

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



ANÁLISIS DIRECCIONAL DE LOS MODOS
RESONANTES PARA LAS BAHÍAS DE
MANZANILLO-SANTIAGO, COLIMA, MÉXICO.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANOLOGO
PRESENTA:

Maria Reyna Barradas Argüelles

ENSENADA, B. C. AGOSTO DE 2001

RESUMEN

Cualquier cuerpo de agua semicerrado es susceptible a perturbaciones provocadas por ondas incidentes. Parte de la energía de estas ondas es reflejada por las paredes dependiendo de la geometría de la bahía o puerto, aumentando su amplitud y ocasionando daños a estructuras y embarcaciones. El estudio o la predicción de estos procesos es complejo debido a las características geométricas e hidrográficas particulares de cada bahía o puerto.

Se han desarrollado diversos modelos para el estudio de la resonancia en puertos y bahías, basados en la ecuación de Helmholtz. Negrete, et al, (2000) propusieron estudiar los modos resonantes de costas con forma arbitraria, adecuando un modelo integral que fue desarrollado para el estudio del esparcimiento de luz. Esta propuesta surgió de la analogía matemática del problema de esparcimiento de luz por cavidades y el problema de bahías de forma arbitraria cuando las ondas llegan a la entrada. El modelo se aplicó a la costa de Manzanillo, Colima, considerando diversos ángulos de incidencia de las ondas. Se encontraron longitudes de onda que provocan resonancia y se analizó su comportamiento en 5 puntos dentro de las bahías. Se observó que la respuesta de las bahías varía con el ángulo de incidencia de las ondas.

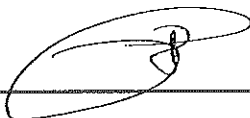
**ANÁLISIS DIRECCIONAL DE LOS MODOS RESONANTES PARA LAS
BAHIAS DE MANZANILLO-SANTIAGO,
COLIMA, MÉXICO.**

T E S I S

que presenta:

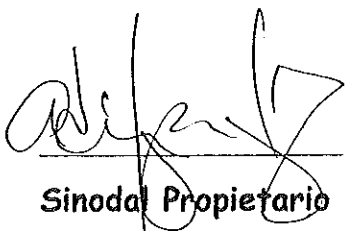
MARIA REYNA BARRADAS ARGÜELLES

Aprobada por:



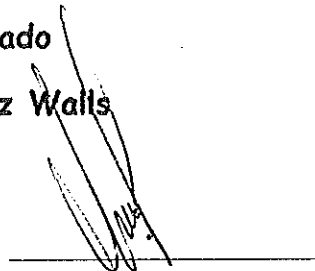
Presidente del Jurado

M.C. Rafael Hernández Walls



Sinodal Propietario

Dr. Adán Mejía Trejo



Sinodal Propietario

Dr. Pedro Negrete Regagnón

Ensenada, Baja California, Agosto 2001

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi director de tesis, M.C. Rafael Hernández Walls, por la ayuda, dedicación e infinita paciencia en la realización de este trabajo.

Al Dr. Adán Mejía Trejo por su colaboración y apoyo, así como las sugerencias para mejorar esta tesis.

Al Dr. Pedro Negrete Regagnón por facilitarme los programas computacionales para realizar este trabajo.

Agradezco a mis padres, Arq. Reyes Barradas González y Maria Teresa Argüelles de Barradas por el amor y el apoyo incondicional durante todos estos años y siempre.

Quiero agradecer a mi hijo Pablo Enrique por ser mi mayor motivación y mi compañero inseparable durante toda la carrera.

A mi esposo, Fernando Marván, por su apoyo y ayuda no solo con este trabajo. A mis hijas, Mónica e Isabel por las risas y abrazos de todos los días.

Especialmente agradezco a mis profesores y amigos, por que sin su ayuda y apoyo no habría terminado mis estudios.

INDICE

1. Introducción	1
1.1 Resonancia	2
1.2 Área de estudio	3
1.3 Tsunamis	5
2. Antecedentes	8
3. Objetivo	13
4. Metodología	14
4.1 Resonancia	14
4.2 Parametrización de la línea de costa	21
5. Presentación y discusión de resultados	26
6. Conclusiones	59
7. Referencias	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio. Bahías de Manzanillo y Santiago, México	4
Figura 2. Origen de tsunamis lejanos registrados en la estación mareográfica de Manzanillo, Colima, desde 1932.	7
Figura 3. Geometría del problema	20
Figura 4. Parametrización de la línea de costa	22
Figura 5. Ángulos de incidencia procesados y ubicación de los puntos A, B, C, D y E	28
Figura 6. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de 90°	29
Figura 7. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de 75°	30
Figura 8. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de 60°	31
Figura 9. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de 45°	32
Figura 10. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de 30°	33
Figura 11. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de 15°	34
Figura 12. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de 0°	35
Figura 13. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de -15°	36
Figura 14. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de -30°	37
Figura 15. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de -45°	38
Figura 16. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de -60°	39
Figura 17. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de -75°	40
Figura 18. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia de -90°	41

1. INTRODUCCIÓN

Cualquier cuerpo de agua conectado al mar por una o más entradas es susceptible a forzamientos externos que producen oscilaciones en el interior. Parte de las ondas que inciden en la costa entran a la bahía o puerto, son refractadas y difractadas de acuerdo a la geometría de esta. Una parte de la energía en el interior se disipa mediante tres mecanismos: el rompimiento de las ondas dentro de la cuenca, el efecto de fricción en el fondo y la absorción en la línea de costa. Sin embargo, las ondas son parcialmente reflejadas por los límites de la cuenca, y cuando llegan a la entrada, son nuevamente reflejadas por forzamientos incidentes. Esta energía atrapada intensifica la agitación dentro de la cuenca provocando en ocasiones resonancia y con esto un aumento en la amplitud de las ondas (Hwang y Tuck, 1970). Las perturbaciones generadas pueden ocasionar problemas a embarcaciones ancladas, daños a las estructuras de protección, o bien dificultar la navegación dentro y fuera de la cuenca, por lo que es de gran importancia estudiar y predecir el comportamiento de un cuerpo de agua en la planeación y desarrollo portuario (Su, 1973).

1.1 Resonancia

Cuando a un cuerpo capaz de oscilar se le imparte una fuerza o impulso periódico con una frecuencia igual a la frecuencia natural del cuerpo, la amplitud de las oscilaciones aumenta y se hace infinita si no existe fricción. A este fenómeno se le conoce como resonancia (Sears, 1967).

La amplitud máxima de las olas dentro de una bahía puede verse afectada por la resonancia. Para ondas incidentes de determinados periodos, una bahía actúa como un amplificador (Raichlen en Ippen, 1966). El estudio o la predicción de estos procesos es complejo debido a las características geométricas e hidrográficas particulares de cada bahía o puerto. Las ondas son inducidas y afectadas por diferentes factores como viento, corrientes, topografía, etc., y la forma irregular del cuerpo de agua provoca que se reflejen en distintas direcciones (Hwang y Tuck, 1970). Un caso de gran interés es el de las oscilaciones inducidas por tsunamis, ondas largas con periodos que van de minutos a horas, y longitudes que llegan a cientos de kilómetros. Dependiendo de la duración del tsunami, las oscilaciones dentro de la bahía o puerto pueden durar horas o días, ocasionando grandes daños, no solo a las estructuras y embarcaciones, sino también a los asentamientos urbanos alrededor (Mei, 1999).

1.2 Área de estudio

Las Bahías de Manzanillo y Santiago, en el estado de Colima, se localizan entre los 19° 01' y 19° 07' de latitud Norte, y entre los 104° 18' y 104° 26' de longitud Oeste (Figura 1). Este puerto natural, en uso desde tiempos prehispánicos ha sido de gran importancia comercial y turística debido a su capacidad en infraestructura, servicios, terminales, instalaciones y equipo portuario especializado (Infoport, 1980).

La Bahía de Manzanillo se abre hacia el Suroeste, y presenta comunicación con dos cuerpos de agua interiores. El primero es la Laguna de San Pedrito, dentro de la cual se ubica el Puerto de San Pedrito, comunicado con la bahía por un canal de 200 m. de longitud. El segundo es la Laguna de Cuyutlán, productora de sal principalmente.

La Bahía de Santiago, abierta hacia el Sur y limitada por Punta Santiago y Punta Juluapán, presenta una mayor concavidad que la de Manzanillo, y está comunicada con la Laguna de Juluapán mediante una boca muy estrecha (González-Chavarin, 1989).

En general, el oleaje que reciben las bahías se comporta en forma estacional. Las olas predominantes provienen del Oeste con alturas menores

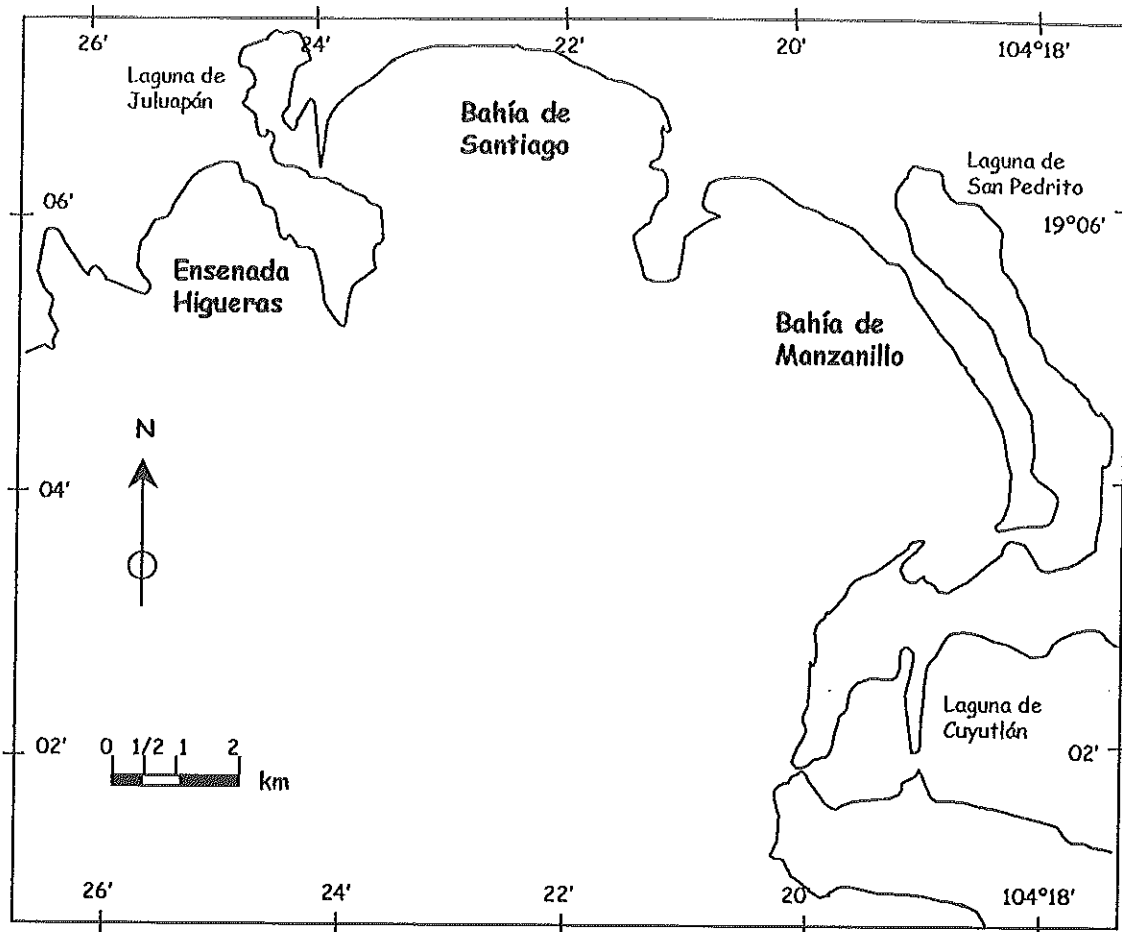


Figura 1. Area de estudio, Bahías de Manzanillo y Santiago (González-Chavarín, 1989).

a 2.75 m. En invierno se observan olas que llegan del Noroeste y Nor-Noroeste con alturas mayores a 2.75 m. En verano se presentan olas del Sur y del Sureste asociadas con ciclones hasta de 9 m. en mar afuera (Galicia-Pérez, 1987). La ubicación y geomorfología de estas bahías hacen la zona susceptible a los efectos de tsunamis locales, regionales y lejanos.

1.3 Tsunamis

La gran mayoría de los tsunamis se originan por sismos que ocurren en el contorno costero del Océano Pacífico, en las zonas de hundimiento de los bordes de las placas tectónicas. El movimiento inicial que provoca la generación de un tsunami es en la mayoría de los casos una dislocación vertical de la corteza terrestre en el fondo del océano, ocasionada por un sismo. El hipocentro de este, o una parte del área de ruptura debe estar bajo el lecho marino a una profundidad menor a 60 Km. y la falla debe tener movimiento vertical, no solamente lateral. El potencial destructivo de los tsunamis radica en su tamaño y velocidad. En mar abierto viajan a cientos de kilómetros por hora, con periodos de 15 a 60 minutos y alturas de apenas unos centímetros, lo cual los hace imperceptibles desde embarcaciones o aviones, pero al aproximarse a la costa, disminuye la profundidad, y por lo

tanto disminuye su velocidad y longitud, concentrándose la energía y adquiriendo alturas de decenas de metros (Farreras y Domínguez 1997).

La costa occidental de México está expuesta al arribo de tsunamis de origen lejano, los cuales representan un bajo riesgo, ya que no ocasionan grandes daños en la costa. Sin embargo, para México un riesgo mayor son los tsunamis generados por sismos en la Fosa Mesoamericana. Los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas están expuestos al arribo de estos tsunamis de origen local (Farreras, 1999). En los últimos 50 años se han registrado 12 tsunamis en la costa de Colima. Cinco han sido de origen local y siete de origen lejano (Figura 2).

La interacción de los tsunamis con la costa es muy compleja. La altura que alcanzan en la costa depende de las características de las ondas incidentes, la batimetría y la configuración del contorno de la costa. Todos estos factores provocan fenómenos como la refracción, reflexión y atrapamiento de sus ondas en bahías, golfos, lagunas costeras, deltas, etc. (Farreras, 1999). Mediante el análisis de los registros mareográficos, se ha inferido la ocurrencia de amplificación resonante de los tsunamis en bahías semi-cerradas como la de Manzanillo (Farreras y Domínguez, 1996).

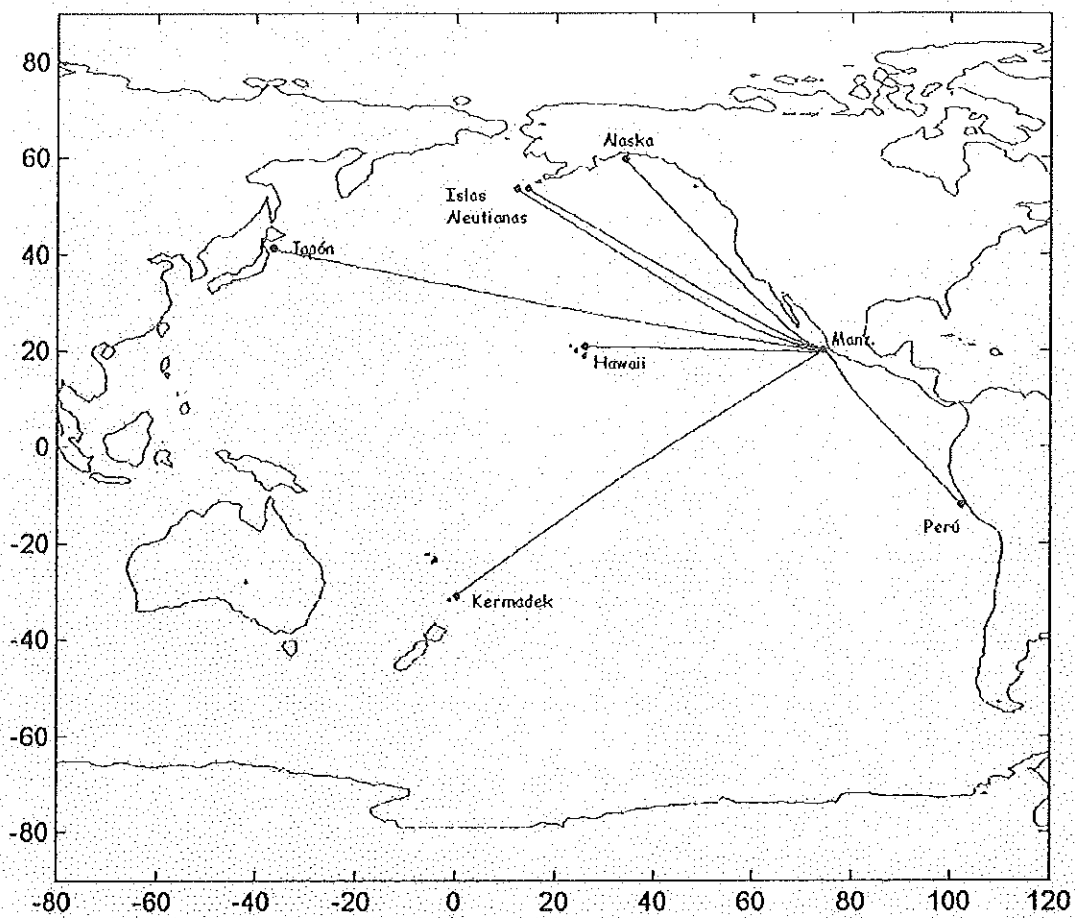


Figura 2. Origen de tsunamis lejanos registrados en la estación mareográfica de Manzanillo desde 1950

2. ANTECEDENTES

El estudio sobre varios aspectos de la resonancia en bahías o puertos comenzó hace aproximadamente 50 años. Se han desarrollado diversas teorías basadas en la ecuación de Helmholtz, que es derivada de las ecuaciones de aguas someras con profundidad constante. Mc Nown (1952), citado por Lee (1971) investigó la respuesta de una bahía circular asumiendo que la cresta de una onda estacionaria ocurría en la entrada cuando la bahía estaba en resonancia. Sin embargo, en la resonancia estas suposiciones llevan a condiciones de frontera idénticas a las de una cuenca cerrada. Esta condición en la entrada es insatisfactoria, ya que la pendiente de la superficie en la entrada debe ser parte de la solución, no suponerse con anterioridad (Lee, 1971).

