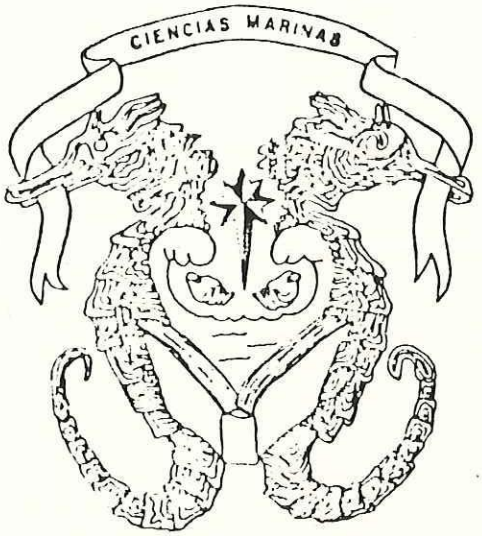
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

ESCUELA SUPERIOR DE CIENCIAS MARINAS




# APLICACION DE UN MODELO ESTOCASTICO PARA SIMULACION DE OLAS

INFORME MEMORIA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**OCEANOLOGO**

PRESENTA

JAVIER ORGANISTA SANDOVAL

ENSENADA B. C. , AGOSTO DE 1985

## RESUMEN

Se utiliza el modelo de Lakhan (1981) para simular las características del oleaje en Mission Bay Ca., considerando datos de alturas y períodos en aguas profundas. Dicho modelo simula el movimiento de un tren de olas desde aguas profundas hasta la costa, considerando las teorías de oleaje de Airy, Stokes y Cnoidal dependiendo de la razón entre profundidad del agua y longitud de onda.

Las alturas y períodos en aguas profundas varían aleatoriamente de tal forma que éstos valores conforman la distribución de probabilidad de Rayleigh. Los valores predichos de alturas y períodos se comparan con los datos medidos en Mission Bay cerca de la zona de rompiente, teniéndose 400 observaciones para los meses de Enero-Abril de 1983. Se calculan estadísticas básicas y prueba Chi-cuadrada de bondad de ajuste para determinar el grado coincidente entre valores observados y predichos, encontrándose representativos los resultados obtenidos para la predicción efectuada.

APLICACION DE UN MODELO ESTOCASTICO

PARA SIMULACION DE OLAS

INFORME MEMORIA
QUE PRESENTA:
JAVIER ORGANISTA SANDOVAL

Aprobada por:

Presidente del Jurado
M. C. Luis Fok Pun

Sinodal Propietario
Modesto Ortíz Figueroa

Sinodal Propietario
M. C. René Pinet Plasencia

Sinodal Suplente
Oc.Armando Oseviña Castro

Sinodal Suplente
Oc. J. Manuel Figueroa Rodríguez

# AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al M. C. Luis Fok Pun por haber aceptado dirigir éste trabajo y por su valiosa ayuda brindada, sin la cuál no hubiera sido posible la realizaciòn del mismo.

Al M.C. René Pinet P., Oc. Modesto Ortíz F., Oc. Armando Trasviña C. y Oc. Manuel Figueroa R., por su gran ayuda, sugerencias y paciencia otorgadas durante todo éste tiempo.

A P.O. Sergio Ramos R. por su ayuda brindada en la elaboraciòn de los dibujos y al P.O. Carlos Torres N. y P.O. Andres Flores T. por su desinteresada ayuda en computaciòn.

A todos los que siempre me apoyaron:

GRACIAS

# INDICE

página


Lista de símbolos.....i

Lista de tablas y figuras.....ii

I Introducción.....1

I.1 Antecedentes.....2

II Objetivo.....6

III Descripción del modelo.....7

IV Datos y método de análisis.....13

IV.1 Datos.....13

IV.1.1 Aguas profundas.....13

IV.1.2 Aguas someras.....13

IV.1.3 De entrada que requiere el modelo.....14

IV.2 Método de análisis.....15

V Resultados.....18

VI Discusión.....25

VII Conclusión.....27

VIII Recomendaciones.....28

IX Bibliografía.....29

# LISTA DE SIMBOLOS

Notación y símbolos utilizados en el presente trabajo

$H$ = Altura de la ola

$T$ = Período de la ola

$C$ = Celeridad o velocidad de fase

$u$ = Componente horizontal de la velocidad orbital

$g$ = aceleración de la gravedad

$L$ = Longitud de onda

$h$ = Profundidad

$\sigma$ = Frecuencia de la ola

$K$ = Número de onda

$\pi$ = 3.141592

$k$ = Módulo de las integrales elípticas

$K(k)$ = Integral elíptica del primer tipo

$E(k)$ = Integral elíptica del segundo tipo

$x, z$ = Coordenadas espaciales

$Y_b$ = Inicio de rompiente

$t$ = Tiempo

$Y_t$ = Distancia del valle de la ola al fondo

$B_b$ = Indice de rompiente

$\alpha$ = Pendiente de la playa

$U$ = Parámetro

Subscripta $_o$ representa condiciones en aguas profundas

Subscripta $_b$ indica condiciones de rompiente

# LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

página

Figura 1. Diagrama de flujo que ilustra la secuencia de pasos del modelo de Lakhan (1981).....12

Figura 2. Ubicación de las estaciones para la medición del oleaje en Mission Bay, para los meses de Enero-Mayo de 1983.....17

Figura 3. Histograma de ocurrencias de las alturas significantes de olas observadas (Superior), y predichas por el modelo (Inferior).....23

Figura 4. Histograma de ocurrencias de los períodos observados (Superior) y de los predichos por el modelo (Inferior).....24

Tabla I. Distribución de alturas y períodos significantes cerca de la zona de rompiente en Mission Bay, Ca. para los meses de Enero-Abril de 1983. (tomado de Seymour, et. al.,1983)...20

Tabla II. Distribución de las alturas y períodos predichos por el modelo de Lakhan (1981).....21

Tabla III Superior: estadísticas básicas para los valores observados y predichos. Inferior: valores de Chi-cuadrada obtenidos de la prueba de bondad de ajuste.....22

# I. INTRODUCCION

Con el advenimiento de las computadoras es notorio el avance alcanzado por los modelos numéricos aplicados en oceanografía, específicamente en la región costera, donde se han desarrollado diversas simulaciones numéricas pretendiendo evaluar el impacto que ocasiona el oleaje, principalmente en aspectos donde la influencia de las olas repercute en alguna extensión sobre obras costeras y actividades humanas, o donde modifiquen o alteren una zona específica de costa con los consecuentes daños económicos que implica.

A efecto de comprender el comportamiento de las olas y de tratar de predecir algunos de sus efectos, en las dos últimas décadas fueron desarrollados diversos experimentos en canales de olas, por ejemplo Saville (1957) y Stafford y Chesnutt (1970), pretendiendo simular a escala aspectos costeros como evolución del perfil de playa, cambios en la línea de costa, transporte litoral, entre otros, obteniendo resultados poco halagadores, debido ésto a la enorme interacción que presentan los diversos elementos que conforman el ambiente costero. Alternativamente se ha encontrado mas práctico efectuar simulaciones, las cuales se consideran modelos simbólicos, donde se requieren

operaciones matemáticas y lógicas que pueden ser usadas para formular una solución al problema que se pretenda evaluar (Mirham, 1972), auxiliadas éstas de computadoras, con las cuales es posible obtener resultados de manera rápida, pudiéndose efectuar diferentes combinaciones de las variables utilizadas. Sin embargo, es de notarse que efectuar una simulación requiere de datos de entrada que correspondan a mediciones efectuadas en el área que se pretenda estudiar, o de datos generados en el modelo en sí, en éste sentido, Lakhan (1981) desarrolló una simulación estocástica de olas para cualquier ambiente costero, considerando diversos estudios sobre mécanica del movimiento de olas, principalmente las teorías sobre oleaje de Airy, Stokes y Cnoidal, cuyo desarrollo es común en textos de ingeniería costera vrg. Wiegel (1964), Horikawa (1978)µ destacando su trabajo debido a la enorme aplicación que presenta utilizar olas por computadora en estudios costeros y el consecuente ahorro en tiempo y dinero que implica.

