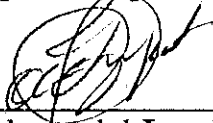


"LA INFLUENCIA DEL VIENTO EN LOS PROCESOS IMPORTANTES PARA LA
FORMACIÓN DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL MAR EN RADARES DE
MICROONDAS"

TESIS
QUE PRESENTA:

GRISELDA TABLERO LÓPEZ

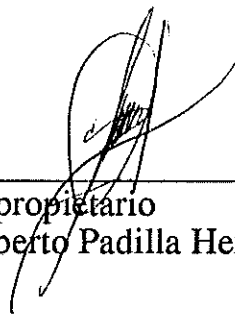
Aprobada por:



Presidente del Jurado
DR. Francisco J. Ocampo Torres



Sinodal Propietario
M.C. Rafael Hernández Walls



Sinodal propietario
M.C. Roberto Padilla Hernández

"LA INFLUENCIA DEL VIENTO EN LOS PROCESOS IMPORTANTES PARA LA FORMACION DE IMÁGENES DE LA SUPERFICIE DEL MAR EN RADARES DE MICROONDAS"

RESUMEN:

Durante las observaciones que se realizaron en Playa Ramona se registraron una serie de imágenes donde se observan olas utilizando un radar marino convencional (que opera en la banda X de las microondas). Al mismo tiempo se hicieron mediciones de viento en la costa con un anemómetro portátil. Para estudiar la influencia del viento en la formación de las imágenes se eligieron trece imágenes. Mediante el análisis espectral aplicado a las subimágenes de las imágenes se determinó que la energía disminuye al aumentar la distancia al radar, la energía aumenta al aumentar la rapidez del viento y se presentan cambios en el espectro direccional de la imagen al cambiar la dirección del viento. Sin embargo, a partir del análisis realizado no fue posible obtener la dirección aproximada del viento local.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	7
1.2 OBJETIVO	11
2 MATERIALES Y MÉTODOS	12
2.1 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	12
2.2 METODOLOGÍA	14
3 RESULTADOS	21
4 DISCUSIONES	64
5 CONCLUSIONES	68
6 BIBLIOGRAFIA	69

LISTA DE TABLAS

<u>Tabla</u>		<u>Página</u>
I.	Párametros y características importantes del radar marino Raytheon.	15
II.	Características de las imágenes tomadas en Playa Ramona.	17
III.	Características espectrales de las subimágenes con los valores máximos de E_T .	29

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1. Localización del radar durante la campaña de observaciones en Playa Ramona, Ensenada, Baja California.	13
2. Imagen obtenida de la pantalla del radar, tratada digitalmente, en la que aparecen patrones de oleaje tomada frente a Playa Ramona, Ensenada, Baja California, el día 5 de marzo de 1991.	32
3. Energía total de la señal recibida en cada una de las 13 imágenes analizadas en función de la distancia al radar.	33
4. Ilustración de la imagen digitalizada y distribución de las subimágenes analizadas. Imagen correspondiente al día 5 de marzo de 1991 a las 10:43 AM.	34
5. Resultados del análisis espectral de la imagen 1. Se presenta la dependencia de la dirección relativa al viento en a) la energía total en cada subimagen, b) la energía y c) el número de onda de la componente asociada al pico espectral y d) la longitud de la componente del pico espectral en función del ángulo de visión del radar para las siguientes distancias: --=222, x-x=444, ---=666,=888, +-+=1110 y _____=1332 m.	35
6. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 10:44 AM.	36
7. Igual que la figura 5 para la imagen 2.	37
8. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:09 AM.	38
9. Igual que la figura 5 para la imagen 3.	39
10. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:10 AM.	40
11. Igual que la figura 5 para la imagen 4.	41

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
12. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:12 AM.	42
13. Igual que la figura 5 para la imagen 5.	43
14. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:14 AM.	44
15. Igual que la figura 5 para la imagen 6.	45
16. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 11:20 AM.	46
17. Igual que la figura 5 para la imagen 7.	47
18. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 12:01 PM.	48
19. Igual que la figura 5 para la imagen 8.	49
20. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 13:13 PM.	50
21. Igual que la figura 5 para la imagen 9.	51
22. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 15:02 PM.	52
23. Igual que la figura 5 para la imagen 10.	53
24. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 16:11 PM.	54
25. Igual que la figura 5 para la imagen 11.	55
26. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 17:16 PM.	56
27. Igual que la figura 5 para la imagen 12.	57

28.	Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 7 de marzo de 1991 a las 11:39 PM.	58
29.	Igual que la figura 5 para la imagen 13.	59
30.	Resultados del análisis espectral de aquellas imágenes que tienen características de viento diferentes.	60
31.	Resultados del análisis espectral de las imágenes. La dirección del viento es: a) y b) 250°, c) y d) 270°.	61
32.	Resultados del análisis espectral de aquellas imágenes donde la magnitud del viento es constante (8 m/s).	62
33.	Resultados del análisis espectral para las imágenes que fueron captadas de la pantalla del radar como 1b*1bO.	63

1 INTRODUCCIÓN

La mayor parte del conocimiento que se tiene de la naturaleza es a través de imágenes. Una imagen es una representación pictórica (cuyo elemento más pequeño se denomina pixel) del objeto, independientemente del tipo de sensor y de las longitudes de onda que éste registre. La obtención de imágenes en percepción remota (la cual nos da información relacionada a un objeto o fenómeno sin establecer contacto físico con este) se puede llevar a cabo mediante dos sistemas:

1) Los sistemas de marca (framing system) que son aquellos con los que instantáneamente se obtiene una imagen del objeto, como son las cámaras fotográficas.

2) Los sistemas de barrido (scanning system) en los que uno o varios detectores, con un campo de visión muy pequeño "barren" o "leen" la cantidad de radiación que refleja la escena y la convierten en una señal eléctrica. La señal es amplificada y almacenada para posteriormente ser procesada y generar la imagen de la escena barrida como es el caso del radar, radiómetro, sonar, etc. (Sabins, 1977).

Los radares son dispositivos electrónicos utilizados generalmente para localizar objetos distantes midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión de ondas electromagnéticas y su recepción después de haber sido reflejadas por dichos objetos (Apel, 1987).

Tradicionalmente, los estudios sobre oleaje han estado motivados por su aplicación en dos campos que hoy pueden considerarse de importancia económica:

la predicción del oleaje para las operaciones marinas y la compilación de las estadísticas sobre oleaje para tareas de ingeniería en las costas o frente a éstas (Gower y Apel, 1988). Para esta última aplicación, normalmente basta con conocer el campo del oleaje en función del espacio y el tiempo. La adquisición de esta información en una escala temporal y espacial adecuada es extremadamente difícil y si recurrimos a los métodos convencionales como boyas y sensores de presión resulta muy costoso económicamente (Gower y Apel, 1988).

En las últimas dos décadas, el estudio del oleaje ha avanzado notablemente con el uso de los sensores remotos (específicamente con el uso de radares) los cuales pueden instalarse en torres, aviones, barcos, satélites o en tierra ya que complementan adecuadamente las tareas de observación y estudios del oleaje con una cobertura a gran escala, ampliando la posibilidad de atender las necesidades de información de oleaje por parte de las actividades involucradas en operaciones marítimas. Los sensores remotos basados en microondas han sido usados para reunir datos simultáneos sobre las olas y los vientos (Gower y Apel, 1988).

Las principales ventajas de los radares de microondas se resumen en:

- 1) Capacidad para obtener datos de oleaje sobre áreas muy grandes.
- 2) Posibilidad de muestrear bajo condiciones climáticas extremas debido a la capacidad de las microondas de penetrar nubes y su independencia del sol como fuente de iluminación.
- 3) Capacidad de usarse en forma autónoma.

El oleaje es un conjunto de perturbaciones provocadas por la acción del esfuerzo del viento sobre la superficie del agua, una vez generado, su permanencia y propagación se debe a la fuerza restauradora de la gravedad, el cual es la forma de energía más sobresaliente de los océanos.

El oleaje que se observa en una región es el resultado del efecto combinado de olas de diferente longitud, que se mueven no sólo entre ellas y a través de ellas, sino también viajando en distintas direcciones. En consecuencia, las olas ocurren en diferentes tamaños y formas dependiendo de la magnitud del viento, su duración y la longitud del alcance sobre el cual está actuando. Para determinar que proporción de la variabilidad total de la superficie del mar es asignable a las diferentes gamas de longitud de onda y de frecuencia que viajan en diferentes direcciones se utiliza el espectro direccional del oleaje. Para obtener el espectro direccional se han propuesto métodos basados en análisis fotográfico de la superficie del mar considerando que la intensidad de la luz en las fotografías son proporcionales a las pendientes de la superficie (Fuentes Morales y Domínguez Mora, 1988).

La formación de la imagen depende de la intensidad de la radiación de retorno en cada punto de la superficie del mar iluminada, esta intensidad depende del ángulo de incidencia de la radiación con la superficie ondulada del mar, y con las olas más pequeñas, cuyas propiedades están determinadas casi exclusivamente por la rapidez del viento que sopla sobre el agua. La forma como varía el viento con la altura depende de la estructura térmica del aire sobre el agua. Cuando el aire es más frío que el agua, los vientos son borrascosos y capaces de formar olas rápidamente. Si

el aire está más caliente que el agua, los vientos son mucho menos borrascosos y las olas crecen más lentamente. Cuanto más rápido es el viento, más encrespadas son las olas y más fuerte es el eco electromagnético (Pierson, 1978).

Una imagen donde aparecen patrones de oleaje en el radar muestra directamente la dirección de propagación (con una ambigüedad de 180°) y su longitud de onda. Las olas en la imagen aparecen en forma de una serie de líneas de "crestas" que son casi paralelas. La imagen de la superficie consiste en regiones brillantes y oscuras que forman un patrón de brillo, este patrón lo forma la variación de σ_0 (definida como la razón de la potencia de la señal recibida con respecto a la potencia de la señal emitida, por unidad de área iluminada) que depende del ángulo de visión del radar, magnitud y dirección del viento, diferencia de temperatura aire-mar, temperatura de agua, pendiente de la ola, etc. (Plant, 1986, Donelan y Pierson, 1987).

Se ha considerado que las principales reflectoras de la radiación electromagnética por la superficie del océano son las ondas Bragg las cuales satisfacen la siguiente relación:

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

donde θ_i y λ_r son, el ángulo de incidencia y la longitud de las ondas emitidas por el radar respectivamente. Las ondas Bragg que detecta el radar son aquellas que presentan crestas perpendiculares a la dirección de observación del radar. Las ondas Bragg y las demás de escala pequeña (gravitatorias-capilares), son moduladas en

orientación, amplitud y velocidad por olas grandes y largas ocasionando que la intensidad de la señal reflejada varíe espacialmente. Esta variación asociada a las olas largas genera a su vez variaciones en la intensidad del brillo en las imágenes del radar ocasionando que las olas largas sean detectadas (Wright, 1978).

La reflexión de las microondas depende de las propiedades físicas y geométricas del material del objeto con las que éstas interactúan (tamaño, corte, rugosidad y orientación de la superficie). 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 reflectora y del ángulo de incidencia de la radiación. Éstos son:

- a) Reflexión especular
- b) Reflexión difusa

La reflexión especular se presenta cuando la señal es reflejada hacia el radar únicamente por las superficies del objeto que son perpendiculares a la dirección de propagación de la señal del radar (superficies planas) (Valenzuela, 1978). En superficies rugosas las ondas electromagnéticas llegan a los diferentes puntos de la superficie con diferentes ángulos, y por lo tanto se reflejan en direcciones distintas. Como resultado, las ondas reflejadas de esta superficie son difusas.

Las ventajas al usar sensores remotos para medir regularmente el oleaje son considerables porque ofrecen mediciones sinópticas. Sin embargo, los datos de los

sensores remotos de la superficie marina no pueden ser invertidos directamente a datos que representen características del oleaje por lo que se requiere una función de transferencia.

Alpers et al (1981) propusó que el espectro de la imagen del radar y el espectro del oleaje cumple con la relación siguiente:

$$S_{imagen}(k_x, k_y) = |FTM|^2 K^2 S_{océano}(k_x, k_y)$$

S= Espectro

$$K = (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}$$

k_x = Dirección de alcance

k_y = Dirección azimutal

FTM= Función de Transferencia Modulada

La función de transferencia modulada no está determinada porque son muchos los factores que intervienen. Si se encontrara esta relación se determinarían las características del oleaje a partir del espectro direccional de la imagen, haciendo posible la compilación de datos de oleaje por ese método que servirían para resolver problemas oceanográficos. Por mencionar uno de ellos, mediante la predicción del oleaje se prevendrían daños futuros cerca de la costa debido al embate del oleaje en ella, también daría herramientas para un mejor diseño de obras de protección costera.

Mediante simulación numerica se ha demostrado la influencia de la direccionalidad de las olas pequeñas en el espectro del oleaje estimado a partir de imágenes de radar cambiando la dirección del pico espectral (es decir, las ondas dominantes) y las longitudes de onda (Ocampo-Torres y Robinson, 1990).

El propósito de este trabajo es determinar como influye el viento en la formación del espectro direccional de la imagen, suponiendo que el mecanismo Bragg es el más importante para explicar la reflexión difusa de las microondas por la superficie del océano.

1.1 ANTECEDENTES

La utilización del radar durante la Segunda Guerra Mundial trajo como consecuencia la investigación de la razón de los efectos del ruido o ecos del mar (reflexión de las ondas oceánicas) sobre la detección de naves, barcos y otros blancos en la superficie. Durante los estudios de los mecanismos que originan estos "ruidos" se observó que la señal se hacía más intensa al incrementarse la rapidez del viento sobre la superficie del mar (Geernaert y Plant, 1990).

Al ser analizadas las imágenes del radar, se encontraron patrones de variación de intensidad que podían estar relacionados con el oleaje. Esto despertó el interés de oceanógrafos en utilizar el radar como una herramienta para medir y observar características del oleaje y del viento.

Rice (1951) publicó una teoría sobre la reflexión de las ondas electromagnéticas (el océano actúa como un fuerte reflector de estas ondas) para superficies "ligeramente rugosas". Aplicando algunos métodos obtenidos por

Rayleigh (1929), para determinar la dispersión del ruido por superficies rugosas, Rice supone estas superficies rugosas como pequeñas perturbaciones de una superficie lisa.

Crombie (1955) presentó uno de los primeros trabajos donde la reflexión difusa fué relacionada con el oleaje. Esta relación surgió a partir del análisis del espectro Doppler de las ondas electromagnéticas reflejadas por las ondulaciones de la superficie del océano con una longitud de onda de 22 m. Crombie dedujo que las ondas de radio son reflejadas difusamente por ondas oceánicas cuya longitud de onda es igual a la mitad de la longitud de la onda electromagnética que viaja en dirección a la antena de transmisión/recepción.

Algunos trabajos experimentales sobre reflexión difusa en la superficie del océano se basaron en actividades de laboratorio como los de Wright (1966) y Keller y Wright (1975). Wright (1966) condujo una serie de mediciones de microondas sobre un tanque de olas donde las condiciones podían ser controladas y mostró que la reflexión difusa de las microondas con cierto ángulo de incidencia resulta del mismo fenómeno de resonancia que Crombie (1955) observó en altas frecuencias, la única diferencia es que las microondas resuenan con olas de longitud de onda menor (aproximadamente de 3 cm. para el caso de la banda X).

A partir de imágenes de radar tomadas en una superficie marina Mattie y Harris (1979), proponen el estudio de esas superficies en base a sus características espectrales vía Transformada Rápida de Fourier (FFT). Mattie *et al.* (1981), Hoogeboom y Rosenthal (1982), Ziemer *et al* (1983), Young *et al.* (1985a) y

Atanassov *et al.* (1985) extendieron estos primeros hallazgos al digitalizar las imágenes de radar y encontrar el espectro bidimensional y tridimensional de estas imágenes, mostrando características similares al espectro obtenido simultáneamente con datos de boyas ó sensores de presión.

Zierner *et al* (1983) encontraron que el espectro de energía de la imagen del radar marino no está relacionado con las alturas de las olas pero hay una fuerte conexión con los procesos del océano a pequeña escala que se obtiene al elevar la retrodispersión. Mostraron que la retrodispersión del radar es fuerte cuando la dirección de observación del radar está a favor del viento y débil en la dirección perpendicular, con un máximo secundario en dirección contraria al viento. Trizna (1988) concluyó de resultados experimentales de un radar marino que operó en la banda X, que la máxima retrodispersión es probablemente en la dirección de las ondas largas. Esa dirección coincide típicamente con la dirección del viento, aunque no necesariamente ocurre así todo el tiempo.

Las variaciones del espectro direccional con respecto al ángulo de visión del radar son principalmente debidas al efecto de la dirección del viento sobre la superficie (Riquelme Alcantar, 1992). En éste trabajo se propone la posibilidad de obtener la dirección aproximada del viento local mediante el análisis espectral de la imagen.

En el Proyecto "Medición, Simulación y Predicción del Oleaje" que se desarrolló en el departamento de Oceanografía Física en el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), se realizaron varias

campañas utilizando un radar marino que operó en la banda X de las microondas. Se obtuvieron algunas fotografías de imágenes de la superficie del mar durante los meses de marzo y agosto de 1991. El objetivo del proyecto es el de explorar la posibilidad de utilizar de manera rutinaria un radar convencional, para estimar cuantitativamente el espectro direccional del oleaje (que arriba a la costa de la región de Ensenada, B.C.) a partir de imágenes de radar.

El presente trabajo forma parte del proyecto "Uso de las Microondas para Mejorar la Adquisición de Información de Oleaje y Avanzar en su Predicción", apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología mediante el convenio 1109-T9201.

1.2 OBJETIVO

Determinar la influencia del viento (rapidez y dirección) en la formación de imágenes de radar donde se observan olas utilizando análisis espectral.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 DESCRIPCIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a Playa Ramona, la cual está ubicada en la porción norte de la Bahía de Todos Santos a los $29^{\circ}27'28''$ de longitud. Sus límites son el Puerto del Sauzal al norte y Punta Morro al sur (figura 1).

Se caracteriza por ser una playa angosta de arenas gruesas y mezclada con grava, se presenta este patrón desde el Sauzal de Rodríguez hasta Punta Morro debido a la erosión producida por el oleaje sobre los derrames basálticos presentes (Aranda Manteca, 1983).

Los vientos predominantes provienen del noroeste y soplan con una velocidad promedio de 8 nudos y los vientos secundarios provienen del oeste y sus velocidades son variables. Se presentan brisas adiabáticas locales con dirección este-oeste (Segovia Zavala, 1982 y López Luna, 1990).

De acuerdo al patrón de viento establecido en los meses cálidos el oleaje proviene del noroeste por lo que la dirección de la corriente en la zona de rompiente se estima ser hacia el sur, siguiendo la topografía de la costa (Rivera Duarte, 1984).

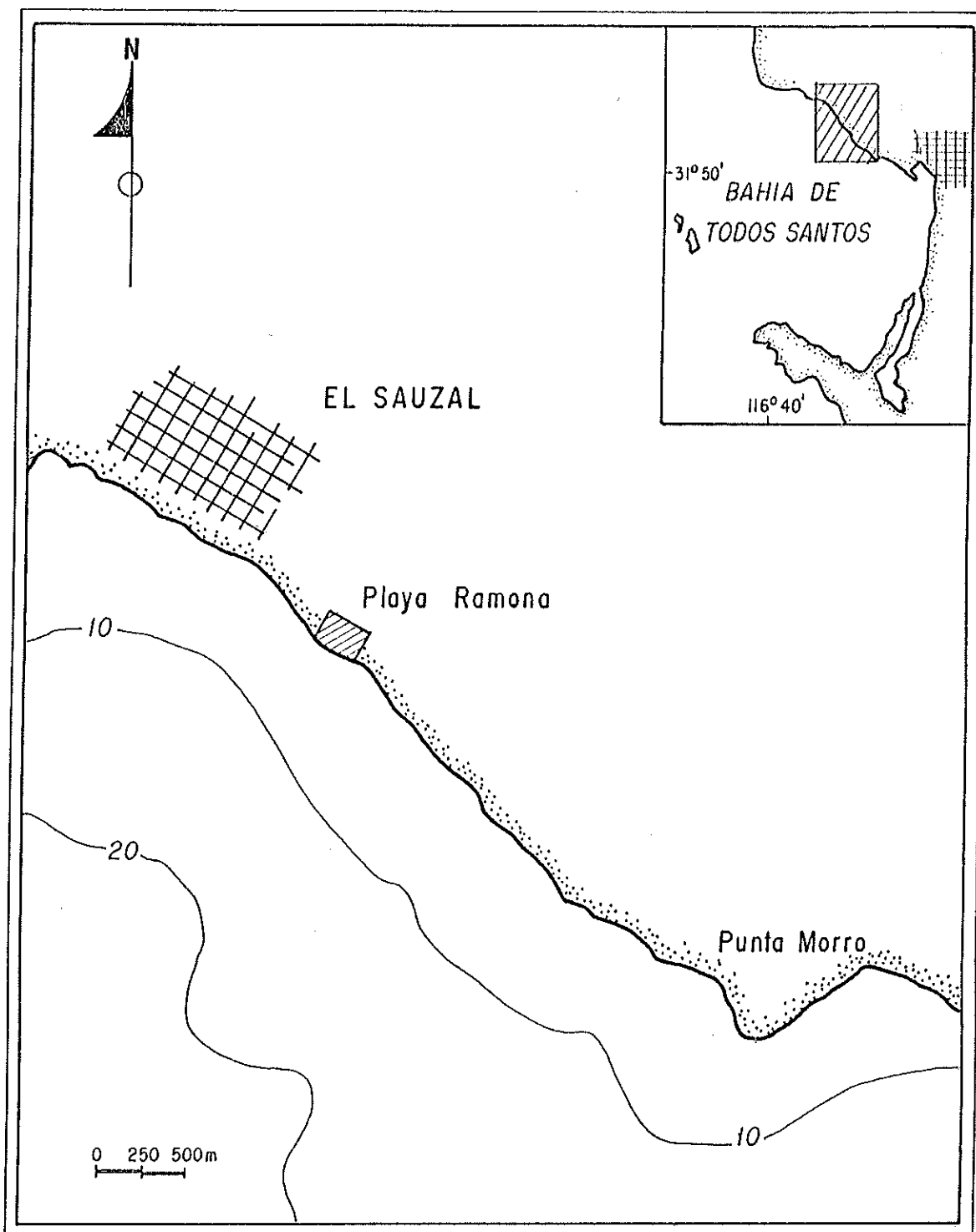


Figura 1. Localización del radar durante la campaña de observaciones en Playa Ramona, Ensenada, Baja California.