Miles y Munk (1961) analizaron una bahía rectangular conectada directamente a mar abierto. Esto fue una aportación importante, ya que incluyó el efecto de la radiación de la onda de la entrada de la bahía hacia afuera. Así, se limitó la amplitud de onda máxima en la bahía a un valor finito, aún en resonancia. También observaron que la disminución de la entrada del cuerpo de agua provocaba un aumento en las oscilaciones. A esto se le llamó la Paradoja del Puerto. Esta teoría estaba limitada a bahías de entrada pequeñas y forma rectangular angosta y poco después, Wilson

(1962) y Le Méhauté (1962) citados por Gerber (1986) concluyeron que la paradoja del puerto es significativa solo para los modos resonantes más bajos, y que la incorporación de la disipación volvería inválida la paradoja.

Huang y Tuck (1970) y Lee (1971), obtuvieron diferentes ecuaciones integrales derivadas de la ecuación de Helmholtz, resolviéndolas en forma numérica. Carrier, Shaw y Miyata (1971), emplearon un método de aproximación para trabajar con puertos de entrada angosta y obtuvieron buenos resultados. Miles (1971) utilizó un método equivalente con circuitos para tratar los puertos de entrada angosta (Su, 1973).

Lee y Raichlen (1971) extendieron el método numérico de Lee para tratar dos o más cuencas conectadas. Su (1973) obtuvo una solución asintótica para un puerto de entrada pequeña comparada con la longitud de la onda incidente, y para dos o más bahías conectadas.

En otros estudios se han tomado en cuenta otros factores como la disipación de la energía. Murakami (1976) desarrolló una teoría para una bahía rectangular, tomando en cuenta la disipación de la energía en la entrada de la bahía. La disipación fue obtenida experimentalmente en un laboratorio. Gerber (1986) extendió el modelo desarrollado por Lee (1971) para incluir los efectos de separación de flujos y disipación. Obtuvo

mediciones en un puerto y las comparó con la predicción numérica obteniendo buenos resultados.

Chen (1986), citado por Weiwen (1991), incorporó en un modelo mixto, integral y de elementos finitos, la disipación de energía por fricción en el fondo. Weiwen (1991) le agregó a este modelo el efecto de absorción en la frontera.

Recientemente, Lee (1998) aplicó un modelo computacional a un puerto irregular empleando un método de elementos finitos y abarcando diversos factores en la frontera, como disipación en la entrada por separación de flujos y fricción, fronteras reflejante, parcialmente reflejante y permeable.

Por otro lado, Negrete et al. (2000) propusieron estudiar los modos resonantes de costas con forma arbitraria, adecuando un modelo integral que fue desarrollado para el estudio de esparcimiento de luz por superficies reentrantes. Esta propuesta surgió de la analogía matemática del problema de esparcimiento de luz por cavidades y el problema de bahías de forma arbitraria cuando las ondas llegan a la entrada.

La teoría de esparcimiento de la luz por superficies rugosas ha estado avanzando rápidamente. La teoría rigurosa (Maradudin, et al, 1990),

ha mostrado trabajar adecuadamente para cualquier superficie y aún cuando tiene ciertas limitaciones computacionales, estos modelos pueden ser utilizados para casos generales. Este es el caso del modelo desarrollado por Mendoza y Méndez (1997) para estudiar el esparcimiento de luz por superficies reentrantes. Las ecuaciones que se manejan son similares a las que se utilizan en el caso de aguas someras, cuando únicamente se considera la polarización p en la onda electromagnética incidente. Basándose en esto Negrete et al. (2000) propusieron una metodología para calcular el campo cercano y con esto el factor de amplificación. Los resultados obtenidos fueron acordes a teorías y experimentos reportados con anterioridad.

El presente trabajo propone aplicar el modelo integral de Mendoza y Méndez (1997) y seguir la metodología desarrollada por Negrete et al. (2000) para estudiar la resonancia en la costa de Manzanillo, Colima, para encontrar las frecuencias que provocan dicho fenómeno y los lugares donde el factor amplificante es de cuidado. Así mismo, se determinará si el factor de la direccionalidad de las ondas incidentes hace cambiar la respuesta de las bahías.

Como se mencionó en el Capítulo 1, las Bahías de Manzanillo y Santiago, por su forma y ubicación son susceptibles a los efectos de tsunamis de origen local, regional y lejano. Farreras, (1996 y 1999) reportó

el arribo de tsunamis a esa zona desde 1932. Borrero, et al, (1997), reportaron alturas de olas que se presentaron en distintas zonas de las bahías durante el tsunami de Octubre de 1995.

3. OBJETIVO

Analizar los modos resonantes para las bahías de Manzanillo - Santiago, tomando en cuenta la direccionalidad de las ondas incidentes, utilizando un modelo desarrollado para el estudio del esparcimiento de luz por superficies rugosas reentrantes y polarización p.

4. METODOLOGÍA

Se utilizará el modelo integral propuesto por Mendoza y Méndez (1997) para el estudio de esparcimiento de luz por superficies reentrantes y se aplicará al problema de costas con forma arbitraria para estudiar los modos resonantes, aplicando la metodología propuesta por Negrete et al. (2000) para calcular el campo cercano y con esto calcular el factor de amplificación.

4.1 Resonancia

Se trabaja con las ecuaciones de aguas someras y la ecuación de continuidad linealizadas y con profundidad constante

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + h \nabla_H \vec{u} = 0 \quad , \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -g \nabla_H \zeta \quad , \quad (2)$$

donde ζ es la elevación, \vec{u} es la velocidad, h la profundidad constante y g es la gravedad.

Derivando con respecto al tiempo la primera ecuación tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial \zeta}{\partial t} + h \nabla_H \vec{u} \right] = 0 \quad , \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + h \nabla_H \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 \quad , \quad (4)$$

y sustituyendo (2) en (4) tenemos:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} - gh \nabla_H^2 \zeta = 0 \quad . \quad (5)$$

Esto da como resultado una ecuación de onda con celeridad $c = \sqrt{gh}$. Ahora, suponemos que tanto ζ como \vec{u} tienen un comportamiento del tipo onda dado por:

$$\zeta(x, y, t) = \varphi(x, y) e^{-i\omega t} \quad (6)$$

$$\text{y} \quad \vec{u}(x, y, t) = \vec{v}(x, y) e^{-i\omega t} \quad (7)$$

donde φ es la distribución espacial de las alturas ζ , y ω es la frecuencia angular.

Aplicando estas ecuaciones (6 y 7) a (2 y 5) tenemos:

$$\vec{v} = \frac{-ig}{\omega} \nabla_H \varphi \quad (8)$$

$$\text{y} \quad \nabla_H^2 \varphi + \frac{\omega^2}{gh} \varphi = 0 \quad , \quad (9)$$

donde (9) es la ecuación de Helmholtz, siendo \vec{v} la distribución espacial de las velocidades

La condición de frontera para una pared que refleje completamente deberá ser de que el flujo normal a la pared sea cero es decir:

$$\vec{v} \cdot \hat{n} = 0 \quad (10)$$

con el vector unitario normal a la costa, \hat{n} , positivo hacia el mar.

Sustituyendo (8) en (10) tenemos:

$$-\frac{g}{\omega} \nabla_H \varphi \cdot \hat{n} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \hat{n}} = 0 \quad (11)$$

donde (11) representa la condición de frontera del campo espacial de las elevaciones.

Por otro lado, el teorema de divergencia (Zill, 1987) está dado por:

$$\int_V \nabla \cdot F dv = \int_{\epsilon} F \cdot \hat{n} dv \quad (12)$$

donde la primera es una integral de volumen y la segunda, una integral de superficie.

Es conveniente recordar la ecuación de Helmholtz, obtenida con anterioridad, dada por: (13)

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = 0$$

y la ecuación de Green dada por:

$$\nabla^2 G + k^2 G = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (14)$$

que representa una fuente puntual con origen (x_0, y_0) donde G es la función de Green asociada.

Sustituyendo F en el teorema por los campos $\nabla \varphi$ y ∇G , obtenemos las siguientes dos ecuaciones:

$$\int_v \nabla^2 \varphi dv = \int_\varepsilon \nabla \varphi \cdot \hat{n} d\varepsilon \quad (15)$$

$$\int_v \nabla^2 G dv = \int_\varepsilon \nabla G \cdot \hat{n} d\varepsilon \quad (16)$$

Se puede despejar de la ecuación (13), $\nabla^2 \varphi = -k^2 \varphi$ y de la ecuación (14), $\nabla^2 G = -k^2 G + \delta(x - x_0, y - y_0)$, entonces (15) y (16) se pueden reescribir como:

$$\int_v -k^2 \varphi dv = \int_\varepsilon \nabla \varphi \bullet \hat{n} d\varepsilon \quad \text{y} \quad (17)$$

$$\int_v [-k^2 G + \delta(x - x_0, y - y_0)] dv = \int_\varepsilon \nabla G \bullet \hat{n} d\varepsilon \quad , \quad (18)$$

y multiplicando (17) y (18) por G y φ respectivamente, obtenemos:

$$\int_v -k^2 G \varphi dv = \int_\varepsilon G \nabla \varphi \bullet \hat{n} d\varepsilon \quad (19)$$

$$\int_v [-k^2 G \varphi + \delta(x - x_0, y - y_0) \varphi] dv = \int_\varepsilon \varphi \nabla G \bullet \hat{n} d\varepsilon \quad (20)$$

Restando (20) de (19),

$$\int_v \delta(x - x_0, y - y_0) \varphi dv = \int_\varepsilon (\varphi \nabla G) \bullet \hat{n} d\varepsilon + (-G \nabla \varphi) \bullet \hat{n} d\varepsilon \quad ,$$

y si
$$\int_v \delta(x - x_0, y - y_0) \varphi dv = \varphi(x_0, y_0) \quad ,$$

entonces, el campo total está dado por

$$\varphi(x_0, y_0) = \int_{\varepsilon_i} (\varphi \nabla G) \cdot \hat{n} d\varepsilon + \int_{\varepsilon_f} (G \nabla \varphi) \cdot \hat{n} d\varepsilon \quad (21)$$

El segundo término de esta suma se refiere al campo incidente:

$$\varphi(x_0, y_0) = \varphi_{inc}(x_0, y_0) + \int_{\varepsilon_i} (\varphi \nabla G) \cdot \hat{n} d\varepsilon \quad , \text{ o bien:}$$

$$\varphi(r) = \varphi_{inc}(r) + \int \varphi(r') \frac{\partial}{\partial n} G(r, r') dr' \quad , \quad (22)$$

donde $r = (x_0, y_0)$. En la Figura 3 se muestra la geometría del problema.

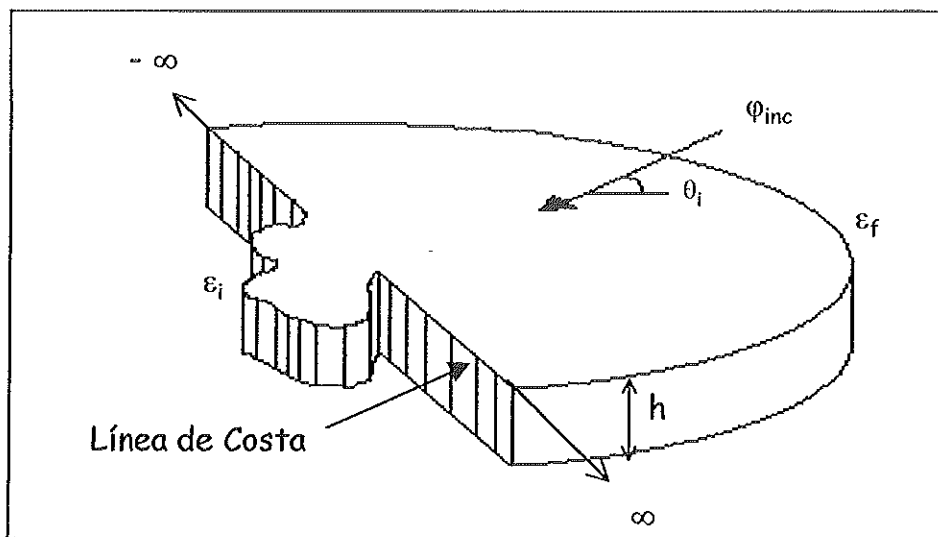


Figura 3. Geometría del problema, $h = cte.$

4.2 Parametrización de la línea de costa

Las ecuaciones del problema de esparcimiento en términos de un perfil parametrizado son adecuadas para discretizar superficies rugosas, principalmente aquellas con pendientes pronunciadas. Para analizar perfiles reentrantes es necesario modificar las ecuaciones desarrolladas anteriormente. Esta modificación fue propuesta por Mendoza y Méndez (1997).

Se asume que la superficie tiene una longitud finita, y está representada por la curva Γ . El objetivo es describir el perfil de la superficie, en este caso la línea de costa, en términos de un parámetro que puede ser la longitud del arco a lo largo de la curva Γ , de esta forma se pueden expresar las ecuaciones básicas del esparcimiento de las ondas con polarización p en términos de este parámetro.

Siendo Γ la trayectoria de un punto a otro, con un número finito de puntos singulares, es posible encontrar un parámetro t tal que la curva Γ pueda ser descrita por una función \vec{R} de este parámetro. En este caso es conveniente que el parámetro t sea igual a la longitud de la curva s medida desde el primer punto (Figura 4).

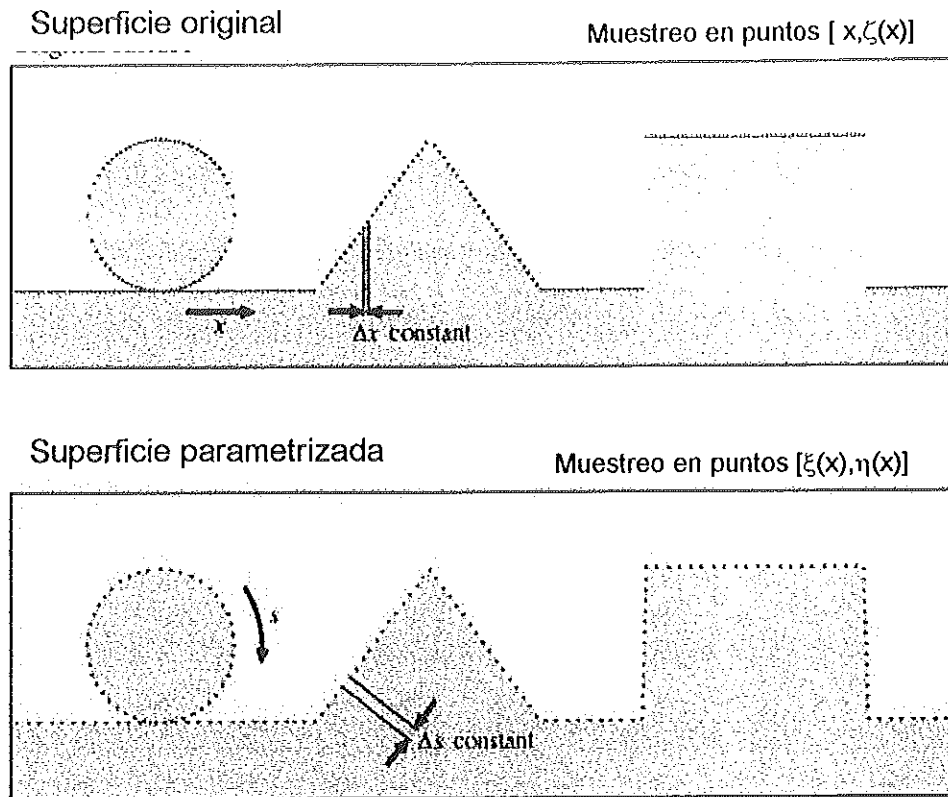


Figura 4. Parametrización de la línea de costa

El perfil de la superficie, puede ser representado entonces por la función $\bar{R}(s)$, tal que el intervalo I_T sea $[0, L_T]$, donde L_T representa la longitud total de la curva.

$$L_T = \int_T \delta s \quad (23)$$

Se asume que la primera y segunda derivadas de la función $\bar{R}(s)$ existen para cada punto regular de Γ . Las ecuaciones de esparcimiento no

están bien definidas en los puntos singulares de la curva Γ , pero no contribuyen a la solución, por lo que no son tomadas en cuenta (Mendoza y Méndez 1997). Es conveniente expresar las dos componentes, (ξ, η) de la función $\vec{R}(s)$, como funciones del parámetro s . Entonces, en cada punto regular del intervalo I'_τ , se puede escribir

$$\vec{R}(s) = [\xi(s), \eta(s)] \quad . \quad (24)$$

Las dos funciones paramétricas, $\xi(s)$ y $\eta(s)$ son de gran importancia, ya que dado un perfil determinado, siempre es posible encontrar ya sea analítica o numéricamente, las funciones $\xi(s)$ y $\eta(s)$, así como su primera y segunda derivada en cada punto de intervalo I'_τ , partiendo de la relación

$$(ds)^2 = (d\xi)^2 + (d\eta)^2 \quad (25)$$

En cada subintervalo I_j , las funciones $\xi(s)$ y $\eta(s)$ pueden encontrarse invirtiendo las funciones $s(\xi)$ y $s(\eta)$, dadas por:

$$s(\xi) = s(\xi_j) + \int_{\xi_j}^{\xi} \sqrt{1 + \left(\frac{d\eta(\xi)}{d\xi} \right)^2} d\xi \quad (26)$$

$$y \quad s(\eta) = s(\eta_j) + \int_{\eta_j}^{\eta} \sqrt{1 + \left(\frac{d\xi(\eta)}{d\eta} \right)^2} d\eta \quad (27)$$

La normal y la derivada normal como funciones del parámetro s están dadas por:

$$n(\vec{R}) = (-\eta'(s), \xi'(s)) \quad (28)$$

$$y \quad \hat{n} \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{r}} \Big|_{\vec{r} = \vec{R}} = \left(-\eta'(s) \frac{\partial}{\partial \xi(s)} + \xi'(s) \frac{\partial}{\partial \eta(s)} \right) \quad (29)$$

Entonces, es posible escribir en términos de $\xi(s)$ y $\eta(s)$, la ecuación (22):

$$\begin{aligned} \varphi(s') = & \varphi(s')_{inc} + \lim_{v \rightarrow 0} \int_0^{L_T} \left[-\eta'(s) \frac{\partial}{\partial \xi(s)} + \xi'(s) \frac{\partial}{\partial \eta(s)} \right] \\ & \times H_0^{(1)} \left(\frac{\omega}{c} \sqrt{(\xi'(s) - \xi(s) - v\eta'(s'))^2 + (\eta'(s) - \eta(s) - v\xi'(s'))^2} \right) \varphi(s) ds \end{aligned} \quad (30)$$

donde se utilizó la función de Hankel de primera clase y orden cero $H_0^{(1)}$ como la función de Green que satisface la ecuación de Helmholtz para la geometría dada.

