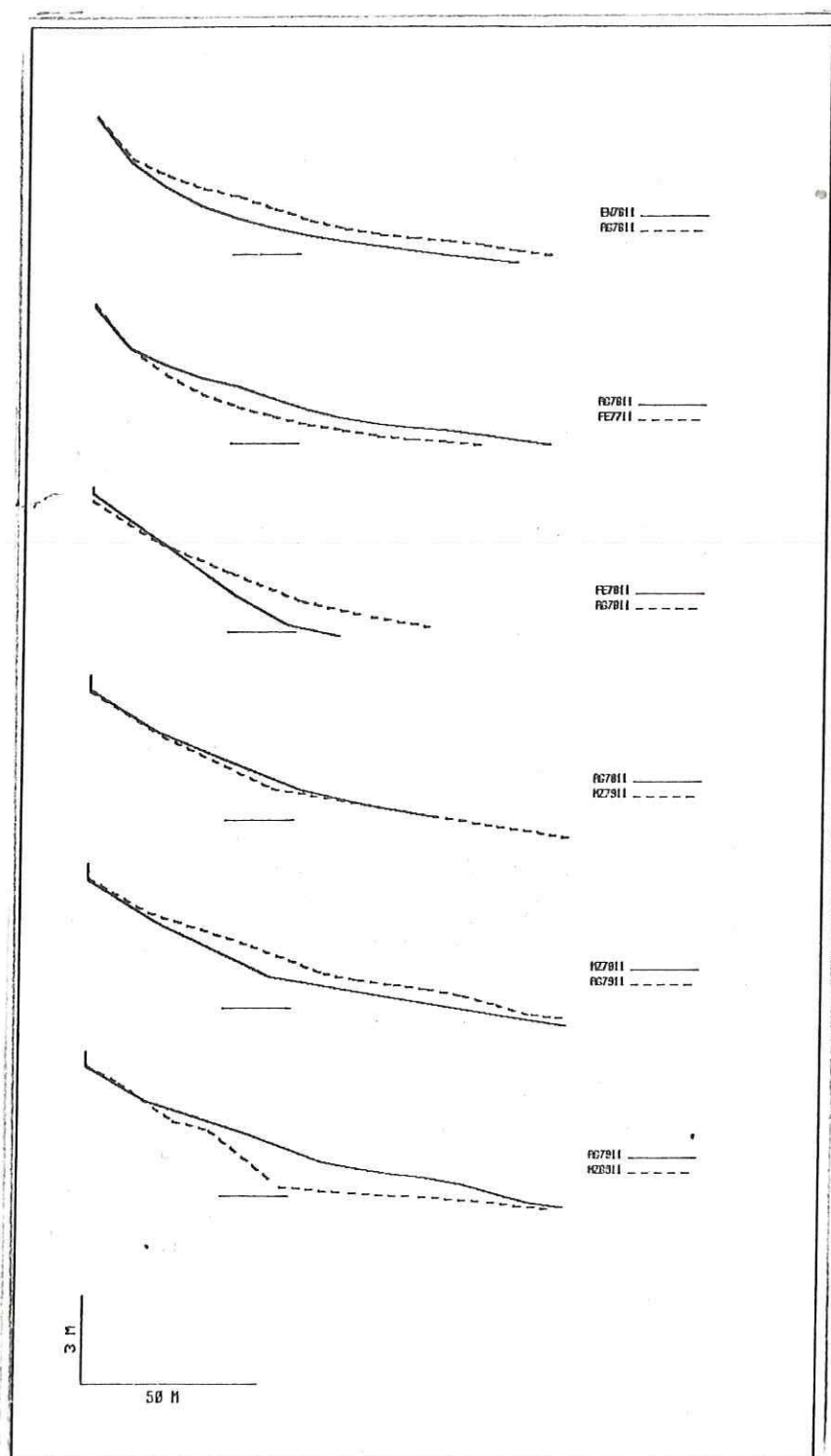


FIGURA 28. Perfiles de playa observados en la estación 11 en el intervalo 1976-1980. Notar la estacionalidad.

V.- CONCLUSIONES

1.-Las primeras dos eigenfunciones de la expansión:

$$X(h, y) = \sum_{k=1}^5 A_k Y_k(y) H_k(h)$$

explican más del 99.8% del valor cuadrático medio de los datos para todas las fechas. Con excepción de la descomposición para Marzo de 1980, donde el porcentaje explicado por estas dos funciones es de 98.62%. Con la estructura de estas dos eigenfunciones es posible describir, de una manera concisa y bastante completa, la configuración de la playa en Ensenada Baja California.

