

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



**ANALISIS ESPECTRAL DE IMAGENES DE RADAR
QUE CONTIENEN INFORMACION DE OLEAJE**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
O C E A N O L O G O
PRESENTA

VERONICA RIQUELME ALCANTAR

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

AGOSTO DE 1992

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**ANALISIS ESPECTRAL DE IMAGENES DE RADAR
QUE CONTIENEN INFORMACION DE OLEAJE**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

OCEANOLOGO

PRESENTA:

VERONICA RIQUELME ALCANTAR

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

AGOSTO DE 1992

RESUMEN

Durante observaciones realizadas en las localidades de Punta los Buenos, Ramona Beach y La Jolla en la costa noroeste de la península de Baja California, se registraron una serie de imágenes de la superficie del mar mediante un radar marino de uso común en embarcaciones (que opera en la banda X de las microondas) con el fin de obtener información acerca de la longitud y dirección de propagación del oleaje.

Se eligió de entre dichas imágenes la que presentó la mejor cobertura (11.1. km de alcance de radar) y donde los patrones de olas estuvieron mejor definidos. Se le aplicó la técnica del análisis espectral con el fin de analizar la variación del espectro direccional con respecto a la distancia y al ángulo de visión del radar para confirmar si éstos son parámetros importantes en la formación de una imagen de la superficie del mar.

Se observó que la variación del espectro bidimensional (direccional) está directamente relacionada con la distancia al radar; la energía reflejada de la superficie del mar para ésta imagen presentó una concentración de energía entre los dos y cinco kilómetros, ya que antes de éstos hay efectos costeros que ocasionan que la reflectividad sea alta y de manera uniforme, destruyendo cualquier patrón de variación periódico. Después de los cinco kilómetros se observó que hay efectos de sombreado ocasionados por olas mas cercanas que causan niveles bajos en la energía reflejada.

Así mismo, se observó que la variación del espectro con respecto al ángulo de visión del radar es debida principalmente a la variación en la dirección del viento, siendo entonces un factor muy importante la direccionalidad de las olas cortas.

Finalmente, se obtiene que mediante el análisis espectral de las imágenes de radar se tiene la posibilidad de obtener la dirección aproximada del viento local.

**ANALISIS ESPECTRAL DE IMAGENES DE RADAR
QUE CONTIENEN INFORMACION DE OLEAJE**

**TESIS
QUE PRESENTA:**

VERONICA RIQUELME ALCANTAR

APROBADA POR

C. Nava B.

Presidente del Jurado
M.C. Cuauhtémoc Nava B.

Sinodal Propietario
Dr. Francisco Javier Ocampo T.

Sinodal Propietario
Oc. Rafael Hernández W.

A LAS MUJERES MAS IMPORTANTES EN MI VIDA:

MI MADRE: MARICRUZ ALCANTAR

Y MIS HERMANAS: CLAUDIA, GABRIELA Y BELEM

AGRADECIMIENTOS

Al M.C. Cuauhtémoc Nava Button por su brillante colaboración y todo el apoyo brindado durante la realización de este trabajo.

Al Oc. Rafael Hernández Walls y al Dr. Francisco Ocampo Torres porque sus oportunas recomendaciones contribuyeron a corregir no pocos errores, lo cual les agradezco sinceramente.

De manera especial a Carlos López Famoza del Centro de Computo de CICESE por su valiosa ayuda durante el procesamiento de imágenes y por su maravillosa amistad.

Al grupo de Procesos Litorales (CICESE) donde he encontrado excelentes amigos y compañeros de trabajo, en especial a: Miguel Angel Tenorio, Roberto Padilla, Alejandro Lambert y Sergio Ramos.

Al grupo de Circulación y Dispersión Costera (CICESE) por las imágenes de radar proporcionadas y a Octavio Meillon quien gentilmente proporcionó la fotografía aérea.

A mis padres y hermanos por todo lo que han hecho por mí.

A mis amigos y a todas aquellas personas que colaboraron directa ó indirectamente en el desarrollo de este trabajo y a lo largo de mi trayectoria profesional. A fin de no hacer esta lista interminable a todas ellas mi más sincero agradecimiento.

Contenido

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	7
1.2 OBJETIVO	9
2 EL RADAR DE MICROONDAS	11
2.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO	13
2.2 FORMACIÓN DE IMÁGENES	14
3 METODOLOGÍA	21
3.1 OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL MAR	21
3.2 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS IMÁGENES	25
4 RESULTADOS	29
5 DISCUSIONES	62
6 CONCLUSIONES	70
7 BIBLIOGRAFIA	71

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
1	a) Fotografía aérea de la superficie del mar a una altura de 606 metros y b) fotografía de la pantalla de un radar operando desde un punto cercano a la costa.	5
2	Geometría que describen algunos de los radares para obtener imágenes de la superficie: a) radar de apertura real a bordo de una embarcación o con base en tierra, b) radar de apertura real a bordo de un avión y/o satélite c) radar de apertura sintética a bordo de un avión y/o satélite.	12
3	Diagrama básico del sistema de radar	13
4	Reflexión de las señales electromagnéticas de: a) una superficie lisa o suave (reflexión especular), b) una superficie ligeramente rugosa y c) una superficie rugosa (reflexión difusa).	15
5	Esquema que muestra la reflexión bragg. λ_r es la longitud de la onda electromagnética que emite el radar, λ_w es la longitud de las olas y θ_i es el ángulo de incidencia (Tomada de Mattie y Harris, 1979).	17
6	Espectro de olas que representa tres regiones importantes para la formación de la imagen de radar (Tomada de Elachi, 1977).	19
7	Sistema de registro de imágenes en la pantalla del radar.	25
8	Esquema de registro, almacenamiento y análisis de imágenes de radar.	26
9	Fotografía de la pantalla de radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en Punta los Buenos, Baja California en febrero de 1986.	30
10	Fotografía de la pantalla del radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en la localidad de Ramona Beach, Ensenada, Baja California en marzo de 1991.	31
11	Fotografía de la pantalla del radar obtenida en la localidad de Ramona Beach, Ensenada, Baja California en marzo de 1991.	32
12	Fotografía de la pantalla del radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en la localidad de La Jolla, Ensenada, Baja California en marzo de 1991.	33

13	Fotografía de la pantalla del radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en Punta los Buenos, Baja California en febrero de 1986 y que fue elegida para aplicar el análisis espectral.	35
14	Batimetría y localización del radar durante el registro de fotografías en Punta los Buenos, Baja California (Tomada de Álvarez, 1989)	36
15	Área de la imagen que fue digitizada para su análisis y distribución de las subimágenes.	38
16	Subimagen 0001. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	39
17	Subimagen 0002. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	40
18	Subimagen 0003. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	41
19	Subimagen 0004. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	42
20	Subimagen 0005. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	43
21	Subimagen 0006. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	44
22	Subimagen 0007. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, b) y d) espectro bidimensional.	45
23	Subimagen 0008. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	46
24	Subimagen 0009. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	47
25	Subimagen -1508. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	48
26	Subimagen -3005. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	49
27	Subimagen +1505. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	50
28	Subimagen +3004. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	51
29	Subimagen +9007. a) vista en perspectiva y b) tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional.	52
30	Energía total en función de la distancia, para cada uno de los ángulos de visión del radar.	57
31	Energía máxima en función de la distancia, para cada uno de los ángulos de visión del radar.	58

32	Energía total en función del ángulo de visión, para cada una de las distancias al radar.	60
33	Ángulo de propagación ($\theta_{o\max}$) para cada una de las subimágenes.	61
34	Energía promedio en función de la distancia, para cada uno de los ángulos de visión del radar.	65
35	Energía total por distancia (E_r), para cada uno de los ángulos de visión del radar.	67
36	Ángulo de propagación del oleaje en función del ángulo de visión del radar.	68

LISTA DE TABLAS

TABLA		PÁGINA
I	Parámetros del radar marino Raytheon.	22
II	Características espectrales de las subimágenes	54

1 INTRODUCCIÓN

Entre los movimientos más importantes de los océanos se encuentra el oleaje que es generado en la superficie del mar debido al esfuerzo del viento sobre ésta. Estas olas ocurren en todos los tamaños y formas dependiendo de la magnitud del esfuerzo del viento, de su duración y del área de la superficie del mar sobre la cual está actuando. Los principales parámetros que las describen son su longitud, altura, período y dirección de propagación.

La importancia de contar con información estadística confiable de los parámetros del oleaje, surge al tratar de comprender y predecir los procesos costeros relacionados con el transporte de sedimentos a lo largo de la costa (para el diseño de puertos y otros problemas de ingeniería costera). Por ejemplo, las olas pueden llegar a ocasionar modificaciones en la geomorfología costera, pues al disipar su energía ponen sedimento en suspensión y generan corrientes costeras que lo transportan. Estas corrientes dependen principalmente de la altura de las olas así como de su dirección y período.

En un estudio realizado por Dean (1982) se muestra que el registro de datos de oleaje es de gran utilidad para obras de ingeniería costera, ya que gracias a ésta información se pueden tener ahorros del orden de entre cien y mil millones de dólares anuales. Además, la seguridad de lugares comerciales o recreativos en la costa y la integridad de estructuras fuera de ésta dependen en gran medida de la calidad de la información del oleaje.

Desde el siglo pasado, el hombre ha recurrido primordialmente a reportes esporádicos de barcos para obtener información de las características globales de la superficie marina. Estos reportes han proporcionado información invaluable en el desarrollo de un mejor entendimiento de las olas superficiales, pero hoy en día éstos resultan insuficientes. Por esta razón se ha emprendido la búsqueda de nuevas técnicas para la observación y el registro de oleaje.

Los tipos y calidad de las mediciones de oleaje requeridos por investigadores y otros usuarios difieren dependiendo de la aplicación particular. Los parámetros del oleaje son importantes, por ejemplo; para el diseño de estructuras cerca de la costa, el diseño de rompeolas y la predicción de daños debido a oleaje generado por huracanes ó tsunamis. De estos parámetros, la dirección de propagación es uno de los procesos más importantes que ocurren a lo largo de las playas, ya que la dirección del transporte de sedimento está directamente relacionado a éste.

El espectro direccional del oleaje, es probablemente la mejor función para tratar de describir el fenómeno lo mas completamente posible. Representa la manera en que la energía total de las olas es distribuida en frecuencias de acuerdo a la dirección de propagación. En general, el espectro direccional de la olas, $S(f, \theta)$, puede ser expresado como

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta)$$

donde $S(f)$ expresa la distribución de la energía total de las olas en frecuencias, f , y $G(f, \theta)$ indica como se distribuye la energía de cada frecuencia en las diferentes direcciones θ .

Son muchos los estudios que se han llevado a cabo para obtener estimaciones adecuadas de la dirección de propagación del oleaje y del espectro direccional asociado (Munk *et al.*, 1963, Mitsuyasu, 1982, Donelan *et al.*, 1985, Ochoa y Delgado, 1990), no sólo para propósitos prácticos como el desarrollo de modelos de predicción, sino también para entender los procesos fundamentales que causan la generación de éste.

Entre las técnicas más utilizadas para obtener información sobre la dirección de propagación se tienen la fotografía aérea, los arreglos de sensores (para medir simultáneamente elevación, corriente y/o presión), y los sensores remotos.

La fotografía aérea es uno de los métodos mas antiguos para estimar la dirección de propagación del oleaje y consiste en tomar fotografías a un área determinada. Para áreas muy grandes, este método puede ser usado tomando fotografías desde un avión, con la ventaja de que éstas se pueden cubrir en un período de tiempo corto; sin embargo, sólo puede ser usado cuando las condiciones atmosféricas son favorables, y no puede ser utilizado durante la noche. El método por fotografía es básicamente la interpretación de una imagen de la superficie del mar que ha sido registrada a la luz del día. Debido a la gran cantidad de fotografías que se necesitan para realizar estudios estadísticos confiables, se tienen que llevar a cabo numerosos vuelos, lo cual eleva el costo de la obtención de datos.

La información sobre la dirección de olas también puede obtenerse mediante instrumentos sofisticados y costosos. Seymour (1978) presenta una revisión de ésta instrumentación "in-situ" usada para mediciones de oleaje y clasifica los sistemas en: boyas con acelerógrafos, registros de barcos, sensores de presión, correntímetros y "wave staffs". Sin embargo, al usar este equipo para conocer la dirección de olas, es necesario primero proponer una función analítica que describa la geometría de la superficie del mar y después calcular los coeficientes usados para determinar la dirección de las olas (Borgman, 1979).

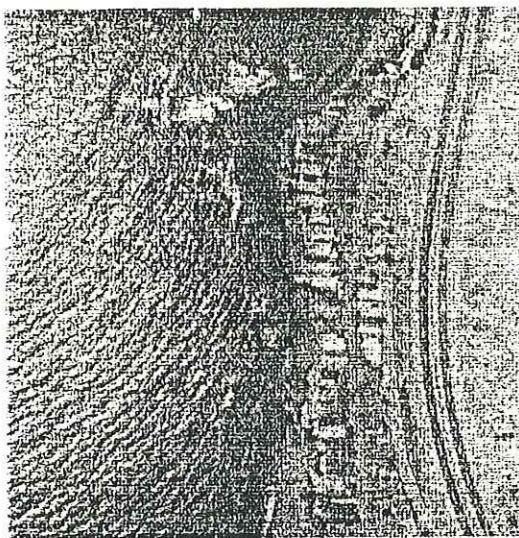
Para registros cerca de la costa, los sensores de presión son los instrumentos más populares. Estos sensores miden las variaciones de presión al pasar una ola sobre él. Presentan la desventaja de no medir satisfactoriamente olas cortas, aunque en aplicaciones en ingeniería esto no es significativo ya que algunas veces sólo las olas largas son importantes. Además el riesgo de pérdida en condiciones de tormenta, vandalismo o arrastre inadvertido por una red es muy alto. Presentan también el inconveniente de que el costo por mantener el equipo en continuo funcionamiento es alto y puede resultar inoperante. Una buena opción es

utilizar los registros de sensores de presión como complemento de algún otro método de muestreo más económico para obtener mayor información de la superficie del mar.

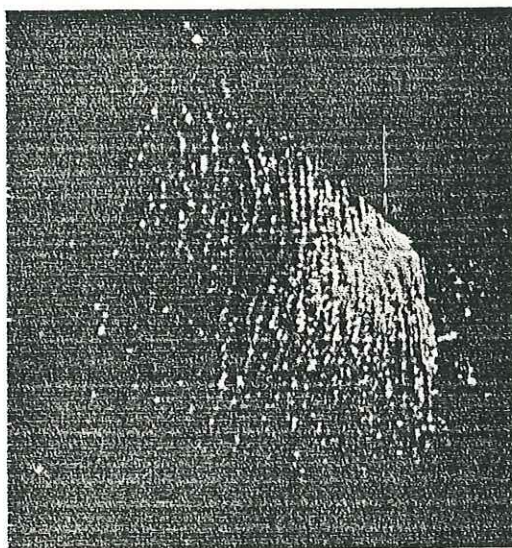
Para registros de olas en aguas profundas, las mediciones se hacen a través del movimiento de una boya que contiene un sensor que mide la aceleración vertical de la superficie del agua. De éstos, el método mas prometedor para medir las características direccionales del oleaje es una boya que puede medir simultáneamente la aceleración vertical, así como la inclinación de la superficie en dos direcciones ortogonales (heave-pitch-roll buoy), introducida por Longuet-Higgins *et al.*, (1963).

Recientemente se ha desarrollado una nueva familia de métodos basados en el uso de sensores remotos (específicamente, radares de microondas instalados en satélites, aviones, barcos o en tierra) para obtener información de la superficie del mar y poder estimar el espectro direccional de las olas marinas (McLeish y Ross, 1983, Young *et al.*, 1985 y Ziemer, 1991). Sus principales ventajas se resumen en: 1) capacidad para obtener datos de oleaje sobre áreas muy grandes, 2) posibilidad de muestrear bajo condiciones climáticas extremas, 3) son sistemas de relativamente bajo costo, y 4) pueden ser usados en forma autónoma (es decir sin que el hombre esté presente). La capacidad de penetrar nubes es uno de los factores más importantes para el uso de los radares de microondas, y su independencia del sol como fuente de iluminación permite que éstos instrumentos puedan ser utilizados por la noche.

En general, las imágenes de la superficie del mar obtenidas mediante radares presentan algunas de las características que se pueden observar en las fotografías aéreas y se tiene la oportunidad de identificar varios trenes de ondas. En la figura 1 se presentan, a manera de comparación, una fotografía de la superficie del mar y una fotografía de la imagen de radar operado desde un punto cercano a la costa.



a)



b)

Fig. 1. a) Fotografía aérea de la superficie del mar a una altura de 606 metros y b) fotografía de la pantalla de un radar marino operando desde un punto cercano a la costa.

Gracias a la gran cantidad de fotografías que se pueden obtener de la pantalla del radar, se pueden realizar estadísticas de oleaje mas precisas apoyadas en una mayor cantidad de datos. Aunque con este método se obtienen muy buenas estimaciones de la dirección de propagación del oleaje, aún son necesarias mediciones "in situ" de oleaje por métodos directos (como por ejemplo, sensores de presión o boyas) para realizar comparaciones de altura de ola con las mediciones realizadas con sensores remotos. Las imágenes de radar tienen la ventaja adicional, sobre los datos obtenidos mediante arreglos de sensores, de proveer evidencia visual de refracción cuando ésta se presenta (Mattie y Harris, 1979).

En años recientes se ha dado un interés considerable a la aplicación de los radares para medir oleaje y corrientes superficiales. Estos estudios se han realizado principalmente a través de diferentes tipos de radar como son: el radar de apertura real (RAR) y el radar de apertura sintética (SAR). Sin embargo, aún se requiere de mas investigación y desarrollo en el área de interacción de microondas con la superficie del mar antes de que puedan ser contestadas muchas preguntas sobre el uso efectivo de las imágenes de radar en el estudio del oleaje. Por ejemplo, mediante simulación numérica se ha demostrado la influencia de la direccionalidad de las olas pequeñas en el espectro del oleaje estimado a partir de imágenes de radar (Ocampo-Torres y Robinson, 1990), así como la importancia de las componentes del oleaje de longitudes mayores que la longitud de onda del radar (Hernández-Walls, 1992).

Por lo anterior, y debido a la necesidad de intensificar los estudios relacionados principalmente con el conocimiento de la dirección de propagación de las olas, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), a través del grupo Procesos Litorales, planteó y ha puesto en práctica el proyecto "Oleaje Mediante Sensores Remotos". Este proyecto tiene la finalidad de estudiar el uso de

los sensores remotos (principalmente el radar marino convencional) como instrumento de registro de oleaje. El presente trabajo representa una contribución a este proyecto.

1.1 ANTECEDENTES

A partir de los años cuarenta, el radar marino de microondas empezó a usarse abordo de barcos militares, y se observó que el océano actúa como un fuerte reflector de las señales electromagnéticas que emite el radar ocasionando grandes ecos o ruidos en la señal recibida. A esta señal no deseada se le dio a conocer como desorden o ruido del mar ("sea clutter"). Desde entonces, diseñadores y usuarios del equipo de radar han tratado de reducir dicho ruido. Al ser investigado de una manera mas amplia, se encontró que esa señal se hacía más intensa al incrementarse la velocidad del viento que sopla sobre la superficie del océano. Asi mismo, al ser analizadas algunas imágenes de radar se encontraron patrones de variación de intensidad que podían estar relacionados con el oleaje. Esto despertó el interés de los oceanógrafos por utilizar el radar para observar y medir el oleaje.

En 1958, se realizó un experimento en el canal del Puerto de Rotterdam (Oudshoorn, 1960) donde se hizo evidente que el radar podía resolver varios problemas sobre la información de patrones de ondas. Desde entonces, la reflexión de ondas de radar en la superficie del océano ha sido estudiada teórica y experimentalmente.

Crombie (1955), Ijima, Takahashi y Sasaki 1964) y Wright (1965) fueron probablemente los primeros en reportar el uso del radar de microondas para obtener imágenes de las olas. Pero fueron sin duda las observaciones de Crombie (1955) las que representaron el primer paso en la oceanografía por radio, al deducir correctamente que las ondas electromagnéticas son reflejadas difusamente por olas con una longitud de onda igual a la mitad de las ondas electromagnéticas viajando en dirección a la antena de transmisión. Esta conclusión la obtuvo a partir

de la observación del espectro doppler de las ondas electromagnéticas reflejadas por las ondulaciones de la superficie del mar con una longitud de onda de 22.2 metros. Años mas tarde Wright (1966) llevó a cabo una serie de mediciones de microondas sobre un canal generador de olas donde las condiciones podían ser controladas y mostró que la reflexión de las microondas con cierto ángulo de incidencia resulta del mismo fenómeno de resonancia que Crombie observó a altas frecuencias. La única diferencia es que las microondas resonaban con olas de longitud de onda muy corta (aproximadamente de 3 cm).

Oudshoorn (1960) y Mattie y Harris (1979) reportaron también la obtención de imágenes de olas mediante un radar marino convencional. Pero estos investigadores únicamente inspeccionaron visualmente las imágenes de radar para obtener información de la dirección, la longitud de onda y el período del oleaje. Mattie *et al.* (1981), Hoogeborn y Rosenthal (1982), Ziemer y Rosenthal (1983), Young *et al.* (1985) y Attanasov *et al.* (1985) extendieron estos primeros hallazgos al digitizar las imágenes de radar y encontrar el espectro bidimensional y tridimensional de estas imágenes, mostrando que el espectro de las imágenes de radar digitizadas es sorprendentemente similar al espectro obtenido simultáneamente con datos de boyas y/o sensores de presión. Con esto se hizo evidente que a partir del espectro bidimensional de las imágenes obtenidas mediante radares de microondas se puede obtener información de utilidad acerca de la dirección de propagación del oleaje, a pesar de la ambigüedad de 180 grados en los espectros resultantes. Sin embargo, para espectros de oleaje relativamente sencillos esta ambigüedad puede ser eliminada suponiendo que la dirección del oleaje esta muy cercanamente relacionada con la dirección del viento para oleaje generado en la zona de estudio (Young *et al.*, 1985). Attanasov (1985) ha mostrado que la ambigüedad direccional puede ser eliminada utilizando 2 imágenes separadas por un corto intervalo de tiempo.

Definitivamente, aún son necesarios más trabajos teóricos y experimentales para relacionar de manera absoluta el espectro direccional de la imagen de radar con el espectro de las olas superficiales, ya que se ha observado que el espectro obtenido de la imagen de radar varía de acuerdo al ángulo de visión del radar, magnitud y dirección del viento, temperatura aire-mar, etc.

1.2 OBJETIVO

Para llegar a utilizar los radares como instrumentos de medición del espectro direccional de las olas, es necesario primero establecer una función de transferencia que nos permita obtener el espectro direccional de las olas a partir del espectro direccional de la imagen obtenida con el radar.

Recientemente, se han utilizado métodos numéricos para determinar la influencia de la direccionalidad de las olas pequeñas (que son las principales reflectoras de las microondas) y se ha demostrado que la dirección del viento (y por lo tanto la dirección de propagación de las olas pequeñas) con respecto a la dirección de visión del radar, es una variable importante, especialmente cuando las olas pequeñas presentan un cierto grado de direccionalidad (Ocampo-Torres y Robinson, 1990).

Como objetivo principal de este trabajo se pretende obtener el espectro direccional de una imagen de radar en la que se detecte información del oleaje y analizar su variabilidad con respecto a la distancia y al ángulo de visión del radar.