2.2 METODOLOGÍA

Las imágenes que se analizaron provienen de un conjunto de 612 fotografías obtenidas durante la campaña realizada bajo el proyecto titulado "Medición, Simulación y Predicción del Oleaje", en marzo de 1991 en Playa Ramona. El radar que se utilizó en la campaña de mediciones para el proyecto fué uno de marca Raytheon, que funciona en la banda X de las microondas ($\lambda_r=3$ cm). La altura de la antena transmisora/receptora fué de aproximadamente 4 m. sobre el nivel del terreno. Algunos parámetros del radar se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Parámetros y características importantes (tomados de Riquelme, 1992) del radar marino Raytheon.

PROPIEDADES	VALOR
Frecuencia (MHz)	9375±30
Longitud de pulso (cm)	3.2
Potencia de salida (KW)	25
Longitud de la antena (m)	3.6
Velocidad de rotación (rpm)	33
Ancho horizontal del haz de electrones (°)	0.65
Diámetro del haz de electrones (en pantalla) (mm)	0.3
Diámetro de la pantalla (m)	0.3
Rango de operación (Km)	5.50 11.1 22.08
Ancho del pulso (μ_s)	0.06 0.5 0.5
Resolución radial (m)	9.0 75.0 75.0
Resolución tangencial (m)	62.0 125.1 248.8

La Tabla II contiene la información referente a cada una de las imágenes como : el número con el que se asignó a las fotografías en el presente trabajo, el número asignado en el banco de datos, la fecha, hora, rapidez y dirección del viento, tiempo de exposición al ser capturada la imagen de la pantalla del radar y algunas observaciones que indican la forma de tomar la fotografía. Los datos de magnitud y dirección del viento se tomaron simultáneamente con el uso de un anemómetro portátil con una precisión de $\pm 5^\circ$ en dirección y de ± 0.025 m/s en rapidez.

Tabla II. Características de las imágenes tomadas en Playa Ramona.

No.	Foto	Fecha	Hora	Viento		Δt	Observ.
				Rapidez(m)	Dirección		
1	9-10	5-03-91	10:43	7	270°	2s	1b@
2	9-11	5-03-91	10:44	7	230°	2s	1bO
3	10-3	5-03-91	11:09	7	230°	1b	1bO
4	10-4	5-03-91	11:10	7	230°	1b	1bO
5	10-5	5-03-91	11:12	7	230°	1b	1bO
6	10-7	5-03-91	11:14	7	230°	1b	1bO
7	14-5	6-03-91	11:20	10	250°	2s	1b@
8	14-7	6-03-91	12:01	11	270°	2s	1b@
9	14-9	6-03-91	13:13	8	270°	2s	1b@
10	14-11	6-03-91	15:02	8	235°	2s	1b@
11	15-3	6-03-91	16:11	8	250°	2s	1b@
12	15-4	6-03-91	17:16	5	255°	2s	1b@
13	16-10	7-03-91	11:39	9	280°	2s	1b@

s= segundos b= barrido @= toma de foto después del barrido O= con obturador
abierto Δt =tiempo de exposición

El subconjunto de fotografías que se extrajo del banco de datos cuenta con las siguientes características : alcance (1.5 mn), ganancia (1.0), brillo (1.0) y contraste (1.0).

Las imágenes fueron digitalizadas con un rastreador (Arcus AGFA) con las siguientes características: 256 niveles de grises, 100% de ampliación y 300 pixeles por pulgada (ppi), generando de esta manera una matriz en la que el valor de cada elemento representa la intensidad de la energía reflejada en cada punto. Las imágenes digitalizadas se transfirieron al disco de una Hawlett Packard (HP700) para su análisis.

El procesamiento de cada imagen una vez instalada en la HP700 fué el siguiente:

1) Cambio de formato. Al digitalizar la fotografía se genera un archivo de formato TIFF que se convirtió a formato RAW mediante el paquete de programación KHOROS con el propósito de accesar este archivo mediante el paquete de programación MATLAB.

En los siguientes pasos se utilizaron rutinas de MATLAB.

2) Extracción de subimágenes, con el propósito de observar la variación de las características espectrales de las subimágenes con respecto a la distancia y a la dirección relativa al viento.

3) Pre-procesamiento de los datos. A los datos se les restó su valor promedio (para eliminar longitud de onda (λ) infinita), se aplicó un filtro para eliminar fugas de energía (Ventana Hanning) y por último se eliminó la tendencia para eliminar longitudes de onda mayores a las que abarca la subimagen.

4) Estimación del espectro direccional (2 grados de libertad (no se realizaron promedios sobre bandas)) de cada subimagen.

5) Graficado de algunos resultados del análisis espectral.

A continuación se define el significado de la simbología utilizada en el presente trabajo:

E_T : Es la energía total del espectro de la subimagen.

$$E_T = \sum_{i=1}^{64} E_i(k) \Delta k_x \Delta k_y$$

E_i = Energía de la señal reflejada de la banda i

k = Número de onda

$\Delta k_{x,y}$ = Intervalo del número de onda en las direcciones x, y .

E_M : Es el valor de la energía correspondiente a la componente del pico espectral

$$E_M = E(k_p)$$

k_p = Número de onda asociado al pico espectral.

$r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$: representan las distancias desde el radar al centro de cada una de las subimágenes, los subíndices 1, 2, 3, 4, 5 y 6 indican distancias aproximadas de 222, 444, 666, 888, 1110, 1332 m respectivamente.

θ_{kN} : Dirección de propagación del oleaje con referencia al norte geográfico.

λ_p : longitud correspondiente a la componente del pico espectral.

$$\lambda_p = \frac{2\pi}{k_p}$$

φ : dirección relativa a la dirección del viento.

3 RESULTADOS

La figura 2 representa una imagen típica obtenida con el radar marino en donde son visibles líneas aproximadamente paralelas que representan un patrón asociado al oleaje. En la imagen se observa un brillo intenso en la región cercana al radar que disminuye gradualmente hacia las regiones distantes.

Se seleccionaron trece imágenes en donde algunas características del radar se mantuvieron constantes (brillo (1), ganancia (1) y alcance ($1.5 \text{ mn} = 2778 \text{ m}$)), para analizar las variaciones debidas a la dirección y magnitud del viento del experimento realizado en Playa Ramona. Las fotografías de la imagen de la pantalla que se seleccionaron fueron obtenidas en dos formas: la primera se realizó obscureciendo completamente la pantalla del radar por espacio de uno ó dos minutos aproximadamente (eliminando cualquier resto del brillo en la pantalla ocasionado por el barrido del cursor en las tomas anteriores) abriendo el obturador de la pantalla al instante en que el cursor inicia a barrer el área manteniéndolo durante 2 segundos ($2s*1@$) y la segunda se realizó sin obscurecer la pantalla, abriendo el obturador cuando el cursor empieza a barrer el área y cerrándolo al terminar el barrido ($1b*1bO$).

En la digitalización, el pixel representa un área de $1.735 \text{ m} \times 1.735 \text{ m}$ aproximadamente ($\Delta x = \Delta y = 1.735 \text{ m}$); en el dominio del número de onda: $\Delta k = 2.8 \times 10^{-2} \text{ radm}^{-1}$ y para las subimágenes de 128×128 pixeles que cubren un área de $222 \text{ m} \times 222 \text{ m}$ aproximadamente, el número de Nyquist es $k_N = 1.8 \text{ radm}^{-1}$

Las figuras 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26 y 28 señalan las subimágenes que fueron analizadas espectralmente. En cada imagen la localización del radar se representa con un círculo. El encabezado de cada imagen representa: "f" significa fotografía; le preceden 4 dígitos, los dos primeros indican el número de rollo de película y los otros dos indican el número de fotografía en ese rollo. Los centros de las subimágenes corresponden a puntos sobre rectas trazadas radialmente con una separación de 15° entre ellas, a estos ángulos nos referiremos como ángulos de visión del radar (θ_v). Algunas imágenes tienen diferente tamaño (en términos de número de pixeles) porque en la digitalización se redujo el tamaño original confinándolas a la presencia de patrones de olas. La orientación de las imágenes en las figuras 6 y 26 se encuentran rotadas 180° con respecto a las demás. Esta orientación fue corregida fácilmente en el análisis espectral.

Los resultados del análisis espectral que se presentan incluyen solamente el análisis de las primeras 6 subimágenes para cada ángulo de visión del radar porque a distancias más grandes los patrones de olas ya no se definen claramente.

En la figura 3 se presentan los resultados de E_T en función de la distancia al radar para las trece imágenes. Los resultados de E_T de las cuatro imágenes que se presentan en la figura 3a fueron tomadas en la misma forma ($1b*1bO$) y son los valores más altos de E_T . La separación de las otras imágenes se hizo en base al orden de magnitud que presenta la E_T ya que todas ellas fueron registradas en la misma

forma (2s*1b@). Generalmente E_T disminuye al aumentar la distancia al radar, sin embargo, la imagen 8 presenta un segundo máximo relativo aproximadamente a los 2000 m.

A partir de los resultados del análisis espectral de cada subimagen se analizaron las siguientes variables: E_T , E_M , θ_{KN} , en función de φ y λ_p en función θ_v .

Los resultados del análisis espectral de la imagen 1 se presentan en la figura 5. Se observa que E_T aumenta cuando θ_v se aproxima a la dirección del viento (figura 5a). El valor máximo de E_T se alcanza en r_1 y r_4 en la dirección del viento. En la figura 5b se muestra que E_M sigue el mismo comportamiento de E_T lo que indica que las contribuciones de energía de los otros números de onda son mucho menores que la energía asociada al pico espectral. La figura 5c muestra θ_{KN} en función de φ , se observa que el valor de θ_{KN} en r_1 es independiente de la dirección del viento, el cual es casi constante (303° o 315°), en las otras distancias varía alrededor de 100° , excepto en r_5 y r_6 donde θ_{KN} varía hasta 180° . La figura 5d muestra λ_p en función de θ_v con un valor máximo de λ_p de 111 m, y un mínimo de 7 m (r_5 y r_6).

Se muestran los resultados del análisis espectral de la imagen 2 en la figura 7. La figura 7a presenta la E_T en función de φ , se observa que E_T sigue el mismo comportamiento que la E_T de la imagen 1. El valor máximo de E_T (r_2 y r_3) se encuentra aproximadamente en la dirección del viento, se observa un segundo máximo relativo de E_T en -90° en r_2 . La figura 7b presenta a E_M en función de φ donde E_M muestra un comportamiento semejante a la E_T . La figura 7c muestra θ_{KN} en función de φ , el comportamiento de θ_{KN} es el mismo que el descrito en la imagen 1 en r_1 con un valor

de θ_{KN} de 303° , para las otras distancias muestra variaciones que son pequeñas en relación a las que se presentan en las distancias r_5 y r_6 donde θ_{KN} varía hasta 170° . La figura 7d presenta λ_p en función de θ_v , donde λ_p toma el valor máximo de 111 m y un mínimo de 3.5 m (r_5 y r_6).

Los resultados del análisis espectral de la imagen 3 se muestran en la figura 9. En la gráfica 9a se observa E_T en función de φ , donde E_T tiende a disminuir en la dirección del viento. Es interesante observar la variación de E_T en r_1 donde al acercarse a la dirección del viento alcanza su valor mínimo y conforme se aleja de la dirección del viento empieza aumentar su valor, la E_T máxima se encuentra en r_3 . La figura 9b presenta E_M en función de φ donde el comportamiento de E_M es totalmente diferente a la E_T excepto en r_1 y r_6 . Esta diferencia indica que existen bandas que tienen una energía semejante a la asociada al pico espectral, el valor máximo de E_M se localiza en r_3 . La figura 9c da el comportamiento de θ_{KN} en función de φ en donde se observa que θ_{KN} presenta variaciones de alrededor 110° . El θ_{KN} en r_4 se mantiene constante en un intervalo de -90 a 0° , de igual forma, se expone en la r_2 pero para un intervalo de 0 a 50° . El valor máximo de λ_p es de 111 m y el mínimo de 45 m (r_2).

En la figura 11 se presentan los resultados del análisis espectral para la imagen 4. La E_T (figura 11a) sigue el mismo patrón que la E_T de la imagen 3, pero la E_T en r_3 y r_6 aumenta al acercarse a la dirección del viento. La figura 11b muestra E_M en función de φ , el patrón de E_M es diferente al de la E_T para r_1 , r_2 y r_3 , sin embargo, la E_M en las otras distancias tiene el mismo patrón que E_T . La figura 11c explica a θ_{KN}

con respecto a φ , donde θ_{KN} exhibe la mayor variación en r_1 , la variación se hace más pequeña conforme se aumenta la distancia al radar. El θ_{KN} en r_1 permanece constante (315°) en un intervalo de φ de 5° a 45° . La figura 11d presenta λ_p en función de θ_v , donde λ_p toma un valor máximo de 111 m y un mínimo de 7 m.

Los resultados del análisis espectral de la imagen 5 se presentan en la figura 13. En la figura 13a la E_T tiene el mismo comportamiento que el de las últimas dos imágenes, la E_T máxima se encuentra en r_3 . La figura 13b muestra E_M en función de φ , el E_M en r_1 expone el mismo patrón que E_T , en las otras distancias sucede lo contrario. El valor máximo de E_M se encuentra en r_4 . La figura 13c muestra θ_{KN} en función de φ , el cual manifiesta mayores variaciones de θ_{KN} en r_4 , las otras distancias θ_{KN} varía alrededor de 120° . En la figura 13d se observa a λ_p en función de θ_v , λ_p toma un valor máximo de 111 m, un mínimo de 10 m.

Los resultados del análisis espectral de la imagen 6 se muestran en la figura 15. La E_T tiene el mismo comportamiento que las últimas 3 imágenes excepto que como la imagen 3 la E_T en r_1 alcanza un valor mínimo en la dirección del viento y el valor máximo lo alcanza en r_4 (figura 15a). En la figura 15b se contempla E_M en función de φ donde E_M en r_1 y r_2 tiene el mismo patrón que E_T ; el valor máximo de E_M se localiza en r_4 . La figura 15c muestra a θ_{KN} en función de φ presentando θ_{KN} variaciones de 120° en r_2 , la θ_{KN} en r_5 y r_6 en comparación a la θ_{KN} en r_1 y r_2 manifiesta variaciones más pequeñas, en ciertos intervalos el valor de θ_{KN} no varía. La figura 15d señala λ_p en función de θ_v , el valor máximo de λ_p es de 111 m y el mínimo de 45 m.

Los resultados del análisis espectral de la imagen 7 (figura 17) siguen el mismo patrón que la imagen 1. La E_T en r_1 y r_6 toma un valor máximo cerca de la dirección del viento (17a). El valor máximo de E_M lo alcanza en r_1 (17b). La figura 17c presenta a θ_{KN} en función de φ donde θ_{KN} exhibe una mayor variación conforme se aleja del radar, en r_6 alcanza cambios de hasta 200° . La figura 17d señala el comportamiento de λ_p , con un valor máximo de 111 m y el valor mínimo es de 7 m (r_5 y r_6).

Los resultados del análisis espectral de la imagen 8 se presenta en la figura 19 observándose el mismo patrón de la imagen 1. En r_3 y r_4 la E_T alcanza su valor máximo cerca de la dirección del viento y en r_5 y r_6 lo alcanza en -90° (figura 19 a). La figura 19b presenta E_M en función de φ , la E_M sigue el mismo patrón que E_T excepto que varía en r_1 porque a esa distancia la E_M tiene su valor máximo y E_T alcanza su valor máximo en r_2 . Se muestra que θ_{KN} en r_1 presenta variaciones pequeña (15°) mientras que en las otras distancias el θ_{KN} varía hasta 120° en r_1 , r_2 y r_4 , la θ_{KN} es paralela a la dirección del viento (figura 17c). La figura 17d señala λ_p en función de θ_v , el valor máximo λ_p es de 111 m y un mínimo de 7 m en r_6 .

En la figura 21 se presenta los resultados del análisis espectral para la imagen 9, los cuales siguen el mismo patrón de la imagen 1. Es importante hacer notar el comportamiento de E_T en r_5 donde su valor máximo es aproximadamente en -90° . La E_M sigue el mismo patrón que E_T excepto que su valor máximo lo alcanza en r_3 , mientras que la E_T lo alcanza en r_1 . Se observa que θ_{KN} presenta mayores variaciones conforme la distancia al radar aumenta, la θ_{KN} en r_1 tiene variaciones en promedio de 20° y en r_6 de 15° (figura 21c).

La figura 23 muestran los resultados del análisis espectral de la imagen 10. La figura 23a presenta E_T en función de φ , observándose que la E_T en r_1 y r_2 sigue el patrón de la imagen 1, sin embargo, para las otras distancias (r_3 , r_4 , r_5 y r_6) E_T tiende a disminuir al acercarse a la dirección del viento; en r_3 alcanza E_T su valor máximo en -90° . Se observa que la E_M sigue el mismo patrón que la E_T difiriendo solamente un poco en r_1 (figura 23b). La figura 23c muestra θ_{KN} en función de φ donde θ_{KN} manifiesta mayores variaciones al alejarse de la dirección del viento excepto en r_6 donde alcanza su mayor variación en esa dirección en r_1 , r_2 , r_3 y r_4 . Se observan intervalos de φ donde θ_{KN} es constante. La figura 23d muestra λ_p en función del θ_v , el valor máximo de λ_p es de 111 m y el mínimo de λ_p se localiza en r_6 con un valor de 3 m.

Los resultados del análisis espectral de la imagen 11 (figura 25) sigue el mismo patrón de la imagen 1. La θ_{KN} en r_1 y r_2 es aproximadamente constante cerca de la dirección del viento con un valor de 333° y empieza a variar al alejarse de φ , θ_{KN} en r_6 varía hasta 200° (figura 25c). La figura 25d muestra λ_p en función de θ_v , su valor máximo de λ_p es 111 m en r_4 para las otras distancias λ_p toma valores menores con un mínimo de 7 m.

Los resultados del análisis espectral de la imagen 12 (figura 27) son semejantes a la imagen 1. La E_M en las dos primeras distancias al radar presenta un comportamiento diferente al de E_T (figura 27b). La figura 27c presenta θ_{KN} en función de φ obteniendo que θ_{KN} varía hasta 120° . La figura 27d muestra λ_p en función de θ_v con un valor máximo de 111 m y un mínimo de 45 m.

La figura 29 presenta los resultados obtenidos de la imagen 13, los cuales siguen la misma tendencia de la imagen 1. La figura 29c señala θ_{kN} en función de φ , con diferencias de θ_{kN} de 110° en r_1 , los cambios de θ_{kN} en las otras distancias presentan mayores variaciones. La θ_{kN} en r_2 permanece constante cerca de la dirección del viento. En la figura 29d se observa λ_p en función de θ_v tomando, el valor máximo de λ_p es 111 m en r_4 , r_5 y r_6 y el valor mínimo de 48 m en r_2 , r_3 , y r_5 .

En la tabla III se presenta a la subimagen con el valor máximo de E_T y sus correspondientes características espectrales para las 13 imágenes, r es la distancia del radar a el centro de cada una de las subimágenes. Se observa que la subimagen que exhibe el máximo de E_T en las imágenes 1, 7 y 8 se encuentra aproximadamente en la dirección del viento.

Tabla III. Características espectrales de las subimágenes con los valores máximos de E_T .

No. Imagen	No. de la subimagen.	E_T (u^2m^2/rad^2)	E_M (u^2m^2/rad^2)	θ_{kN} ($^\circ$)	λ_p (m)	θ_v ($^\circ$)	φ ($^\circ$)	r (m)
1	1	5.99×10^7	3.97×10^6	315	78.52	45	1.31	222.08
2	19	5.25×10^7	3.62×10^6	303	61.59	253	-26.68	222.08
3	13	1.41×10^8	5.98×10^6	423	49.66	64	22.31	666.24
4	55	1.38×10^8	9.20×10^6	405	78.52	140	-53.68	444.16
5	7	1.59×10^8	1.28×10^7	333	99.32	51	35.31	1.55×10^3
6	67	1.62×10^8	1.69×10^7	416	61.59	129	-42.68	888.32
7	9	2.91×10^7	1.72×10^6	360	111.04	65	1.31	222.08
8	2	9.91×10^7	7.08×10^6	315	52.34	45	1.31	444.16
9	1	7.57×10^7	5.61×10^6	341	70.23	41	5.31	222.08
10	14	3.40×10^7	3.59×10^6	326	61.59	70	11.31	222.08
11	24	5.65×10^7	5.85×10^6	333	99.32	104	-37.68	222.08
12	1	19.31×10^8	9.46×10^6	306	44.42	231	10.31	222.08
13	24	8.53×10^7	6.81×10^6	315	78.52	81	-44.68	222.08

De la figura 30 a la 33 se muestra el comportamiento de la energía de las subimágenes a dos distancias diferentes del centro del radar, de las 6 distancias que se analizaron hasta el momento se eliminaron r_1 y r_2 por presentar un brillo uniforme lo que provoca que no se observen patrones bien definidos.

En las dos primeras gráficas de la figura 30 se observa que en forma general E_T aumenta al incrementarse la magnitud del viento y también al cambiar la dirección del viento. Estas gráficas difieren entre sí por la distancia al centro del radar. En las últimas dos gráficas que se encuentran en esta figura se observa que la E_T de la imagen al momento de ser registrada imperaba un viento con una magnitud de 5 m/s que tiene un valor más alto de E_T que la que se tomó cuando el viento tenía una magnitud de 8 m/s.

La figura 31 presenta gráficas que difieren entre sí por la dirección del viento, sin embargo, cada gráfica muestra el comportamiento de la E_T para una dirección en común del viento. En forma general se observa que al aumentar la magnitud del viento la E_T aumenta.

La figura 32 presenta también la variación de la E_T para 3 diferentes imágenes las cuales tienen en común que fueron registradas con la misma magnitud del viento, el valor máximo de E_T se localiza cuando la dirección del viento era 270° . La dirección de 235° tiene mayor E_T que la dirección de 250° .