## I.1 ANTECEDENTES

El caracter de las olas, generalmente ha sido estudiado por diversos investigadores en forma teórica, experimentalmente en modelos a escala, numéricamente mediante simulaciones, por observaciones directas y

mediciones en el mar. En el aspecto teórico existen diversos estudios desarrollados para describir el movimiento de las olas, destacando las teorías clásicas de Airy, Stokes y Cnoidal, citadas en Kinsman (1975), Wiegel (1964), Shore Protection Manual (1973).

De los modelos a escala aplicados al estudio del oleaje, destacan los trabajos realizados por Stafford y Chesnutt (1970), quienes efectuaron una serie de experimentos en canales de olas para evaluar la variabilidad de las alturas de las olas debido al fenómeno de reflección, así como los cambios de perfil considerando diferentes condiciones tanto de olas como de sedimento. Noda (1972), trabajó en un programa experimental con el propósito de desarrollar las leyes que rigen a los modelos a escala para los perfiles de playas de laboratorio suponiendo que están en equilibrio, encontrando relación entre las escalas horizontal y vertical del canal de olas con el tamaño y peso específico del sedimento, remarcando la importancia de conocer las leyes físicas que rigen los procesos costeros para poder determinar la magnitud relativa de las fuerzas involucradas. De manera similar, Naheer (1978), realizó estudios experimentales auxiliándose con un canal generador de olas, para evaluar el perfil, celeridad y velocidad orbital de las partículas del agua de la onda solitaria, destacando su trabajo por la gran similitud encontrada entre

los valores experimentales con los teóricos. Así, pretendiendo generalizar el concepto de similitud, Le Mehauté (1976), estableció las condiciones que debe reunir un modelo a escala para poder representar adecuadamente el fenómeno de estudio, denotando la importancia de considerar la similaridad geométrica, estática y dinámica para determinar la influencia relativa de los efectos de escala.

En el aspecto de las simulaciones numéricas, el estudio de las olas ha estado más enfocado, al igual que los modelos a escala, a tratar de evaluar los efectos que ocasionan, mas que al estudio de las olas en sí; sin embargo, de los trabajos que destacan se encuentra el de Noda (1971), quien efectuó una simulación numérica para predecir el comportamiento de un sistema de olas mediante análisis de fourier, el perfil de la superficie del agua generado por el modelo es comparado con el perfil teórico, encontrando que la técnica del análisis de fourier es apropiada desde un punto de vista práctico para simular olas de éste tipo. Similarmente Hudspeth y Chen (1979), simularon la superficie del mar de manera discreta y unidireccional, considerando estocasticidad y no linealidad en las ecuaciones, basándose en el método espectral complejo de fourier.

Otros estudios realizados en oleaje son los métodos de predicción, los cuales permiten obtener la altura y período

de las olas a partir de las características del viento que las genera. Generalmente dichos métodos se clasifican en: fórmulas empíricas, método de la ola significante y método espectral de energía. En éste sentido, Falvey (1974), efectuó una predicción de alturas de olas, desarrollando las ecuaciones en forma simplificada con el objeto de relacionar las estadísticas del oleaje con el esfuerzo tangencial del viento.

De los trabajos que consideran el método espectral de energía para la predicción de olas destaca el de Bishop (1983), quien compara 3 modelos de predicción (Sverdrup-Munk-Bretschneider, JONSWAP y Donelan ), encontrando que los tres modelos son apropiados para predecir las características de las olas y la distribución de energía en el espectro, sin embargo sugiere la utilización del modelo de Donelan, dado que también predice la dirección de la energía dominante de la ola conociendo el fetch.

# II. OBJETIVO

Implementar el modelo estocástico de simulación de olas, desarrollado por Lakhan (1981) en la computadora Prime 400.

Utilizar el modelo anterior con propósitos prácticos, específicamente para predecir condiciones de oleaje en la zona costera de Mission Bay Ca., t niendo mediciones de alturas de olas en aguas profundas y cerca de la zona de rompiente, con las cuales se efectuará un análisis coincidente entre los valores observados y los predichos por el modelo.

# III. DESCRIPCION DEL MODELO

El modelo bidimensional de Lakhan (1981), está diseñado para simular estocásticamente la altura, longitud y celeridad de las olas, así como la componente horizontal de las velocidades orbitales de las partículas del agua para cualquier número de puntos, igualmente espaciados a lo largo de la región cercana a la costa y a profundidades variables, ver (fig. 1).

Se considera la distribución de Rayleigh para describir la probabilidad de ocurrencia de las alturas y períodos de las olas; para tal efecto, se generan números aleatorios en el rango de (0,1), los cuales son utilizados para tomar muestras de dicha distribución para obtener estocásticamente las alturas y períodos de las olas en aguas profundas. Una vez generados dichos valores, se evalúan las principales características de las olas, tales como longitud, celeridad y velocidad orbital de las partículas del agua, para ello se consideran las teorías de Airy, Stokes y Cnoidal; aplicándose cada teoría en diferentes regiones, según lo indique el cociente entre la profundidad del agua (h) y la longitud de ola (L):

Airy.....h/L>0.5

Stokes.....0.5> h/L > 0.1

Cnoidal.....h/L < 0.1

Cuándo la ola inicia su propagación en aguas profundas y el cociente (h/L) es mayor que 0.5, las ecuaciones utilizadas para computar la longitud y celeridad de acuerdo a la teoría de Airy son:

$$C = \frac{g\,T}{2\pi}$$

$$L = \frac{g\,T^2}{2\pi}$$

Conforme la ola avanza hacia aguas menos profundas y los valores del cociente (h/L) indican la región de aplicación de la teoría de Stokes, las ecuaciones utilizadas para evaluar las características de la ola son:

$$C = \frac{g\,T}{2\pi}\tanh(2\pi h/L)$$

$$L = \frac{g\,T^2}{2\pi}\tanh(2\pi h/L)$$

$$u = \frac{\pi H}{T}\,\frac{\cosh[k(z+h)]}{\operatorname{Senh}(kh)}\cos(kx-\sigma t) + \frac{3}{4}(\pi H/L)^2 C\,\frac{\cosh[2k(z+h)]\cos[2(kx-\sigma t)]}{[\operatorname{Senh}(kh)]^4}$$

Los cambios de profundidad ocasionan en la ola una pérdida de altura debido a los efectos del fondo, la cuál es

evaluada con la ecuación descrita por Holmes (1975):

$$H = H_o \left\{ \sqrt{\frac{1}{\tanh(2\pi h/L)} + \frac{1}{\left[\frac{1+ 4\pi h/L}{\text{Senh}(4\pi h/L)}\right]}} \right\}$$

Para las olas que se propagan en aguas someras, se considera la teoría Cnoidal para evaluar sus características, las cuales son función del módulo k de las integrales elípticas de Jacobi. La integral del primer tipo se calcula mediante:

$$K(k) = [a_o + a_1 m_1 + a_2 m_1^2] + [b_o + b_1 m_1 + b_2 m_1^2] \text{Ln}(1/m_1) + \epsilon(k) \quad |\epsilon(k)| \leq 3X10^{-5}$$

donde $a_o = 1.3862944$; $a_1 = 0.1119723$; $a_2 = 0.0725296$
$b_o = 0.5$; $b_1 = 0.121347$; $b_2 = 0.0288$; $m_1 = 1 - k^2$

