

615528923
i 19029226

T/837

**CARACTERIZACION DE PRADERAS DE POSIDONIA
OCEANICA (L.)Delile Y CYMODOCEA NODOSA
(Ucria)Ascherson POR IMAGENES ACUSTICAS**

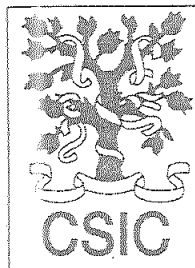
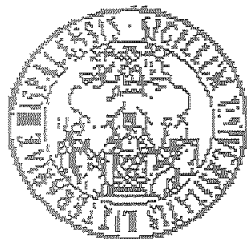
(TESIS DOCTORAL)

Adela Moreno

Sevilla 2001

Universidad de Sevilla

Consejo Superior de Investigaciones Científicas



Departamento de Cristalografía,
Mineralogía y Química Agrícola

Instituto de Recursos Naturales
y Agrobiología

**CARACTERIZACION DE PRADERAS DE POSIDONIA
OCEANICA (L.)Delile Y CYMODOCEA NODOSA (Ucria)Ascherson
POR IMAGENES ACUSTICAS**

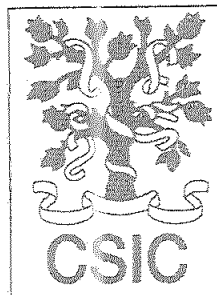
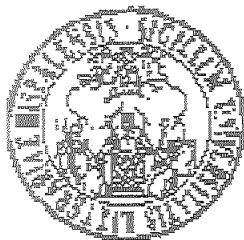
Tesis Doctoral

Adela Moreno López

Sevilla 2001

Universidad de Sevilla

Consejo Superior de Investigaciones Científicas



Departamento de Cristalografía,
Mineralogía y Química Agrícola

Instituto de Recursos Naturales
y Agrobiología

Memoria presentada para optar al título de Doctor en Biología por

Adela Moreno López

Sevilla 2001-08-09

Directores: Patricia Siljeström Ribed

Jorge Rey Salgado

Handwritten signature of Patricia Siljeström Ribed, underlined.

Handwritten signature of Jorge Rey Salgado.

Tutora: Celia Espino

Doctorando: Adela Moreno López

Handwritten signature of Celia Espino, underlined.

Handwritten signature of Adela Moreno López, underlined.

Dedicado a mis padres

AGRADECIMIENTOS

No sería justo, si antes de exponer este trabajo no agradeciera a las muchas personas que han hecho posible que esta tesis sea ya una realidad, participando y ayudando, tanto en los trabajos prácticos, como ofreciendo su apoyo en aquellos momentos en que falta la confianza en una misma. Por todo ello agradecer:

Al Dr. D. Nicolás Bellinfante, por su gentileza al presentar esta Tesis Doctoral ante el Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola de la Universidad de Sevilla.

Al Dr. D. Juan Cornejo, Director de Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología por las facilidades concedidas en todo momento para la realización del presente trabajo.

A los doctores Dña. Patricia Siljeström y D. Jorge Rey, por la dirección y orientación de la Tesis, donde además, en el caso de Patricia nos ha unido una gran amistad, fruto del trabajo de todos estos años en común.

Al personal del IRNASE, siempre dispuesto a ayudar.

A mis compañeros de proyecto daneses les agradezco los datos de la ecosonda RoxAnn, que tomaron y elaboraron, compartiéndolos posteriormente conmigo.

No puedo olvidar tampoco a todas aquellos, que me han corregido y contribuido así a mejorar la tesis. En la parte de acústica mi agradecimiento al Dr. D. Rafael Carbó y a la Dra. D^a Adriana Molero. En la parte de botánica a Dr. D. Pablo García. En cuestiones estadísticas sobre todo y en la tesis en general a D. Luis Ventura García.

AL Dr D. Luis Clemente, por su contribución permanente en la elaboración de la tesis.

A D. Juan Cara, por ser un poco todoterreno, pero principalmente por su ayuda en todo lo referente a informática.

A Dr. Santos Cirujano, por su ayuda en la búsqueda de bibliografía, que en algunos casos por la antigüedad de los artículos, no ha resultado fácil.

A D. José Ignacio Sánchez y D. Luis Rodríguez, por sus aportaciones en la cartografía.

Por supuesto, al grupo del desayuno, por haber aguantado que les diera la lata con este tema, y por hacérmelo ver desde un punto de vista un poco menos serio.

Y desde luego a Miguel Angel, que me ha ayudado en las correcciones literarias y liberándome de trabajos domésticos para que así me diera tiempo a terminar esta tesis.

INDICE

Lista de Figuras

Capítulo 1 - Introducción

- 1.1- Interés
- 1.2- Antecedentes
- 1.3- Problemática
- 1.4- Objetivos
- 1.5- Metodología y Plan de Trabajo

Capítulo 2 - Biología de las especies estudiadas

- 2.1- Introducción
- 2.2- Historia evolutiva
- 2.3- Las Angiospermas marinas. Origen y Sistemática
- 2.4- Características generales de las Fanerógamas marinas
 - 2.4.1- El género *Posidonia*
 - 2.4.1.1- Morfología y Anatomía de *Posidonia oceanica*
 - 2.4.1.2- Ecología
 - 2.4.2 - El género *Cymodocea*
 - 2.4.2.1- Morfología y Anatomía de *Cymodocea nodosa*
 - 2.4.2.2- Ecología

Capítulo 3 - Metodología experimental

- 3.1- Introducción: Por que se ha utilizado la acústica.
- 3.2- Adquisición de datos por sonido.
 - 3.2.1- Propagación del Sonido: Parámetros que le afectan
 - 3.2.1.1- Interacciones con el propio medio

- 3.2.1.1.1 - Velocidad del Sonido
- 3.2.1.1.2- Refracción
- 3.2.1.1.3- Propagación Esférica (Divergencia ó Dispersión)
- 3.2.1.1.4 - Absorción
- 3.2.1.1.5 - Reverberación
- 3.2.1.2- Factores que afectan al Retorno del Sonido
 - 3.2.1.2.1 - Reflexión
 - 3.2.1.2.2 - Reverberación del Fondo (o Dispersión)
- 3.2.1.3- Interferencias y Ruidos
- 3.3- Sensores Acústicos Utilizados
 - 3.3.1- Sonar. Características
 - 3.3.1.1- Longitud del Pulso
 - 3.3.1.2- Detectabilidad
 - 3.3.1.3- Resolución Longitudinal
 - 3.3.1.4- Resolución Transversal
 - 3.3.1.5- Lóbulo de Emisión (Anchura del Rayo de Emisión)
 - 3.3.1.6- Frecuencias de Operación
 - 3.3.2- Ecosonda. Características
- 3.4- Sistemas de localización y navegación
 - 3.4.1- Sistema de localización (GPSD)
 - 3.4.2- Sistema de Navegación Integrado

Capítulo 4 - Area de estudio y toma de datos

- 4.1- Areas de estudio
- 4.2- Diseño de las campañas
 - 4.2.1- Area de Cabo de Palos
 - 4.2.2- Area de Mazarrón
- 4.3- Diseño de la toma de datos
- 4.4- Comprobación y Validación de los datos
- 4.5- Especificaciones de los equipos utilizados
- 4.6- Datos obtenidos

- 4.6.1- Parámetros geodésicos de las campañas de 1996 y 1997
- 4.6.2- Itinerarios del barco
 - 4.6.2.1- Itinerarios del barco correspondientes a Noviembre de 1996
 - 4.6.2.2- Itinerarios del barco correspondientes a Noviembre de 1997
- 4.6.3- Parámetros medidos (densidad, cobertura, temperatura, oxígeno disuelto, Seston, clorofila, salinidad, granulometría del sedimento, transparencia, coordenadas de imágenes puntuales de vídeo y coordenadas de transectos de vídeo)

Capítulo 5 - Tratamiento digital de la imagen acústica

- 5.1- Introducción
- 5.2- Tratamiento de la sonografías
 - 5.2.1-Preprocesado de las imágenes
 - 5.2.2-Procesos de realce de una imagen
 - 5.2.2.1-Mejora de la Interpretación visual
 - 5.2.2.1.1-Realce de contraste
 - 5.2.2.1.2-Realce espacial
 - 5.2.2.1.2.1-Filtros de suavizado
 - 5.2.2.1.2.2-Filtros de Detección de Borde
 - 5.2.2.1.2.3-Filtros de eliminación de Singularidades
 - 5.2.2.2-Extracción de información
 - 5.2.2.2.1-Reconocimiento de Patrones. Clasificaciones
 - 5.2.2.2.1.1-Tipos de Clasificadores
 - 5.2.2.2.1.2-Verificación de los resultados
 - 5.2.2.2.2-Estudios Multitemporales
 - 5.2.2.3-Extracción de información a partir de efectos relacionados con el medio.
- 5.3- Formato de las sonografías. Resolución y escala de trabajo.
- 5.4- Mosaicos. Generación de mapas

Capítulo 6 - Resultados y discusión

6.1- Introducción

6.2- Filtros - Patrones de distribución espacial

6.2.1- Arena

6.2.2- Pradera densa de *Cymodocea nodosa*

6.2.3 - Posidonia Planta Aislada. Límite inferior de la pradera de *C. nodosa* y límite superior de la pradera de *P. oceanica*

6.2.4 - Pradera densa de *P. oceanica*

6.2.5 - Límite inferior de la pradera de *P. oceanica*

6.2.6 - Conclusiones

6.3- Clasificaciones - Patrones de distribución acústica

6.3.1- Fotos y sonografías de los Fondos Tipo. Area de Alta Diversidad

6.3.2- Mosaicos de Fondos Tipo

6.3.2.1 - Mosaicos de Imágenes Procesadas

6.3.2.1.1.- Posidonia

6.3.2.1.2 - *Cymodocea*

6.3.2.1.3 - Arena

6.3.2.2 - Mosaicos de Sonografías Preprocesadas

6.3.3- Validación Cruzada

6.3.3.1 - Arena (100 y 500 kHz)

6.3.3.2 - *Cymodocea* (100 y 500 kHz)

6.3.3.3 - *Cymodocea* (100 kHz)

6.3.3.4 - Posidonia (100 y 500 kHz)

6.3.4- Conclusiones

6.4- Frecuencias óptimas para la caracterización acústica de cada fondo

6.4.1 - Arena

6.4.2 - *Posidonia oceanica*

6.4.3 - *Cymodocea nodosa*

6.4.3.1- Hipótesis sobre la selectividad acústica de *C. nodosa*

6.4.4 - Conclusiones.

6.5- Evaluación de los ecosistemas

6.5.1- *Posidonia oceanica*

6.5.2- *Cymodocea nodosa*

6.5.3 - Conclusiones

6.6- Mapa de distribución. Comparación de resultados.

Conclusiones

Bibliografía

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 1 : Distribución geográfica del género *Posidonia* (Hartog, 1970)

Figura 2 A y B : Morfología externa de *Posidonia oceanica* (L.) Delile

Figura 3: Morfología de *Posidonia oceanica*. Sección transversal de la hoja (Tomlinson, 1982)

Figura 4 : Fotografía submarina en detalle de ambas especies, donde se pueden apreciar sus diferencias morfológicas (http://dragonja.nib.si/Zusterna/Silkel_2.html)

Figura 5 : Hábitat y su evolución de las fanerógamas marinas mediterráneas (<http://www.fao.org/docrep/x0169f/x0169f2i.htm>)

Figura 6 : Modelo de crecimiento de rizomas y raíces (<http://dragonja.nib.si/index.html>)

Figura 7 : Praderas de *P. oceanica* como trampas de sedimentos (Iván Badal Departamento de Biología y Ecología marinas (C.R.I.S.), Web "Xarxa De Vigilancia Dels Alguers" http://www.gencat.es/darp/pesca/fanero_ga/cfanind.htm).

Figura 8 : Pradera de *Posidonia oceanica*. (<http://dragonja.nib.si/index.html>)

Figura 9 : Distribución geográfica del género *Cymodocea* (Hartog, 1970) (http://dragonja.nib.si/DebeliRtic/DrtSlike_4s.html)

Figura 10: Fotografía submarina de *Cymodocea nodosa*. (http://dragonja.nib.si/DelibiRtic/DrtSlike_4s.html)

Figura 11: Dibujo de las características de una planta femenina en flor (según Hartog, 1970).

Figura 12: Corte transversal de la raíz de *Cymodocea nodosa*, Sauvageau, 1891a

Figura 13 : Sección transversal de la hoja de *C. nodosa* (según Sauvageau, 1891b)

Capítulo 3

Figura 14 : Sonar de barrido lateral siendo arrastrado por un barco

Figura 15 : Generación de una sonografía

Figura 16 : Funcionamiento de Ecosondador con clasificador de fondos RoxAnn integrados con los equipos de a bordo.

Figura 17 : Funcionamiento de un DGPS con estación de referencia en tierra

Capítulo 4

Figura 18 : Localización geográfica de las áreas de estudio

Figura 19: Area de estudio frente al Cabo de Palos. Cartografía del fondo.

Figura 20: Area de estudio, donde se localizan los Fondos Tipo, frente al Puerto de Mazarrón. Cartografía del fondo.

Figura 21: (A) Diseño de los transectos del Area Test; (B) Diseño de los transectos de los Fondos Tipo

Figura 22: Itinerario del Area Test realizado durante la campaña de 1996

Figura 23: Itinerario correspondiente al Fondo ARENA realizado durante la campaña de 1996.

Figura 24: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo POSIDONIA (límite superior) realizado durante la campaña de 1996.

Figura 25: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo CYMODOCEA realizado durante la campaña de 1996.

Figura 26: Itinerario del Area Test en Cabo de palos realizado durante la campaña de 1997.

Figura 27: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo ARENA realizado durante la campaña de 1997.

Figura 28: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo POSIDONIA realizado durante la campaña de 1997.

Figura 29: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo CYMODOCEA realizado durante la campaña de 1997.

Figura 30: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo POSIDONIA DEGRADADA realizado durante la campaña de 1997.

Figura 31: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo FANGO realizado durante la campaña de 1997.

Figura 32: Triángulo textural

Capítulo 5

Figura 33: Histograma correspondiente a una imagen .DAT (sonografía en crudo)

Figura 34: Sonografía (fichero .DAT) sin corregir (en crudo)

Figura 35: Sonografía corregida

Figura 36: Histograma de una imagen .PCX estirado automáticamente

Capítulo 6

6.2 - Filtros

Figura 37: Imágenes correspondientes al Fondo Tipo Arena

Figura 38: Imágenes correspondientes al Fondo Tipo Pradera de *Cymodocea nodosa*

Figura 39: Imágenes crudas (ext) y procesadas con el filtro edp, correspondientes al Fondo Tipo Arena, incluyendo el límite inferior de la pradera de *C. nodosa* y el superior de la de *P. oceanica*.

Figura 40: Imagen tomada con 100 kHz, procesada con el filtro Frost, correspondiente al Fondo Tipo Arena, incluyendo el límite inferior de la pradera de *C. nodosa* y el superior de la de *P. oceanica*.

Figura 41: Imágenes correspondientes al Fondo Tipo Pradera densa de *P. oceanica*.

Figura 42: Imágenes crudas y procesadas con el filtro edp, correspondientes al Fondo Tipo Límite inferior de la pradera de *P. oceanica*.

Figura 43: Imagen resultante de aplicar el filtro Frost a la sonografía tomada con 100 kHz, correspondiente al Fondo Tipo Límite inferior de la pradera de *P. oceanica*

6.3. Clasificaciones - Patrones de distribución acústica

Figura 44: Sonografía original de 100 y 500 kHz;

Figura 45: Foto submarina tomada en el círculo marcado;

Figura 46: Clasificación de la imagen usando su propio training set (A);

Figura 47: Clasificación de la imagen usando el training set del área de alta diversidad

Figura 48: Sonografía original de 100 y 500 kHz ;

Figura 49: Foto submarina tomada en el círculo ;

Figura 50: Clasificación de la imagen de forma independiente (usando su propio training set)

Figura 51: 100 y 500 kHz, imagen cruda

Figura 52: Foto submarina

Figura 53: Clasificación de la imagen usando su propio training set

Figura 54: Imagen clasificada usando el training set del área de alta diversidad

Figura 55: Imagen clasificada utilizando únicamente la frecuencia de 100 kHz y el training set del área de alta diversidad.

Figura 56: Imagen clasificada con su propio training set;

Figura 57: Imagen clasificada utilizando el training set generado en el Area de Alta Diversidad (AAD)

Figura 58: Imagen del Fondo Tipo Cymodocea clasificada con su propio training set;

Figura 59: Imagen del mismo Fondo Tipo, clasificada utilizando el training set generado en el Area de Alta Diversidad (AAD)

Figura 60: Foto submarina correspondiente al Fondo Tipo Arena ;

Figura 61: Sonografía clasificada usando su propio training set;

Figura 62: Sonografía del mosaico del Fondo Tipo clasificada con el training set del Area de Alta Diversidad.

Figura 63: Mosaico del Fondo Tipo Cymodocea

Figura 64: Mosaico del Fondo Tipo Posidonia

Figura 65: Mosaico del Fondo Tipo Arena

6.3.3 - Validación cruzada

Figura 66: Derrotas correspondientes al Fondo Tipo de Arena

Figura 67: Columna de la izquierda, sonografías originales en las tres direcciones disponibles, con sus respectivas clasificaciones a la derecha.

Figura 68: Derrotas del Fondo Tipo Cymodocea

Figura 69: Sonografías originales e imágenes clasificadas usando 100 y 500 kHz

Figura 70: Imágenes clasificadas utilizando la frecuencia de 100 kHz

Figura 71: Derrotas correspondientes al Fondo Tipo Posidonia

Figura 72: Imágenes originales y clasificadas de fondo tipo de Posidonia

6.5 - Evaluación de los ecosistemas

Figura 73: (A y B) Posidonia mata aislada y con EDP;

(C y D) Posidonia densa y con EDP;

(E y F) Posidonia degradada Mazarrón y con EDP;

(G y H) Posidonia degradada Palos y con EDP.

Figura 74: (A y B) Fango y con EDP

Figura 75: (A y B) Cymodocea degradada y con EDP

6.6- Mapas de distribución. Comparación de resultados usando RoxAnn.

Figura 76: Mapa de distribución con medidas de superficie de cada tipo de cobertura.

Figura 77: Distribución espacial de los datos de RoxAnn tomados en Cabo de Palos, 1997.

Figura 78: Mapa de distribución con las clases Cymodocea (en verde) y arena (en amarillo), basado en las medidas tomadas con el RoxAnn.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1- Interés

Las praderas de fanerógamas marinas habitan las zonas más someras de la plataforma continental hasta una profundidad máxima de treinta a cincuenta metros, aproximadamente. Entre la variedad de especies que las forman, dos constituyen el objeto de este estudio: las praderas constituidas por *Posidonia oceanica* (L.) Delile que forman uno de los componentes más importantes del ecosistema marino costero y la segunda *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson, que aparece asociada a las anteriores ocupando ecosistemas de características ligeramente diferentes. El conocimiento de la distribución de éstas, ayudará a determinar el estadio evolutivo del ecosistema litoral.

1.2- Antecedentes

La importancia de la pradera de *Posidonia oceanica* en la ecología y economía litoral ha sido ampliamente tratada (Boudouresque *et al*, 1977; Ramos-Esplá, 1984), bien en función de la elevada biodiversidad que sustenta (Kermeis, 1960; Ledoyer, 1962; Peres y Picard, 1964; Hartog, 1970) o bien por su elevada producción primaria (Ott, 1980; Pergent y Pergent-Martini, 1991) y protección del litoral (Maggi, 1973; Meinesz y Lefevre, 1978; Meinesz *et al*, 1981^a; Ballesta, 2000).

Cymodocea nodosa es la segunda fanerógama marina más abundante en el Mediterráneo, apareciendo también ampliamente distribuida. El interés de las praderas de *C. nodosa* es que se adaptan a fondos más someros y de sedimentos más finos que *P. oceanica*, por lo que anteceden en una evolución litoral natural a las praderas de *Posidonia* (Hartog, 1970) y pueden preceder a esta especie cuando el ecosistema de *P. oceanica* se encuentra en regresión.

La comunidad científica ha calificado a las praderas de fanerógamas, especialmente *Posidonia oceanica*, como una de las principales riquezas naturales del Mediterráneo. Se hace imprescindible una caracterización y seguimiento de estas praderas porque, según numerosos autores, se encuentran en regresión debido a factores climáticos (Augier y Boudouresque, 1970), antropogénicos (Augier y Boudouresque, 1970; Peres y Picard, 1975; Maggi *et al*, 1977), físicos (Hartog, 1970), químicos (Greepeace, 1991) y biológicos (Ramos-Esplá, 1984), que se detallarán más adelante.

1.3- Problemática

Una de las dificultades en el estudio de estos ecosistemas, encontradas hasta la fecha, era que las observaciones debían realizarse mediante inmersiones, lo cual resultaba en la mayoría de los casos investigaciones lentas, costosas, poco precisas y, en muchos casos, peligrosas, obteniéndose únicamente un conjunto de datos de carácter puntual.

Por otra parte, varios autores (Ramos-Esplá 1984; Lefevre et al, 1984; Meinesz et al, 1981b) han utilizado fotografía aérea a escala de detalle (1:18.000) que les ha permitido delimitar la pradera superficial hasta unos diez metros de profundidad pero no distinguían la naturaleza y el tipo de substrato en el que crece *Posidonia* ni la diferenciaban de la pradera densa de *Cymodocea*.

En el presente trabajo se propone una metodología basada en dos novedades: de un lado, la selectividad acústica que presentan ciertas especies vegetales submarinas estudiadas por la autora (Siljeström et al, 1995, 1996; Carbó y Molero, 1997) y del otro, el procesado de imágenes acústicas (Moreno et al, 1998). Esta metodología se viene utilizando desde hace unos años, ofreciendo muy buenos resultados en la caracterización y evaluación de diferentes tipos de fondos submarinos (Pasqualini et al, 1998). La sinergia de estas dos técnicas está creando una poderosa herramienta en los estudios submarinos, ya que posibilita el estudio y seguimiento de grandes extensiones de fondos a un coste mínimo y con una gran seguridad y fiabilidad de resultados (Laban, 1998; Green y Cunningham, 1998).

1.4- Objetivos

El objetivo general de esta Tesis Doctoral es la caracterización y evaluación de dos especies de fanerógamas marinas (*Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*) mediante la unión de las técnicas de acústica submarina (generadoras de imágenes acústicas o sonográficas) con otras de procesado de imágenes.

Para ello, se va a utilizar una metodología que resulta innovadora en estudios biológicos, así como un tratamiento de imágenes que, por las especiales características de las sonografías, resulta ser muy específica.

Los objetivos concretos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- ❖ Caracterización acústica de los fondos típicos donde se asienta *Posidonia oceanica*
- ❖ Caracterización acústica de los fondos donde se establece *Cymodocea nodosa*
- ❖ Firma acústica de *Posidonia oceanica*
- ❖ Firma acústica de *Cymodocea nodosa*
- ❖ Procesamiento de imágenes adecuado para realzar las características de *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*
- ❖ Caracterización de los diferentes estadios de la pradera de *Posidonia oceanica* a partir de la interpretación de las imágenes sonográficas tratadas.
- ❖ Caracterización de los diferentes estadios de la pradera de *Cymodocea nodosa* a partir de la interpretación de las imágenes sonográficas tratadas.
- ❖ Cartografía final de la zona estudiada. Mapas de distribución

1.5- Metodología y plan de trabajo

Para conseguir los objetivos propuestos, se va a estudiar una zona, cuya profundidad oscila entre cinco y treinta metros, situada en el mar Mediterráneo donde aparecen las dos especies. Dicha área será explorada y rastreada por un sonar de barrido lateral de doble frecuencia simultánea, que genera imágenes sonográficas georreferenciadas bajo el control de un sistema de navegación y posicionamiento en tiempo real. En el área de estudio se definirán una serie de puntos establecidos al azar donde se realizarán, de un lado, comprobaciones *de visu* (por buceadores e imágenes ópticas) para verificar la especie detectada y los tipos de fondos y, de otro, toma de datos adicionales, tales como conteos manuales de haces de plantas (por buceadores) para obtener información de la biomasa y valores de diversos parámetros y variables exógenas que pudieran influir en la toma de imágenes como son la salinidad, temperatura, turbidez, etc. El diseño de las campañas así como la elección de las áreas de estudio será descrito en detalle en el capítulo cuatro (Área de Estudio y Toma de datos).

Las principales características de las especies que se van a estudiar, algunas de ellas muy importantes a la hora de explicar su firma acústica, se comentan en el capítulo dos (Biología de las especies).

Los sistemas utilizados para la generación de datos y adquisición de imágenes se describen en el capítulo tres (Metodología Experimental).

El procesado que se aplicará a las imágenes sonográficas, incluyendo el preprocesado, aparece comentado en el capítulo cinco (Tratamiento de la Información). Dicho preprocesado consiste en aplicar una serie de correcciones tales como las anamórficas (para enmendar las deformaciones transversales y longitudinales debidas al cambio de rumbo y la velocidad del barco) y otras de carácter instrumental que fueran necesarias. Una vez corregidas las sonografías, se realizará un mosaico sonográfico con las imágenes para obtener una cartografía detallada del fondo (sonoplano). Por otro lado, se recortarán subescenas de las imágenes más representativas (tanto de tipos de fondos, como de los diferentes tipos de cobertura vegetal) para ser procesadas en el laboratorio de análisis de imágenes, donde serán sometidas a una serie de tratamientos digitales encaminados a mejorar la interpretación visual y a extraer el máximo de información.

Por último, los resultados obtenidos serán discutidos posteriormente en el capítulo seis, comparándose con otros trabajos en los que se ha aplicado otros sistemas acústicos con el mismo objetivo que el presente proyecto y en el mismo área de estudio.

Capítulo 2

BIOLOGIA DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS

2.1- Introducción.

Las fanerógamas marinas son grupos de plantas muy antiguos que se han adaptado a la vida en un medio salino, de hecho son las únicas representantes de las Angiospermas que viven en el mar. Son capaces de crecer completamente sumergidas y pueden formar poblaciones densas, denominadas praderas, gracias a que disponen de sistemas de anclaje suficientemente desarrollados para hacer frente a la acción de las olas y las corrientes marinas. La adaptación de estas especies a la vida en el mar conlleva una serie de cambios anatómicos, morfológicos y fisiológicos, que se comentarán en el presente capítulo. Así mismo, se describe la historia evolutiva de las áreas en las que habitan las especies a caracterizar (*Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*), haciendo hincapié en el mar Mediterráneo donde *Posidonia oceanica* es endémica.

2.2 - Historia evolutiva

Se piensa que el origen de las praderas de fanerógamas marinas se remonta al antiguo mar de Tetis, rodeado por Africa, Gondwana y Asia hace unos cien millones de años. Durante el Eoceno las praderas se encontraban ampliamente extendidas en el Pacífico asiático y los trópicos (Dawes, 1986). Los cambios climáticos que acompañaban los movimientos de la tectónica de placas durante el Cretácico produjeron importantes cambios en su distribución originado por el descenso de las temperaturas.

A finales del Cretácico (100 - 65 my BP), el Mediterráneo (o lo que iba a convertirse en el Mediterráneo) formaba parte del mar de Tetis que conectaba el Atlántico con el Indo-Pacífico. Dicho océano estaba poblado por una rica vida subtropical de afinidad Indo-Pacífica. Cuando el Paleomediterráneo se separó del Atlántico y del mar Rojo, hace unos seis millones de años, cambios climáticos conocidos como la Crisis Messiniense de Salinidad provocaron que el Paleomediterráneo se secase parcial o totalmente en algunos lugares, originando una destrucción en masa de la vida marina. Posteriormente, hubo unos movimientos tectónicos que restablecieron la conexión con el Atlántico a través del Estrecho de Gibraltar, hace unos cinco millones de años (Brongniart, 1828). Todo ello dio lugar a que el Mediterráneo se repoblase de especies Atlánticas, siendo ésta la razón de que la mayoría de las especies mediterráneas actuales se encuentren también en el Atlántico Este

(Watelet, 1866). Como este último evento puede considerarse relativamente reciente, desde un punto de vista geológico, muy pocas especies han tenido la posibilidad de diferenciarse de sus parientes atlánticos, de ahí, el bajo número de formas mediterráneas endémicas. De hecho, y desde un punto de vista biogeográfico, el Atlántico y el Mediterráneo forman una unidad denominada provincia Atlanto-Mediterránea (Schembri, 2001).

Muy recientemente (1869), la unión del Mediterráneo con el mar Rojo fue restablecida a través del canal de Suez, lo que favoreció la migración de especies hacia el Mediterráneo Este, proceso que se ha denominado Migración de Lesseps (en honor al ingeniero responsable de la construcción del canal de Suez). Los elementos Indo-Pacíficos actuales del Mediterráneo están básicamente representados por estos inmigrantes recientes, aunque un pequeño número de especies son relictas desde los días del mar de Tetis como, por ejemplo, *Posidonia oceanica* (Brasier, 1975; Brayle, 1991)).

A partir de esta historia evolutiva, Schembri (2001) describe la flora y fauna actual del Mediterráneo compuesta, aproximadamente, por un 62 % de especies que también se encuentran en el Atlántico este, un 29 % de especies endémicas del Mediterráneo, un 13 % de especies cosmopolitas y un 5 % de especies Indo-Pacíficas, entre las cuales se encuentran las especies de fanerógamas que se van a estudiar.

2.3 - Las Angiospermas marinas. Origen y sistemática

El origen de las Angiospermas marinas plantea numerosos interrogantes que se pueden resumir en dos hipótesis:

- La primera, desarrollada por Arber (1920), propone que las Angiospermas han penetrado en el mar procedentes del agua dulce.
- La segunda hipótesis, propuesta por Hartog (1970), sugiere que las fanerógamas marinas provienen de plantas terrestres que retornaron al mar.

La transición que plantea Arber (1920) es que especies de agua dulce evolucionaron a otras tolerantes a la sal, adaptándose posteriormente al agua salobre y pasando finalmente a vivir en el mar. Arber sugiere que las Familias Potamogetonaceae e Hydrocharitaceae pasaron por estas etapas mientras que otras Familias (Ceratophyllaceae, Callitrichaceae, Naiadaceae, Ranunculaceae y Haloragaceae) se han quedado en etapas previas como especies de agua

dulce tolerantes a la sal, que posiblemente en el futuro puedan adaptarse a condiciones marinas.

La hipótesis de Hartog (1970) se opone a la anterior, basándose en los siguientes argumentos: el hecho de que Potamogetonaceas e Hydrocharitaceas estén distribuidas principalmente en agua dulce puede ser verdad a nivel de especie. Sin embargo, es diferente cuando se considera la distribución de las Subfamilias. El grupo que él llama Familia Potamogetonaceas es bastante heterogéneo y está subdividido en seis Subfamilias. Tres de estas, que comprenden en la actualidad Familias (Cronquist, 1988) (Zosteroidea, Posidonioidea, y Cymodocioidea), son completamente marinas. En cambio, el resto (Zannichellioideae con tres géneros, y Ruppioideae con un género), presentan alta tolerancia a la sal pero son incapaces de sobrevivir en condiciones marinas.

En cuanto a la sistemática, actualmente se considera que todas las especies que forman las praderas marinas, pertenecientes al antiguo orden HELOBIALES, se han fragmentado en varios Ordenes (Cronquist, 1998), entre los que se encuentran HIDROCHARITALES y NAJADALES, los únicos que incluyen los dieciocho géneros y las cincuenta y ocho especies de fanerógamas marinas reconocidas. Las Familias Posidoniaceae y Cymodoceae se ubican en el orden NAJADALES (Cronquist, 1988).