La figura 33 muestra el comportamiento de la E_T para las imágenes donde la toma de la fotografía de la pantalla del radar fué de forma diferente. Las fotografías como se observa en la Tabla II tienen la misma dirección y magnitud del viento difiriendo solamente en el tiempo siendo el intervalo de 5 minutos.

f10-3

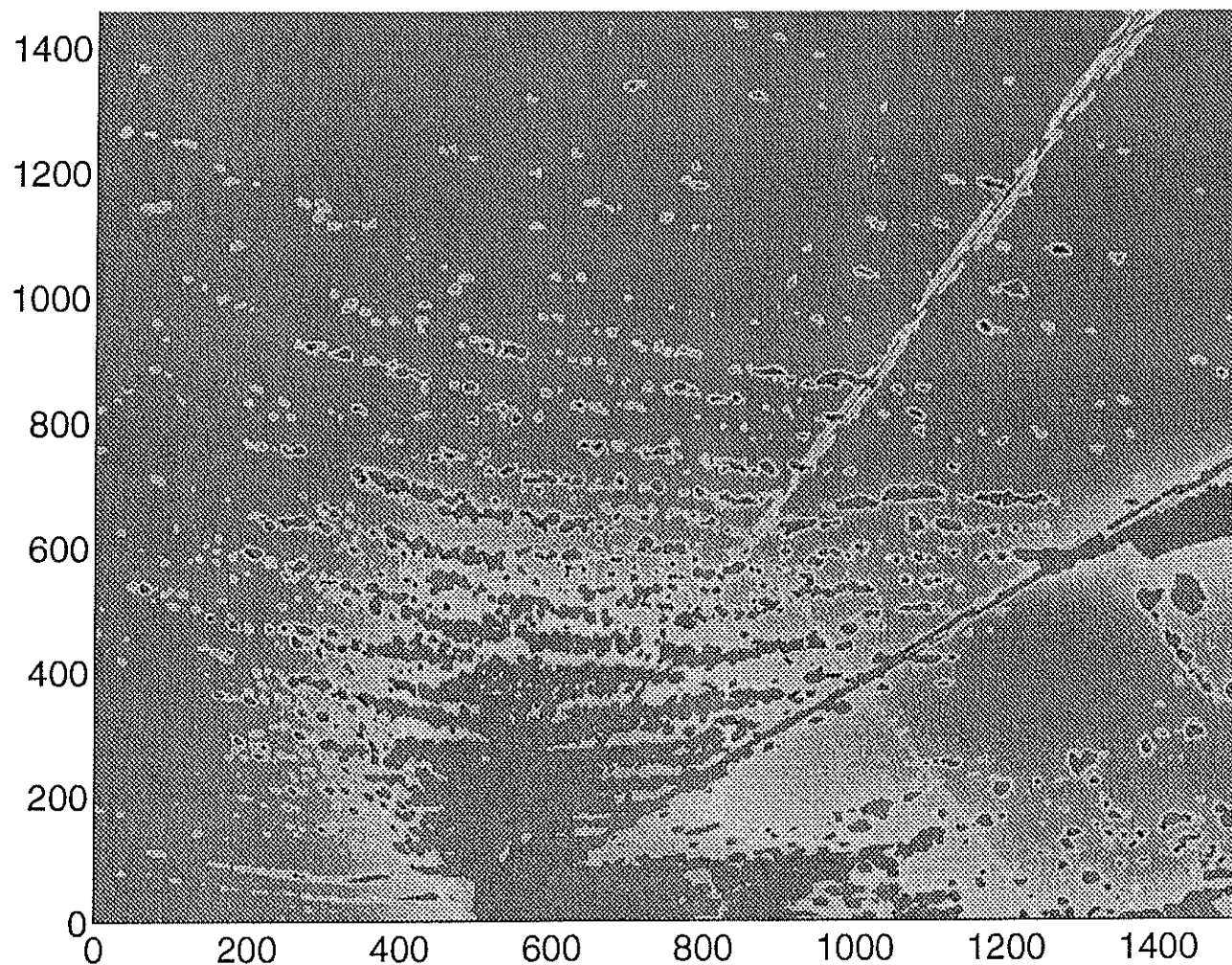


Figura 2. Imagen obtenida de la pantalla del radar, tratada digitalmente, en la que aparecen patrones de oleaje tomada frente a Playa Ramona, Ensenada, Baja California, el día 5 de marzo de 1991.

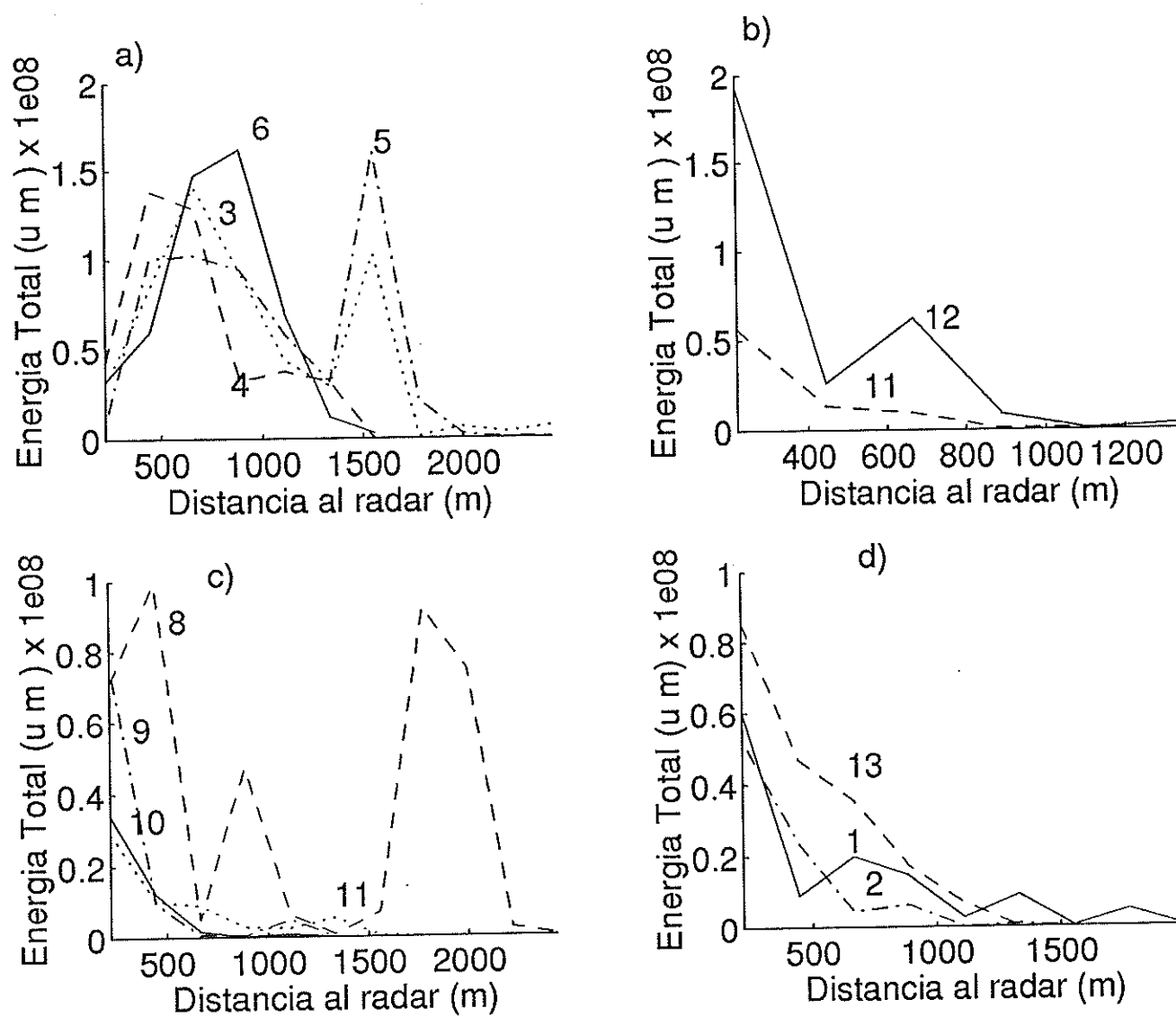


Figura 3. Energía total de la señal recibida en cada una de las 13 imágenes analizadas en función de la distancia al radar.

f9-10

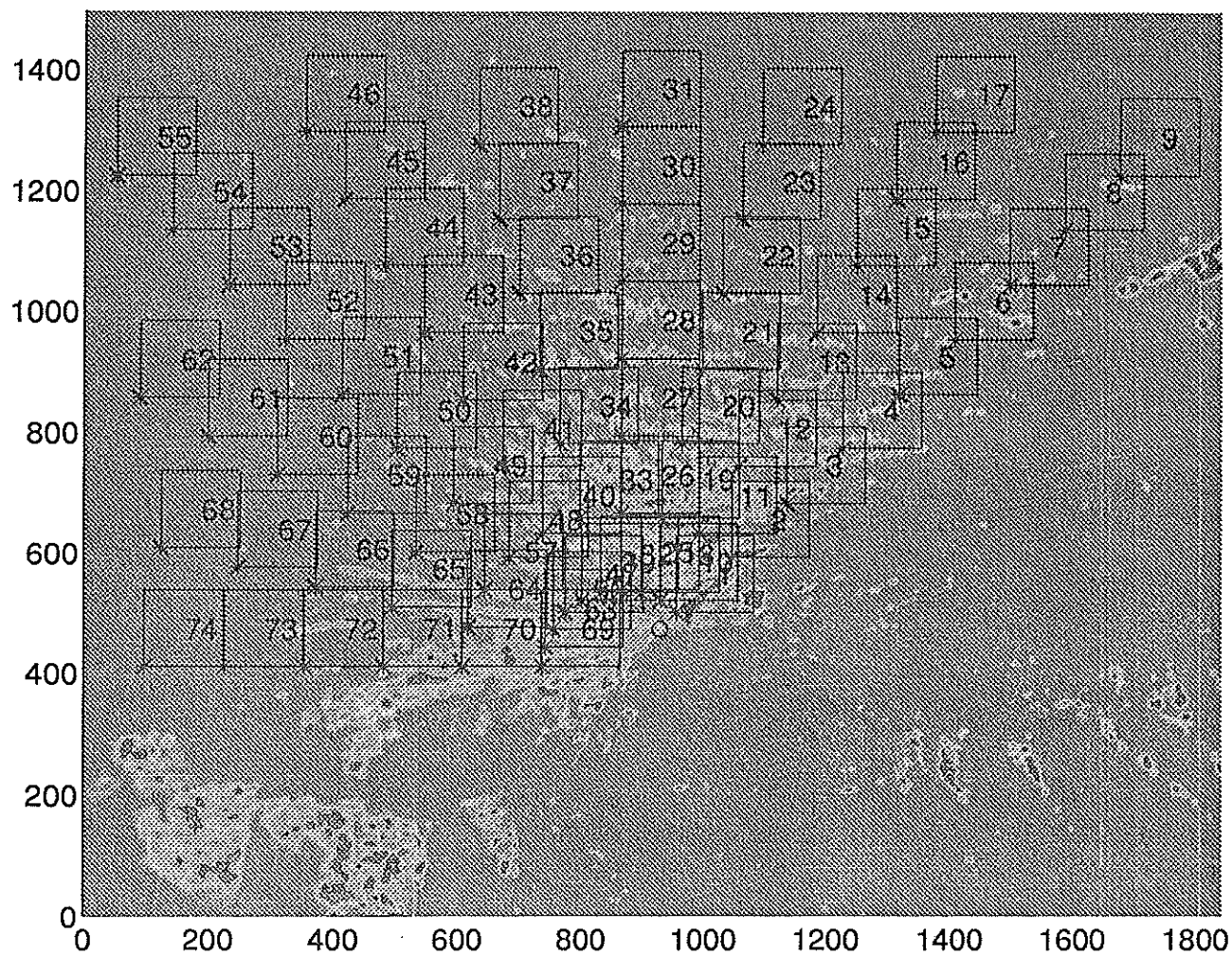


Figura 4. Ilustración de la imagen digitalizada y distribución de las subimágenes analizadas. Imagen correspondiente al día 5 de marzo de 1991 a las 10:43 AM.

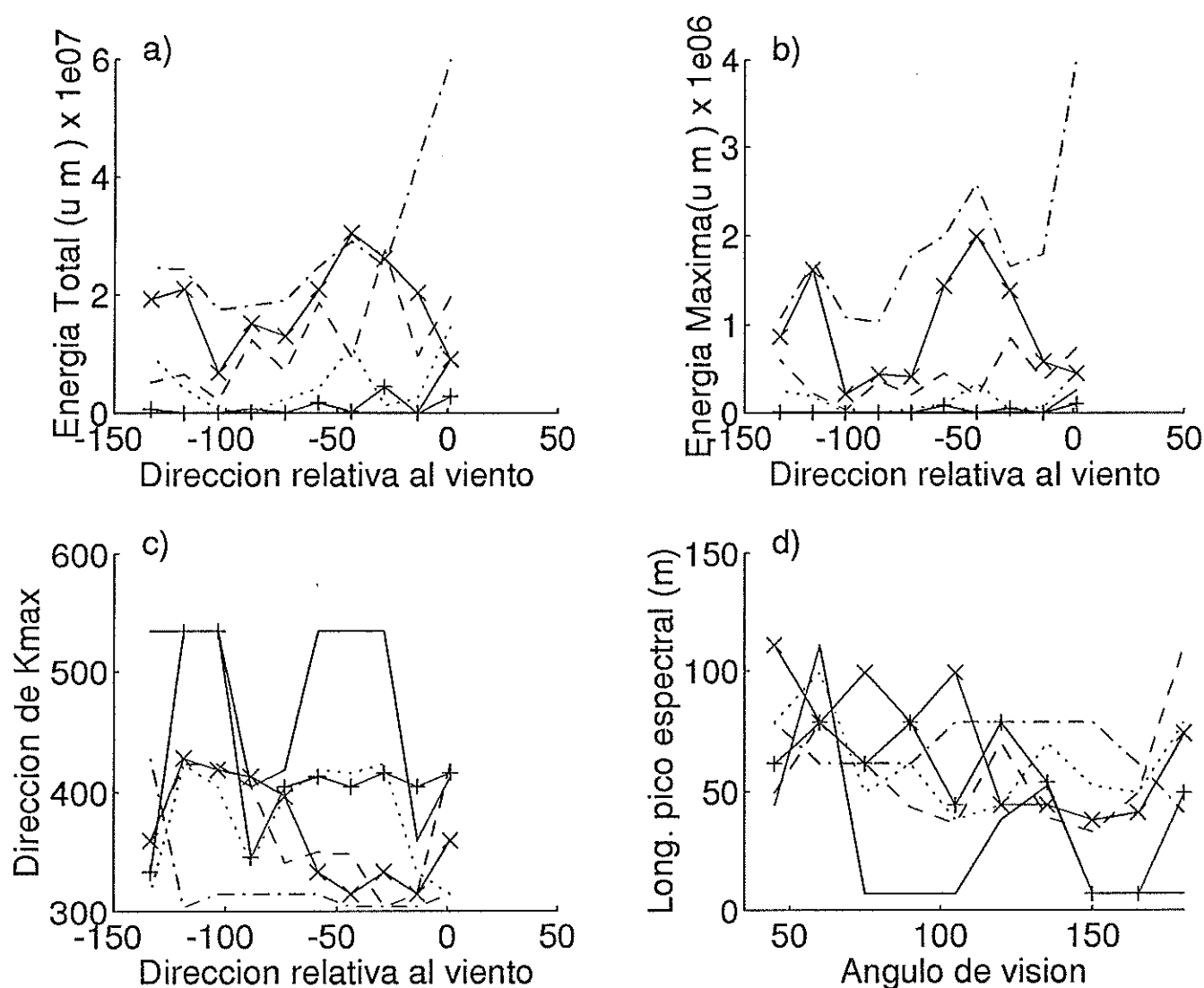


Figura 5. Resultados del análisis espectral de la imagen 1. Se presenta la dependencia de la dirección relativa a el viento en a) la energía total en cada subimagen, b) la energía y c) el número de onda de la componente asociada al pico espectral y d) la longitud de la componente del pico espectral en función del ángulo de visión del radar para las siguiente distancias al radar: $_ _ _ = 222$, $x-x = 444$, $--- = 666$, $..... = 888$, $+--+ = 1110$ y $______ = 1332$ m.

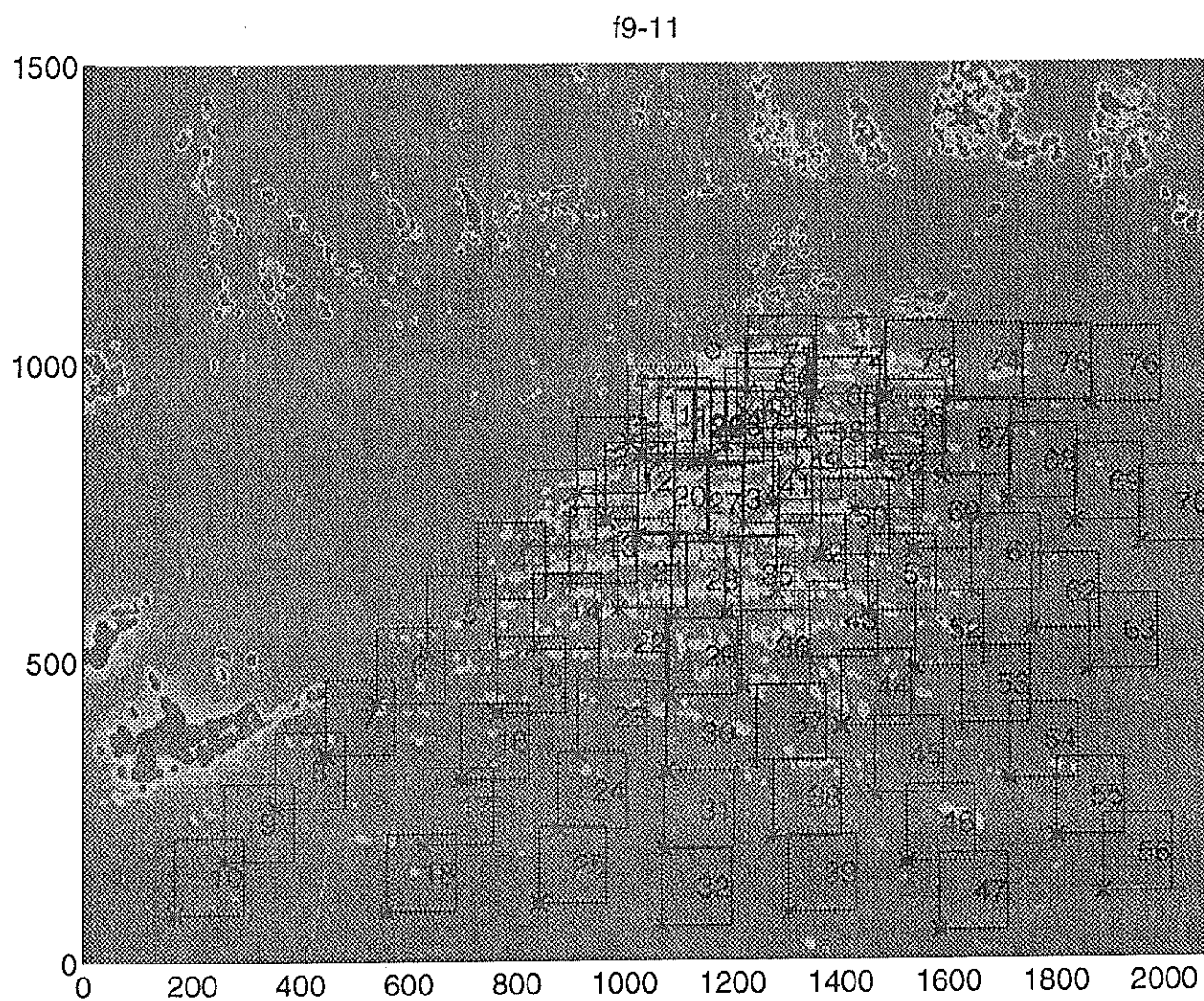


Figura 6. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 10:44 AM.