2.-La estructura de la primera eigenfunción $Y_1(y)$ muestra tres máximos regularmente espaciados: hacia 0.5 km, 2.4 km y 4.1 km. Estos máximos son el reflejo de zonas en donde la cantidad de arena por encima del plano de Bajamar Media Inferior es también un máximo. Se propone describir estas zonas como zonas de depósito. Y además, estos máximos se interpretan como una forma de topografía rítmica u ondulaciones de la línea de la playa ('sand waves').

3.-La existencia de la morfología mencionada en el párrafo anterior es consistente con la hipótesis de las ondas

marginales como mecanismo generador. Con la información que proporcionan Holman y Bowen (1982) es posible proponer que el ritmo observado y descrito en este estudio es el resultado de la interacción entre dos ondas marginales de la misma frecuencia, $\sigma = 0.0057\text{Hz}$, y de números modales consecutivos [$n = 0$ y $n = 1$, es decir: la interacción (0,1)].

4.-Se comprueba la estacionalidad del movimiento de la arena en el área. Es decir, se extrae y se muestra con claridad el ciclo anual característico de los cambios del perfil asociados al carácter estacional del oleaje en la zona.

LITERATURA CITADA

- Aubrey, D.G. 1978. Statistical and Dynamical Prediction of Changes in Natural Sand Beaches. PhD. Thesis. University of California, San Diego, California. 180pp.
- Bagnold, R.A. 1963. Mechanics of Marine Sedimentation, p.507-528. En: The Sea, Vol 3. (M.N. Hill, Ed.) Interscience., New York. 963pp.
- Bailard J. 1981. An Energetics Total Load Sediment Transport Model for a Plane Sloping Beach. J. Geophys. Res. 83: 1913-1920.
- Bowen, A.J. y R.T. Guza. 1978. Edge Waves and Surf Beat. J. Geophys. Res. 83: 1913-1920.
- Bowen, A.J. y D.L. Inman. 1971. Edge Waves and Crescentic Bars. J. Geophys. Res. 76: 8662-8670.
- Davis, R.E. y J.W. Kelly. 1980. Topografía Elemental. Compañía Editorial Continental., México. 648 pp.
- Dolan, R., L. Vincent y B. Hayden. 1974. Crescentic Coastal Landforms. Zeitschr. Fur Geomorph. 18: 1-12.
- Eckart, C. 1951. Surface waves in water of variable

depth. Wave report 100, Scripps Inst. Oceanogr.,
ref. 51-12, La Jolla California.

Goda, Y. 1978. The Observed Distribution of Periods
and Heights of Sea Waves. Proc. of the sixteenth
Coastal Eng. Conference. Vol 1:227.

González, L.M., M.A. Uribe y F. Plaza. 1982. Cambios
en la Playa . Ensenada, Baja California. Divn.
Oceanol.
Sec. Proc. Litorales. CICESE., Ensenada, Baja
California.
Manuscrito.

Holman, R.A. 1981. Infragravity Energy in the
Surf Zone. J. Geophys. Res. 86: 6442-6450.

Holman, R.A. y A.J. Bowen. 1979. Edge Waves
on Complex Beach Profiles. J. Geophys. Res.
84: 6339-6346.

Holman, R.A. y A.J. Bowen. 1982. Bars, Bumps and
Holes: Models for the Generation of Complex Beach
Topography. J. Geophys. Res. 87: 457-468.

Hunt, J. y B. Johns. 1963. Currents produced by
Tides and Gravity Waves. Tellus, 15:343-351.

Leblond, P.H. y L.A. Mysak. 1978. Waves in the Ocean.
Elsevier Publ. Co., Amsterdam. 602 pp.

Lizárraga, J.R. 1971. Estudio de los Movimientos Cíclicos de la Playa en la Bahía de Todos Santos B.C. por medio de Secciones Transversales. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California., Ensenada, Baja California. 41pp.

Shepard, F.P. 1950. Beach Cycles in Southern California. U.S. Army Corps of Engrs. Beach Erosion Board. Tech. Memo No.20. 26 pp.

Anon. 1981. A Preliminary Compilation of Environmental Data off Ensenada, B.C. México. Tecnocean, S.A. Reporte privado.

Winant, C.D., D.L. Inman y C.E. Nordstrom. 1975. Description of Seasonal Beach Changes Using Empirical Eigenfunctions. J. Geophys. Res. 80: 1979-1986.