Y la integral elíptica de Jacobi del segundo tipo se aproxima mediante:

$$E(k) = [1 + a_1 m_1 + a_2 m_1^2] + [b_1 m_1 + b_2 m_1^2] \text{Ln}(1/m_1) + \epsilon(k) \quad |\epsilon(k)| \leq 4X10^{-5}$$

donde $a_1 = 0.4630151$; $a_2 = 0.1077812$; $b_1 = 0.2452727$;
$b_2 = 0.0412496$

Para estimar K(k) y E(k) cuándo k---> 1, se utilizan las ecuaciones descritas por Jahnke y Emde (1960):

$$K(k) = G + \frac{G-1}{4} k'^2 + \frac{9}{64}\left[G - \frac{7}{6}\right]k'^4 + \frac{25}{256}\left[G - \frac{37}{30}\right] k'^6 + \ldots,$$

$$E(k) = 1 + \frac{1}{2}\left[G - \frac{1}{2}\right]k'^2 + \frac{3}{16}\left[G - \frac{13}{12}\right] k'^4 + \frac{15}{128}\left[G - \frac{6}{5}\right]k'^6 + \ldots,$$

donde $G = \ln(4/k')$; y $k' = \sqrt{1-k^2}$

Con las integrales elípticas calculadas para diferentes valores del módulo k=0.99, 0.98, 0.97,... la longitud y celeridad de la onda cnoidal se describe mediante:

$$L = \sqrt{\frac{16\ h^3}{H}} \cdot k \cdot K(k)$$

$$Y_t = \frac{16\ h^3}{3\ L^2} K(k)\ \{K(k)-E(k)\} + h - H$$

$$C = g \cdot Y_t \left\{ 1 + H\ \frac{[0.5-E(k)/K(k)]}{Y_t \cdot k^2} \right\}$$

Para evaluar adecuadamente el cambio de altura de la ola cnoidal debido a los efectos del cambio en profundidad conforme avanza hacia la costa, se utiliza la ecuación descrita por Svendsen y Hansen (1977):

$$H = H_o \{0.157 \left[\frac{H_o}{L_o}\right]^{1/3} \left[\frac{h}{L_o}\right] U^{1/2} B^{-4/3}\}$$

A efecto de determinar adecuadamente las condiciones de

campo, es necesario determinar si la ola está rompiendo y ajustar la altura a dichas condiciones, para tal efecto, el inicio de rompiente se simula con:

$$Y_b = \frac{H_b}{h_b} = 0.78$$

Y la pérdida absoluta de altura a través de la rompiente (dBrk) es calculada sobre una longitud unitaria, especificada con la ecuación derivada empíricamente por Davidson-Arnott (1975):

$$dBrk = (0.05\ H/hB_b)(X_i - X_{i-1}/5.0)$$

dónde se incluye el índice de rompiente de Galvin :

$$B_b = \frac{H}{g \propto T^2}$$

Una vez alcanzada la línea de costa, se efectúan los ajustes de las profundidades debido a la influencia de la marea. Dado que el rango de mareas controla las variaciones del nivel del agua, y en teoría presenta una distribución normal, en la simulación se generan números aleatorios, los cuales son usados para muestrear de la distribución normal, con media y desviación estandar dados para el rango de marea, cambiándose éste último cada 12 iteraciones en el programa respectivo y representando cada iteración alrededor de 70 minutos de tiempo real.