La parametrización de cada segmento comienza en un punto inicial de el perfil, evaluando la longitud del arco a lo largo de la superficie en sentido de las manecillas del reloj. Por convención, la parte localizada a la derecha de esta dirección de integración es considerada tierra, y la parte localizada a la izquierda corresponde al mar. Para poder analizar el perfil de la costa de las Bahías de Manzanillo y Santiago, se giró el mapa hasta quedar la costa del lado derecho de la dirección de integración.

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El modelo se aplicó a la costa digitalizada de Manzanillo, obtenida mediante el programa Coastline Extractor (NOAA, 1994). Se analizaron 40 números de onda de 2.5 a 100, cada 2.5. Estos números de onda están normalizados con un valor arbitrario a , correspondiente a 107.16 km. En la Tabla 1 se muestran las longitudes de onda que corresponden a dichos números de onda ka . Estas longitudes de onda abarcan un amplio rango de forzamientos en la entrada de la bahía, incluyendo tsunamis de origen lejano y regional.

Para analizar la respuesta de las bahías a ondas provenientes de distintas direcciones, se analizaron 13 ángulos de incidencia θ_i que se muestran en la Figura 5. La amplificación en las bahías para cada ángulo y número de onda se graficó en las Figuras 6 a 18. Se puede observar que el valor máximo de amplificación que se graficó es 4. Los valores mayores se igualaron a 4, con el fin de lograr una mejor resolución de los valores menores y visualizar el comportamiento de las bahías.

Tabla 1. Números de onda procesados y longitudes de onda correspondientes

ka	λ (km)	ka	λ (km)	ka	λ (km)	ka	λ (km)
2.5	269.32	27.5	24.49	52.5	12.82	77.5	8.68
5	134.65	30	22.44	55	12.24	80	8.41
7.5	89.78	32.5	20.71	57.5	11.71	82.5	8.15
10	67.32	35	19.23	60	11.22	85	7.92
12.5	53.87	37.5	17.96	62.5	10.77	87.5	7.69
15	44.89	40	16.83	65	10.35	90	7.48
15.5	38.47	42.5	15.84	67.5	9.96	92.5	7.28
20	33.66	45	14.96	70	9.61	95	7.08
22.5	29.92	47.5	14.18	72.5	9.28	97.5	6.90
25	26.93	50	13.46	75	8.97	100	6.73

Se ubicaron 5 puntos, dos en la Bahía de Manzanillo, dos en la Bahía de Santiago y uno en la Ensenada Higueras para evaluar la amplificación en cada bahía (Figura 5). Se graficó el factor de amplificación en cada punto para los 40 ka procesados con cada ángulo de incidencia. (Figuras 19 a 24).

En general se puede observar que las ondas mas largas, particularmente cuando $ka = 12.5$ y 15 , afectan toda la bahía, La amplificación es menor cuando θ_i es 30° o 45° y aumenta para los ángulos

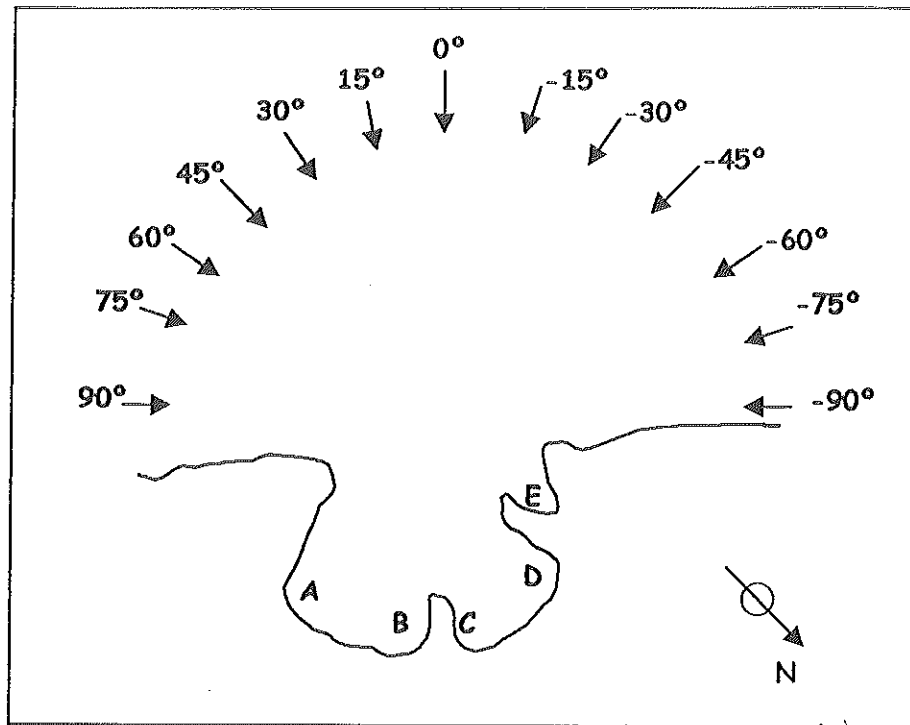


Figura 5. Angulos de incidencia procesados y ubicación de los puntos A, B, C, D y E en las bahías.