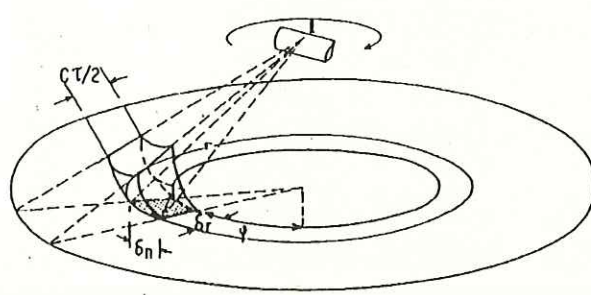
La organización del resto del trabajo es como sigue: en el segundo capítulo hablaremos del radar de microondas: principios de funcionamiento, mecanismos de reflexión de microondas y la formación de imágenes. En el tercero se presentan los métodos de obtención y de análisis de las imágenes de la superficie del mar usando un radar marino

convencional. Los resultados y discusiones se presentan en los capítulos cuatro y cinco respectivamente, y finalmente, en el capítulo seis, se presentan las conclusiones de este trabajo.

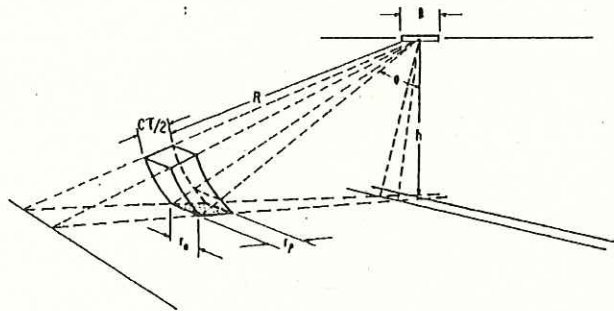
2 EL RADAR DE MICROONDAS

El término radar se deriva de su definición en inglés "Radio Detecting And Ranging", o sea, la determinación de la dirección y la distancia por medio de las ondas de radio. El término fue inventado en un tiempo cuando la detección de barcos y aviones y la determinación de su posición era el propósito primario del radar. El término radar, sin embargo, es aplicable a cualquier dispositivo que emite ondas electromagnéticas y recibe las que son reflejadas por la superficie de los objetos iluminados. Midiendo el tiempo de recorrido de estas ondas y tomando en cuenta su dirección de propagación se puede determinar la dirección y la distancia de cualquier objeto que refleje las microondas.

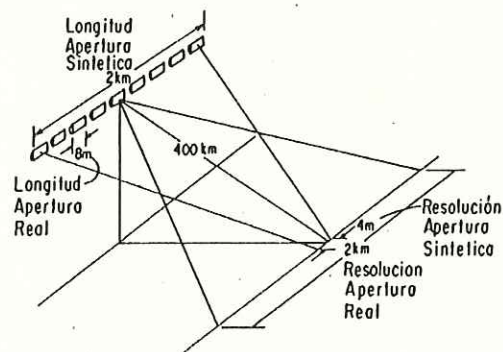
La geometría que describen los diferentes tipos de radares utilizados para obtener imágenes de la superficie del mar se muestra en la figura 2. En los tres casos la distancia se determina transmitiendo un pulso angosto y midiendo el tiempo de retorno de la señal y proveen una imagen bidimensional en la que cada punto que la forma tiene una brillantez proporcional a la energía reflejada (proporcional a la rugosidad de la superficie del mar en ese punto). Sin embargo, la cobertura y la resolución de cada sistema difieren en cada caso. En el radar con base en tierra o a bordo de una embarcación (figura 2a), la antena hace mecánicamente (o electrónicamente) un barrido en azimut para alcanzar a cubrir una área más amplia. En el sistema de la figura 2b el área cubierta se logra por el movimiento de la antena al ser transportado por un avión y/o satélite. Estos dos sistemas se basan en técnicas de apertura real (RAR) donde la resolución espacial depende de la longitud de la antena que utilizan. En la técnica de apertura sintética (figura 2c) un sistema coherente de radar registra la amplitud y la fase de cada eco produciendo una imagen con alto poder de resolución, la cual es independiente de la distancia del radar a la superficie (Tomiyasu, 1978). El sistema SAR ha sido utilizado con éxito en la aviación y/o en satélites, permitiendo de esta manera observar grandes áreas del océano con muy buena resolución.



a)



b)



c)

Fig. 2. Geometría que describen algunos de los radares para obtener imágenes de la superficie del mar: a) radar de apertura real a bordo de una embarcación o con base en tierra, b) radar de apertura real a bordo de un avión y/o satélite y c) radar de apertura sintética a bordo de un avión y/o satélite.

De los diferentes tipos de radar utilizados para la observación de patrones de olas cerca de la costa, es el propósito de este trabajo el utilizar únicamente imágenes obtenidas mediante un radar marino convencional (RAR), ya que su uso nos trae importantes ventajas económicas en comparación con radares montados a bordo de aviones o satélites y principalmente debido a que en México tenemos un mejor acceso a ellos, ya que los encontramos a bordo de barcos y en estaciones costeras.

2.1 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO

Como se muestra en la figura 3, el equipo básico de radar marino consta de un transmisor que genera las señales electromagnéticas, un explorador giratorio (la antena) que emite y recibe las señales y una pantalla en la que la señal recibida es presentada en forma analógica.

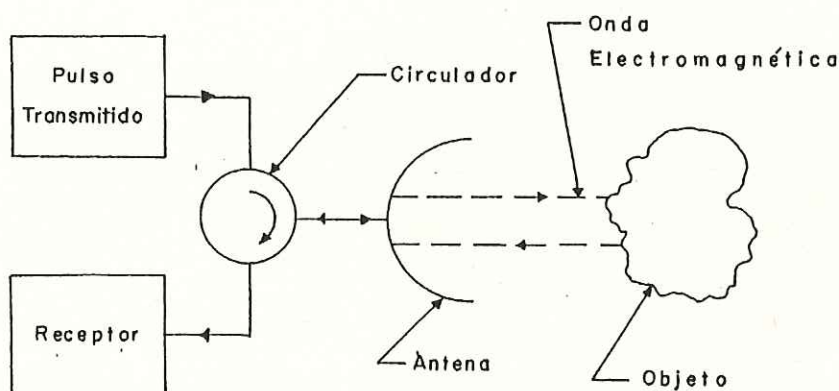


Fig. 3. Diagrama básico del sistema de radar.

Los objetos son detectados en el radar iluminando la escena con pulsos de energía electromagnética con frecuencias de microondas que van de 1000 a 35,000 millones de ciclos por segundo. Cuando el tren de ondas enviado por el radar choca contra algún objeto cuya superficie presenta

un cierto grado de rugosidad, una cierta cantidad de energía es reflejada generalmente en muchas direcciones, pero sólo una pequeña cantidad de energía viaja de regreso al punto de transmisión. Los pulsos del radar se programan de manera que cada señal dé en el objetivo y rebote antes de que se emita la siguiente. Como las ondas de radio viajan a la velocidad de la luz (300,000 km/s) la programación del pulso se mide en microsegundos (p.ej. en 1 μ s recorren 300 metros). Midiendo el tiempo que tarda la señal en regresar, se puede calcular la distancia al objetivo.

Si el objeto está en movimiento, la señal de retorno es de frecuencia ligeramente diferente de la emitida. Esto se llama efecto Doppler, y se debe al amontonamiento de las ondas electromagnéticas si el objeto en movimiento se acerca, o a su dispersión si se aleja.

En la pantalla del radar se produce una imagen circular (donde el centro del círculo corresponde a la posición de la antena) cuyo poder resolutivo se puede calcular en dirección radial y tangencial. La resolución radial δ_r depende de la duración del pulso, τ , según la relación $\delta_r = \frac{1}{2}c\tau$ (c es velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas). La resolución tangencial δ_n (en dirección normal al radio) depende de la distancia r y del ancho horizontal del haz $\delta\theta$ que emite la antena del radar de acuerdo a $\delta_n = r\delta\theta$ (las antenas más largas producen haces más angostos y por consiguiente, se obtiene mejor resolución tangencial). La reflexión de las microondas depende en gran medida del material del objeto con las que éstas interactúan (tamaño, corte, y orientación de la superficie)

2.2 FORMACIÓN DE IMÁGENES

Al ser emitida una señal desde el radar, parte de la energía transmitida regresa a la antena del radar mediante dos mecanismos de reflexión que dependen básicamente de la rugosidad de la superficie y del ángulo de incidencia de la radiación. Estos son:

- a) Reflexión especular

b) Reflexión difusa

En la reflexión especular, la señal es reflejada hacia el radar únicamente por superficies que son perpendiculares a la dirección de propagación de la señal del radar. En superficies planas la reflexión solamente es especular.

En superficies rugosas las ondas electromagnéticas llegan a las diversas partes de la superficie bajo diferentes ángulos, y por lo tanto se reflejan en direcciones distintas. Como resultado, las ondas reflejadas de esta superficie son difusas (figura 4).

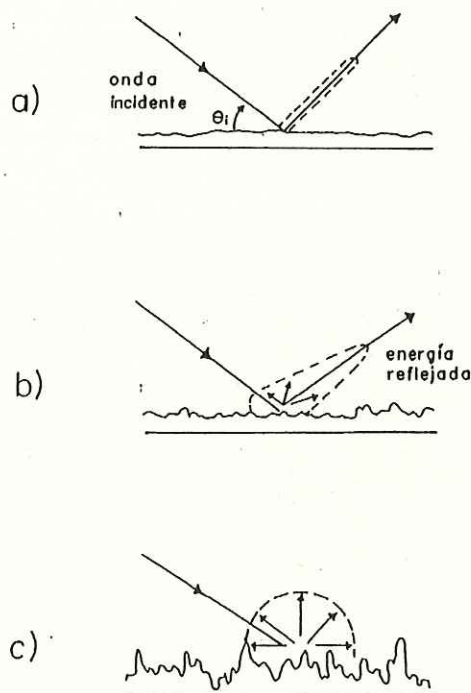


Fig. 4. Reflexión de las señales electromagnéticas de: a) una superficie lisa o suave (reflexión especular), b) una superficie ligeramente rugosa y c) una superficie rugosa (reflexión difusa).

La superficie rugosa también puede producir reflexión especular y la proporción entre ésta y la reflexión difusa depende del ángulo con el que las ondas electromagnéticas inciden sobre ella (ángulo de incidencia, θ_i). La reflexión especular de ondas electromagnéticas que inciden sobre la superficie del mar es importante sólo para ángulos de emisión γ entre 0 y 15 grados (Valenzuela, 1978). Los radares utilizados como altímetros en satélites y aeroplanos obtienen la señal por reflexión especular principalmente. Para ángulos de emisión entre 15 y 80 grados (el rango exacto de los ángulos esta en función de la rugosidad de la superficie del mar) el mecanismo que explica la recepción de la señal es la reflexión difusa, principalmente cuando se utilizan radares convencionales.

Desde el trabajo de Crombie (1955), es generalmente aceptado que la reflexión difusa de la superficie del océano es posible cuando la rugosidad de la superficie del mar contiene componentes con longitudes de onda λ_b definidas como $\lambda_b = \lambda_r/2$.

Wright (1968) encontró que

$$\lambda_b = \frac{\lambda_r}{2 \sin \theta_i}$$

donde θ_i y λ_r son, respectivamente el ángulo de incidencia y la longitud de las ondas emitidas por el radar. Esta es la relación conocida como la "ecuación Bragg", formulada por vez primera por el físico inglés William Lawrence Bragg en 1912 al realizar estudios sobre la reflexión de los rayos X en estructuras de cristales (Encyclopaedia Britannica, 1974) y que a partir de los resultados de Crombie (1955) fue adaptada por Wright (1968) a estudios de oleaje (figura 5).

En estos trabajos se ha considerado que las componentes simples del sistema de olas superficiales llamadas ondas Bragg (que satisfacen la

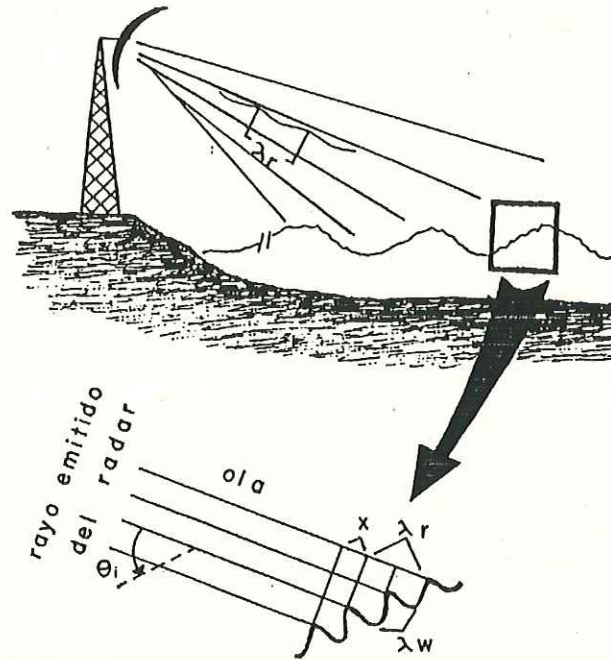


Fig. 5. Esquema que muestra la reflexión bragg. λ_r es la longitud de la onda electromagnética que emite el radar, λ_w es la longitud de las olas y θ_i es el ángulo de incidencia (Tomada de Mattie y Harris, 1979).

condición Bragg) son las principales reflectoras de la radiación electromagnética por la superficie del océano bajo ciertas condiciones oceánicas.

Sin embargo, las suposiciones implícitas respecto a la rugosidad de la superficie del mar y el requisitos de ausencia de ondas de longitudes intermedias son motivos para que se trate de explicar la reflexión difusa de las microondas mediante algunos mecanismos adicionales (Valenzuela, 1978, Ocampo-Torres y Robinson, 1990). En particular Hernández-Walls (1992) elimina estos requisitos con el fin de estudiar la influencia de la componentes de longitudes intermedias entre las ondas Bragg y aquellas mas largas.

Las olas de pequeña escala (gravitatorias-capilares) son moduladas en orientación, amplitud y velocidad por olas grandes y largas y es precisamente esta modulación la que vuelve detectables las olas largas por los radares de microondas y por consiguiente contribuye a la formación de la imagen en el radar. La modulación de las ondas Bragg se presenta en la pantalla del radar como imágenes de la superficie marina con propiedades espectrales similares a las del campo de olas marinas (Wright, 1978).

Los fenómenos físicos que causan que las olas formen la imagen es discutido por varios autores y resumido por Elachi (1977). Propone que al examinar las propiedades de las imágenes de radar, el espectro de la superficie de mar sea dividido en tres regiones (figura 6):

- 1) $\kappa_b = 2\kappa_r \sin \theta$. Región de olas gravitatorias-capilares que provocan la reflexión hacia el radar. Para señales de radar de alta frecuencia (λ_r del orden de cm) la reflexión Bragg es el principal mecanismo de reflexión.
- 2) $2\pi/2R < \kappa_b$, donde R es la resolución de la imagen. Las olas en esta región no pueden ser vistas individualmente así que cada elemento en la imagen de radar corresponde a la composición del σ_0 que explica la contribución de todas las inclinaciones posibles de las olas en esta región del espectro. Para una imagen de radar de resolución de 25 metros, esta región espectral cubre todas las olas con longitud de onda menores de 50 m.
- 3) $\kappa_b < 2\pi/2R$. Todas las olas de esta región tienen una longitud de onda larga. Esta cubre todo el swell y olas producidas por viento de cerca de 18 nudos.

La intensidad de la señal reflejada en cada punto de la superficie iluminada varía espacialmente. Esta variación espacial es precisamente la que da lugar a que se pueda construir una imagen de la superficie. Esta

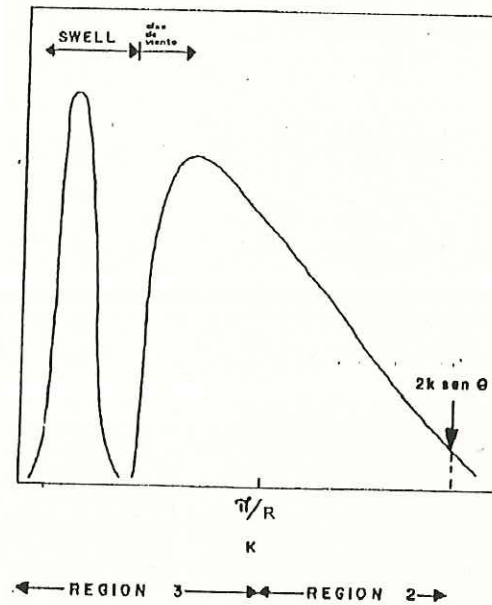


Fig. 6. Espectro de olas que representa tres regiones importantes para la formación de una imagen de radar (Tomada de Elachi, 1977).

intensidad es expresada en terminos del "normal radar cross section (σ_0)", el cual es la razón de la energía reflejada E_r con respecto a la emitida E_i a cierto ángulo vertical de emisión y está dado por

$$\sigma_0 = \frac{4\pi r^2 \langle |E_r|^2 \rangle}{\text{área} \langle |E_i|^2 \rangle}$$

donde

$$E_r = \frac{\kappa_r E_i e^{i\kappa_r}}{i2\pi r} \iint g_{pq} (\cos \theta_i + \eta_x \sin \theta_i) e^{i2\kappa_r (-x \sin \theta_i + \eta \cos \theta_i)} dx dy$$

y g_{pq} es el coeficiente de reflexión difusa (Hernández-Walls, 1992), r es la distancia y $\kappa_r = 2\pi/\lambda_r$, x es la dirección de visión del radar y η es la superficie del mar.

El radar marino convencional provee una imagen bidimensional en la que cada punto que la forma tiene una brillantez proporcional al σ_0 de la superficie del mar. A su vez la imagen formada dependerá de la rugosidad de la superficie, la inclinación local y de la direccionalidad de las olas pequeñas. A su vez, la rugosidad de la superficie del mar esta relacionada con el viento local, tensión superficial y corrientes superficiales.

La distancia a la cual las olas originan una señal detectable para el radar depende de muchos factores incluyendo la elevación de la antena, la altura y la longitud de onda de las olas gravitatorias y las condiciones atmosféricas imperantes.

3 METODOLOGÍA

Este trabajo está basado en la obtención de imágenes de la superficie del mar que muestran información del oleaje. El sistema de adquisición de estas imágenes constó principalmente de un radar marino convencional y una cámara fotográfica, ambos instalados en el interior de una estación de trabajo móvil.

Primeramente se buscaron lugares apropiados donde el radar pudiera operar satisfactoriamente. Para lograr este propósito, la estación de trabajo se remolcó hasta sitios accesibles de la costa buscando siempre que el radar tuviera una visión óptima. Se obtuvieron registros desde acantilados de 10 a 20 metros, aunque se ha observado que para obtener información de oleaje el radar puede operar desde la playa (Alvarez, 1982). Los registros se llevaron a cabo bajo diferentes condiciones atmosféricas (viento) y oceánicas (oleaje, batimetría, etc).

Los datos se obtuvieron fotografiando la pantalla del radar, operándolo bajo diferentes grados de exposición al oleaje distante y local. Posteriormente las imágenes fueron tratadas numéricamente con técnicas de análisis de Fourier para analizar la variación de las características espectrales de las olas presentes durante la toma de la fotografía.

Además de las imágenes de la superficie del mar se obtuvieron simultáneamente registros de viento, para lo cual se utilizó un anemómetro con una precisión de $\pm 5^\circ$ en dirección y de $\pm 0.25 m/s$ en rapidez.

La técnica de campo para obtener las imágenes de la superficie del mar y la técnica del análisis numérico utilizados para cumplir con el objetivo del trabajo se describen a continuación.

3.1 OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL MAR

El radar utilizado fue un radar marino Raytheon de uso común en embarcaciones, que opera en la banda X de las microondas ($\lambda_r = 3 cm$) y que consiste de tres unidades principales: la antena y pedestal, la pantalla, y

un modulador-transmisor-receptor. En la parte exterior del remolque se instaló una torre que sostiene a la antena utilizada para transmitir y recibir la señal, la cual se elevó hasta una altura de aproximadamente 4 metros sobre el nivel del terreno. Algunos detalles de los parámetros del radar se muestran en la Tabla I (una descripción completa de éstos y sus propiedades es dado en Raytheon, 1978).

TABLA I. Parámetros del radar marino Raytheon.

PARÁMETRO	VALOR		
Frecuencia (f)	9375 +- 30 MHz		
Longitud de la onda electromagnética(λ_r)	3.2 cm		
Potencia máxima de salida de la onda transmitida	25 KW		
Longitud de la antena	3.6 m		
Velocidad de rotación de la antena	33 rpm		
Ancho horizontal del haz de electrones	0.65 grados		
Diámetro del haz de electrones	0.3 mm		
Diámetro de la pantalla	0.3 m		
Rango de operación (Km)	5.5	11.1	22.08
Ancho del pulso (μs)	0.06	0.5	0.5
Resolución radial (m)	9	75	75
Resolución tangencial (m)	62	125.1	248.8

Para suministrar la energía eléctrica requerida por el radar se utilizó una planta generadora portátil de 1500 Watts de potencia, o bien, simplemente se hizo conexión al sistema de energía doméstica donde hubo disponibilidad.

Para poder llevar a cabo el registro de datos fue necesario que la pantalla del radar presentara una buena imagen y para ello se realizaron varias pruebas ajustando los diferentes controles manuales del radar. Los parámetros controlados son:

- a) *brillantez*: se utiliza para controlar la intensidad de luz de la pantalla.
- b) *ganancia*: amplificador de energía.
- c) *contraste*: selecciona la cantidad de luz para asignársela al nivel de brillo de cada señal que regresa y que es mostrada en la pantalla.
- d) *ruido del mar*: elimina la señal que es ocasionada por la reflexión de olas o por la espuma del mar. Se tuvo especial atención en la manipulación de este control, pues el objetivo de este trabajo era precisamente obtener fuertes señales de retorno de la superficie del mar.
- e) *alcance*: es un interruptor que selecciona cualquiera de los 11 alcances disponibles. A través de muchas pruebas se decidió trabajar únicamente con alcances de 1.38, 2.77, 5.55 y 11.11 kilómetros; sin embargo, se incluyeron mediciones con el alcance mínimo que es de 0.92 kilómetros.

Una vez ajustado el sistema a nuestra conveniencia, las imágenes se obtuvieron fotografiando la pantalla del radar. Se colocó el interruptor de la antena en posición de encendido y el control de ruido se movió completamente a favor de la manecillas del reloj para obscurecer completamente la pantalla. Posteriormente cuando la antena del radar que estaba barriendo pasaba de ver la tierra al mar el control de ruido se movía completamente en sentido contrario para que apareciera el oleaje en la pantalla y entonces era tomada la fotografía.

Para realizar el registro de fotografías, el obturador de la cámara se colocó en posición de bulbo y se cerró después de 1 a 2 segundos de exposición dependiendo de la luminosidad de la pantalla del radar y de la reflectividad del oleaje dominante. La película entonces avanza automáticamente dejando la cámara lista para la siguiente exposición. El control de ruido se volvió a su posición inicial y se esperó (aproximadamente 2 segundos) a que desapareciera por completo la brillantez en la pantalla para que en la siguiente fotografía no quedara información de la imagen anterior.

El sistema fotográfico fue montado a la pantalla del radar como se muestra en la figura 7. Este sistema estaba compuesto por una cámara Hasselblad modelo ELM/500 de formato mediano con un lente "Carl Zeiss" de 100 mm al cual le fue adaptada una lentilla de acercamiento de enfoque a 1 metro. La película utilizada para la toma de fotografías fue Verichrome-Pan VP120 y fue procesada con revelador D-76 diluido 1:1 para la obtención del negativo, y papel blanco y negro de contraste variable para la impresión de la fotografía. Esto se llevó a cabo a bordo del remolque ya que también fue acondicionado como cuarto oscuro para el revelado de la película.