Tabla 1 . Sistemática de las fanerógamas marinas (según Cronquist, 1988)

Clase LILLIOPSIDA (Monocotiledóneas)

Subclase ALISMATIDAE

Orden ALISMATALES

O. HYDROCHARITALES

Familia Hydrocharitaceae

Género Enhalus (contiene 1 especie, India & Pacífico)

Thalassia (2, Caribe & Pacífico)

Halophila (10, Trópicos)

O. NAJADALES (10 Familias)

F. Zosteraceae

Zostera (12, Zonas Templadas)

Heterozostera (1, Zonas Templadas, Australia y Chile)

Phyllospadix (5, Pacífico)

F. Posidoniaceae

Posidonia (3, Mediterráneo, SW Australia, Tasmania)

F. Cymodoceae

Cymodocea(4,Mediterráneo,Atlántico,Indopacíf.-Australia)

Halodule (6, Trópicos)
Syringodium (2, Caribe, Indopacífico)
Amphibolis (2, Australia - Trópicos)

O. TRIURIDALES

Las especies que se van a estudiar , *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa* son fanerógamas (plantas con semilla) pertenecientes a la División SPERMATOPHYTA, concretamente al grupo de las Angiospermas (vegetales que tienen los óvulos encerrados en una cavidad carpelar u ovario y forman frutos), Subdivisión MAGNOLIOPHYTINA y, dentro de ésta, a la Clase LILLIOPSIDA o Monocotiledóneas, cuya sistemática se resume en la Tabla 1.

2.4 - Características generales de las fanerógamas marinas

Las fanerógamas marinas presentan una serie de rasgos anatómicos comunes como resultado de haberse adaptado a este estilo de vida. Por este motivo y de manera general, la hoja presenta forma de cinta o tira con una capa de cutina muy fina o inexistente. Dichas hojas tienen sólo una capa de células con clorofila (epidermis), debajo de la cual se sitúa un aerénquima grueso sin color y con grandes canales aeríferos a lo largo de la hoja. El rizoma sirve como área de almacenaje de almidón y presenta la continuación de los canales aeríferos que, a su vez, continúan por las raíces y por los pelos radicales que capturan nutrientes del sedimento.

Las flores, nacidas bajo el agua, presentan polinización hidrófila. Las semillas se producen generalmente en grandes cantidades aunque la expansión de las praderas se hace básicamente por crecimiento horizontal del rizoma y, en menor proporción, por propagación y germinación de éstas.

Las características morfológicas, anatómicas y ecológicas de cada una de las especies estudiadas presentan una gran influencia en su respuesta acústica, por lo que se comentan a continuación de forma separada.

2.4.1 - El género Posidonia

El género *Posidonia* se caracteriza por poseer un rizoma monopódico e irregularmente ramificado. Las inflorescencias axilares son racemosas y llevan brácteas en forma de hojas mientras que las apicales, en forma de espigas, tienen varias flores laterales aparentemente desnudas. Cada flor tiene tres estambres, un solo carpelo y un ovario solitario. El polen es filamentosos. El fruto tiene un pericarpo esponjoso que se abre para liberar unas semillas alargadas. Las hojas se caracterizan por poseer vaina y lígula, epidermis fotosintética, sin pelos ni estomas. Poseen células ricas en taninos en todas partes de la planta, especialmente en la epidermis (Tomlinson, 1982).

Posidonia tiene tres especies, *P. australis* y *P. ostenfeldii* distribuidas en las costas tropicales de Australia, y *P. oceanica* que habita principalmente en el Mediterráneo, aunque penetra algo en el Atlántico cerca de Gibraltar (Figura 1).

Posidonia oceanica está ampliamente distribuida en el Mediterráneo, de donde es endémica, encontrándose tanto en las costas europeas como en el norte de África (Ben Mustapha, 1987).

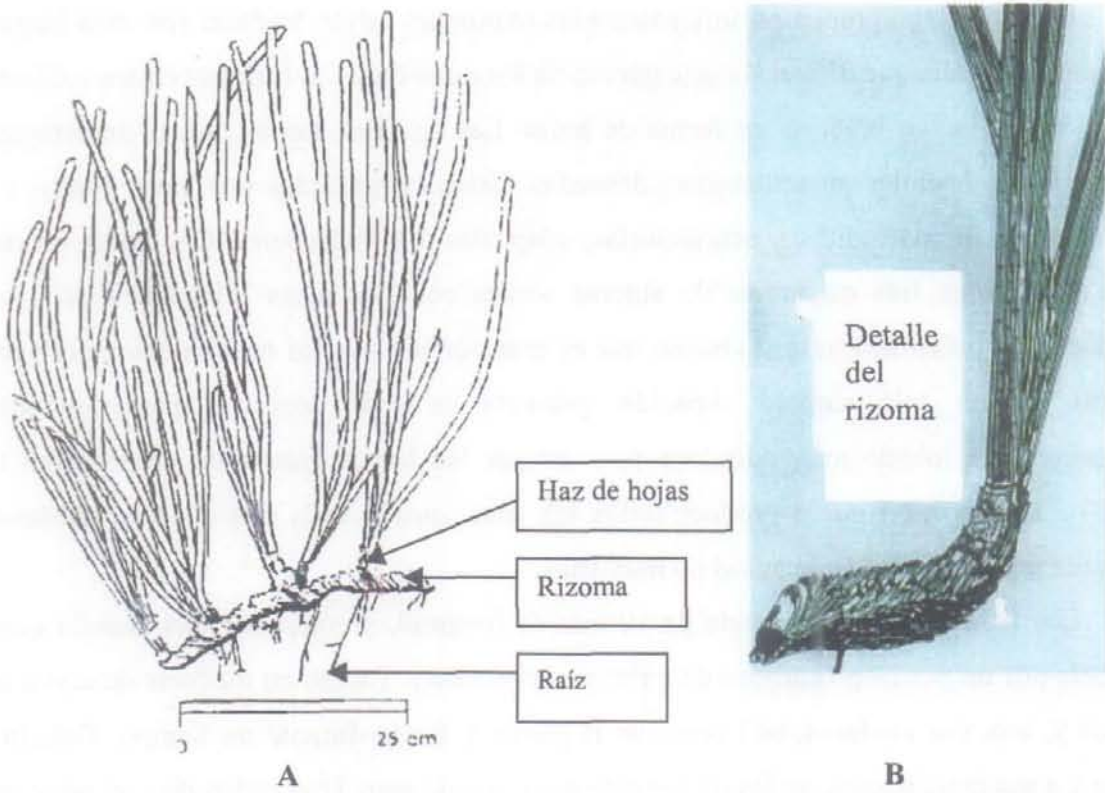


Figura 1 : Distribución geográfica del género *Posidonia* (Hartog, 1970)

2.4.1.1- Morfología y anatomía de *Posidonia oceanica*

La especie *Posidonia oceanica* se caracteriza por poseer un rizoma monopódico de color marrón, irregularmente ramificado, con un grosor de hasta 1 cm, herbáceo, monopódico, comprimido lateralmente y repetidamente ramificado. Se encuentra cubierto de hojas escuamiformes a modo de vaina enraizante en los nudos, como se aprecia en las Figuras 2, A y B. Los rizomas más viejo, aparecen revestidos por fibras persistentes que son restos de la base de las hojas (Figura 2 B). (Hartog, 1970). Las raíces alcanzan 15 cm de longitud y 4 mm de grosor y son bastante ramificadas y lignificadas.

Presenta un tallo terminado por grupos de hojas denominados fascículos, cada uno de los cuales comprende de cuatro a ocho hojas (Figura 2, A). Las hojas son alternas con limbo acintado de 20-80 cm de longitud y cerca de 1 cm de anchura, recorridas por 13-17 nervios conectados por haces perpendiculares a intervalos de 2-5 mm y un pedúnculo comprimido de 10-25 cm de largo y 2.5-3.5 mm de ancho (Figura 2, B). Las fibras, bien desarrolladas, forman un sistema subepidérmico en forma de tiras a lo largo de la lámina de la hoja, agregándose en bandas anchas, lignificadas y persistentes en su base que siguen presentes en el córtex del rizoma. Las hojas se caracterizan por poseer vaina y lígula. La vaina, a diferencia los géneros australianos, no se cierra completamente alrededor del tallo, y la lígula es muy corta. La planta posee células ricas en tanino, especialmente en la epidermis de la hoja donde aparecen como numerosos puntos oscuros, como se muestra en la Figura 3 que recoge la sección transversal de la hoja.



Planta de *Posidonia oceanica*
(<http://www.fao.org/docrep/x0169f/x0169f2i.htm>)

Rizoma cubierto por hojas
escuamiformes
(<http://dragonja.nib.si/index.html>)

Figura 2 A y B : Morfología externa de *Posidonia oceanica* (L.) Delile

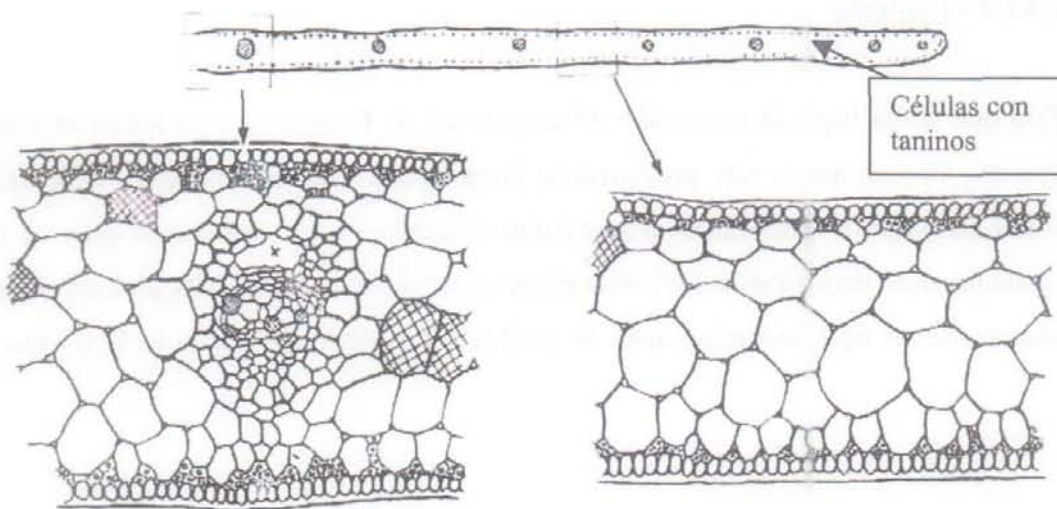


Figura 3: Morfología de *Posidonia oceanica*. Sección transversal de la hoja
(Tomlinson, 1982)

Las flores se agrupan en inflorescencias terminales cuyas brácteas son más largas que sus vainas, detalle que diferencia este género de los otros dos. Las inflorescencias axilares son racemosas y llevan brácteas en forma de hojas. Las apicales son en forma de espigas con varias flores laterales aparentemente desnudas. Están constituidas por entre cuatro y diez flores, todas hermafroditas y actinomorfas, adaptadas a la hidrocoria. Las flores no poseen periantio, tienen tres estambres de anteras sésiles con dos tecas biloculares cada una y producen un polen filiforme y viscoso que es transportado por los movimientos del agua. El ovario, de un solo carpelo elipsoide, presenta un estilo corto y porta un estigma irregularmente lobado muy adecuado para atrapar los largos granos de polen (Font Quer, 1993) . La floración no se produce todos los años, quizás cada dos años y solamente en sectores muy localizados de aguas no muy frías.

Los frutos, de forma ovoide de 10 mm de longitud, y contienen una semilla que está rodeada por un pericarpo carnoso de color pardo-verdoso. Tardan en madurar de seis a nueve meses y, una vez maduros, se liberan de la planta y flotan durante un tiempo. Debido a su color y a sus dimensiones, se les ha llamado aceitunas de mar. Tras varios días, el pericarpo se pudre y la semilla cae al fondo; si el sustrato y las condiciones físico-químicas del medio son favorables tendrá lugar la germinación. Las semillas son oblongas y comprimidas, con una cara convexa y otra con una ranura, rellenas completamente con el embrión.

2.4.1.2 - Ecología

Para que tenga lugar la formación de un pastizal de *P. oceanica* en zonas arenosas, es necesario que el sedimento esté previamente humificado, para lo cual sería necesario que algas como *Caulerpa* u otras fanerógamas como *Cymodocea* y/o *Zostera* se fijen en primer lugar, constituyendo uno o varios lechos de rizomas, estolones, raíces o rizoides enmarañados, edificándose así un tipo de suelo capaz de recibir a *Posidonia* (Figuras 4, 5) (Greenpeace, 1991).



Figura 4 : Fotografía submarina en detalle de ambas especies, donde se pueden apreciar sus diferencias morfológicas (http://dragonja.nib.si/Zusterna/Silkel_2.html)

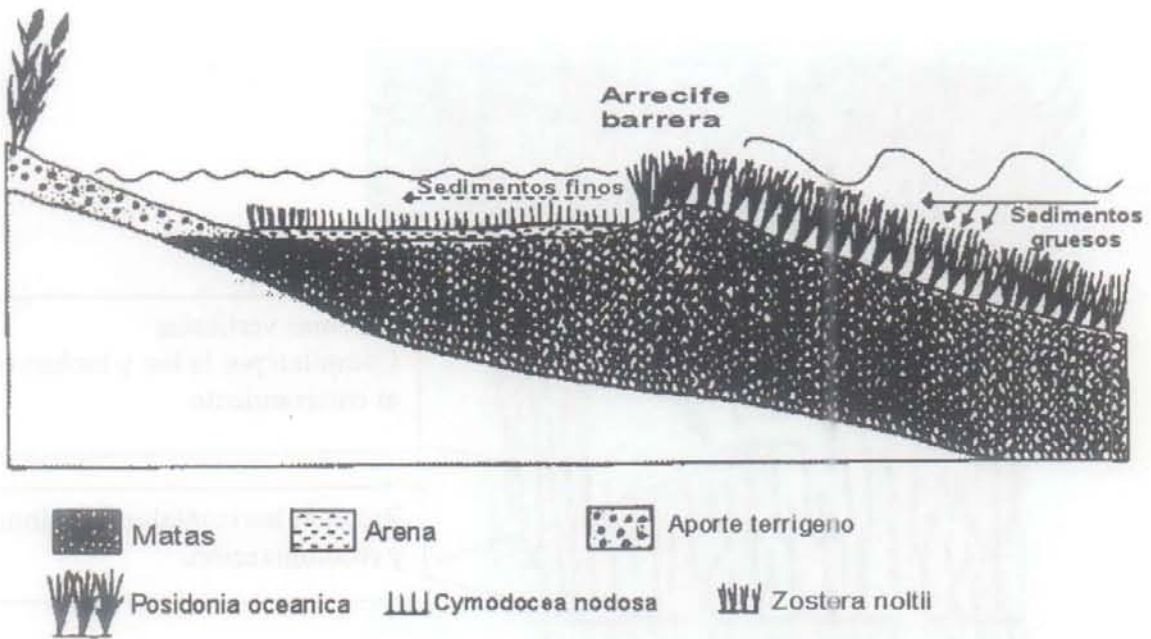


Figura 5 : Hábitat y su evolución de las fanerógamas marinas mediterráneas (<http://www.fao.org/docrep/x0169f/x0169f2i.htm>)

En zonas rocosas el establecimiento de *P. oceanica* sigue un modelo parecido. En este caso, serán las algas las encargadas de fijar la arena existente sobre las rocas. La posterior acumulación de arena hace al sustrato menos apropiado para las algas que empiezan a perder su punto de anclaje, favoreciendo la llegada de las fanerógamas marinas. Estos modelos de establecimiento, así como su posterior evolución (incluida la formación de "arrecifes barrera"), se esquematiza en la Figura 5.

Una vez instalada, los rizomas se desarrollan horizontalmente y de crecimiento muy lento (5 a 10 centímetros por año, Figura 6). Hace falta una decena de años para que la germinación inicial dé lugar a una mancha de pocos metros cuadrados. Sobre un sustrato óptimo, estas manchas se unirán para formar una pradera continua. En este periodo de tiempo, las especies pioneras como *Cymodocea*, *Caulerpa*, etc. van desapareciendo progresivamente. Una vez que el espacio disponible ha sido totalmente colonizado, los rizomas comenzarán a tener un crecimiento vertical debido a la gran densidad de fascículos de hojas existentes, dándose una competencia por la luz. Este crecimiento vertical también es muy lento, como máximo de unos pocos milímetros por año.

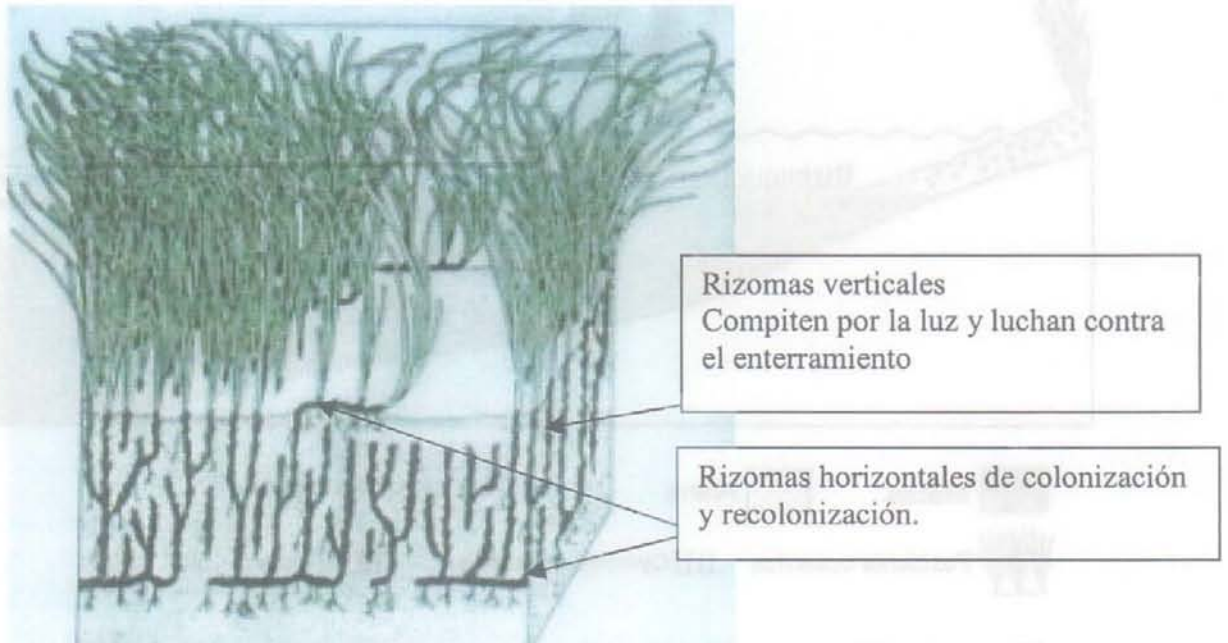


Figura 6 : Modelo de crecimiento de rizomas y raíces
(<http://dragonja.nib.si/index.html>)

Los pastos de *P. oceanica* constituyen una trampa para la sedimentación de partículas de arena transportadas por la corriente, como se aprecia en la foto submarina de la Figura 7. Debido al aporte continuo de estos sedimentos, se produce un progresivo aumento del fondo marino, favorecido también por el crecimiento vertical de los rizomas (Kerneis, 1960; Rico-Raimondino, 1995).



Figura 7 : Praderas de *P. oceanica* como trampas de sedimentos (Iván Badal Departamento de Biología y Ecología marinas (C.R.I.S.), Web "Xarxa De Vigilancia Dels Alguers" <http://www.gencat.es/darp/pesca/faneroga/cfanind.htm>).

Las praderas de *P. oceanica* forman ecosistemas muy dinámicos. Su ciclo anual consta de una estación de crecimiento foliar (primavera-verano) que permite la colonización de las hojas por una comunidad de epífitos muy diversa y bien adaptada. Las hojas se degradan apreciablemente durante septiembre y las tormentas de otoño dejan paso a la siguiente generación foliar.

Las praderas de elevada calidad de *P. oceanica* (ver Figura 8) son sistemas altamente productivos (entre 4 y 20 l de O₂ diarios) (Boudouresque y Meinesz, 1982; Bay, 1979; Pergent et al, 1994; Pergent et al, 1997), convirtiéndolas en un elemento clave para el proceso de oxigenación del mar. Estas praderas producen y sostienen elevados niveles de biomasa (38 Tm/ha/año de peso seco), estimados como los más elevados del Mediterráneo (Ott, 1980; Pergent-Martini et al, 1994).

La diversidad biológica de las comunidades de *P. oceanica* es también muy elevada, ya que más de cuatrocientas especies vegetales y mil de animales habitan estas praderas, que

funcionan como zonas de protección y alevinaje para numerosos crustáceos y peces (Mazzella et al, 1986; Ledoyers, 1962; Pergent et al, 1999)



Figura 8 : Pradera de *Posidonia oceanica*. (<http://dragonja.nib.si/index.html>)

Dichas praderas juegan un papel esencial en la estabilización de playas y fondos marinos, ya que esta vegetación reduce la acción de las olas y corrientes a la vez que las hojas y rizomas retienen sedimentos en suspensión (Blanc y Jeudy de Grissac, 1984; Jeudy de Grissac, 1984; Pergent-Martini, 2000). Además, la gran sensibilidad de *P. oceanica* a las alteraciones artificiales del medio marino hace de esta especie un eficaz indicador biológico del estado del ecosistema marino costero (Maggi, 1973; Maggi et al, 1977; Pergent-Martini, 1998).

En la actualidad, las praderas de *Posidonia oceanica* del Mediterráneo están en regresión. A partir de los datos aportados por Molinier y Picard (1952), se ha supuesto que pudiera encontrarse en regresión natural por motivos de carácter climático, ya que su óptimo desarrollo se produciría a temperaturas más altas que las que se dan en la parte Noroccidental del Mediterráneo (Peres y Picard, 1975; Peres, 1984; Anonyme, 1920). Por otro lado, existen numerosos trabajos donde se pone de manifiesto la sensibilidad de la especie a las alteraciones de origen antrópico (Ardizzone y Miglinolo, 1982; Blanc y Jeudy de Grissac, 1989; Astier, 1984; Bourcier, 1980, 1982; Sanchez Lizaso et al, 1990; Badal, 2000), por lo

cual Sanchez Lizaso (1993) sugiere que la inadaptación de la especie a las condiciones actuales se debe a su incapacidad para soportar introducciones de materia y energía provocadas por las actividades humanas que inestabilizan el sistema litoral. Esta especie se comporta como un típico estratega de la k, que necesita ambientes muy estables para desarrollarse.

En efecto, la acción antrópica, como el elevado aporte al mar de materia orgánica y sustancias químicas, ha traído consigo el aumento de la turbidez del agua causada por la eutrofización. Este factor reduce la profundidad a la cual las comunidades fóticas pueden realizar la fotosíntesis, causando la regresión del límite inferior, más profundo, de la pradera. El aumento de la tasa de sedimentación del fondo marino, que supera en ocasiones la tasa de crecimiento de *Posidonia oceanica*, causa el enterramiento de los rizomas y provoca lesiones generales debido a la acumulación de contaminantes en los rizomas y aguas intersticiales (Peres y Picard, 1975).

Siendo la comunidad más abundante y extensa de la zona infralitoral, las praderas de *Posidonia* son las que padecen en mayor medida el efecto de la contaminación (Augier, 1986). Como especie endémica y por su función ecológica dentro del sistema marino, es de gran interés el estudio y control de este proceso de regresión, siendo uno de los objetivos fundamentales del presente proyecto de Tesis.

2.4.2- El género Cymodocea

Las plantas del género *Cymodocea* tienen crecimiento vertical durante los tres primeros años hasta que de forma brusca cambia a horizontal. Este crecimiento suele ser irregular pero, esencialmente, se desarrolla a través de un rizoma monopódico con hojas dicotómicas. Las raíces crecen de los nudos del rizoma (uno a dos por nudo) hacia la parte baja del tallo. La planta tiene ramas erectas normalmente restringidas a los nudos separados por largos entrenudos. Es decir, éstas no son frecuentes o están ausentes en nudos con entrenudos cortos. La proliferación de los rizomas se hace habitualmente por extensión de unos brotes laterales.

Las hojas son más cortas que en *Posidonia*, con un limbo de hasta 30 cm de longitud cuyo ancho sirve como carácter de determinación específico. Cada hoja presenta una corta vaina abierta y envolvente y una lígula inconspicua. El mesófilo incluye una sola capa de células formando un suelo y un techo de los canales aeríferos cuyo número de estos canales

está determinado por la anchura de la hoja. Presentan células con taninos en toda la planta pero principalmente en el limbo de la hoja.

Este género tiene cuatro especies ampliamente distribuidas: *C. rotundata* y *C. serrulata* en el Indo - Pacífico; *C. nodosa* en el Mediterráneo y llega hasta las costas de Mauritania (oeste de Africa) y *C. angustata* en el oeste de Australia. La especie estudiada, *C. nodosa* (Ucria) Ascherson, tiene una distribución similar a la de la *P. oceanica*. (Figura 9)



Figura 9 : Distribución geográfica del género *Cymodocea* (Hartog, 1970)

2.4.2.1 - Morfología y anatomía de *Cymodocea nodosa*

La especie a estudiar (Figuras 10 y 11) se caracteriza por presentar un rizoma robusto, herbáceo, monopódico y ramificado, cubierto de hojas escuamiformes y con una sola raíz muy ramificada. En la zona parenquimatosa de la raíz, las células están situadas en forma radial, formando círculos concéntricos. Estas células dejan entre ellas unas lagunas igualmente colocadas en forma radial, como se aprecia en la figura 12 (Duchartre, 1872; Sauvageau, 1891a). Los tallos son cortos y erectos y se originan en cada nudo. Las hojas se disponen en dos filas, apareciendo de entre dos y cinco hojas en cada nudo. El limbo es acintado, de 10-30 cm de longitud y 2-4 mm de ancho, recorrido por siete ó nueve nervios y entre cada par de nervios de dos a tres venas perpendiculares (marcados en naranja en la Figura 13).



Figura 10 Fotografía submarina de *Cymodocea nodosa*
(http://dragonja.nib.si/DebeliRtic/DrtSlike_4s.html)

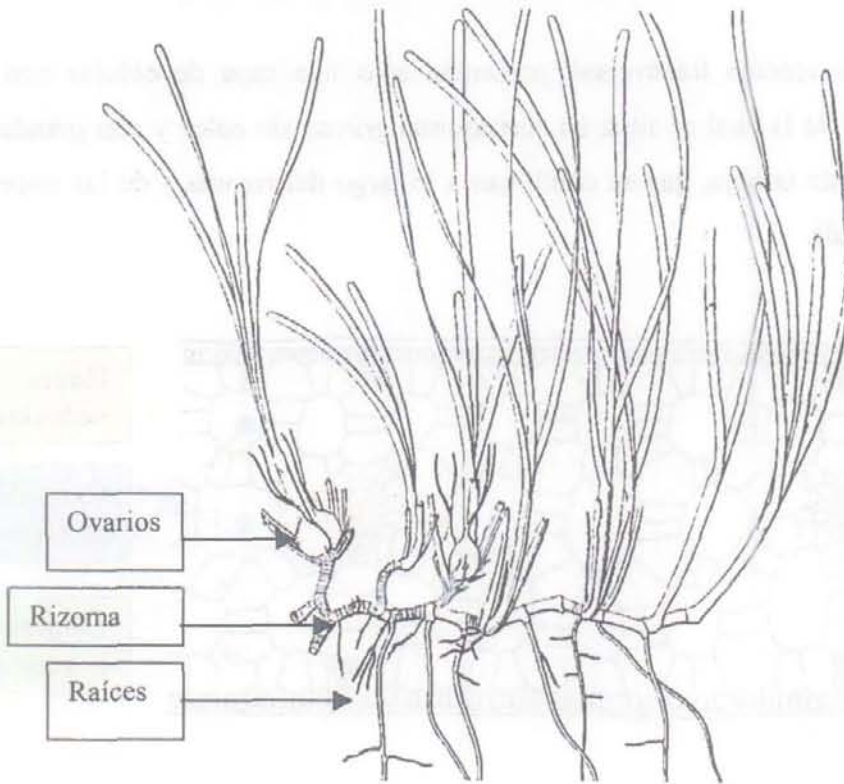


Figura 11 - Dibujo de las características de una planta femenina en flor (según Hartog, 1970).

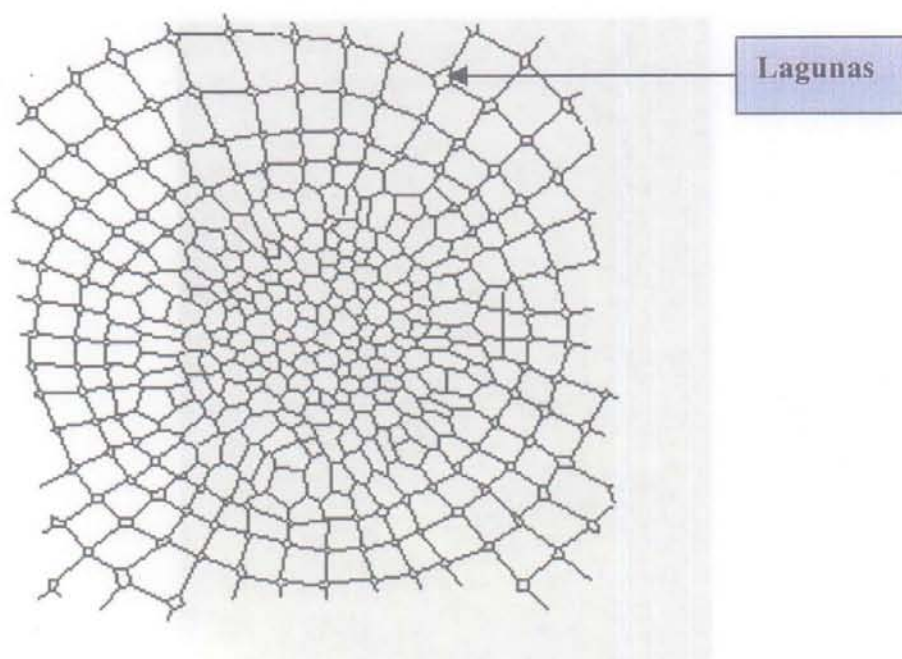


Figura 12: Corte transversal de la raíz de *Cymodocea nodosa*, Sauvageau, 1891a

Las hojas, en sección transversal, presentan sólo una capa de células con clorofila (epidermis), debajo de la cual se sitúa un aerénquima grueso sin color y con grandes canales aeríferos a lo largo de la hoja, que se continúan a lo largo del rizoma y de las raíces (Figura 13, marcados en azul).