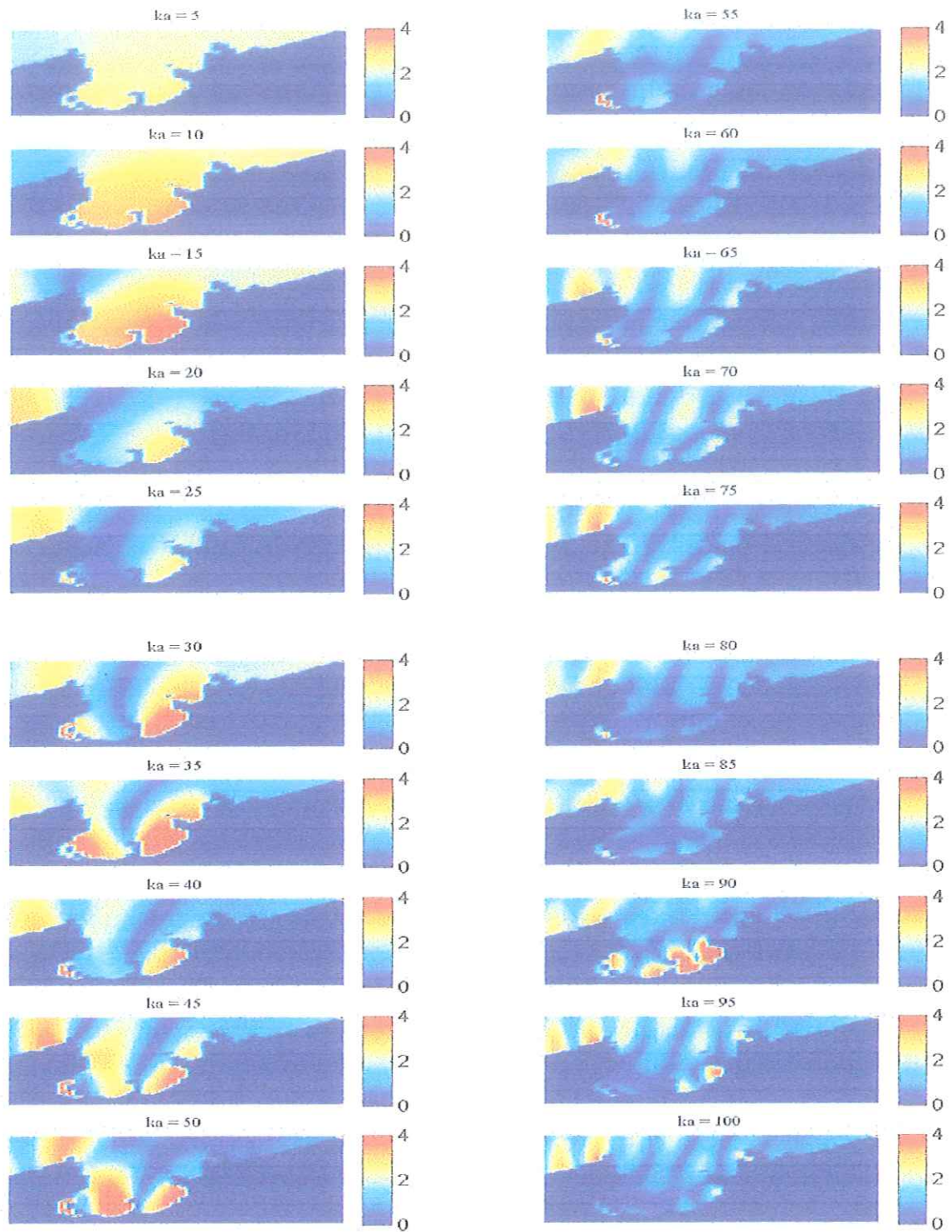


Figura 6. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = 90°

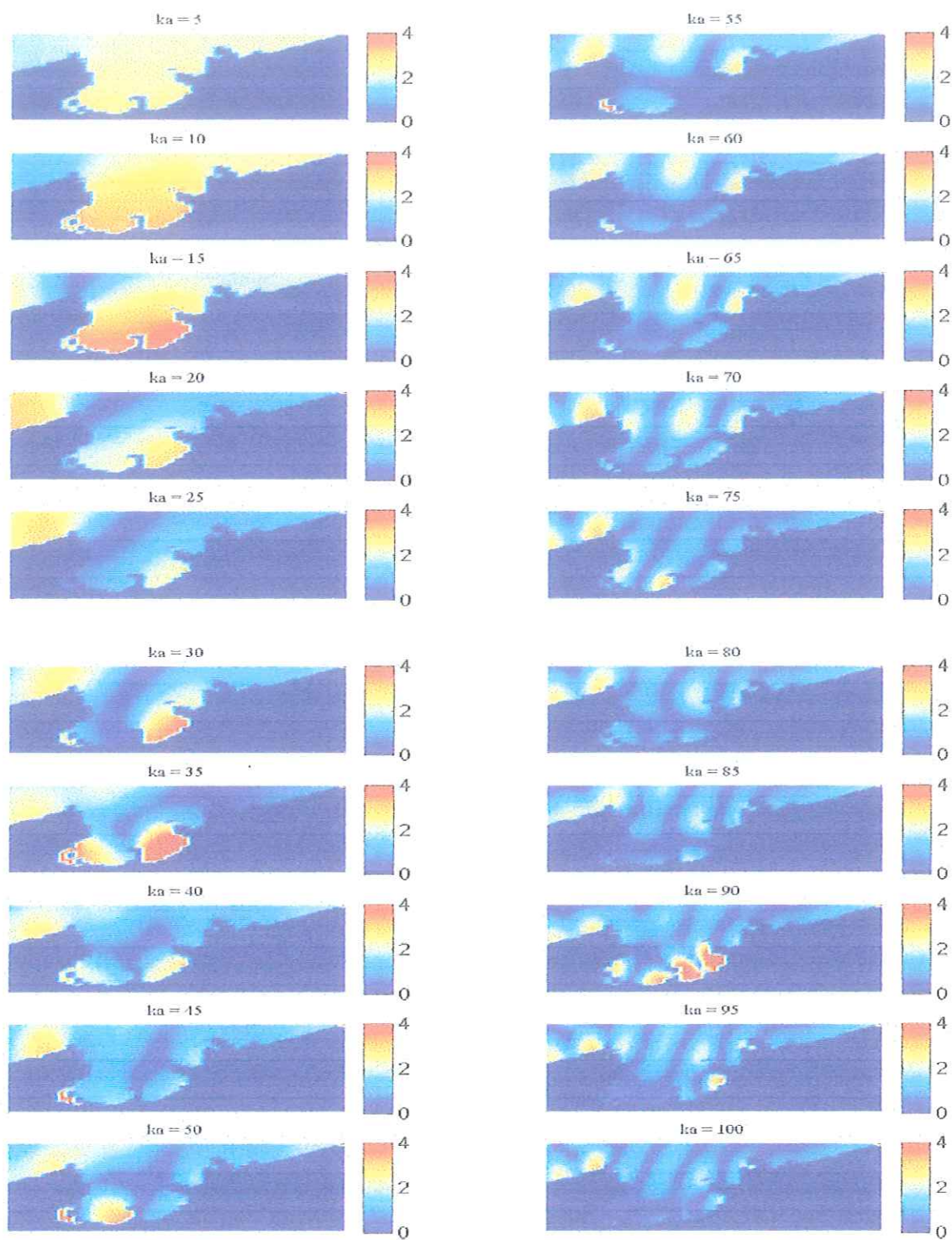


Figura 7. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = 75°

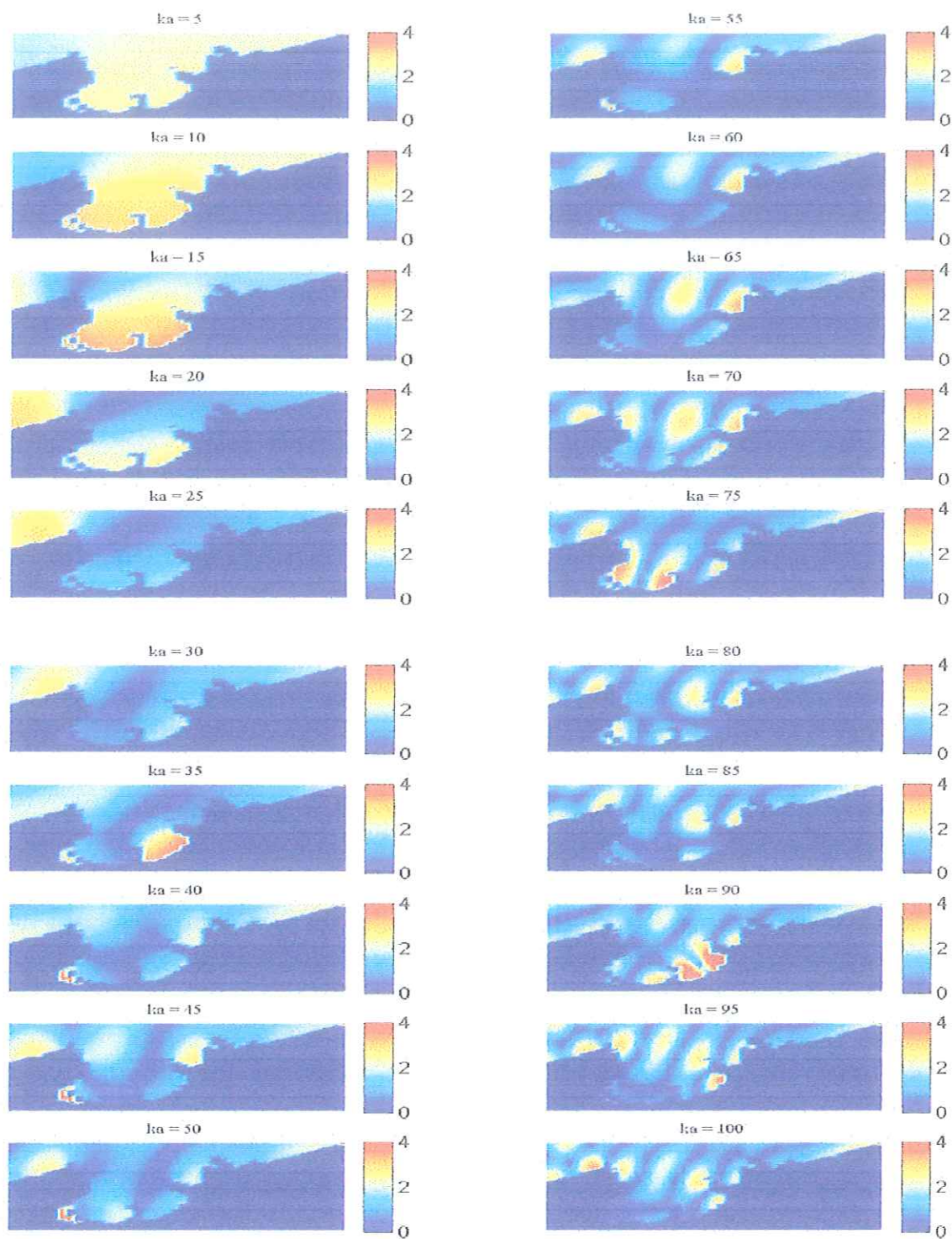


Figura 8. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = 60°

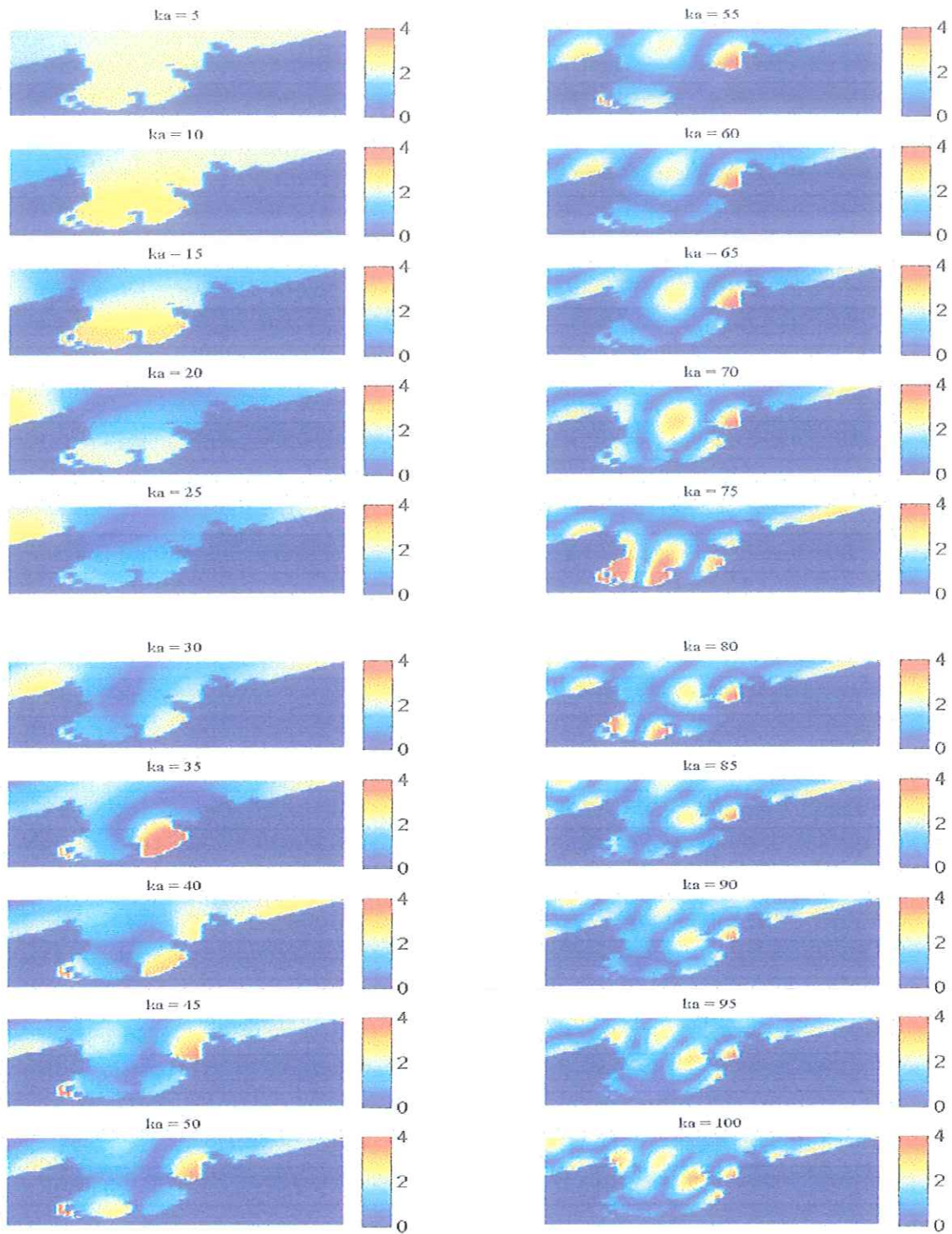


Figura 9. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = 45°

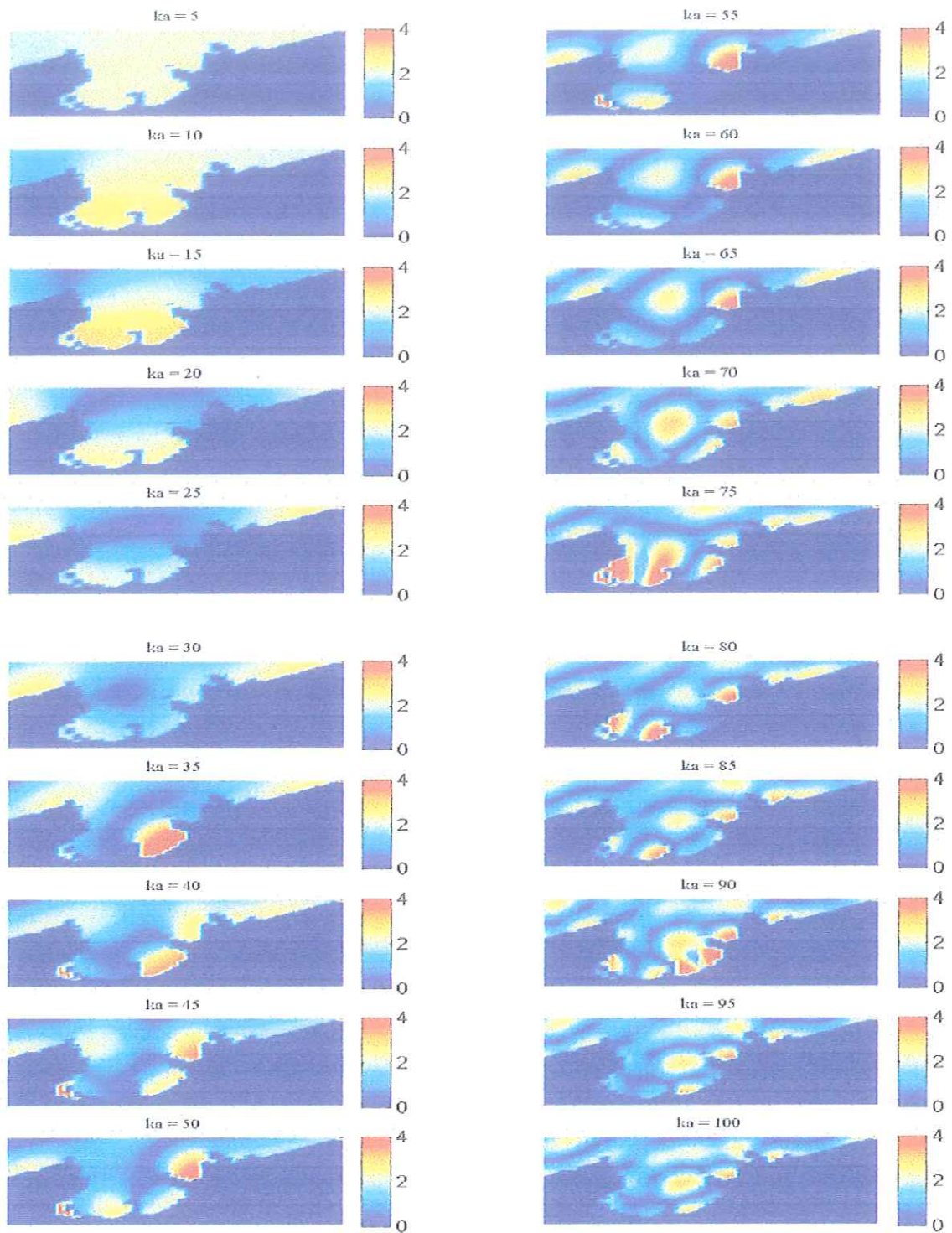


Figura 10. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = 30°

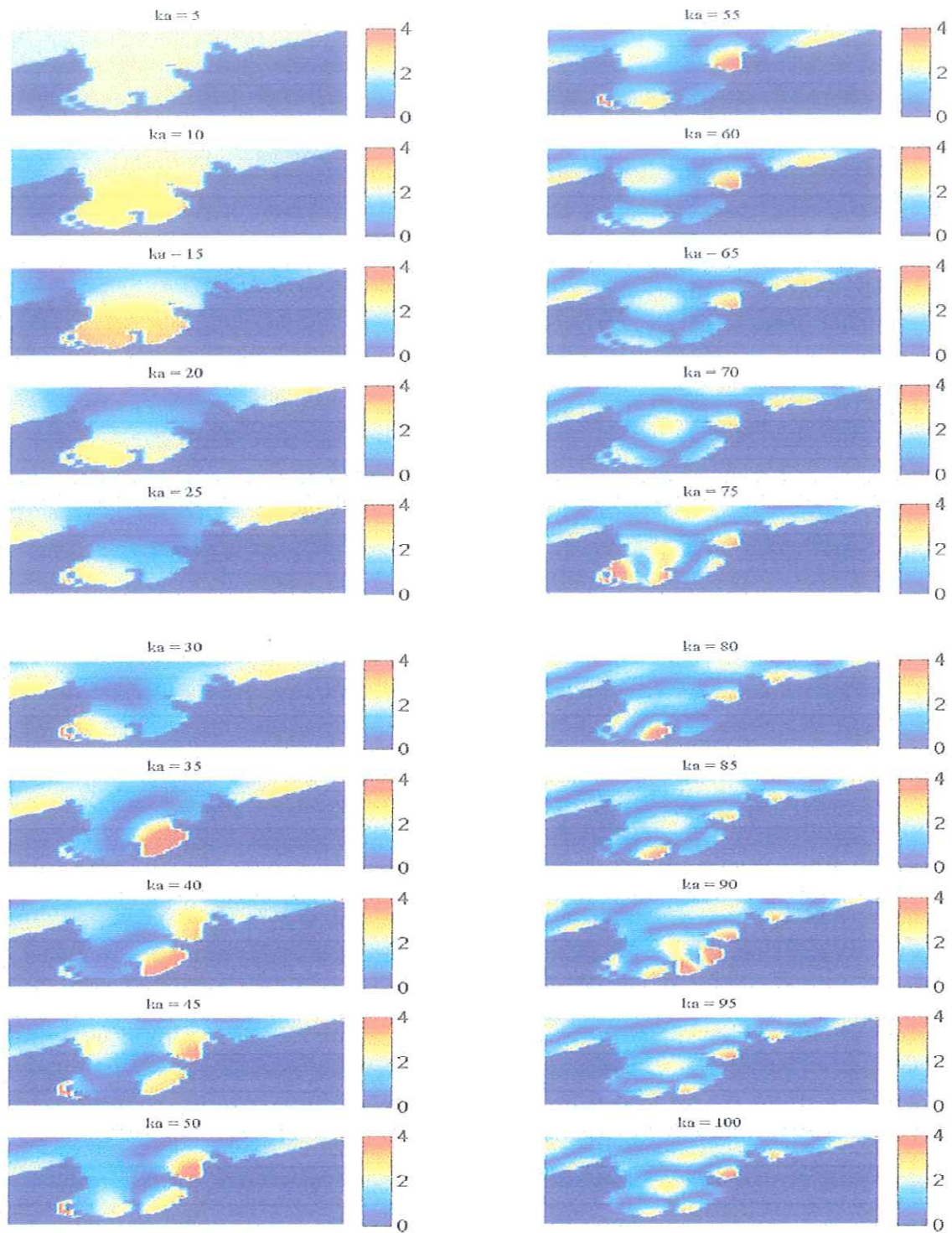


Figura 11. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = 15°

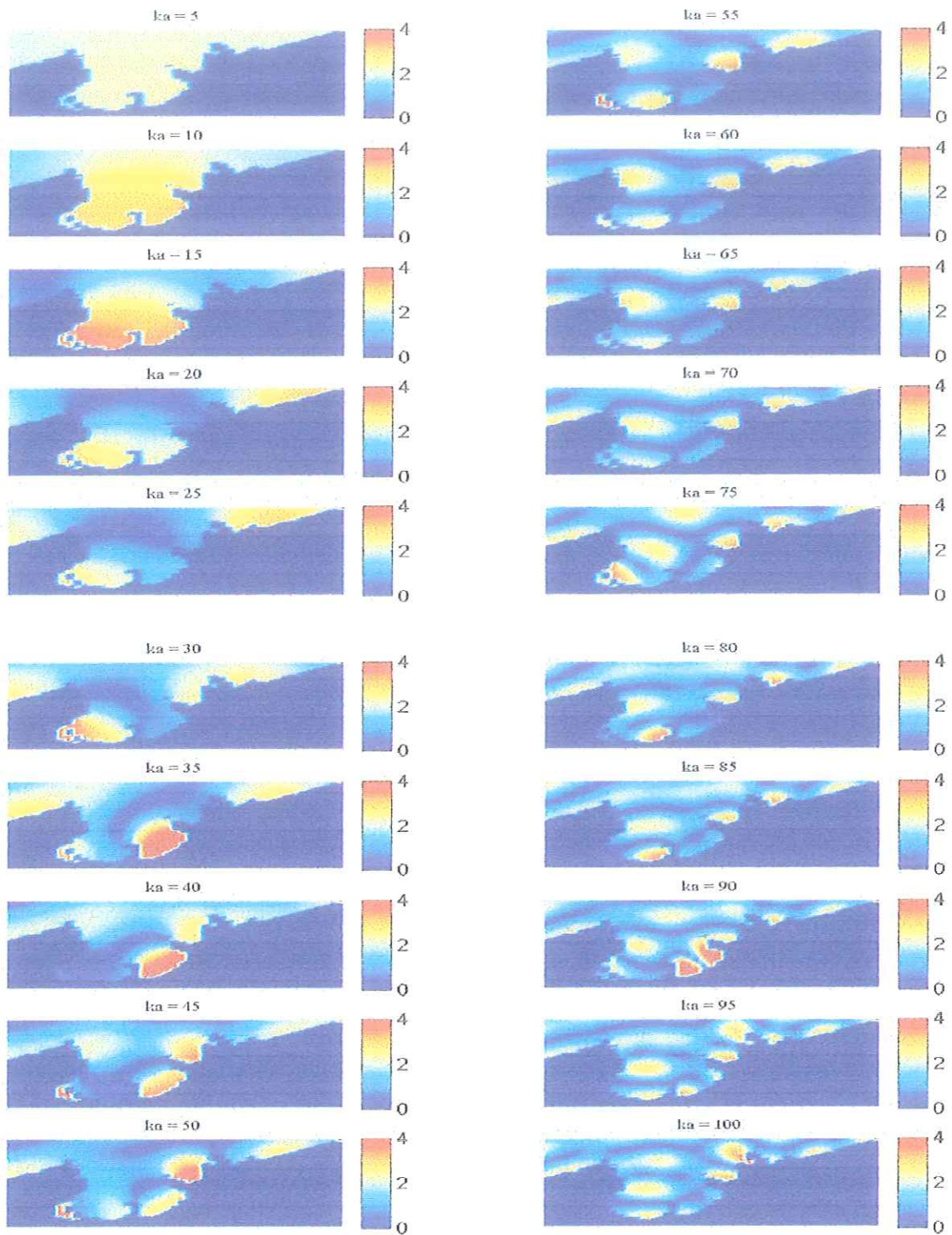


Figura 12. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = 0°

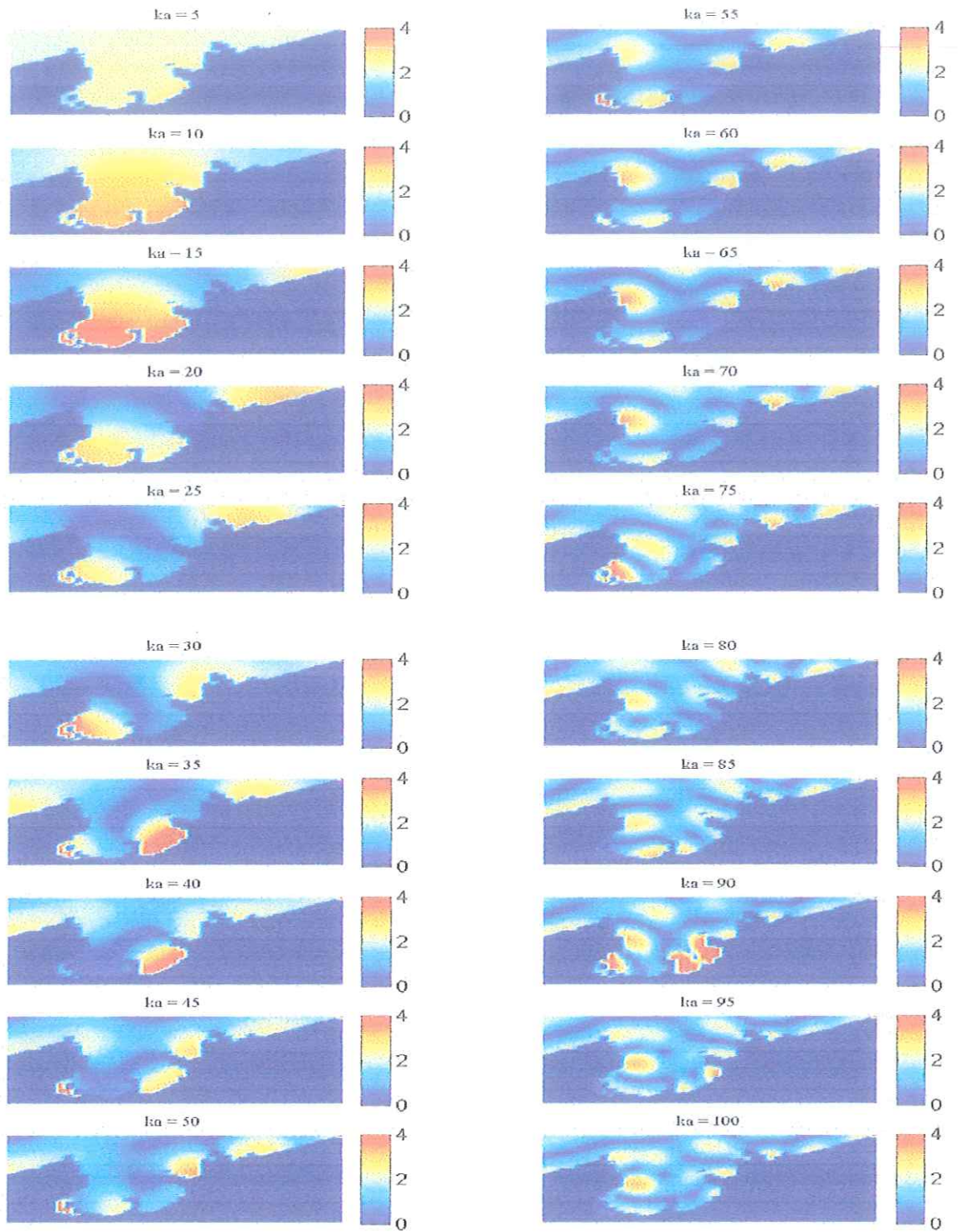


Figura 13. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = -15°

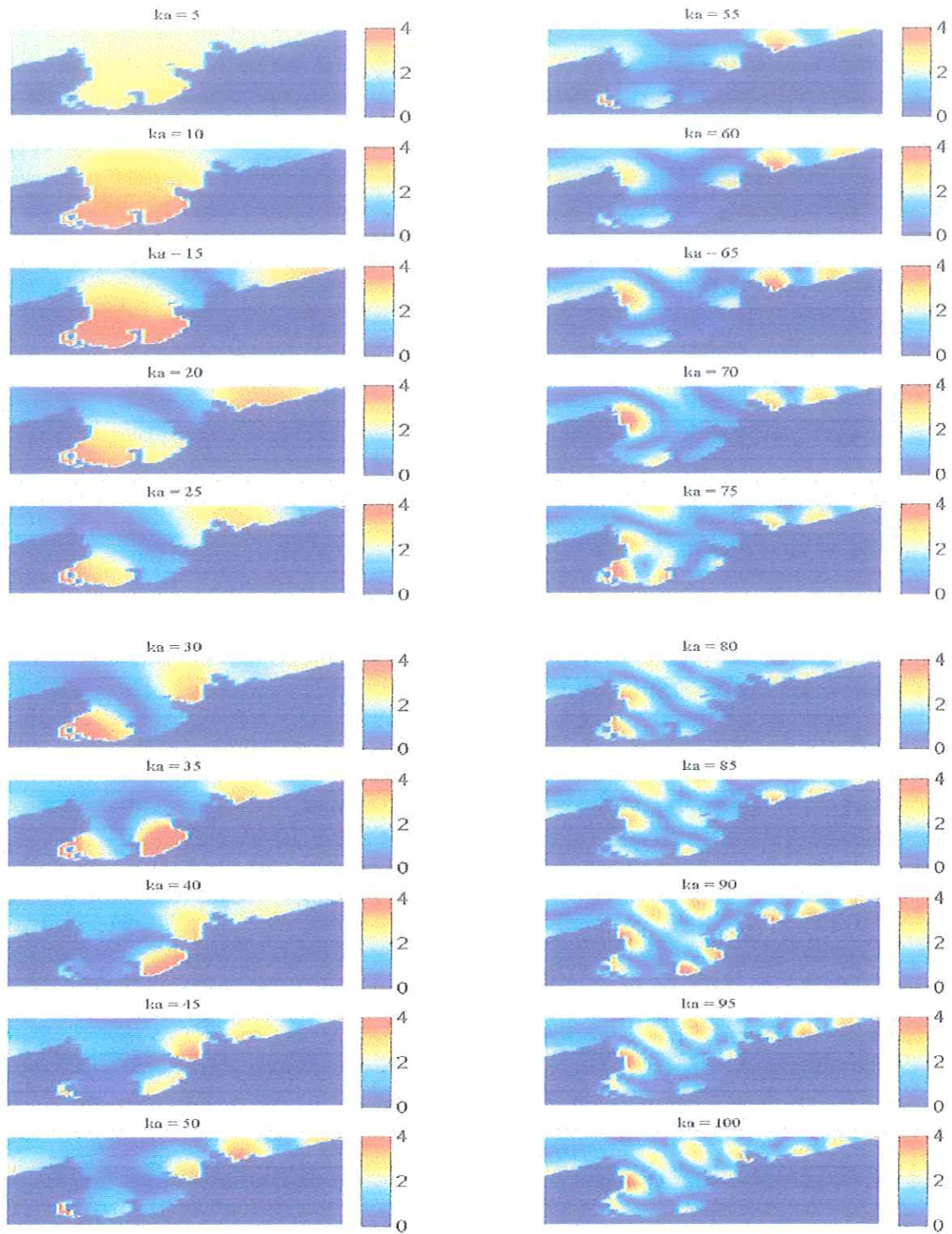


Figura 14. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = -30°

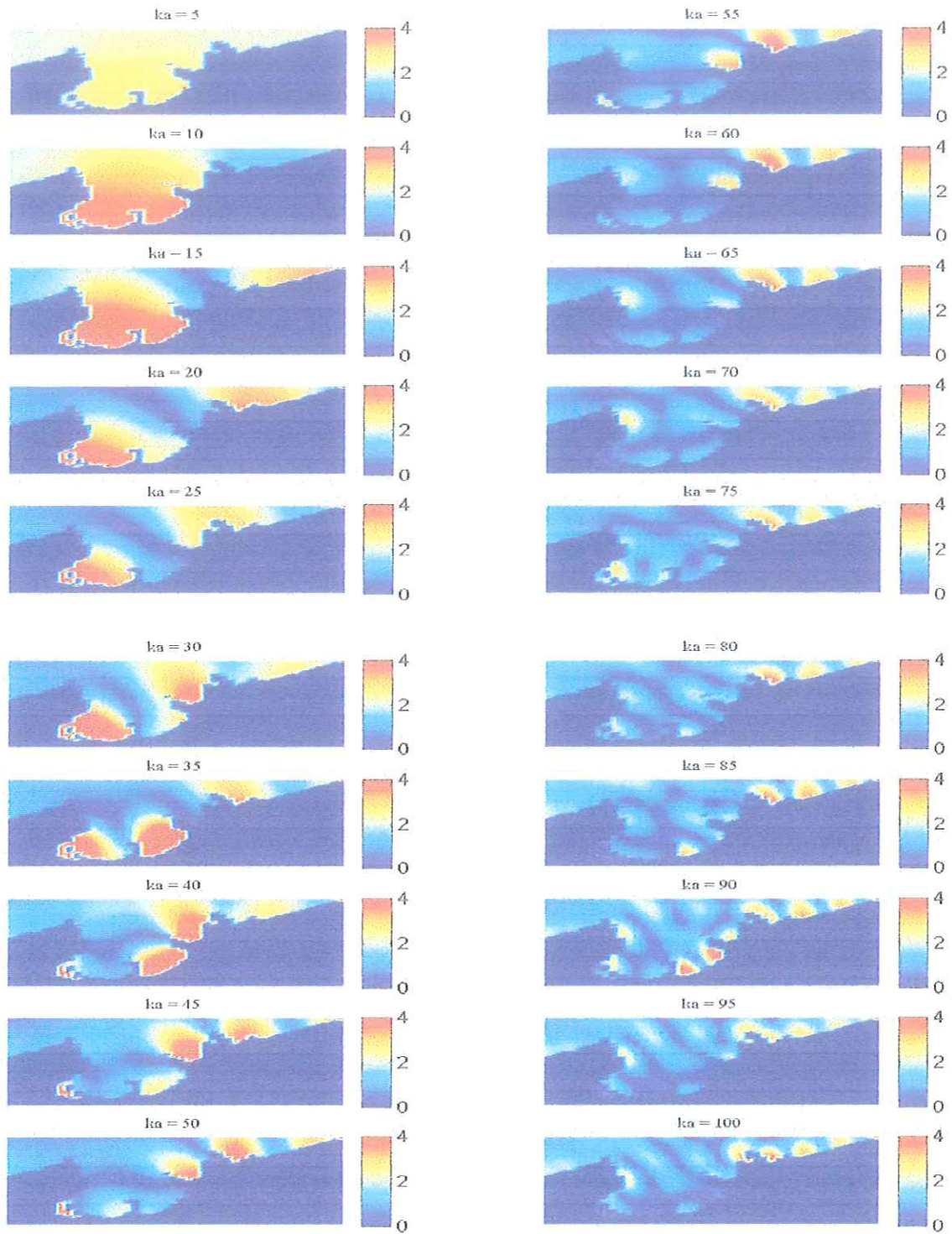


Figura 15. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = -45°

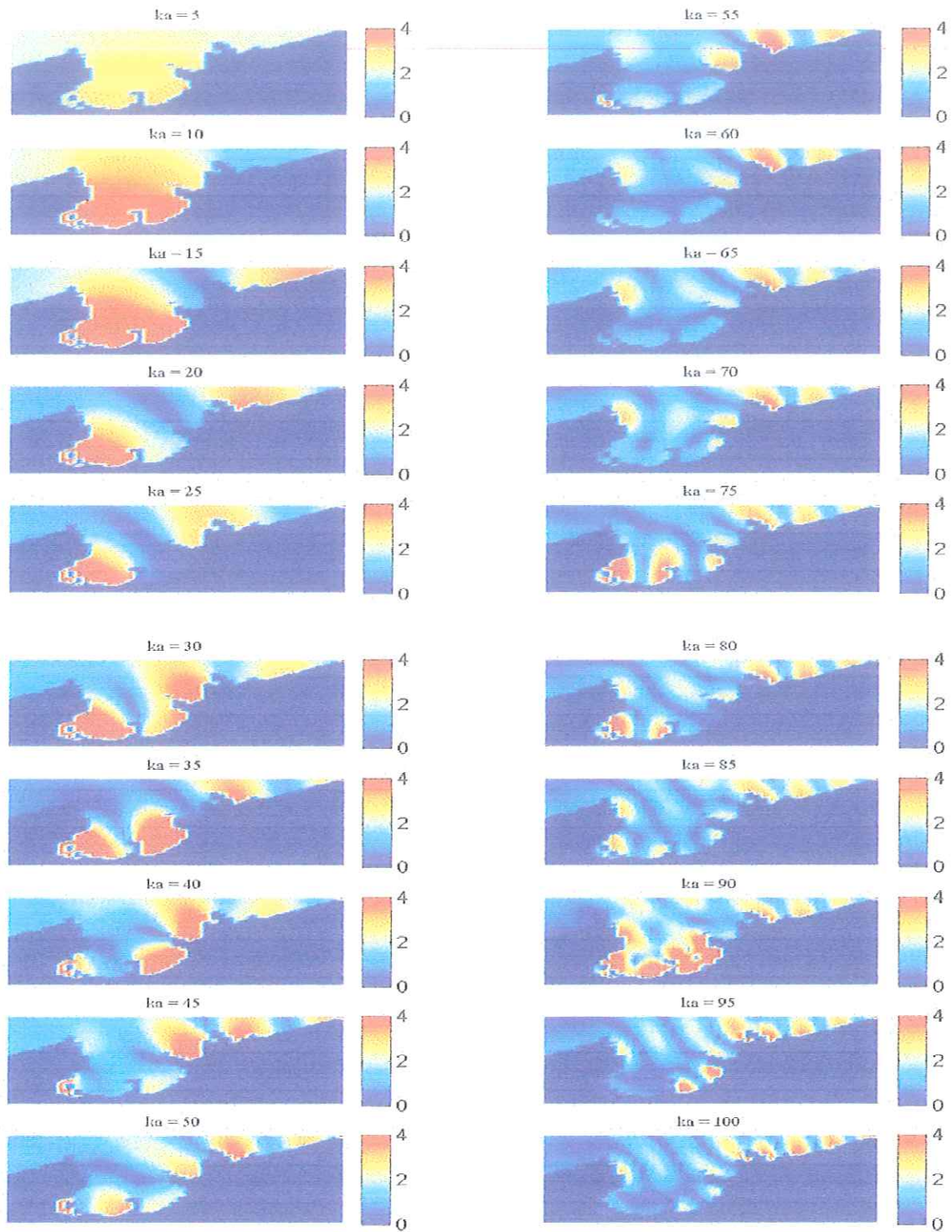


Figura 16. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = -60°