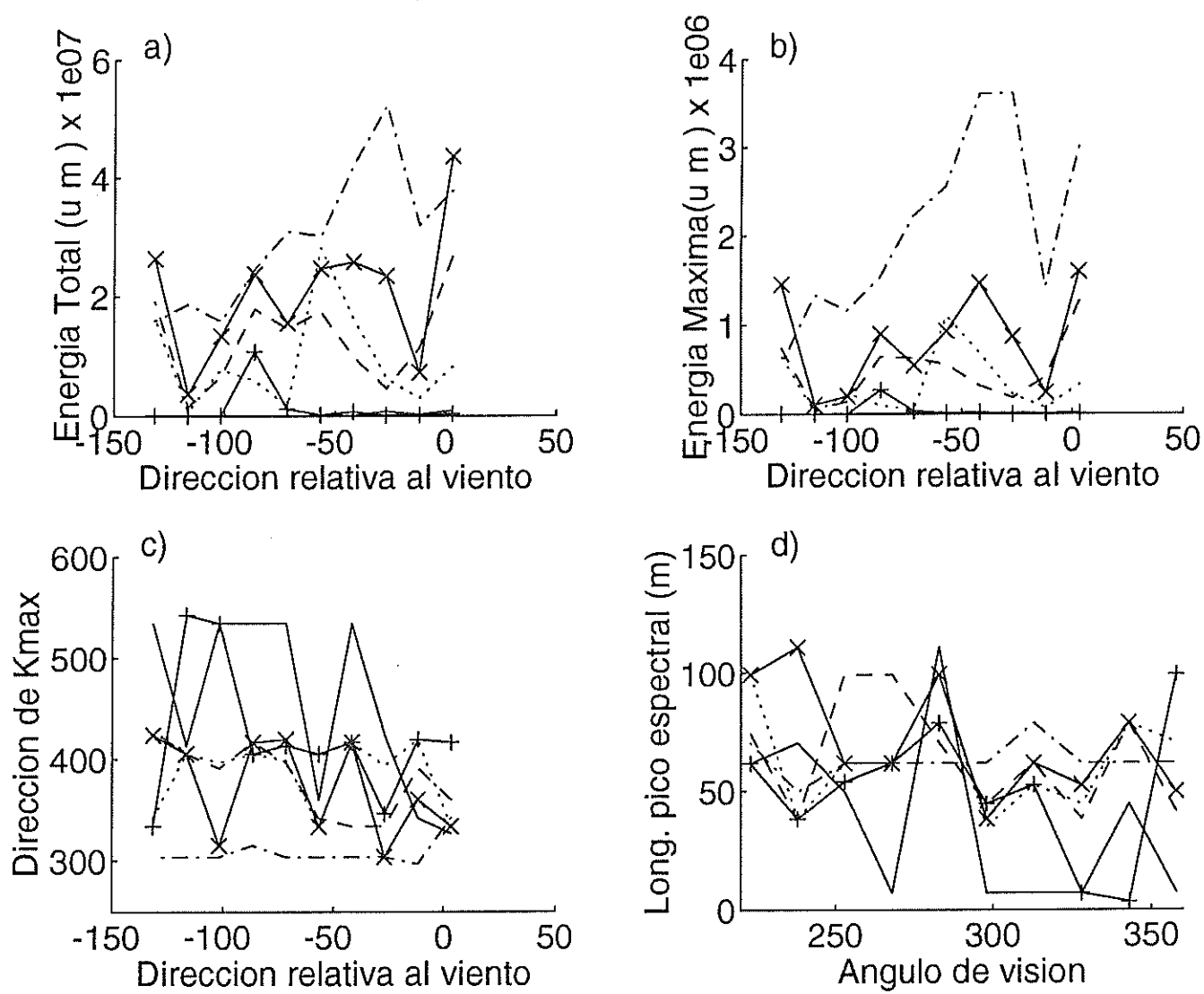


Figura 7. Igual que la figura 5 para la imagen 2.

f10-3

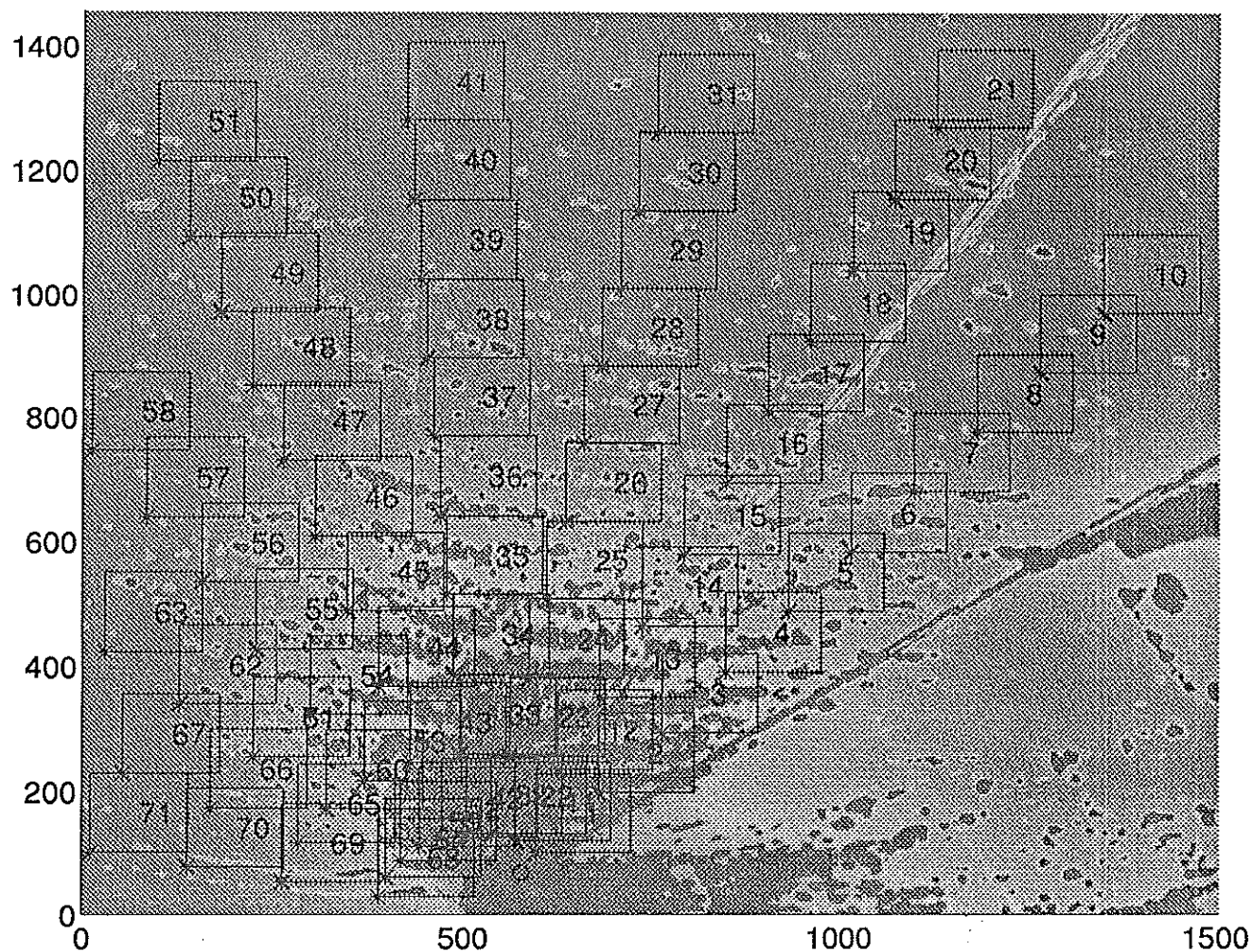


Figura 8. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:09 AM.

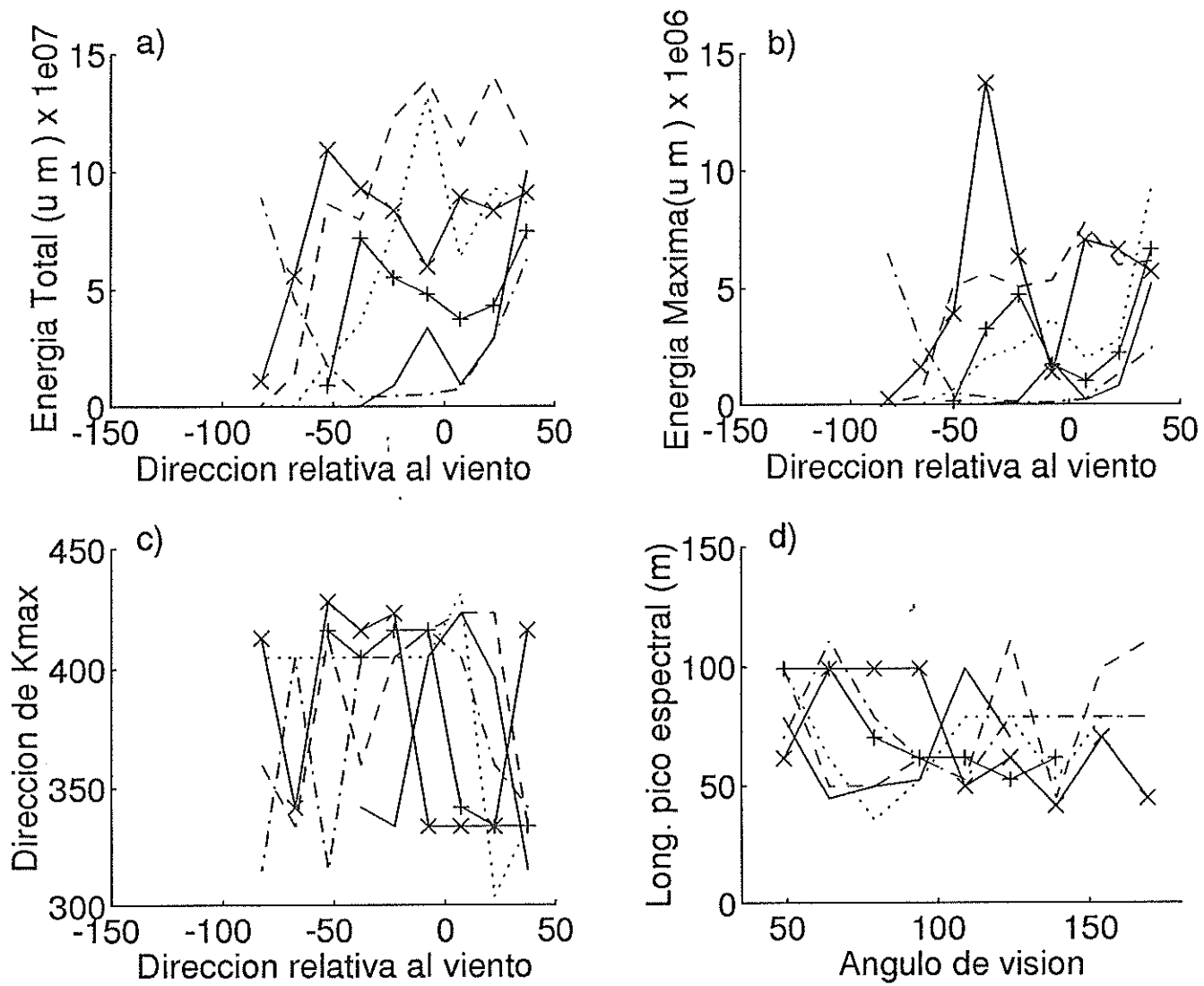


Figura 9. Igual que la figura 5 para la imagen 3.

f10-4

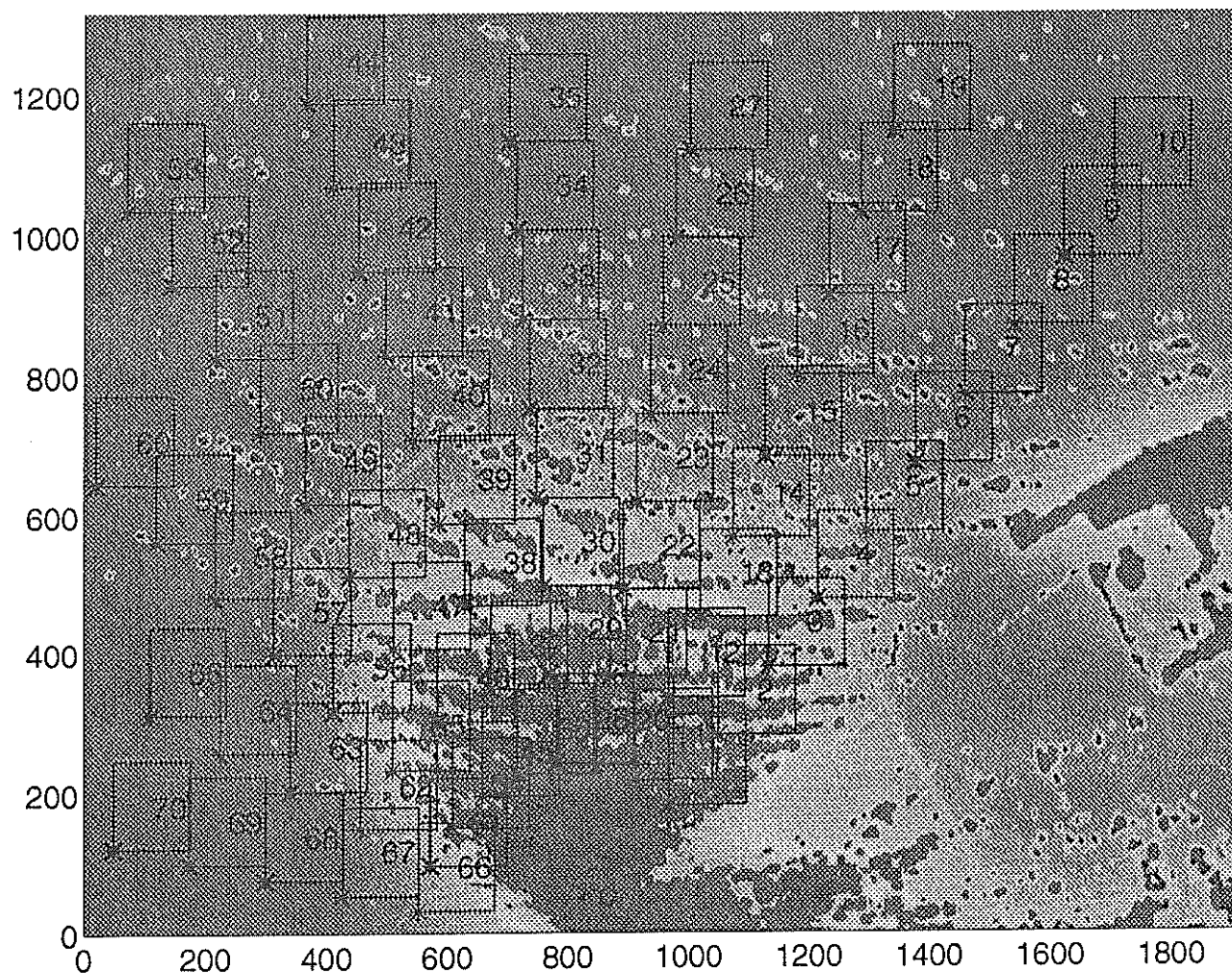


Figura 10. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:10 AM.

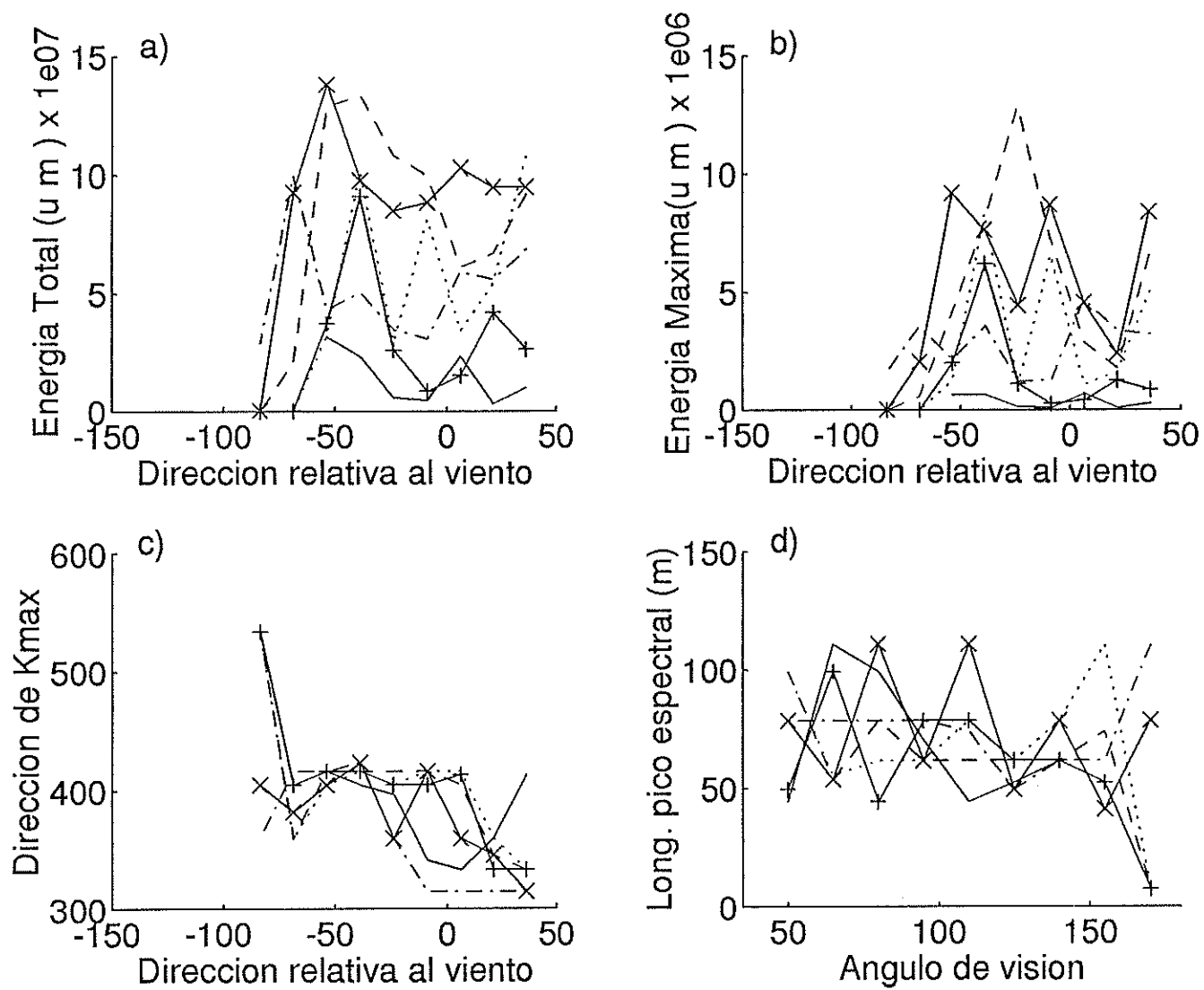


Figura 11. Igual que la figura 5 para la imagen 4.

f10-5

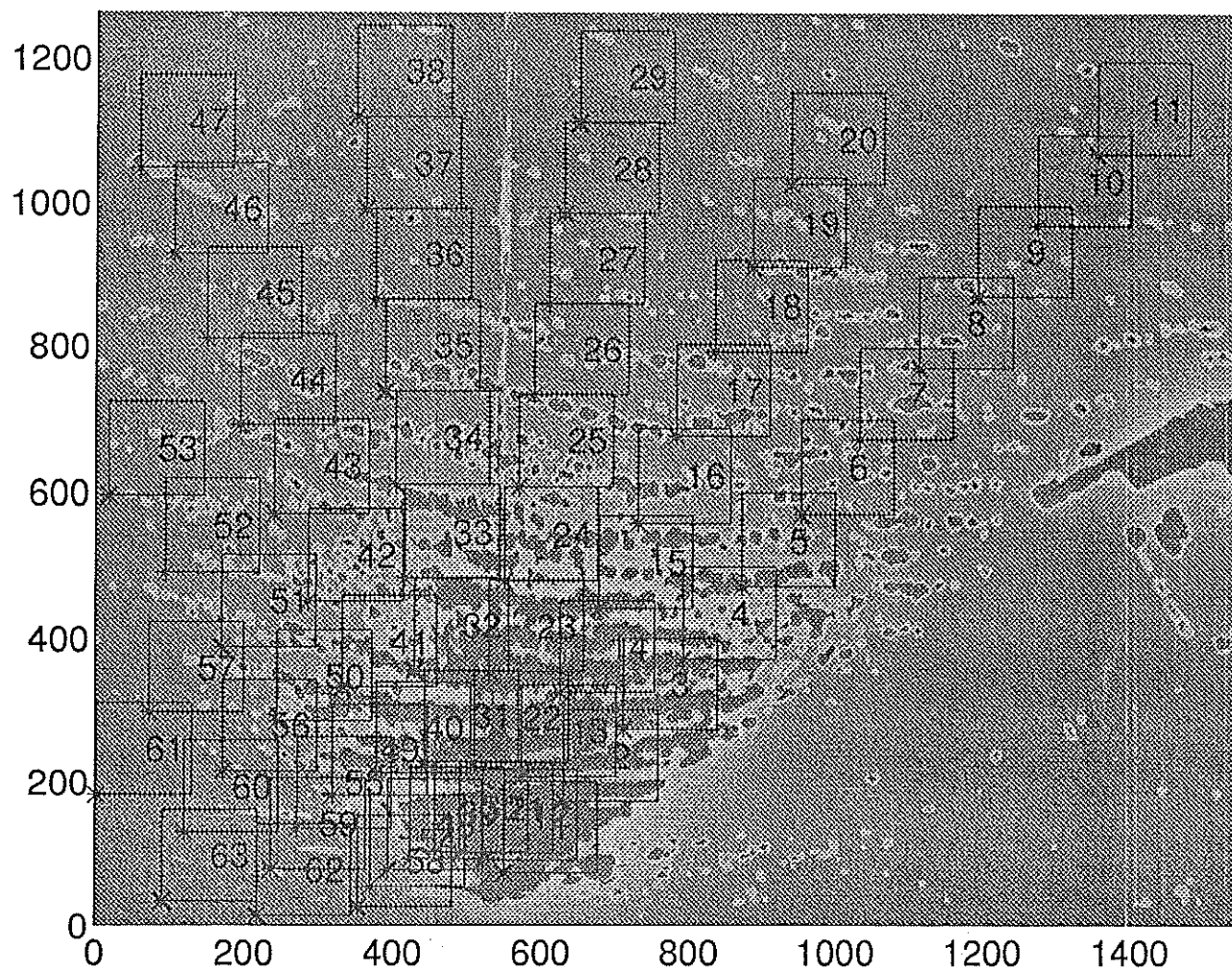


Figura 12. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:12 AM.