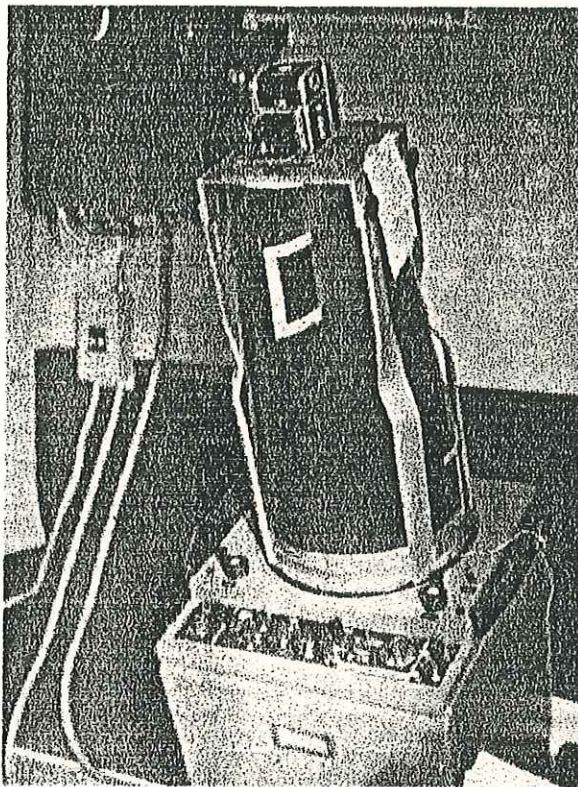


Fig. 7. Sistema de registro de imágenes en la pantalla del radar (Tomada de Hernández-Walls, 1986).

3.2 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS IMÁGENES

Con el fin de investigar la variación de las características espectrales de las imágenes con respecto a la distancia y dirección de visión del radar θ , las imágenes fueron digitizadas y particionadas en pequeñas secciones (o subimágenes).

La digitización se llevó a cabo utilizando un rastreador Scan Jet Plus Hewlett Packard que resuelve la imagen en 16 ó 256 niveles de grises, generando de esta manera una matriz en la que el valor de cada elemento representa la intensidad de la energía reflejada en cada punto.

El esquema de trabajo considerado es similar al utilizado por Young *et al.* (1985) (figura 8). Las imágenes digitizadas fueron transferidas al disco fijo de la SUN 3/50 para su análisis. Con la ayuda del paquete de software PV-WAVE P&C se extrajeron las secciones de 128 X 128 puntos.



Fig. 8. Esquema de registro, almacenamiento y análisis de imágenes de radar.

Para obtener los espectros direccionales de cada imagen se considera a la función de intensidad $s(x,y)$ (con un rango posible de valores de 0 a 15 unidades arbitrarias (u), sobre un área rectangular que puede ser representada como la suma de armónicos senoidales de la forma

$$s(x,y) = \Re \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M A_{lm} e^{i(\kappa_l x + \kappa_m y)}$$

donde A_{lm} es la amplitud compleja del armónico que tiene κ_l y κ_m como componentes de su número de onda, en las direcciones x y y respectivamente.

Los espectros de la imagen son una representación de la varianza de la señal a diferentes frecuencias y fueron estimados a partir del producto de los coeficientes complejos de Fourier mediante

$$S(\kappa_x, \kappa_y) = \langle A_{lm} A_{lm}^* \rangle$$

donde el complejo conjugado está indicado con $*$ y $\langle \rangle$ quiere decir el promedio sobre todas las realizaciones posibles.

Los coeficientes de Fourier pueden ser obtenidos mediante la transformada de Fourier, la cual es una representación en el dominio de frecuencia de una función y que contiene exactamente la misma información que la función original.

Así, los coeficientes de Fourier de la imagen están dados por:

$$A_{lm} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M s(x,y) e^{-i(\kappa_l x + \kappa_m y)}$$

donde $N = LM$.

Esta ecuación muestra que la amplitud de una componente en el dominio del número de onda puede considerarse como un promedio pesado de todos los niveles de intensidad de la imagen (Tucker, 1985).

Los coeficientes fueron calculados para cada uno de los segmentos en que fue dividida la imagen original con ayuda de un programa en lenguaje Fortran que contiene el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Brigham, 1974).

El vector número de onda $\mathbf{K}$, con componentes κ_x y κ_y , tiene magnitud dada por

$$|\mathbf{K}| = \sqrt{\kappa_x^2 + \kappa_y^2}$$

donde $\kappa_x = K \cos \theta$ y $\kappa_y = K \sin \theta$.

Para cada sección se determinó la energía total así como los números de onda ($\kappa_{xmax}, \kappa_{ymax}$) del componente de mayor energía y el valor de ésta. Se calculó la dirección de propagación de la señal con esos números de onda y esa dirección se tomó como la de propagación del oleaje ($\theta_{max} = \arctan(\kappa_{ymax}/\kappa_{xmax})$).

4 RESULTADOS

El primer conjunto de imágenes fue proporcionado por el grupo de Circulación y Dispersión Costera (CICESE) y fueron adquiridas durante un experimento llevado a cabo en la localidad de Punta los Buenos, B.C. en enero y febrero de 1986 (Alvarez, 1989). La figura 9 es una imagen obtenida durante este período utilizando un alcance de radar de 5.5 km.

En un segundo experimento, la estación de trabajo se trasladó a las localidades de Ramona Beach y La Jolla, en Ensenada, B.C. de enero a abril de 1991. Las figuras 10 y 11 son imágenes obtenidas en la localidad de Ramona Beach en marzo de 1991 a un alcance de radar de 2.77 km; el viento, al ser tomadas las fotografías, tenía una dirección de 260° y rapidez de 5.5 m/s para la figura 10, mientras que para la figura 11 no había viento al ser registrada la fotografía.

La figura 12 es una imagen obtenida durante el mismo período de tiempo en la localidad de La Jolla; el alcance de esta imagen es de 1.38 km y el viento al ser tomada la fotografía tenía una dirección de 240° y una rapidez de 10 m/s.

En la figuras 9, 10 y 12 se observan líneas bien definidas que están relacionadas con las crestas de las olas. En la figura 11 esto no es tan claro.

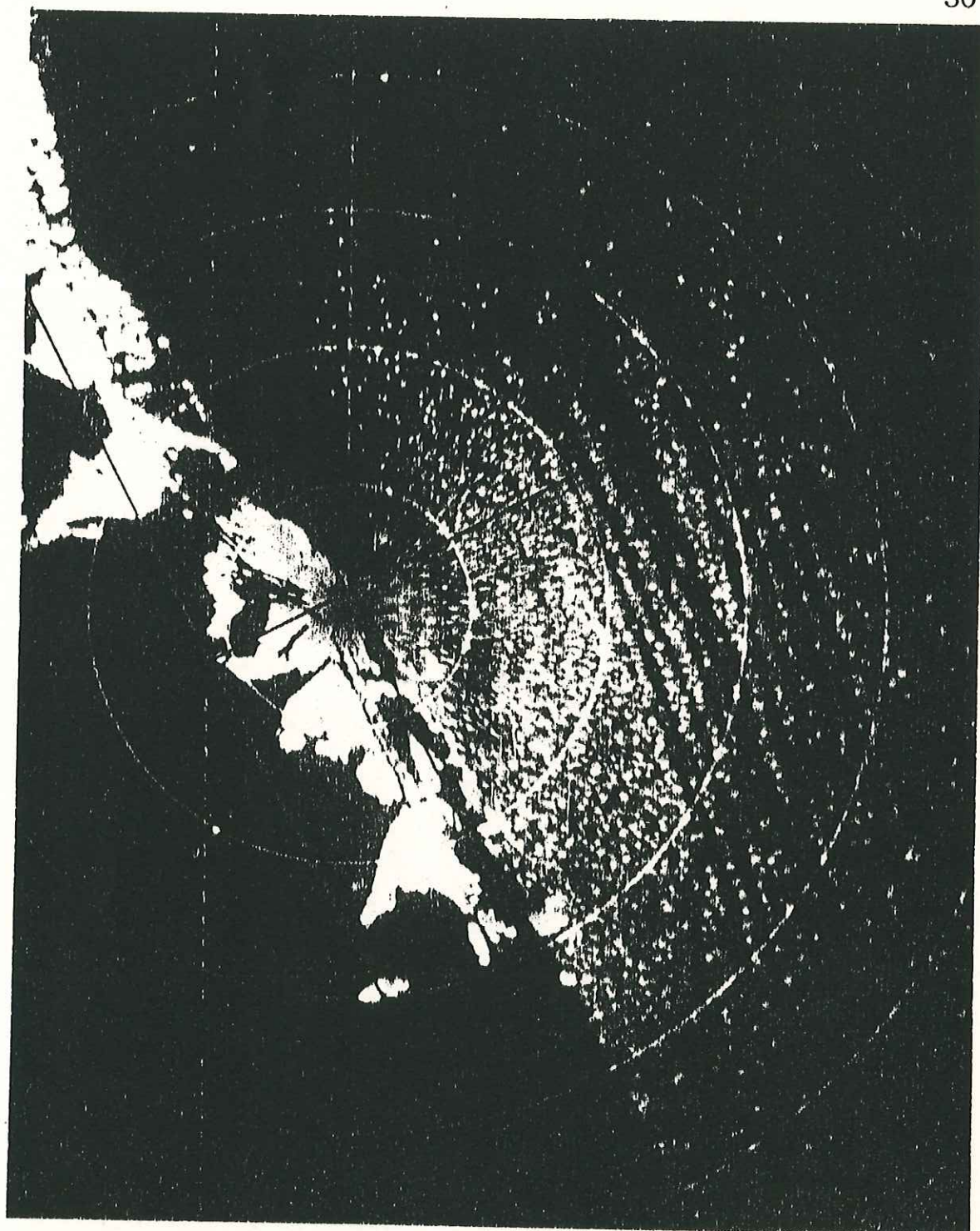


Fig. 9. Fotografía de la pantalla del radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en Punta los Buenos, Baja California en febrero de 1986.

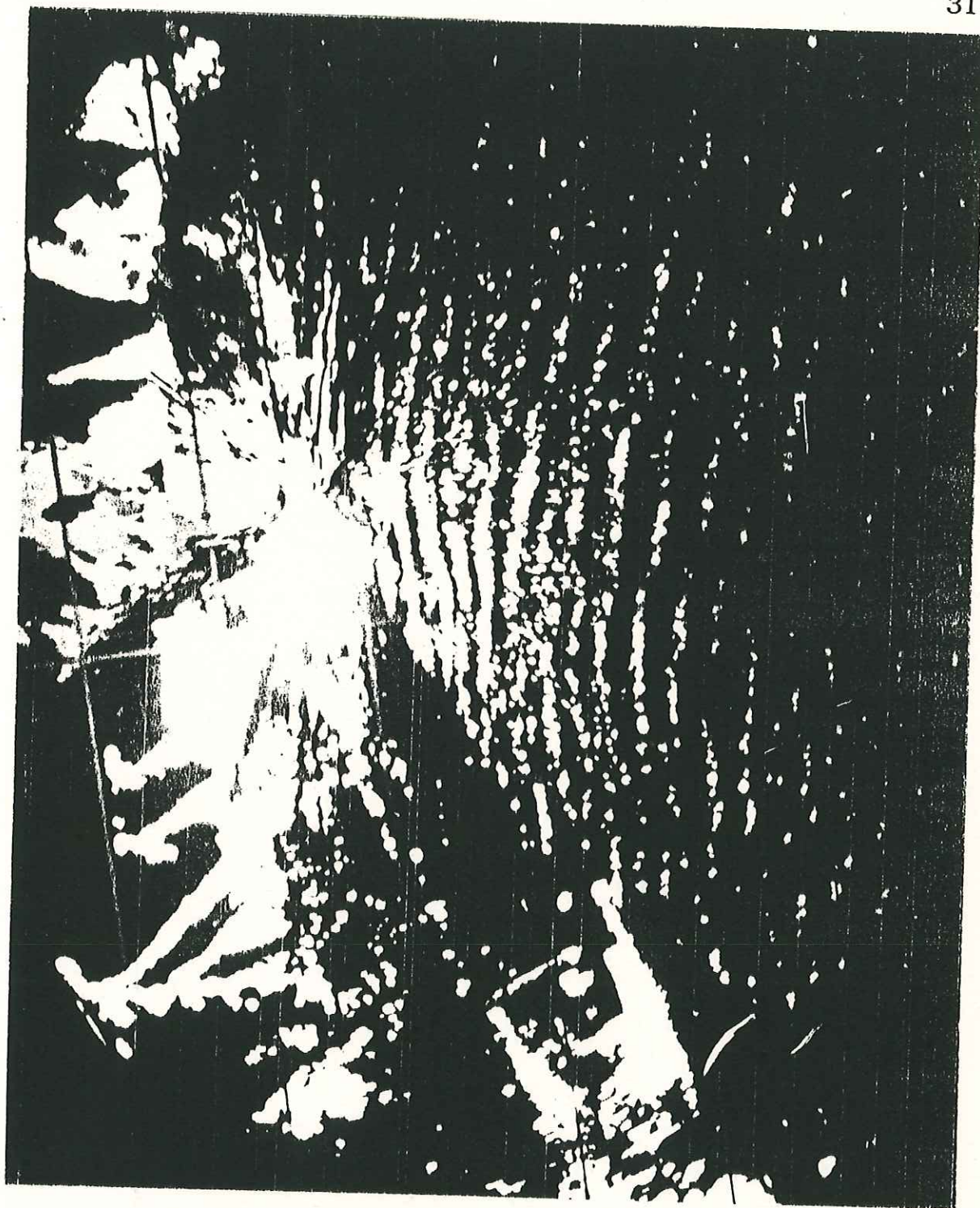


Fig. 10. Fotografía de la pantalla del radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en la localidad de Ramona Beach, Ensenada, Baja California en marzo de 1991.



Fig. 11. Fotografía de la pantalla del radar obtenida en la localidad de Ramona Beach, Ensenada, Baja California en marzo de 1991.

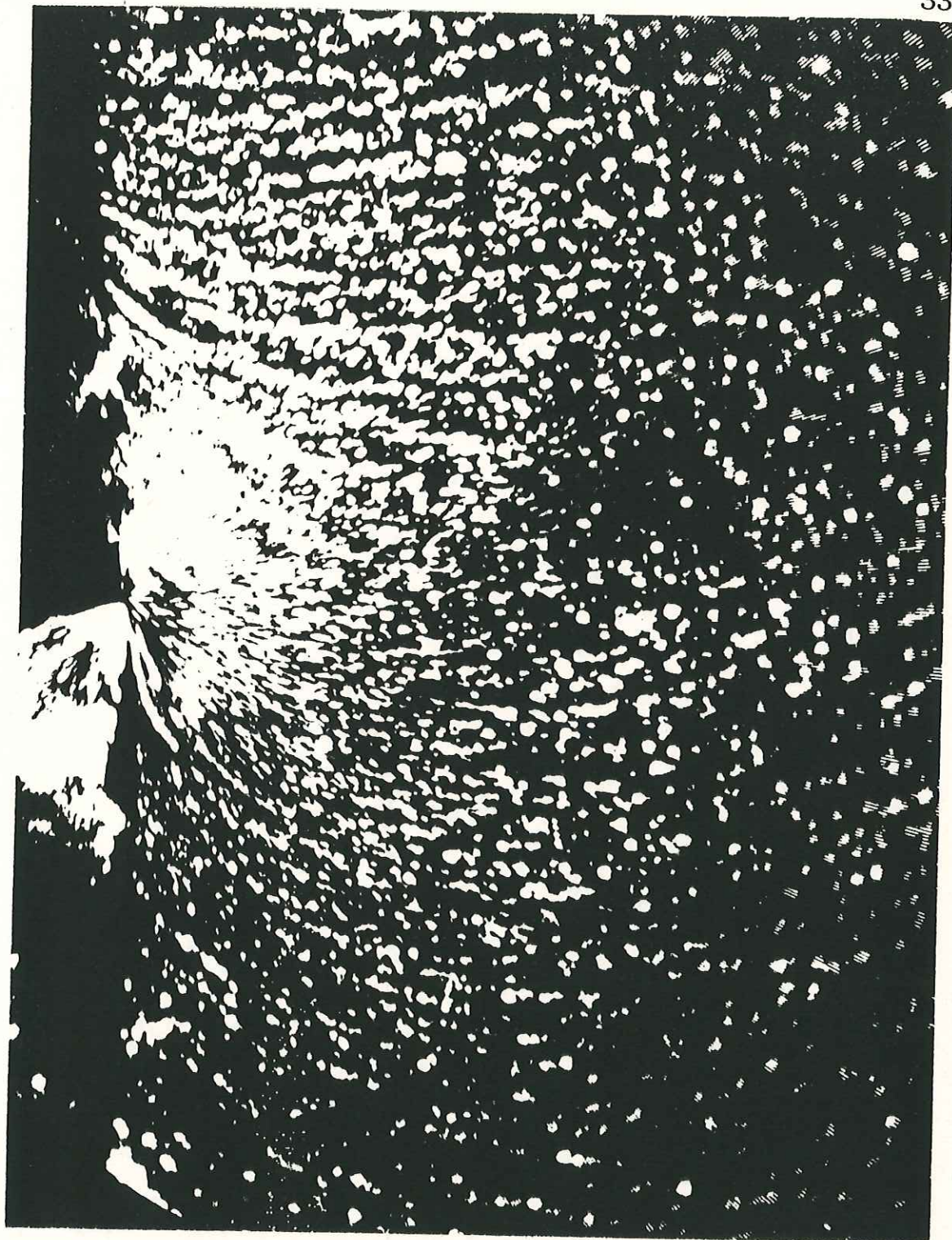


Fig. 12. Fotografía de la pantalla del radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en la localidad de La Jolla, Ensenada, Baja California en marzo de 1991.

De todo el conjunto de imágenes obtenidas durante las campañas de medición únicamente se eligió una imagen para su análisis (figura 13), dejando las demás imágenes para estudios posteriores. Esta imagen fue obtenida en Punta los Buenos, B.C. en febrero de 1986 durante condiciones de tormenta extrema, por lo que había oleaje de alta energía durante la toma de la fotografía (la localización del radar y la batimetría del lugar se muestran en la figura 14). Como se observa en la figura 13, la imagen muestra patrones de oleaje bien definidos y además es la que presenta la mayor cobertura (11.11 km). El viento tenía una dirección oeste - noroeste al momento de ser tomada la fotografía.



Fig. 13. Fotografía de la pantalla del radar que muestra patrones de oleaje, obtenida en Punta los Buenos, Baja California en febrero de 1986 y que fue elegida para aplicar el análisis espectral.

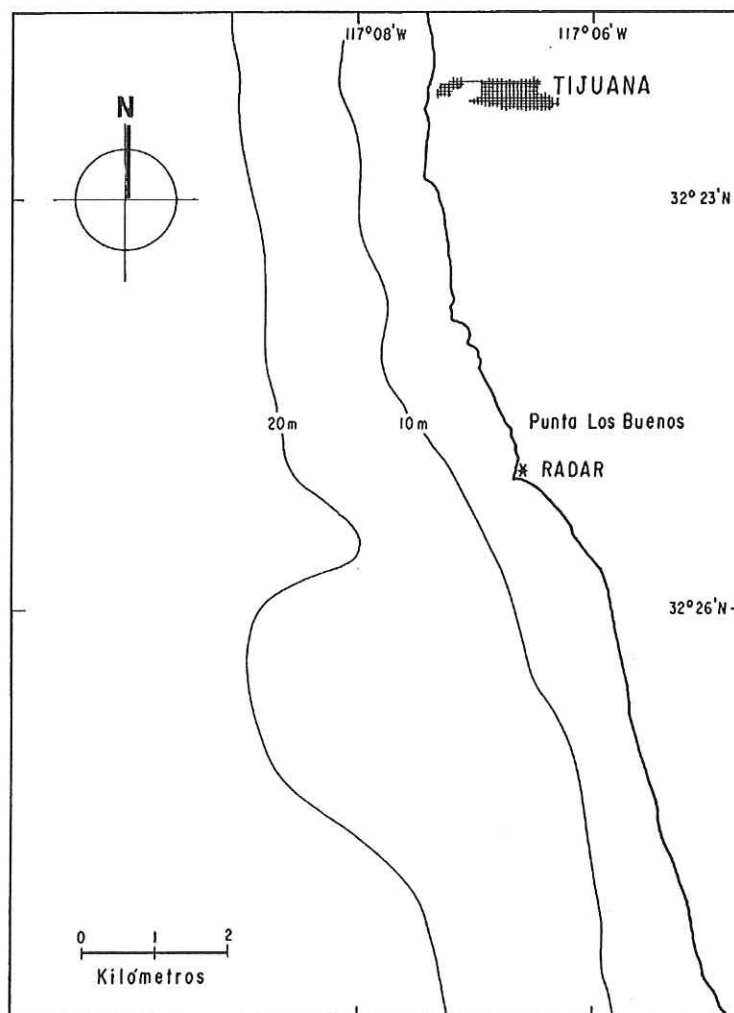


Fig. 14. Batimetría y localización del radar durante el registro de fotografías en Punta los Buenos, Baja California (Tomada de Alvarez, 1989).

La figura 15 muestra el área de la imagen digitizada que se escogió para su análisis la cual consistió en una matriz de 1500 x 1819 pixeles y que, como se describió en la sección 3.2, fue dividida en pequeñas subimágenes.

El centro de cada subimagen correspondió a puntos sobre rectas trazadas radialmente con una separación de 15° entre ellas. Se tomó como recta de

referencia (ángulo de 0°) la que está alineada aproximadamente en dirección perpendicular a las crestas del tren de olas principal. Los ángulos a partir de ella son negativos a favor de las manecillas del reloj y positivos para el caso contrario; a partir de aquí nos referiremos a estos ángulos como ángulos de visión del radar (θ_r).

Las subimágenes consistieron de 128×128 pixeles, cubriendo un área de 0.85 kilómetros por lado ($L_x = L_y = 0.85 \text{ km}$). De esta forma, el espectro bidimensional de cada subimagen obtenido con el análisis de Fourier, constó de 128×128 bandas con $\Delta\kappa_x = \Delta\kappa_y = 2\pi/L_x = 2\pi/L_y = 7.389 \times 10^{-3} \text{ rad m}^{-1}$.

Las subimágenes de la 001 a la 009, y las subimágenes -1508, -3005, +1505, +3004 y +9007 de la figura 15 y sus correspondientes espectros se muestran en las figuras 16 a 29 respectivamente. Estas se tomaron como las subimágenes más representativas para mostrarlas en estos resultados. Estas figuras presentan cuatro gráficas cada una con la siguiente información: las gráficas (a) y (b) muestran a la subimagen vista en perspectiva y en 16 tonos de grises respectivamente; las gráficas (c) y (d) muestran el espectro bidimensional sólo para las 32 bandas centrales del espacio de número de onda κ_x, κ_y (con el eje x en la dirección perpendicular y el eje y en la dirección paralela a la costa). El espectro fue normalizado con el pico de máxima energía de entre todas las secciones ($131 \times 10^6 \text{ u}^2 \text{ m}^2$ para la subimagen +3004).