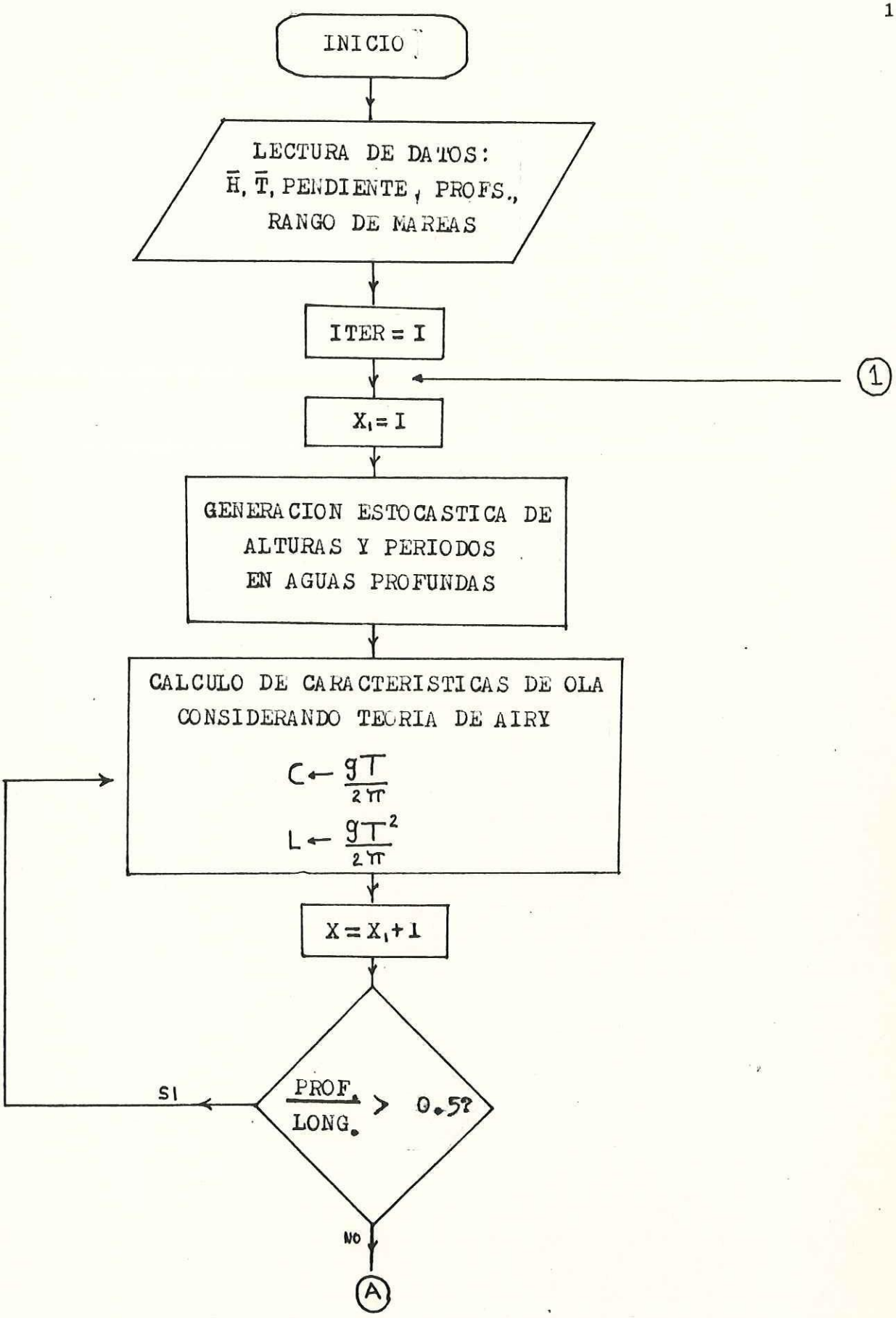
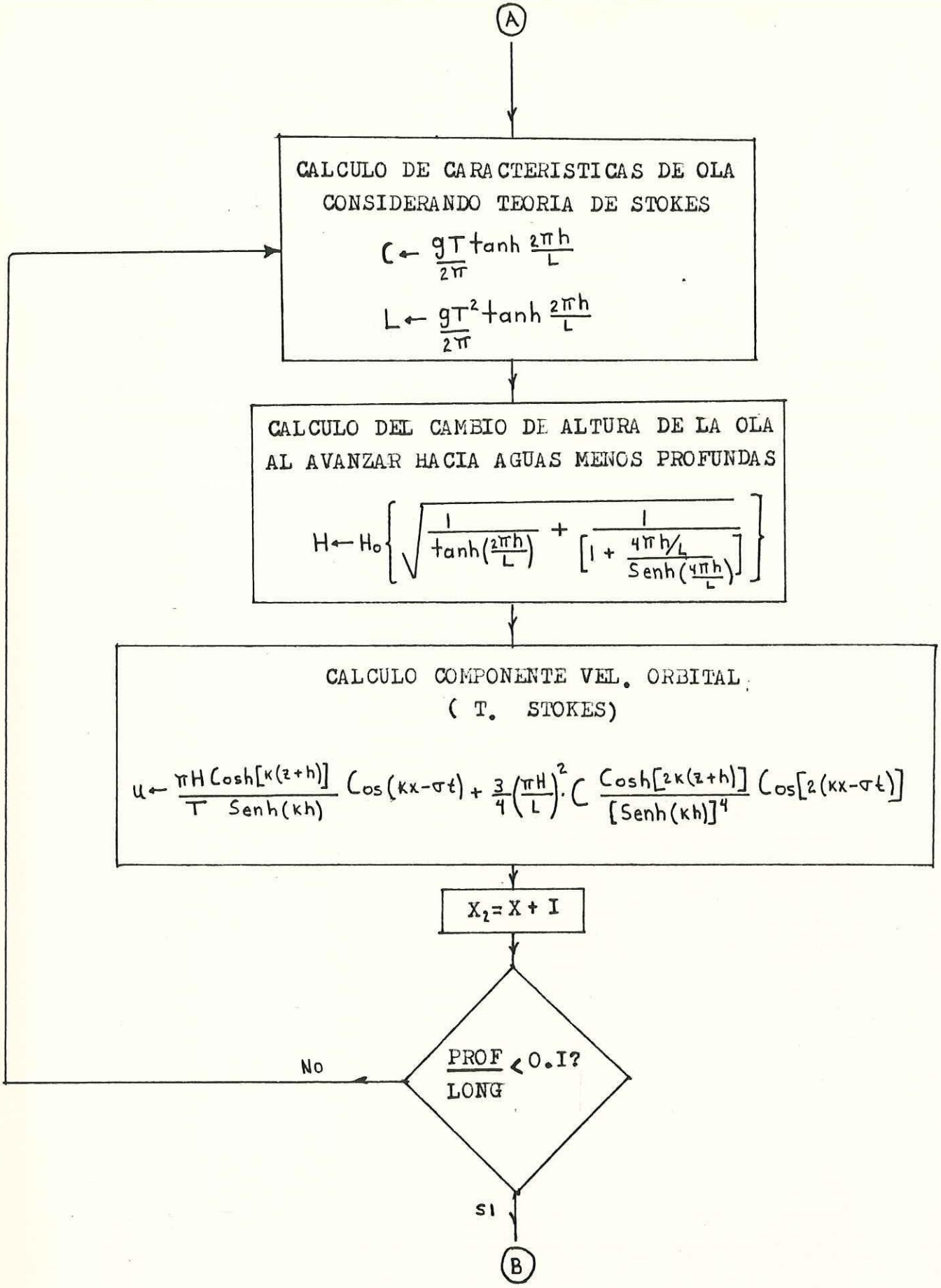
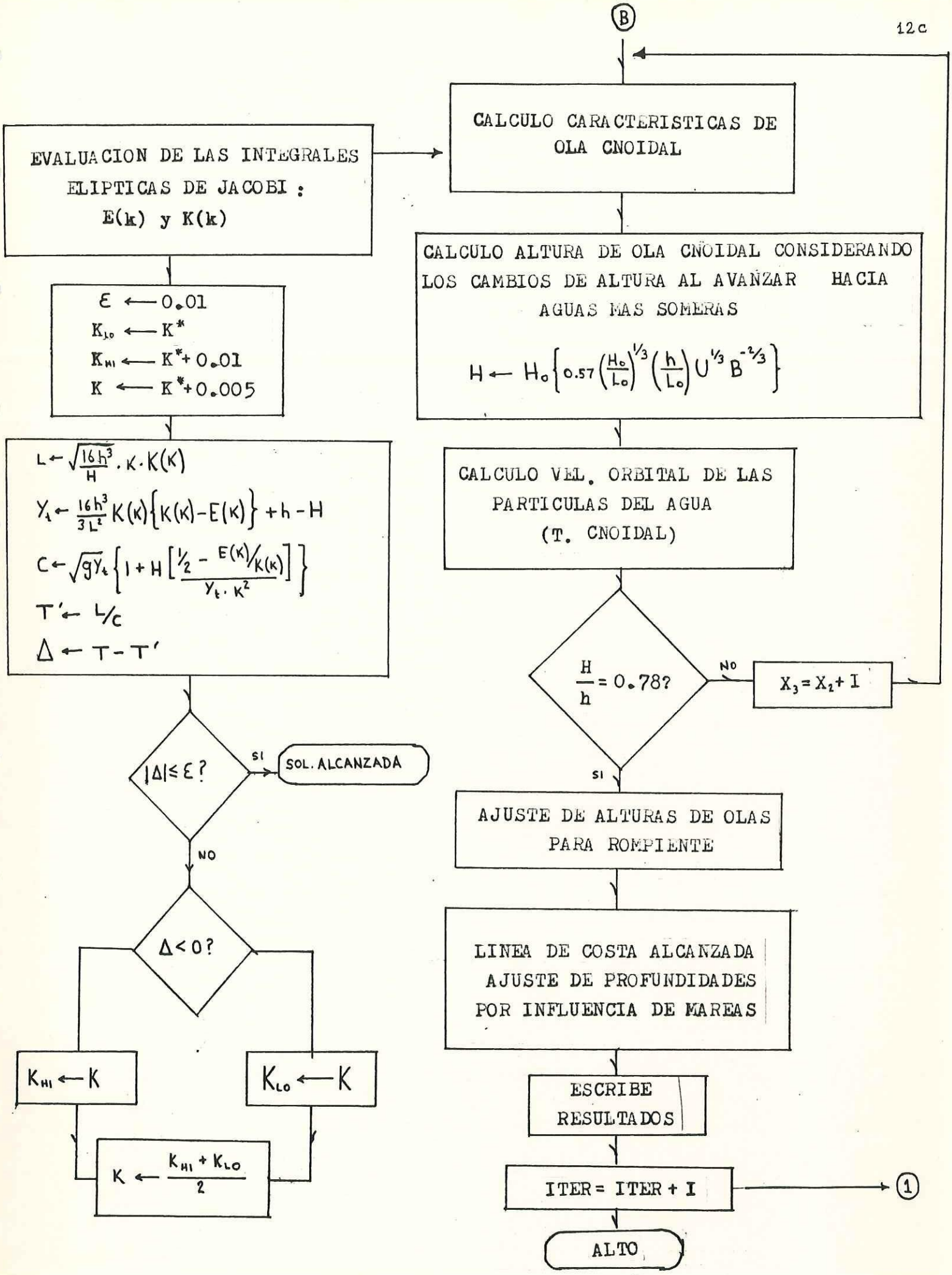



Figura 1. Diagrama de flujo que ilustra la secuencia de pasos del modelo de Lakhan (1981).