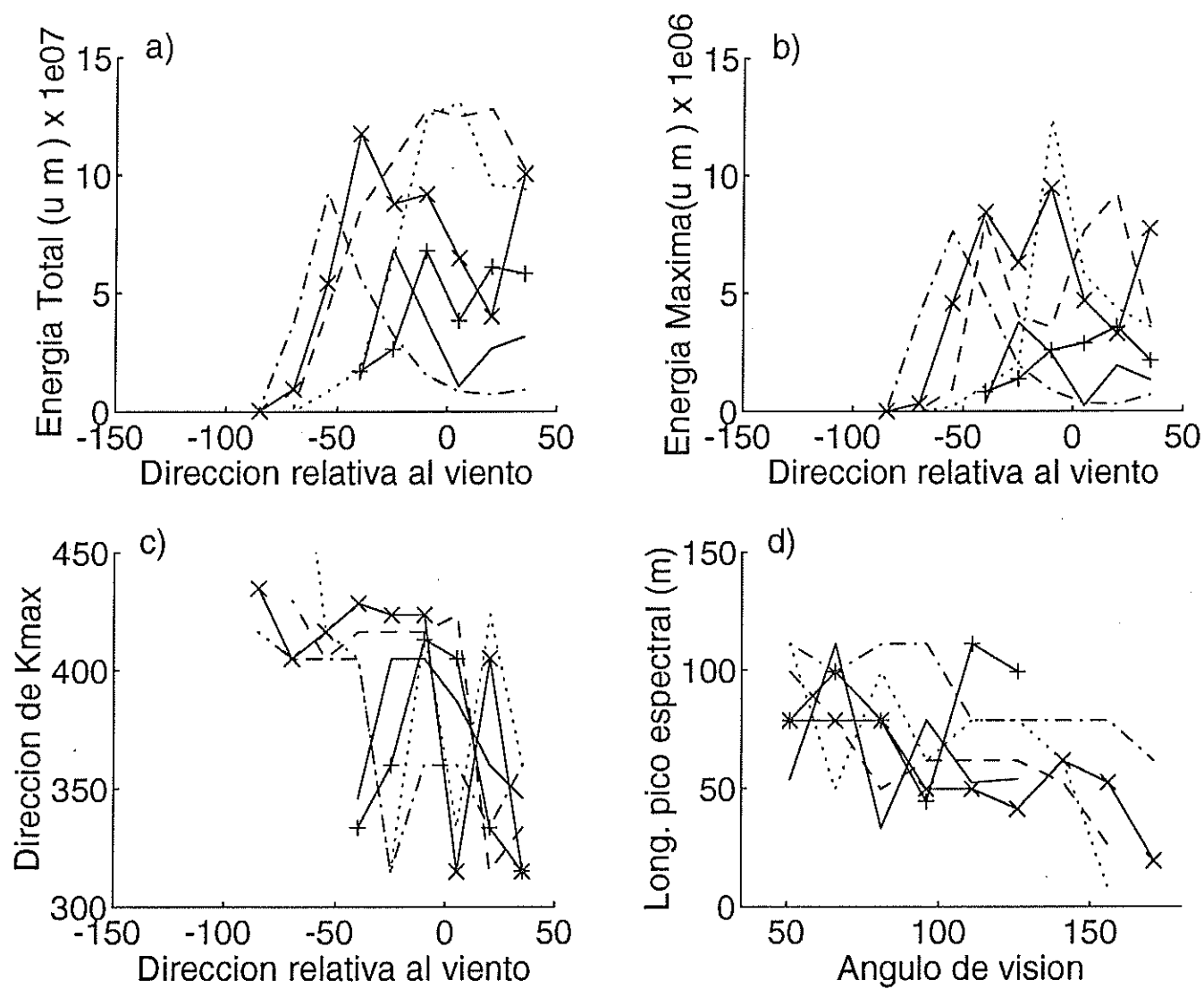


Figura 13. Igual que la figura 5 para la imagen 5.

f10-7

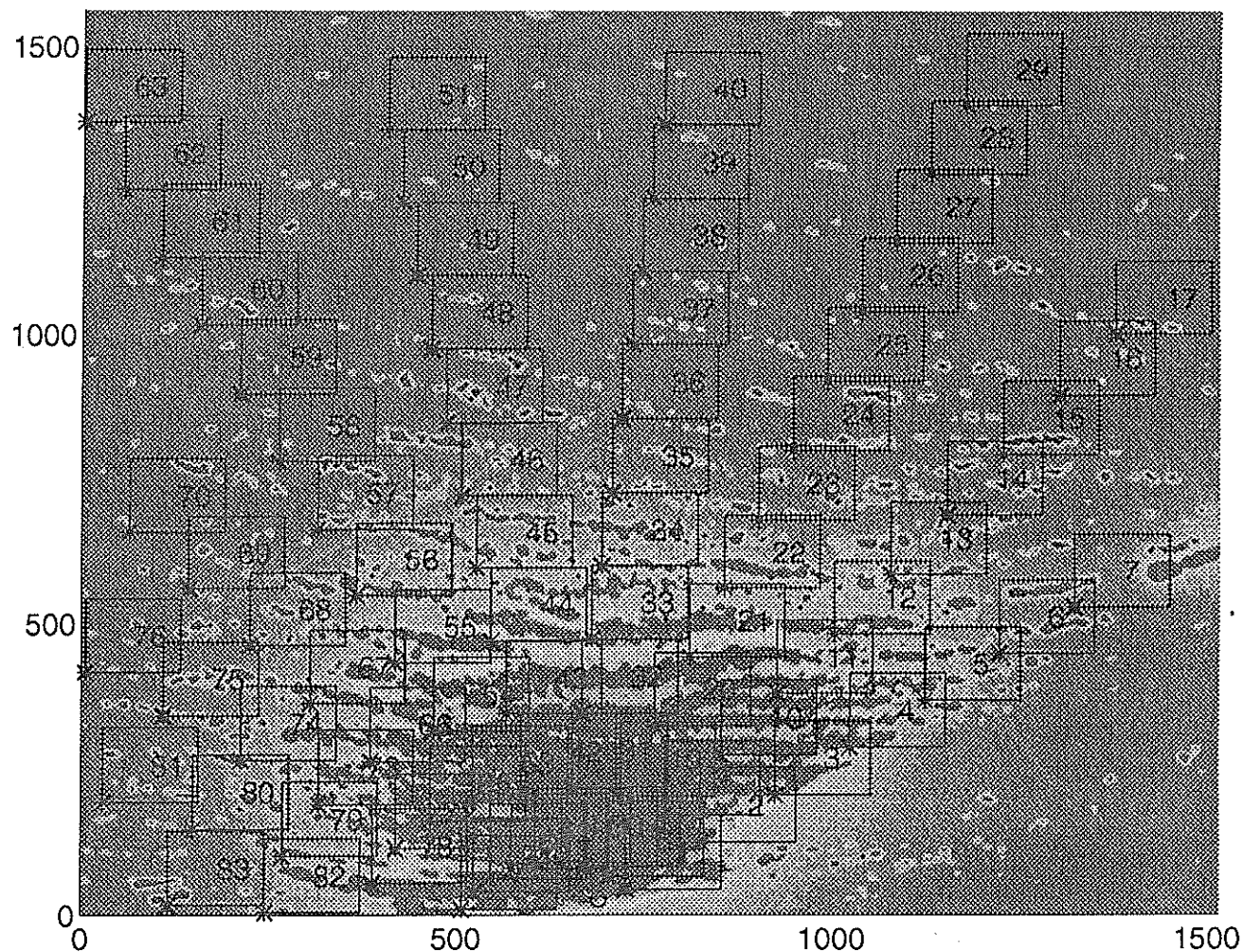


Figura 14. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 5 de marzo de 1991 a las 11:14 AM.

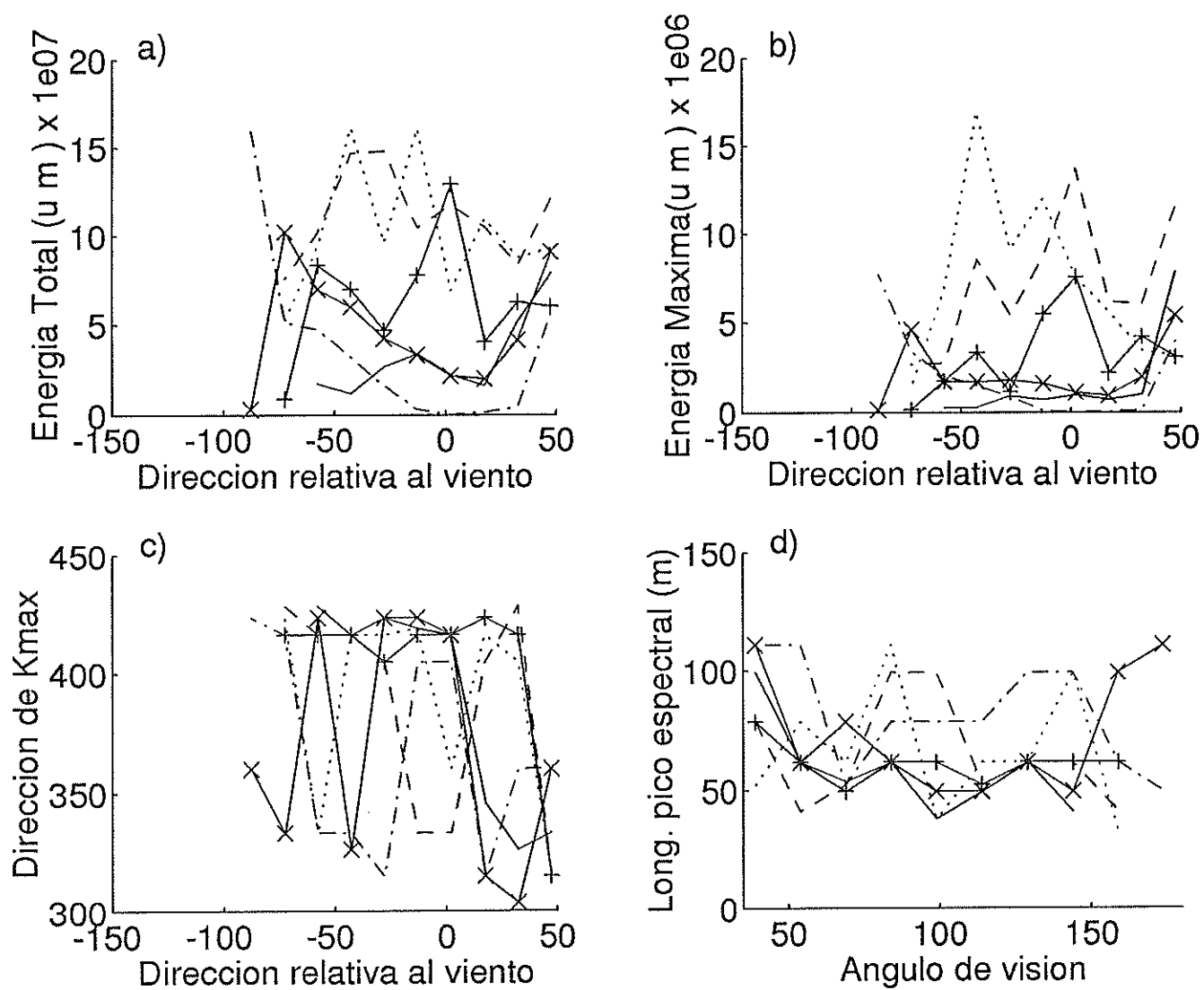


Figura 15. Igual que la figura 5 para la imagen 6.

f14-5

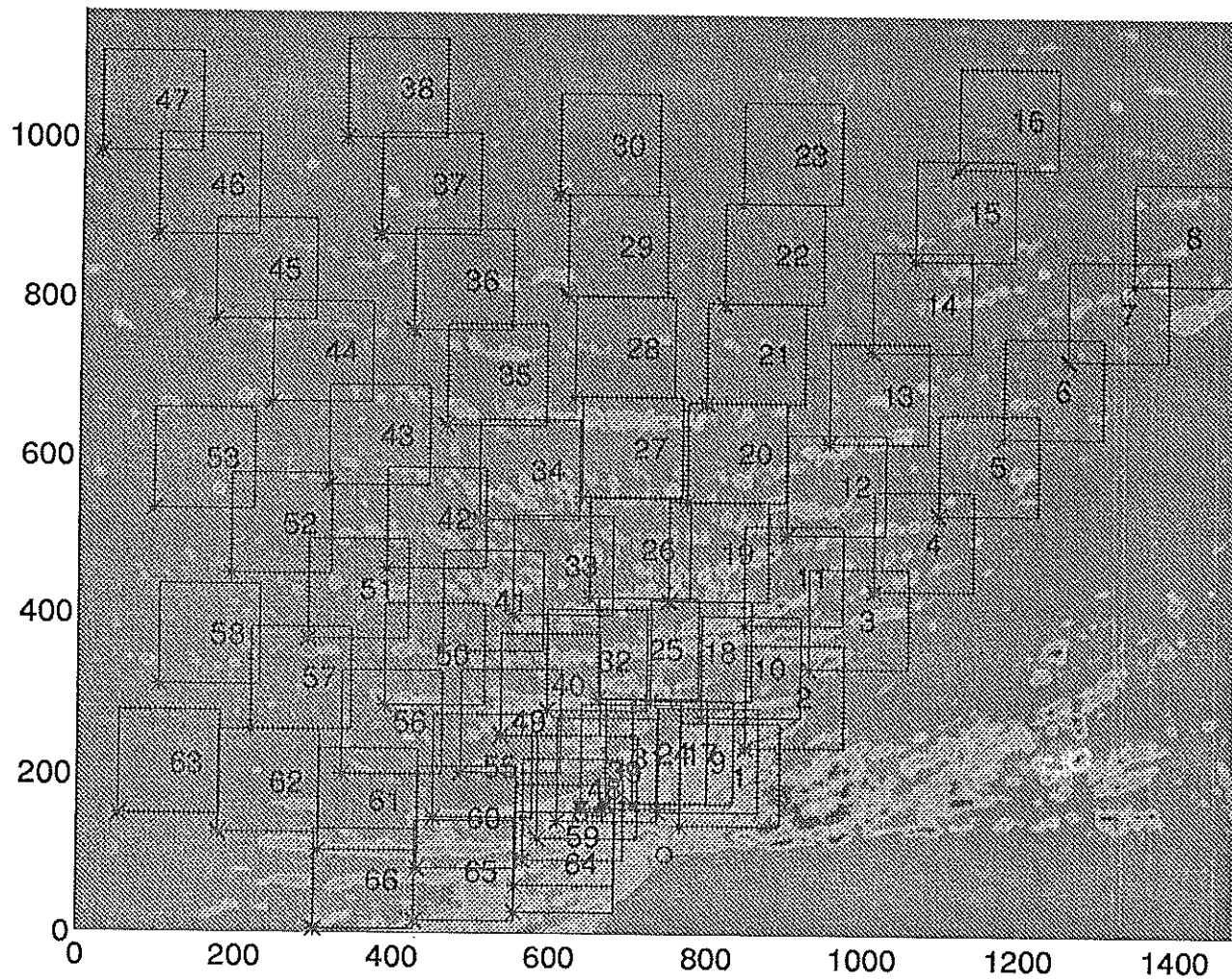


Figura 16. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 11:20 AM.

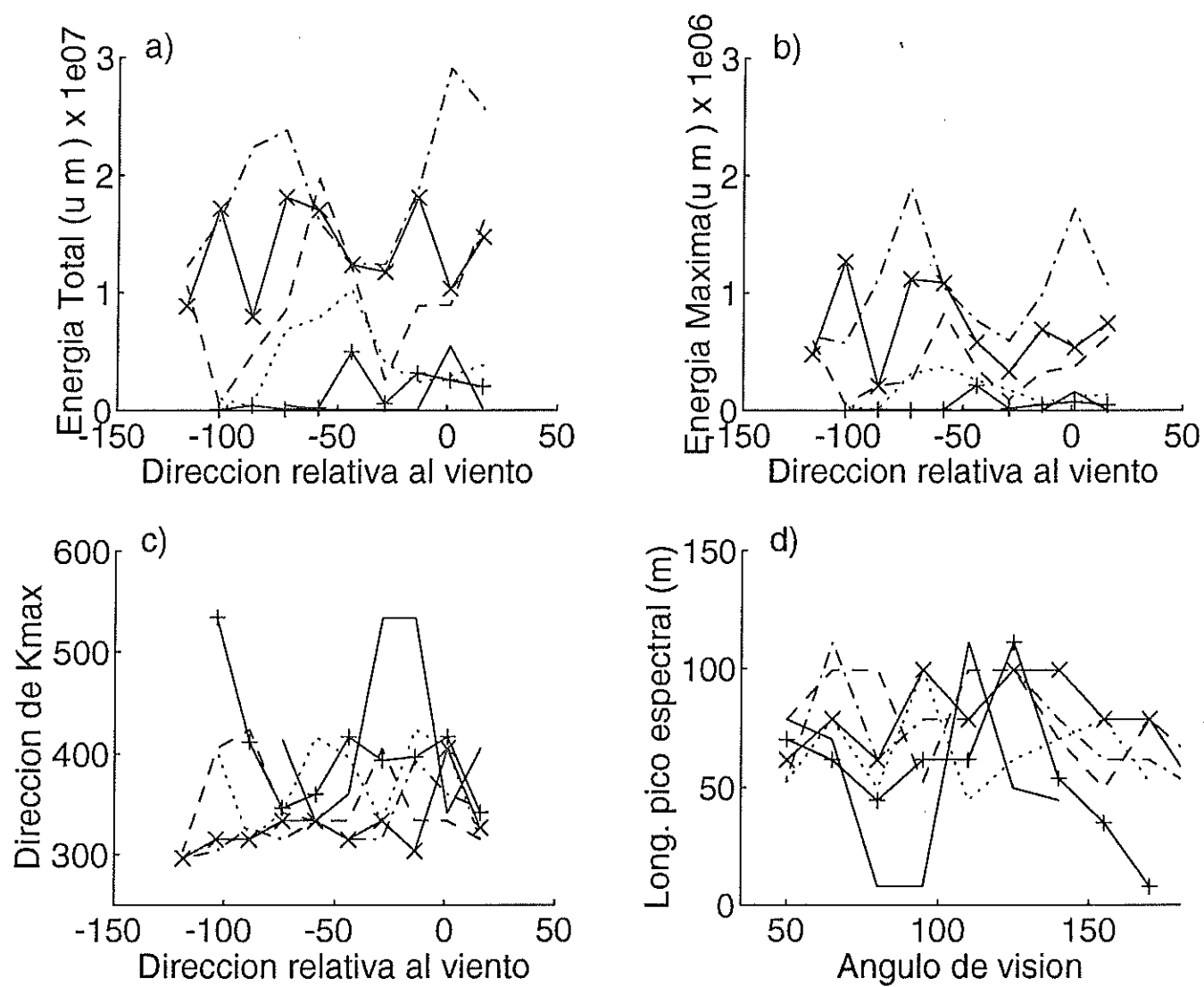


Figura 17. Igual que la figura 5 para la imagen 7.

f14-7

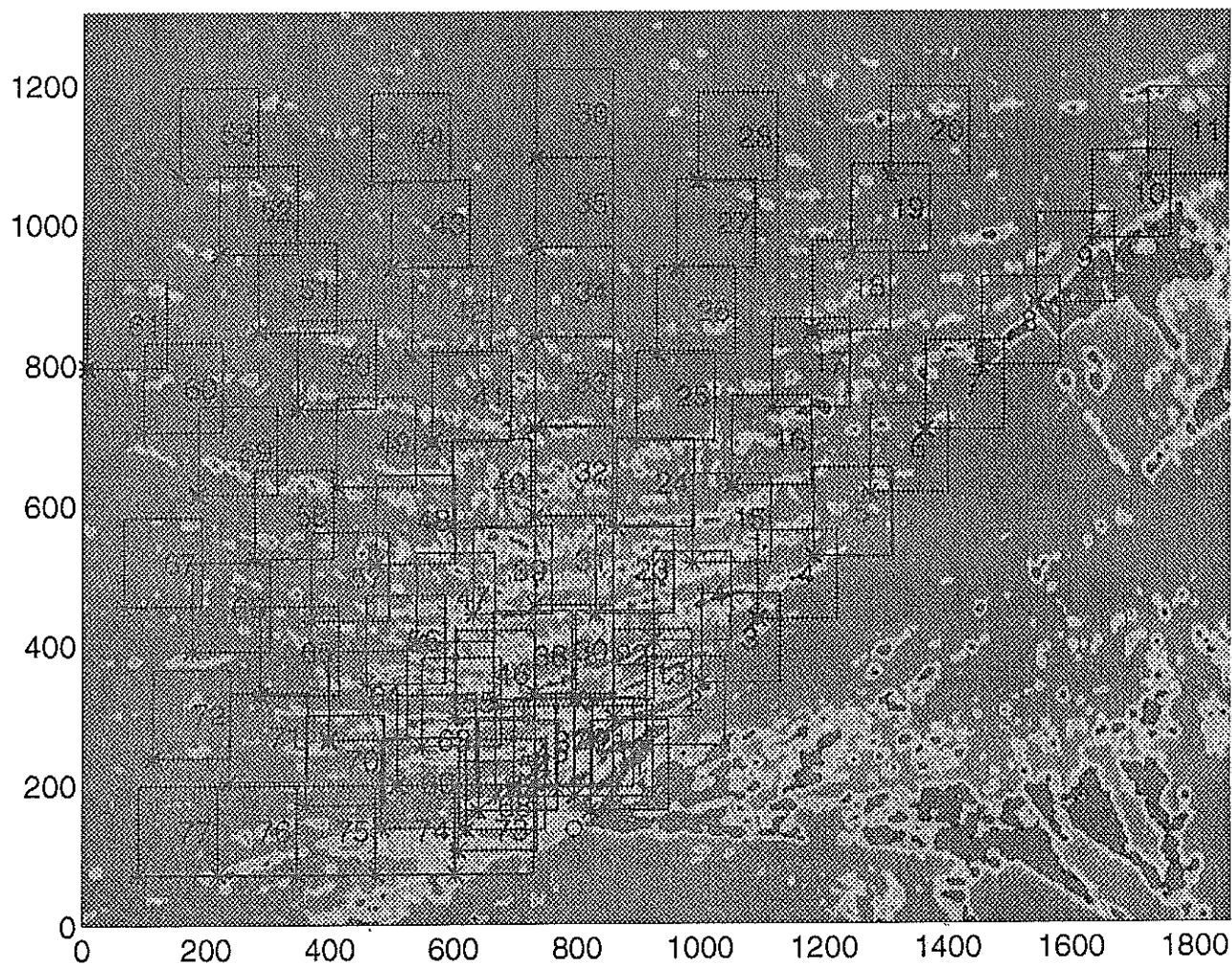


Figura 18. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 12:01 AM.