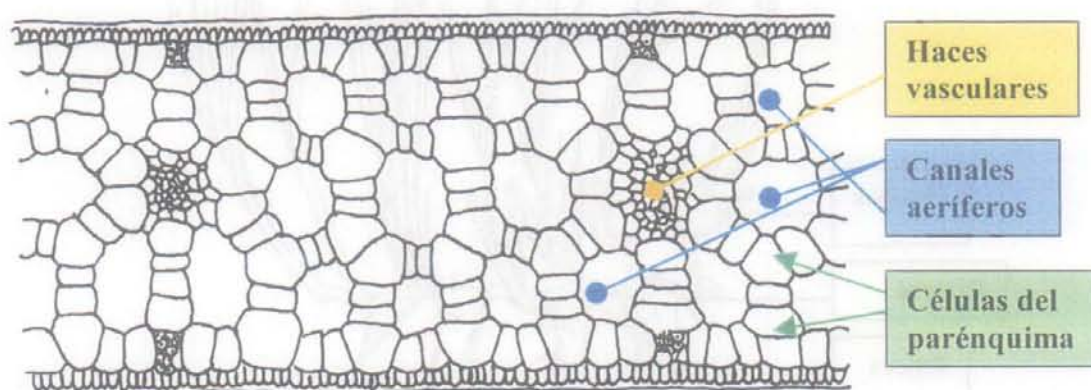


Figura 13: Sección transversal de la hoja de *C. nodosa* (según Sauvageau, 1891b)

Las flores unisexuales y dioicas, se presentan de forma solitaria, las masculinas sobre un pedicelo de 7-10 cm y las femeninas sésiles. Las flores masculinas están formadas por dos estambres sésiles que producen un polen filamentososo y las femeninas con un ovario formado por dos carpelos soldados que porta un estigma bifido. Los frutos son de tipo núcula, semicircular, lateralmente comprimido, de 8 mm de longitud, 6 mm de ancho y 1.5 mm de grueso (Hartog, 1970). Semillas sin endospermo.

La floración se produce entre mayo y agosto. Los frutos se recogen en agosto aunque a veces se han podido observar en los meses de otoño.

2.4.2.2 - Ecología.

Cymodocea nodosa es una especie típicamente pionera que habita en el Mediterráneo (Dawes, 1986).

Es capaz de formar poblaciones cerradas sin la presencia de otras especies pero no puede competir con *P. oceanica*, por lo que se establece en lugares donde no puede hacerlo esta última. Esto se refleja en que *Cymodocea nodosa* precede a menudo a *P. oceanica* en la sucesión evolutiva.

C. nodosa puede asentarse en depresiones arenosas del sublitoral donde la arena está enriquecida con algo de materia orgánica, estabilizando el fondo; en esta situación, plantas aisladas de *Posidonia oceanica* pueden comenzar a colonizar el sustrato, desplazando a *Cymodocea* en unos pocos años. En fondos rocosos presenta asimismo un papel pionero; *C. nodosa* aparece cuando la capa de sedimentos acumulados entre las algas que ocupan esos fondos se vuelve demasiado gruesa para que el alga se regenere. Esto, no sólo protege de la erosión al material depositado sino que, además, se encarga de capturar más sedimentos. En esta situación, el crecimiento de *Cymodocea* juega un papel temporal, pues pronto es sucedida por *Posidonia* cuando los sedimentos acumulados alcancen el espesor adecuado.

Cuando ocurre algún cambio en el ecosistema o debido a la erosión, se produce un retroceso de *Posidonia*. Antes o después, los huecos que ésta deja son ocupados por *Cymodocea* hasta que a su debido tiempo, esta última sea desplazada otra vez por *Posidonia*.

En lugares donde las hojas de *Posidonia* alcanzan la superficie del agua se forman una especie de lagos entre la pradera y la costa. En estos lagos, la circulación del agua está obstaculizada y esto da como resultado fluctuaciones considerables de temperatura, salinidad

y contenido en oxígeno. La pradera de *Posidonia* funciona como una trampa para el material en suspensión, ya que sólo las partículas muy finas alcanzan estos lagos y son depositadas como una delgada capa de fango en el sustrato arenoso. Este fango, removido por tormentas u otros mecanismos, enturbia el agua y queda en suspensión. En tales lagos, *Cymodocea nodosa*, más eurícora que *Posidonia*, puede desarrollar comunidades estables sola o en compañía de Clorofíceas como especies del género *Caulerpa*.

Las plantas de *Cymodocea*, cuando crecen en un sustrato rico en materia orgánica, desarrollan un fuerte sistema de raíces y rizomas y pequeñas hojas. Sin embargo, en lugares donde el sustrato es pobre, el sistema de raíces y rizomas está menos desarrollado, mientras que las hojas pueden llegar a medir 1.50 m de longitud. El gran desarrollo de las hojas sería para compensar la asimilación del carbono que, en otro caso, se haría por las raíces (Hartog, 1970).

Capítulo 3

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Introducción: Por qué se ha utilizado la acústica

La exploración de los fondos marinos por sensores remotos es una difícil tarea, que se refleja en que sólo se conoce un 18% de ellos, cubriendo los océanos el 71% de la superficie del planeta. La causa es la opacidad de la capa de agua, que forma un medio hermético e impenetrable para un gran número de sensores remotos (incluido el ojo humano). Esta dificultad, unida a la limitación del tiempo de permanencia del hombre bajo el agua, el límite operativo originado por la presión hidrostática, las variaciones de la temperatura del agua y otros muchos factores, actúa como fuerte impedimento en el estudio directo subacuático (Clarke et al, 1988; Wentzel y Ziese, 1988; Gill et al, 1992; Seibold y Berger, 1993; Frisk, 1994).

Para paliar todas estas dificultades, se han desarrollado una serie de metodologías basadas en el sonido fundamentalmente ya que se trasmite con facilidad a través del agua y recoge datos en el medio marino. Utilizando dichas técnicas, se pueden emprender exploraciones sistemáticas que facilitan la investigación de los fondos y la obtención de datos, a la vez que se puede conseguir su imagen precisa, permitiendo la elaboración de cartografías o representaciones comprensivas del mismo (Gloux, 1984; Fish y Carr, 1990; Nasu y Honjo, 1993; Magorrian et al, 1995; Foster-Smith et al, 1997).

3.2. Adquisición de datos por sonido

El sonido se produce por una oscilación mecánica que se trasmite en el agua, produciendo compresiones y expansiones periódicas. Estas variaciones de presión se propagan en forma de onda, cuyo frente está constituido por todas las partículas del agua que en un mismo instante de tiempo se mueven con igual velocidad y tienen la misma presión. Características importantes de la onda que se propaga son la energía que transporta de un lugar a otro y la intensidad con la que fluye por unidad de tiempo. La intensidad instantánea es el producto de la presión por la velocidad de vibración de las partículas. Las medidas acústicas se hacen frecuentemente en decibelios (dB), que es una medida logarítmica de la relación de dos intensidades o de dos presiones. Así, se define el nivel sonoro como (Kinsler y Frey, 1982):

$$NS_{dB} = 10 \log_{10}(I/I_0) = 20 \log_{10}(p/p_0)$$

donde p_0 es la presión de referencia de 1 micropascal.

Generalmente, los sistemas de detección acústica submarina están basados en la emisión de energía acústica a través del agua y la recepción de la energía reflejada por el fondo o subfondo marino o cualquier objeto que se encuentre inmerso en el agua en forma de eco.

Desde el momento que la energía acústica abandona el transductor, se encuentra a merced de las propiedades del agua y del medio marino, por lo que la interacción de los pulsos acústicos y dicho medio no siempre se realiza de la misma forma. En este sentido, las condiciones acústicas en un lugar concreto pueden provocar limitaciones en las expectativas o en los resultados esperados.

3.2.1. Propagación del sonido: Parámetros que afectan

Los factores de la acústica submarina que pueden afectar al normal funcionamiento de los equipos se clasifican en varias categorías, entre las que destacan las interacciones con el propio medio, incluyendo la velocidad de propagación, refracción, propagación esférica (o divergencia), absorción y reverberación. Así mismo influyen los factores que afectan al retorno del sonido (cuando la energía transmitida vuelve a llegar a los equipos en forma de eco), como son la reflexión y la reverberación del fondo. A estos dos factores hay que unirle un tercero, constituido por ruidos e interferencias de diversa procedencia (motores del barco, cetáceos, etc.)

3.2.1.1 - Interacciones con el propio medio

3.2.1.1.1 - Velocidad del sonido

Los métodos acústicos miden el tiempo invertido desde que el pulso es emitido hasta un punto dado y su retorno. Cuando se relaciona el tiempo con la distancia, se debe conocer la velocidad de propagación del sonido en este medio. La velocidad de 1500 metros por segundo

está ampliamente aceptada para el agua del mar, aunque representa una aproximación del valor real en la mayoría de las circunstancias.

Los parámetros que influyen en la velocidad de propagación del sonido en el agua del mar son: la temperatura, la salinidad y la presión hidrostática, principalmente, aunque en la práctica sea la temperatura el factor más importante (Urlick, 1975). La presión influye poco, especialmente cuando los trayectos de propagación son cortos o se producen sin gran variación de la profundidad. La salinidad, por lo general, es poco variable y por lo tanto su repercusión es pequeña, a excepción de algunas áreas concretas cercanas a la desembocadura de ríos, surgencias de aguas subterráneas o mezola de aguas glaciares.

En profundidad, la temperatura de las masas marinas varían poco, pero cerca de la superficie o en aguas someras, el perfil de la temperatura alcanza variaciones importantes debido a la insolación diurna. Estas variaciones se reflejan en el perfil de la velocidad de propagación del sonido en el agua, que puede ser medido por varios métodos, de forma que pueden obtenerse directamente.

Es importante recordar que en la mayoría de los casos, las capas de la misma velocidad del sonido se mantienen horizontales y se extienden lateralmente a grandes distancias.

3.2.1.1.2 - Refracción

Cuando una onda sónica atraviesa dos regiones con diferente velocidad, varía su dirección o se refracta, proceso que viene gobernado por la Ley de Snell. Esta refracción produce la variación de la dirección de los rayos emitidos, por lo tanto hacen variar la distancia recorrida, que se traduce en una dislocación de los objetos o reflectores. Esta interferencia es debida a variaciones de los valores de la temperatura (termoclinas) y/o salinidad (halinoclinas) en la columna de agua, apareciendo grandes distorsiones en los datos.

3.2.1.1.3 - Propagación esférica (divergencia ó dispersión)

Los pulsos acústicos emitidos en forma de paquete de ondas se difunden en todas las direcciones. Por tanto, el pulso acústico, al propagarse irá, ocupando un volumen cada vez mayor. Este proceso se conoce como propagación esférica o divergencia y provoca la pérdida

o atenuación de la intensidad emitida según nos alejamos del punto de emisión (De Lustrac y Carbó, 1968).

La intensidad en el medio acuático va disminuyendo en una relación inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (Urlick, 1975), esto es, cuanto más lejos esté un objeto detectado, más débil será el sonido que le llegue y que es devuelto al sistema acústico. La intensidad de la onda sonora a la distancia r_2 del transductor es igual a la intensidad de la onda a la distancia r_1 multiplicada por la relación de distancia (r_2/r_1) al cuadrado.

$$I_2 = I_1 (r_2^2/r_1^2)$$

Expresado esto mismo en escala logarítmica (decibelios) sería: el nivel sonoro NS_2 a la distancia r_2 es igual al nivel sonoro NS_1 a la distancia r_1 menos las pérdidas por transmisión.

$$NS_2 = NS_1 - TL \quad \text{con } TL = 20 \log_{10}(r_2/r_1)$$

Es importante tener en cuenta que la divergencia va a afectar de igual forma a todas las frecuencias.

3.2.1.1.4 - Absorción

Los pulsos acústicos viajan a través del medio marino, perdiendo parte de la energía que es absorbida por el medio. La absorción es debida a efectos de fricción y relajación molecular, por lo que está relacionada con la frecuencia. La presencia de numerosos constituyentes (sales, etc.) en el agua salada, hace que la absorción sea siempre mayor en ésta que en el agua dulce. El coeficiente de absorción α que crece rápidamente con la frecuencia se expresa usualmente en decibelios por metro (MacLenan y Simmonds, 1992).

Existe un coeficiente de absorción para cada medio, que variará en función de la temperatura y salinidad para cada uno de los espectros de frecuencia utilizada. Es importante tener en cuenta que la absorción afecta a la energía del pulso en el viaje de ida y en el de vuelta, por lo que a su llegada la energía siempre será menor.

La intensidad a la distancia r_2 del transductor es igual a la intensidad a la distancia r_1 multiplicada por las pérdidas por absorción

$$I_2 = I_1 e^{-2\alpha(r_2 - r_1)}$$

Expresándolo en escala logarítmica (decibelios) sería: el nivel sonoro NS_2 a la distancia r_2 es igual al nivel sonoro NS_1 a la distancia r_1 menos las pérdidas por absorción

$$NS_2 = NS_1 - AL, \quad \text{donde} \quad AL = 2\alpha(r_2 - r_1)$$

Hay que tener en cuenta que, al afectar la dispersión (o propagación esférica) de igual forma en todas las frecuencias, la absorción será el factor dominante en las distancias más cortas y en las frecuencias bajas.

3.2.1.1.5 - Reverberación

El mar contiene inhomogeneidades de muchos tipos y tamaños (partículas, peces o montañas submarinas), y todas ellas, constituyen discontinuidades en las propiedades físicas del medio. Cuando estas inhomogeneidades interceptan el sonido que se propaga en el mar, irradian una porción de la energía acústica incidente sobre ellos. Esta irradianción del sonido se llama difusión (en inglés scattering) y la suma total de las contribuciones de todos los difusores se llama reverberación.

La reverberación en el mar es básicamente de tres tipos (Medwin y Clay, 1998): una producida por los objetos que se encuentran flotando en la columna de agua que constituye la llamada reverberación de volumen, otra producida por la ondulada superficie del mar y por las burbujas próximas a la superficie, llamada reverberación de superficie, y una tercera producida por la superficie rugosa y difusores próximos al fondo, llamada reverberación de fondo.

La reverberación, que da lugar a una persistencia de energía acústica decreciente a partir de la extinción del impulso emitido, tiene el mismo contenido de frecuencias que la señal emitida y, por tanto, no se puede eliminar como el ruido usando filtros. Tan solo se podría reducir fuertemente su efecto usando emisores acústicos muy directivos.

3.2.1.2.- Factores que afectan al retorno del sonido

Los pulsos emitidos retornan a los receptores siguiendo dos mecanismos primarios, la reflexión y la reverberación. La reflexión está referida a los ecos directos reflejados. La

reverberación consiste en un proceso que resulta de la interacción de la energía sónica con la textura de los objetos o el material del fondo.

3.2.1.2.1 - Reflexión

Cuando el pulso acústico emitido alcanza un obstáculo en el medio (la superficie del agua, una roca, un banco de peces, etc.), parte del sonido es reflejado como un eco. Aparte de los factores, tales como la absorción y dispersión, anteriormente comentados, este eco se verá afectado por otros parámetros, como son la orientación del objeto o el tipo de material. La orientación respecto a la energía incidente sirve para determinar si la energía reflejada va hacia el sensor o se aleja de él. La ley de Snell o ley de la reflexión dice que la dirección en la que se propaga la onda acústica reflejada forma, con la normal a la superficie de reflexión un ángulo igual al de la onda incidente con dicha normal. Si la superficie reflectora está mirando hacia el dispositivo de adquisición de datos, el transductor recibirá un fuerte eco (ángulo de incidencia 0° , ángulo de reflexión 0° , el eco regresa por el mismo camino que llegó el impulso incidente sobre la superficie de reflexión). De igual forma, una superficie lisa que presenta una reflexión especular, si el ángulo de incidencia es grande, refleja gran parte de la energía en dirección contraria a la de incidencia, lejos del sistema acústico receptor.

Otro de los factores que determinan la cantidad de energía que puede ser reflejada es el tipo del material sobre el que incide el pulso. Las cantidades relativas de energía devuelta están determinadas por las características acústicas del material (coeficiente de reflexión). Este coeficiente depende de la impedancia acústica (equivalente a la idea de dureza) que es el producto de la densidad del material por la velocidad con que se propaga el sonido en ese material.

3.2.1.2.2 - Reverberación del fondo (o dispersión)

No todo el sonido que llega a los sensores procede de los ecos directos, ya que el fondo del mar posee heterogeneidad e irregularidades y no se comporta como un espejo ideal. Si lo hiciera, no se podrían captar gran parte de los pulsos (salvo en incidencia normal a la superficie del fondo).

El fondo es muy heterogéneo debido a la gran diferencia de textura que presentan sus componentes (arenas, arcillas, fango, grava, plantas, algas, etc.). La rugosidad, por tanto, actúa como un difusor del sonido, haciendo que este se disperse en todas direcciones. Esta dispersión se conoce también con el término de reverberación del fondo y su intensidad será función de la rugosidad del mismo y del ángulo de incidencia del pulso acústico (Urick, 1967).

La rugosidad sólo puede ser definida de acuerdo a la frecuencia del impulso incidente. La escala de rugosidad del fondo (grava, arena, limo, arcilla) se traduce en una escala de respuesta ligada a la intensidad. El contraste entre dos tipos de fondo hace que puedan parecer diferentes, dependiendo de la frecuencia de trabajo.

La dispersión del fondo o reverberación decrece siempre con la distancia. Esto implica que para ciertas distancias, el nivel de reverberación estará por debajo del nivel de los ruidos de fondo, por lo que no se registrarán retornos reales del mismo. La mayor distancia desde la cual se pueden recibir los ecos de retorno se llama límite de dispersión de retorno o límite de reverberación.

3.2.1.3.- Interferencias y ruidos

Durante la operación de los equipos de detección acústica submarina, se puede observar que las señales recibidas no equivalen a aquellas que han sido transmitidas al medio marino.

El ruido es una energía que se detecta pero que no es el resultado de la energía del pulso que se emitió. Las interacciones que afectan a la señal emitida y a la de recepción pueden provocar efectos no deseados, que se reflejan en las imágenes. Estos fenómenos pueden enmascarar o distorsionar los datos adquiridos.

Los ruidos e interferencias pueden ser clasificados en dos categorías en función del momento en que aparecen: acústicos y eléctricos.

Los ruidos acústicos son aquellos que se introducen en los sistemas desde el medio marino a través de los sensores acústicos y no son el resultado de la recepción del impulso acústico emitido. Las causas son muy variadas: animales marinos, interferencias de otros sistemas acústicos, hélices, maquinaria, etc.

Los ruidos eléctricos se introducen en el sistema después de que los sensores acústicos hayan adquirido los datos. Las causas son interferencias de señales externas, problemas con las fuentes energéticas, averías en las conexiones y en los cables, averías en los componentes electrónicos, etc.

Finalmente, se obtendrán registros con información válida contaminada por ruidos. Para rentabilizar la relación señal-ruido, potenciando la primera respecto a la segunda, se utilizaran una serie de filtros electrónicos.

Todos los factores mencionados previamente van a afectar principalmente a las imágenes obtenidas por el sonar de barrido lateral.

3.3.-Sensores acústicos utilizados

3.3.1. Sonar. Características

El sonar es un sistema activo, caracterizado por emitir y recibir ecos de los impulsos que emite (ver Figura 14). Esto es, el propio sistema es la fuente generadora de energía que es emitida al medio y recogida posteriormente por él mismo.

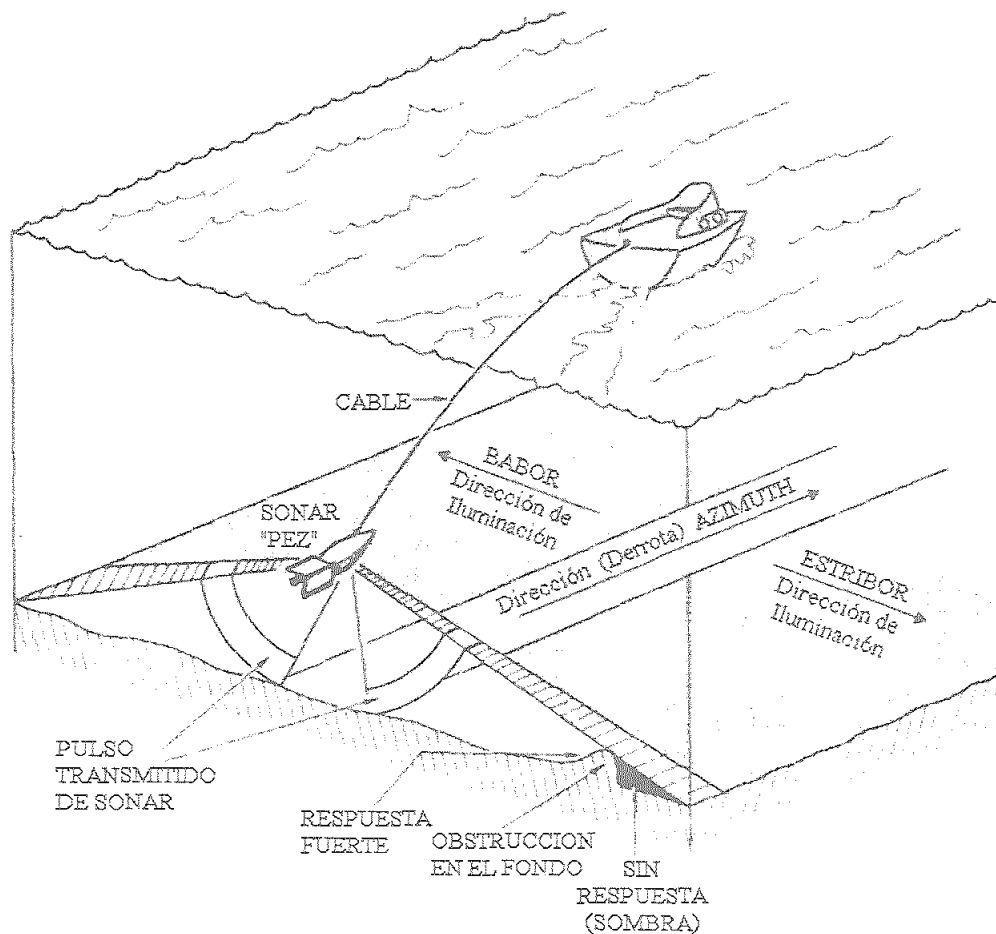


Figura 14 : Sonar de barrido lateral siendo arrastrado por un barco

El sistema se basa en un transductor que convierte la energía eléctrica en acústica. Generalmente, los transductores son cristales piezoeléctricos de material cerámico que tienen la propiedad física de cambiar de forma cuando se les aplica una corriente eléctrica. Si la

corriente que se le aplica oscila, el transductor entra en vibración mecánica. Esta vibración se transfiere en el agua como una oscilación de presión, o pulso sónico.

Estos pulsos viajan a través del medio hasta que llegan a un obstáculo. Parte de la energía de estos pulsos es reflejada como ecos de reflexión que llegan de nuevo al transductor.

El mismo transductor que produce el pulso de emisión es utilizado para captar los ecos que llegan. El material del transductor es activado por la variación de presión del sonido y convierte la vibración en energía eléctrica. Esta energía es amplificada por la sección de recepción.

Los sonares realmente no miden distancia o profundidad, sino que miden el tiempo que invierte la señal desde que es transmitida hasta que es devuelta en forma de eco. La imagen se obtiene juntando las sucesivas señales, de forma que el resultado final es una composición hecha uniendo las diferentes líneas de barrido (Figura 15) (Mazel, 1985).

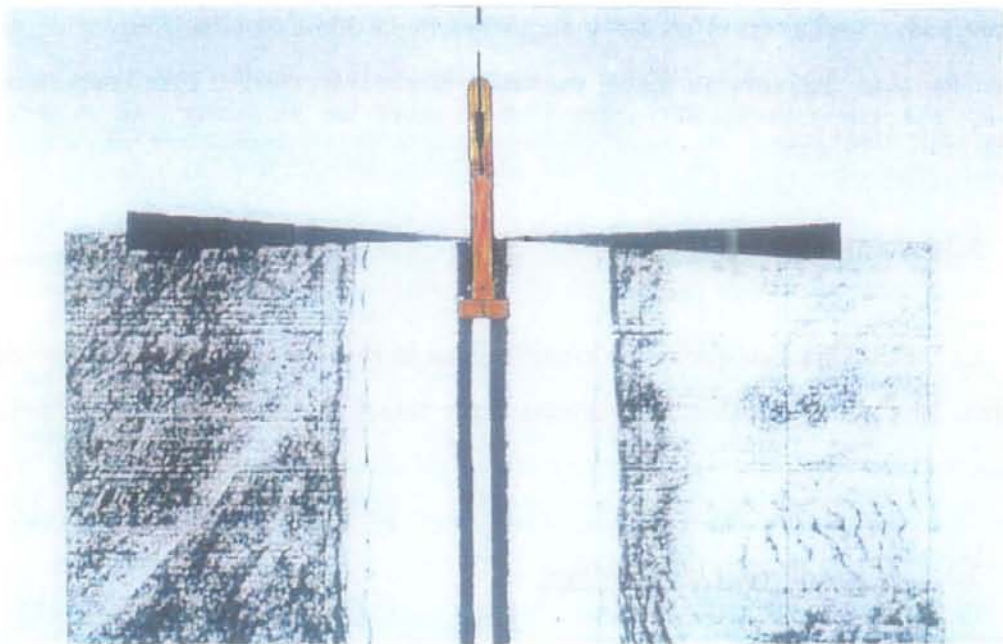


Figura 15: Generación de una sonografía

El Sonar de Barrido Lateral se ha utilizado como herramienta básica en este estudio por las siguientes características (Klein, 1971):

- a) Presenta una búsqueda lateral en dos canales, dirigidos cada uno a un costado del barco, duplicando la cobertura efectiva.
- b) Utiliza un pulso extremadamente estrecho en el plano vertical para conseguir una mejor resolución.
- c) Al ser arrastrado el sensor por el barco se aísla del movimiento de éste, obteniéndose un haz horizontal estrecho que implica un buen control del plano.

A la hora de seleccionar el sonar de barrido lateral a utilizar en la toma de datos, se han tenido en cuenta los siguiente parámetros:

3.3.1.1- Longitud del pulso

Hay que buscar el equilibrio entre la resolución y el alcance para una longitud de pulso fija. Un pulso corto proporciona mayor resolución. Un pulso de larga duración proporcionará mas cantidad de señal en el medio y como resultado una capacidad mayor de alcance. Los sistemas comerciales ajustan estos valores que se sitúan en 0.1 milisegundos para una frecuencia de 100 kHz.

3.3.1.2 - Detectabilidad

La Detectabilidad, que no es lo mismo que la resolución, es la capacidad de poder ver un objeto en todo el registro. Está directamente relacionada con la relación señal/ruido del sonar.

3.3.1.3 - Resolución longitudinal

La resolución es la facultad de poder distinguir dos objetos próximos. Si los dos objetos están próximos en la distancia longitudinal, los ecos pueden solaparse sobre el registro. El poder de discriminación de dos puntos próximos sobre el fondo en la dirección de arrastre del pez, será la resolución longitudinal. Esta depende, principalmente, del ancho del haz del sonar en el plano horizontal. Si dos objetos están separados por una distancia que es menor que la apertura del rayo horizontal, sus ecos aparecerán como uno solo. Si por el contrario, la distancia de separación entre los dos objetos es mayor que la anchura del rayo

horizontal, sus ecos serán registrados como dos objetos separados. En distancias cortas la anchura del haz es menor y la resolución puede ser mejor. La resolución longitudinal dependerá también, por tanto, de la velocidad de arrastre del pez y del intervalo entre pulsos, siendo el ángulo horizontal del rayo el factor crítico (Flemming et al, 1982).

3.3.1.4. Resolución transversal

La separación mínima será la mitad del ancho físico del pulso. Esta separación puede variar en función de la frecuencia (por ejemplo, 0.75 cm trabajando con alta resolución, 500 kHz; 7.5 cm trabajando con baja resolución, 50 kHz). En este efecto también interviene el ángulo de incidencia del pulso sobre el fondo, calculándose la resolución como función del coseno de este ángulo.

3.3.1.5 Lóbulo de emisión (anchura del rayo de emisión)

El sonar lateral maneja un haz que es estrecho en el plano horizontal y amplio en el plano vertical. Generalmente, para los sonares convencionales es de un grado en el plano horizontal y de cuarenta grados en el plano vertical. En términos generales, hay que considerar además la forma del lóbulo del haz, que dependerá del diseño de construcción del transductor. Un transductor consiste en una fila de elementos cerámicos. Cada uno de estos elementos actúa como un punto de emisión, por lo tanto, cada punto enviará un pulso que se propagará en todas las direcciones. A cierta distancia del transductor, la presión provocada por cada uno de ellos puede coincidir en un punto, sumándose o restándose de acuerdo a la fase en que se encuentren. Si se extendiera este comportamiento a todos los puntos del transductor, el resultado sería un haz con una forma determinada que determinará el lóbulo de emisión. A lo largo del eje del haz, la presión se va reforzando, mientras que hacia los extremos, va decreciendo hasta anularse.

3.3.1.6 Frecuencias de operación

El último factor a tener en cuenta es la frecuencia. Existe un buen número de frecuencias de operación para los sonares laterales. La elección de la frecuencia determinará

la relación entre el alcance y la resolución. Las frecuencias altas operan con longitudes de pulsos cortos y haces estrechos con resultados óptimos de resolución. Por ello, los sonares que operan a altas frecuencias deben estar dotados de una gran estabilidad para el pez que es arrastrado. Los sistemas que trabajan a bajas frecuencias poseen un mayor alcance a costa de sacrificar la resolución (Etter, 1991).

Teniendo en cuenta todos los parámetros definidos anteriormente, se ha decidido utilizar un sonar que trabaja simultáneamente en dos frecuencias: 100 y 500 kHz. El sonar recoge la respuesta en forma analógica y es transformada a digital por el sistema de adquisición de imágenes en tiempo real (EOSCAN). El resultado final, sobre el que se va a trabajar, es una imagen de 1024 pixel de ancho, dividida en dos canales (correspondientes a estribor y babor del barco), y de un largo indeterminado (depende de la duración del trayecto o del tamaño del fichero generado), igual para cada frecuencia, ya que se han tomado simultáneamente. Esta imagen se denomina sonografía.

Como se comentó anteriormente, la sonografía está formada por la unión de las sucesivas líneas de barrido que recoge, las respuestas acústicas del fondo. Estas imágenes se visualizan como dos bandas en continuo separadas por una línea blanca que corresponde al trayecto seguido por el sonar. Cada una de las bandas corresponde al área barrida a ambos costados del buque por cada canal, como respuesta a la recepción de los ecos laterales. La línea blanca que aparece en el centro del registro corresponde a la columna de agua pero no significa que el sonar no capte el fondo directamente por debajo del pez.

3.3.2. Ecosonda. Características

De forma paralela, se ha utilizado en la toma de datos un ecosondador RoxAnn con objeto de comparar resultados.

El ecosondador se utiliza básicamente en el cálculo de la profundidad (distancia desde el transductor al fondo) y se basa en la medida del tiempo que tarda un impulso acústico en recorrer la distancia desde el punto de emisión al fondo, donde se refleja y vuelve al punto de emisión (ver Figura 16). Entre la gran variedad de ecosondas existente, se ha utilizado un clasificador de fondos RoxAnn. Este sistema consiste en un equipo que utiliza el método del eco múltiple para obtener una clasificación de las características de los materiales que constituyen los fondos (Heald y Pace, 1996; Greenstreet et al, 1996) como se muestra en la Figura 16. A partir de

aproximaciones aritméticas y predicciones basadas en determinaciones experimentales, se ha observado que existe una relación entre la naturaleza del fondo y el primer y segundo eco del pulso emitido. Estos son los dos parámetros que el RoxAnn usa para realizar la clasificación, que corresponden a la rugosidad (E1) y a la dureza (E2).