A
CALCULO DE CARACTERISTICAS DE OLA CONSIDERANDO TEORIA DE STOKES
$C \leftarrow \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$
$L \leftarrow \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$
CALCULO DEL CAMBIO DE ALTURA DE LA OLA AL AVANZAR HACIA AGUAS MENOS PROFUNDAS
$H \leftarrow H_o \left\{ \sqrt{\frac{1}{\tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} + \frac{1}{\left[1 + \frac{4\pi h/L}{\operatorname{Senh}\left(\frac{4\pi h}{L}\right)}\right]}} \right\}$
CALCULO COMPONENTE VEL. ORBITAL ( T. STOKES)
$u \leftarrow \frac{\pi H \cosh[k(z+h)]}{T \operatorname{Senh}(kh)} \cos(kx-\sigma t) + \frac{3}{4}\left(\frac{\pi H}{L}\right)^2 C \frac{\cosh[2k(z+h)]}{[\operatorname{Senh}(kh)]^4} \cos[2(kx-\sigma t)]$
$X_2 = X + I$
$\frac{PROF}{LONG} < 0.I?$
No
SI
B


B
CALCULO CARACTERISTICAS DE OLA CNOIDAL
EVALUACION DE LAS INTEGRALES ELIPTICAS DE JACOBI : E(k) y K(k)
CALCULO ALTURA DE OLA CNOIDAL CONSIDERANDO LOS CAMBIOS DE ALTURA AL AVANZAR HACIA AGUAS MAS SOMERAS
$H \leftarrow H_o\left\{0.57\left(\frac{H_o}{L_o}\right)^{1/3}\left(\frac{h}{L_o}\right)U^{1/3}B^{-2/3}\right\}$
$\varepsilon \leftarrow 0.01$
$K_{Lo} \leftarrow K^*$
$K_{HI} \leftarrow K^* + 0.01$
$K \leftarrow K^* + 0.005$
CALCULO VEL. ORBITAL DE LAS PARTICULAS DEL AGUA (T. CNOIDAL)
$L \leftarrow \sqrt{\frac{16h^3}{H}} \cdot K \cdot K(K)$
$Y_t \leftarrow \frac{16h^3}{3L^2}K(K)\{K(K)-E(K)\}+h-H$
$C \leftarrow \sqrt{gY_t}\left\{1+H\left[\frac{1/2 - E(K)/K(K)}{Y_t \cdot K^2}\right]\right\}$
$T' \leftarrow L/C$
$\Delta \leftarrow T - T'$
$\frac{H}{h} = 0.78$?
NO
$X_3 = X_2 + I$
SI
$|\Delta| \leq \varepsilon$?
SI
SOL. ALCANZADA
NO
AJUSTE DE ALTURAS DE OLAS PARA ROMPIENTE
$\Delta < 0$?
LINEA DE COSTA ALCANZADA
AJUSTE DE PROFUNDIDADES POR INFLUENCIA DE MAREAS
$K_{HI} \leftarrow K$
$K_{LO} \leftarrow K$
ESCRIBE RESULTADOS
$K \leftarrow \frac{K_{HI} + K_{LO}}{2}$
ITER = ITER + I
1
ALTO

# IV. DATOS Y METODOS DE ANALISIS

## IV.1 Datos

Los datos para el presente estudio fueron tomados de Coastal Data Collection Program Reports (1983), para los meses de Enero, Febrero Marzo y Abril de 1983. Se seleccionó el área de Mission Bay Ca., ya que en esa zona se presentan mediciones de oleaje tanto en aguas profundas como en aguas someras. Véase (fig. 2).

### IV.1.1 Aguas Profundas

El oleaje es medido en aguas profundas con una boya acelerometro Waverider, ubicada en latitud de 32 45.9° N y Longitud de 117 22.5° W a una profundidad de 168 mts. y una distancia aproximada de 10 kilómetros de la costa.

### IV.1.2 Aguas Someras

El oleaje cercano a la costa es medido con un arreglo de sensores ubicados en latitud de 32 45.4° N y longitud de 117 15.7° W, a una profundidad de 10 mts. A dichas mediciones se referirá como (Mission Bay entrada). De los meses seleccionados (Ene-Abr,1983), se tienen la distribución de alturas significantes y períodos asociados.

IV.1.3 DATOS DE ENTRADA QUE REQUIERE EL MODELO

-Altura media de la ola en aguas profundas en metros. (la altura cambia en cada iteración)

-Período medio de la ola en segundos. (el período cambia en cada iteración)

-Pendiente de la playa en grados. Si se especifica (0.0), entonces las profundidades en metros deberán ser leídas

-Rango medio de mareas en metros. (el rango cambia cada 14 iteraciones)

-Distancia en metros entre los puntos equidistantes de la rejilla, a lo largo de la pendiente de la playa.

-Profundidad en metros, debajo del nivel de aguas tranquilas (SWL) para el cuál las velocidades horizontales de las partículas del agua serán calculadas.

-Número de iteraciones y de puntos de la rejilla.

-Semilla para la generación de números aleatorios.

(cualquier número impar de cinco cifras.)

## IV.2 METODO DE ANALISIS

-De las observaciones de las alturas significantes (Seymour,1983) se procede a la obtención de la altura promedio mediante la relación de Horikawa (1978):

$$\bar{H} = 0.625\ Hsig.$$

-El período medio asociado a las alturas significantes es obtenido por la relación estadística descrita por Horikawa (op.cit.):

$$\bar{T} = Tsig/1.1$$

-La pendiente de la playa se obtiene de los datos de profundidad y de la distancia a la costa, de los sitios de observación.

-De la tabla de mareas de 1983, se obtiene el rango medio para San Diego Ca., región mas cercana a Mission Bay.

-Con los datos anteriores se procede a ejecutar el

programa. Para poder tener las comparaciones adecuadas , se efectuaron 2880 iteraciones, de cada iteración se selecciona la altura a 10 metros y el período correspondiente, promediandose cada 7 iteraciones, y utilizando las relaciones de Horikawa (1978) para la obtención de las alturas significantes y los períodos asociados, a efecto de poder hacer las comparaciones entre los valores observados y los predichos.

-Una vez obtenidos los valores predichos, se procede a graficarlos para observar su distribución y compararlos con los datos observados.

-Se calcularon estadísticas básicas como promedio y desviación estandar de los datos

-Se utiliza la prueba Chi-cuadrada de bondad de ajuste, para determinar el grado coincidente entre los valores observados y predichos.