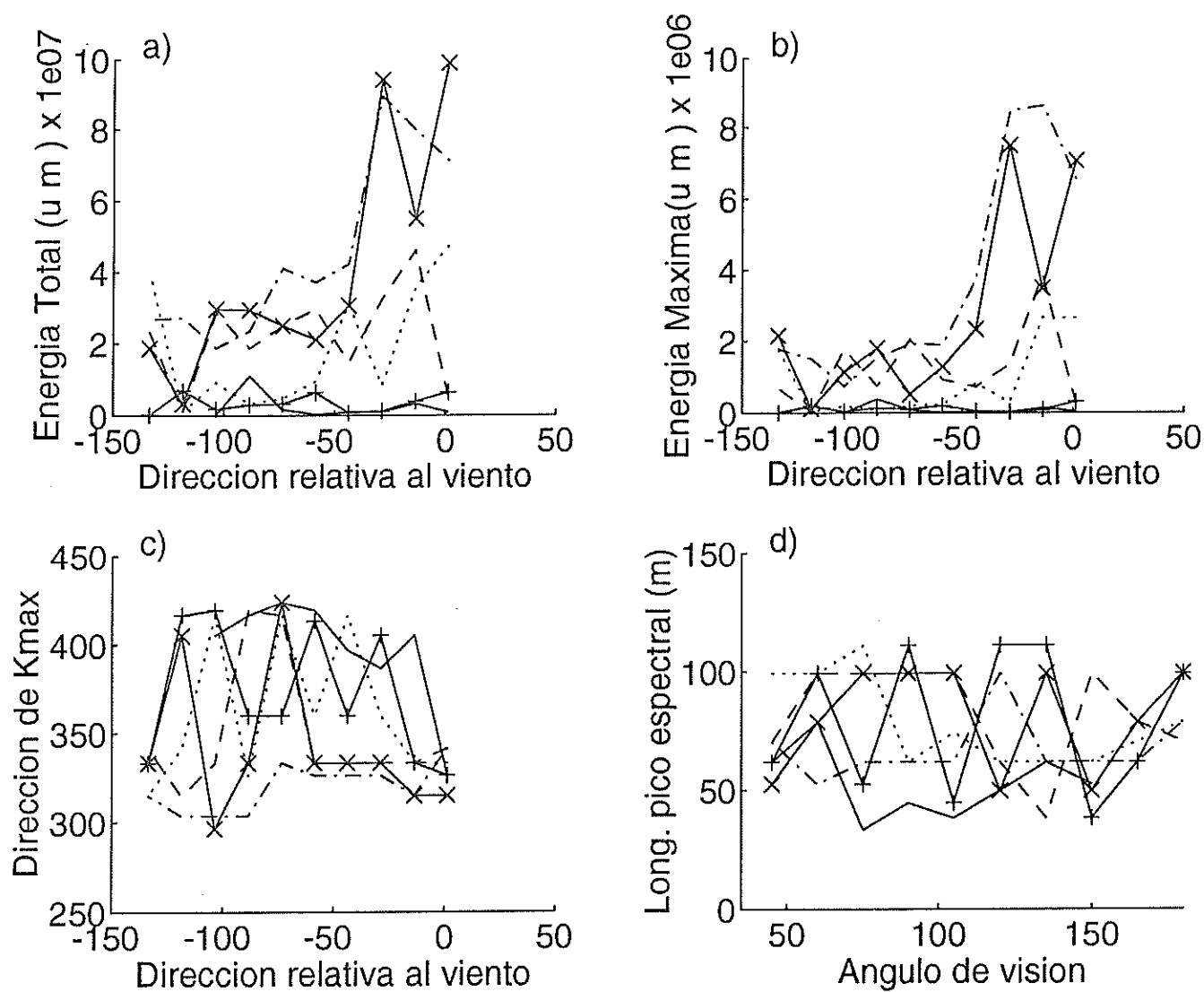


Figura 19. Igual que la figura 5 para la imagen 8.

f14-9

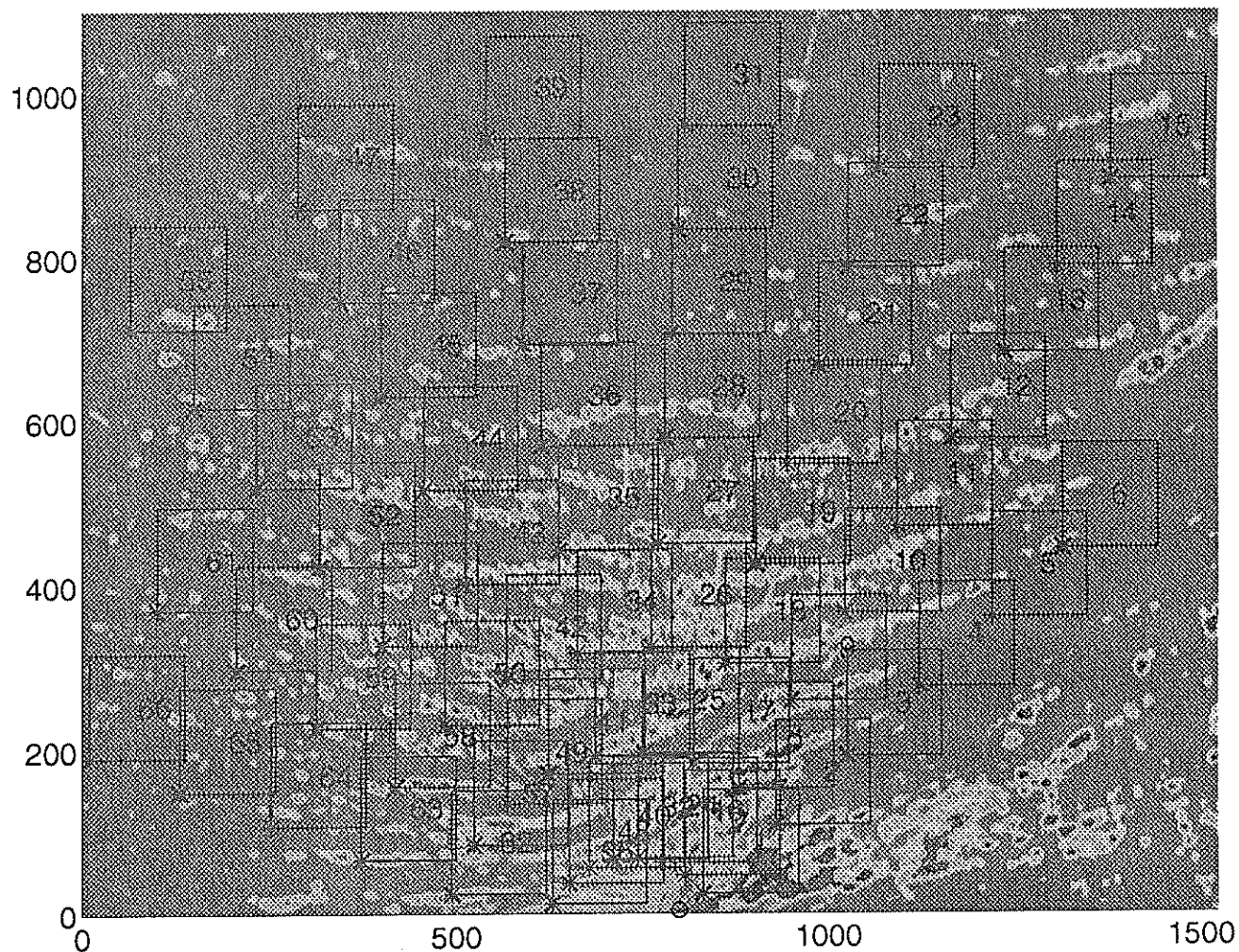


Figura 20. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 13:13 AM.

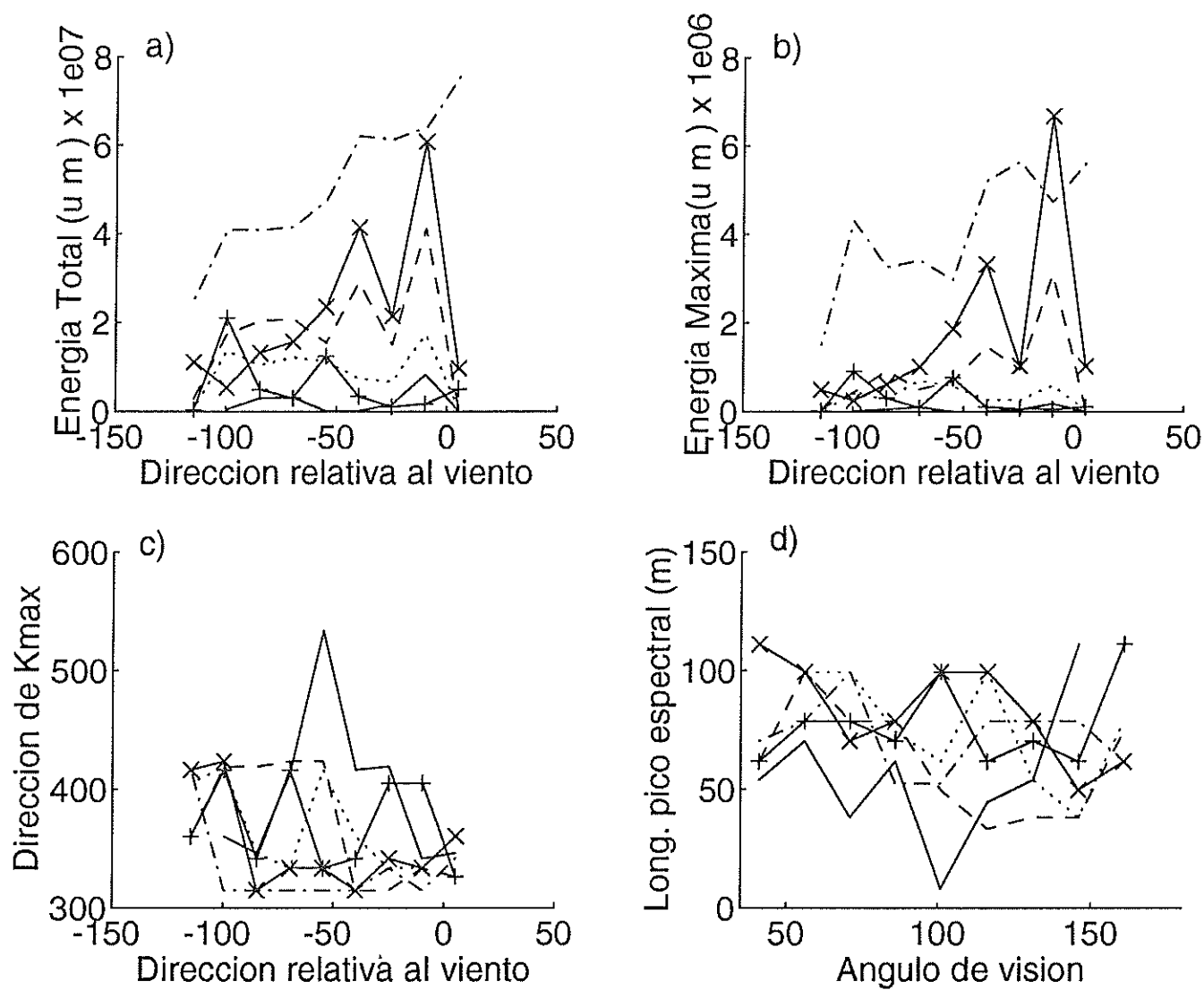


Figura 21. Igual que la figura 5 para la imagen 9.

f14-11

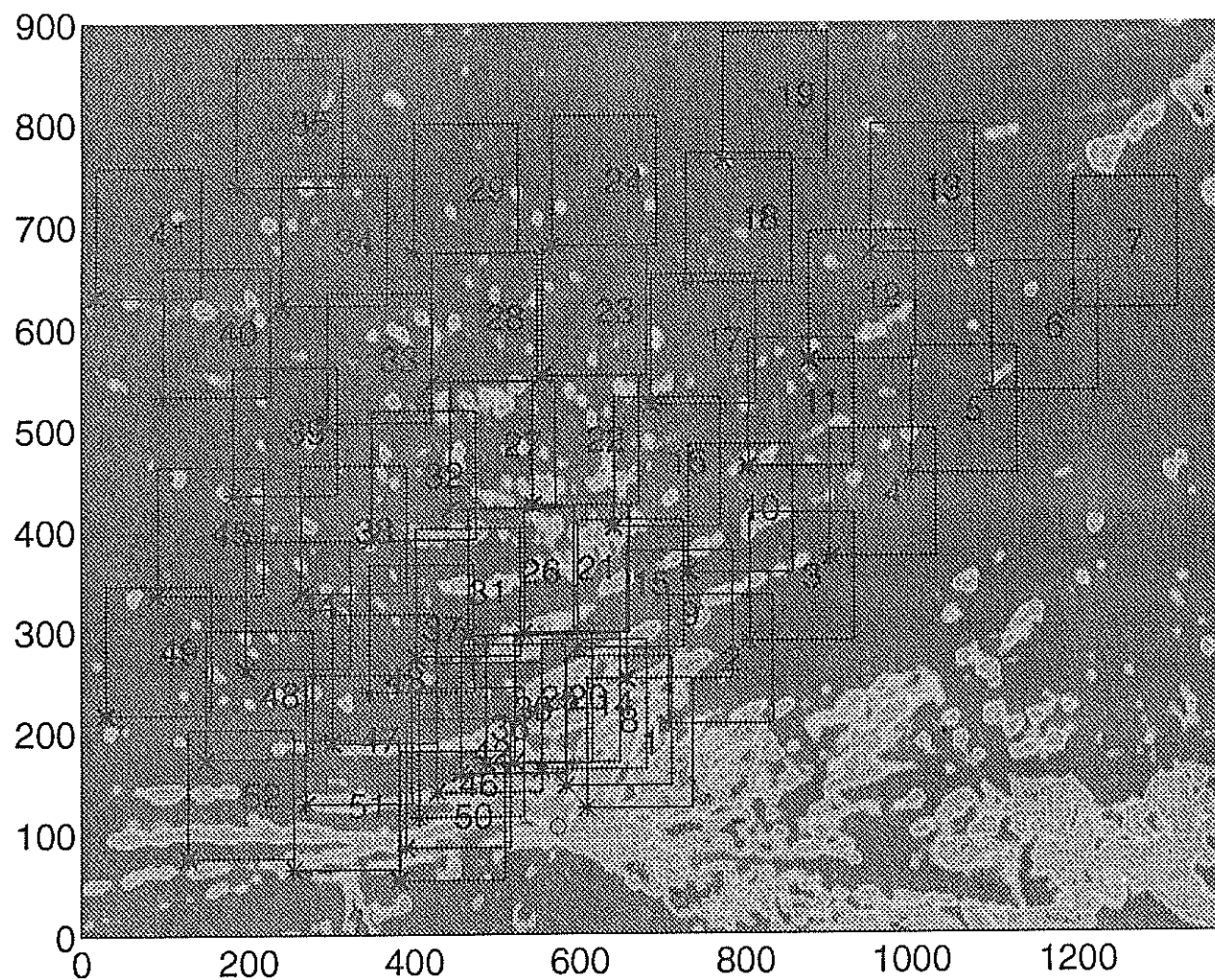


Figura 22. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 15:02 AM.

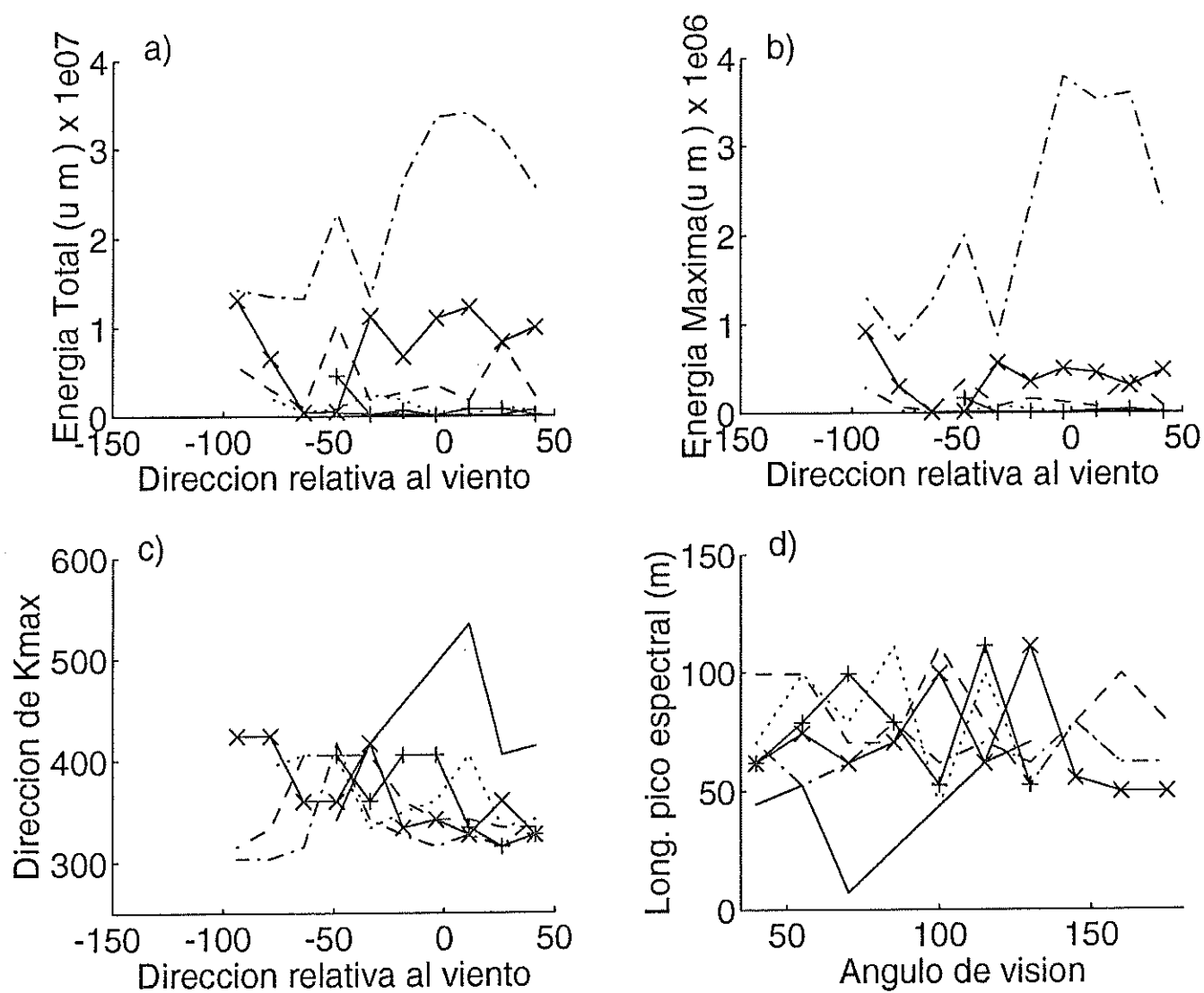


Figura 23. Igual que la figura 5 para la imagen 10.

f15-3

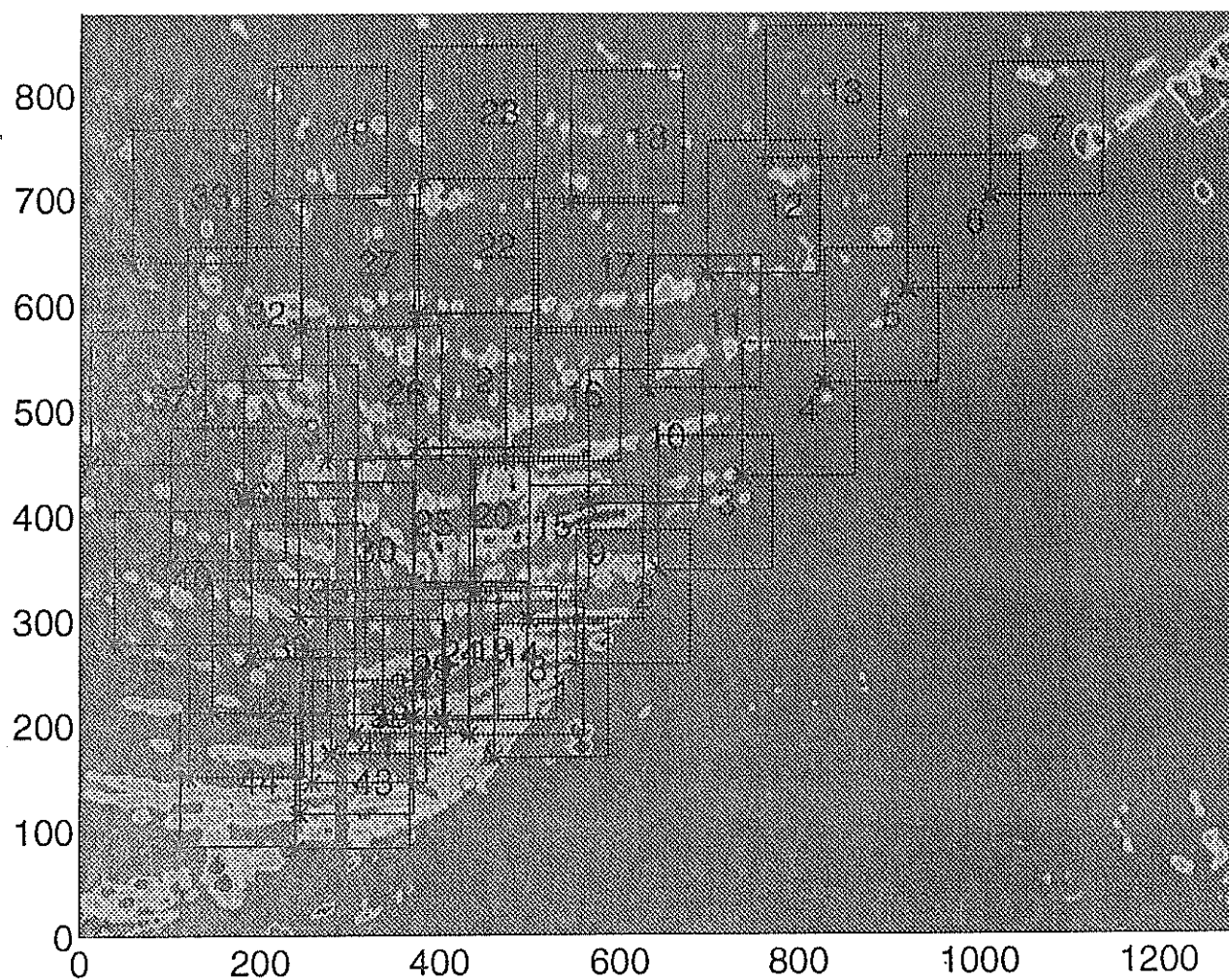


Figura 24. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 16:11 AM.