El sistema RoxAnn va conectado a un ecosonda en paralelo, operando con el transductor de 200 kHz. Una conexión vía RS232 dirige los valores E1 y E2 a un sistema de adquisición de datos que tiene un programa apropiado para generar una serie de clasificaciones preestablecidas por el operador.

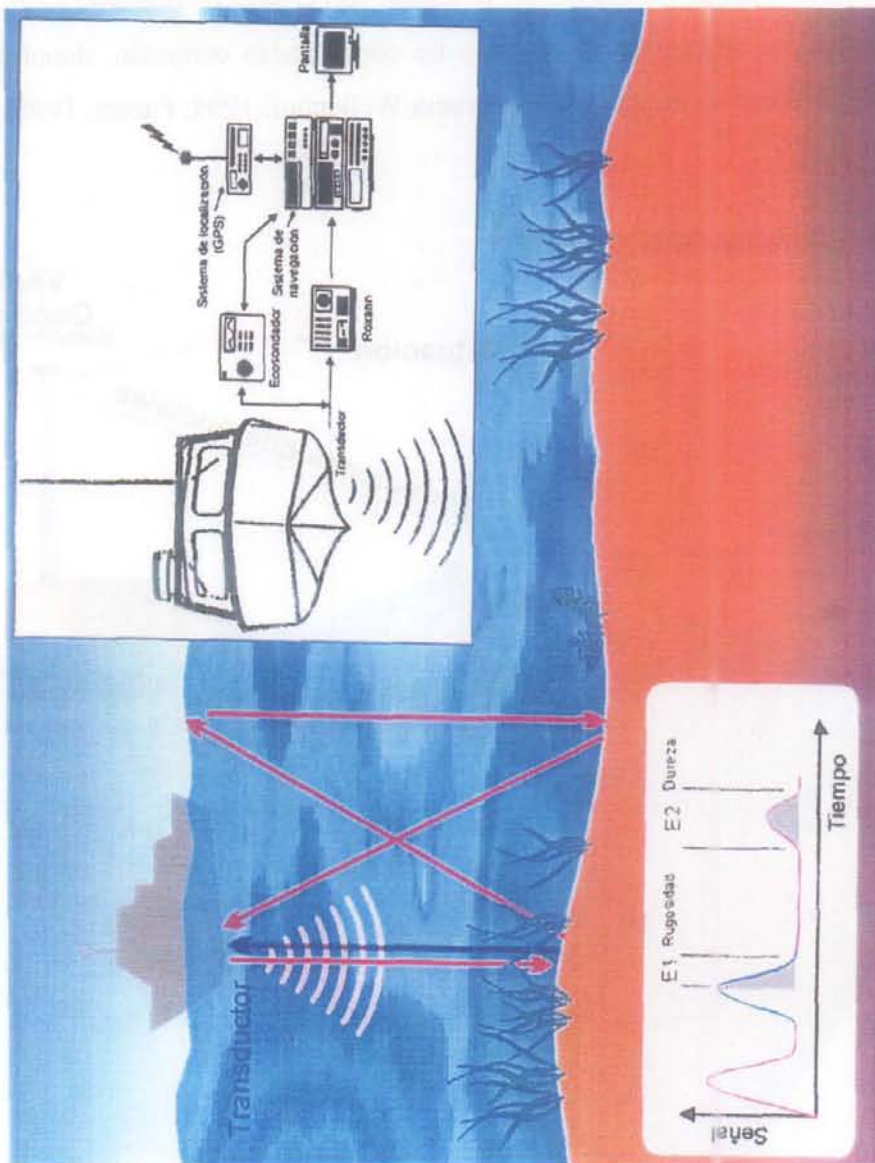


Figura 16: Funcionamiento de Ecosonda con clasificador de fondos RoxAnn integrados con los equipos de a bordo.

3.4.-Sistemas de localización y navegación

3.4.1- Sistema de localización (GPSD)

Para operar en el medio marino, un gran problema que se plantea es el conocimiento de la situación espacial del dato recogido respecto a un sistema de coordenadas con la máxima exactitud y precisión, ya que en mar abierto no existen puntos fijos de referencia. Hoy en día, esto se resuelve gracias a la utilización de los sistemas de posicionamiento global por satélite (GPS), que permiten obtener valores de alta precisión con errores menores de $\pm 1\text{m}$, utilizando la técnica diferencial con referencia a un punto de coordenadas conocido, denominado vértice geodésico (GPS Diferencial, Figura 17) (Hoffmann-Wellenhof, 1994; Parker, 1998).

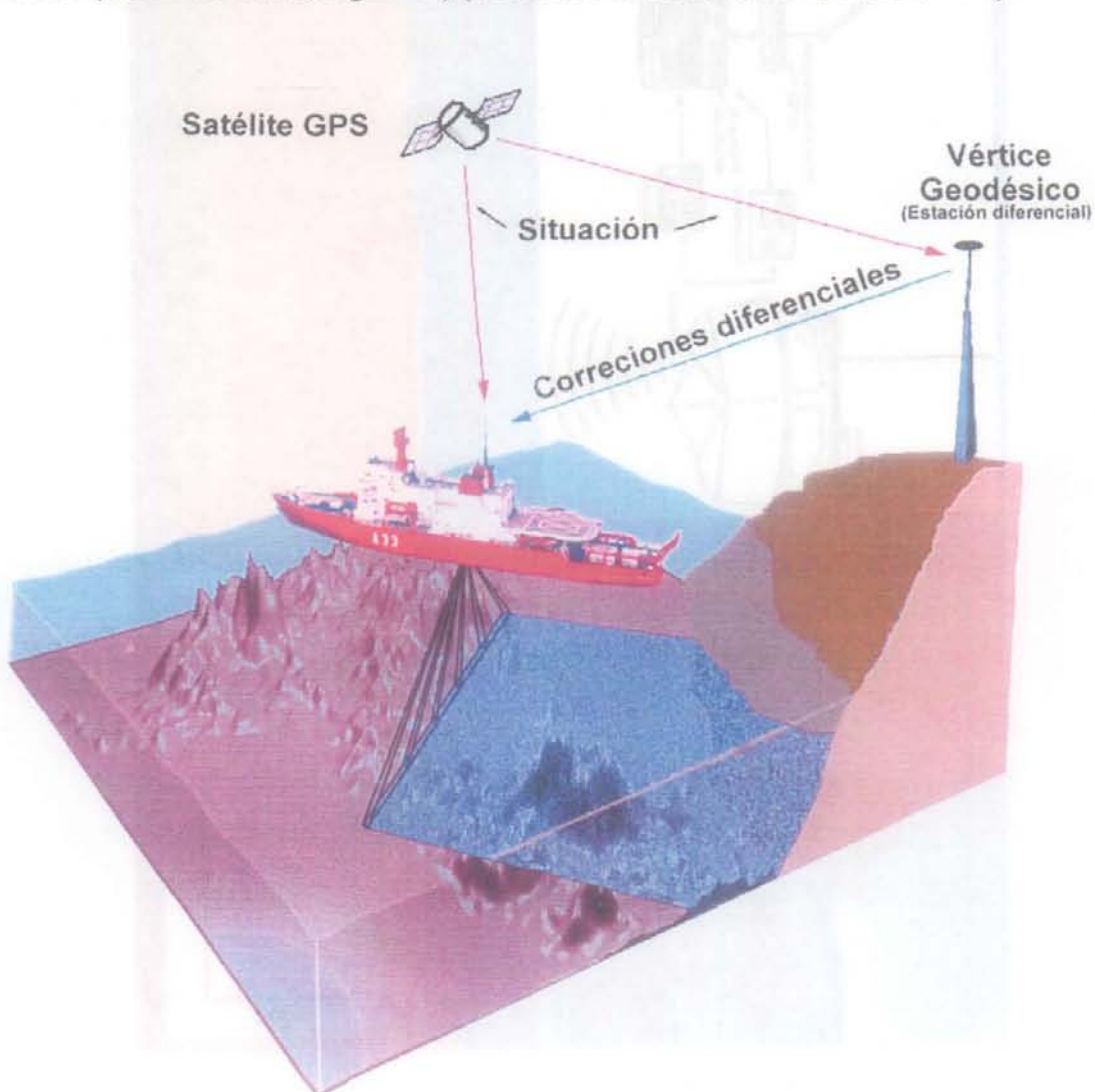


Figura 17: Funcionamiento de un DGPS con estación de referencia en tierra

3.4.2- Sistema de navegación integrado

Se conoce como sistema de navegación integrado a un sistema que permite el control total de la derrota (trayectoria completa que sigue el barco). En general, consta de un sistema de posicionamiento y un ordenador conectado a diversos equipos periféricos que grabarán o expresarán la situación y que darán, a su vez, diversas informaciones: rumbo a seguir, mareas, distancias, etc.

El equipo de posicionamiento utilizado ha sido un GPSD basado en datos de satélite. Los datos de cálculo procedentes de estos equipos son tratados en el ordenador con un programa específico denominado HYPACK, obteniéndose una situación expresada en coordenadas geográficas y en metros (UTM). Este proceso sirve para que la situación obtenida coincida con la que el barco tiene realmente.

El ordenador origina un pulso para controlar los aparatos de detección e imprime y graba los datos de situación y sonda.

Capítulo 4

ÁREA DE ESTUDIO. TOMA DE DATOS

4.1 - Áreas de estudio

Para el presente estudio, se han escogido dos localidades, próximas entre ellas, situadas en aguas del Mediterráneo (Figura 18). En estas áreas existen ecosistemas de fanerógamas marinas, habiéndose elegido uno bien conservado y otro degradado. El primero está localizado frente al Cabo de Palos (Figura 19), mientras que el segundo se sitúa frente al puerto de Mazarrón (Figura 20), ambos en la provincia de Murcia. Sus profundidades varían entre 15 y 30 m, como se puede apreciar en la cartografía detallada.

Las campañas para la toma de datos se realizaron durante los meses de noviembre de los años 1996 y 1997.

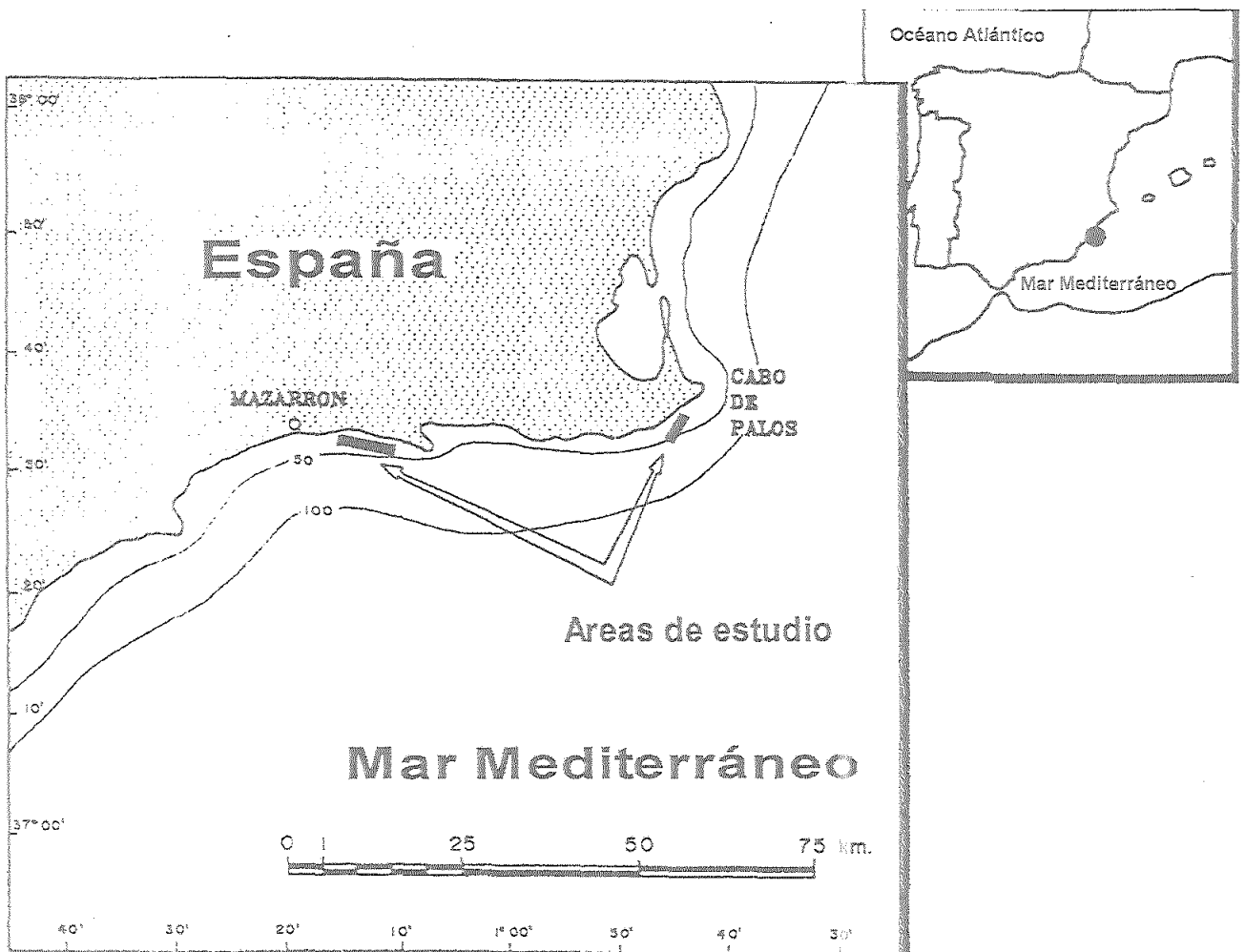


Figura 18: Localización geográfica de las áreas de estudio

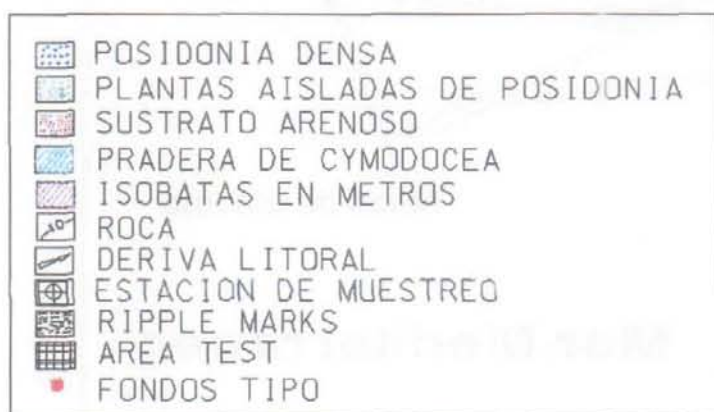
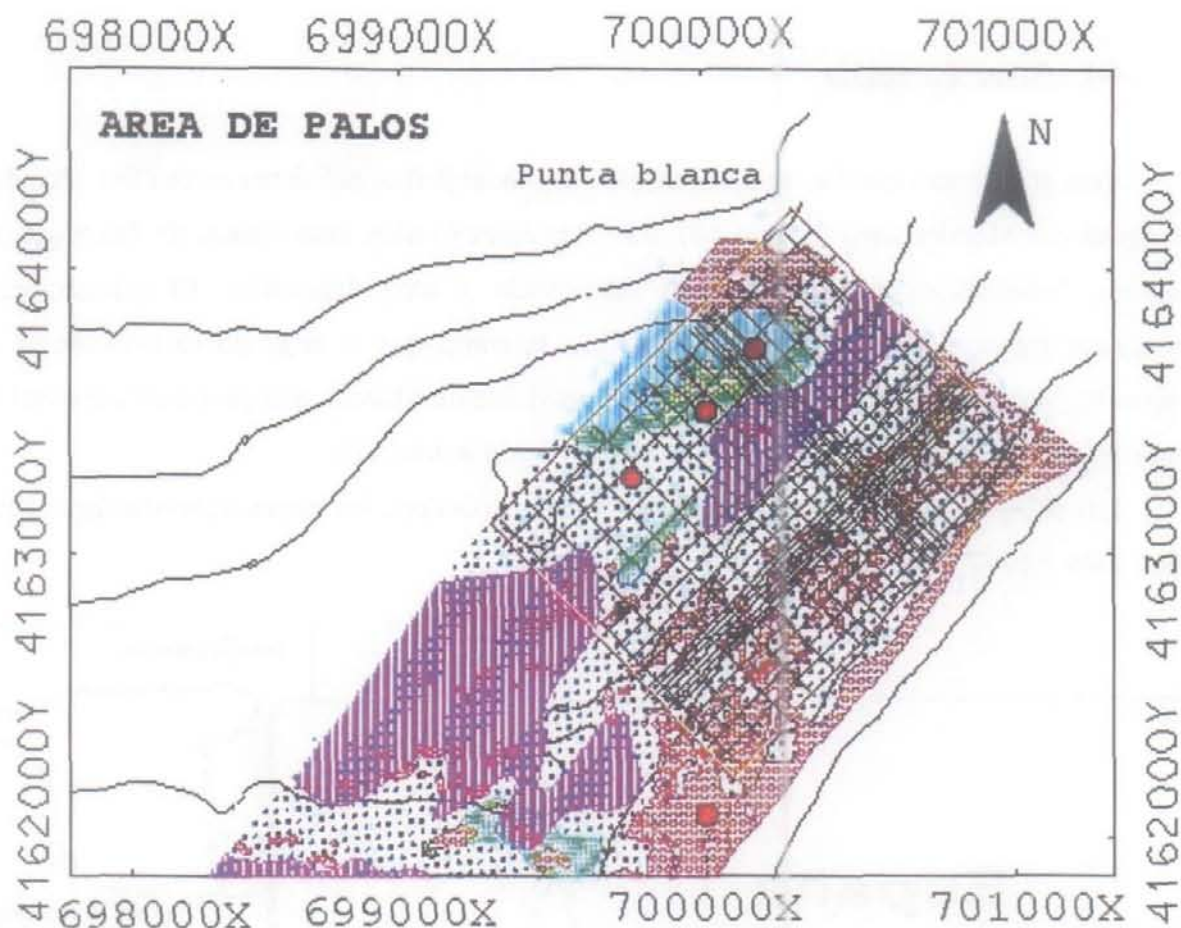


Figura 19: Area de estudio frente al Cabo de Palos. Cartografía del fondo.

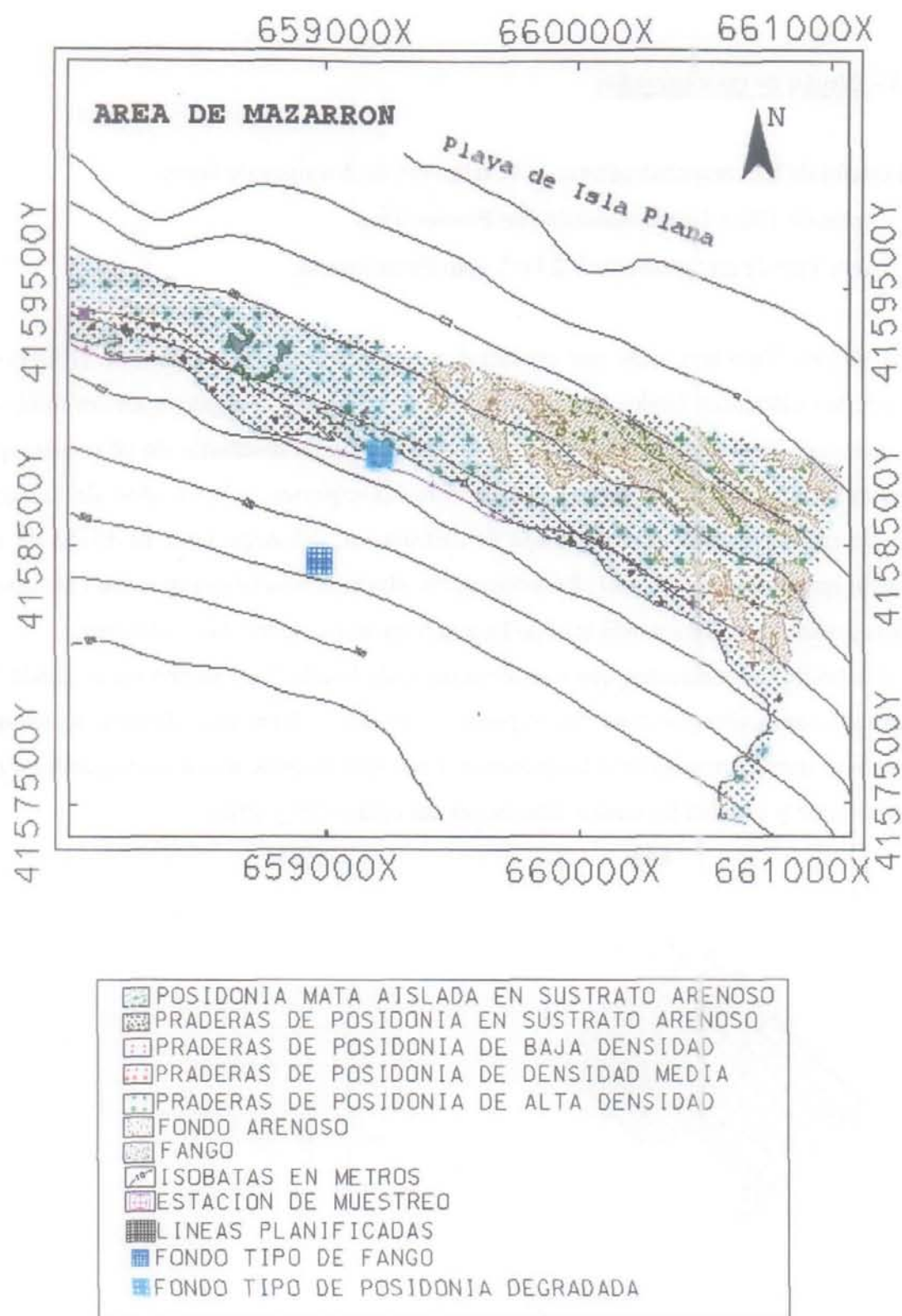


Figura 20: Area de estudio, donde se localizan los Fondos Tipo, frente al Puerto de Mazarrón. Cartografía del fondo.

4.2 - Diseño de las campañas

El diseño de las campañas se basa en la selección de dos tipos de áreas:

- Areas de 100 x 100m, denominadas Fondos Tipo
- Area Test de un tamaño de 1-2 km², aproximadamente.

Los Fondos Tipo son áreas que presentan una cobertura total y uniforme (100%) de cada uno de los diferentes fondos que se van a estudiar, ya sean de especies en sus distintos estadios, como de substratos al descubierto. Estas zonas fueron diseñadas de tal manera que sus datos sirvieran para caracterizar acústicamente las especies y los fondos de la zona, sirviendo de referencia para hacer el mapa de distribución del Area Test. El diseño de las líneas puede apreciarse en la Fig.21. La información obtenida se utilizó asimismo como base en estudios preliminares para verificar el poder discriminatorio de los datos acústicos.

El diseño de los transectos que conformaban cada Fondo Tipo estaba estructurado en una cuadrícula compuesta por cinco líneas paralelas separadas 20 m unas de otras y cortadas por otras cinco líneas ortogonales a las primeras. Cada una de estas líneas correspondía a las derrotas del barco y seguían las cuatro direcciones del compás(Fig. 21B).

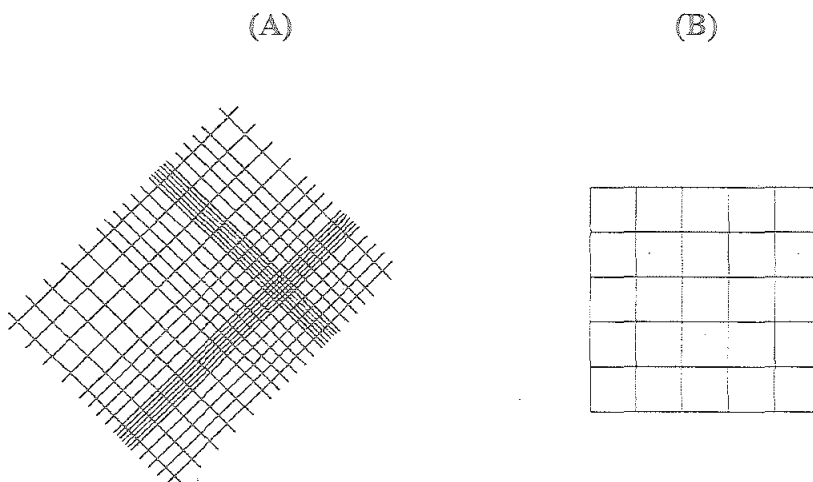


Figura 21: (A) Diseño de los transectos del Area Test; (B) Diseño de los trasectos de los Fondos Tipo.

Los Fondos Tipo se han seleccionado basándose en cartografías previas verificadas por observaciones *de visu*, obtenidas por buceo e imágenes ópticas. En cada una de estas áreas se situaron estaciones de muestreo que, serán analizadas posteriormente junto con las líneas planificadas de navegación.

A continuación se enumeran los Fondos Tipo descritos con su referenciación geográfica, así como el Area Test

4.2.1 - Area de Cabo de Palos (X30, Y30)

Posidonia densa (situado dentro del área test)

699919.5257X

4163338.1565Y

Posidonia en plantas aisladas (límite superior de la pradera, en área test)

699720.9759X

4162778.1987Y

Arena (límite inferior de las praderas de Posidonia, fuera del área test)

700167.2265X

4162959.216Y

Cymodocea (situado dentro del área test)

700108.1584X

4163575.8816Y

Area test

700372.5386X

4163238.0625Y

4.2.2 - Área de Mazarrón

Posidonia degradada

659211.9002X

4158926.3284Y

Fango

658990.3174X

4158500.2737Y

Es importante hacer notar que este proyecto de tesis formaba parte de uno más complejo donde otros grupos tomaban datos hidroacústicos con el ecosondador RoxAnn. Así como el diseño de los Fondos Tipo se hizo específicamente para el estudio con imágenes sonar, el de las Areas Test correspondió a las necesidades del RoxAnn. De ahí que los Fondos Tipo tengan un diseño uniforme, teniendo en cuenta las direcciones en las que circula el sensor, y las Areas Test presenten un diseño canónico para favorecer comparaciones a diferentes escalas de los datos del ecosondador. Los resultados de ambos conjuntos de datos serán comparados en el capítulo correspondiente.

El propósito de las Areas Test es la toma de datos de un lugar representativo del ecosistema real, con fondos mezclados, que servirá para verificar la metodología puesta a punto en la caracterización acústica y procesado de imágenes que se han aplicado en el estudio de los Fondos Tipo. El objetivo final es obtener el mapa de distribución de especies en el Area Test, basándose en la información obtenida a partir del tratamiento de las sonografías.

La delimitación geográfica de dicha área se localiza cerca del Cabo de Palos, por considerar esa zona representativa de áreas con praderas bien desarrolladas (Fig. 18).

Como se comentó anteriormente y para estudiar las propiedades espaciales de unas de las medidas hidroacústicas (RoxAnn) a varias escalas y direcciones, se diseñó una cuadrícula compuesta por transectos ortogonales separados 120 m. Esta cuadrícula básica fue suplida por una zona más densa en forma de cruz, compuesta por siete transectos interespaciados 20 m en cada dirección ortogonal, flanqueada por cuatro transectos separados por una distancia de 60 m (Fig. 21).

4.3 - Diseño de la toma de datos

En cada campaña se midieron una serie de variables, siguiendo diferentes metodologías, relacionadas tanto con los objetivos de la Tesis, como a variables exógenas suplementarias.

Debido a que el proyecto de Tesis se va a centrar en el estudio y procesado de unos datos muy específicos (imágenes de sonar), los otros datos de los muestreos simplemente se exponen a título informativo, en el presente capítulo, en la parte correspondiente a la información de cada campaña.

Las variables medidas son las siguientes:

- ❖ Temperatura y oxígeno (muestreo en superficie y profundidad, resultados en °C y mg/l, respectivamente)
- ❖ Transparencia (muestreo usando un disco de Secchi, resultado en metros)
- ❖ Seston y clorofila (muestreo con botella Niskin, filtro Whatman de tamaño de poro 0.45 μ , resultados en mg. Los valores se obtuvieron en 10 litros por nivel).
- ❖ Salinidad (valores medidos en 10 litros por nivel).
- ❖ Granulometría del sedimento (muestreo con cores)
- ❖ Densidad (conteos de hojas en matas de *Posidonia* y *Cymodocea* realizadas con un marco metálico de 40x40 cm. Las medidas, en plantas/m², se realizaron en tres puntos diferentes cerca de las estaciones de muestreo de Cabo de Palos y Mazarrón, estando cada punto separado 10 m de la estación).
- ❖ Numero de hojas (muestreo de hojas/rizoma-brotes)
- ❖ Superficie de la hoja (muestreo de la superficie de la hoja por estolón/rizoma-hoja-grupo, resultados en cm²)
- ❖ Longitud del rizoma (muestreo de rizomas, resultados en centímetros)
- ❖ Biomasa hipogea y de las plantas (muestreo de brotes de rizomas/unidad de superficie, resultados en gr/m²)
- ❖ Cobertura de la vegetación (corresponde al porcentaje de la superficie cubierta por la pradera. Se estima colocando sobre el fondo una regla de 25 m graduada en cm para medir la longitud de la cobertura de la pradera. Se anotan los parches de arena o fango al descubierto. En cada estación de Cabo de Palos y Mazarrón se midieron tres y cuatro transectos respectivamente. Independientemente se tomaron imágenes de sonar con el mismo fin).

- ❖ Estructura y firma acústica de las praderas de *P. oceanica* y *C. nodosa* (imágenes de sonar)
- ❖ Estadío de las praderas de *P. oceanica* y *C. nodosa* (imágenes de sonar)

4.4 - Comprobación y validación de los datos

Los datos mencionados anteriormente fueron comprobados de tres modos distintos, por personal especializado perteneciente al Instituto de Ecología Litoral de Campello (Alicante):

- ❖ Por inspección visual de puntos al azar.
- ❖ Por imágenes ópticas (tomadas con cámara de vídeo o fotográfica) en puntos al azar a 0.5 m del fondo.
- ❖ Por cortos transectos de vídeo realizados en el cruce de las líneas de los Fondos Tipo.

4.5 - Especificaciones de los equipos utilizados

Las campañas se planearon para adquirir datos hidroacústicos, verificar dichos datos y tomar muestras de las comunidades bentónicas y del agua.

La adquisición de datos hidroacústicos se llevó a cabo con dos sistemas diferentes cuyas características se describen a continuación.

Sistema de Sonar de Barrido Lateral compuesto por dos transductores modelo SS941, conteniendo un circuito de procesado analógico, y un sensor para ser arrastrado (pez) modelo 159, perteneciente a la casa Geoacustics, de adquisición de datos en doble frecuencia simultánea, modelo SS942, 100/500 kHz \pm 1%. Este sensor va unido a un cable de arrastre coaxial de 50 m de largo.

Equipo de adquisición de imágenes en tiempo real. Este equipo consta de un ordenador y un software de la casa Polaris (EOSCAN), capaz de digitalizar la señal analógica que recibe del transductor del sonar y almacenar cinco canales de información (babor y estribor de ambas frecuencias mas una de referencia) en discos ópticos. Las imágenes correspondientes a estos canales se visualizan en tiempo real en un monitor donde pueden ser preprocesadas.

Clasificador de fondos RoxAnn unido a una ecosonda Odom Echotrack 3200FS trabajando en 200 kHz.

Todos estos sistemas se conectaron a un equipo de posicionamiento GPSD Trimble Ag132, unido a un sistema de navegación controlado por el software HYPACK.