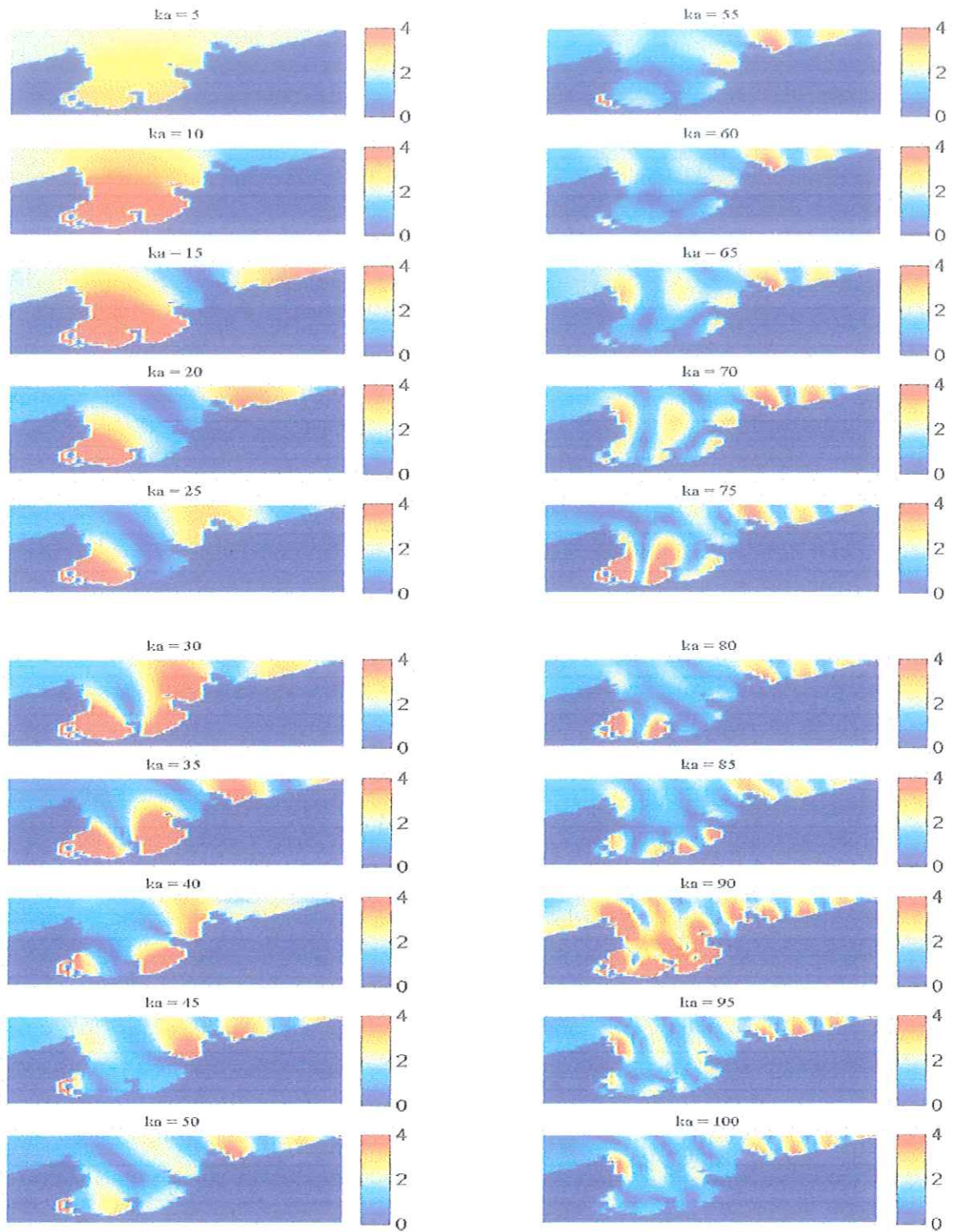


Figura 17. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = -75°

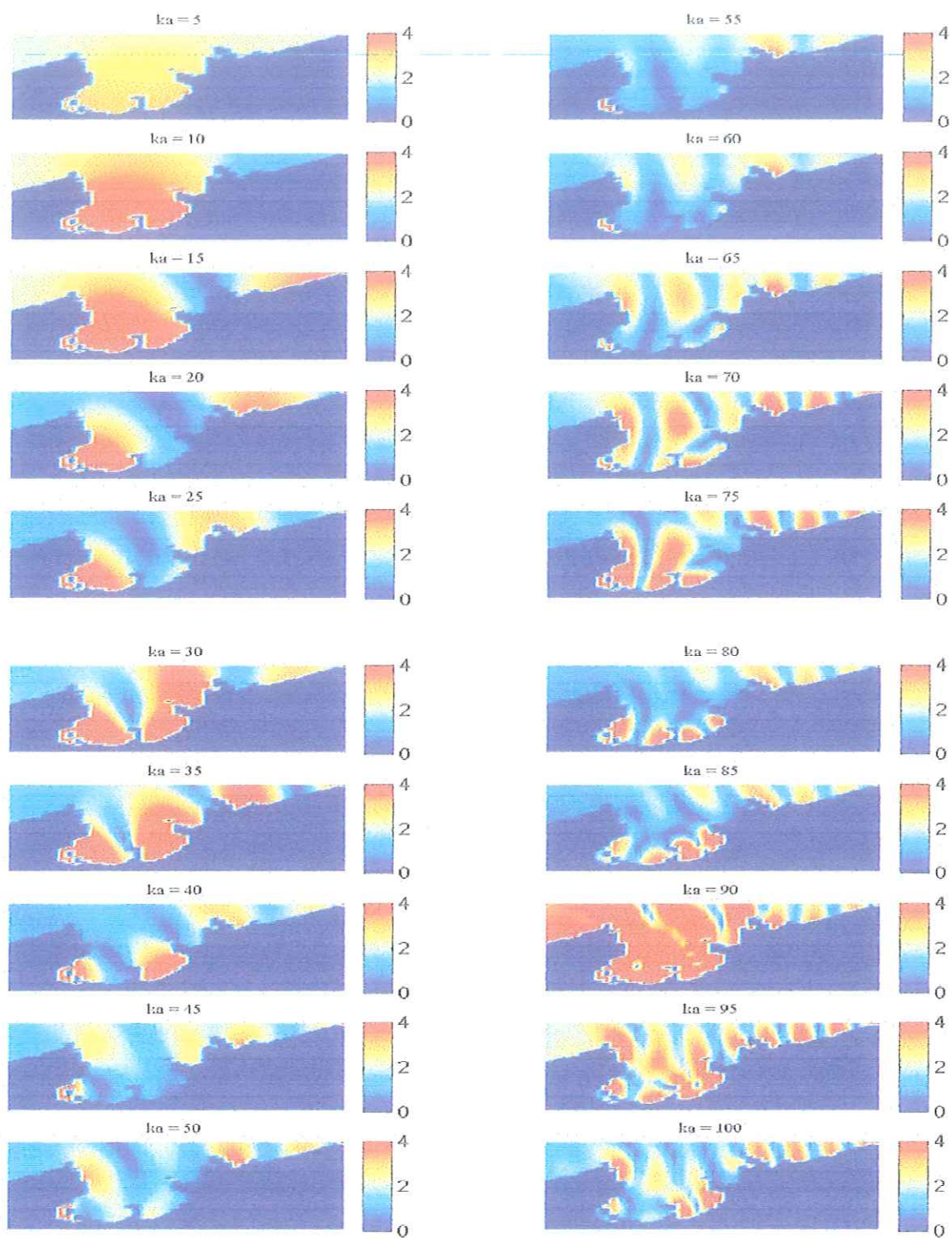


Figura 18. Factor de amplificación para ondas con ángulo de incidencia = -90°

negativos. En las Figuras 6 a 18 se observó una amplificación importante en la bahía de Santiago para $ka = 35$ y $ka = 90$ en la mayoría de los ángulos de incidencia. En la bahía de Manzanillo y el resto de la costa se distinguen amplificaciones que no son constantes para todos los θ_i .

En las Figuras 19 y 20 se graficaron las amplificaciones en los puntos A y B de la Bahía de Manzanillo para cada número de onda ka . Se puede distinguir una amplificación para $ka = 12.5$ y 15 . Estas ondas se amplifican en las dos bahías, como se observó en las Figuras 6 a 18.

En la Bahía de Manzanillo, los $ka = 32.5, 35$ y 50 provocan amplificaciones cuyo valor varía para cada θ_i . Lo mismo ocurre para $ka = 77.5$ y 90 , aunque el comportamiento de estos es más irregular. La amplificación máxima calculada para el punto A fue de 7.1 para $ka = 32.5$ y $\theta_i = -60^\circ$. La amplificación máxima para el punto B fue de 7.1 para $ka = 77.5$ y $\theta_i = 30^\circ$.