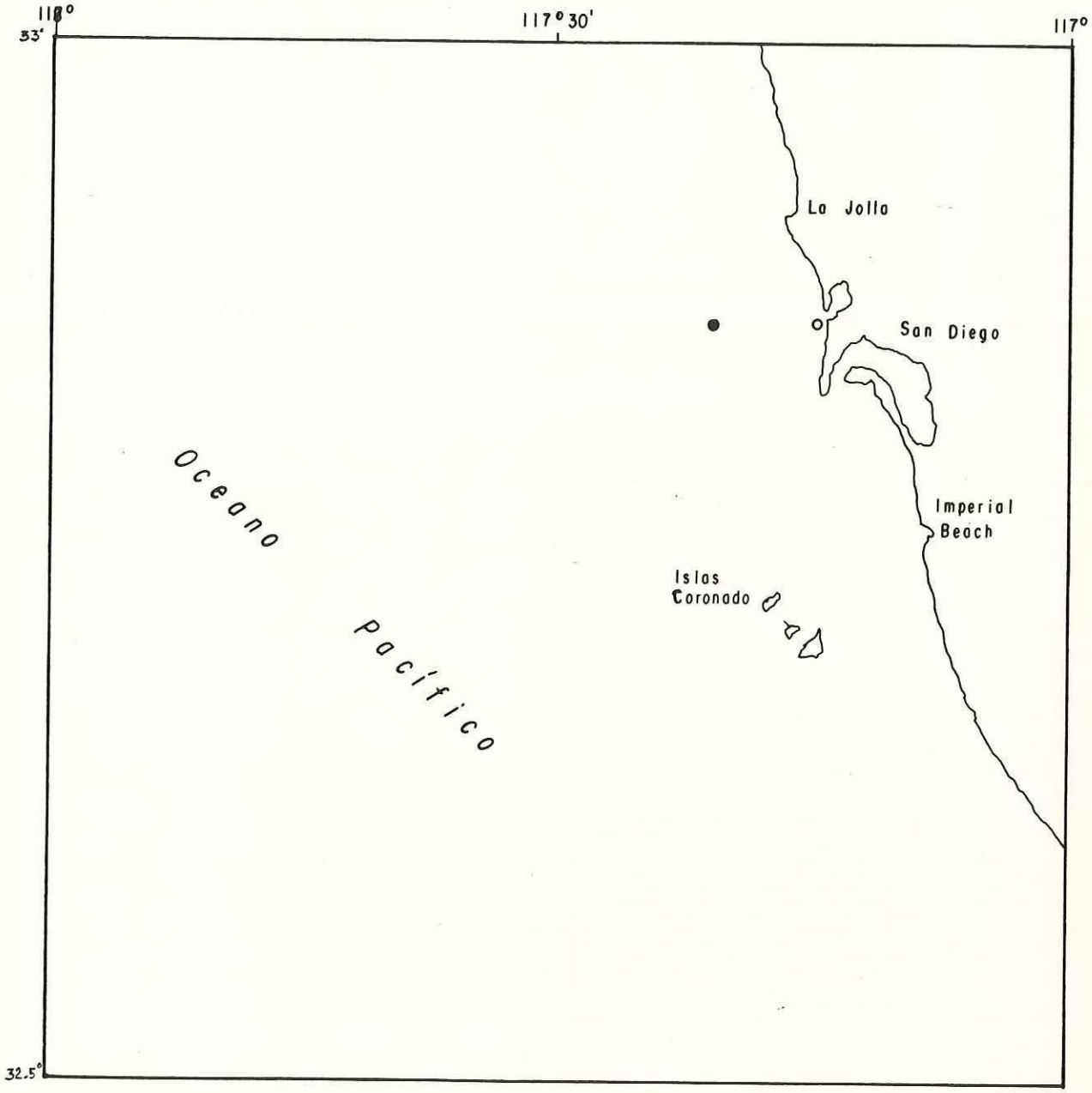



Figura 2. Ubicación de las estaciones para la medición del oleaje en Mission Bay, para los meses de Enero-Mayo de 1983.

- ● Boya en aguas profundas
- o Arreglo de sensores, cerca de la rompiente.

# V. RESULTADOS

En la tabla I se muestran las distribuciones de las alturas y períodos asociados correspondientes a las mediciones efectuadas en la entrada a Mission Bay, mientras que en la tabla II se tienen los valores predichos obtenidos mediante el modelo.

Los resultados de las estadísticas básicas se muestra en la tabla III, teniendo el número de eventos, promedio y desviación estandar para alturas y períodos tanto observados como predichos.

De las distribuciones de las alturas predichas se tiene una media de 1.40 metros con una desviación estandar de 0.57 mts., mientras que las alturas observadas presentan una altura promedio de 1.55 mts., con una desviación estandar de 0.79 metros, denotando gran aproximación los valores predichos, no obstante muestren una menor dispersión que los valores observados, lo cual puede observarse graficamente en las figuras 3 y 4.

En la prueba de bondad de ajuste efectuada con las alturas se obtiene un valor de Chi-cuadrada de 20.27 con 29 grados de libertad, y con un nivel de significancia de 0.05

se encuentra que el valor crítico es de 42.55, por lo que no existen evidencias para concluir que existen diferencias significativasµmientras que para los períodos se tiene un valor de Chi-cuadrada de 12.09 y para un nivel de significancia de 0.05, con 8 grados de libertad se encuentra un valor crítico de 15.50 como puede observarse en la tabla III.

Tabla 1. Distribución de alturas y períodos significantes cerca de la zona de rompiente en Mission Bay, Ca. para los meses de Enero-Abril de 1983. (tomado de Seymour, et. al., 1983).

**TOTAL DE OBSERVACIONES (400).**

| ALTURA SIGNIFICANTE (CMS.) | 22+ | 20 | 17 | 15 | 13 | 11 | 9 | 7 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 450 | | 3 | | | | | | | |
| 435 | | 1 | | | | | | | |
| 420 | | | | | | | | | |
| 405 | | | 1 | | | | | | |
| 390 | | | | | | | | | |
| 375 | | | 2 | | | | 1 | | |
| 360 | | | 1 | | | | | | |
| 345 | | | 2 | | | | | | |
| 330 | | | 1 | | 1 | 1 | | | |
| 315 | | | 1 | 2 | | | | 1 | |
| 300 | | 1 | | 2 | | 1 | | 1 | |
| 285 | | 3 | 3 | | | | | | |
| 270 | | 1 | 4 | 3 | 1 | | 1 | | |
| 255 | | | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | | |
| 240 | | 1 | 5 | 2 | | | 2 | 3 | |
| 225 | | | 4 | 2 | 3 | | 1 | 1 | |
| 210 | | | 9 | 5 | 2 | | | 2 | |
| 195 | 2 | 3 | 5 | 6 | 3 | 1 | 1 | 2 | 1 |
| 180 | | 1 | 4 | 9 | 5 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 165 | | | 5 | 11 | 8 | | | 2 | 3 |
| 150 | | 1 | 6 | 11 | 8 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 135 | | 2 | 5 | 3 | 9 | 5 | 2 | | 2 |
| 120 | | 2 | 3 | 6 | 14 | | 1 | 1 | 5 |
| 105 | | | 5 | 4 | 12 | 1 | 1 | 4 | 2 |
| 90 | | 1 | 2 | 4 | 7 | 2 | 3 | 1 | 4 |
| 75 | | | 1 | 5 | 12 | 11 | 6 | | 2 |
| 60 | 1 | | 3 | 7 | 2 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| 45 | 3 | | 7 | 4 | | 2 | | | |
| 30 | 4 | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | |

PERIODOS (SEG.)

Tabla II. Distribución de las alturas y períodos predichos por el modelo de Lakhan (1981).

TOTAL DE PREDICCIONES (400).

| ALTURA SIGNIFICANTE (CMS.) | 22+20 | 17 | 15 | 13 | 11 | 9 | 7 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 450 | | | | | | | | |
| 435 | | | | | | | | |
| 420 | | | | | | | | |
| 405 | | | | | | | | |
| 390 | | | | | | | | |
| 375 | | | | | | | | |
| 360 | | | | | | | | |
| 345 | | | | | | | | |
| 330 | | | | | | | | |
| 315 | | | | | | | | |
| 300 | | | | | | | | |
| 285 | | 1 | 1 | | | | | |
| 270 | | 3 | 2 | 2 | 1 | | | |
| 255 | | 4 | 2 | 2 | | | | |
| 240 | | 8 | 4 | 2 | 1 | | | |
| 225 | | 5 | 3 | 4 | | 1 | | |
| 210 | | 3 | 7 | 2 | 3 | | | |
| 195 | | 5 | 11 | 3 | 1 | | | |
| 180 | | 9 | 10 | 12 | 3 | | | |
| 165 | | 8 | 9 | 12 | 2 | 3 | 1 | |
| 150 | | 9 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 | |
| 135 | | 6 | 8 | 13 | 5 | 3 | | |
| 120 | | 10 | 8 | 7 | 4 | 4 | 3 | |
| 105 | | 4 | 9 | 9 | 5 | 3 | 3 | |
| 90 | | 2 | 10 | 8 | 4 | 4 | 3 | |
| 75 | | 8 | 6 | 10 | 5 | 6 | 5 | |
| 60 | | | 4 | 5 | 4 | 3 | 2 | |
| 45 | | 2 | 4 | 4 | 2 | 1 | | |
| 30 | | | | 2 | 2 | | | |
| 15 | | | | | | | | |

PERIODOS (SEG.)