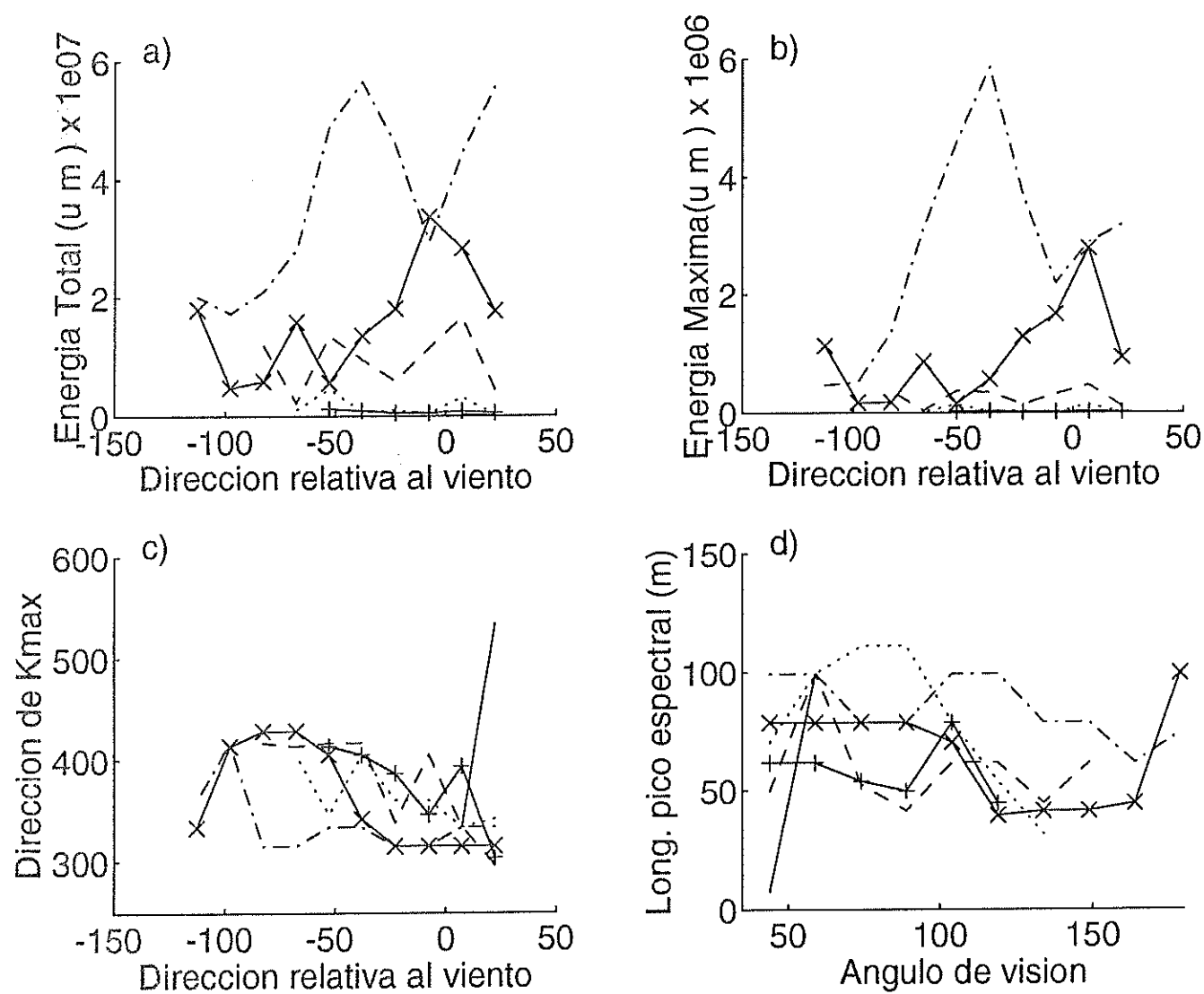


Figura 25. Igual que la figura 5 para la imagen 11.

f15-4

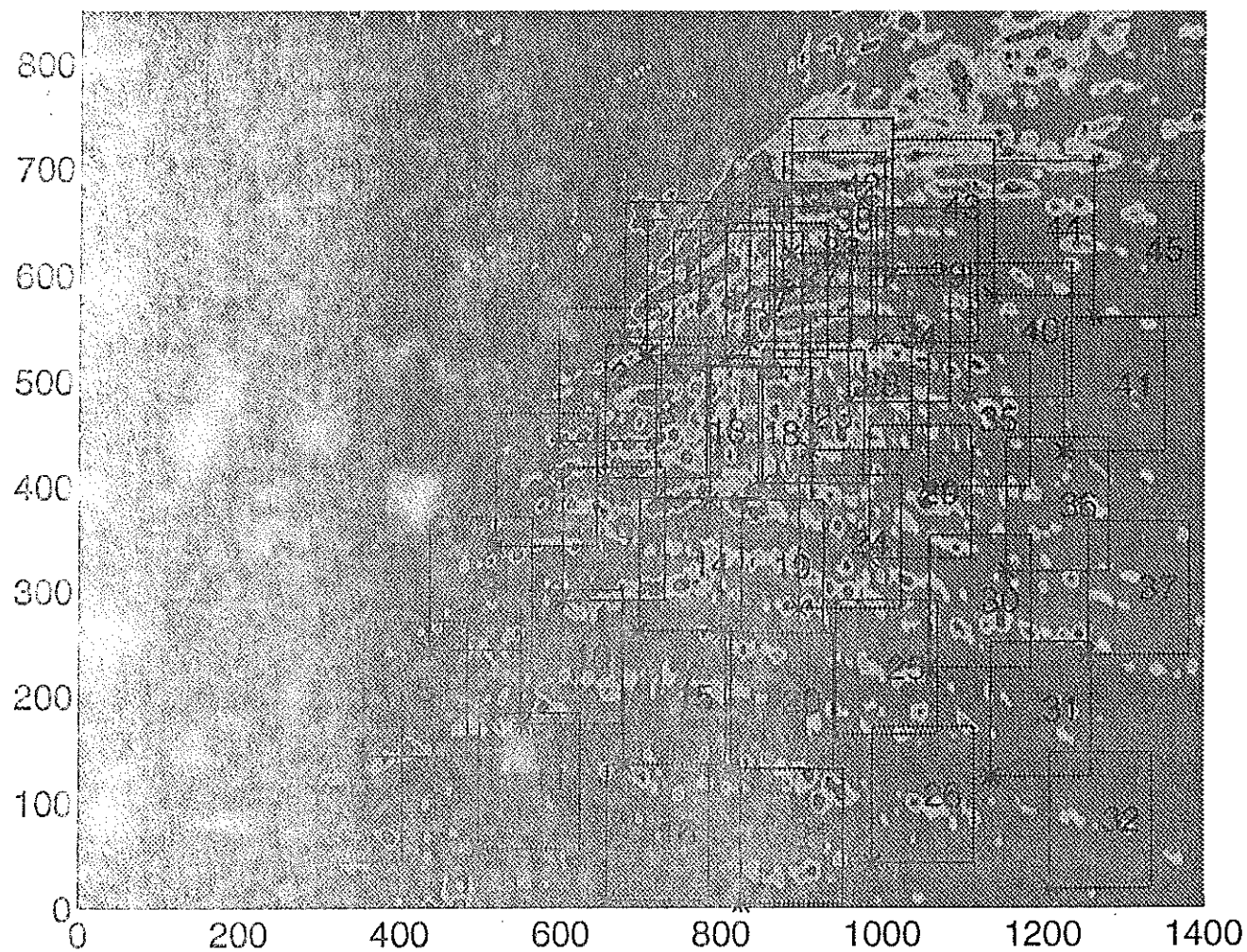


Figura 26. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 6 de marzo de 1991 a las 17:06 AM.

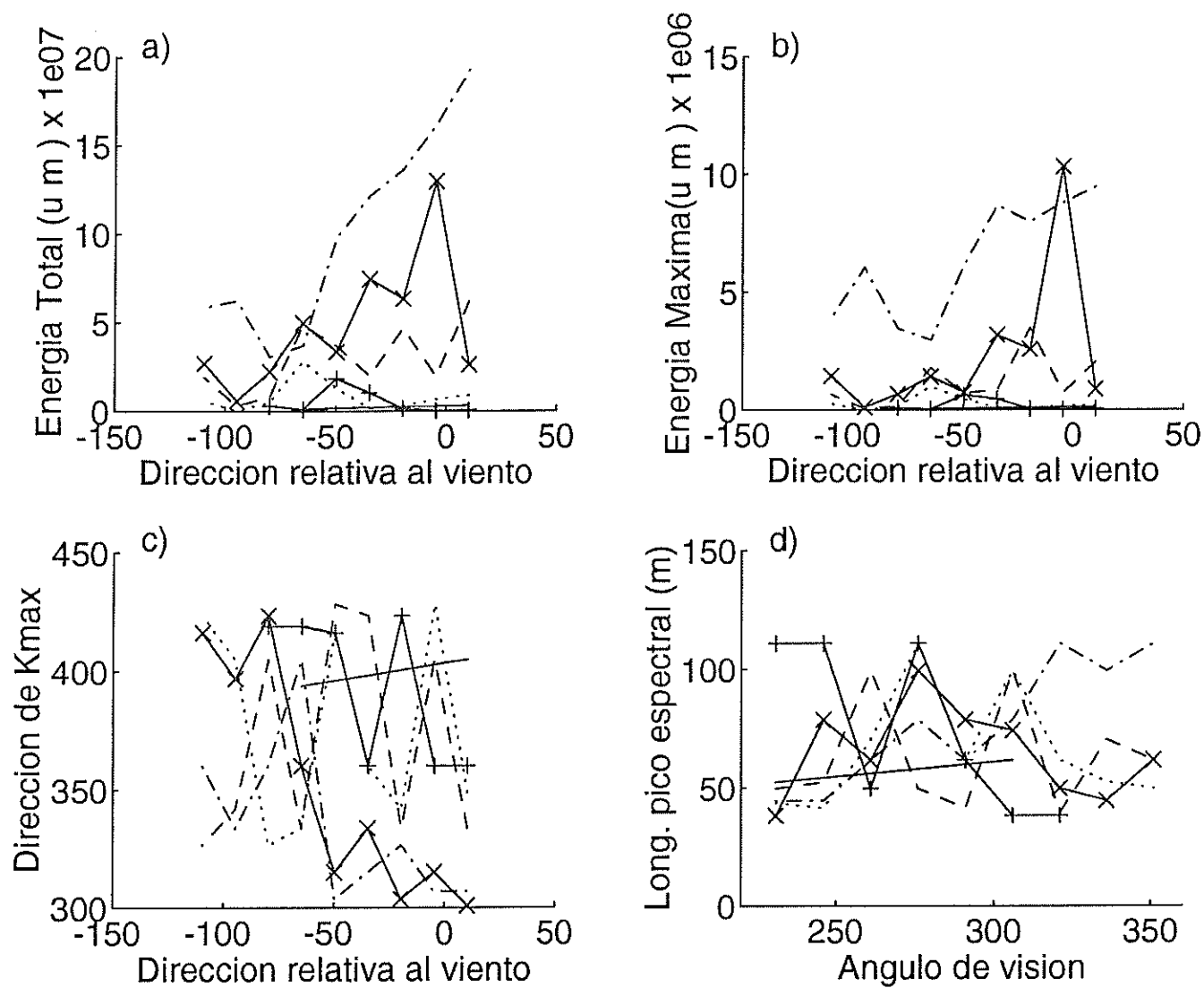


Figura 27. Igual que la figura 5 para la imagen 12.

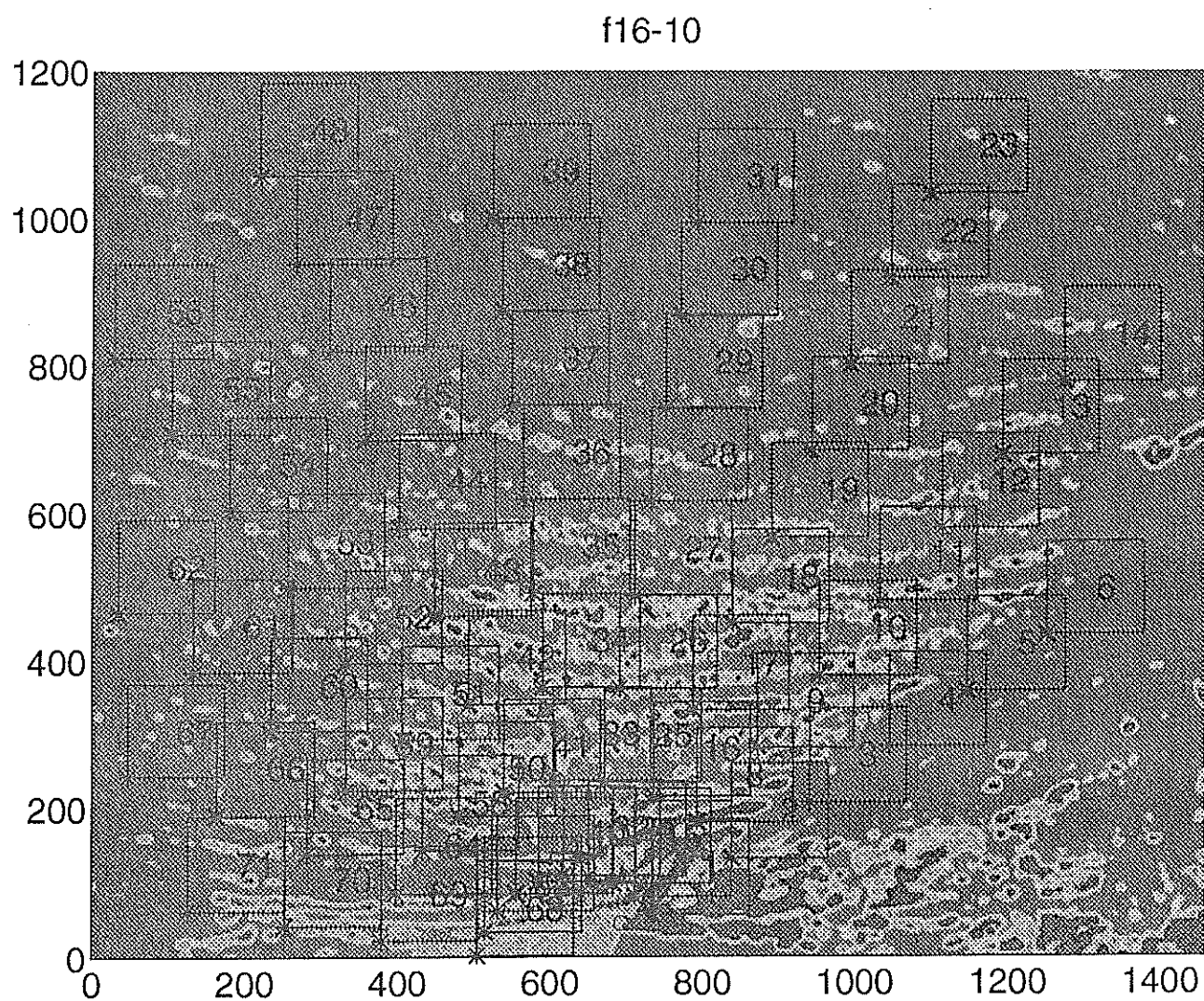


Figura 28. Igual que la figura 4 pero la imagen fué registrada el día 7 de marzo de 1991 a las 11:39 AM.

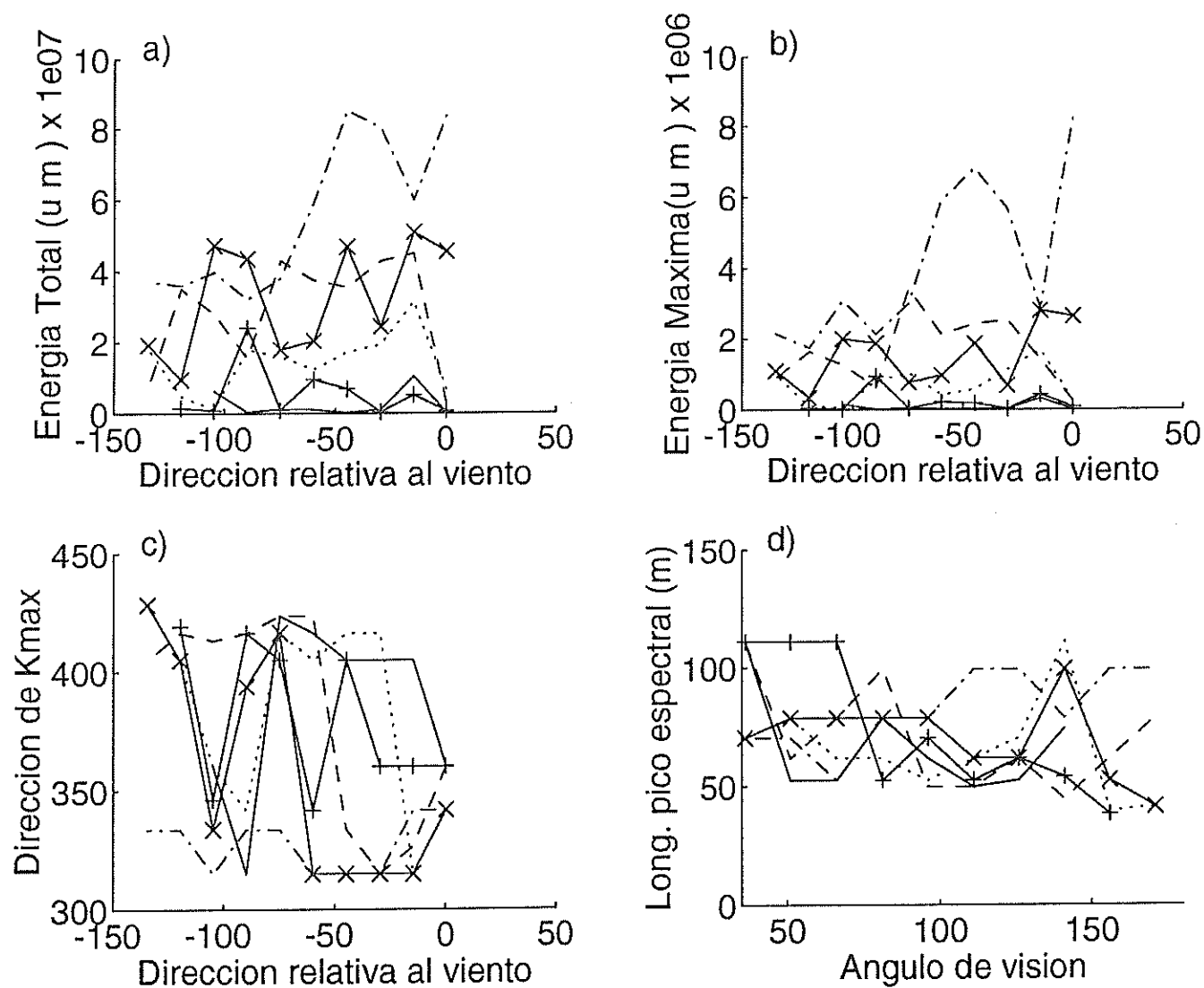


Figura 29. Igual que la figura 5 para la imagen 13.

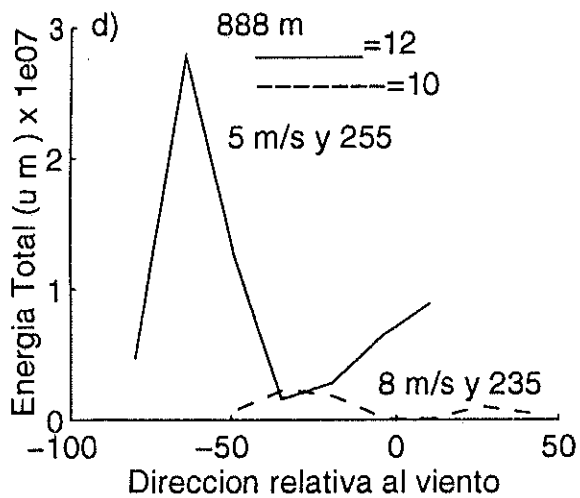
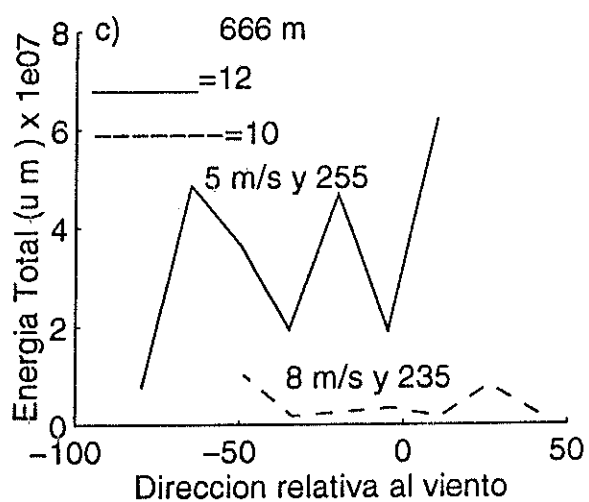
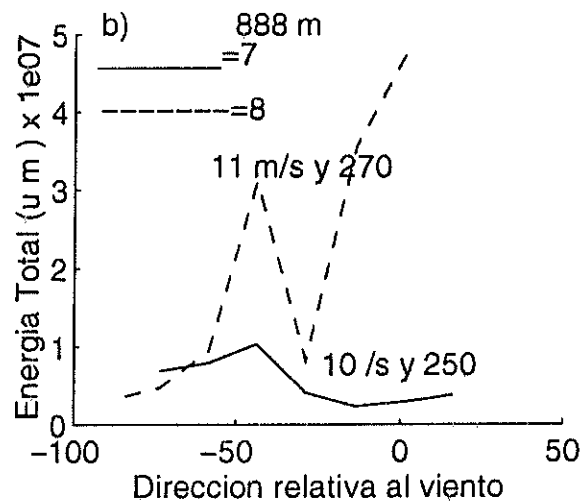
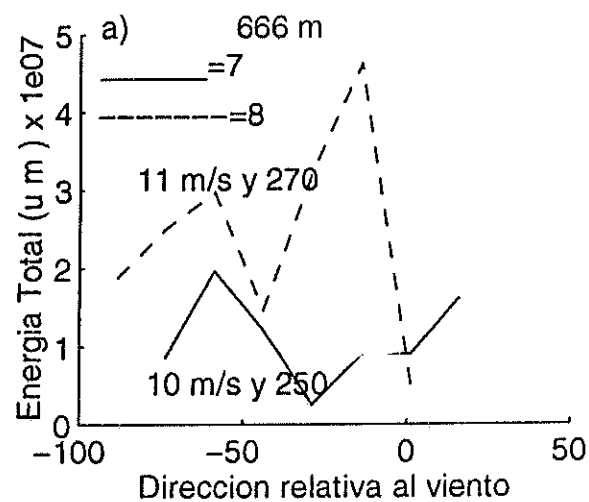


Figura 30. Energía total en función de las subimágenes con características de viento diferente.