4.6 - Datos obtenidos

Hay que destacar que, en la primera campaña, el muestreo de plantas y la toma de imágenes de vídeo hubo de hacerse tres meses después de la obtención de datos con sensores hidroacústicos, debido al mal tiempo. Por esta misma razón, en esta campaña, no se pudieron tomar datos de la zona de Mazarrón, ya que hubo de ser interrumpida.

Por el contrario, la campaña de 1997 se desarrolló con toda normalidad.

4.6.1- Parámetros geodésicos de las campañas de 1996 y 1997

Meridiano central	3° W (-3)
Zona:	30
Elipsoide	WGS 84
Semiejes :	A: 6378137.000 B: 6356752.314
Focus:	1/F: 298.257223600
Latitud de referencia:	0
Paralelo Sur:	0
Falso Este	500000
Falso Norte	0
Coordenadas	UTM
Unidades	metros
Factor de escala:	0.999600000 ppm
Frecuencias utilizadas:	100 y 500 kHz
Fixes marcados en	100 kHz cada 20 m
Velocidad de propagación del sonido:	1450 m/seg.
Rango :	65 m

4.6.2- Itinerarios del barco

A continuación se muestran los itinerarios seguidos por el barco en ambas campañas, tanto los de las Areas Test como los de los Fondos Tipo, ordenados por el año. En las figuras falta el itinerario de la zona correspondiente al Fondo Tipo Posidonia Densa ya que, como estaba incluido en el Area Test, en una zona densamente estudiada, se han utilizado dichas líneas.

Los puntos que aparecen a lo largo de cada transecto están numerados y, corresponden a los denominados fixes, cuyas coordenadas se conocen con exactitud.

Estos itinerarios fueron posteriormente usados para recortar las subescenas a tratar en el laboratorio de análisis de imagen y para componer los mosaicos de las imágenes sonar corregidas y tratadas de sonar, que sirvieron para obtener el mapa de distribución.

4.6.2.1- Itinerarios del barco correspondientes a Noviembre de 1996

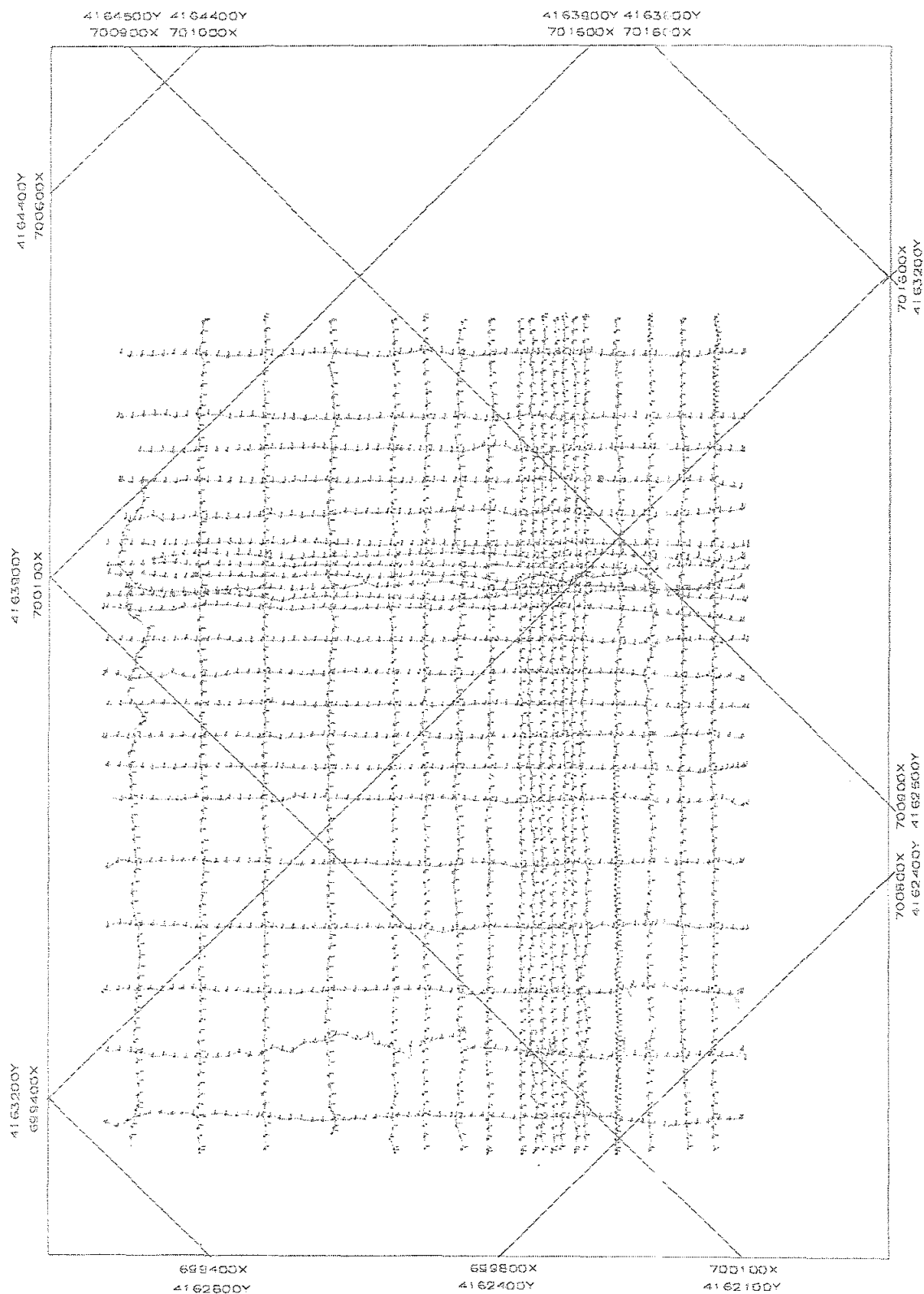


Figura 22: Itinerario del Area Test realizado durante la campaña de 1996

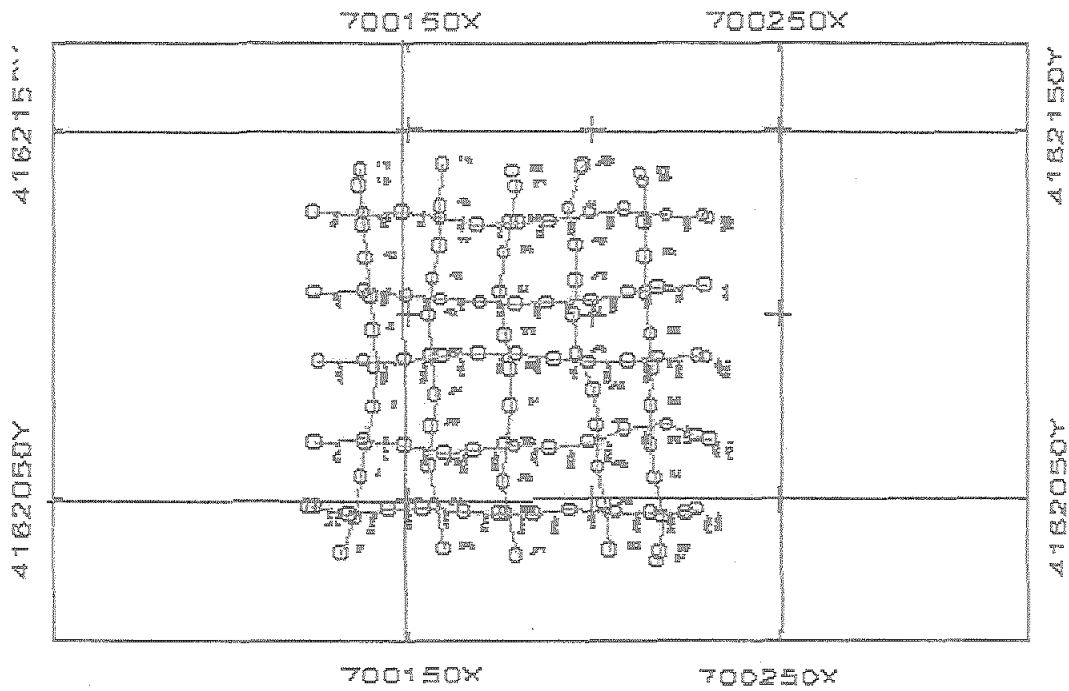


Figura 23: Itinerario correspondiente al Fondo ARENA realizado durante la campaña de 1996.

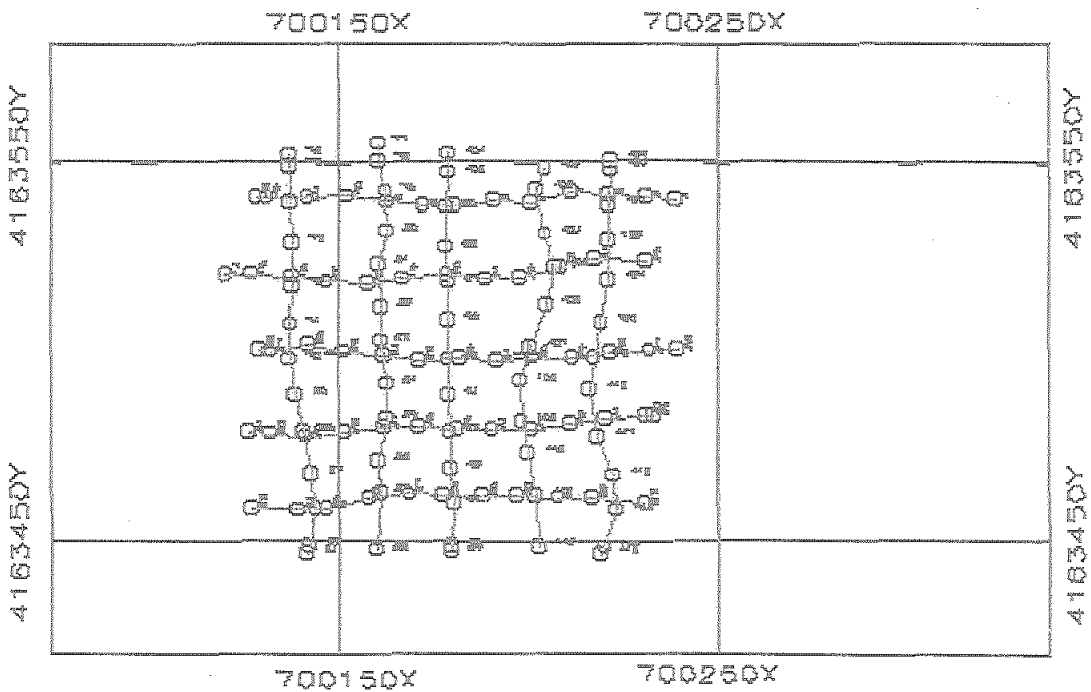


Figura 24: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo POSIDONIA (límite superior) realizado durante la campaña de 1996.

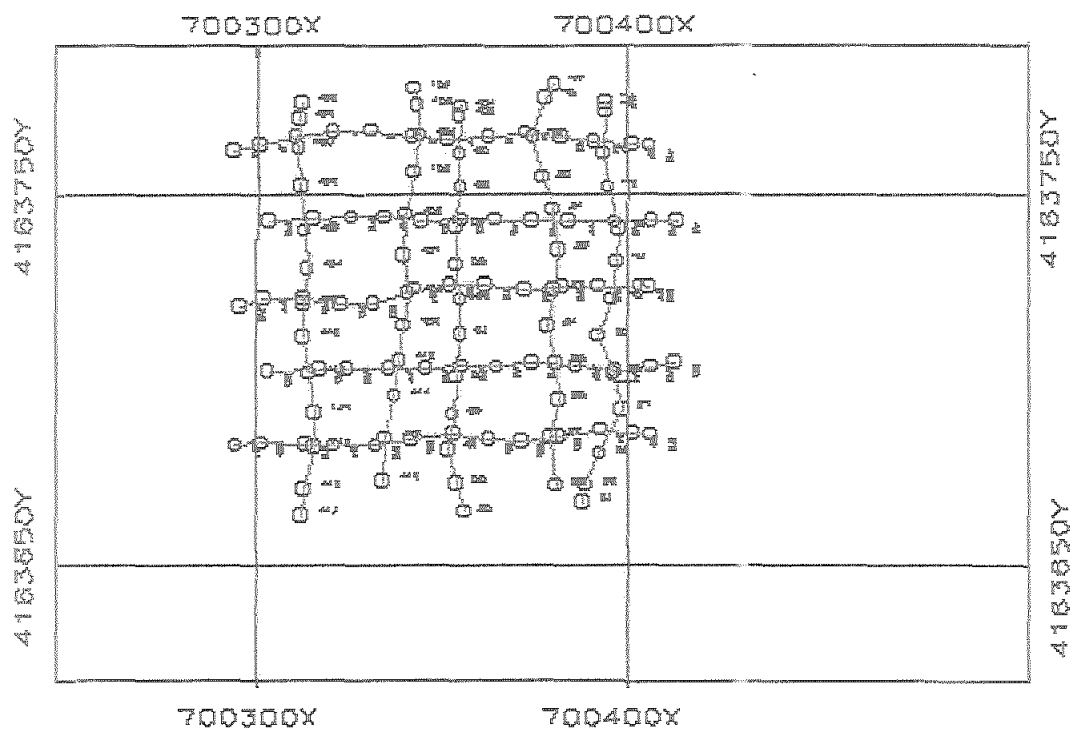


Figura 25: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo CYMODOCEA realizado durante la campaña de 1996.

4.6.2.2- Itinerarios del barco correspondientes a Noviembre de 1997

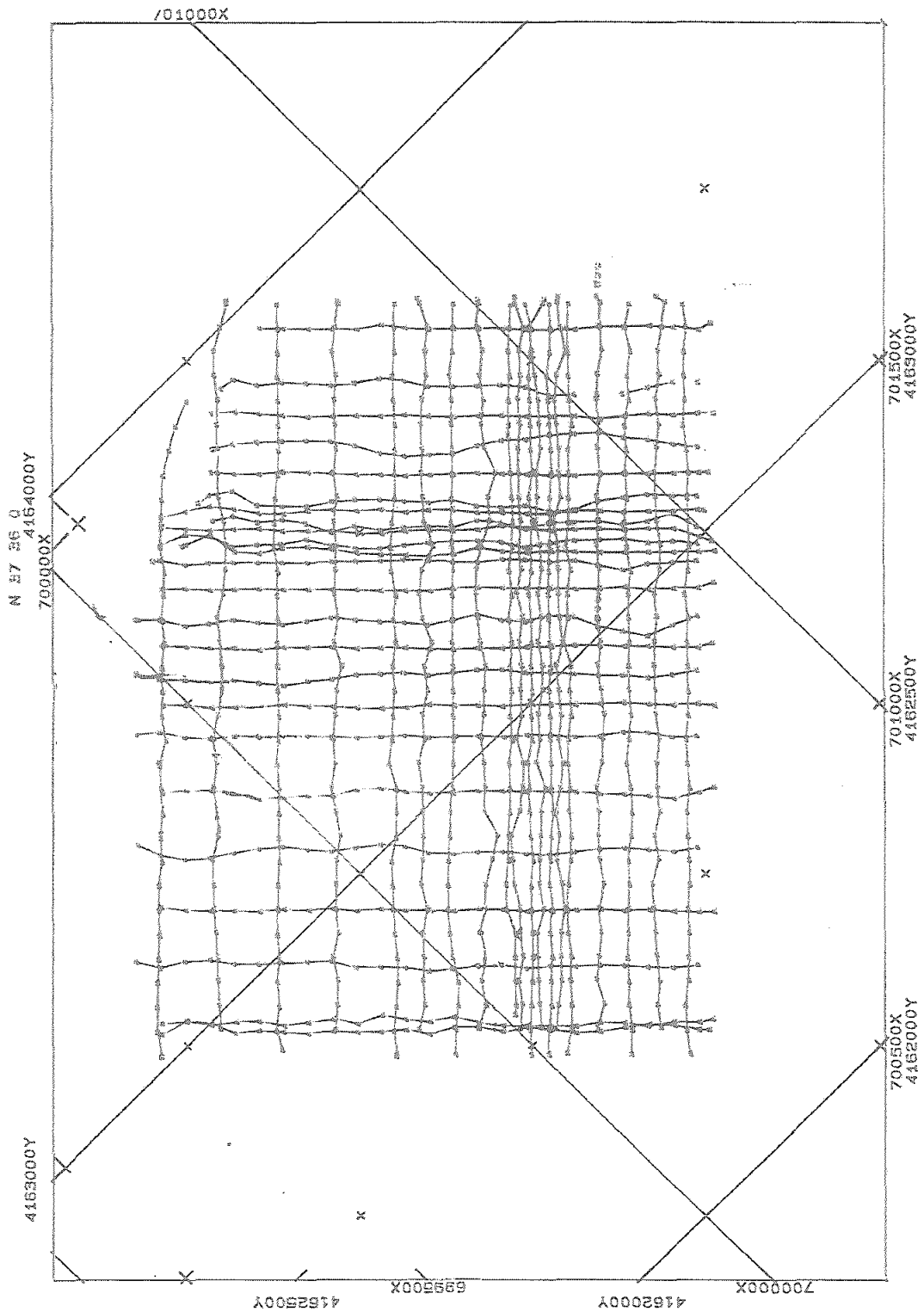


Figura 26: Itinerario del Area Test en Cabo de palos realizado durante la campaña de 1997.

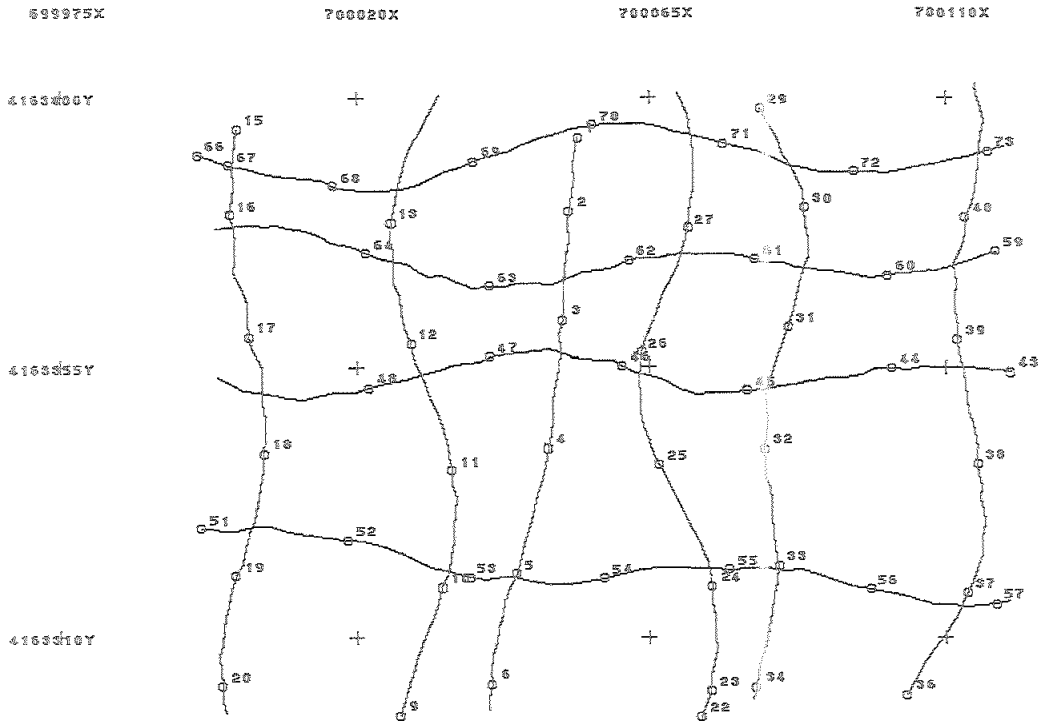


Figura 27: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo ARENA realizado durante la campaña de 1997.

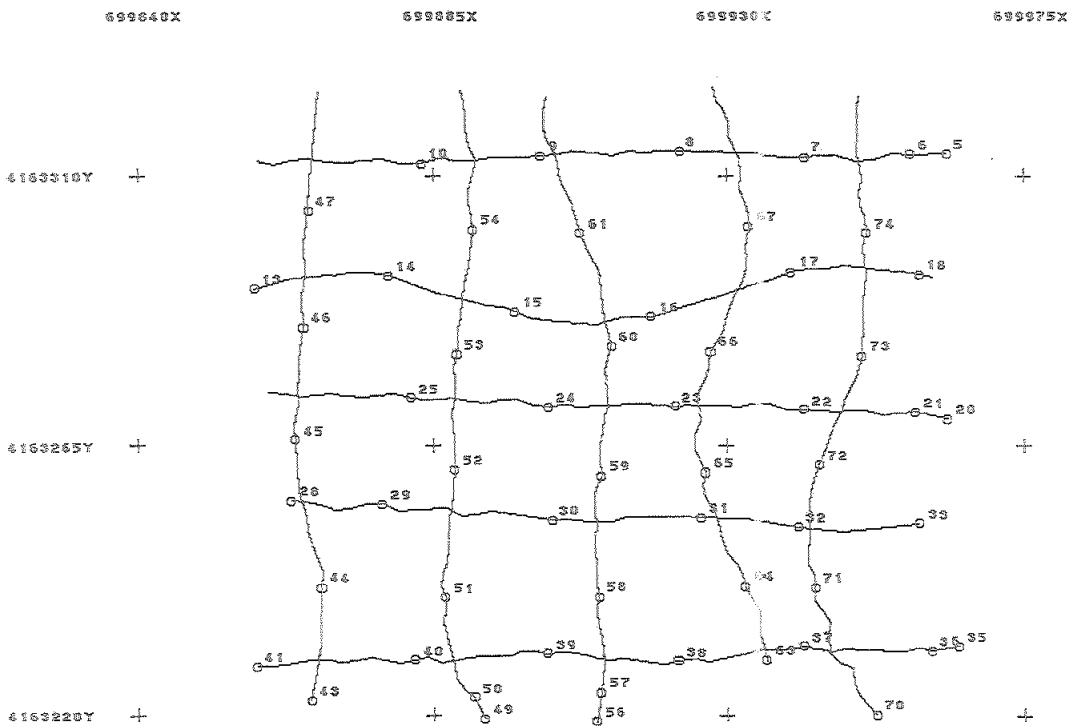


Figura 28: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo POSIDONIA realizado durante la campaña de 1997.

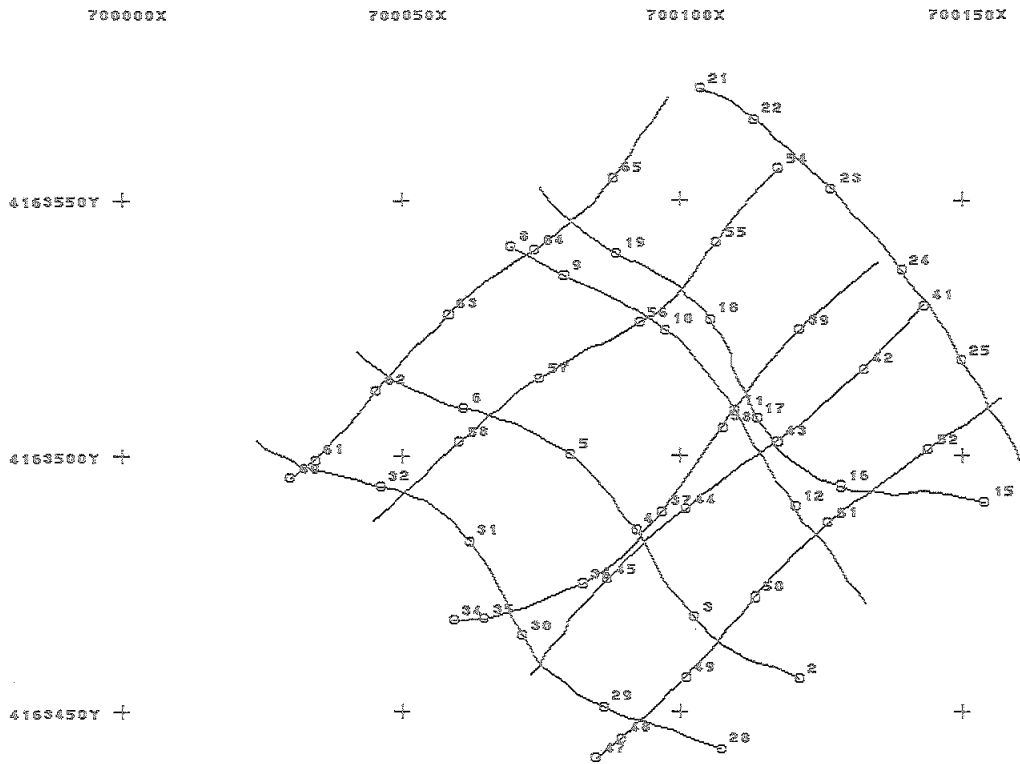


Figura 29: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo CYMODOCEA realizado durante la campaña de 1997.

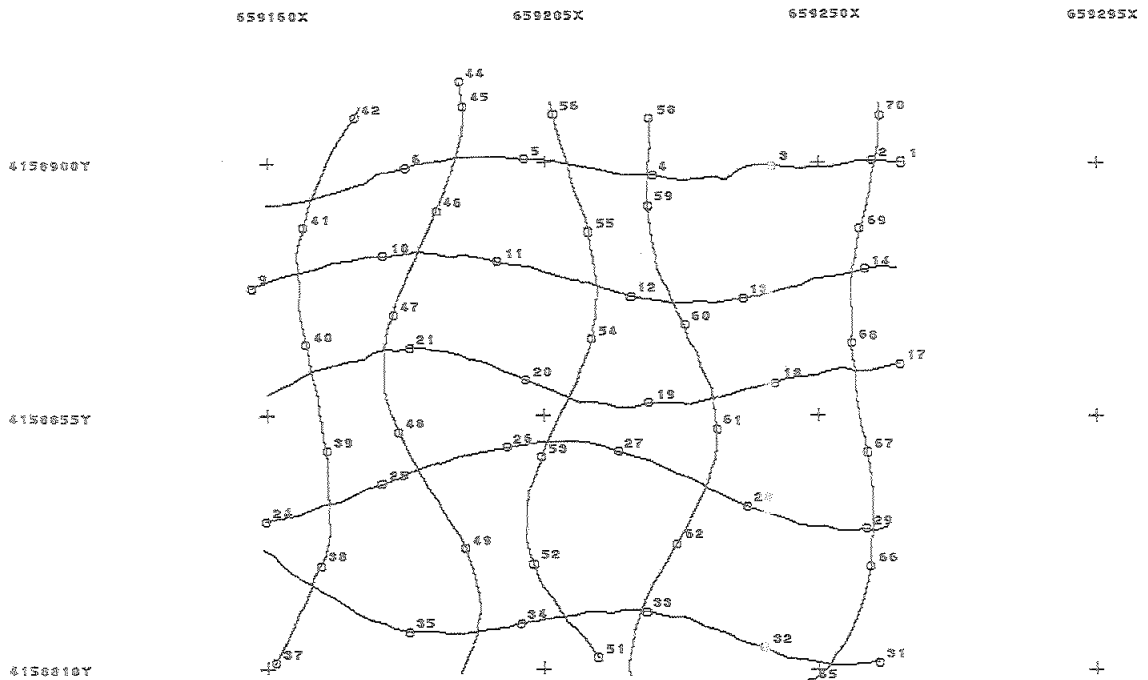


Figura 30: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo POSIDONIA DEGRADADA realizado durante la campaña de 1997.

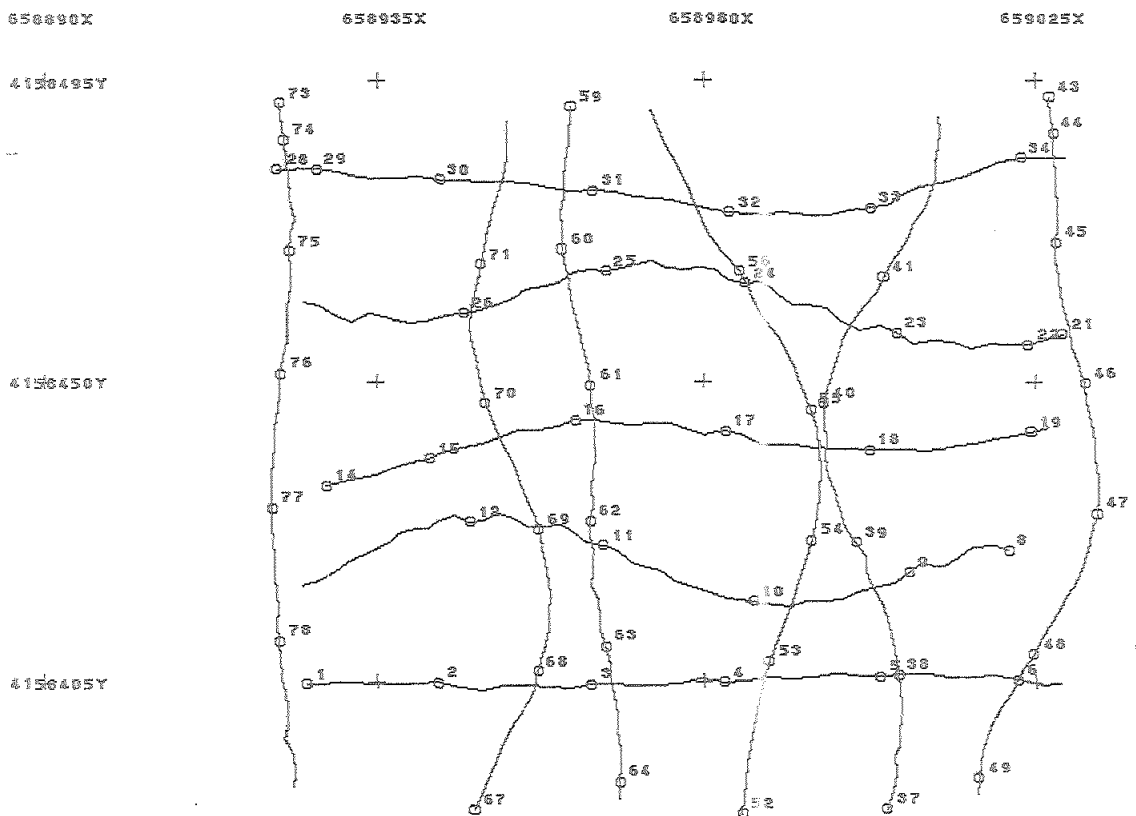


Figura 31: Itinerario correspondiente al Fondo Tipo FANGO realizado durante la campaña de 1997.