Tabla III Superior: estadísticas básicas para los valores observados y predichos. Inferior: valores de Chi-cuadrada obtenidos de la prueba de bondad de ajuste.

| | | NO. DE DATOS | PROMEDIO | DESV.EST. |
|---|---|---|---|---|
| ALTURAS (MTS.) | OBSERVADAS | 400 | 1.55 | 0.79 |
| | PREDICHAS | 400 | 1.40 | 0.57 |
| PERIODOS (SEG) | OBSERVADOS | 400 | 13.58 | 3.96 |
| | PREDICHOS | 400 | 13.55 | 2.78 |

CHI-CUADRADA

| | CALCULADO | CRITICO | GRADOS DE LIB. |
|---|---|---|---|
| ALTURAS | 20.27 | 42.55 | 29 |
| PERIODOS | 12.09 | 15.50 | 8 |

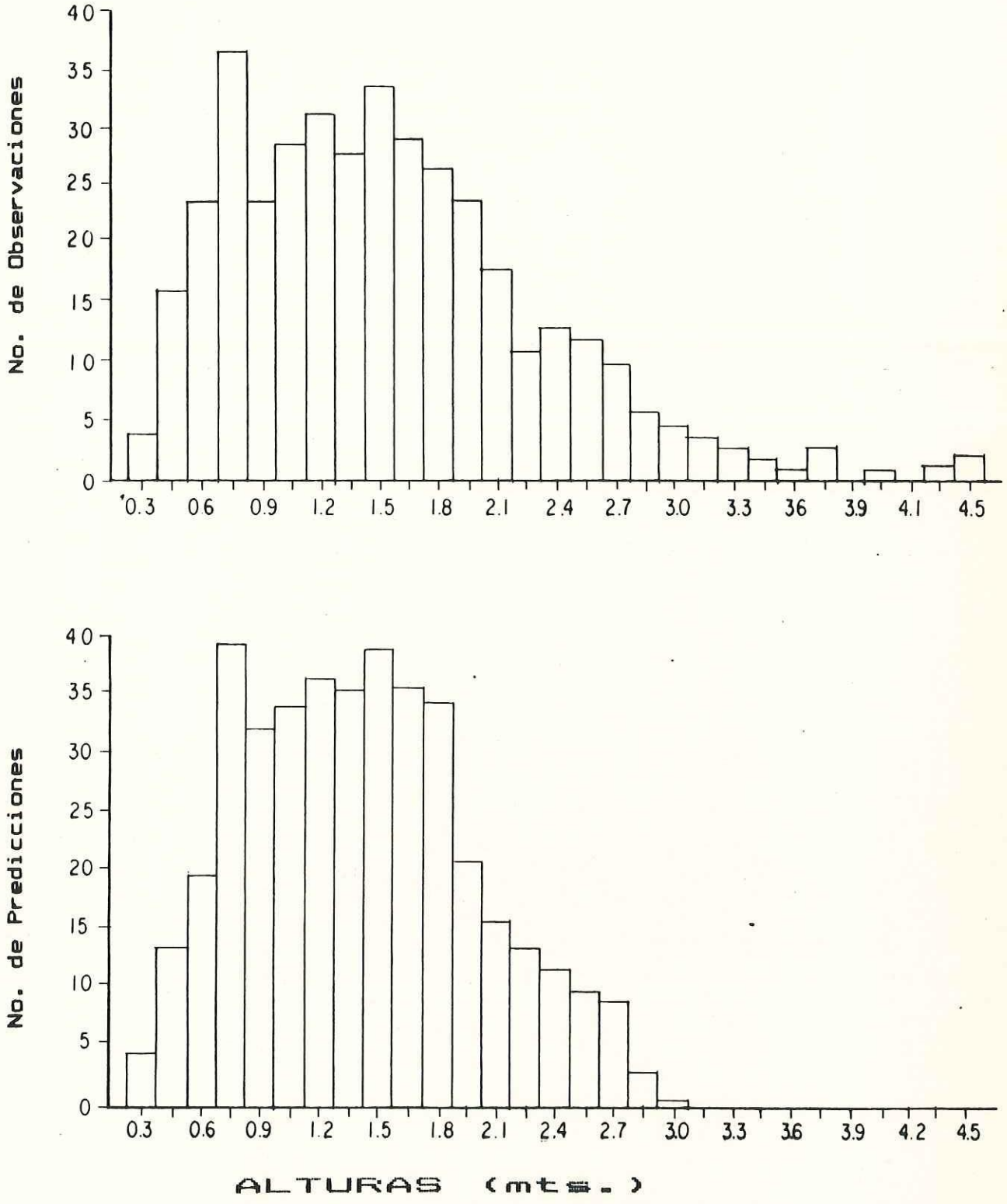



Figura 3. Histograma de ocurrencias de las alturas significantes de olas observadas (Superior), y predichas por el modelo (Inferior).

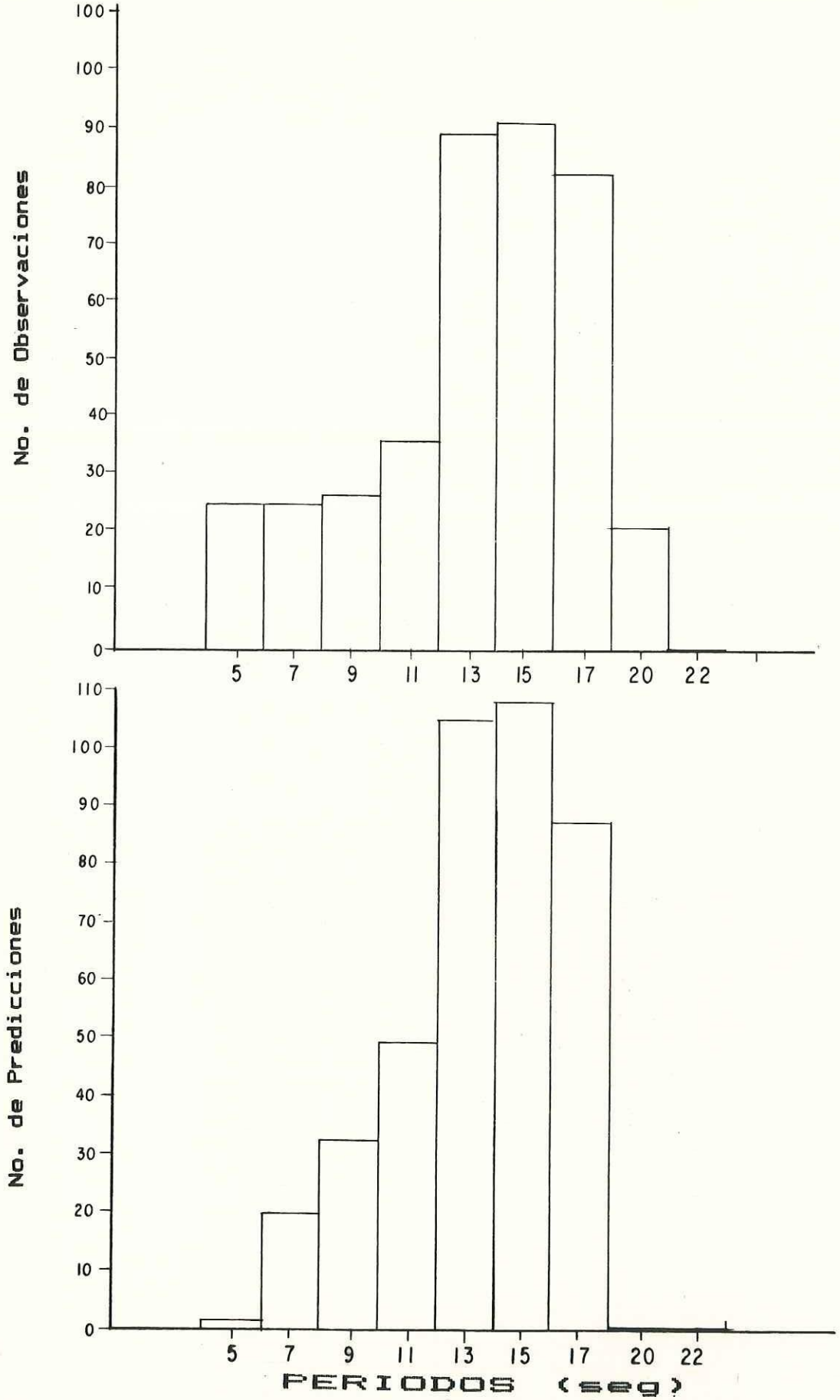



Figura 4. Histograma de ocurrencias de los períodos observados (Superior) y de los predichos por el modelo (Inferior).