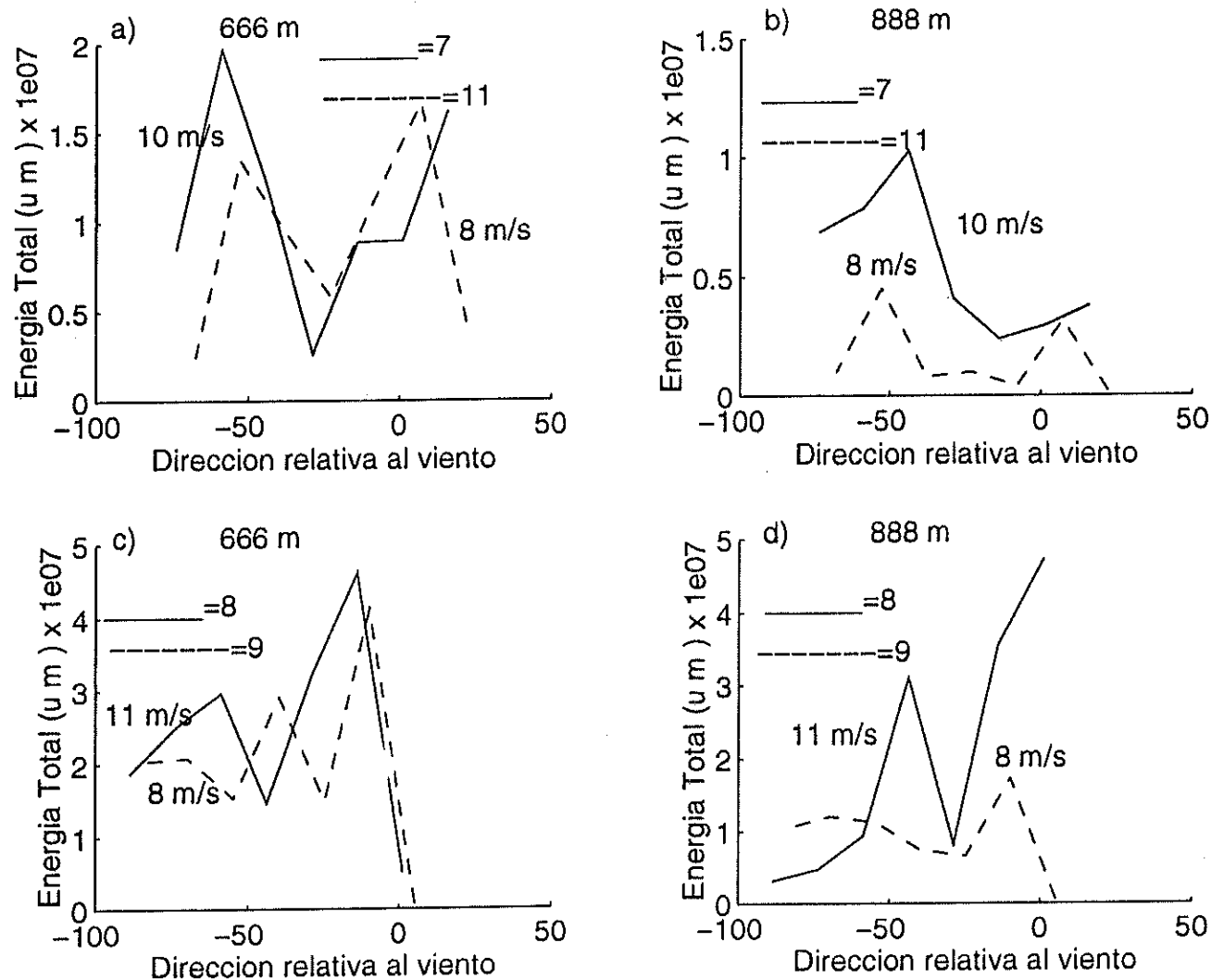


Figura 31. Energía total en función del No. de subimágenes. La dirección del viento es: a) y b) 250° , c) y d) 270° .

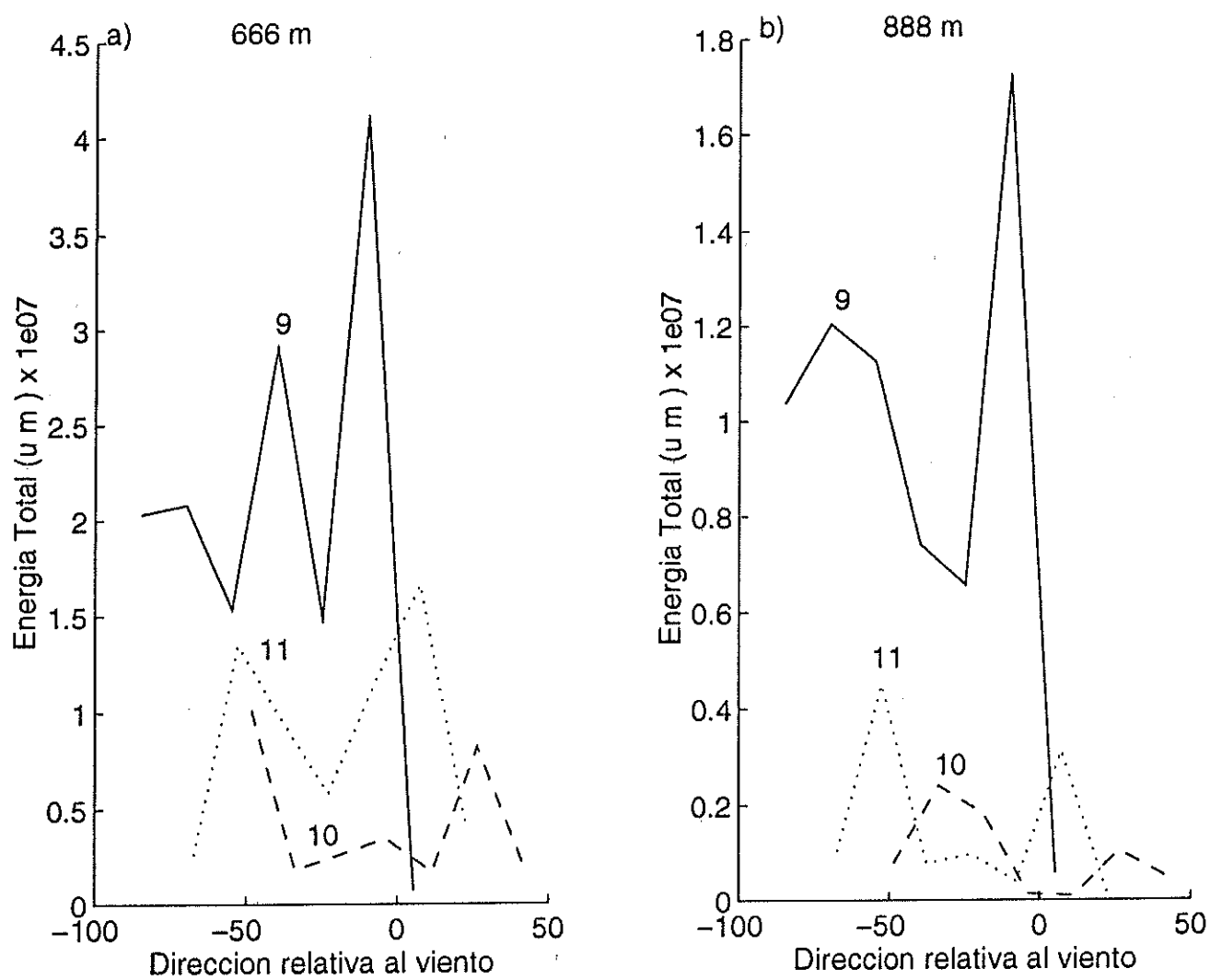


Figura 32. Energía total en función del No. de subimágenes, la magnitud del viento es constante (8 m/s).

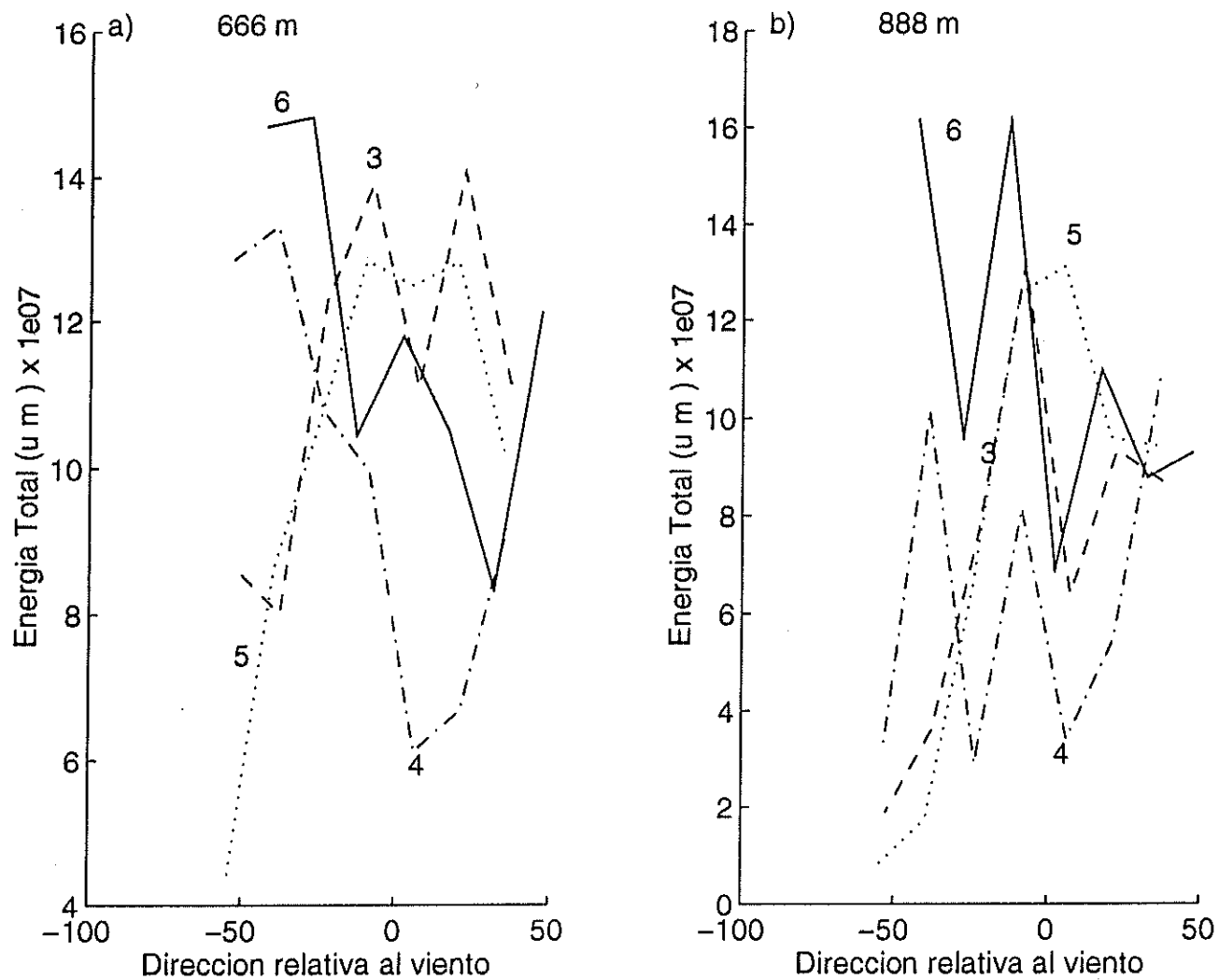


Figura 33. Energía total en función del No. de subimágenes.

4 DISCUSIONES

El uso de las subimágenes de 128x128 píxeles tiene dos propósitos: por un lado optimizar el tiempo de computación y por el otro es prevenir distorsiones debido a la variación en la función de transferencia de una región de la imagen a otra (Young et al, 1985b).

Los valores de E_T más altos encontrados en las imágenes 3, 4, 5 y 6 son debidos a la forma de capturar la imagen de la pantalla del radar porque al no oscurecerse la pantalla del radar le quedan restos del brillo ocasionado por el barrido del cursor en las tomas anteriores.

Una de las causas por las que se puede deber la disminución de la energía al aumentar la distancia al radar es el efecto de sombreado (encubrimiento de la superficie oceánica detrás de las crestas de ondas largas) como es observable en las imágenes 1, 7, 9, 10, 11, 12 y 13 donde se presentan niveles bajos de energía después de 1500 m. La presencia de un segundo máximo de E_T en la imagen 8 a una distancia de 1800 m se debe a que a esa distancia se encuentra la subimagen que incluyó el rompeolas del Sauzal provocando una alta reflectividad. La mayor energía en general, se concentra entre los 200 y 1500 m medidos desde el centro del radar.

Las seis distancias con respecto al radar que se escogieron tuvieron como base que a distancias mayores había ausencia de brillantez (no en todas las imágenes) que definiera algún patrón, es decir, disminuye tanto la intensidad como la definición de crestas.

En general se observa que la E_T de las imágenes 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11 y 12 tiende a aumentar conforme se acerca a la dirección del viento, solamente la imagen 1 alcanza el valor máximo de E_T en esa dirección, las imágenes 3, 4, 5 y 6 disminuyen su E_T al acercarse a la dirección del viento.

La E_T presenta dos máximos en las imágenes 8, 9 y 10, el primer máximo de E_T se encuentra cerca de la dirección del viento (0°) y el segundo aproximadamente -90° , lo cual concuerda con Crombie, *et al* (1978), que menciona que las ondas generadas por el viento viajan solamente $\pm 90^\circ$ de la dirección del viento. La existencia de estas ondas puede ser explicada por un gran número de mecanismos diferentes. Estos procesos influyen reflexiones de la costa, dispersión de las olas por un fondo irregular (Long, 1973) e interacciones no lineales dentro del espectro de las ondas.

La E_T de la imagen 12 tiende a aumentar en la dirección del viento (0°) y en -90° , el valor de E_T disminuye hasta alcanzar en algunas distancias el mínimo. Los valores altos de E_T se encuentran cerca de la dirección del viento. La imagen 13 aumenta E_T en -90 con respecto a la dirección del viento y disminuye su E_T en la dirección del viento. Trizna (1988) concluyó desde resultados experimentales de un radar marino de banda X que la máxima retrodispersión es probablemente en la dirección de las ondas largas que a veces coincide con la dirección del viento como sucedió con la imagen 1. El comportamiento de E_T en función de φ de las imágenes 3, 4, 5 y 6 difieren totalmente de las otras imágenes debido a las características en las que fueron tomadas, además son las que presentan una mayor cantidad de energía reflejada.

En forma general, el comportamiento de E_M es semejante a E_T en las trece imágenes lo que indica una mayor energía asociada a la componente del pico espectral y cuando el comportamiento de E_M era diferente al de la E_T implica que la contribución de energía asociada a los otros números de onda son del mismo orden que la energía asociada al pico espectral.

El θ_{KN} en función de φ de las imágenes analizadas indican el comportamiento de θ_{KN} conforme se acerca a la dirección del viento. En las imágenes 1(r_1), 2(r_3), 6(r_4), 7(r_1, r_6), 12(r_5) y 13(r_3, r_5 y r_6) la dirección de propagación del oleaje va en la misma dirección que el viento, sin embargo, todas las demás imágenes presentan patrones diferentes. En algunas imágenes el θ_{KN} en r_1 ó r_2 varía muy poco con respecto a φ lo que implica que empiezan a sentir el fondo las olas por lo que cuando el θ_{KN} presenta variaciones se infiere la presencia del fenómeno de refracción.

La longitud de onda máxima que se infiere por el análisis espectral de las subimágenes de las trece imágenes fue de 111 m.

Las distancias que se escogieron para analizar la variabilidad de la E_T (figura 30 a la 33) para diferentes condiciones del viento no presentan el efecto del brillo uniforme característico de las primeras distancias cercanas al radar. La comparación que se realiza de la E_T de las imágenes es posible porque se considera en este trabajo que la variabilidad temporal del oleaje tiene un período de estacionaridad en la región de Ensenada de 3 horas (Lambert Arista, 1992).

El que la E_T aumente al aumentar la magnitud del viento concuerda con Wright (1978) que mencionó que era notable la dependencia de las ondas Bragg con 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.

En la figura 32 se observa que el espectro de la imagen cambia en respuesta a los cambios de la dirección del viento, observandose que presenta una mayor energía una dirección de 235° que una de 250° .

Las características del análisis espectral de las dos formas de captar la imagen a partir de la pantalla del radar ocasionan fuertes variaciones en las imágenes que se traducen en variaciones en el análisis espectral. En la figura 33 muestra los resultados del análisis espectral de la segunda forma de captar la imagen, el intervalo de tiempo entre estas imágenes fué de 5 min teniendo las mismas condiciones de viento (magnitud y dirección), sin embargo, se muestran variaciones de E_T que no se esperaban .

Cabe mencionar que no solamente el viento es el factor principal en la formación de la imagen, es en sí, el conjunto de todas las condiciones atmosféricas imperantes al momento de tomar la fotografía (temperatura aire-mar, etc.) (Valenzuela, 1978).

5 CONCLUSIONES

La forma de capturar la imagen de la pantalla del radar es determinante para la interpretación de los resultados del análisis espectral.

Al aplicar el análisis espectral a las subimágenes se determina que la energía depende de la distancia al centro del radar (disminuye la energía de las subimágenes al aumentar la distancia al radar).

Del análisis espectral de las imágenes no se determinó la dirección del viento local.

La influencia de la rapidez y dirección del viento sobre las imágenes se resume en: aumento de la intensidad de la señal al aumentar la rapidez del viento, así, como cambios en la energía total por la variación en la dirección del viento.

En Playa Ramona se determina que la dirección del viento que provoca una mayor energía en la imagen es a 235° (Marzo).

De las dos formas que se utilizaron para capturar la imagen de la pantalla del radar, la primera forma (2s*1b@) se recomienda para la interpretación de los resultados del análisis espectral.

6 BIBLIOGRAFIA

Alpers, W.R., D.B. Ross y C.L. Rufenach., 1981. On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar. J. Geophys. Res., 86(C7): 6481-6498.

Apel, J.R., 1987. Principles of Ocean Physics. Academic Press Inc., San Diego. 634 pp.

Aranda Manteca, F.J., 1983. Estudio de minerales pesados como trazadores de la corriente litoral en la Bahía de Todos Santos, B.C. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C., Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura. 78 pp.

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., 90(C1): 1061-1067.

Crombie, D.D., 1955. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/S. Nature, 175: 681 pp.

Crombie, D.D., K. Hasselman, y W. Sell, 1978. High-frequency radar observations of sea waves travelling in opposition to the wind. Boundary layer Meteorol., 13: 45-54.

Donelan, M.A. y W.J. Pierson, Jr., 1987. Radar scattering and equilibrium ranges in wind-generated waves with application to scatterometry. J. Geophys. Res., 92: 4971-5029.

Fuentes Morales, O.A y Domínguez Mora, R., 1988. Análisis espectral del oleaje. Unidad de Estudios de Ingeniería Civil. Departamento de Oceanografía. C.F.E.

Gower, J.F.R. y J.R. Apel. 1988. Las mediciones del mar por satélite: posibilidades que ofrecen y problemas que plantean. Documentos técnicos de la UNESCO sobre ciencias del mar.(46).

Hoozeboom, P. y W. Rosenthal, 1982. Directional wave spectra images. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE Geosci. Remote Sens. Soc. Munich, June 1-4.

Keller, W.C. y J. W. Wright, 1975. Microwave scattering and straining of wind-generated waves. Radio Sci., 10(2): 139-147.

Lambert Arista, A.A., 1993. Variabilidad del oleaje y su efecto en la estimación de parámetros estadísticos. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México. Tesis de Maestría en Ciencias. 85 pp.

Long, R.B., 1973. Scattering of surface waves by an irregular bottom. J. Geophys Res., 78: 7861-7970

López Luna, M. G., 1990. Cuantificación del volumen de sedimento transportado por la corriente litoral en las playas, el Sauzal y pesquera Zapata, ubicadas en la zona Norte de la Bahía de Todos Santos , Baja California. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C., Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura. 57 pp.

Mattie, M. y D.L. Harris, 1979. A system for using radar to record wave direction. Techn. Rep. U.S. Coastal Eng. Res. Center. (79-1). 50 pp.

Mattie, M., S. Vhsiao y D.D. Evans, 1981. Wave direction measured by four different systems. IEEE J. Ocean. Eng., OE-6(3): 87-93.

Ocampo-Torres, F.J. y I.S. Robinson, 1990. Wind wave directionality effects on the radar imaging of ocean swell. J. Geophys. Res., 95(C11): 20, 347-20, 362 pp.

Pierson, Williard J., 1978. Las olas, p. 128-143. En: Oceanografía la Última Frontera (Richard C. Vetter, ed). El Ateneo., Buenos Aires, Argentina. 302 pp.

Plant, W.J., 1986. A two-scale model of the short wind-generated waves and scatterometry. J. Geophys. Res., 91: 10,735-10,749.

_____, 1990. Bragg scattering of electromagnetic waves from the air/sea interfase, p. 41-108. En: Surface Waves and Fluxes (G.L. Geernaert y W.J. Plant, ed.) Board, los Países Bajos. 372 pp.

Rayleigh, Lord, 1929. Theory of Sound. Macmillan, London, England. II: 89 pp.

Rice, S.O., 1951. Reflection of Electromagnetic Waves from Slightly Rough Surfaces. Comm. Pure Appl. Math, 4, 351 pp.

Riquelme Alcantar, V., 1992. Análisis espectral de imágenes de radar que contienen información de oleaje. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C., Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura. 74 pp.

Rivera Duarte, I., 1984. Comportamiento de los contaminantes derivados de la industria pesquera en la región del Sauzal, Bahía de Todos Santos, B.C. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C. Tesis de Licenciatura. 80 pp.

Sabins, F.F. Jr., 1977. Remote Sensing: Principles and Interpretation. Second Edition. W.H. Freeman and Company.

Segovia Zavala, J. A., 1982. Estudio de Contaminación por materia orgánica en la zona industrial de el Sauzal, B. C. Facultad de Ciencias Marinas. U.A.B.C., Ensenada, B.C. Tesis de Licenciatura. 96 pp.

Trizna, D.D., 1988. Measurements and interpretation of North Atlantic Ocean marine radar sea scatter. Naval Research Laboratory Report 9099., 47 pp.

Valenzuela, G.R., 1978. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves: A review. Boundary Layer Meteorol., 13: 61-85.

Wright, J.W., 1966. Backscattering from capillary waves with application to sea clutter. IEEE Trans. Ant. y Prop., 14: 749-754 .

_____, 1978. Detection of ocean waves by microwave radar, the modulation of short gravity-capillary waves. Boundary-Layer Meteorolgy, 13: 87-105.

Young, I.R., W. Rosenthal y F. Ziemer, 1985a. A three dimensional analysis of marine radar images for determination of ocean wave directionality and surface currents. J. Geophys. Res., 90(C1): 1049-1059 .

_____, 1985b. Marine radar measurements of wave and currents during turning winds. UDC 551.466.32: 551.465.52: 621.396.96, Nort Sea, German Bight. Dt. Hydrogr. Z.38.

Zierner, F., W. Rosenthal y H. Carlson., 1983. Measurements of the directional wave spectra by ship radar. Paper presented at the IAPSO Symposium P5-11, IU66 XVIII General Assembly, Hamburg, Federal Republic of Germany.