4.6.3- Parámetros medidos

Densidad

Estación de Cabo de Palos (700608.9533X, 4163118.6423Y)

Profundidad: -23

Posidonia oceanica

Densidad (numero de rizomas-brotes/0.16 m²): 68, 61, 58 (1996) / 49, 62 y 58 (1997)

Densidad total: 389.583 (1996) / 352.083 (1997) plantas/ m²

Estación de Mazarrón (746378.3888X, 4161612.8373Y)

Profundidad: -10

Cymodocea nodosa

Densidad (numero de rizomas-brotes/0.16 m²: 22, 35 y 35 (1997)

Densidad: 195.83 (1997) plantas/m²

Cobertura:

C. PALOS (1997)				
Transecto	1	2	3	Media
Arena %	33.6	57.6	62.0	51 %
<i>Posidonia</i> %	66.4	42.4	38.0	49 %

MAZARRON (1997)					
Transecto	1	2	3	4	Media
fango arenoso %	100	100	77.6	54.0	82.9 %
<i>Cymodocea</i> %	-	-	22.4	46	17.1 %

Temperatura y oxígeno disuelto:

C. PALOS (1996)		
Profundidad (m)	T (C°)	O ₂ (mg/l)
0	14.4	10.0
5	14.0	10.7
10	13.9	11.9

C. PALOS (1997)		
Profundidad (m)	T (C°)	O ₂ (mg/l)
0	15.10	7.8
10	15.60	7.7
20	15.80	6.7

MAZARRON (1997)		
Profundidad (m)	T (C°)	O ₂ (mg/l)
0	16.10	6.7
5	16.05	7.1
10	16.00	7.1

Seston, Clorofila y Salinidad:

NIVEL	C. PALOS (1997)			MAZARRON (1997)		
	Superficie	10 m	20 m	Superficie	5 m	10 m
Seston (mg/l)	9.6	10.4	11.2	12.5	13.8	14.2
Clorofila (µg/l)	0.282	0.274	0.316	0.292	0.326	0.348
Salinidad (‰)	37.95	37.95	37.94	37.87	37.87	37.87

Granulometría del sedimento:

C. PALOS (1997)			
Muestra	% Grava	% Arena	% Fango
PAII97-20.3 m	30.76	61.86	7.38
PAII97-20.1 m	29.86	61.62	8.52

MAZARRON (1997)			
Muestra	% Grava	% Arena	% Fango
MA1III97-10.1 m	0.83	33.74	65.43
MA2II97-10.2 m	1.80	36.75	61.45

Basándose en estos datos, se elaboró el triángulo textural que se muestra en la Fig. 32:

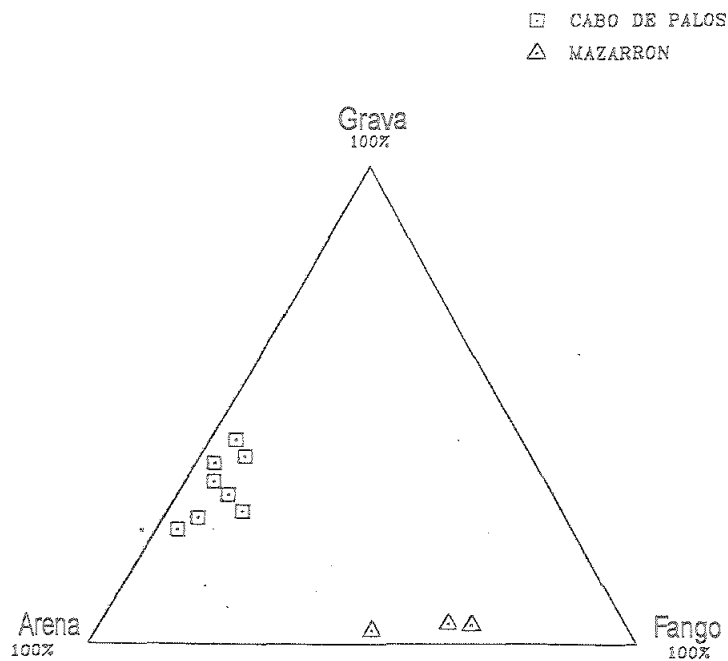


Figura 32: Triángulo textural

Transparencia:

C.PALOS (1996)	C.PALOS (1997)	MAZARRON (1997)
16.5 m	19-21 m	17-22 m

Imágenes puntuales de vídeo : (Tomadas a 4 m del fondo).

C. PALOS (1996)	Coordenadas	
Estación No.	X	Y
Muestreo	700600.0	4163050.0
A	700603.1	4163121.4
B	700260.8	4162873.5
C	700458.0	4163375.3
D	700823.4	4163623.8
E	700549.3	4163793.1
F	700341.8	4163580.3
G	700252.8	4163486.4
H	699930.0	4163161.8
I	700108.8	4163502.9
J	700170.3	4163568.5
K	700319.0	4163712.1
L	700364.1	4163795.7
M	700450.1	4163871.5
N	700576.3	4164008.9

C. PALOS (1997)	Coordenadas	
Estación No.	X	Y
V-1	700263.09	4162308.08
V-2	700342.24	4162565.07
V-3	700726.64	4162877.12
V-4	700893.17	4162954.82
V-5	700996.56	4163298.88
V-6	701243.45	4163386.61
V-7	700884.22	4163552.39
V-8	700780.24	4163274.50
V-9	700433.65	4163067.08
V-10	700561.97	4162843.45
V-11	700413.97	4162837.33
V-12	700257.75	4162801.85
V-13	700151.16	4162589.38
V-14	699922.73	4162812.42
V-16	699914.02	4162988.77
V-16	700220.94	4163027.44
V-17	700249.55	4163163.23
V-18	700515.51	4163327.44
V-19	700668.48	4163396.37
V-20	700467.34	4163539.66
V-21	700255.56	4163482.86
V-22	699995.18	4163230.69
V-23	699674.82	4163080.60
V-24	700052.52	4163616.07
V-25	700256.28	4163652.07
V-26	700607.44	4163837.64

MAZARRON (1997)	Coordenadas	
Estación No.	X	Y
V-1	659478.65	4158852.14
V-2	659597.96	4159089.13
V-3	659703.52	4159045.37
V-4	659633.15	4158779.87
Estación-V	659872.56	4158922.98
V-5	659837.05	4159176.93
V-6	659885.59	4159152.16
V-7	659814.78	4158987.51
V-8	659692.81	4158746.46
V-9	659747.85	4158728.43
V-10	659893.91	4159009.91
V-11	659941.77	4159106.12
V-12	660036.09	4159066.73
V-13	659947.54	4158931.08
V-14	659815.49	4158676.48
V-15	659872.11	4158653.37
V-16	660002.79	4158914.27
V-17	660076.99	4159056.11
V-18	660175.98	4158994.18
V-19	660105.16	4158853.13
V-20	659982.55	4158609.87

Transectos de vídeo :

N° Líneas (1996)	Coordenadas Comienzo		Coordenadas Final		Intervalo Tiempo
	X	Y	X	Y	
2	700429.9	4163743.5	700282.2	4163745.5	11:10-15:13
3	700179.8	4163544.5	700184.8	4163421.2	15:13-17:38
1	700617.3	4164030.1	700025.0	4163431.4	28:53-47:28
4	700209.7	4162945.2	700106.9	4162837.6	50:21-53:42
5	699905.6	4163098.5	699904.9	4163250.3	58:31-61:00

Capítulo 5

TRATAMIENTO DIGITAL DE LA IMAGEN ACÚSTICA

5.1 - Introducción

Las imágenes acústicas (sonografías) proceden de la reflexión de pulsos acústicos a través del agua (Abarzuza, 1991). Estas imágenes son de difícil interpretación debido al gran número de variables que influyen en su adquisición, ya comentadas anteriormente. En este capítulo se van a detallar los principales procesos que se van a aplicar en el tratamiento de una sonografía.

La sonografía (Sutton, 1979) es una vista plana de una proyección oblicua del fondo del mar, sobre la que se pueden identificar las formas y estructuras presentes, en función de las variaciones de intensidad de los ecos. Estos se reflejan en los distintos niveles de gris que forman la imagen ecoacústica (Cervenka y De Moustier, 1993). Las variaciones de tono se corresponden directamente con la respuesta acústica del fondo, definido como firma acústica. Esta dependerá de la naturaleza de los materiales que forman la superficie del fondo y de su relieve topográfico (Frappa y Duprat, 1982; Duck y McManus, 1990). Así, los retornos sónicos fuertes (correspondientes a superficies rugosas, zonas escarpadas, etc.) aparecen en tonos muy oscuros, igual que los objetos metálicos, correspondiendo los tonos claros a una respuesta débil (laderas suaves por ejemplo) o a una reflexión especular (como sedimentos de textura fina) (Clay y Medwin, 1977). En el presente proyecto, las imágenes se han tomado con un sonar de barrido lateral de doble frecuencia simultánea, trabajando a 100 y 500 kHz ya que dichas frecuencias muestran una buena relación alcance / resolución en estudios generales del ecosistema marino (Sanz y Rey, 1983; De Andrés et al, 1991). El hecho de trabajar con un sonar en doble frecuencia simultánea, permite disponer de dos imágenes (una por cada frecuencia) del mismo área: La de 100 kHz ofrece un ancho de barrido máximo de 300 m y la de 500 kHz, aunque tiene un alcance espacial máximo de 100 m por cada canal, presenta una mejor resolución. Si bien estos parámetros pueden variar dependiendo del diseño de los diferentes equipos existentes en el mercado. De esta forma, los anchos de barrido estarán en consonancia con las frecuencias empleadas y con el diseño y geometría de los transductores.

5.2 - Tratamiento de las sonografías

El tratamiento de las imágenes tiene como objetivo mejorar su calidad para detectar la estructura y la textura de los diferentes ecosistemas que se van a estudiar, entendiéndose como estructura el patrón de distribución espacial que determina el crecimiento de cada especie, y como textura la disposición y frecuencia de cambios en los niveles de gris que componen una imagen (Avery y Berlin, 1985; Sabins, 1986; Drury, 1987). Dentro de este objetivo se incluye también el estudio de la distribución espacial en función de los valores acústicos de cada ecosistema.

El procesado de datos digitales recogidos por cualquier sistema de adquisición de imágenes conlleva dos tipos de operaciones: preprocesado y extracción de información. Las técnicas de preprocesado están diseñadas para mejorar una imagen degradada y hacer que se parezca lo más posible a la realidad, precediendo normalmente a las operaciones de extracción de información. Los algoritmos de preprocesado deben ser personalizados para cada sistema de adquisición de imágenes, ya que cada uno utiliza unos parámetros específicos en la toma de datos (distorsiones geométricas y radiométricas, etc.) (Searle y Kidd, 1984; Chavez et al, 1987; Chavez, 1986; Searle et al, 1990). En contraste, las técnicas de extracción de información son más generales (por ejemplo filtrado espacial, codificado en colores y clasificaciones de coberturas) y permiten ser aplicadas a datos tomados por cualquier sistema de adquisición de imágenes. El objetivo de estas técnicas es, en primer lugar, mejorar la detectabilidad de objetos o patrones en una imagen digital para su interpretación visual y, en segundo lugar, la extracción de la información o clasificación digital (Chavez, 1986; Fish y Carr, 1991; Richards, 1993; Pasqualini et al, 2000).

En función de la calidad de la imagen, los procesos a aplicar deben ir encaminados a un **realce de contraste** (mejora la calidad de la imagen monocroma), **realce espacial** (atenuación del ruido y/o destacar bordes mediante el uso de diferentes filtros) y **clasificaciones** para la obtención de mapas de distribución (Blackinton et al, 1986). La elevada correlación que existe entre las imágenes obtenidas correspondientes a ambas frecuencias (100 y 500 kHz), y el escaso número de bandas de que se dispone (solo dos), hace que muchos de los tratamientos más habituales (RGB, IHS, Transformación de Karhunen-Loeve) no aporten información de interés, por lo que no se comentan en este apartado.

Como tarea final, la información obtenida debe ser verificada. La validación de los datos se ha realizado por tres vías (como ha sido comentada en el capítulo cuatro), por observaciones *in situ* (con buceadores), fotografía o vídeo puntual y transectos de vídeo.

5.2.1 - Preprocesado de las imágenes

Las técnicas de preprocesado han sido diseñadas para reconocer y compensar errores, ruido y distorsiones ocurridos durante el registro de las sonografías, así como para mejorar la calidad de las imágenes que se están obteniendo en tiempo real. El objetivo, como se dijo anteriormente, es hacer que la imagen se identifique lo más posible con la escena original (Miller et al, 1991). Entre estos procesos, destacamos aquellos que más se han aplicado en el presente trabajo:

- La corrección de anamorfosis (slant range) modifica el tamaño de los pixels con objeto de que no se deformen con la distancia. Esta corrección, realizada manualmente por el operador, elimina la columna de agua y hace una restitución de la imagen (de acuerdo a la velocidad del barco y al ángulo de barrido de los transductores) con el primer retorno del sonido de cada canal. Esta operación puede ser realizada en tiempo real pero afecta a los datos guardados, eliminando la posible información contenida en la columna de agua, por lo que es mas conveniente realizarla como preprocesado en el laboratorio. Es una corrección necesaria para unir posteriormente las imágenes de cada itinerario y formar mosaicos (corrección geométrica o Mapping) en los que se referencian los transectos de acuerdo a la navegación, longitud del cable y corrección de las vueltas, giros y cabeceo del sensor.
- La Ganancia es una corrección que se aplica para modificar el nivel de la señal del sonar y así aclarar u oscurecer la imagen que se está generando. Este tipo de operación se ajusta normalmente dependiendo del tipo de fondo y afecta a los datos salvados en el disco.
- La Ganancia variable con el tiempo (TVG) es una operación que permite amplificar la señal de recepción, con el fin de compensar la disminución en la intensidad de la señal con respecto a la distancia (tiempo). Esta corrección, al igual que la anterior, también afecta a los datos salvados en el disco. Se usan dos tipos de TVG: en el reconocimiento de fondos se usa normalmente el 20 log y en la detección de blancos en la columna de agua el 40 log.

- La longitud del cable se refiere a la distancia que separa el pez del barco. Teniendo en cuenta que la imagen se guarda con las coordenadas del barco y que el pez está sujeto a él por un cable de longitud variable, hay que aplicar esta corrección para asegurarse que las coordenadas de la imagen sean las correctas.
- La velocidad de avance hace referencia a la corrección necesaria para compensar la velocidad del barco y las posibles variaciones que puedan darse cuando la navegación no es constante. Para esta corrección se utilizan los ficheros de navegación que se obtienen con un sistema de posicionamiento y navegación.
- BACGAC (Beam Angle-Grazing Angle Compensation) corrige la elevada intensidad que puede aparecer en la respuesta acústica en áreas situadas a cada lado del nadir. También se utiliza cuando existe una tendencia a disminuir la intensidad de la señal al alcanzar el borde más alejado del rango. Estas tendencias, sistemáticas en la imagen, están causadas por la falta de uniformidad en el patrón del haz emitido por el transductor del sonar, así como por el ángulo con el que el pulso acústico emitido toca el fondo. El algoritmo utilizado para compensar cambios en la intensidad de la respuesta se basa en el cálculo de una media del valor del pixel a lo ancho de cada canal (curva BACGAC). Se asume que el retorno acústico debe ser equivalente para todos los pixels, y se le aplica la corrección correspondiente a cada pixel según su posición, por lo que debe hacerse sobre un fondo plano y muy homogéneo. Esta corrección se puede hacer tanto en tiempo real, ya que no afecta a los datos que se están guardando, como *a posteriori* en el laboratorio.

5.2.2 - Procesos de realce de una imagen

5.2.2.1 - Mejora de la interpretación visual

El realce de una imagen altera el impacto visual que ésta tiene sobre el usuario para que se facilite la extracción de información. Los principales procesos que se aplican son:

5.2.2.1.1 - Realce de contraste

El objetivo del sonar de barrido lateral es recoger todo el rango de respuestas de los diferentes materiales que constituyen el fondo marino para su posterior reconocimiento y estudio.

Normalmente, una imagen presenta un histograma comprimido en un pequeño rango de valores de los 256 posibles que van del blanco al negro, imperceptible para el hombre. Si el ojo humano tuviera la sensibilidad de un radiómetro, no existiría ningún problema, pero sólo es capaz de distinguir unos treinta niveles de gris entre el negro y el blanco siempre y cuando estén adyacentes y presenten un límite brusco entre ellos. Por tanto, una imagen sin estirar aparecerá con un contraste muy pobre ante él. Para mostrar toda la información que recoge el histograma comprimido, y sea perceptible por el ojo humano, este deberá ser expandido hasta ocupar todo el rango de niveles de gris que pueda ser mostrado por pantalla (256). El realce de contraste se basa en el valor digital de cada pixel en concreto (Cracknell y Hayes, 1991; Lillesand y Kiefer, 1994). Se puede aplicar siguiendo varios métodos, entre los que destacamos el estiramiento lineal y el gaussiano, que han sido los utilizados en el presente estudio.

El estiramiento lineal es la forma más sencilla y utilizada. Se asigna el valor digital (DN) mínimo del histograma a 0 y el máximo a 255. Cada punto del histograma se moverá a una nueva posición, resultando un histograma repartido regularmente a todo lo largo de los 256 niveles de gris. Este tipo de estiramiento mejora notablemente el contraste en la mayoría de las imágenes, aunque favorece una pérdida de contraste en los extremos (valores más bajos y más altos).

El estiramiento gaussiano realza la apariencia visual de la imagen y ayuda a mejorar la precisión de los algoritmos utilizados en la fase de entrenamiento (del proceso de clasificación), ya que éste asume que el histograma de la imagen posee una distribución normal. Para realizar este estiramiento habrá que ajustar dos parámetros: media y desviación estándar del histograma.

Al modificar la media, la imagen se oscurece o ilumina, cambiando el centro de los valores del histograma y dando lugar a una distribución normal. La desviación estándar afecta a la curva de distribución normal, pues casi todos los valores del histograma están contenidos en tres desviaciones estándar de la media y, aproximadamente, el 60.7% en una sola

desviación estándar. Por ello al incrementar la desviación estándar, se amplía la curva de distribución normal, dando como resultado un aumento en el contraste de la imagen, por el contrario, al disminuirla, los valores en torno a la media se agrupan, estrechando el histograma y reduciendo con ello el contraste de la imagen (Sokal y Rohlf, 1979).

5.2.2.1.2 - Realce espacial

El proceso de realce espacial consiste en la aplicación de una serie de operaciones denominadas filtros que, aplicados sobre la imagen, pretenden suavizar o reforzar los contrastes espaciales presentes (bordes) en los niveles digitales que la componen (Curran, 1988; Chuvieco, 1990). Estos procesos cobran especial importancia a la hora de mejorar la calidad visual de las imágenes de sonar (Seidman, 1972) para el estudio textural, ya que en dichas imágenes los materiales que constituyen la superficie son diferentes y con valores acústicos homogéneos.

Los bordes corresponden a fronteras entre superficies, que se comportan de distinta manera y se caracterizan por presentar un cambio brusco de valores digitales en un espacio pequeño. Este tipo de límites o bordes ocupa un área muy pequeña, considerándose rasgos de alta frecuencia, por el contrario, los límites graduales, que ocupan un gran número de pixels, se consideran rasgos de baja frecuencia.

Según las operaciones matemáticas utilizadas, existen dos tipos de filtros, uno basado en el dominio espacial y otro en el dominio de las frecuencias. El primero utiliza el proceso de convolución, que consiste en aplicar un kernel o ventana de filtraje (matriz de filas y columnas impares de tal forma que siempre haya una célula en el centro) a cada pixel de la matriz que constituye la imagen. Este proceso se basa en el valor digital de cada pixel en relación con sus vecinos, por lo que se realiza a través de operaciones de área, que realzan la apariencia de la distribución espacial de una imagen, detectando rasgos de alta o baja frecuencia, es decir, suavizan la imagen, detectan bordes y/o eliminan singularidades, alterando la textura original de ésta (Overton y Weyouth, 1979).

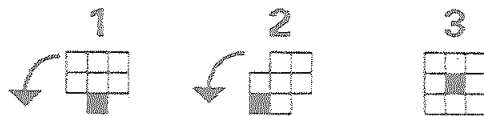
Los filtros que trabajan en el dominio de las frecuencias utilizan la transformada de Fourier, que permite separar una imagen en sus diferentes componentes de frecuencia espacial (González y Woods, 1992; Pinilla, 1997). Estos filtros no han dado buenos resultados por las especiales características de las imágenes y, por tanto, no se comentan.

El objetivo de este proceso es buscar un filtro tal que las áreas correspondientes al mismo ecosistema aparezcan homogéneas pero con bordes nítidos que las separen entre ellas y del fondo. Al mismo tiempo estos filtros ayudan a obtener información de la textura y estructura de cada ecosistema; para ello, se aplican filtros de suavizado y de detección de bordes, con el fin de observar cuales se ajustan mejor. A continuación se describen los más utilizados en el presente proyecto de tesis

5.2.2.1.2.1 - Filtros de suavizado

- Mediana: El valor que se asigna al píxel central es la mediana de los valores de los píxels vecinos.
- Moda: En este caso el valor asignado al píxel central corresponde a la moda de los valores de los píxels vecinos.
- Sigma: Suaviza la imagen mediante un kernel de tamaño especificado por el operador y un valor de porcentaje sigma, también elegido por el usuario. En primer lugar, se calcula la desviación estándar para el kernel y se multiplica por el porcentaje elegido para dar el valor de sigma que se va a utilizar en la operación. A todos aquellos píxels del kernel que presenten un valor de sigma ± 1 del valor obtenido, les será calculada la media. Al píxel central le será asignada esta media si el número de píxels a los que se les ha calculado es mayor que la mitad de los píxels que constituyen el kernel; si no, se calculará la media a los cuatro vecinos inmediatos del píxel central y este valor sustituirá al de dicho píxel.
- Edge Preserving: Para eliminar el ruido sin difuminar bordes nítidos, no se pueden aplicar filtros basados en el valor de la media a un área que contenga un borde, ya que éste quedaría difuminado. Por ello, hay que buscar el área vecina más homogénea alrededor del punto que se desea suavizar. Si un área contiene un borde nítido, la varianza en los niveles de gris de ese área será alta. Por esta razón, la varianza se usa como una medida de no-homogeneidad de un área. Este filtro busca el área vecina más homogénea alrededor de cada punto de la imagen, y le da a éste el valor medio del área vecina seleccionada. Como resultado del uso repetitivo de este filtro, se elimina el ruido en una imagen y al

mismo tiempo se conservan los bordes. Este filtro está basado en el cálculo de la media de pequeños grupos de pixels y se comienza rotando un kernel alrededor de un punto para buscar la posición en la que la varianza sea mínima. Una vez encontrada, se calcula la media de los pixels y se le asigna el valor al pixel central (marcado en negro) (Nagao y Matsuyama,1979). El proceso consiste en que los kernel 1 y 2 se pasan sobre la imagen cuatro veces, cada una rotada 90° respecto a la anterior, mientras que el tercer kernel se pasa sólo una vez. Este proceso se aplica a todos los pixels de la imagen, repitiéndose hasta que la mayoría de sus valores no cambien.



De los filtros mencionados hasta ahora, este último es el que más se ha usado en el presente proyecto, como veremos más adelante.

5.2.2.1.2.2 - Filtros de detección de bordes

- Sobel: Aplica dos kernels ó ventanas de filtraje de 3x3 al área vecina de cada pixel. El valor asignado a la posición central será el mayor valor absoluto de los dos resultantes.

1	2	1	1	0	-1
0	0	0	2	0	-2
-1	-2	-1	1	0	-1

- Central Difference: Aplica dos kernels de 1x3 al área vecina de cada pixel. El valor asignado al pixel central es el mayor valor absoluto de los dos resultantes.

-1	0	1
1		
0		
-1		

5.2.2.1.2.3 - Filtros para eliminar singularidades

- Linear Preserving: Elimina singularidades (pixels que han quedado sin clasificar) de las imágenes clasificadas, conservando estructuras relativamente delgadas pero significativamente largas. Utiliza un tamaño de kernel y tipo de vecindad especificado por el usuario.
- Frost: Se creó para eliminar el moteado (speckle) de las imágenes de radar. El algoritmo está diseñado para suavizar áreas de la imagen que contienen rasgos de frecuencia espacial baja, sin afectar a las de frecuencia espacial alta, conservando así los bordes (Narasimha Rao et al, 1995).
Aunque estos dos filtros se utilizan para eliminar singularidades, el primero se suele aplicar a las imágenes ya clasificadas, mientras que el segundo se usa con las imágenes originales. De los dos, el primero es que se ha utilizado en más ocasiones en el presente trabajo.

5.2.2.2 - Extracción de información

Entre los procesos de extracción de información, el utilizado en el presente proyecto ha sido el de Reconocimiento de Patrones (Clasificaciones) para separar zonas de diferente respuesta acústica (Patrick, 1972; James, 1985; Fukunaga, 1986). Otros como ratio, componentes principales, etc., no resultan adecuados en las sonografías (Siljeström et al, 1995).

El reconocimiento de patrones en una imagen está basado en una serie de algoritmos que son capaces de extraer automáticamente la información de las imágenes digitales. Estas técnicas, consideradas como de inteligencia artificial, están enfocadas a la detección de diferentes materiales, discriminación de diferentes patrones espaciales naturales y reconocimiento de cambios ocurridos a lo largo del tiempo.

5.2.2.2.1 -Reconocimiento de patrones según respuesta acústica (clasificaciones)

La clasificación es un proceso de extracción de información, que analiza el comportamiento acústico de cada pixel en cada frecuencia y luego separa categorías (o clases) de pixels que engloban a aquéllos de respuestas similares.

Lo que se intenta discriminar son las clases informacionales (definidas por el usuario), pero por otro lado tenemos las clases acústicas (clases definidas por materiales u objetos que presentan una misma respuesta acústica). Lo ideal sería que cada clase informacional viniera dada por una acústica, pero lo habitual es que esto no ocurra sino que una clase informacional esté definida por varias acústicas. Para solucionar este problema hay que ayudarse de cartografía auxiliar así como de análisis texturales (Labrandero, 1978; Siljeström et al , 1995b; De Bruin y Gorte, 2000; Hirata et al, 2001).

Antes de comenzar una clasificación hay que definir una serie de criterios a seguir para la discriminación de coberturas, denominada fase de entrenamiento, que consiste en seleccionar diferentes muestras de pixels que representen las distintas categorías de interés (Cochran, 1977).

Los valores digitales medios de los pixels pertenecientes a cada clase o categoría, así como su variabilidad numérica en todas las bandas que intervienen en el proceso de clasificación, serán utilizados para definir el espacio de decisión de dicha clase, que estará rodeado por el límite de decisión. Este espacio se define como el volumen incluido en un elipsoide o cluster que contendrá a cada categoría.

Una vez definidos los clusters o clases acústicas, se comparan esos datos con los valores acústicos de cada pixel y se determina su posición en el espacio de la clasificación. Si cae dentro de un cluster, estará clasificado y si queda fuera, se considera no clasificado.

Existen dos aproximaciones fundamentales a la hora de hacer una clasificación en función del conocimiento previo que se tenga del área a estudiar:

- 1- Clasificación supervisada, donde el intérprete conoce el territorio y establece unas parcelas llamadas campos de entrenamiento (training field). A partir de éstas se calcula el valor digital que define cada una de las clases, para luego asignar el resto de los pixels de la imagen a una de esas categorías en función de su valor digital (Chuvienco, 1990). Los parámetros estadísticos generados por el programa utilizado,

correspondientes a cada una de las clases definidas por el operador, se denominan **training set**.

- 2- **Clasificación no supervisada**, define las clases acústicas presentes en la imagen de forma automática sin intervención humana, por tanto, no implica conocimiento del área de estudio. Es por ello que este método podría considerarse como exploratorio, ya que nos dará una idea de las clases acústicas presentes en la imagen (Mather, 1987). A continuación, el intérprete deberá asociar esas clases con las categorías de interés.

En el presente proyecto, dado que se tenía conocimiento previo del área de estudio, se ha optado por utilizar la clasificación supervisada.

Una vez finalizada la selección y estudio de las categorías que intervendrán en la clasificación, se inicia la fase de **asignación** que trata de adscribir cada pixel de la imagen a las clases previamente seleccionadas, mediante un conjunto de funciones discriminantes que establecerán las fronteras estadísticas entre dichas clases. A este tipo de funciones se les denomina clasificadores.

5.2.2.2.1.1 - Tipos de clasificadores

- Mínima distancia, se basa en la distancia euclídea. Cada categoría viene representada por un vector prototipo Z_i , que se obtiene de su media ponderada

Si tenemos N clases $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ con sus respectivos vectores prototipo Z_1, Z_2, \dots, Z_n . Un vector X se asociará al vector prototipo más cercano, para ello emplea la distancia euclídea, que es la distancia mínima entre dos puntos, en este caso, sería la distancia mínima entre el vector X y el vector prototipo Z_i de una clase genérica α_i , esto es:

$$d_E(X, Z_i) = \|X - Z_i\| = \sqrt{(X - Z_i)^T \cdot (X - Z_i)} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_j - Z_{ij})^2}$$

Por tanto, el funcionamiento de este clasificador consiste en, calcular las distancias euclídeas de X a cada uno de los prototipos Z_1, Z_2, \dots, Z_n y, asignar X a la clase α_j , tal que la distancia $d_E(X, Z_j)$ sea mínima (Maravall, 1993).

- Paralelepípedos, clasifica pixels basándose en la categoría de los rangos de valores acústicos en los cuales están incluidos. Una vez que un pixel es identificado como perteneciente a una clase, se bloquea la posibilidad de que se solape con otra.

- Máxima verosimilitud, este método considera que los niveles digitales en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto permite describir esa categoría por una función de probabilidad a partir de su vector de medias y su matriz de varianza-covarianza, es decir, esa función asemeja la distribución real de los niveles digitales en esa categoría, por lo que sirve para calcular la probabilidad de que un pixel (con un determinado ND) sea miembro de ella. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el pixel a aquella que maximice la función de probabilidad. Este es el método más complejo y, sin embargo, el más empleado por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos (Chuvieco, 1990) (Maravall, 1993).

En el presente proyecto se ha optado por utilizar el clasificador de Mínima Distancia, ya que el área a clasificar no presenta gran complejidad, a lo sumo se han diferenciado tres categorías en cada proceso de clasificación, y con este clasificador no quedan pixels sin clasificar, lo que ayuda para la consecución de los mapas de distribución

5.2.2.2.1.2 - Verificación de los resultados

Toda clasificación lleva aparejado un cierto margen de error en función de la calidad de los datos o de la rigurosidad del método empleado, por lo que es importante aplicar algún procedimiento de verificación, que permita cuantificar ese error y, en función de él, valorar la calidad final del trabajo y su aplicabilidad operativa (Arnoff, 1982; Congalton, 1991).

Las medidas de fiabilidad se llevan a cabo comparando el resultado de la clasificación con el obtenido por fuentes tradicionales (imágenes ópticas, buceo, etc.) en unas áreas de verificación. A partir del muestreo se obtiene una matriz de confusión en donde se resumen los acuerdos y desacuerdos entre clases resultantes y la verdad- terreno. Las filas de la matriz de confusión representan la clase real mientras que las columnas se refieren a las clases resultantes de la clasificación. Los valores de la diagonal son los pixels clasificados correctamente pues su cobertura coincide con la real. Los residuales representan los errores de asignación, así los de las filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa mientras que los de las columnas implican cubiertas del mapa resultante que no se ajustan a la realidad (Hay, 1988; Chuvieco, 1990).

5.2.2.2 - Reconocimiento de cambios en el tiempo (estudios multitemporales)

Este tipo de estudio se basa en una comparación de imágenes de un mismo lugar tomadas en distintas fechas. Los estudios multitemporales serán el paso siguiente y la principal aplicación del presente estudio de Tesis. Una vez caracterizadas acústicamente las praderas de fanerógamas marinas, estos resultados serán muy útiles para monitorizar dichas especies, que constituyen ecosistemas actualmente protegidos.

5.2.2.3 - Extracción de información a partir de efectos relacionados con el medio

El medio marino ejerce una serie de efectos sobre el sonar de barrido lateral que quedan reflejados en las imágenes y que aunque a veces entorpecen la interpretación de las sonografías, otras veces encierran una información muy valiosa, por lo que deben ser estudiados con detenimiento (Chesterman et al, 1958; Belderson et al, 1972; Ayala et al, 1985).