# VI. DISCUSION

En los resultados obtenidos se aprecia que los valores de los promedios de las alturas observadas y predichas muestran gran similitud, mientras que los valores de la desviación estandar muestran mayor diferencia, siendo los valores de la dispersión mayor en los datos observados comparado con los predichos, presentándose de forma similar los valores del promedio y desviación estandar para los períodos.

Las diferencias obtenidas, se pueden deber a la manera como es planteado el modelo de simulación de Lakhan (1981), puesto que no considera efectos como refracción, fenómeno que generalmente acompaña al oleaje cuándo se aproxima a la costa. Tampoco se consideran efectos disipativos que influyen en el oleaje como lo es el viento soplando en dirección contraria al sentido de propagación, turbulencia, intercambio de momentum lateral, efectos friccionales, etc.

Cabe considerar que los datos correspondientes a las mediciones efectuadas en Mission Bay corresponden a los primeros cuatro meses de 1983, por lo tanto presentan las características típicas de la estación de invierno o de tormentas para esa zona, afectando consecuentemente las

características de la ola diversos factores como influencia de tormentas, vientos, entre otros, que en el modelo no son considerados.

Es de notarse que el tamaño de la muestra fué de 400 observaciones, por lo que se tuvo que considerar un número similar de predicciones para compararlas de manera adecuada con las observaciones, obteniéndose así las características de las olas predichas para cada hora, teniendo que efectuarse un número considerablemente grande de iteraciones para obtener los valores correspondientes a 4 meses.

# VII. CONCLUSION

En base a lo anteriormente expuesto, se concluye que el modelo de simulación de Lakhan (1981) es apropiado en el caso particular de la predicción efectuada en el presente estudio para la zona de Mission Bay Ca., dada la similitud que muestran los valores de las estadísticas, así como la prueba de bondad de ajuste efectuada, la cual indica que los valores obtenidos mediante el modelo son representativos, y las diferencias no significativas pueden deberse a factores como refracción, fricción, turbulencia, etc. Sin embargo se debe destacar, que considerar todos los factores anteriores llevaría a desarrollar otro modelo, el cual mostraría mayor complejidad, dado el número mayor de factores.

Cabe notar que el modelo de Lakhan (op.cit) consiste en la generación de oleaje mediante las 3 teorías mas aceptadas por los investigadores, y se muestra, según el análisis descrito anteriormente como un mecanismo adecuado cuándo se pretenda simular olas por computadora, sirviendo éstas para evaluar o experimentar en diversos aspectos oceanográficos como: cambios en la linea de costa, transporte litoral, o en problemas de ingeniería portuaria.

# VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda aplicar el modelo de simulación para la región de Ensenada B. C. o para puertos nacionales, dado que actualmente no se efectúan, pudiendo aplicarse en diversos problemas costeros, o complementarse con otros modelos para obtener panoramas mas amplios en cuanto a la aplicación se refiere.

Se puede utilizar el modelo para la obtencion de la ola de diseño estructural o de construcción, siempre y cuando se tengan un número suficientemente grande de observaciones para la calibración, de tal manera que sea representativo.

# IX. BIBLIOGRAFIA

Bishop, Craig T. 1983. Comparison manual wave prediction models. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division. ASCE, Vol. 109. No. 1, Proc. No. 17743, pp.1-17

Coastal Engineering Research Center (1973). Shore Protection Manual. U. S. Army Corps of Engineers, Washington D. C., 3 volumes.

Davidson-Arnott, R.G.D., 1975, Form, movement and sedimentological characteristics of wave formed bars: a study of their role in the nearshore equilibrium. Kouchibouguac Bay, New Brunswick. Doctoral disertation, Department of Geography, University of Toronto, Ontario, 226p.

Falvey, Henry T. 1974. Prediction of wind waves heights. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division. ASCE. Vol.100, No. WW1, Proc. No. 10324, pp.1-12

Holmes, P., 1975. Wave conditions in coastal areas, in

Hails, J., and Carr, A., eds., Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation. Wiley Interscience Publ., London, pp.1-15

Horikawa, K., 1978. Coastal Engineering. John Wiley and Sons. New York-Toronto.

Hudspeth, Robert T., and Chen, Min-Chu. 1979. Digital simulation of nonlinear random waves. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division. ASCE. Vol. 105, No. WW1, Proc. No. 14376 pp.67-85.

Jahnke, E., and Emde, F., 1960. Tables of Higher Functions. Sixth Ed. McGraw Hill Book Co., Inc.,New York, 318p.

Kinsman, B. 1965. Wind Waves. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J.

Lakhan, C. V. 1981. Waves: a fortran IV program on the stochastic simulation of waves in the coastal environment. Computer and Geosciences, Vol. 8, No. 1, pp.45-61.

Le Mehaute, Bernard. 1976. Similitude in coastal

engineering. Journal of the waterways, harbors and coastal Engineering division. ASCE. Vol. 102, No. WW3, Proc. No. 12293, pp.317-335.

Mirham, G. A., 1972. Simulation. Statistical foundations and methodology. Academic Press, New York-London. Vol. 92 in Mathematics in science and engineering.

Naheer, E. 1978. Laboratory experiments with solitary wave. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division. ASCE. Vol. 104, No. WW4, Proc. No. 14189, pp.421-436.

Noda, Edward K., 1971. Fourier analysis of transient wave system. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division. ASCE. Vol. 97, No. WW4, Proc. No. 8535, pp.663-670.

Noda, Edward K., 1972. Equilibrium beach profile scale-model relationship. Journal of the waterways, harbors and coastal engineering division. ASCE. Vol. 98, No. WW4, Proc. No. 9367, pp.511-528.

Saville, T., 1957. Scale effects in two dimensional beach studies. Transactions of the 7th Meeting, Internatl.

Ass. Hydr. Res. Lisbon.

Seymour, R. J., Thomas, J. O., Castel, D., Woods, A. E., Sessions, M. H., 1983. Coastal Data Information Program. Eight Anual Report. Jan. 1983 through Dec. 1983. Published by State of California Resources Agency. Department of Boating and Waterways. Sacramento, Ca.

Stafford R. P., and CH. B. Chesnutt., 1977. Laboratory Effects in beach studies: Procedures used in 10 movable-bed experiments. Vol. I, Misc. Rep. No. 77-7., U. S. Army Corps of Engrs. C.E.R.C. Fort Belvoir, Va., 22060.

Svendsen, I. A., and Hansen, J. B., 1977. The wave height variation for regular waves in shoaling water, Coastal Engineering, V.1, pp.261-284.

Wiegel, R. L., 1964. Oceanographical Engineering. Prentice-Hall Inc., Englewoods Cliffs, New Jersey, U.S.A.