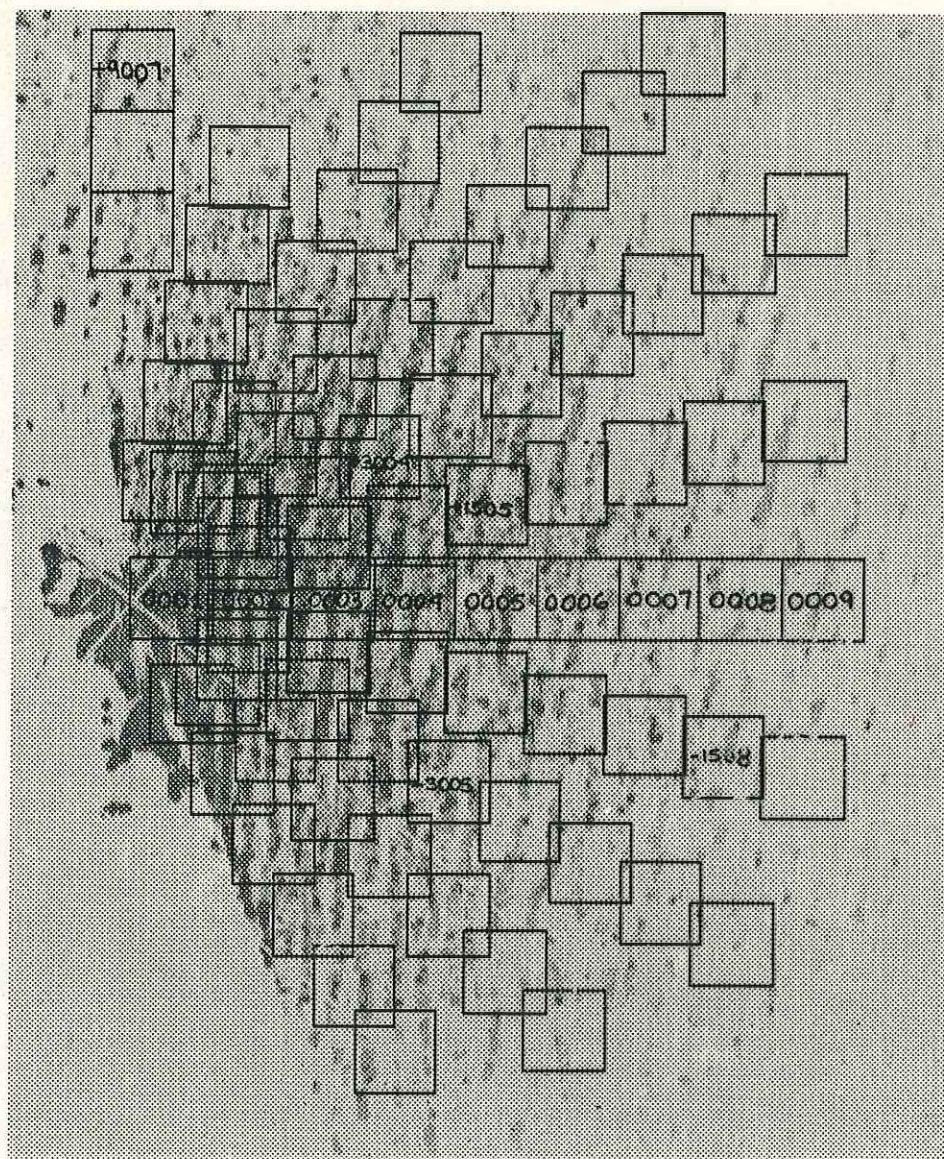
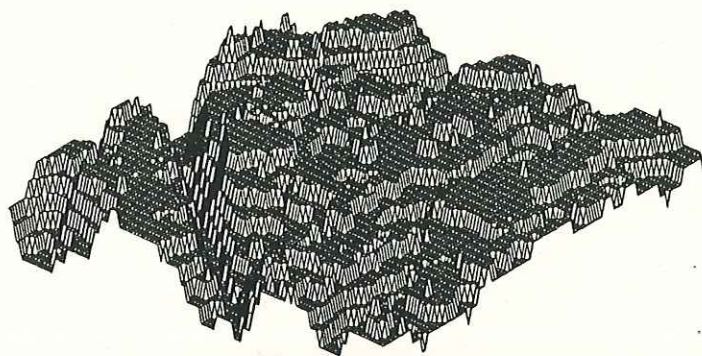
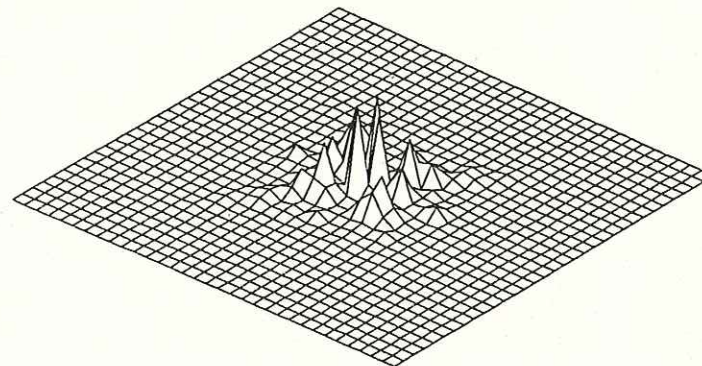


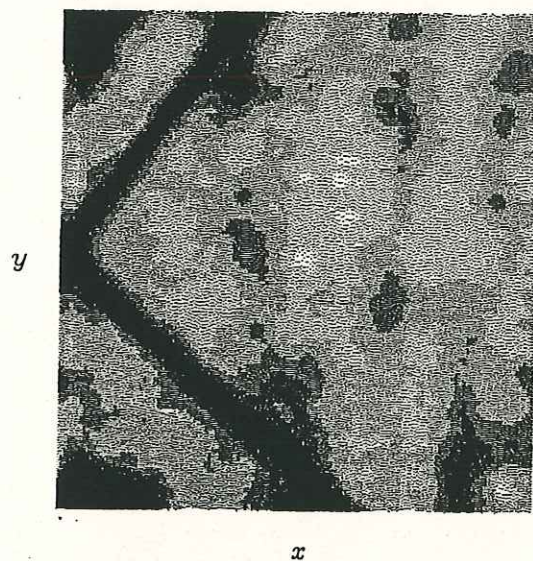
Fig. 15. Área de la imagen que fue digitizada para su análisis y distribución de las subimágenes.



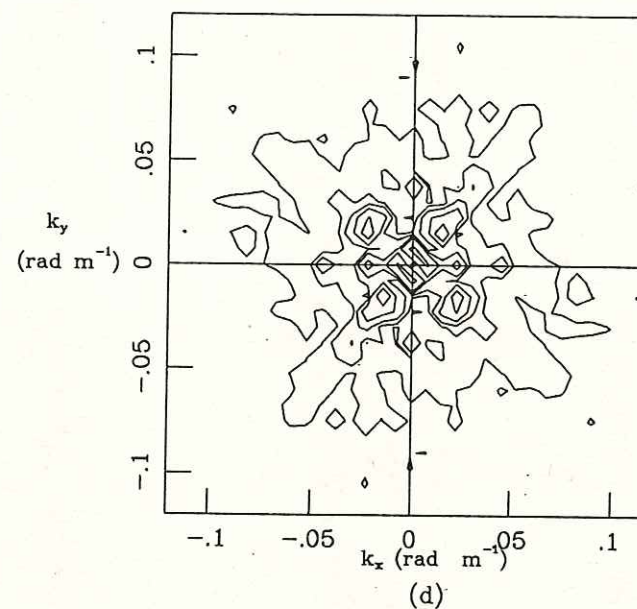
(a)



(c)

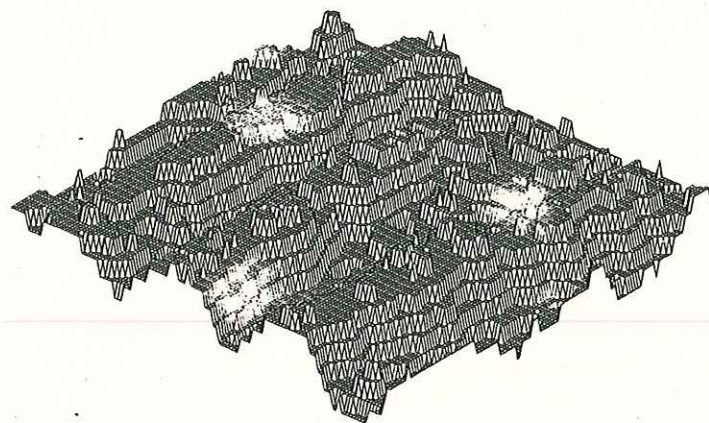


(b)

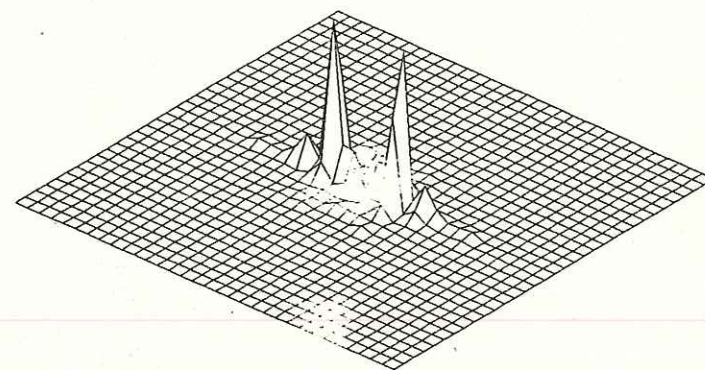


(d)

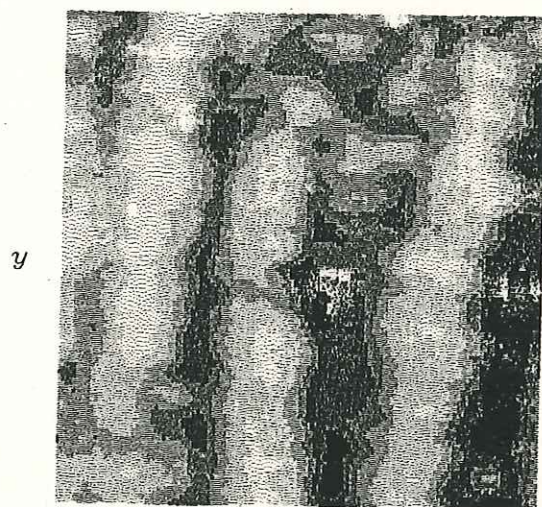
Fig. 16. Subimagen 0001. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



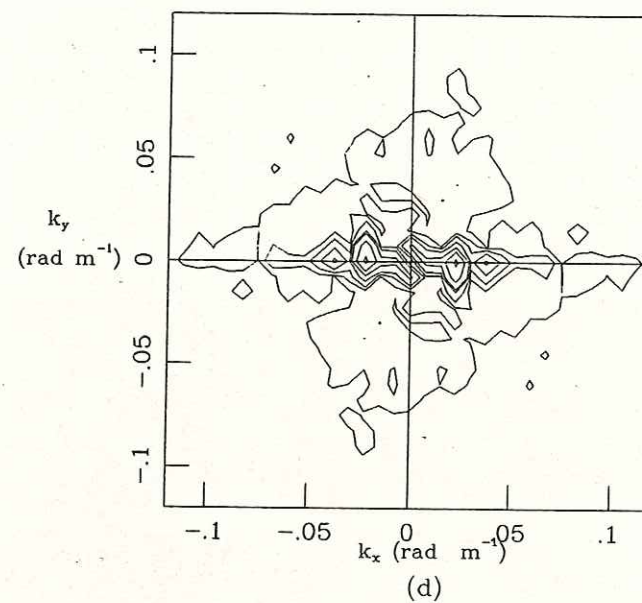
(a)



(c)

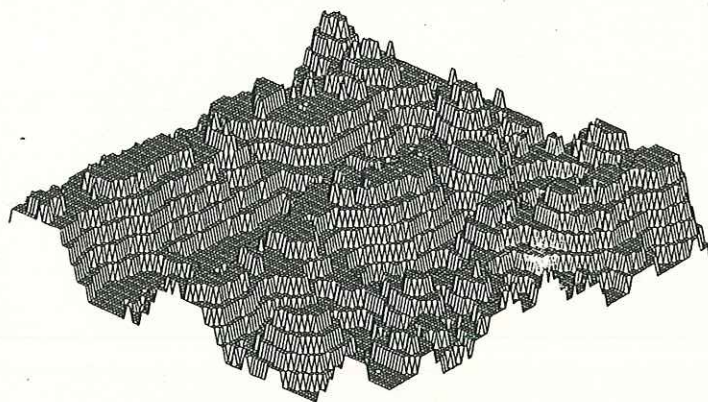


(b)

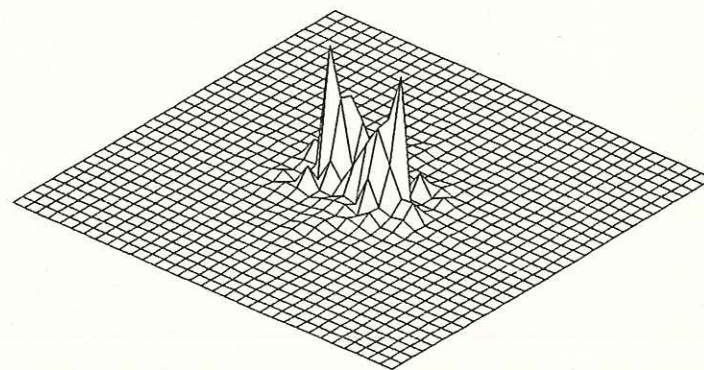


(d)

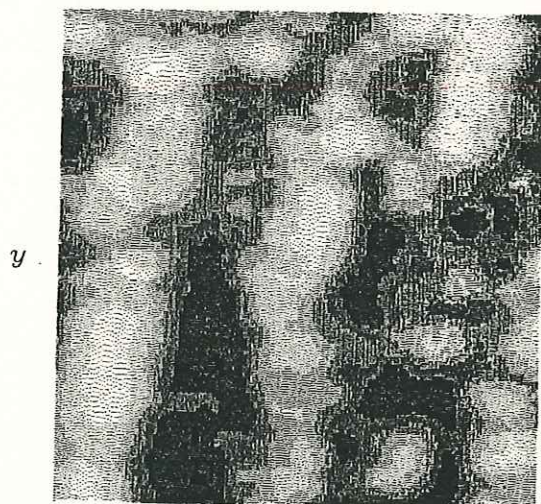
Fig. 17. Subimagen 0002. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



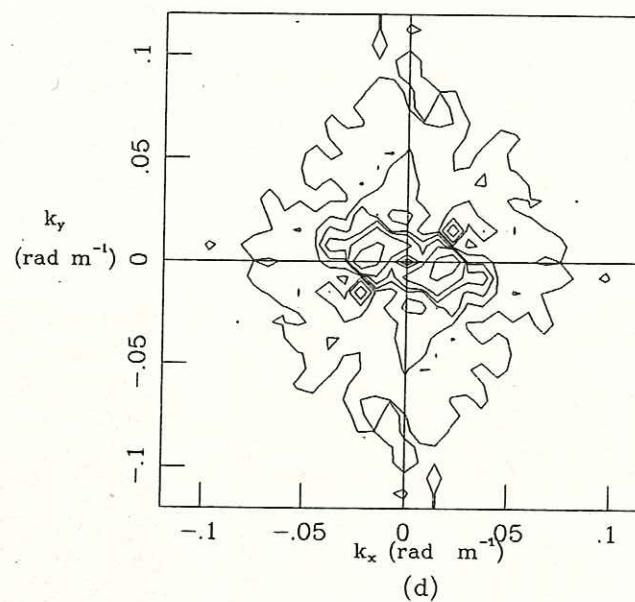
(a)



(c)

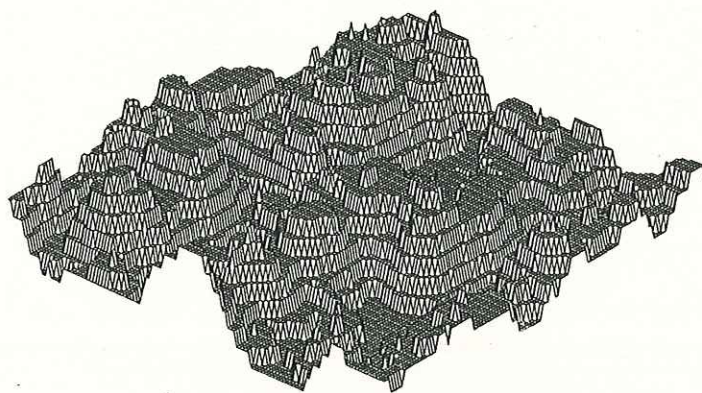


(b)

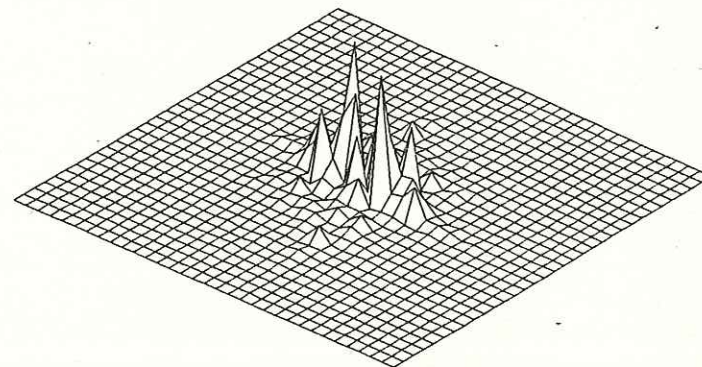


(d)

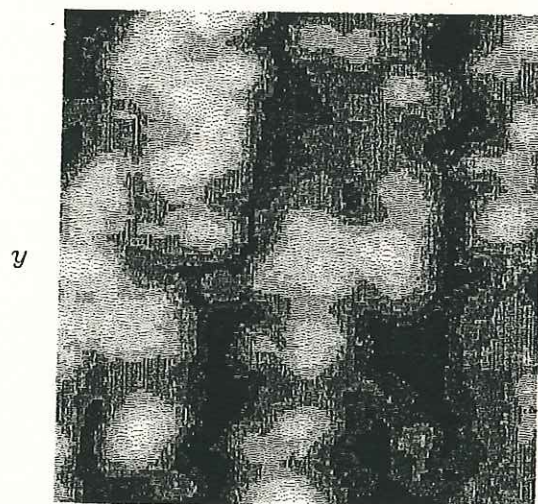
Fig. 18. Subimagen 0003. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



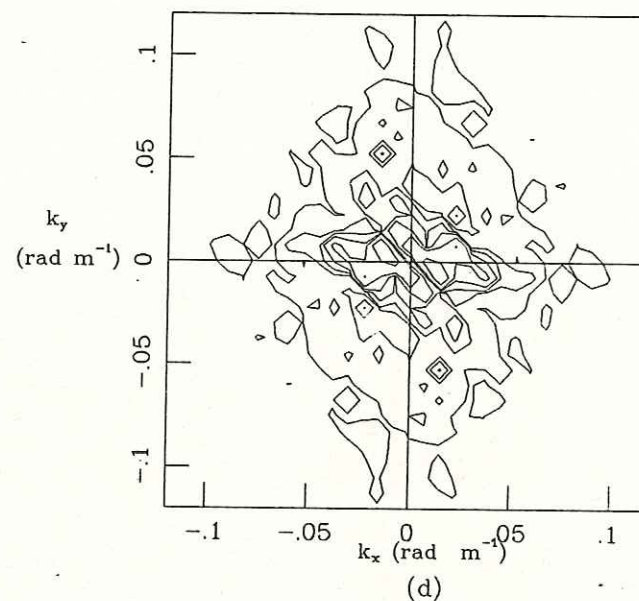
(a)



(c)

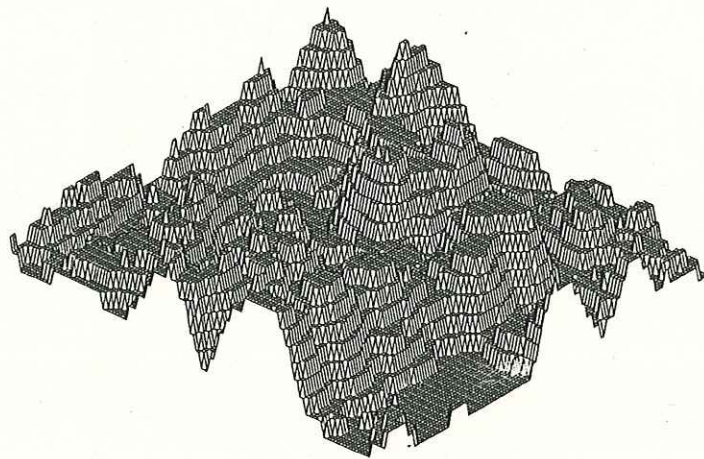


(b)

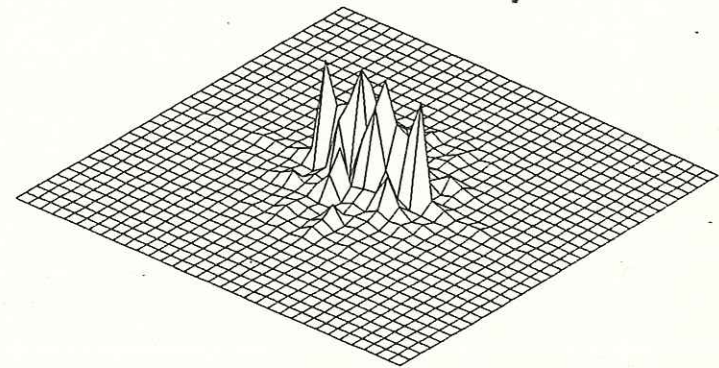


(d)

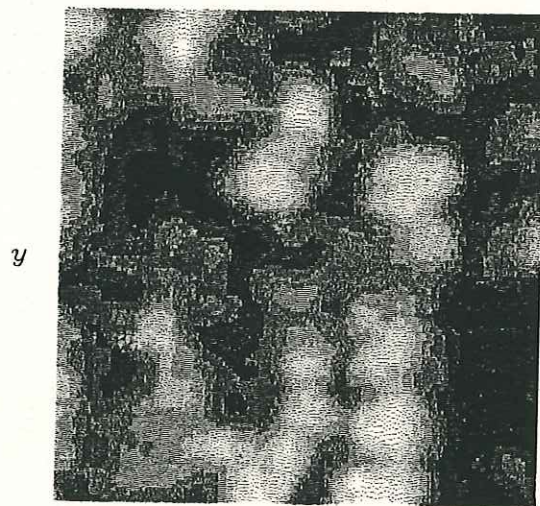
Fig. 19. Subimagen 0004. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



(a)



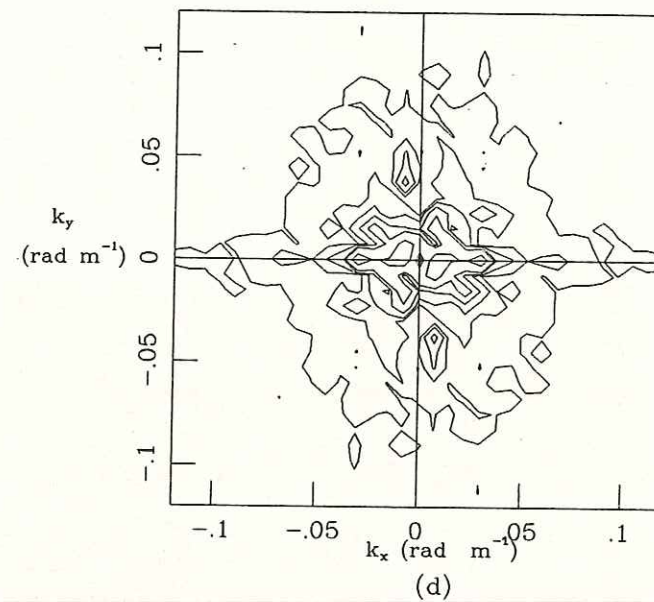
(c)



y

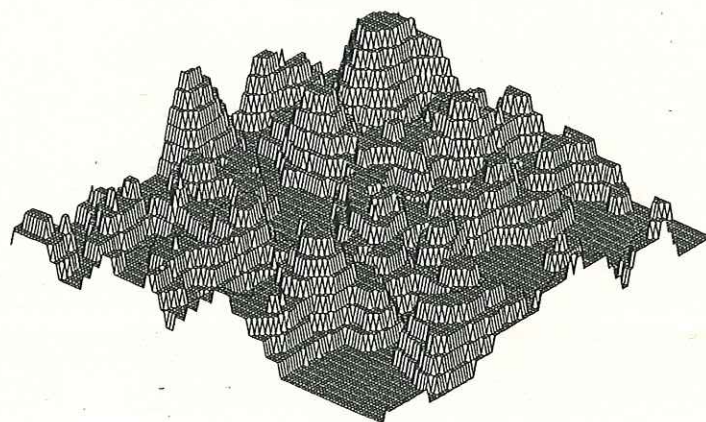
x

(b)