En las figuras 21 y 22 se puede distinguir que la Bahía Santiago presentó amplificaciones importantes con un ka de 35 y 90 , en todos los θ_i . En el punto D se presentan los mayores valores de amplificación de $ka = 35$, llegando a 11.9 con $\theta_i = -60^\circ$. Para $ka = 90$ ($\lambda \approx 8$ km) se observaron valores muy altos de amplificación cuando el ángulo de incidencia es -60° y -

Bahía Manzanillo

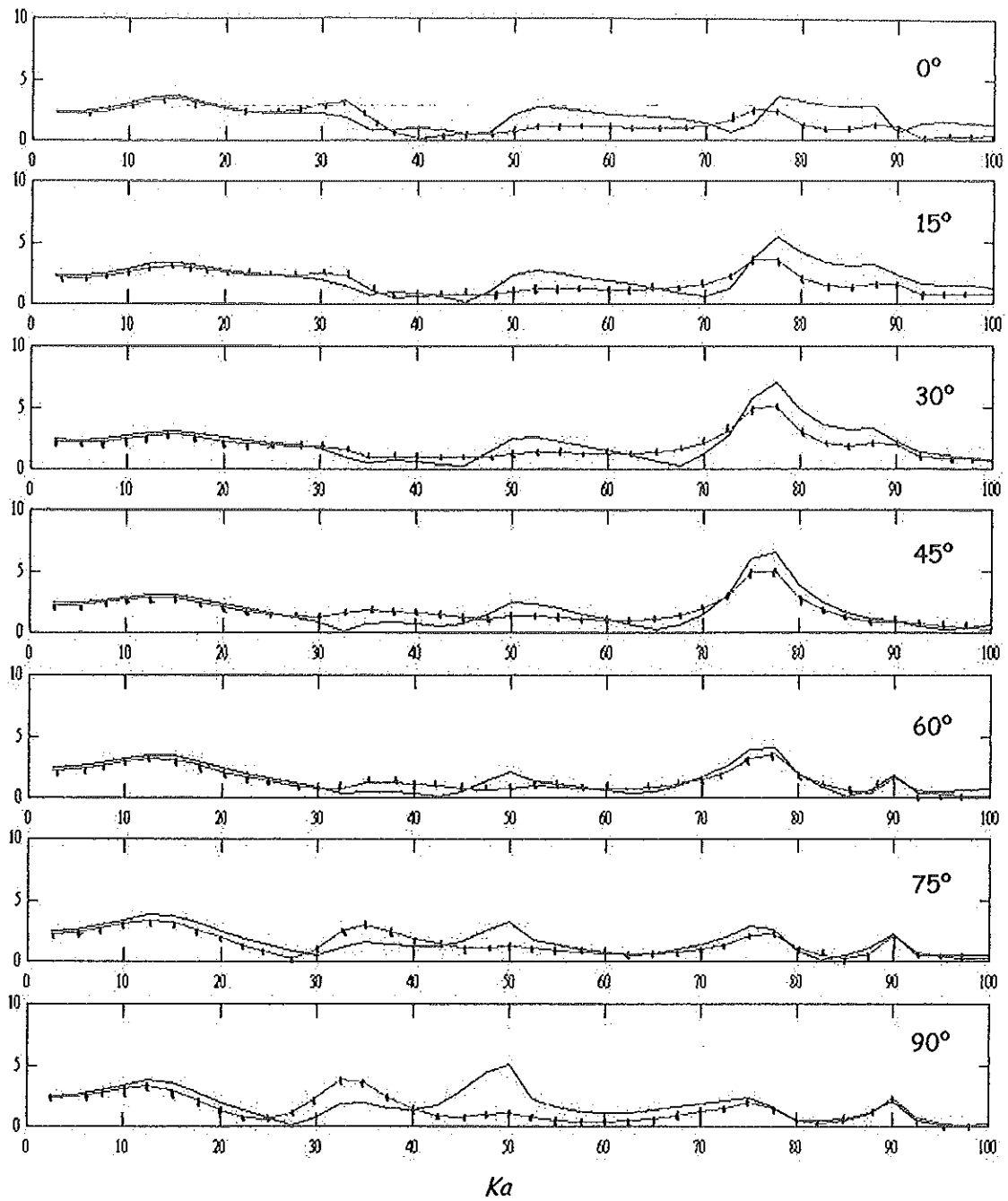


Figura 19. Factor de amplificación en A \blacktriangle y B — para cada ángulo de incidencia.

Bahía Manzanillo

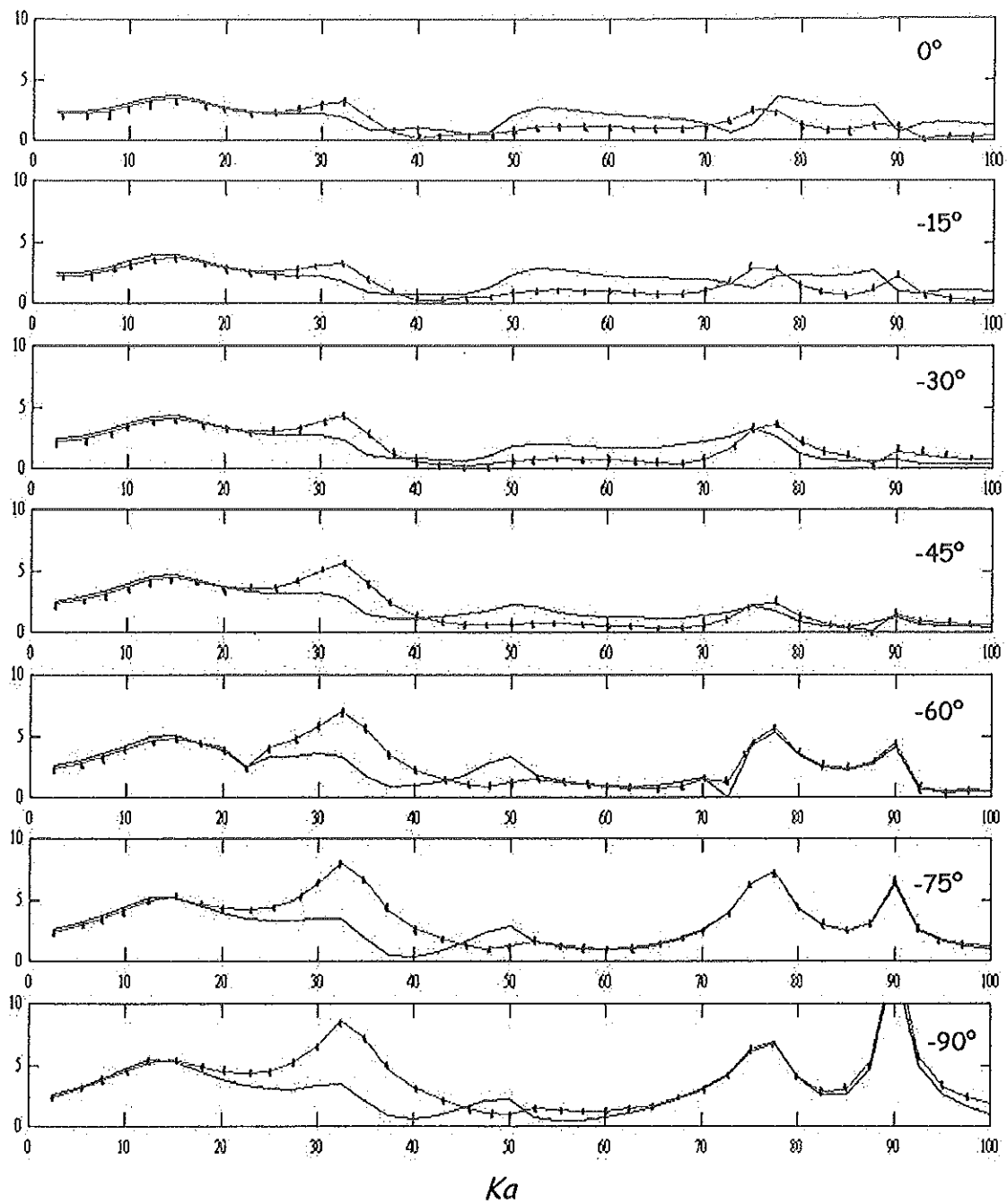


Figura 20. Factor de amplificación en A \triangle y B — para cada ángulo de incidencia.

Bahía Santiago

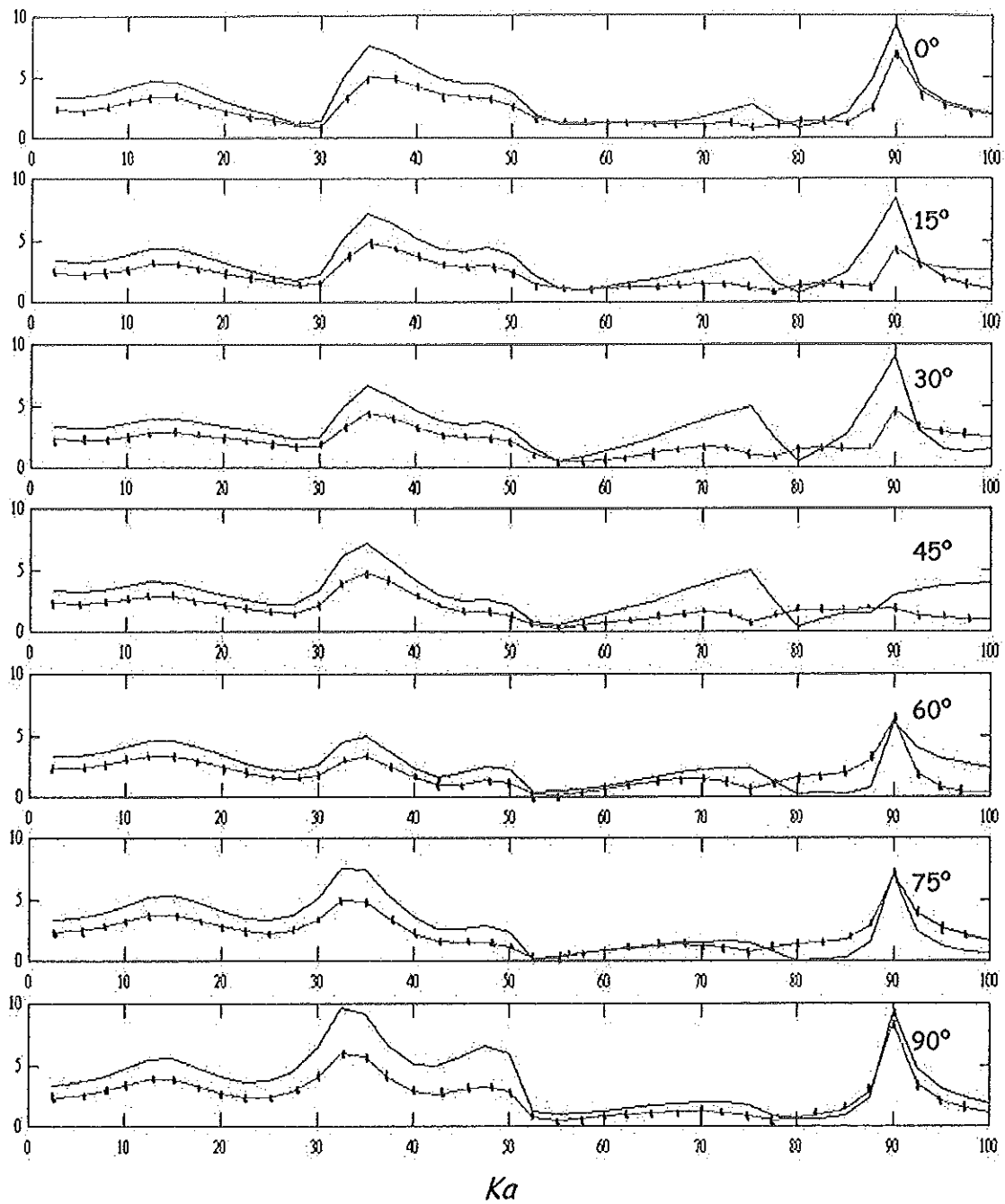


Figura 21. Factor de amplificación en C $\dashv\vdash$ y D — para cada ángulo de incidencia.

15°. La amplificación máxima para el punto C se calculó en 15.9 para $ka = 90$ y $\theta_i = -60^\circ$. La amplificación máxima calculada para el punto D fue de 15.32 para $ka = 90$ y $\theta_i = -15^\circ$.

En la Ensenada Higueras (Figuras 23 y 24) los valores máximos apenas llegaron a 5. Esta zona se encuentra más cercana a mar abierto, sin embargo, no presenta la concavidad de las otras bahías. La amplificación máxima para el punto E se calculó en 5.0 para $ka = 45$ y $\theta_i = -45^\circ$.

Con el fin de analizar si la direccionalidad de las ondas produce un cambio en la respuesta de las bahías, se graficó la amplificación generada por determinadas longitudes de onda para los ángulos de incidencia mostrados en la Figura 5. En las Figuras 25, 26 y 27 se puede observar cómo la amplificación de cada onda determinada se ve afectada por el ángulo de incidencia. En la mayoría de los estudios de resonancia en bahías y puertos se analizan ondas incidentes paralelas a la entrada. En este trabajo estas ondas corresponden al $\theta_i = 0^\circ$. Parte de los objetivos de este trabajo es analizar cómo se ven afectadas las bahías de Manzanillo y Santiago por ondas largas como los tsunamis. Como se muestra en la Figura 2, estos llegan a la costa de Manzanillo de diversas direcciones. Estas ondas, aún después de haber sido refractadas y difractadas por la topografía, se puede esperar que lleguen con cierto ángulo a la entrada de la bahía. Es posible

Ensenada Higueras

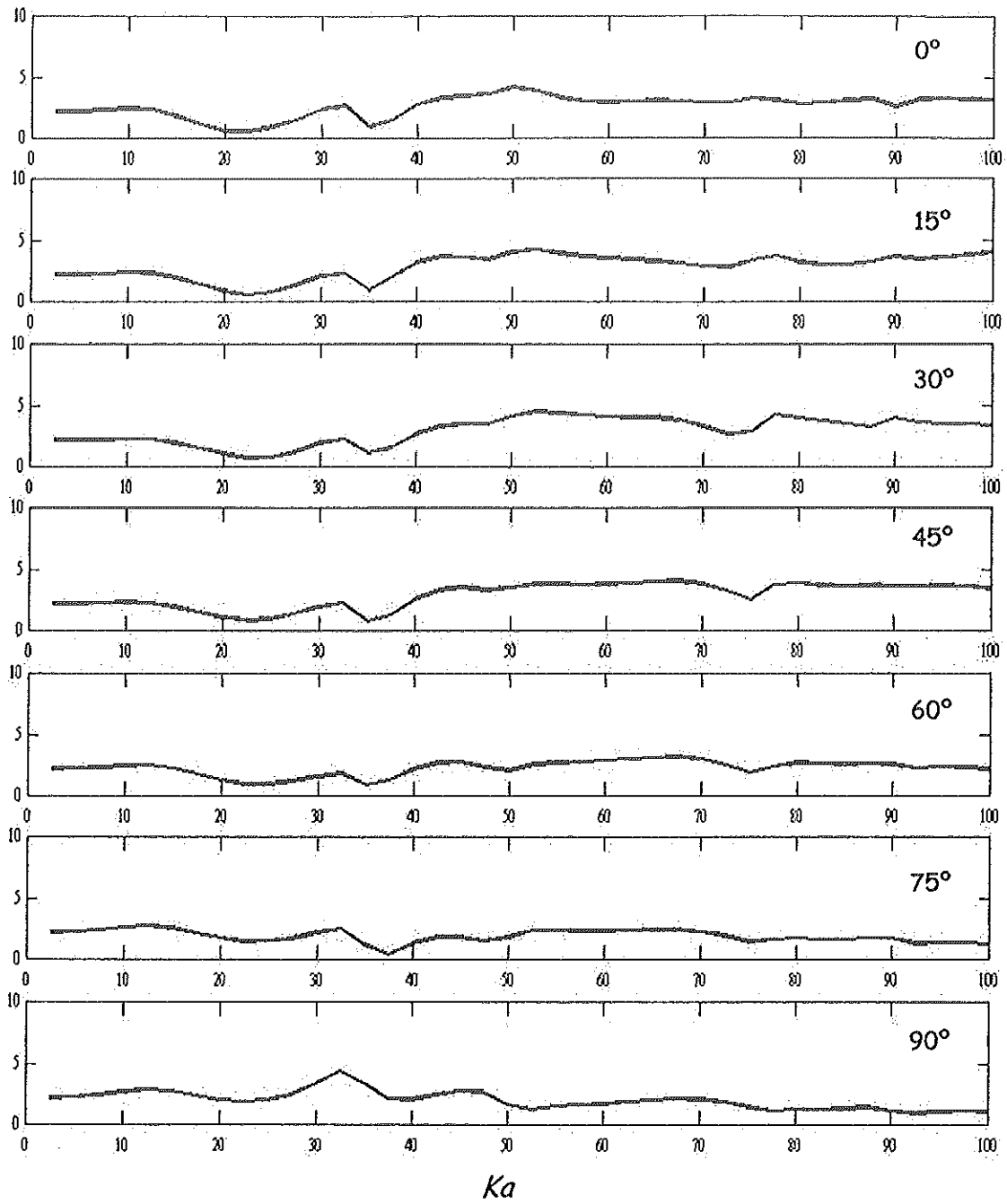


Figura 23. Factor de amplificación en E \leftrightarrow para cada ángulo de incidencia.