Uno de los principales problemas es el eco de la superficie del mar que aparece como una línea negra en las imágenes. Su situación estará en función de la posición del pez y sirve para precisar su altura. Cuando el mar está agitado, se producen ecos reflejados por las burbujas y el oleaje, que quedarán registrados como un moteado en la columna de agua.

Las estelas de los barcos, constituidas por burbujas, son otra gran fuente de interferencias. Generalmente estas estelas aparecen en la imagen como una ráfaga oscura y con límites poco definidos. Si la densidad de burbujas es muy grande, pueden llegar a bloquear la emisión de la señal. Otros problemas visibles en el registro están originados por la variación en la velocidad de arrastre del pez (expansión o comprensión de los objetos), el cabeceo de éste (distorsión) y los virajes que modifican la geometría de los registros (Newton y Stephanon, 1975).

Los objetos situados tanto en el fondo como en la columna de agua reflejan los ecos de los pulsos incidentes, actuando como obstáculo a las emisiones sónicas, por lo que detrás de ellos se produce un vacío de señal. El resultado es una sombra acústica que aparece como una zona blanca en el registro del sonar, cuya dimensión servirá para poder deducir el tamaño y la altura de los objetos. En el presente proyecto hemos utilizado las sombras originadas por las

praderas de *P. oceanica* para estimar su altura. El análisis de las características de los ecos fuertes, junto con las sombras, ofrece información sobre la morfología del fondo (hoyos, depresiones, escarpes, resaltes, etc.) (Brekhovskikh y Lysanov, 1982; Carbó, 1986; Chivers et al, 1990).

5.3 - Formato de las sonografías. Resolución y escala de trabajo.

Los ficheros generados por el equipo de adquisición de imágenes EOSCAN se guardan en formato .DAT. Este formato contiene no sólo la información de la respuesta acústica de los fondos, sino también datos de velocidad del barco, posicionamiento y navegación.

A la hora de trabajar con ellas, se observa que tienen una resolución radiométrica de 0 - 127 niveles de gris (ver histograma, Fig. 33), mientras que la resolución espacial presenta un máximo de 1024 pixel / canal, o 2048 pixel / barrido (babor y estribor). Los datos crudos se guardan sin realce de contraste y sin ningún otro preproceso. No se les ha corregido en cuanto a la velocidad del barco ni se les ha eliminado la columna de agua, por lo que los pixels aparecen estirados en la dirección X y comprimidos en la dirección Y, como muestra la Fig. 34.

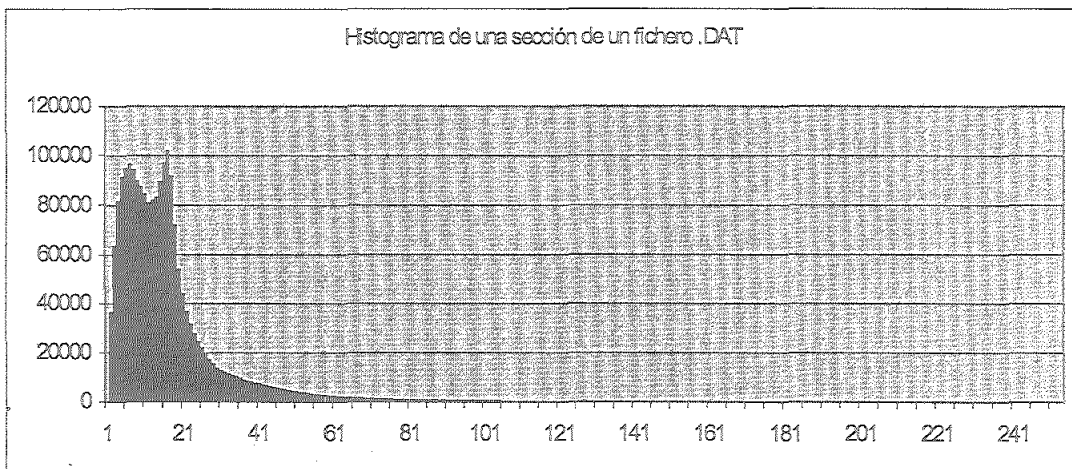


Figura 33: Histograma correspondiente a una imagen .DAT (sonografía original)

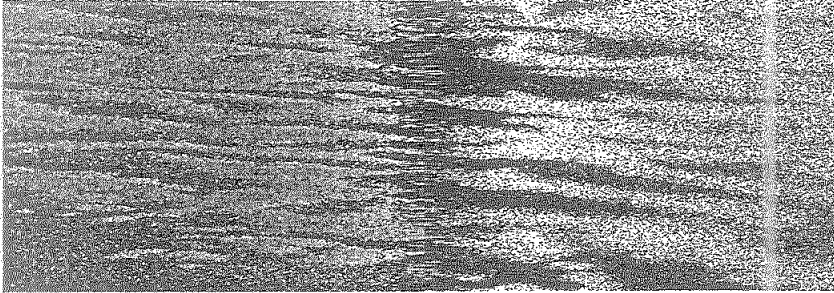


Figura 34: Sonografía (fichero .DAT) sin corregir (sonografía original)

En primer lugar, como se ha comentado anteriormente, se les somete a un preprocesado (tratamiento primario que hay que aplicar a todas las imágenes antes de que puedan ser procesadas con métodos más complejos) para normalizarlas. Para ello, en el propio sistema de adquisición de imágenes (EOSCAN), se elimina la columna de agua a todas las sonografías del área de estudio, ya que en este caso no aporta información e introduce ruido, quedando así corregida la geometría de la sonografía e igualado el tamaño de pixel. Dichas sonografías servirán para hacer el mosaico (Fig. 35).

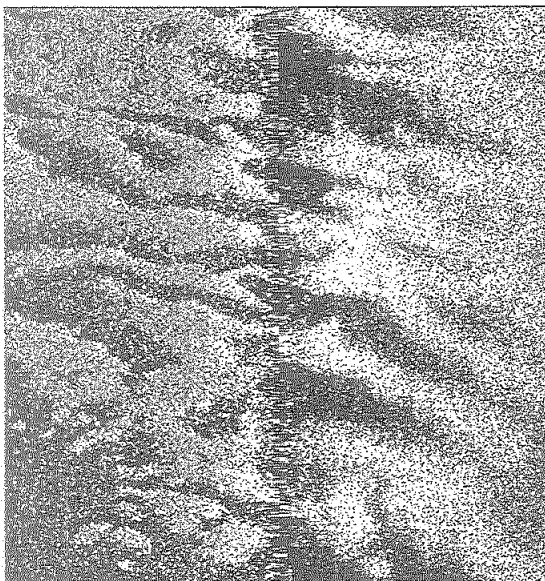


Figura 35: Sonografía corregida

A continuación se escogen y recortan las escenas más significativas para su traslado al equipo de tratamiento de imágenes. Dichas escenas, de un tamaño medio de 1000 pixels de alto por 2048 de ancho, constan normalmente de los dos canales de ambas frecuencias. Es importante hacer notar que, una vez recortadas y extraídas del equipo de adquisición de

sonografías, las escenas pierden la georreferenciación, por lo que se mantienen los ficheros conteniendo las imágenes “crudas” que llevan unidos los datos de navegación y de posicionamiento. Las escenas, una vez recortadas, sólo pueden ser exportadas del equipo de adquisición de imágenes sonar en formato PCX, lo cual conlleva numerosos problemas.

En primer lugar, la resolución radiométrica se degrada notablemente por un estiramiento automático que tiene el efecto de reclasificar los 128 valores de retorno de sonar en 19 nuevos valores, como muestra el histograma de la Figura 36. Esto implica una reducción por seis de los datos originales.

La resolución espacial de una imagen .PCX será mucho más pobre, estando formado cada barrido por 256 pixels y el barrido total (babor y estribor) por 512 pixels, en comparación con los 2048 pixels que tenían los ficheros originales .DAT. Por tanto, hay una reducción espacial de cuatro veces respecto a los datos originales.

Estas reducciones implican una gran restricción a la hora de aplicar procesos de análisis de imagen.

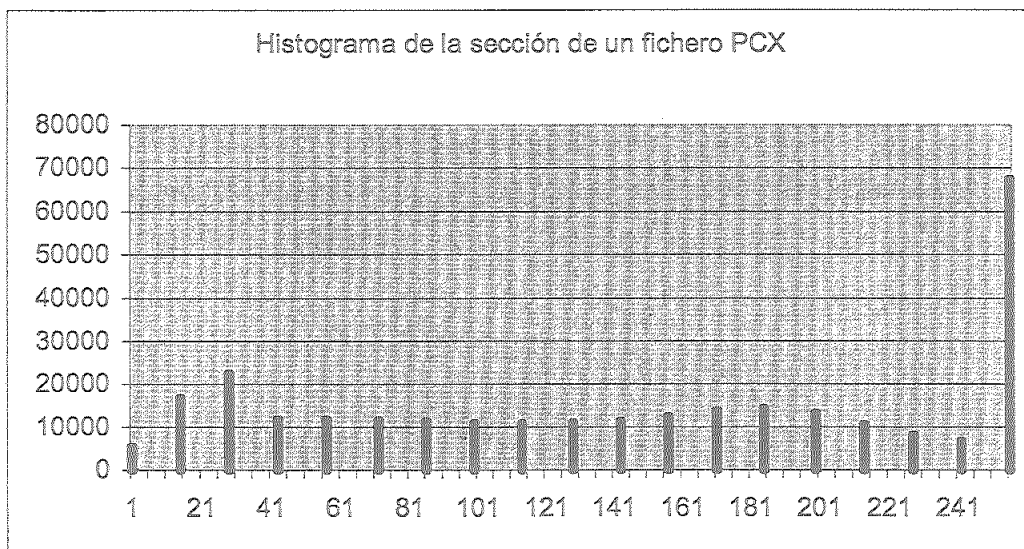


Figura 36: Histograma de una imagen .PCX estirado automáticamente

A la hora de trabajar con las imágenes y poder verificar los resultados, se hace necesario el cálculo de la resolución espacial y precisión de las sonografías. Para calcular la resolución, se parte de que cada canal tiene 256 pixels de ancho. Teniendo en cuenta que el rango escogido por el operador es de 6500 cm, cada pixel medirá 25 x 25 cm (una vez corregido). La escala de trabajo con este mismo rango será, por tanto, de 1:802. Una vez exportadas las

escenas al equipo específico de tratamiento de imágenes, serán de nuevo recortadas según las necesidades comparativas ó de cada metodología que se les vaya a aplicar, que serán comentadas posteriormente. A cada escena se le aplica un nuevo realce de contraste basado en un estiramiento gaussiano del histograma, que diferirá en cada escena según se necesite para destacar variaciones en los niveles de gris.

5.4 - Mosaicos. Generación de mapas de distribución

Como resultado final se obtendrá unos registros de sonar corregidos. El proceso para construir un mosaico de imágenes de sonar es mas complicado que el que se utiliza en otros tipos de imágenes, como por ejemplo las de satélite, ya que el control geométrico sólo se puede obtener en puntos del nadir. Normalmente no existe información sobre características, tales como grado de inclinación, cabeceo o balanceo del barco, de los pixels que conforman la imagen (Chavez et al, 1987; Danforth et al, 1991). Como sucede en otro tipo de imágenes, las correcciones geométricas para elaborar un mosaico digital se basan en la identificación de puntos de control y en la aplicación de una ecuación de interpolación que utiliza dichos puntos de control, para hacer un remuestreo de la imagen. Tal como se ha indicado, los puntos de control accesibles son sólo los situados en el nadir, por tanto, el primer paso cobra gran importancia, al contrario del segundo que es muy similar si no idéntico a aquellas transformaciones utilizadas en datos tomados por otros sensores. Debido a la variación en la calidad radiométrica de los datos (niveles de gris), especialmente aquellos situados en la parte más lejana del rango, se requiere un trabajo adicional para obtener un tono semejante entre los diferentes itinerarios.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Introducción

El presente capítulo trata de la discusión de los resultados obtenidos durante el preprocesado y procesado de las sonografías con el objetivo de caracterizar acústicamente las especies *Posidonia oceanica* y *Cymodocea nodosa*, incluyendo la evaluación de la calidad de las praderas.

Es importante destacar que los datos originales, debido a la mala calidad visual en su recepción, presentan un gran problema para ser utilizados directamente, y por tanto, no pueden considerarse como tales, al variarse manualmente los valores de Ganancia y de TVG (Ganancia Variable con el Tiempo) durante su adquisición con el fin de mejorar su calidad. Esto hace que los valores de los pixels no se puedan considerar absolutos y por ende no se puedan utilizar las estadísticas de primer orden, siendo mejor utilizar imágenes preprocesadas que pueden considerarse normalizadas. Dichas imágenes presentan la geometría corregida y los niveles de gris equilibrados, facilitando su interpretación visual y posterior procesado.

Una vez obtenidas las imágenes, en primer lugar, como ya se comentó en el capítulo 5 (ver 5.3), hay que hacer un cambio de formato para la compatibilización de las imágenes entre los equipos utilizados (Eoscan para adquisición de datos en tiempo real y de tratamiento de imágenes en el laboratorio). En dicho capítulo ya se comenta el preprocesado (acústico) que se aplica a cada subescena, así como el realce de contraste (estiramiento Gaussiano del histograma) aplicado. Una vez exportadas las escenas normalizadas al equipo específico de tratamiento de imágenes, éstas serán de nuevo recortadas según las necesidades comparativas ó de cada metodología que se les vaya a aplicar, y que serán comentadas en cada caso.

A continuación, se les aplica procesos de filtrado (comentados en Cap. 6.2) y, posteriormente, otros de clasificación (ver 6.3), y en vista de los resultados obtenidos, se describirá la frecuencia y metodología de procesado óptimos para la caracterización acústica de cada especie (ver 6.4) para aplicarla finalmente en la detección y evaluación de la calidad ambiental de las praderas (ver 6.5). Toda esta información se recoge en un mapa de distribución de especies, basado en la metodología propuesta, del Area Test (ver 6.6). Finalmente, se comparan los resultados con los obtenidos utilizando otras metodologías acústicas (ecosondador con clasificador de fondos RoxAnn)(ver 6.6.2).

6.2. - Filtros - Patrones de distribución espacial

Como se ha comentado en el capítulo anterior, los filtros son fundamentales a la hora de realzar la textura de los distintos tipos de coberturas y fondos y de caracterizar los patrones de distribución espacial de cada especie (Jan y Minot, 1989; Cervenka y Moustier, 1993; Siljeström et al, 1995).

Se escogieron una serie de filtros, aquellos considerados más adecuados (comentados en el capítulo 5), y se aplicaron a las imágenes correspondientes a los Fondos Tipo, ya que estas zonas específicas presentaban una cobertura máxima (a ser posible el 100 %) de cada tipo de fondo que se esperaba encontrar.

Se analizan las especies siguiendo un gradiente de profundidad, comenzando por el Fondo Tipo correspondiente a Arena, situado en zonas someras y representado por la imagen p2sm11. Se ha escogido una zona homogénea de textura arenosa al ser, este tipo de fondo, el más habitual en los asentamientos de las praderas a estudiar.

A continuación se estudia el Fondo Tipo de Cymodocea nodosa, imagen denominada p2c6, situada asimismo en las zonas relativamente someras (5 a 8 m aprox.) y de fondo arenoso.

La siguiente imagen, denominada p2p6, está situada en zonas algo más profundas y recoge el límite inferior de la pradera de C. nodosa y superior de P. oceanica. Esta imagen se tomó con fines comparativos, ya que en ella se observa la diferencia de estructura, textura y comportamiento acústico de ambas especies, además de la respuesta acústica del fondo.

En zonas más profundas (entre 10 y 20 m de profundidad, aprox.), se encuentra la pradera de P. oceanica más densa, a cuyo Fondo Tipo corresponde la imagen pp2p3.

Finalmente, y situada en las zonas más profundas estudiadas (hasta un máximo de 30 m de profundidad), aparece el límite inferior de la pradera de P. oceanica, al que corresponde la imagen p2dp8.

En el presente apartado se comentan los resultados obtenidos en el realce de la interpretación visual para cada tipo de fondo y en cada frecuencia. El nombre de las imágenes incluye una serie de números que se corresponden con datos de posicionamiento (fixes) y con la frecuencia (terminaciones en _1 y _5 corresponden a 100 y 500 kHz, respectivamente). Asimismo, los nombres llevan anotados si son imágenes originales, simplemente extraídas del fichero original (en cuyo caso acaban en ext, de "extract"), y en caso de haber sido

procesadas, qué filtro se les ha aplicado (así EDP se corresponde con el Edge Preserving Filter y Frost se corresponde con el filtro del mismo nombre).

Las imágenes correspondientes a 500 kHz llevan unas rayas negras, que se les hacen al comienzo y final de línea de navegación para tener la referencia de la posición, una vez recortadas y extraídas del equipo de adquisición de imágenes acústicos.

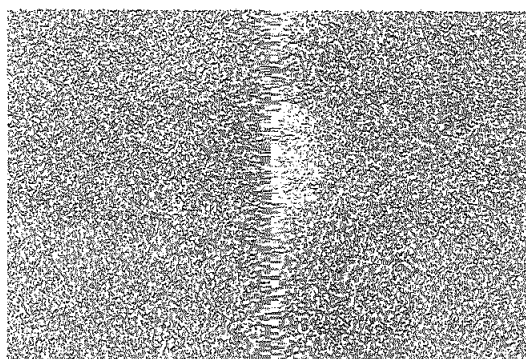
6.2.1 - Arena

La arena constituye un fondo de textura homogénea que presenta una respuesta acústica débil, al ser su topografía suave y el material (silíceo) relativamente inerte (Hamilton, 1987). Dicha respuesta es muy similar en las dos frecuencias utilizadas, como se puede observar en las imágenes p2sm11_1 ext y p2sm11_5 ext, que corresponden a las originales tomadas con 100 y 500 kHz, respectivamente (Fig. 37). Al ser éstas sus principales características, se le ha aplicado a ambas imágenes el filtro EDP, comentado en el capítulo 5, que homogeneiza las texturas eliminando posibles ruidos de origen externo que puedan entorpecer la interpretación e identificación de estos fondos. El realce de una textura homogénea se hace patente en las imágenes p2sm11_1 edp y p2sm11_5 edp, correspondientes a 100 y 500 kHz, respectivamente (Fig.37).

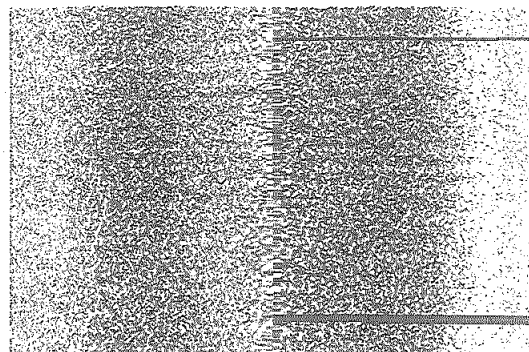
La banda que aparece más oscura en el centro de los canales de babor y estribor de 500 kHz corresponde a unos valores de ganancia desigualmente ajustados en cada frecuencia, pero que no interfieren en la interpretación visual de la imagen. De hecho, el modo de operar del filtro utilizado diluye en cierta medida este oscurecimiento central, permitiendo observar con más detalle las características texturales del fondo.

En la imagen estudiada se observa que la frecuencia de 100 kHz, caracterizada por su menor resolución pero mayor alcance, ofrece una información equivalente a la de 500 kHz.

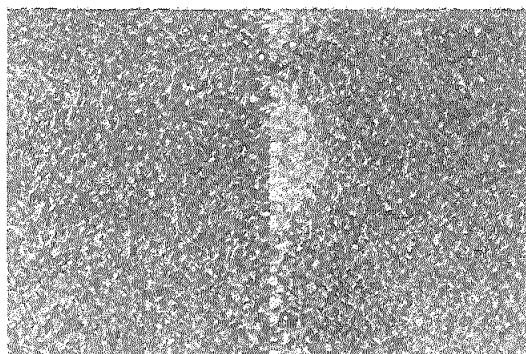
Por tanto, el fondo arenoso desprovisto de vegetación se caracteriza por una respuesta acústica baja, similar en 100 y 500 kHz y cuyas posibilidades de realce se centran en la eliminación de ruidos que pueda haber presentes.



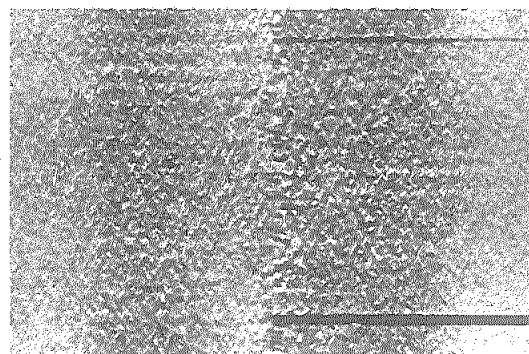
p2sm11_1 ext



p2sm11_5 ext



p2sm11_1 edp



p2sm11_5 edp

Figura 37: Imágenes correspondientes al Fondo Tipo Arena

6.2.2 - Pradera densa de *Cymodocea nodosa*

C. nodosa es una especie con una respuesta acústica muy específica, como se observa en la Fig. 38. En efecto, esta especie aparece nítidamente en las sonografías tomadas con 100 kHz, mientras que en aquellas obtenidas simultáneamente con 500 kHz aparece transparente. Ningún filtro aplicado sobre las imágenes de 500 kHz ha dado buen resultado, ya que las sonografías originales carecen de información. El procesado no resalta ninguna estructura, que es una característica fundamental de la especie para su reconocimiento (Siljeström et al, 2001).

Por el contrario, las imágenes correspondientes a 100 kHz ofrecen una clara diferenciación de la especie respecto al fondo.

En la imagen procesada, el canal de babor, casi completamente cubierto por *C. nodosa*, tiene unos valores de ganancia demasiado bajos que no realzan lo suficiente la diferencia entre la pradera y la arena, aunque éste límite se pueda apreciar claramente. Por el contrario, en el canal de estribor se aprecia perfectamente la diferencia.

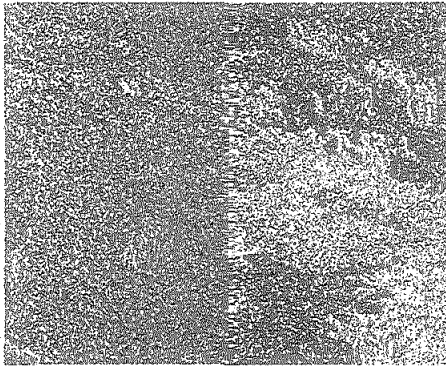
Hay que hacer notar la fuerte respuesta acústica que esta planta ofrece en relación a su tamaño y modelo de crecimiento, previamente descritos en el capítulo 2 (Sauvageau, 1891; Hartog, 1970). A través de su respuesta acústica, se puede interpretar como si esta planta no tuviera un modelo claro de crecimiento y presentara una gran biomasa. Más adelante se formulará una hipótesis que intente conciliar todos estos datos, que en un principio parecen no coincidir con la anatomía de la parte externa de esta especie.

El mejor resultado, sin duda, ha sido el obtenido al aplicar el filtro EDP (Edge Preserving) a la imagen de 100 kHz (ver Fig. 38), pues dicho filtro homogeneiza las texturas semejantes, manteniendo los bordes nítidos entre las diferentes superficies. En la imagen resultante, la zona cubierta por esta especie, destaca notablemente del fondo arenoso.

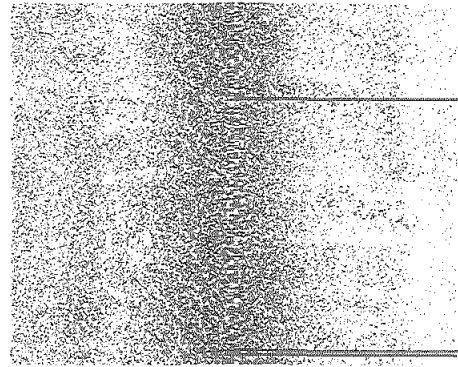
Por otro lado, se aplicó un filtro Frost (ver Fig. 38) que elimina gran cantidad de ruido, suavizando a la vez las diferencias texturales en la imagen. En este caso se descarta el resultado, ya que dicho suavizado provoca una pérdida de información.

En la imagen de 100 kHz, *C. nodosa* se caracteriza por presentar una estructura migajosa, tendente a granular gruesa y bastante homogénea. La textura, realzada en la imagen procesada con el filtro EDP, se puede considerar asimismo granular.

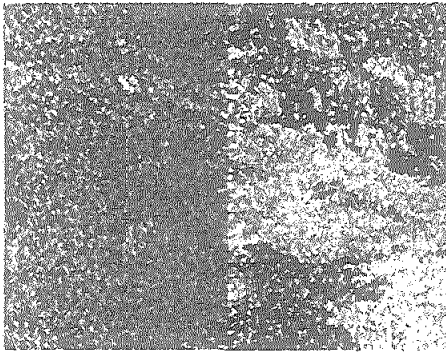
No se aprecian estructuras en el patrón de distribución que se correspondan con el modelo de crecimiento de la especie.



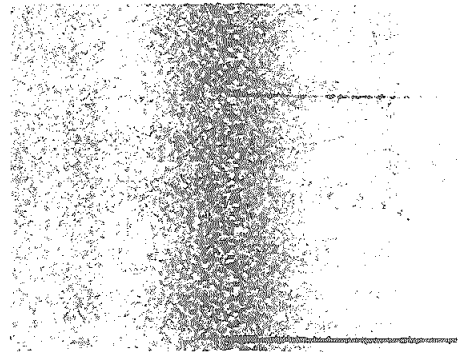
p2c6_1 ext



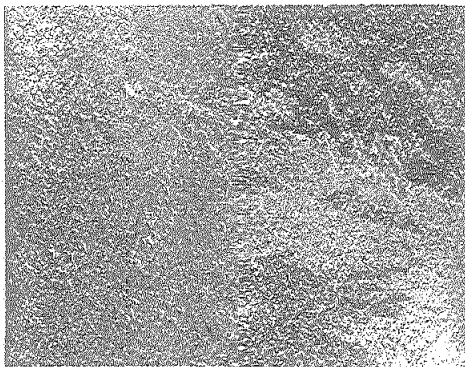
p2c6_5 ext



p2c6_1 edp



p2c6_5 edp



p2c6_1 frost

Figura 38: Imágenes correspondientes al Fondo Tipo Pradera de *Cymodocea nodosa*

6.2.3 - Fondo Tipo Posidonia Planta Aislada - Límite inferior de la pradera de *C. nodosa* y límite superior de la pradera de *P. oceanica*.

Las imágenes de la Fig. 39 recogen la respuesta acústica de la zona arenosa que delimita el borde inferior de la pradera de *Cymodocea nodosa* y el superior de la pradera de *Posidonia oceanica*. Es muy interesante observar las distintas respuestas acústicas que presentan ambas especies, en función de las cuales se han probado los dos filtros, cuyas imágenes resultantes se recogen en la Fig. 39 (Siljeström et al, 1996). Hay que señalar que la arena, al mantener su respuesta débil, contribuye a que pueda observarse tan claramente las diferentes especies estudiadas.

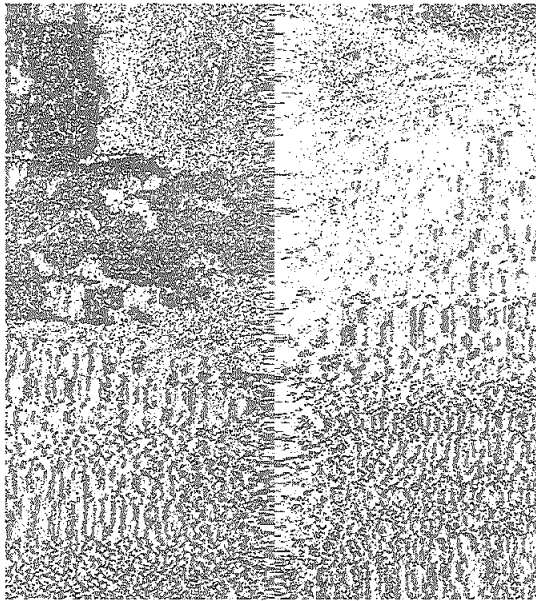
La pradera de *C. nodosa* aunque presente en una menor densidad, tiene la misma respuesta que se observaba en la imagen anterior, esto es, una señal muy fuerte en 100 kHz y otra muy débil en 500 kHz (Siljeström et al, 2001). La textura y estructura son asimismo semejantes a las comentadas en la imagen anterior.

Por el contrario, la pradera de *P. oceanica* presenta una estructura muy definida en forma de plantas aisladas (Rey y Díaz del Río, 1989). Esta imagen se corresponde con el borde, que se puede definir como de la ecocline, ya que es ancha y muy gradual. Este borde cobra una gran importancia, pues es a través de su estudio que se puede apreciar la evolución de la pradera, sobre todo su posible regresión.

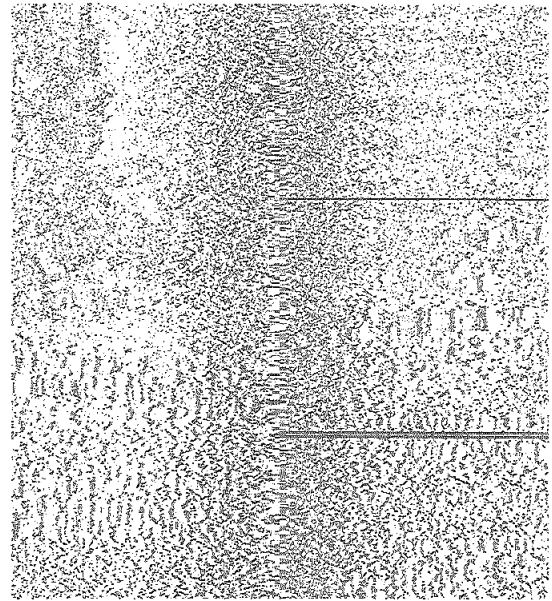
Hay que hacer notar que entre las matas aisladas, que aparecen con morfología moteada debido a la altura y sombra producidos por cada planta, se aprecian formas más alargadas y paralelas entre sí. Estas últimas estructuras no se corresponden con la realidad, sino que son matas alargadas artificialmente por los cabeceos y balanceos del barco. Como se ha comentado en el capítulo 3, estos efectos producidos por el oleaje se ven potenciados cuando la zona a reconocer es relativamente somera, puesto que el cable que separa el sonar de barrido lateral del barco es corto (2 a 3 m) y no puede amortiguar suficientemente los movimientos del barco.