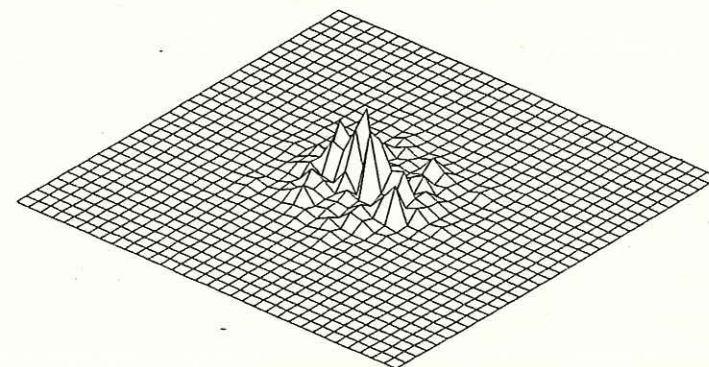


(d)

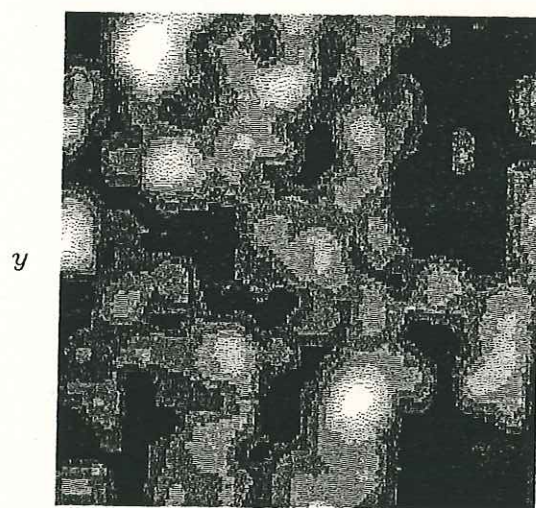
Fig. 20. Subimagen 0005. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



(a)



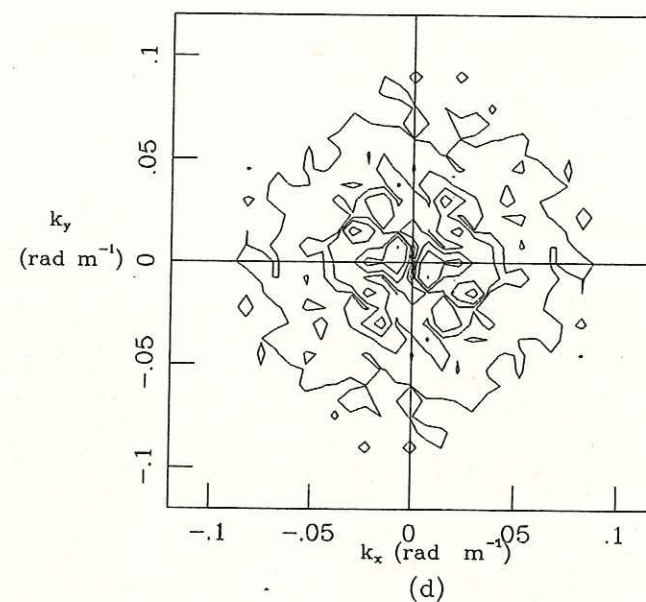
(c)



y

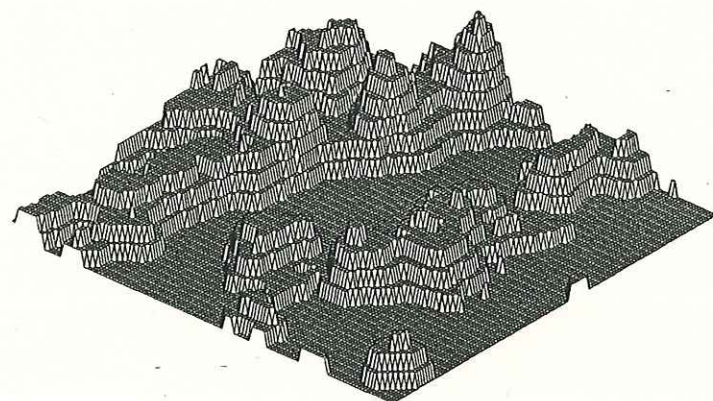
x

(b)

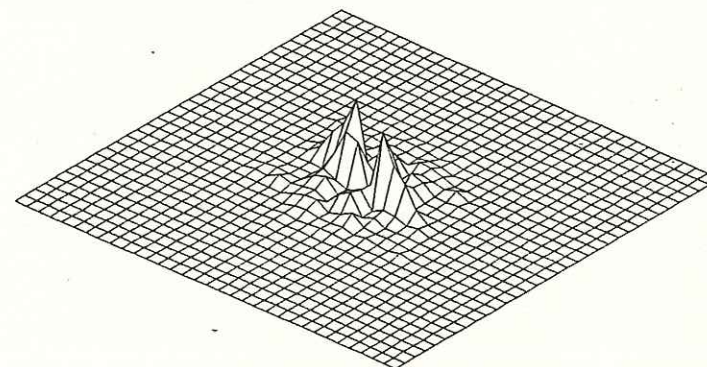


(d)

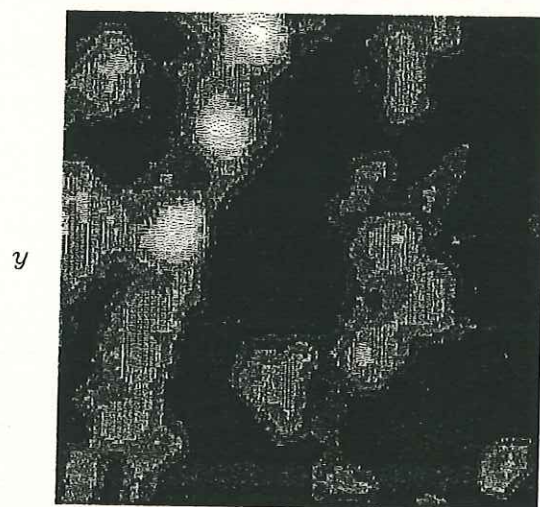
Fig. 21. Subimagen 0006. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



(a)



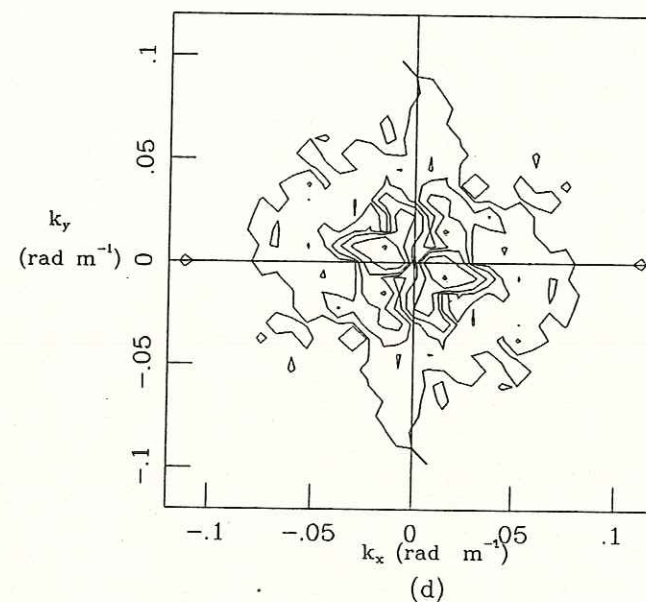
(c)



y

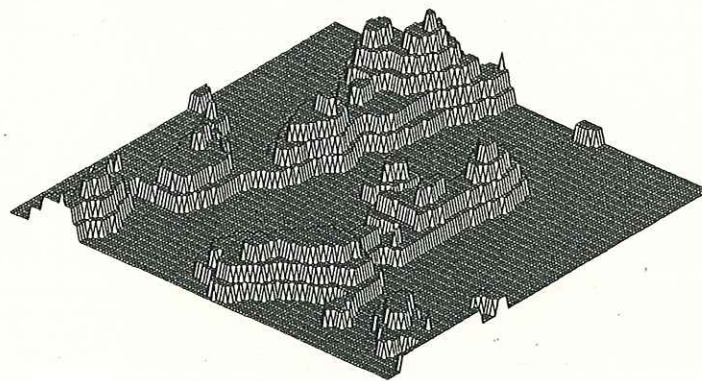
x

(b)

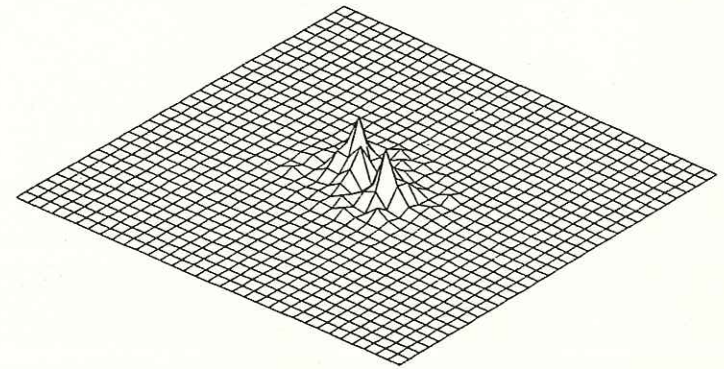


(d)

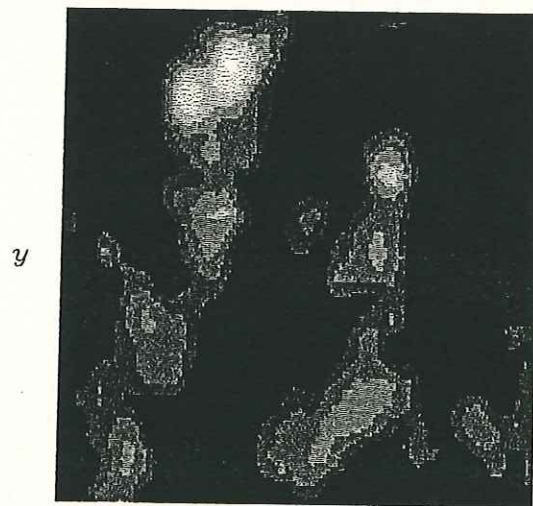
Fig. 22. Subimagen 0007. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



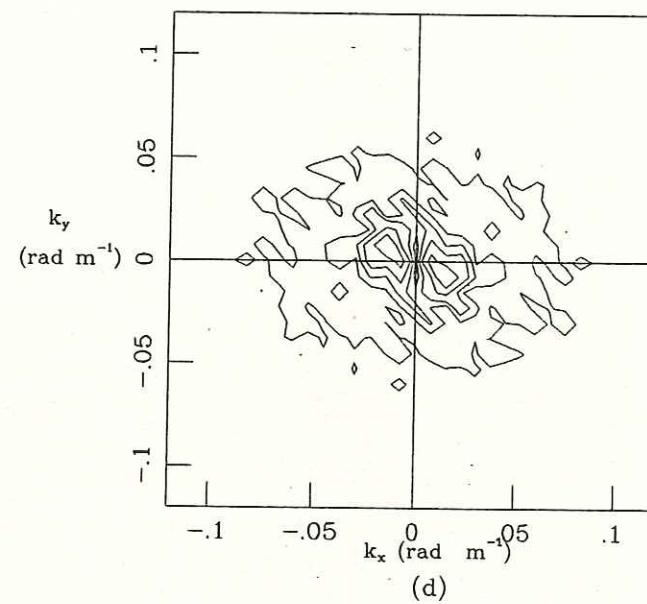
(a)



(c)

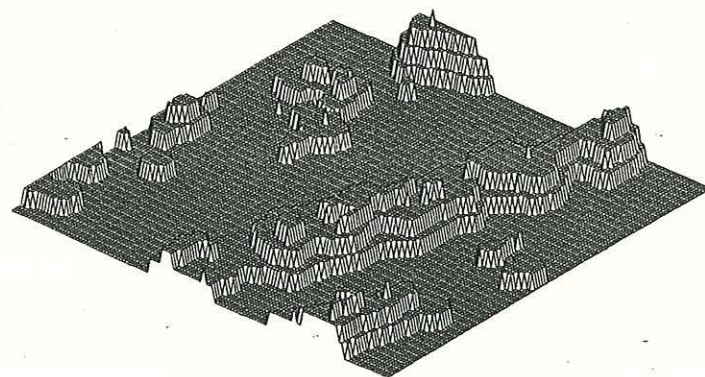


(b)

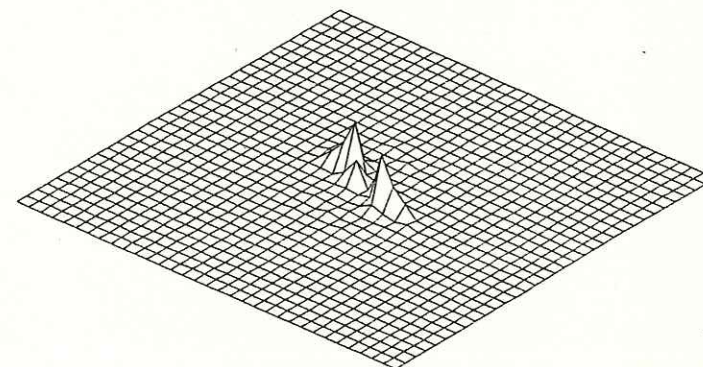


(d)

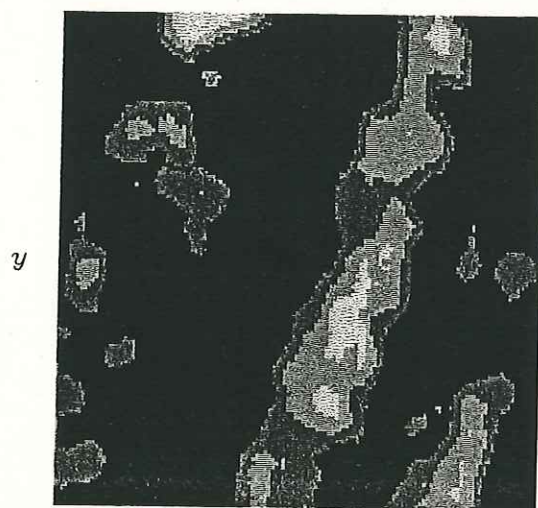
Fig. 23. Subimagen 0008. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



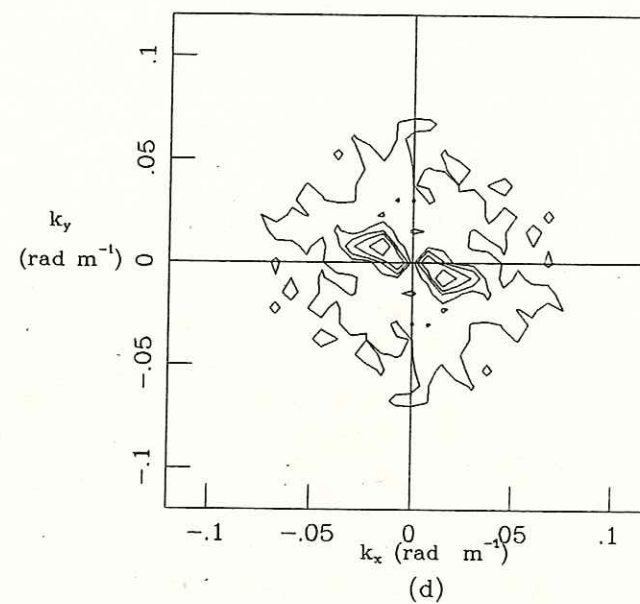
(a)



(c)

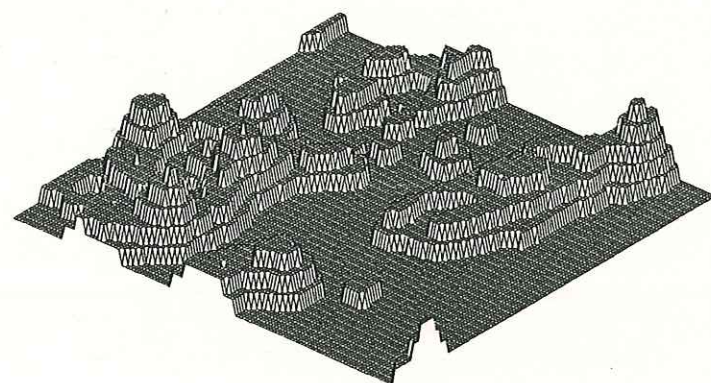


(b)

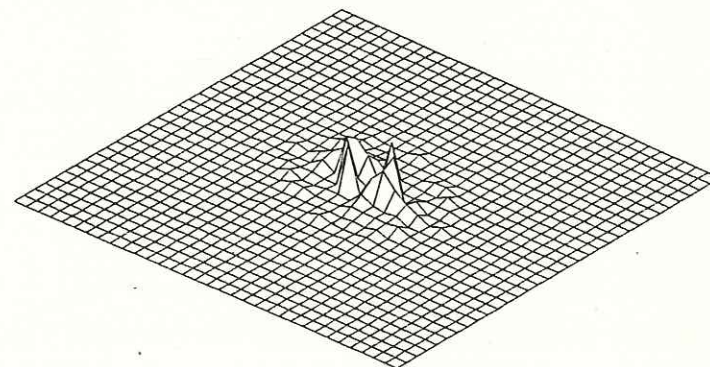


(d)

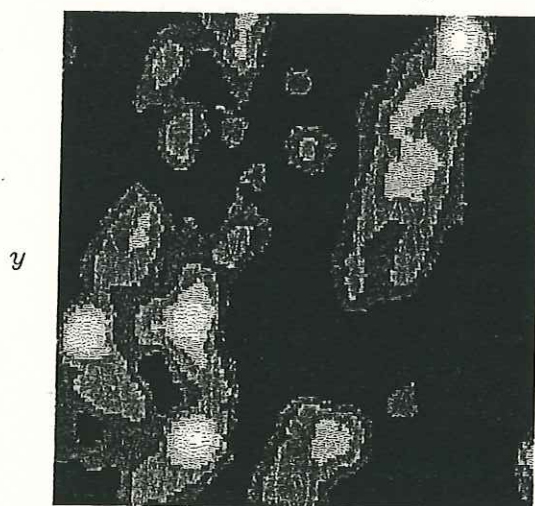
Fig. 24. Subimagen 0009. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



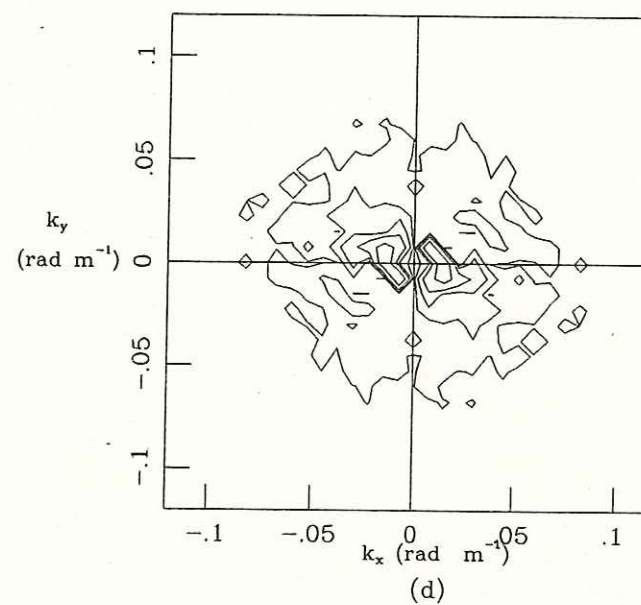
(a)



(c)

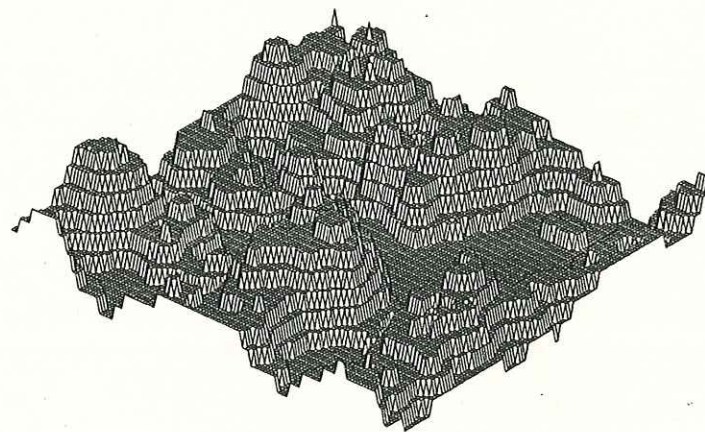


(b)

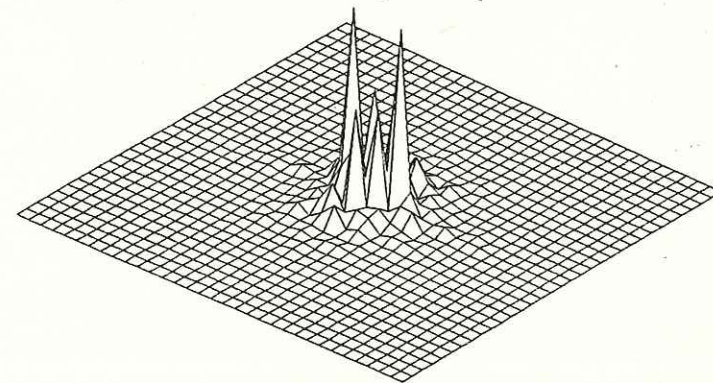


(d)

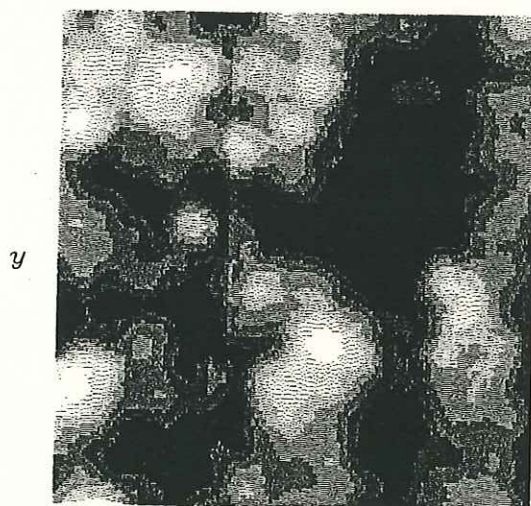
Fig. 25. Subimagen -1508. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