Ensenada Higueras

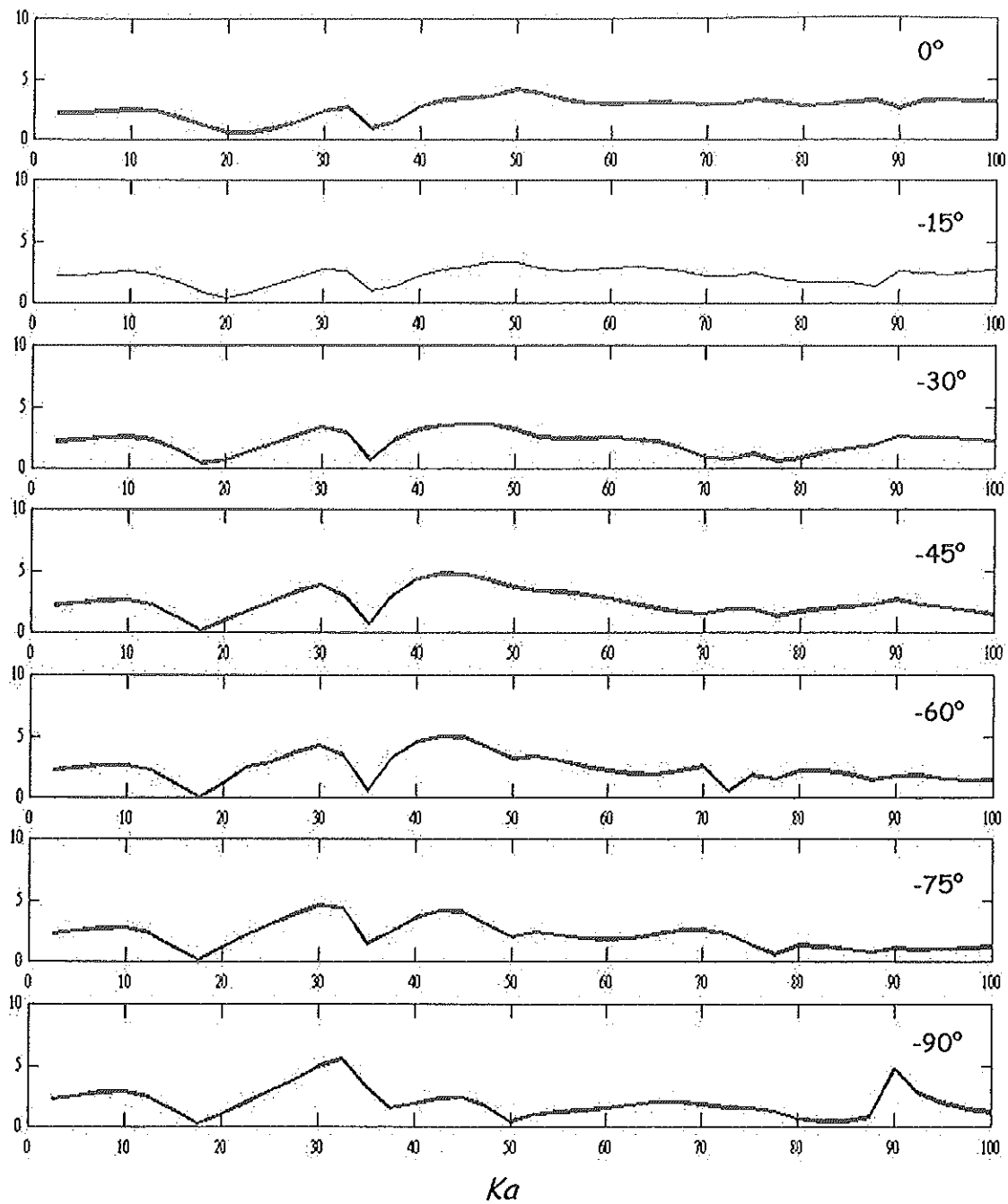


Figura 24. Factor de amplificación en E — para cada ángulo de incidencia.

Bahía Manzanillo

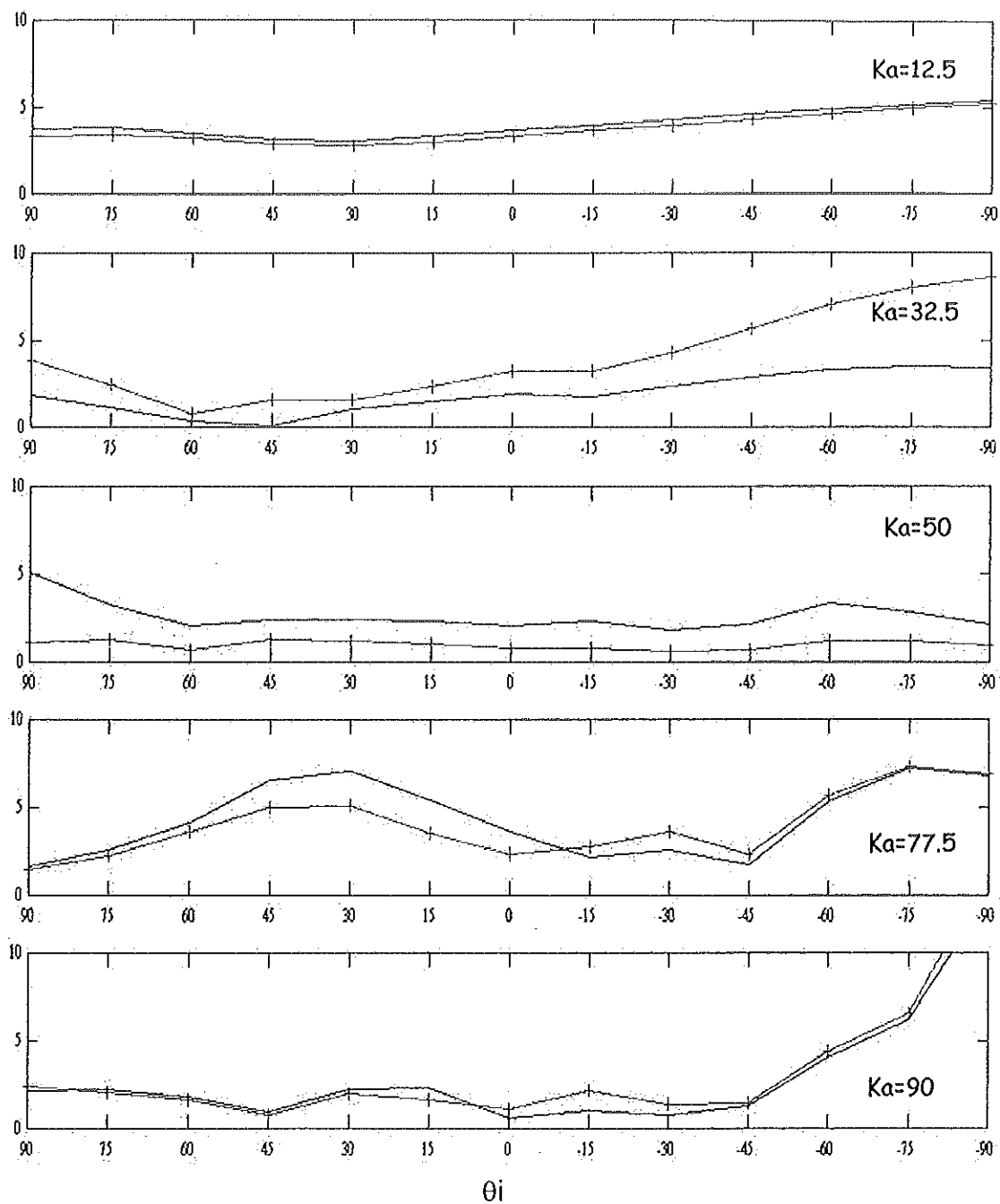


Figura 25. Factor de amplificación en A — y B — cambiando el ángulo de incidencia en determinados Ka

Bahía Santiago

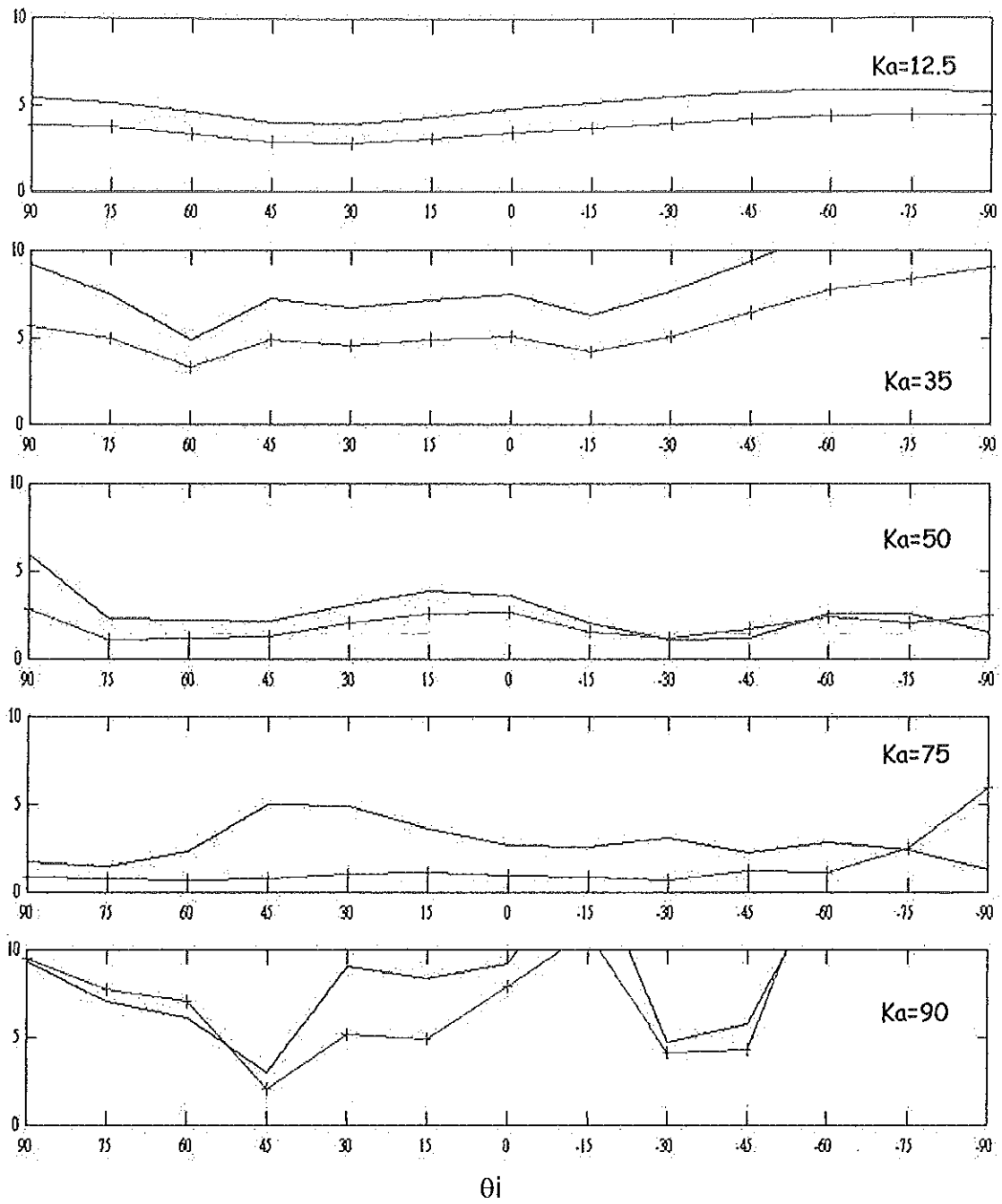


Figura 26. Factor de amplificación en C— y D — cambiando el ángulo de incidencia en determinados K_a

Ensenada Higueras

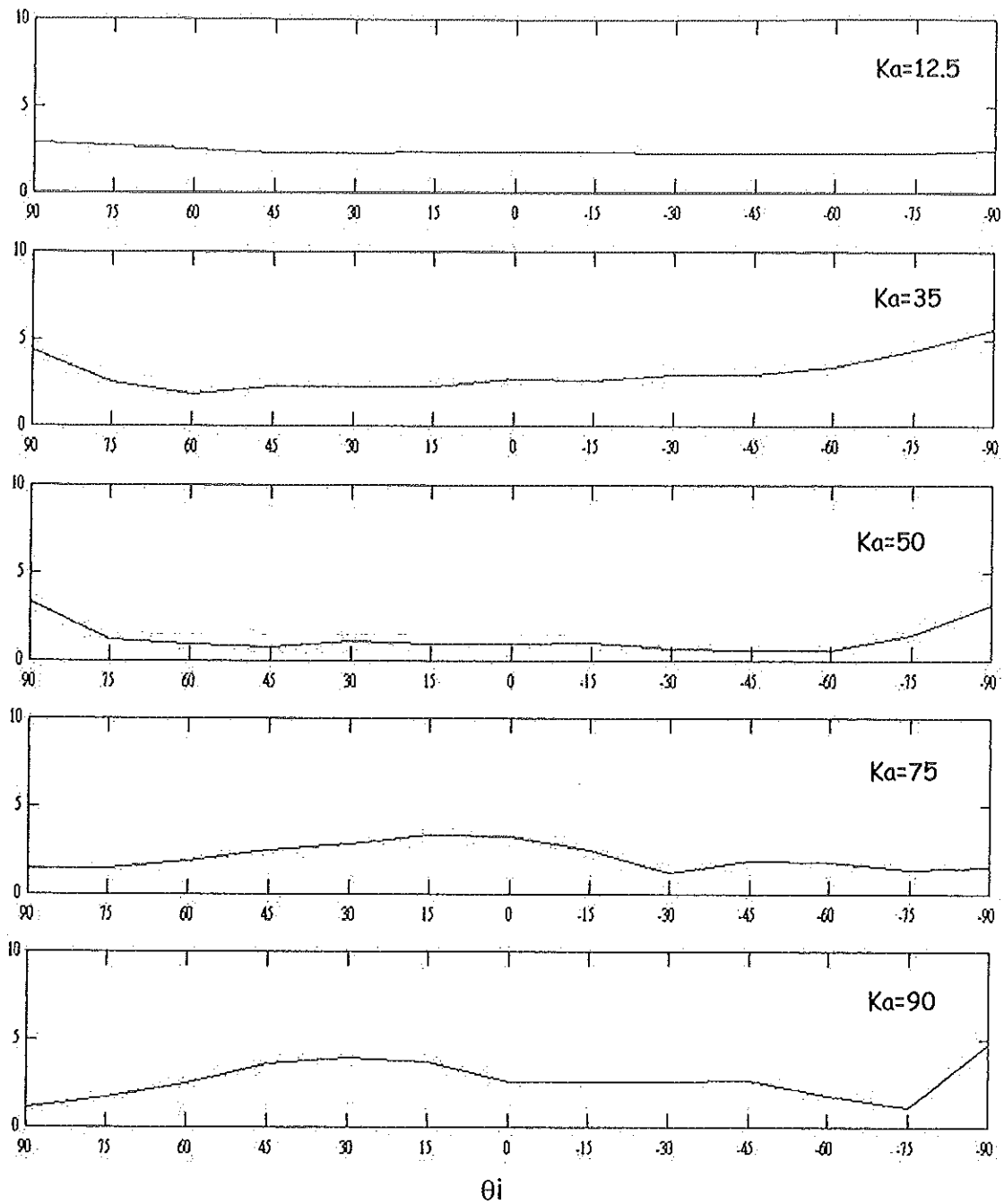
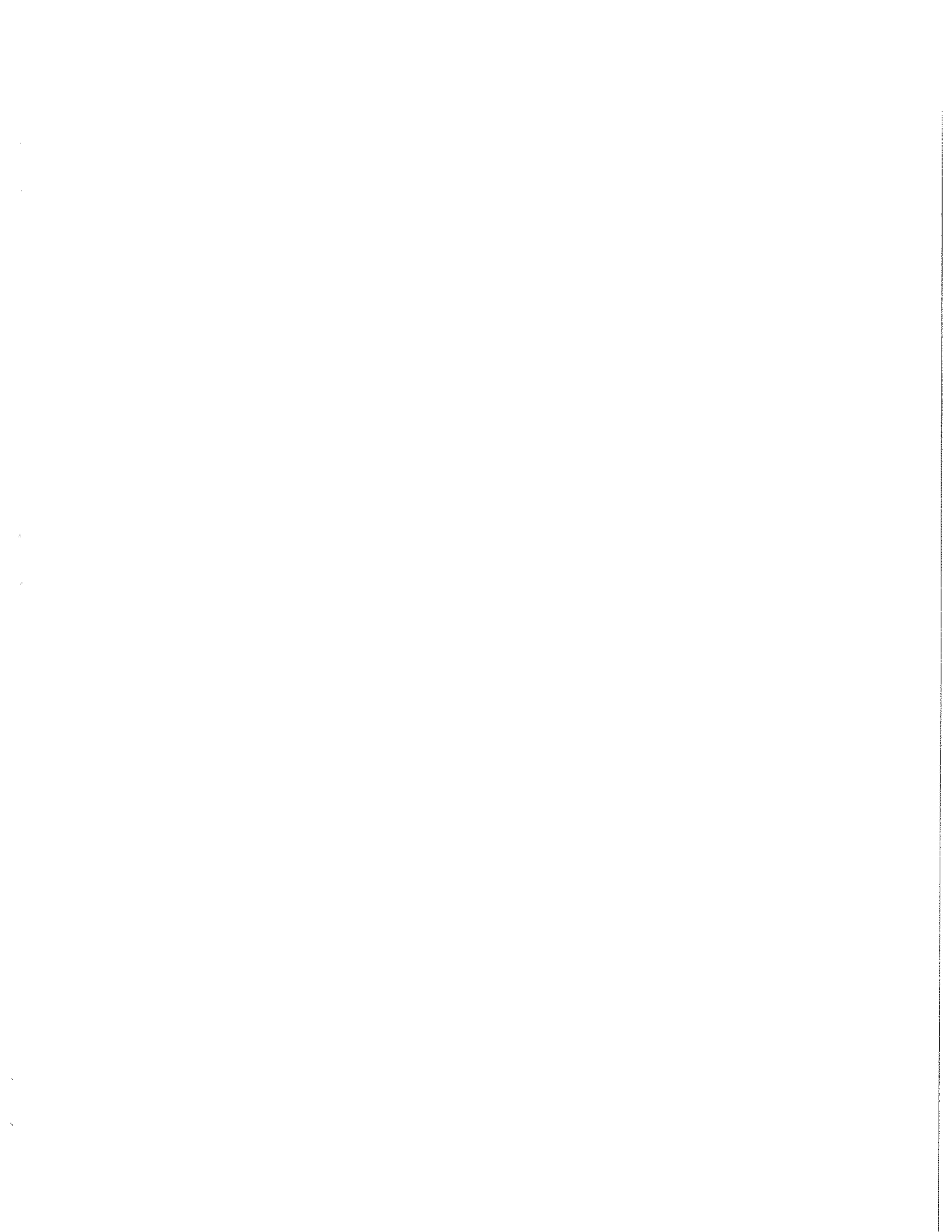


Figura 27. Factor de amplificación en E — cambiando el ángulo de incidencia en determinados Ka

observar que en algunos casos, una misma onda ocasiona amplificaciones importantes cuando llega a la entrada de la bahía con cierto θ_i y no ocasiona la menor amplificación cuando llega desde un θ_i distinto. En la Figura 25, para las ondas de $ka = 32.5$, se calculó un factor de amplificación que llega a 7.1 en el punto A si el $\theta_i = -60^\circ$. El factor de amplificación es tan solo 0.7 cuando la misma onda llega con un $\theta_i = 60^\circ$.

La Ensenada Higuera presentó un comportamiento más regular para los distintos ángulos de incidencia (Figura 27). Se puede notar que los valores de amplificación para los números de onda que afectan a los puntos A, B, C y D no llegan a ser tan altos y no varían tanto para cada θ_i como en dichos puntos. Borrero (1997) reporta que con el arribo del tsunami de 1995, el mayor run-up se presentó en esta zona. Esto puede deberse a la proximidad con la entrada de la bahía, o bien a que los valores que se obtuvieron para esa zona, (punto E) no son producto de la reflexión, sino del efecto que la geometría de la costa tiene en las ondas incidentes (comunicación personal con el Dr. Modesto Ortíz).