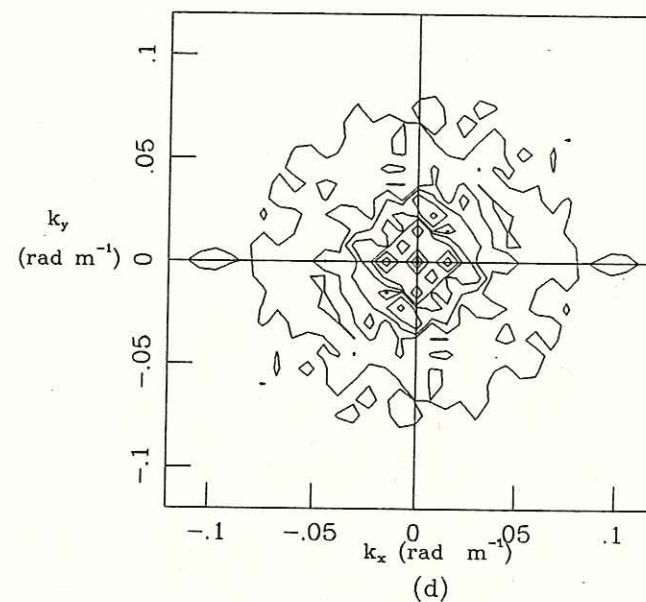
(a)



(c)

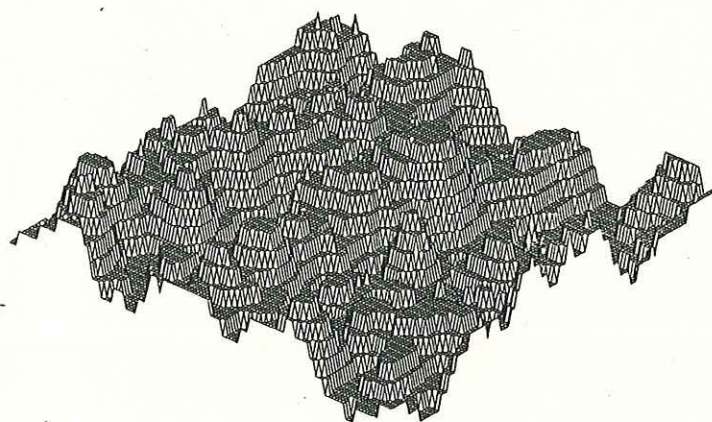


(b)

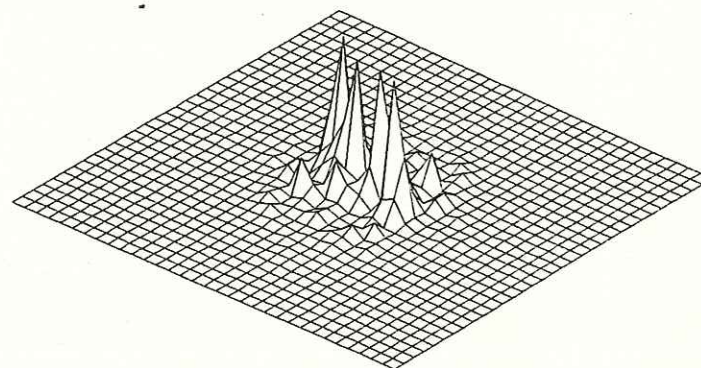


(d)

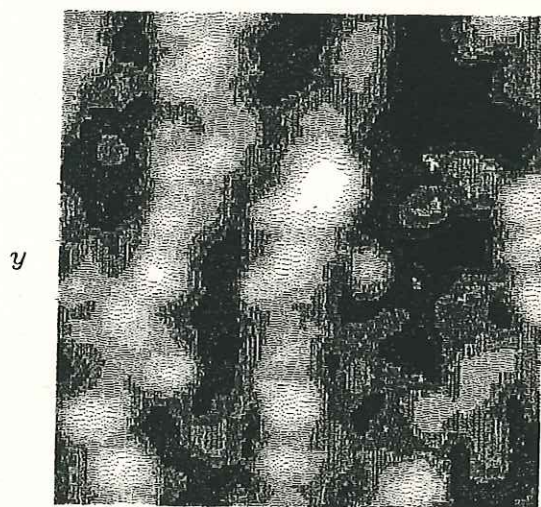
Fig. 26. Subimagen -3005. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



(a)



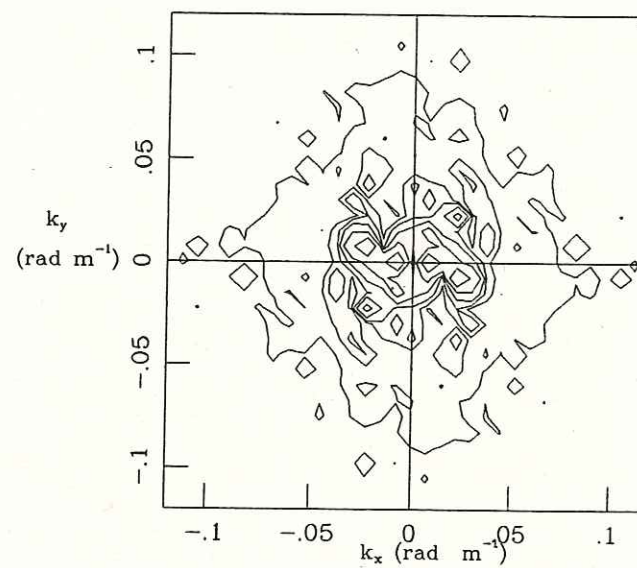
(c)



y

x

(b)

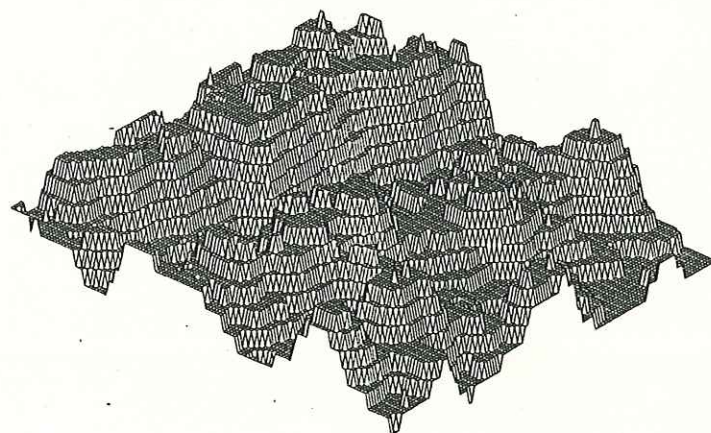


k_y
(rad m⁻¹)

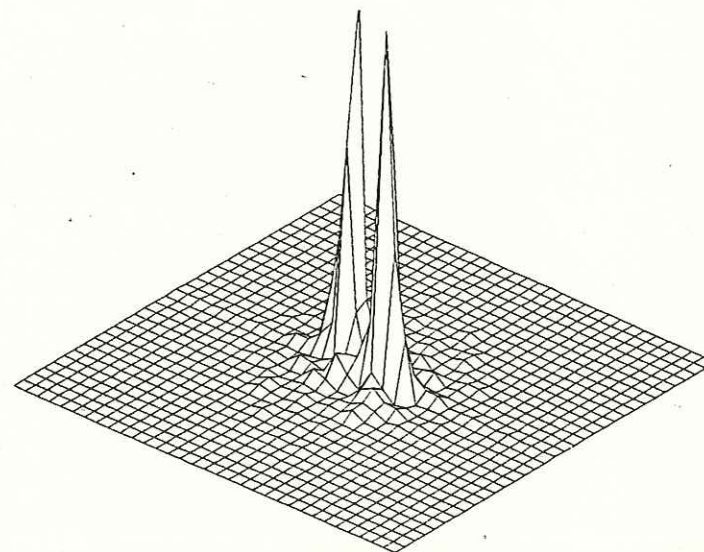
k_x (rad m⁻¹)

(d)

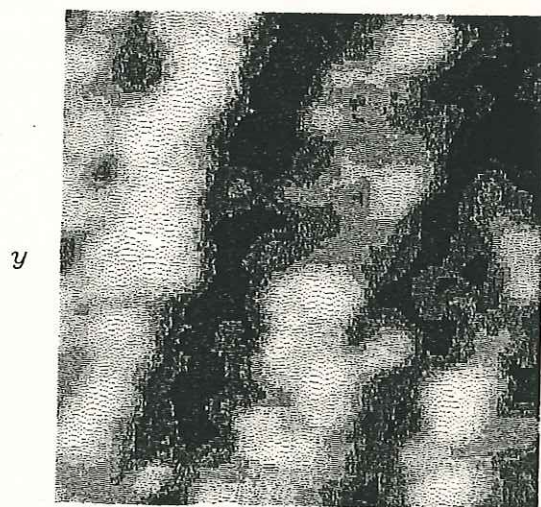
Fig. 27. Subimagen +1505. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional



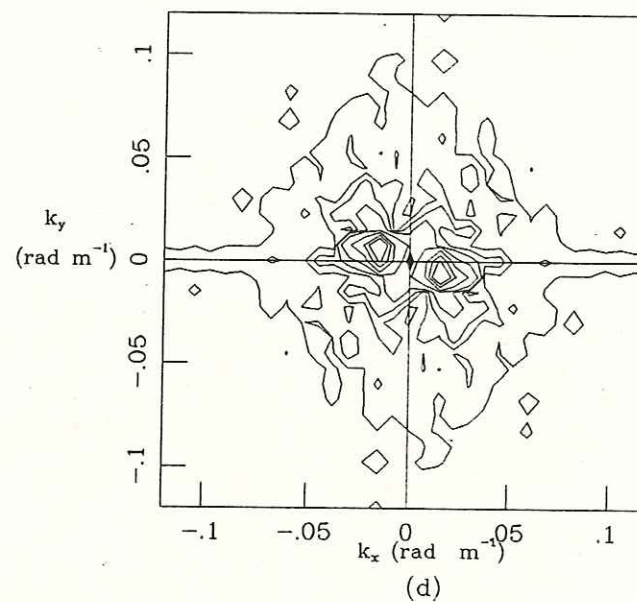
(a)



(c)



(b)



(d)

Fig. 28. Subimagen +3004. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional

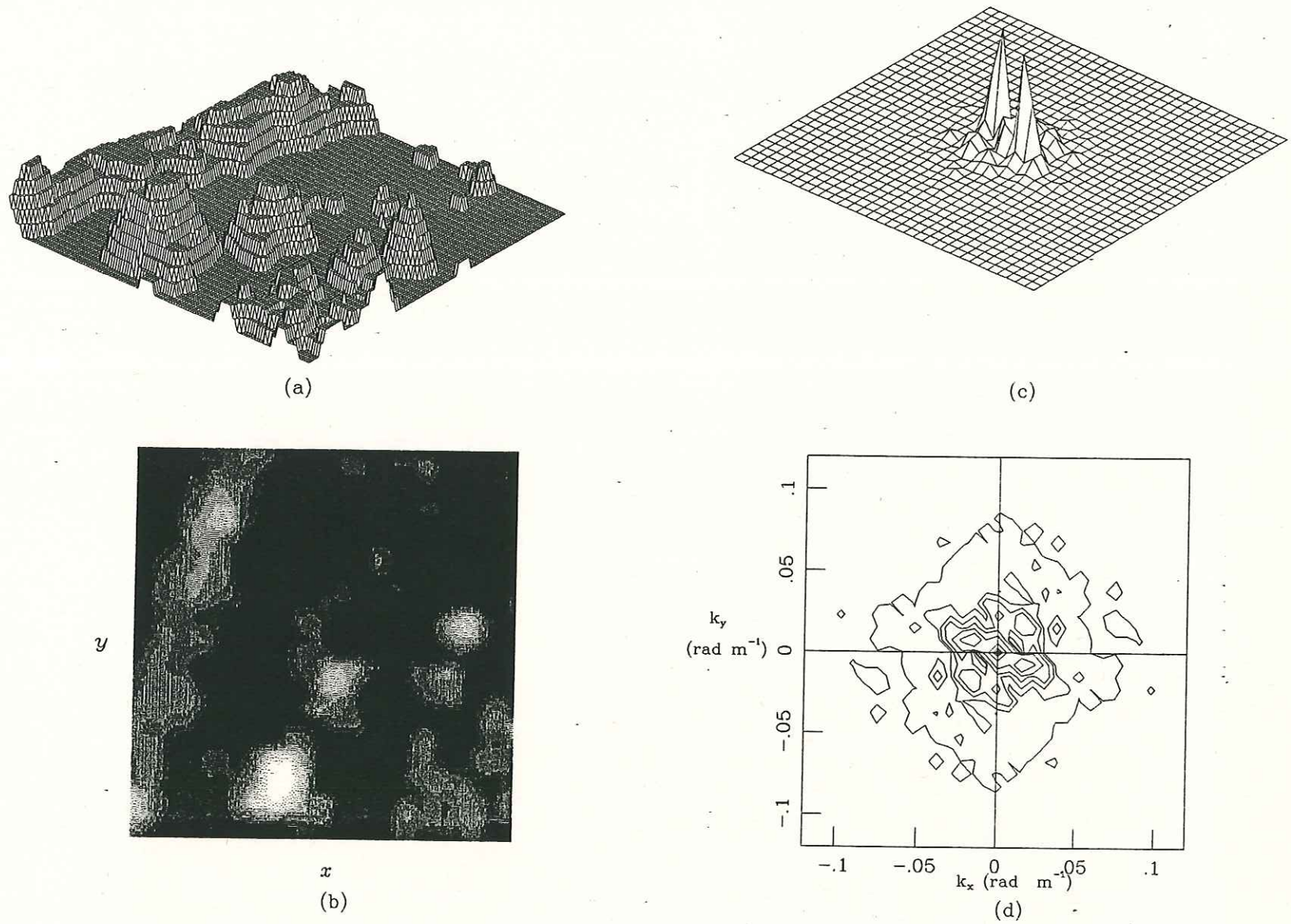


Fig. 29. Subimagen +9007. a) vista en perspectiva y b) en tonos de grises, c) y d) espectro bidimensional

En la Tabla II se presentan los resultados del análisis espectral realizado para cada una de las subimágenes. Los dos primeros números de la identificación de la subimagen indican el ángulo de visión del radar y los dos siguientes se incrementan conforme la distancia al radar. E_T es la energía total del espectro de la subimagen mientras que $E_{\max}$ es el valor de la componente espectral de máxima energía; $K_{\max}$ es su número de onda, con proyecciones $\kappa_{x\max}$ y $\kappa_{y\max}$ respectivamente y $\theta_{o\max}$ ($\theta_{o\max} = \arctan(\kappa_y/\kappa_x)$) es su dirección de propagación. $L_{\max}$ es la longitud de onda medida en la dirección de propagación ($L_{\max} = 2\pi/K_{\max}$) y r es la distancia del radar al centro de cada una de las subimágenes.

TABLA II. Características espectrales de las subimágenes.

SUBIMAGEN	E_T ($10^6 u^2 m^3$)	E_{max} ($10^6 u^2 m^3$)	θ_{max} ($^\circ$)	κ_{max} ($10^{-3} rad/m$)	κ_{ymax} ($10^{-3} rad/m$)	κ_{zmax} ($10^{-3} rad/m$)	L_{max} (m)	r (m)
-1502	537.1	98.6	180	-22.17	0.00	22.17	283	1273
-1503	592.9	66.1	180	-14.78	0.00	14.78	425	2125
-1504	697.0	89.8	153	-14.78	7.39	16.52	380	2977
-1505	593.4	30.2	225	-7.39	-7.39	10.45	601	3823
-1506	591.3	32.8	180	-14.78	0.00	14.78	425	4675
-1507	378.0	27.9	180	-7.39	0.00	7.39	850	5527
-1508	268.5	16.8	225	-7.39	-7.39	10.45	601	6373
-1509	74.0	5.0	180	-7.39	0.00	7.39	850	7227
-3002	425.1	35.3	180	-29.56	0.00	29.56	212	1273
-3003	522.0	70.2	180	-22.17	0.00	22.17	283	2125
-3004	614.1	51.4	180	-14.78	0.00	14.78	425	2977
-3005	721.7	67.3	180	-14.78	0.00	14.78	425	3826.2
-3006	407.4	49.5	180	-14.78	0.00	14.78	425	4677.0
-3007	282.7	24.5	180	-7.39	0.00	7.39	850	5527.9
-3008	173.3	9.8	161	-22.17	7.39	23.37	268	6373.1
-3009	67.5	2.5	180	-14.78	0.00	14.78	425	7224.0
-4502	446.0	24.3	206	-14.78	-7.39	16.52	380	1277.3
-4503	524.2	36.4	180	-29.56	0.00	29.56	212	2122.5
-4504	488.3	47.4	180	-22.17	0.00	22.17	283	2977.2
-4505	544.5	43.4	180	-22.17	0.00	22.17	283	3822.4
-4506	373.5	23.9	198	-22.17	-7.39	23.37	268	4677.1
-4507	170.4	11.1	180	-22.17	0.00	22.17	283	5522.3
-4508	134.6	7.3	180	-14.78	0.00	14.78	425	6377.0
-6002	545.9	61.0	206	-14.78	-7.39	16.52	380	1273.5
-6003	894.7	125.7	180	-7.39	0.00	7.39	850	2124.4
-6004	636.3	69.6	180	-22.17	0.00	22.17	283	2975.3
-6005	519.8	49.6	180	-22.17	0.00	22.17	283	3826.2
-6006	456.2	63.6	180	-22.17	0.00	22.17	283	4677.0
-6007	291.8	29.8	180	-22.17	0.00	22.17	283	5476.3
0001	508.6	27.7	180	-7.39	0.00	7.39	850	425.0
0002	449.3	56.4	180	-22.17	0.00	22.17	283	1268.4
0003	594.7	47.3	180	-22.17	0.00	22.17	283	2111.8
0004	670.8	47.4	153	-14.78	7.39	16.52	380	2955.2
0005	811.2	40.7	180	-7.39	0.00	7.39	850	3798.6
0006	486.3	25.5	135	-7.39	7.39	10.45	601	4642.0
0007	439.0	27.0	153	-14.78	7.39	16.52	380	5485.4
0008	272.9	19.5	153	-14.78	7.39	16.52	380	6328.8
0009	151.8	18.7	153	-14.78	7.39	16.52	380	7172.2
+1502	439.7	50.0	161	-22.17	7.39	23.37	268	1272.7
+1503	441.5	28.1	153	-14.78	7.39	16.52	380	2124.8
+1504	784.1	122.3	180	-22.17	0.00	22.17	283	2976.9
+1505	728.2	48.2	161	-22.17	7.39	23.37	268	3822.6
+1506	718.0	127.1	180	-14.78	0.00	14.78	425	4674.8
+1507	288.6	18.5	135	-7.39	7.39	10.45	601	5526.9
+1508	226.9	11.7	206	-14.78	-7.39	16.52	380	6372.6
+1509	241.1	27.3	153	-14.78	7.39	16.52	380	7226.5

TABLA II. Continuación...

SUBIMAGEN	E_T ($10^6 u^2 m^3$)	P_{max} ($10^6 u^2 m^3$)	θ_{max} ($^\circ$)	κ_{max} ($10^{-3} rad/m$)	$\kappa_{y,max}$ ($10^{-3} rad/m$)	$\kappa_{x,max}$ ($10^{-3} rad/m$)	L_{max} (m)	r (m)
+3002	519.4	83.7	180	-22.17	0.00	22.17	283	1273.5
+3003	635.2	41.5	153	-14.78	7.39	16.52	380	2124.4
+3004	1036.5	131.8	153	-14.78	7.39	16.52	380	2975.3
+3005	673.3	38.7	180	-14.78	0.00	14.78	425	3826.2
+3006	543.9	30.1	153	-14.78	7.39	16.52	380	4677.0
+3007	491.4	56.8	153	-14.78	7.39	16.52	380	5527.9
+3008	251.4	15.3	153	-14.78	7.39	16.52	380	6373.1
+3009	143.2	6.5	225	-7.39	-7.39	10.45	601	7224.0
+3010	95.4	8.2	180	-7.39	0.00	7.39	850	8074.9
+4502	682.0	119.6	180	-22.17	0.00	22.17	283	1277.3
+4503	650.0	35.5	161	-22.17	7.39	23.37	268	2122.5
+4504	743.4	71.7	165	-29.56	7.39	30.47	206	2977.2
+4505	814.0	109.3	153	-14.78	7.39	16.52	380	3822.4
+4506	595.8	109.9	153	-14.78	7.39	16.52	380	4677.1
+4507	424.3	27.3	153	-14.78	7.39	16.52	380	5522.3
+4508	317.4	31.0	153	-14.78	7.39	16.52	380	6377.0
+4509	240.6	17.3	153	-14.78	7.39	16.52	380	7222.2
+4510	50.0	1.2	108	-7.39	22.17	23.37	268	8076.9
+6002	583.9	56.1	161	-22.17	7.39	23.37	268	1273.5
+6003	611.9	57.3	161	-22.17	7.39	23.37	268	2124.4
+6004	745.1	34.4	180	-14.78	0.00	14.78	425	2975.3
+6005	683.5	43.1	161	-22.17	7.39	23.37	268	3826.2
+6006	546.5	61.1	180	-14.78	0.00	14.78	425	4677.0
+6007	223.6	23.0	180	-14.78	0.00	14.78	425	5527.9
+6008	148.2	12.8	153	-14.78	7.39	16.52	380	6373.1
+7502	717.5	57.3	180	-7.39	0.00	7.39	850	1272.7
+7503	832.8	83.9	180	-14.78	0.00	14.78	425	2124.8
+7504	811.7	18.8	213	-22.17	-14.78	26.64	235	2976.9
+7505	662.4	20.0	116	-7.39	14.78	16.52	380	3822.6
+7506	325.5	9.0	206	-14.78	-7.39	16.52	380	4674.8
+9004	886.6	53.3	180	-22.17	0.00	22.17	283	2975.1
+9005	510.3	17.6	180	-22.17	0.00	22.17	283	3825.2
+9006	284.9	8.4	161	-22.17	7.39	23.37	268	4675.2
+9007	527.8	49.8	153	-14.78	7.39	16.52	380	5525.3

Las figuras de la 16 a 24 son las subimágenes que están alineadas aproximadamente en dirección perpendicular a las crestas del tren de olas principal (0001 a 0009 de la figura 15). En ellas observamos patrones de oleaje bien definidos que van disminuyendo en intensidad de brillo al incrementar la distancia al radar (hasta una distancia de 7 km). Las zonas oscuras en (b) corresponden a regiones completamente planas en (a). En las zonas claras se observan regiones de brillantez variable que dependen de la rugosidad de la superficie. En algunas secciones se presentan líneas negras bien marcadas, las cuales son debidas al cursor de la pantalla del radar. Al hacer un análisis visual de la subimágenes (figuras 16(b) a la 29(b)) se observa que las zonas más cercanas a la costa tienen un brillo uniforme pero no se alcanza a distinguir las crestas de las olas (entre 1 y 2 km.). Entre los 2 y 5 km se observan crestas bien definidas y después de los 5 km disminuye tanto la intensidad como la definición de las crestas.

En la mayoría de las subimágenes la energía se concentra en las bandas ($\kappa_x = 0.022, \kappa_y = 0$) y ($\kappa_x = 0.014, \kappa_y = 0.0073$) correspondiendo a longitudes de onda de 283 y 380 metros respectivamente.

En las figuras 30 y 31 se presentan los valores de energía total y de energía máxima respectivamente en función de la distancia al radar para cada uno de los ángulos en que fueron muestreadas las subimágenes: en a) -60° a 0° , b) 0° a 45° y c) 45° a 90° . En ambas figuras se observa que la energía decrece mas rápidamente al aumentar la distancia a la fuente de energía electromagnética (radar); lo anterior lo podemos corroborar en la Tabla II y ver que efectivamente los valores de energía total y máxima van disminuyendo conforme la distancia al radar es mayor, aunque existen subimágenes que presentan aumentos significativos de energía (figura 29(b)).

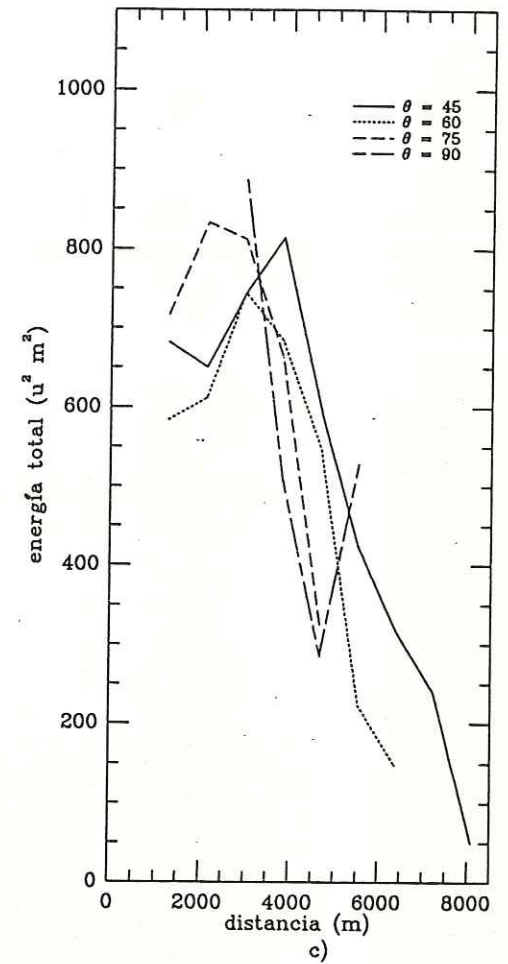
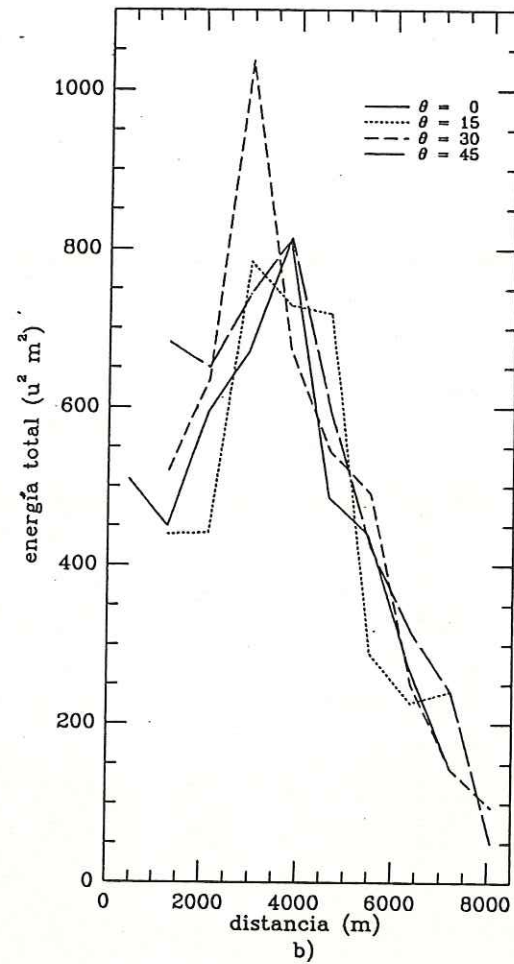
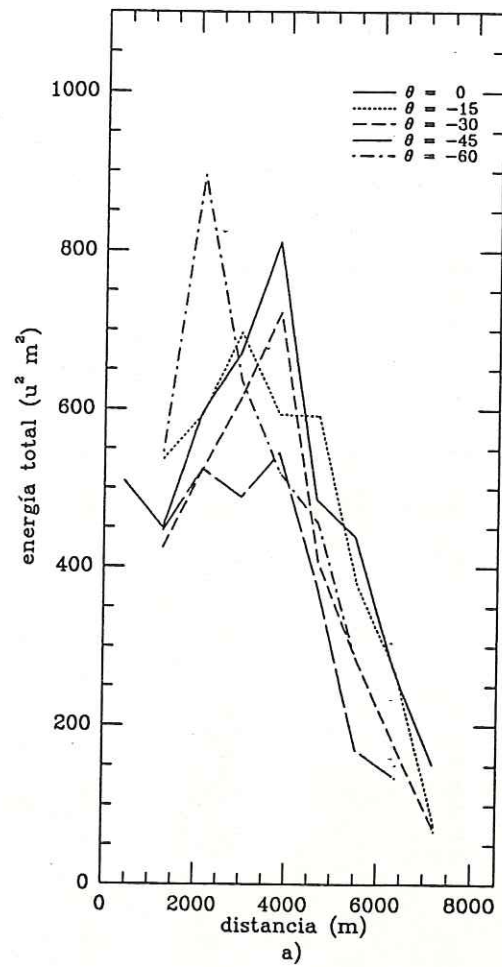
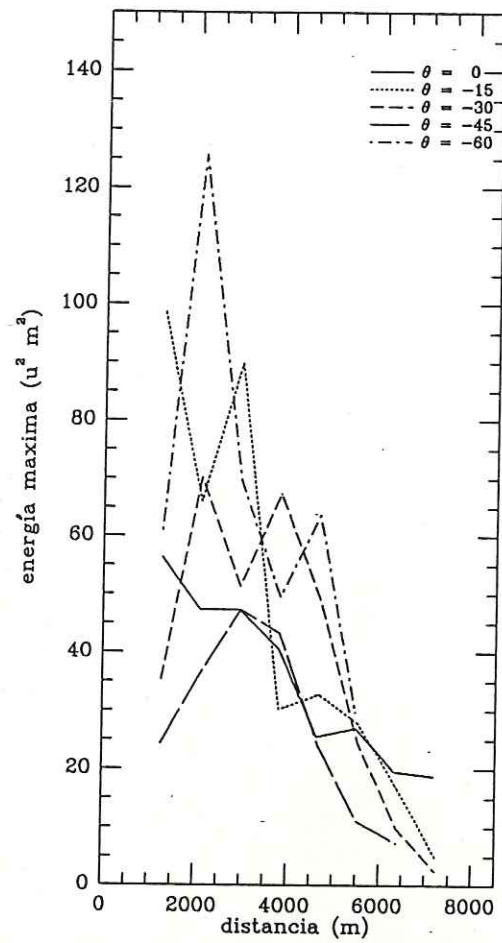
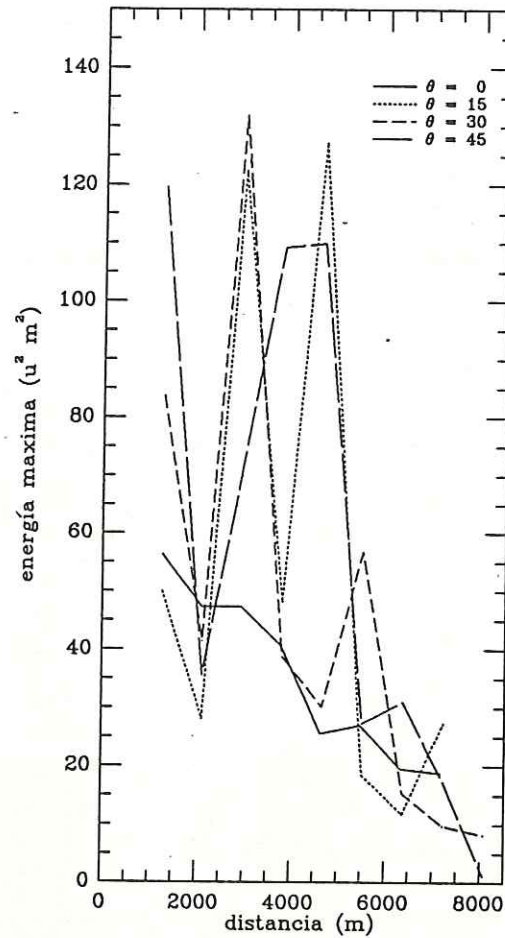


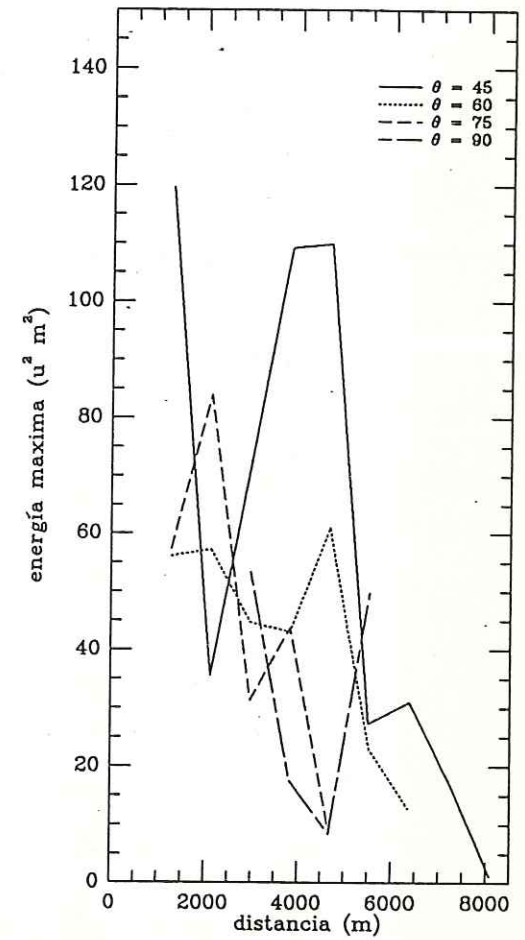
Fig. 30. Energía total en función de la distancia, para cada uno de los ángulos de visión del radar



a)



b)



c)

Fig. 31. Energía máxima en función de la distancia, para cada uno de los ángulos de visión del radar

En la figura 32 se presenta la energía total en función del ángulo de visión del radar para subimágenes localizadas a la misma distancia del radar. El comportamiento de la energía es similar que en las figuras anteriores, sólo que aquí se observa claramente que al ir aumentando θ , (ángulo de visión del radar), ya sea para ángulos negativos o positivos, la energía disminuye rápidamente. Se observa que los picos de mayor energía se concentran alrededor de los 30 grados.

El ángulo de propagación ($\theta_{o_{max}}$) para cada una de las subimágenes se muestra en la figura 33 y oscila entre 150° y 180° (Tabla II).

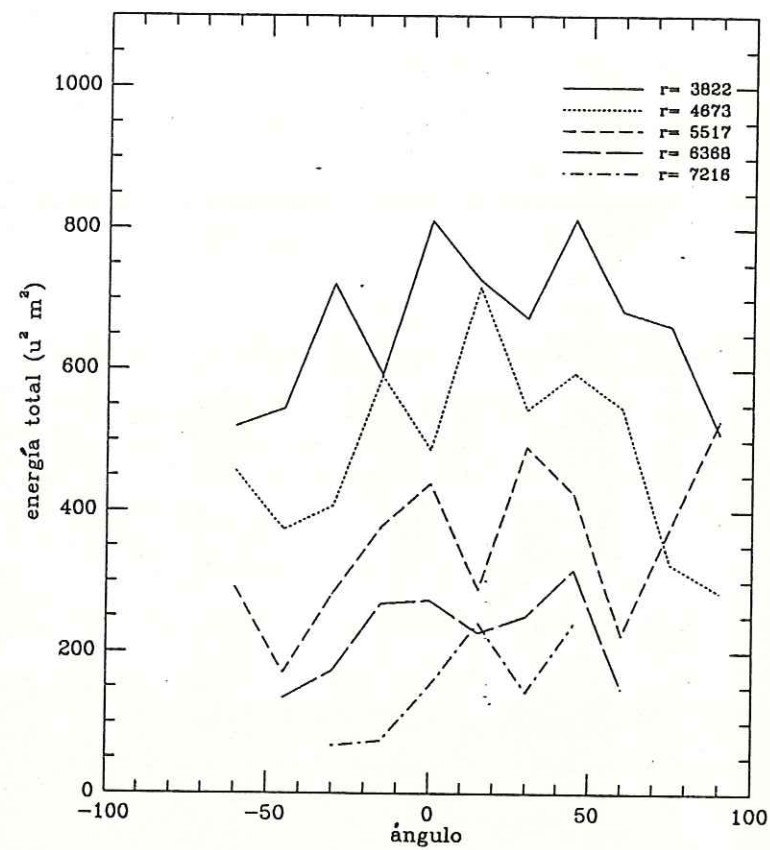
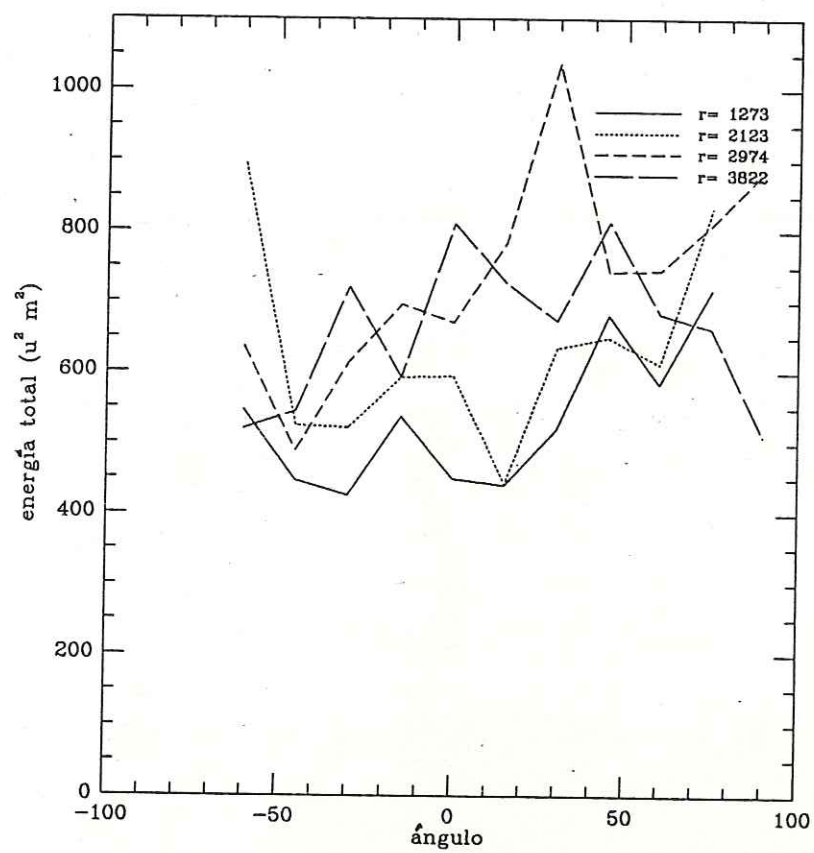


Fig. 32. Energía total en función del ángulo de visión, para cada una de las distancias al radar

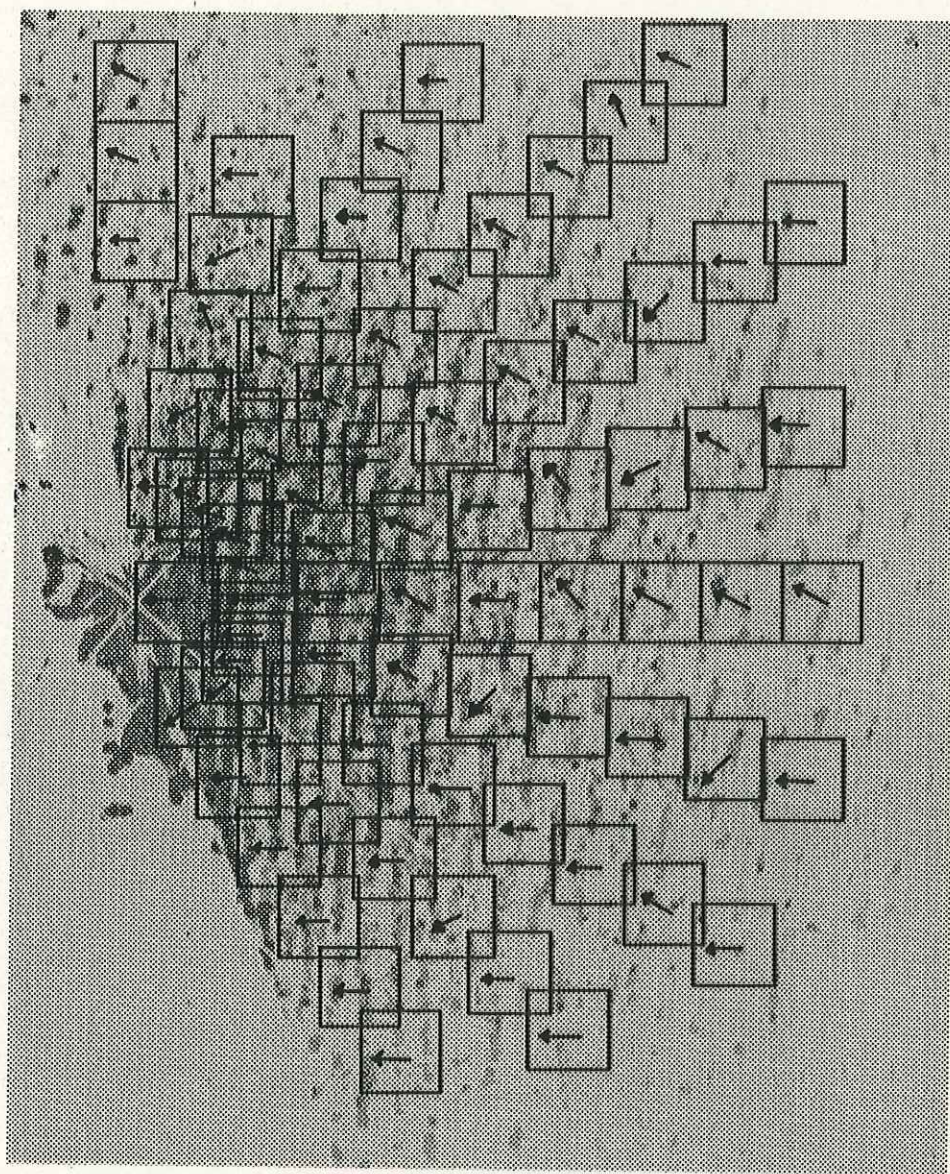


Fig. 33. Ángulo de propagación para cada una de las subimágenes.

5 DISCUSIONES

Durante el registro de fotografías llevado a cabo en las localidades de Ramona Beach y La Jolla, en Ensenada, B.C., las imágenes se tomaron a diferentes alcances del radar para escoger el óptimo y poder obtener buena información del oleaje presente. A través de una revisión visual de la imágenes adquiridas, se observó que el alcance de 5.5 km es el más apropiado para registrar un campo más amplio de oleaje y de mejor resolución ($\delta_r = 9m$); siempre y cuando exista un mínimo de viento, ya que si el esfuerzo del viento sobre la superficie es pequeño, el oleaje no se define en la imagen. En la localidad de Punta los Buenos, B.C., las condiciones imperantes de tormenta al momento de tomar las fotografías permitieron registros incluso hasta un alcance de 11.1 km; lo cual nos indica que incluso en condiciones de tormenta extrema se pueden obtener registros de olas mediante un radar marino convencional.

En general se observó que cuando prevalecía una intensidad mínima de viento (superficie del mar en calma) las olas no aparecían en la pantalla del radar aún cuando era evidente (por observación visual directa) que éstas existían, pero una vez que el viento empezaba a manifestarse y formar olas gravitatorias-capilares, la señal reflejada de la superficie del mar al radar se hacía mas intensa. En las figuras 10 y 11 se observa claramente lo anterior, ya que en la imagen (figura 10) que fue tomada cuando el viento era mas fuerte (5.5 m/s) se observan patrones de oleaje bien definidos mientras que en la imagen que fue tomada siete horas después (figura 11), cuando el viento había disminuido (prácticamente nulo) presenta puntos brillantes aislados que resulta muy difícil relacionarlos con patrones de oleaje. En la figura 12 la magnitud del viento al ser tomada la fotografía era de intensidad mayor (10 m/s) y como se observa, la imagen presenta patrones bien definidos de oleaje.

Wright (1978) menciona que es notable la dependencia de las ondas Bragg (es decir, las olas que satisfacen la condición Bragg y que suponemos son las principales reflectoras de las ondas electromagnéticas de la

superficie del mar) de la magnitud del esfuerzo del viento sobre la superficie, ya que la amplitud de la onda Bragg se incrementa rápidamente cuando se incrementa la velocidad del viento y por lo tanto la señal reflejada es más fuerte.

No solamente el viento es el factor principal en la formación de la imagen; es en si el conjunto de todas las condiciones atmosféricas imperantes al momento de tomar la fotografía (temperatura aire-mar, etc.) (Valenzuela, 1978). Además es importante la adecuada ubicación (altura) del sistema de radar (Mattie y Harris, 1979).

Del análisis visual de las imágenes se pueden observar uno o dos trenes de olas propagándose hacia la costa, pero puede darse el caso de que en una misma imagen se observen perfectamente hasta tres. En las figuras 9, 10, 12 y 13 se observa claramente como la dirección del oleaje cambia al aproximarse a la costa debido a la refracción. El observar más de un tren de olas en la imagen y la evidencia visual de refracción son entonces dos importantes ventajas que se tienen cuando se utilizan imágenes obtenidas mediante un radar marino.

En la imagen seleccionada para procesar en este trabajo (figura 13) se observan la longitud del tren de olas principal y su dirección a partir de la orientación de las franjas que son reflejadas. La longitud de onda del tren de olas principal medida directamente sobre la fotografía es de aproximadamente 313 metros.

Sin embargo, trenes de onda secundarios de la imagen (figura 13) no son fácilmente detectables por observaciones visuales y una descripción más completa sólo es posible en términos de su espectro bidimensional (direccional).

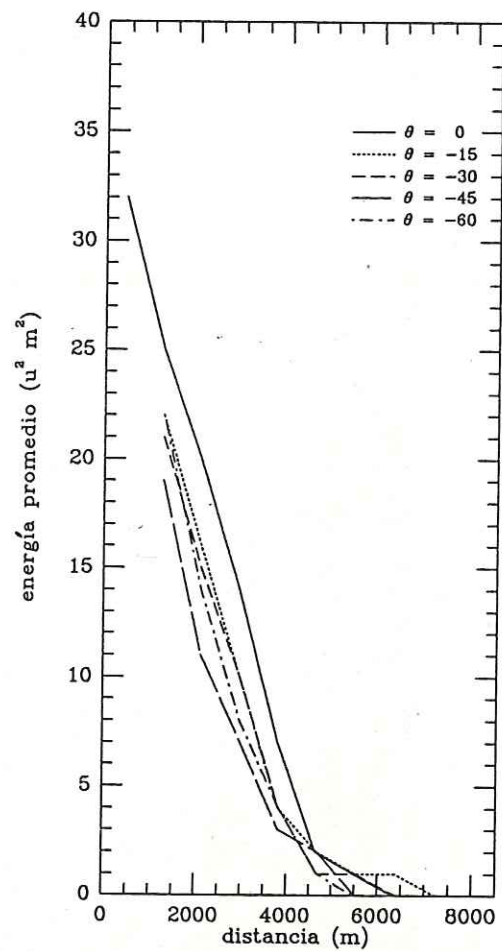
El espectro direccional nos da información sobre la manera en que la energía de las olas es distribuida en frecuencias de acuerdo a la dirección

de propagación. Los espectros calculados han sido usados principalmente para determinar los números de onda (magnitud y dirección) con energía significativa (la cual depende de la intensidad de la señal del radar reflejada).