Los resultados obtenidos para los ángulos de -75° y -90° deben ser tomados en cuenta con cautela, ya que el modelo está basado en una discretización numérica de la línea de costa y por lo tanto se toma con una longitud finita lo que provoca que numéricamente se tengan problemas con



el efecto de borde, entendiendo esto como una difracción de origen numérico producida por una aparente pared vertical en los extremos de la línea de costa. Esto ha mostrado ser más evidente para ángulos cercanos a los 90 grados de incidencia.

El modelo también se aplicó con todas las longitudes de onda cerrando la entrada del puerto para ver si la respuesta de las bahías se modificaba en algo. Esto se hizo únicamente para los ángulos de incidencia de 30° , 15° y -15° . Los resultados obtenidos en los 5 puntos se presentan en las figuras, 28, 29 y 30.

En la bahía de Manzanillo (Figura 28), se puede observar que al modificar la costa las ondas más largas tienen la misma respuesta, Para los ángulos positivos, en el punto A, cerca de la entrada del puerto, las amplificaciones máximas que resultaron de los $ka = 77.5$ y 90 se desfasaron hacia los $ka = 70$ y 87.5 respectivamente. Los valores de estas amplificaciones disminuyeron muy poco.

En el punto B, mas alejado del puerto también se observa un desfase de la amplificación máxima de los $ka = 77.5$ y 90 a $ka = 72.5$ y 87.5 respectivamente. Cuando $\theta_i = -15^\circ$ se observan cambios muy ligeros en ambos puntos en los ka de 35 a 75 únicamente.

Bahía Manzanillo

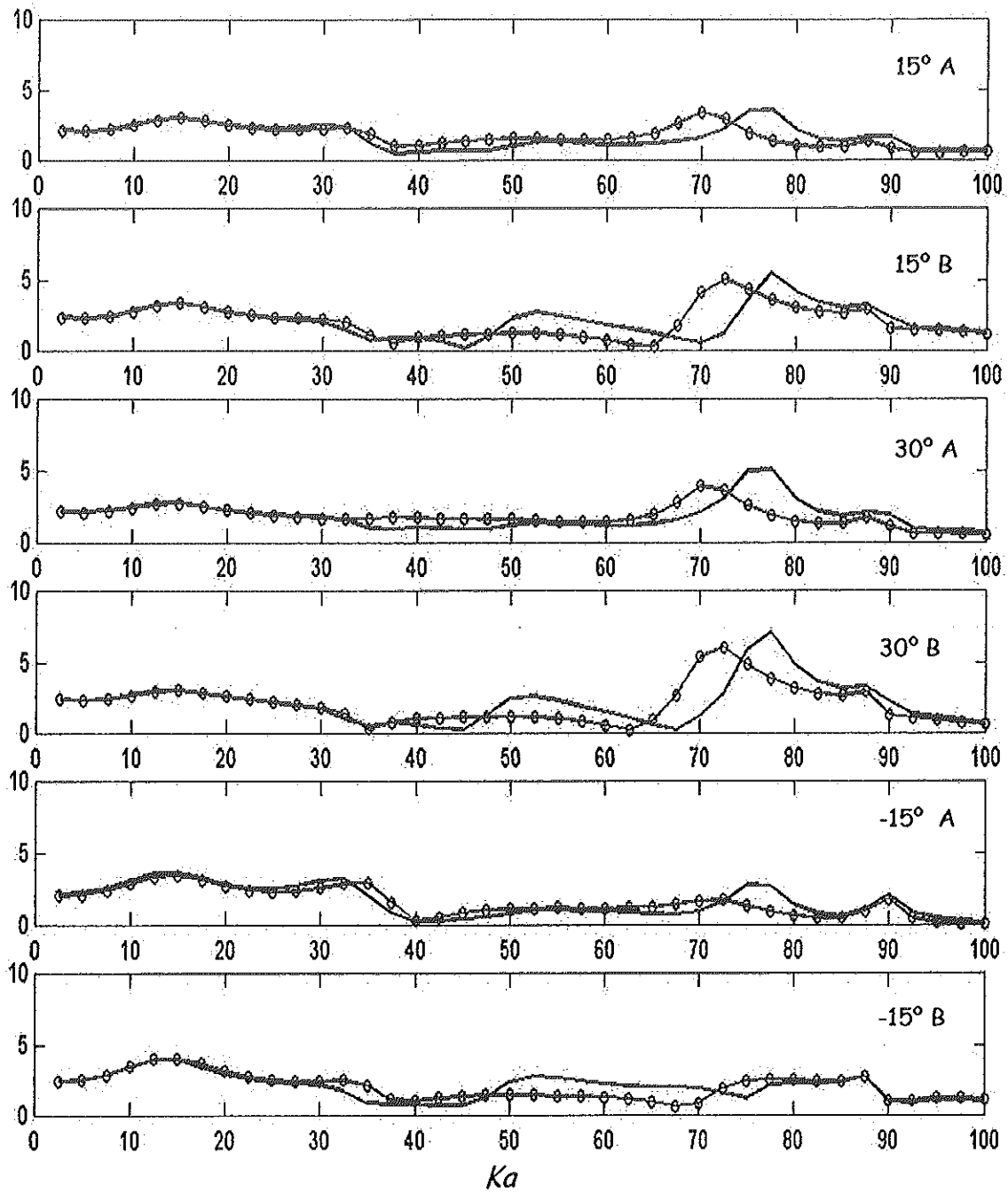


Figura 28. Factor de amplificación en A y B considerando el puerto ——— y sin considerar el puerto ◊—◊

Bahía Santiago

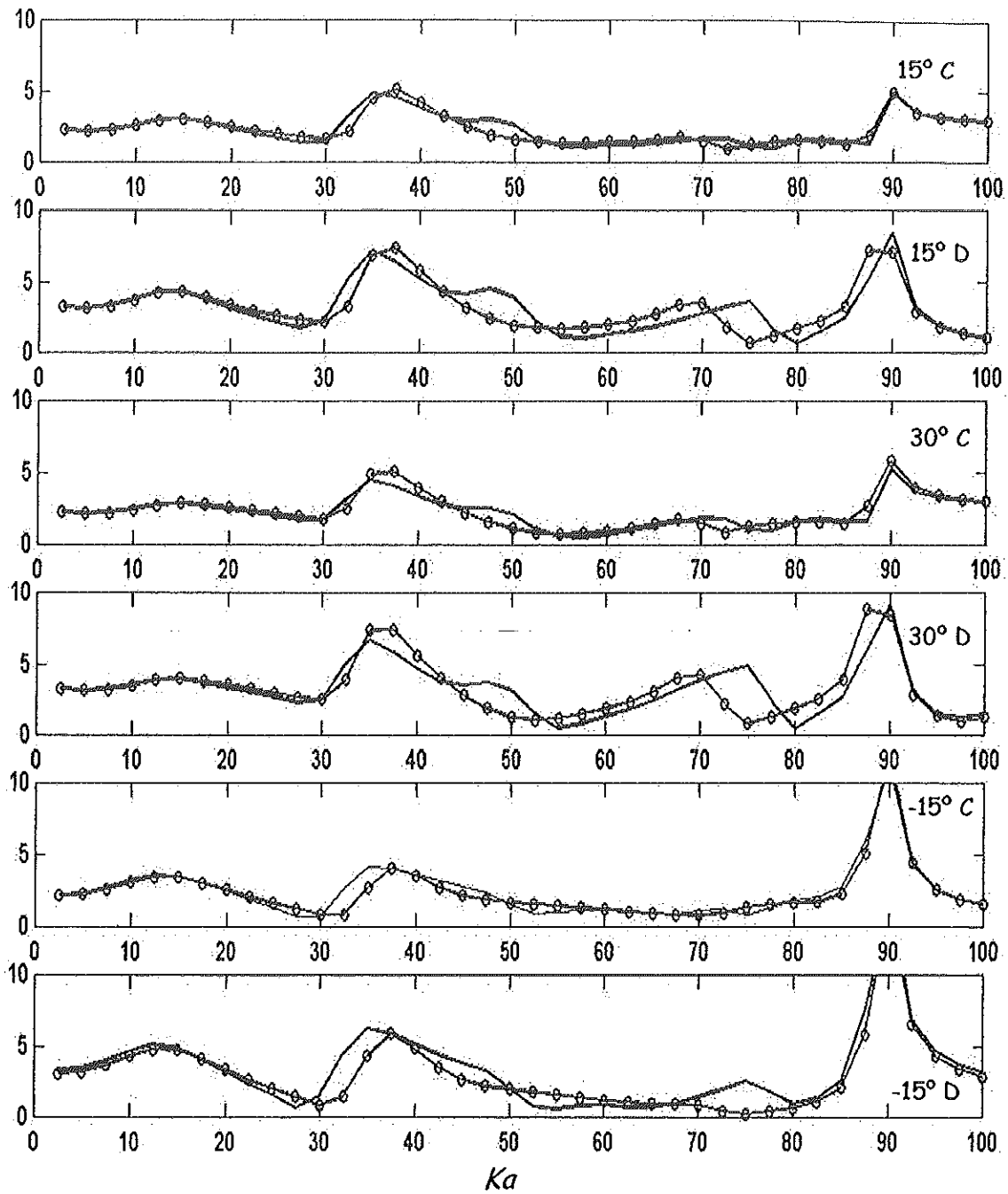


Figura 29. Factor de amplificación en C y D considerando el puerto — y sin considerar el puerto ○—○—○

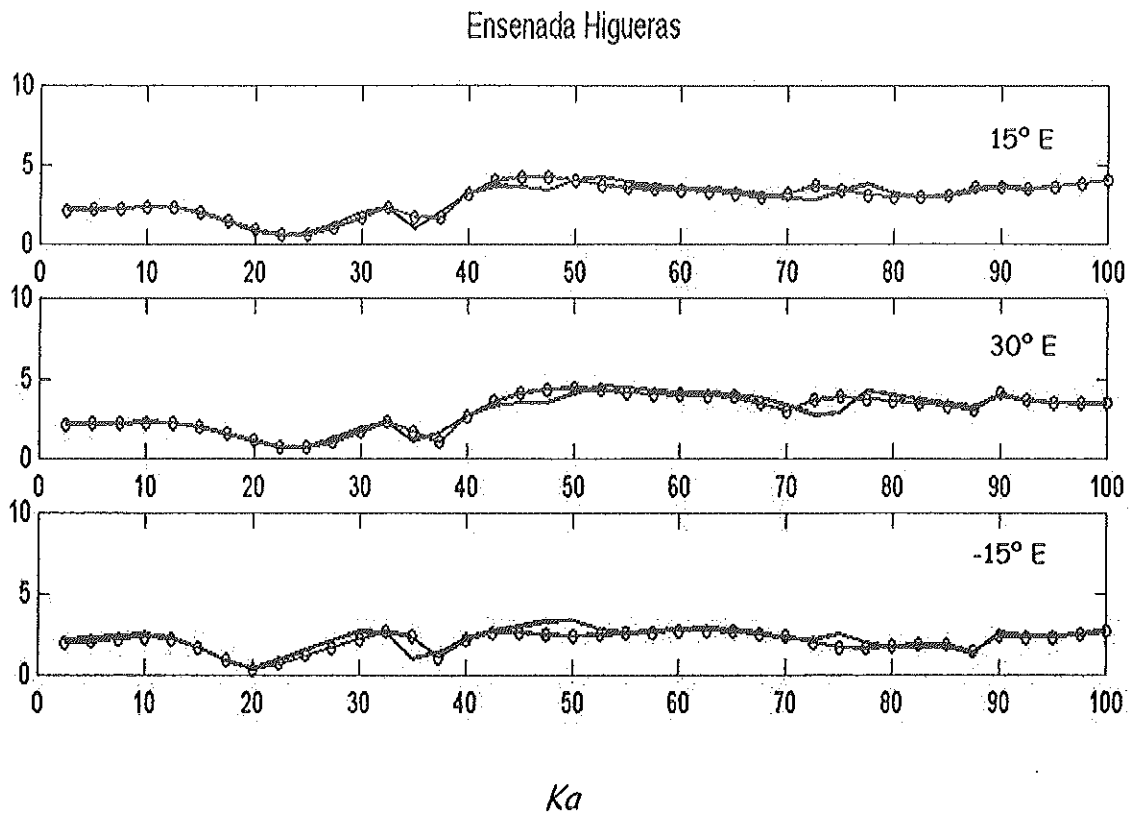


Figura 30. Factor de amplificación en E considerando el puerto ——— y sin considerar el puerto ○—○—○

En la bahía de Santiago (Figura 29), las amplificaciones máximas en el punto D cambiaron de $ka = 35$ a $ka = 37.5$ y de $ka = 90$ a $ka = 87.5$. La amplificación para $ka = 50$ ya no se presentó, y la que se observó para $ka = 75$ se desfasó hacia $ka = 70$.

La Figura 30 muestra que la ensenada Higueras no recibe mucha influencia del puerto, ya que los valores de amplificación presentan cambios muy ligeros.

6. CONCLUSIONES

Al analizar las 40 longitudes de onda, se puede observar que las ondas largas afectan mas a la bahía completa, con un factor de amplificación máximo de 4.9 cuando las ondas inciden con $\theta_i = -60^\circ$.

Se observaron 5 números de onda que provocan amplificaciones en los puntos A, B, C y D:

Ka	12.5	32.5 - 35	50	75 - 77.5	90
λ (km)	57	21 - 20	14	9.3 - 9	7.8

Las variaciones en el ángulo de incidencia de las ondas generan cambios en la respuesta de las bahías para ka mayores de 30 ($\lambda < 23$ km). Las bahías de Manzanillo y Santiago reciben oleaje con diversos ángulos de incidencia dependiendo de la época del año, y los tsunamis que se han registrado también han llegado de distintas direcciones, por lo que es importante considerar el ángulo de incidencia en el estudio de estos fenómenos.

Se observó que cambios pequeños en la configuración de la costa, por ejemplo al quitar el puerto, no parecen alterar significativamente la respuesta de las bahías.

Debido a que el modelo utilizado puede aceptar superficies con constante dieléctrica imaginaria es posible que se pueda simular costas absorbentes y con esto tener disipación de energía en la línea de costa.

Se recomienda un estudio mas profundo acerca de la funcionalidad del modelo para ángulos muy cercanos a la costa.

7. REFERENCIAS

- Borrero, J., Ortiz, M., Vasily, T., Synolakis, C. (1997). Field survey of Mexican tsunami produces new data, unusual photos. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*. Vol. 78, no. 8, pp 85 - 88.
- Farreras, S., Sánchez, A., (1991). The tsunami threat on the Mexican West coast: A historical analysis and recommendations for hazard mitigation. En: *Tsunami Hazard, a Practical Guide For Tsunami Hazard Reduction*. Editado por E. N. Bernard, Kluwer Academic Publishers, pp. 301-316, Holanda, 1991.
- Farreras, S., Domínguez-Mora R. (1996). *Tsunamis*. Fascículo No. 12, 24 pp. CONAPRED, Secretaría de Gobernación, 1996.
- Farreras, S. (1999). Los tsunamis en México, sus riesgos y prevención. *Memorias Del Programa De Extensión Educativa Del Subcomité Para La COI - UNESCO, CONALMEX - SEP*. 1ª edición, México, 1999, pp. 51 - 56.
- Galicia-Pérez, M.A., (1987). *Modelación hidrodinámica numérica de las Bahías de Manzanillo y Santiago*. Tesis de maestría, UNAM, Ciencias del Mar, Colegio de Ciencias y Humanidades. México, D.F.
- Gerber M., (1986). *Modelling disipation in harbour resonance*. *Coastal Engineering*, Vol. 10, pp. 211 - 252.

- González-Chavarin I., (1989). Dinámica de la línea de costa en base a cambios anuales del perfil en las Bahías de Manzanillo y Santiago. Tesis de Licenciatura, Universidad de Colima, Escuela Superior de Ciencias Marinas.
- Huang, L., Tuck, E.O. (1970). On the oscillations of harbours of arbitrary shape. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 42, part 3, pp. 447 - 464.
- Infoport, (1980). www.infoport.com.mx/manzanillo .
- Lee, J.J. (1971). Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry . *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 45, pp. 375 -394.
- Lee, J.J. (1998). Application of computer modelling for harbor resonance studies of Long Beach and Los Angeles harbor-basins. *Coastal Engineering, Proceedings of Coastal Engineering Conference*. Vol. 2, pp. 1196 - 1209.
- Maradudin, A.A., Michel, T., McGurn, A.R. and Méndez, E.R., (1990). Enhanced backscattering of light from a random grating. *Ann. Phys. (N.Y.)* 203, pp. 255 - 307.
- Mei, C. (1999). The applied dynamics of ocean surface waves. *Advanced Series on Ocean Engineering*, Vol. 1, 3rd reprint. World Scientific Publishing Co. pp. 183 - 252.
- Mendoza-Suárez, A., Méndez, E.R. (1997). Light scattering by a reentrant fractal surface. *Applied Optics*, 36 (15), pp. 3521 - 3531.

- Miles, J. and Munk, W. (1961). Harbor paradox. *Journal of the Waterways And Harbors Division. Proceedings of the American Soc. of Civil Engineers*. Vol. 87, No. WW3, pp. 11 - 130.
- Murakami, H. (1976). A solution for wave-induced oscillations in harbors considering energy dissipation. *Coastal Engineering in Japan*. Vol. 19, pp. 29 - 45.
- Negrete-Regagnon, P., Hernández-Walls, R., Ruíz-Cortés, V. (2000). Light scattering resonances in arbitrary-shaped one-dimensional reentrant surfaces. *Proceedings SPIE*, 4100:33-45.
- NOOA, (1994). Coastline extractor. <http://sea-mat.whoi.edu>.
- Rodríguez, C. (1996). Análisis numérico de oscilaciones inducidas en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas.
- Sears, F. W., (1967), *Fundamentos de Física, Volumen 1. Mecánica, Calor y Sonido*, Editorial Aguilar, S. A., 1971, 570 pp.
- Su, C.L. (1973). Asymptotic solutions of resonances in harbors with connected basins. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, pp. 375 - 391.
- Weiwen, Z. (1991). Hybrid element method for calculation of harbor resonance. *China Ocean Engineering*. Vol. 5, No. 2, pp. 203 - 212.

Zill, D. (1987). *Cálculo con Geometría Analítica*. Editorial Iberoamericana, 1014 pp.