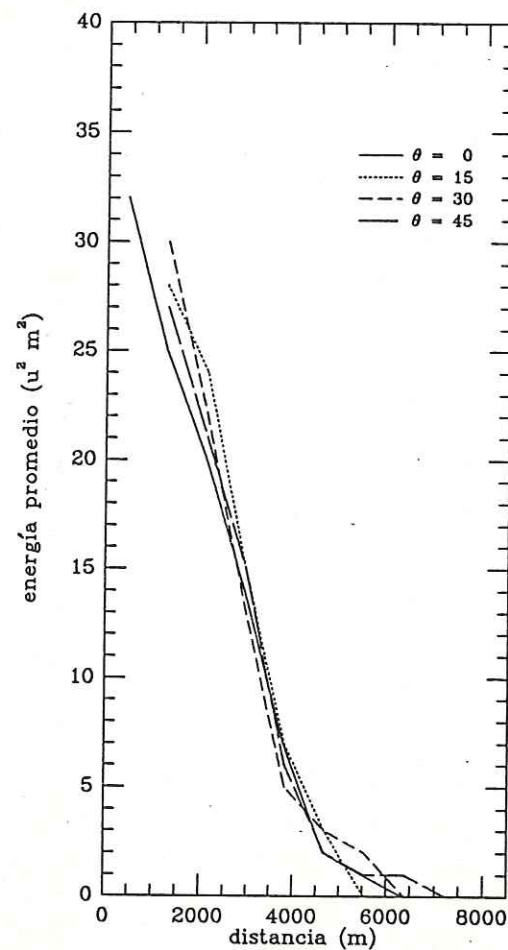
Particularmente los resultados del análisis espectral aplicado a la imagen que fue procesada (figuras 13 y 15) presentan claramente una concentración de energía en las bandas ($\kappa_x = 0.022, \kappa_y = 0$) y ($\kappa_x = 0.014, \kappa_y = 0.0073$) que corresponden a longitudes de onda de 283 y 380 metros respectivamente, concordando aproximadamente con el resultado obtenido al medir directamente sobre la imagen.

En general los espectros presentan resultados satisfactorios (figuras 16(c),(d) a 29(c),(d)). Esto es, la cantidad de energía reflejada disminuye conforme se incrementa la distancia al radar. Las subimágenes de muy poca energía se encuentran aproximadamente de 6 a 7 kilómetros de distancia al radar (Tabla II (r)) y como se observa en las figuras 23(a),(b) y 24(a),(b) son regiones de muy poca reflectividad. Lo anterior se puede apreciar también en la figura 34, que muestra la disminución gradual de la intensidad promedio desde un máximo en subimágenes cercanas al radar hasta un mínimo en subimágenes mas alejadas a él.

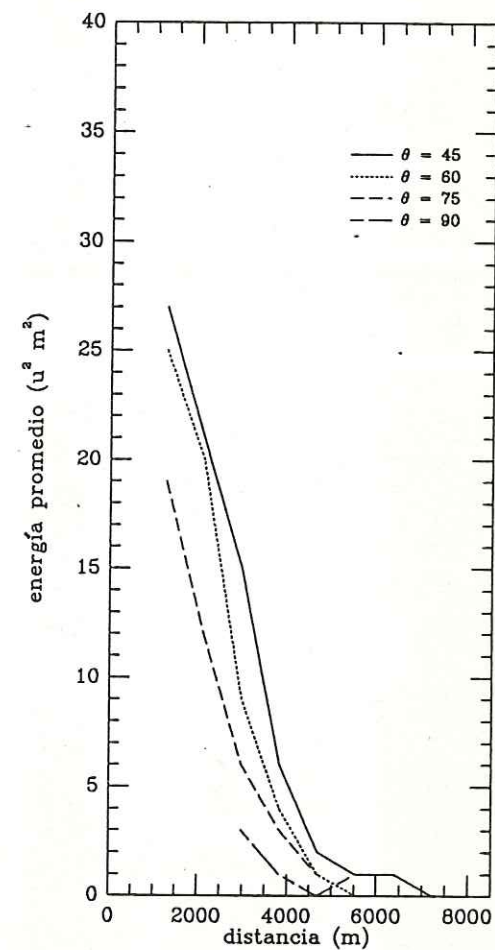
En la figura 31, se observa que la energía es mayor entre los 2 y 5 kilómetros de distancia al radar en comparación con las regiones mas cercanas y mas alejadas del radar. Esto se debe posiblemente a que muy cerca del radar hay efectos costeros (por ejemplo, gran cantidad de pequeñas rizaduras de olas rompiendo) que ocasionan que aquí la reflectividad sea alta pero de manera uniforme en toda la subimagen, destruyendo cualquier patrón de variación periódica que pudiera corresponder al oleaje. Después de los 5 km hay efectos de sombreado causados por olas mas cercanas que ocasionan niveles bajos de energía. Esto se presenta más claramente en la figura 35 donde a la energía reflejada



a)



b)



c)

Fig. 34. Energía promedio en función de la distancia, para cada uno de los ángulos de visión del radar

se le eliminó la dependencia con la distancia obteniendo picos de máxima energía ubicados aproximadamente a los cuatro kilómetros de distancia del radar y que es donde tenemos los patrones de oleaje mejor definidos.

Los espectros presentados en gráficas de contornos (figuras 16(d) a 29(d)) presentan una ambigüedad direccional de 180° en el espectro resultante. Esta ambigüedad se resolvió estableciendo a priori que las olas viajan solamente en dirección a la costa (figura 13). La dirección de propagación para cada una de las secciones está dada por $\theta_{o\max}$ y es representada gráficamente en la figura 33. Como se observa hay subimágenes que no presentan la misma dirección que la mayoría; esto es debido principalmente a que la dirección del tren de olas principal en algunas subimágenes cambia por efecto de la refracción que sufre el oleaje al aproximarse a la costa.

Los resultados muestran en general (figura 36) que para ángulos negativos el ángulo de propagación de las componentes de mayor energía es de $\theta_o = 180^\circ$ y para ángulos positivos está entre los $\theta_o = 150^\circ$ y $\theta_o = 160^\circ$. Estos resultados corresponden al tren de olas que es fácilmente observable en la imagen misma (figura 13). Las demás componentes no son tan fáciles de distinguir.

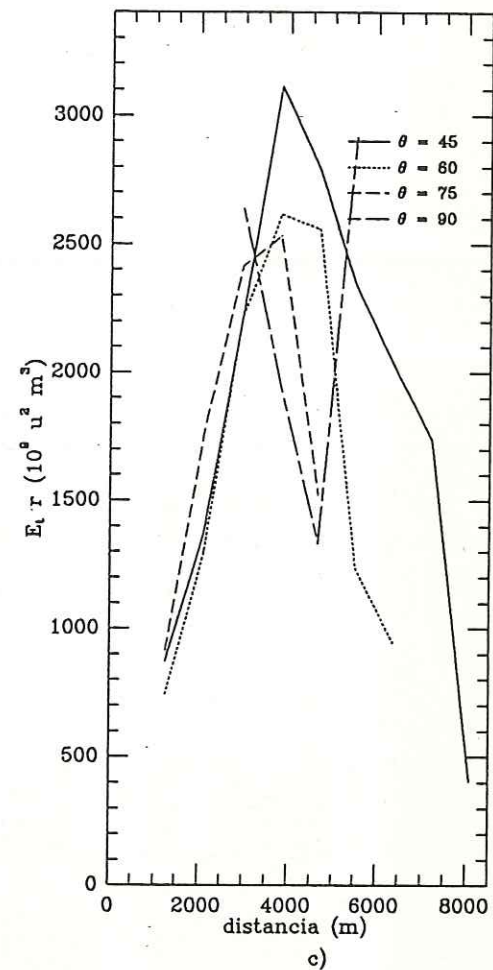
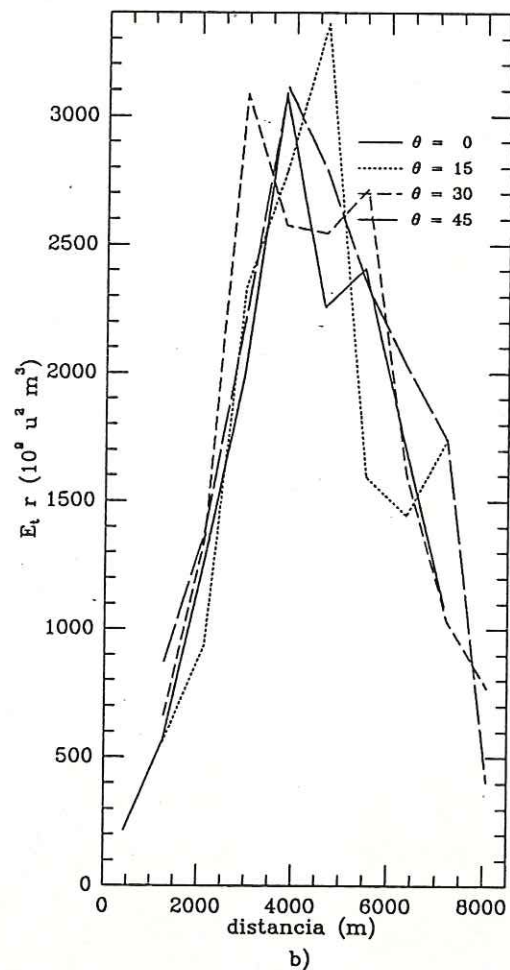
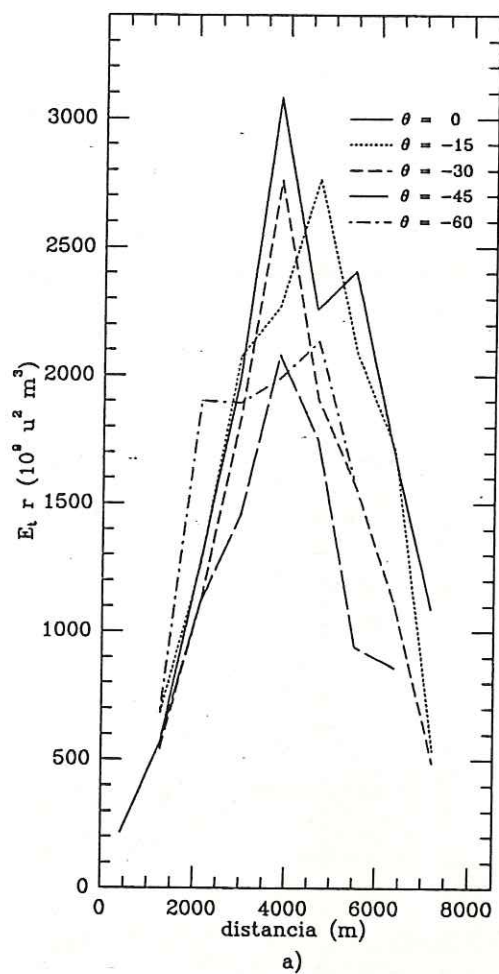


Fig. 35. Energía total por distancia ($E_t r$), para cada uno de los ángulos de visión del radar.

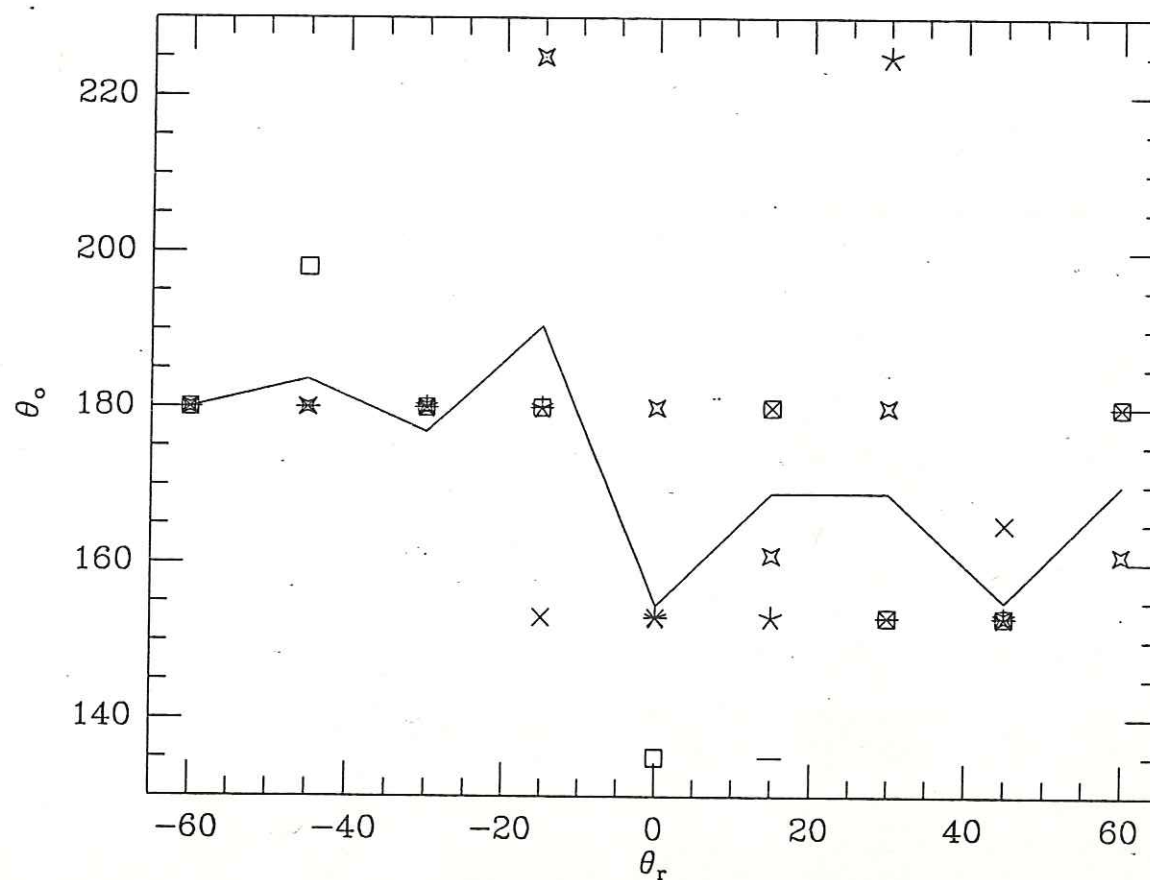


Fig. 36. Ángulo de propagación del oleaje en función del ángulo de visión del radar.

Al hacer un análisis visual de las subimágenes (por ejemplo, en la figura 25) que tienen las variaciones más notables en cuanto a dirección de propagación, se observa que en ellas no hay una dirección de oleaje definida y es por lo tanto que la dirección de propagación varía.

Ziemer *et al.* (1983) (citado por Young *et al.* 1985) mostraron que el retorno de la señal decrece ligeramente a medida que el ángulo entre la dirección de la señal del radar y la dirección del viento se incrementa. Nuestros resultados presentan un patrón similar si observamos (figura 32) que la energía está concentrada a los 30° (240° con respecto al norte) que es la dirección que tenía el viento al momento de tomar la fotografía. Vemos que la variación del espectro direccional con respecto al ángulo de visión del radar es debida principalmente al efecto de la dirección del viento, por lo que podemos decir que las olas cortas presentan cierta direccionalidad y que ésta es un factor importante a considerar en el análisis espectral de una imagen de radar de la superficie del mar. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos por Ocampo-Torres y Robinson (1990), que mediante un modelo numérico explican que la direccionalidad de las olas cortas es un factor importante en la determinación del espectro direccional de una imagen de radar. Esto además nos indica la posibilidad de obtener con este método la dirección aproximada del viento local.

Los posibles errores debidos al movimiento del oleaje y efectos causados por la geometría del radar fueron pequeños y fueron omitidos en nuestros cálculos.

En cuanto al equipo fotográfico utilizado para registrar las imágenes, se cuidaron al máximo todos los detalles para evitar posibles errores. Se utilizó en la cámara un lente planar que elimina la distorsión (ó aberración óptica) en las orillas de la imagen y diafragmas pequeños que dan más profundidad de campo. Además, se utilizó película "pancromatica" de alta resolución, con emulsión de grano extremadamente fino y de negativo grande que evita que al ampliarse éste se pierda resolución.

6 CONCLUSIONES

Del análisis espectral aplicado a la imagen seleccionada, se obtuvo que el espectro direccional varía significativamente con respecto a la distancia y al ángulo de visión del radar. Esto es, la energía reflejada de la superficie del mar con respecto a la distancia es mayor para distancias entre dos y cinco kilómetros; para distancias menores, hay efectos costeros que ocasionan que la reflectividad sea alta pero de manera uniforme, destruyendo cualquier patrón de variación periódico que pudiera corresponder al oleaje. Después de los cinco kilómetros hay efectos de sombreado que causan niveles muy bajos de energía reflejada (no se debe olvidar que estos resultados son para un alcance de radar de 11.1 kilómetros).

Las variaciones del espectro bidimensional (direccional) con respecto al ángulo de visión del radar son principalmente debidas al efecto de la dirección del viento sobre la superficie, siendo un factor muy importante entonces la direccionalidad de las olas pequeñas.

Por lo anterior, se presume que mediante el análisis espectral de imágenes de radar se tiene la posibilidad de obtener la dirección aproximada del viento local.

El sistema de adquisición de imágenes mediante un radar marino convencional nos da principalmente buena información acerca de la longitud de onda y la dirección de propagación del tren de onda principal.

Con este sistema no podemos obtener mediciones de altura de olas, y la cobertura espacial no es tan buena como la de los sensores a bordo de aviones. Sin embargo, se tienen las ventajas de registrar imágenes bajo condiciones de tormenta extrema; además de que en ellas se puede observar simultáneamente más de un tren de olas y evidencia visual de refracción.

7 BIBLIOGRAFIA

- Álvarez, L., M. Uyeji y R. Durazo, 1982. Observaciones de corrientes costeras superficiales mediante trazadores lagrangeanos. Informe Técnico OC-82-03, Departamento de Oceanografía del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., México, pp. 4-9.
- Álvarez, L., V. Godinez y A. Bravo, 1989. Trayectorias de corrientes y ejes de difusión frente a la costa de Tijuana, B.C. (1985-1986). Informe Técnico OC-89-03, Departamento de Oceanografía Física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C., México.
- Atanassov, V, W. Rosenthal y F. Ziemer, 1985. Removal of ambiguity of two-dimensional power spectra obtained by processing ship radar images of ocean waves. *J. Geophys. Res.*, vol. 90, no. C1, pp. 1061-1067.
- Borgman, E.L., 1979. Directional spectra from wave sensors. In *Ocean Wave Climate*, Earle and Malahoff Eds., Plenum Press, pp. 368.
- Brigham, E.O., 1974. *The Fast Fourier Transform*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Crombie, D.D., 1955. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. *Nature*, vol. 175, pp. 681.
- Dean, R., 1982. The NRC workshop on wave measurement technology a sumary, *Proceeding of the Conference on Directional Wave Spectra Applications*. R.L. Wiegel Ed., American Society of Civil Enginners, pp. 220-232.
- Donelan, M.A., J. Hamilton y W.H. Hui, 1985. Directional spectra of wind-generated waves. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. A 315, pp. 509-562.

- Elachi, C., 1977. Models of radar imaging of the ocean surface waves. IEEE Trans. Ant. and Prop., vol. AP-25 (1), pp. 84-95.
- Encyclopaedia Britannica, 1974. Volume II. H. H. Benton, Publisher, Printed in U.S.A., pp. 223-224.
- Hernández-Walls, R., 1986. Circulación inducida por el viento en una zona costera. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada, B.C., 70 pp.
- Hernández-Walls, R., 1992. Simulación numérica de la retrodispersión de microondas al incidir sobre la superficie del mar. Tesis de Maestría (En proceso), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México.
- Hoogeboom, P y W. Rosenthal, 1982. Directional wave spectra images. Paper presented at the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE Geoscience and Remote Sensing Soc. Munich, June 1-4.
- Ijima, T., T. Takahashi y H. Sasaki, 1964. Application of radar to wave observations. Proceedings of 11th Conference on Coastal Engineering in Japan, Japan Society of Civil Engineers, pp. 81-88.
- Longuet-Higgins, M.S., D.E. Cartwright y N.D. Smit, 1963. Observations of the directional spectrum of the sea waves using the motions of a floating buoy. Ocean Wave Spectra, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 111-136.
- McLeish, W. y D.B. Ross, 1983. Imaging radar observations of directional properties of ocean waves. J. Geophys. Res., vol. 88, no. C7, pp. 4407-4419.
- Mattie, M. y D.L. Harris, 1979. A system for using radar to record wave direction. Technical Report U.S. Coastal Engineering Research Center, no. 79-1, pp. 50.

- Mattie, M., S. Hsiao y D.D. Evans, 1981. Wave direction measured by four different systems. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-6, no. 3, pp. 87-93.
- Mitsuyasu, H., 1982. Directional spectra of ocean waves in generation area. *Proceedings of the conference on Directional Wave Spectra Applications*. R. L. Wiegel Ed., American Society of Civil Engineers, New York.
- Munk, W.H., G.R. Miller, F.E. Snodgrass y N.F. Barber, 1963. Directional recording of swell from distant storms. *Proc. Royal Society*, No. 253, pp. 505-584.
- Ocampo-Torres, F. J. y I. S. Robinson, 1990. Wind wave directionality effects on the radar imaging of ocean swell. *J. Geophys. Res.*, vol. 95, No. C11, pp. 20,347-20,362.
- Ochoa, J. y O. Delgado-Gonzalez, 1990. Pitfalls in the estimation of wind wave directional spectra by variational principles. *Applied Ocean Research*, vol. 12, no. 4, pp. 180-187.
- Oudshoorn, H.M., 1960. The use of radar in hydrodynamic surveying. *Proceedings of the seventh Conference on Coastal Engineering*, Council of Wave Research, Berkeley, California, vol. 1, pp. 59-76.
- Raytheon Marine Company, 1978. Mariners pathfinder radar. *Instruction Manual*, models 1225 y 1625, pp. 1-1 - 1-7.
- Seymour, R. y A.L. Higgins, 1978. Continuous estimation of longshore sand transport. *American Society of Civil Engineers, Proc. Coastal Zone 1978*, pp. 2308-2318.
- Tucker, M.J., 1985. The imaging of waves by satelliteborne synthetic aperture radar: the effects of sea-surface motion. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 6, no. 7, pp. 1059-1074.

- Tomiyasu, K., 1978. Tutorial review of synthetic aperture radar (SAR) with applications to imaging of the ocean surface. *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 5, pp. 563-583.
- Valenzuela, G.R., 1978. Microwave sensing of the ocean surface. "The ocean surface", Eds. Y. Toba y H. Mitsuyasu, pp. 233-244.
- Wright, F.F., 1965. Wave observation by shipboard radar, *Ocean Science and Ocean Engineering*, vol. 1, pp. 506-514.
- Wright, J.W., 1966. Backscattering from capillary waves with application to sea clutter, *IEEE Trans. Ant. and Prop.*, vol. AP-14, pp. 749-754.
- _____, 1968. A new model for sea clutter, *IEEE Trans. Ant. and Prop.*, vol. AP-16 (2), pp. 217-223.
- _____, 1978. Detection of ocean waves by microwave radar, the modulation of short gravity-capillary waves, *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 13, pp. 87-105.
- Young, I.R., W. Rosenthal y Z. Ziemer, 1985. A three-dimensional analysis of marine radar images for the determination of ocean wave directionality and surface currents, *J. Geophys. Res.*, vol. 90, no. C1, pp. 1049-1059.
- Ziemer, F., 1991. Directional spectra from shipboard navigation radar during Lewex. *Directional Wave Spectra*, Beal R.C. Ed. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, U.S.A.