Por todo lo comentado anteriormente, el mejor resultado ha sido el obtenido tras aplicar el filtro EDP (Fig. 39) que resalta notablemente la cobertura de *C. nodosa*, manteniendo sus bordes con nitidez. La estructura de la comunidad de *P. oceanica* en plantas aisladas queda asimismo resaltada. El filtro Frost (Fig. 40) mejora la calidad de la imagen en general aunque suaviza y disminuye demasiado el contraste, con lo que la característica de la fuerte respuesta

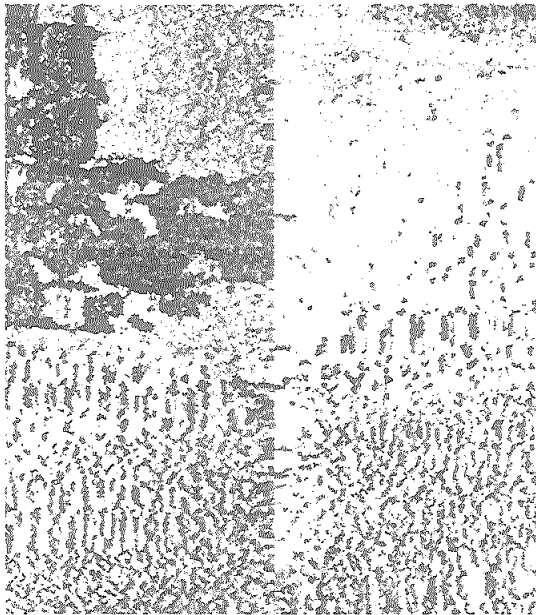
de *C. nodosa* queda muy desvirtuada. Por este motivo, este filtro no se usará para el procesado estándar de las imágenes.



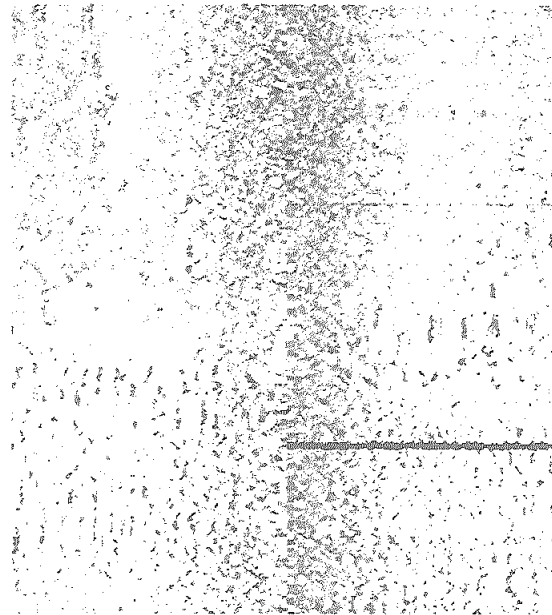
p2p6_1 ext



p2p6_5 ext



p2p6_1 edp



p2p6_5 edp

Figura 39 : Imágenes originales (ext) y procesadas con el filtro EDP, incluyendo el límite inferior de la pradera de *C. nodosa* y el superior de la de *P. oceanica*.



p2p6_1 frost

Figura 40. Imagen tomada con 100 kHz, procesada con el filtro Frost, incluyendo el límite inferior de la pradera de *C. nodosa* y el superior de la de *P. oceanica*.

6.2.4 - Pradera densa de *P. oceanica*

La pradera densa de *P. oceanica* constituye el cuarto Fondo Tipo estudiado. Esta zona corresponde a la parte más desarrollada de la pradera situada en la zona central, donde la densidad de plantas es muy alta.

La estructura de esta parte de la pradera es muy homogénea, destacando en las dos frecuencias por igual, aunque en 100 kHz (Fig. 41) aparezca un poco más fuerte. Siendo esta su principal diferencia con la pradera de *C. nodosa* en las imágenes sin tratar.

El filtro EDP destaca aún más, si cabe, la estructura homogénea de la pradera, ya que dicho filtro procesa las áreas en función de su varianza y destacando de este modo, dichas áreas de su entorno (Nagao y Matsuyama, 1978). En el presente caso, la zona estudiada se homogeneiza notablemente, por lo que se deduce que los valores de varianza de su respuesta acústica deben ser menores que aquellos que presenta la pradera de *C. nodosa*, donde las imágenes filtradas presentan una cierta estructura granular gruesa, más contrastada que la que aquí se aprecia.

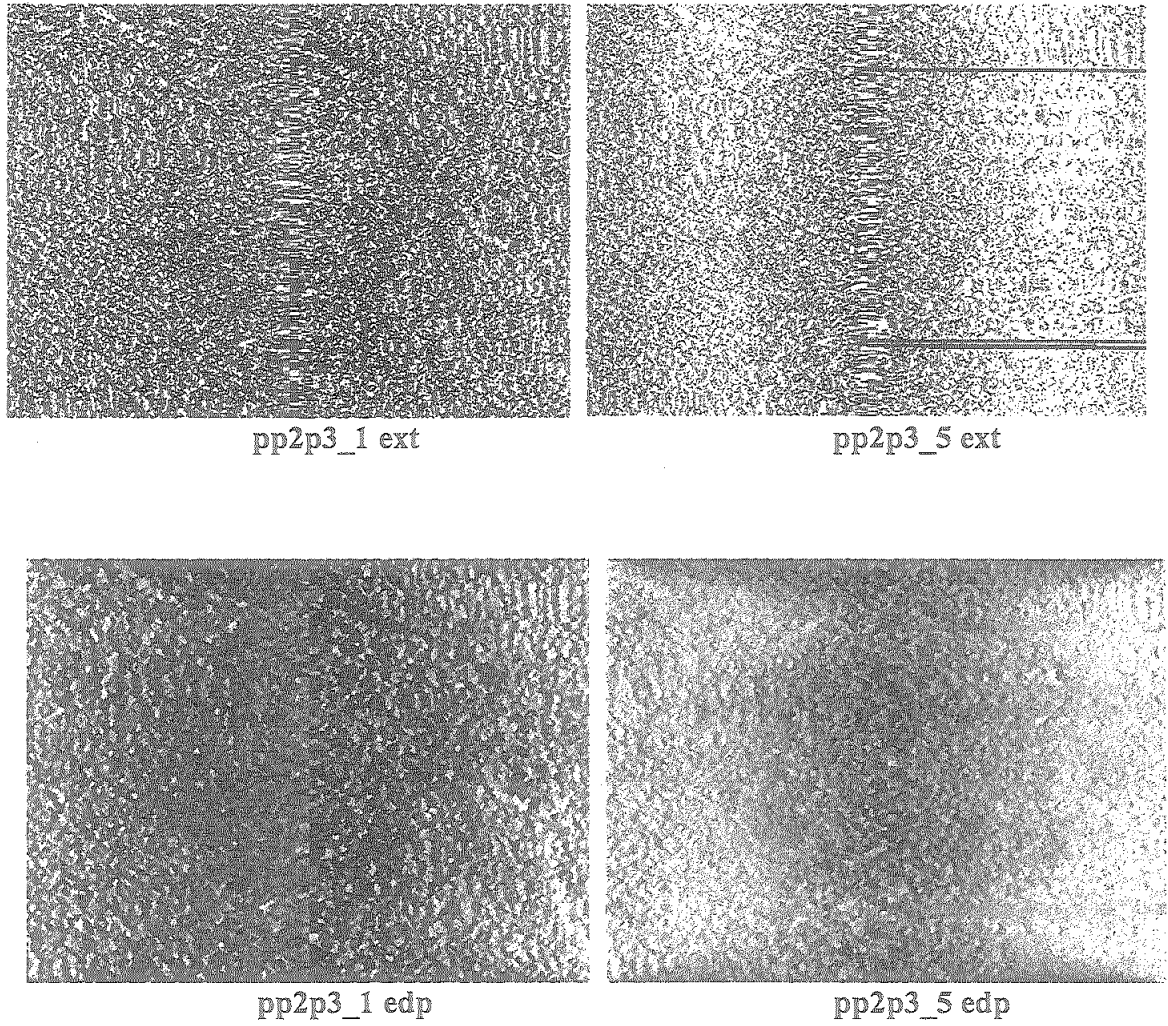


Figura 41 : Imágenes correspondientes al Fondo Tipo Pradera densa de *P. oceanica*.

6.2.5 - Límite inferior de la pradera de *P. oceanica*

El límite inferior de la pradera se ha considerado como la zona de mayor profundidad (se ha llegado hasta los 30 m), donde deja de crecer y desaparece, que sirve como indicador de la claridad del agua (Denisson y Kirman, 1996; Gallego y Kenworthy, 1996). Es un límite más abrupto que el superior, de tipo ecotono, y se caracteriza porque los parches de arena intercalados en la pradera van siendo cada vez más abundantes hasta que dominan por completo, como se verá más adelante en el mapa de distribución (BIOSONAR, 1999; Sørensen et al, 2001). La imagen que recogen las Figuras 42 y 43 corresponden a esta zona.

Al igual que ocurría en las imágenes anteriores, *P. oceanica* sigue presentando una respuesta acústica semejante en ambas frecuencias. En el canal de babor, la pradera aparece muy homogénea y densa, por el contrario, en el canal de estribor, que marca el comienzo del límite inferior, se observa que entre zonas cubiertas por vegetación, aparecen áreas arenosas, que irán ganando en extensión a medida que aumenta la profundidad, como se verá más adelante.

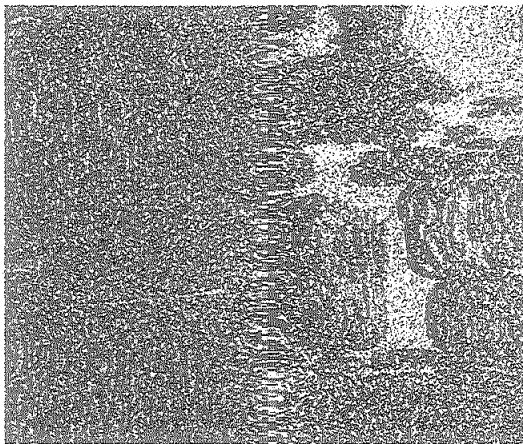
La causa de que la pradera presente poca nitidez en el canal de babor, es debida a una deficiente regulación de la ganancia, desigual en ambos canales. No obstante, en el presente caso, la interpretación del procesado se centrará en el canal de estribor, ya que contiene la información relevante.

Como es habitual, el canal de 100 kHz presenta un mejor contraste entre las zonas cubiertas por vegetación y las áreas arenosas. El canal correspondiente a 500 kHz, que teóricamente debería ser de gran calidad por poseer más resolución, presenta un menor contraste junto a un menor alcance de los pulsos acústicos. Por este motivo, las sonografías tomadas con 100 kHz suelen ofrecer más calidad visual y mejores posibilidades en cuanto a su procesado.

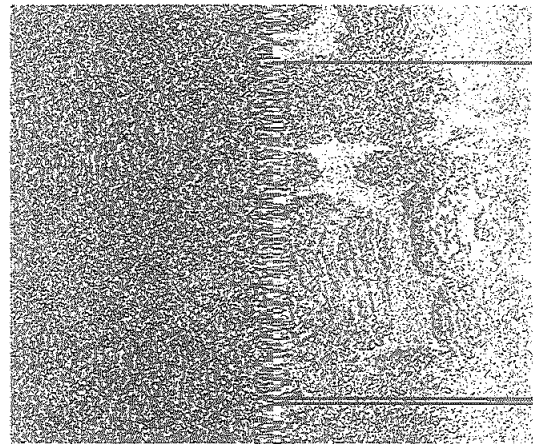
El filtro EDP mejora notablemente el contraste que interesa resaltar (áreas con vegetación / fondo desnudo), a la vez que resalta la estructura de crecimiento de la especie en cuestión. En la imagen filtrada (Fig. 42, p2dp8_1 edp), se aprecia una cierta estructura filiforme subparalela, a veces errática, que va a caracterizar la pradera de *P. oceanica* cuando ésta no es suficientemente densa como para presentar una estructura homogénea (Molenaar et al, 2000). El mismo filtro, aplicado en la imagen correspondiente a 500 kHz, no tiene el

mismo resultado, no se realiza el contraste de la misma manera ya que la imagen original presentaba asimismo una peor calidad visual.

Por otro lado, al aplicar el filtro Frost a la sonografía tomada con 100 kHz (Fig. 43, p2dp8_1 frost), el resultado es bastante bueno pues aunque la textura de la imagen se suaviza notablemente, se mantiene cierto contraste que resulta suficiente para destacar las diferencias entre las zonas cubiertas por vegetación de otras arenosas.



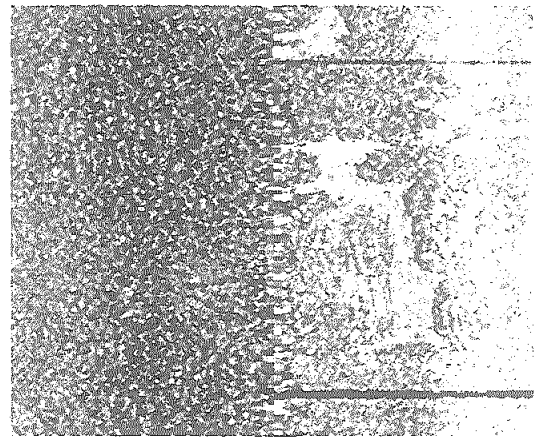
p2dp8_1 ext



p2dp8_5 ext

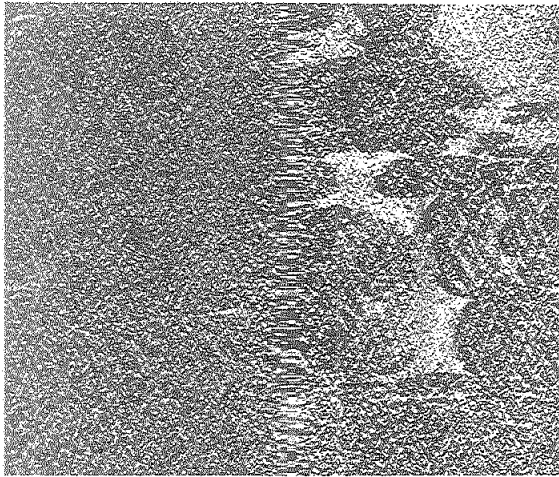


p2dp8_1 edp



p2dp8_5 edp

Figura 42: Imágenes originales y procesadas con el filtro EDP, correspondientes al Fondo Tipo Límite inferior de la pradera de *P. oceanica*



p2dp8_1 frost

Figura 43. Imagen resultante de aplicar el filtro Frost a la sonografía tomada con 100 kHz, correspondiente al Fondo Tipo Límite inferior de la pradera de *P. oceanica*.

6.2.6 - Conclusiones

Como conclusión de este apartado, se puede afirmar que, el filtro EDP (Edge Preserving Filter) es el que ha ofrecido los mejores resultados en todos los tipos de fondos probados.

Una dificultad básica con los filtros de suavizado es que tienden a difuminar los bordes presentes en las imágenes. Este filtro, basado en las medidas de varianza de una superficie, separa este área de otra, que a su vez también homogeneiza (Nagao y Matsuyama, 1978; Gonzalez y Woods, 1992). Esta operación mejora notablemente el contraste a la vez que suaviza ligeramente la imagen original, favoreciendo su interpretación visual y la extracción de información textural. Esto es muy importante para determinar el modelo de crecimiento y expansión de cada especie, así como para la determinación del estado evolutivo de la pradera.

En cuanto a las frecuencias utilizadas, el canal correspondiente a 500 kHz, que teóricamente debería ser de gran calidad por poseer más resolución (Abarzuza, 1991), pierde gran parte de información debido a la reducción que sufren las imágenes al pasar a formato .PCX (como se explicó al principio del presente capítulo). A esta desventaja hay que unir el menor alcance de los pulsos acústicos (menor rango). Por ello, las sonografías tomadas con 100 kHz suelen ofrecer más calidad visual y mejores posibilidades en cuanto a su procesado (Carbó, 1991).

6.3. Clasificaciones - Patrones de distribución acústica

Las clasificaciones forman parte del proceso de extracción de información, consistiendo en un análisis del comportamiento acústico de los pixels en cada frecuencia y, separándolos posteriormente en categorías (clases) que engloban a los que presentan respuestas similares. El objetivo de este proceso es discriminar una serie de clases informacionales (definidas por el usuario) a través de la obtención de clases acústicas (materiales u objetos que presentan una misma respuesta acústica) (Campbell, 1996; Congalton y Green, 1999). En este capítulo se estudia cómo llegar a un tipo de clasificación donde ambas clases obtenidas (informacionales y acústicas) se ajusten lo más posible.

Como se comentó en el capítulo 5, existen dos aproximaciones fundamentales a la hora de hacer una clasificación: clasificaciones supervisadas, cuando existe un conocimiento previo del área a estudiar, y clasificaciones no supervisadas, en caso contrario. En el presente trabajo se ha utilizado la primera. El clasificador utilizado ha sido el de Mínima Distancia, ya que el área a clasificar no es demasiado compleja, pues no se han diferenciado más de tres categorías en ninguno de los procesos de clasificación.

Los valores digitales de los pixels pertenecientes a cada clase, delimitados por el usuario, forman un conjunto de parámetros que caracterizan los campos de entrenamiento, (denominado training set), que serán utilizados para definir el espacio de decisión de dicha clase. Este, a su vez, estará rodeado por el límite de decisión (espacio definido como el volumen de un elipsoide o cluster que contendrá a cada categoría) (Thomas y Allock, 1984).

Toda clasificación lleva aparejada un cierto margen de error, por lo que es importante aplicar algún procedimiento de verificación que permita cuantificarlo. Las medidas de fiabilidad se llevan a cabo comparando el resultado de la clasificación con el obtenido por fuentes tradicionales (imágenes ópticas, buceo, etc.) en unas áreas de verificación (Wang y Howarth, 1993; Schwengerdt, 1997).

Cada proceso de clasificación lleva aparejado el cálculo posterior de una Matriz de Error que ofrece información sobre la fiabilidad de la clasificación realizada con un clasificador en concreto (Prisley y Smith, 1987; Congalton, 1988; Congalton y Green, 1993). El valor a destacar de este análisis estadístico es la media de fiabilidad.

Cuando existe la posibilidad de comparar mapas obtenidos a partir de las clasificaciones, los resultados se estudian en la Matriz de Confusión donde se resumen los

acuerdos y desacuerdos entre clases resultantes y la verdad- terreno. Las filas de la matriz de confusión representan la clase real (definida por el usuario) mientras que las columnas se refieren a las clases resultantes de la clasificación. Los valores de la diagonal son los pixels clasificados correctamente pues su cobertura coincide con la real. Los residuales representan los errores de asignación, así los de las filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa mientras que los de las columnas implican cubiertas del mapa resultante que no se ajustan a la realidad (Ho y Agrawala, 1968; Chuvieco,1990).

Por todo lo comentado anteriormente, en primer lugar se ha seleccionado al menos una escena de cada Fondo Tipo , donde se ha tomado una fotografía submarina, que sirve de comprobación visual. Estas escenas han sido clasificadas independientemente, permitiendo así estandarizar una determinada combinación de parámetros del proceso de clasificación, que serán utilizadas en los demás casos a estudiar. A continuación, se ha seleccionado un área que contiene los tres Fondos Tipo (Posidonia, Cymodocea y Arena), denominada Area de Alta Diversidad (AAD), que así mismo ha sido clasificada independientemente. El training set correspondiente a este área se ha aplicado a cada una de las escenas de los Fondos Tipo para ver la reproducibilidad y fiabilidad del sistema de clasificación, esto es, hasta qué punto es capaz de discernir un fondo “puro” (sección 6.3.1). Esta parte es fundamental a la hora de evaluar una clasificación aplicada a un área de grandes dimensiones como es el Area Test.

Como segundo paso se generan mosaicos a partir de las sonografías de cada Fondo Tipo (100 x 100 m) y se clasifican con independencia unos de otros. Estos resultados se analizan y comparan con otros obtenidos al aplicárseles el training set del Area de Alta Diversidad (ver 6.3.2). Visto los problemas que aparecen, se estudia la influencia que tiene la iluminación de la imagen (dirección y sentido del sensor) en el proceso seguido mediante un análisis de Validación Cruzada (sección 6.3.3). Dicho estudio compara las clasificaciones obtenidas en sonografías tomadas en diferentes direcciones del compás.

Las imágenes utilizadas corresponden a la campaña de 1996, ya que presentan una mejor calidad que las tomadas en 1997. Finalmente, se elaboran las conclusiones parciales y se detalla la metodología estándar definida.

6.3.1- Fotos y sonografías de las especies a caracterizar. Area de Alta Diversidad

En todas las campañas realizadas, se hicieron fotos submarinas dentro de cada Fondo Tipo para calibrar y validar los datos obtenidos con los dispositivos acústicos y así comprobar la eficacia de la metodología y procedimientos aplicados.

Las fotos, de 2x2 m, fueron localizadas por coordenadas en la sonografía previamente corregida, marcando con un círculo el lugar exacto en cada escena. Gracias a su tamaño, cada fotografía ofrece una vista general del área correspondiente a cada Fondo Tipo, confirmando de esta manera la información visual extraída de las sonografías.

En primer lugar, para verificar la información extraída, se ha clasificado cada escena (que engloba la localización de la fotografía submarina) independientemente (esto es, cada una con su propio training set), utilizando un proceso de clasificación supervisada con clasificador de Mínima Distancia. La matriz resultante se muestra en el paso (A).

En segundo lugar, aunque sólo se ha efectuado en los casos de fondos más típicos de Posidonia y Cymodocea, se ha aplicado a las mismas escenas originales el training set generado a partir del Area de Alta Diversidad. Como se explica a continuación, ésta es una zona que comprende los tres Tipos de Fondos a estudiar (Arena, Posidonia y Cymodocea), y sirve para comprobar si dicho training set reconoció fondos con una única cobertura. La matriz de confusión resultante se muestra en el paso (B).

El Area de Alta Diversidad (AAD) nace de la necesidad de definir un training set (o conjunto de parámetros de los campos de entrenamiento) apropiado para la clasificación del área total (Area Test), por lo que se buscó la zona (dentro del Area Test) que comprendiera una mayor diversidad de ecosistemas. A dicha área se le aplicó una clasificación supervisada utilizando cuatro imágenes, dos de ellas correspondientes a las frecuencias de 100 y 500 kHz (escenas originales) y, las otras dos son las mismas imágenes pero con el filtro BDP. La clasificación se ha llevado a cabo utilizando el clasificador de Mínima Distancia y el filtro de Linear Feature Preserving (LIFE) de 5x5 para suavizar la imagen resultante (ver capítulo 5). La matriz de error producida se muestra a continuación :

Matriz de Error

	cymodocea	posidonia	arena	nulo	total
cymo	69.24%	28.24%	2.52%	00.00%	100%
	2967	1210	108	0	4285
posid	36.30%	61.40%	2.29%	00.00%	100
	554	937	35	0	1526
arena	14.13%	0.55%	85.32%	00.00%	100%
	333	13	2011	0	2357

Media de fiabilidad = 71.99%

Las imágenes correspondientes a cada escena (sonografías) se describen con el nombre en negrita y posición geográfica de la fotografía marcada con un círculo en la imagen original. También se proporciona y se comenta la información estadística (Matriz de Error y media de fiabilidad) usando ambos training set.

La Matriz de Error muestra la clasificación real de los pixels del training set. Esta contiene los nombres de las clases, la cantidad de pixels, el porcentaje de pixels clasificados dentro de cada clase y la clase nula que contiene los pixels que no están asociados a ninguna. La media de fiabilidad muestra el porcentaje de pixels incluidos en la clase apropiada.

6.3.1.1 - Posidonia densa (Foto de Estación de muestreo)

pf1.pcx (100 kHz izquierda, 500 kHz derecha, imagen original, estación de muestreo localizada en el círculo, Fig.44

X 700609.0756
Y 4163118.562

(A) Nombre de la imagen: **po1_1y5** (Fig. 46)

Matriz de Error

	posidonia	arena	nulo	total
posidonia	83.13%	16.25 %	00.62 %	100%
	4932	964	37	5933
arena	07.84%	92.16%	0.0	100%
	249	2928	0	3177

Media de fiabilidad = 87.65%

(B) Nombre de la imagen: pos1_1y5 (AAD) (ver Fig. 47)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	posidonia	nulo	total
cym	9.03% 567	47.19 % 2964	43.78 % 2750	00.00 0	100% 6281
arena	6.92% 437	54.92% 3470	38.16% 2411	00.00 0	100% 6318
pos	7.65% 209	33.55% 917	58.80% 1607	00.00 0	100% 2733

Media de fiabilidad = 40.92%

Matriz de Confusión

	posidonia	arena	nulo	total	%
posidonia	8354	51533	77813	137700	6.07
arena	8889	53020	40866	102775	51.59
nulo	1	212	3894	4107	94.81
total	17244	104765	122573	244582	

La primera imagen estudiada corresponde con una zona de *P. oceanica* con cobertura densa, como se aprecia en la fotografía submarina (ver Fig. 45).

Los resultados de la clasificación usando su propio training set (A) se pueden considerar satisfactorios, ya que el 83,13 % de los pixels definidos como posidonia se reconoce como tal. La media de fiabilidad (o porcentaje de aciertos) muestra un valor alto (87.65%), por lo que la misma metodología de clasificación se ha seguido en los diferentes fondos.

La matriz de error resultante de la clasificación (B), esto es, aplicándole a la imagen el training set del área de alta diversidad, muestra una gran confusión. Como clase arena sólo se clasifican el 54.92% de los pixels y como clase posidonia el 58.80% de los pixels muestreados. De este último valor sólo un 6.07% son pixels correctamente clasificados, como muestra la Matriz de Confusión (obtenida a partir de la comparación de los dos mapas anteriores).

Por otro lado, en la matriz de error correspondiente a la clasificación (B) se puede apreciar como la clase *cymodocea* apenas tiene pixels clasificados como tal (9.03%), lo que es bastante lógico teniendo en cuenta que en este área no hay *Cymodocea*.

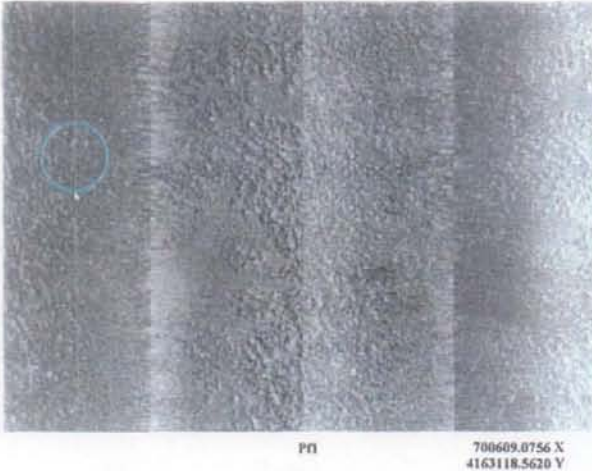


Figura 44



Figura 45

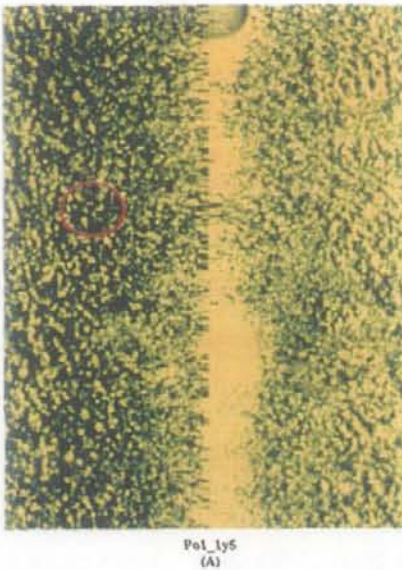


Figura 46

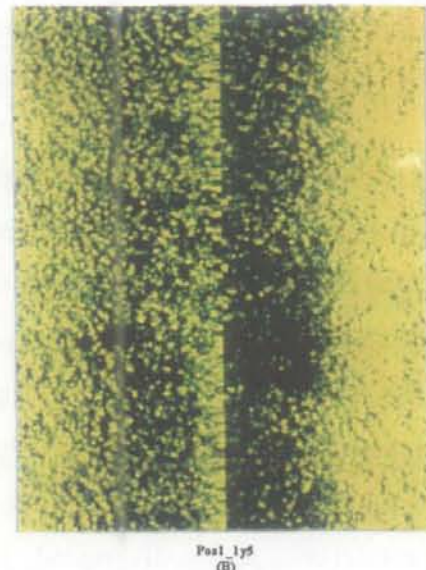


Figura 47

Figura 44 : sonografía original de 100 y 500 kHz;

Figura 45 : foto submarina tomada en el círculo marcado;

Figura 46 : clasificación de la imagen usando su propio training set (A);

Figura 47 : clasificación de la imagen usando el training set del área de alta diversidad

6.3.1.2. Posidonia aislada

pf3.pcx (100 y 500 kHz, imagen original, Foto localizada en el círculo, Fig. 48,
Foto submarina, Fig. 49

X 700117.5903
Y 4163571.4829

(A) Nombre de la imagen: po3_1y5 (ver Fig. 50)

Matriz de Error

	posidonia	arena	nulo	total
posidonia	83.91% 2806	16.09 % 538	00.00 % 0	100% 3344
arena	13.47% 990	86.35% 6346	0.18 13	100% 7349

Media de fiabilidad = 85.13%

La imagen tratada (Fig. 50) corresponde a una zona de transición entre la arena y el comienzo de la pradera de *Posidonia* (ver Foto submarina, Fig. 49). Esta zona no es representativa de la pradera, por lo que no se genera Matriz de Confusión, simplemente se le aplica una clasificación de forma independiente para estudiar la fiabilidad del proceso, que presenta un valor elevado (85.13 %).

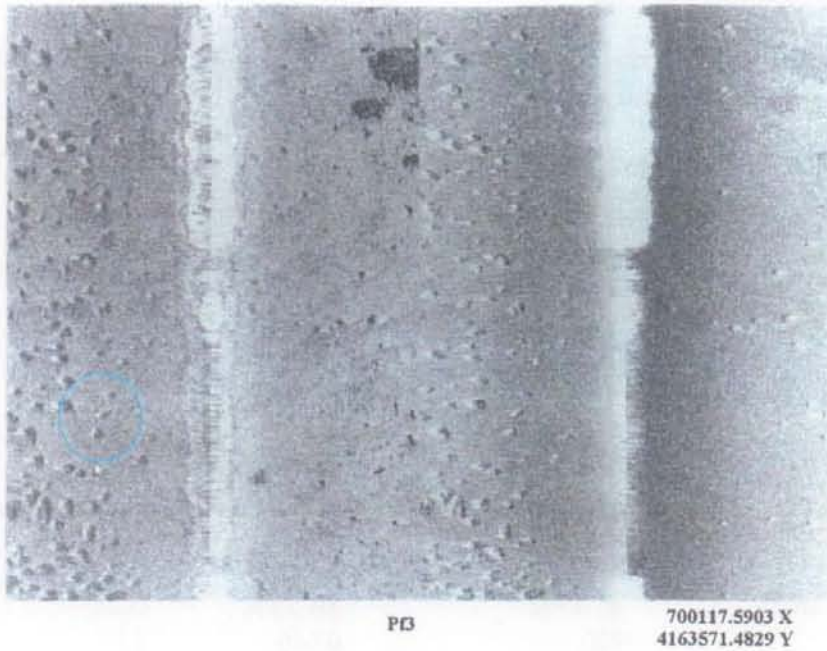


Figura 48



Figura 49



Po3_ly5

Figura 50

Figura 48 : sonografía original de 100 y 500 kHz ;

Figura 49: Foto submarina tomada en el círculo ;

Figura 50: clasificación de la imagen de forma independiente (con su propio training set)

6.3.1.3. Cymodocea

pf6.pcx (100 y 500 kHz, imagen original, Fig. 51, foto localizada en el círculo, ver Fig. 52)

X 700373.1055
Y 4163864.1888

(A) Nombre de la imagen: Cym1y5 (Fig. 53)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	total
cymodocea	88.22% 8364	9.90% 939	1.88 % 178	100% 3344
arena	3.36.% 208	96.64% 5988	0.0% 0	100% 7349

Media de fiabilidad = 92.43%

(B) Nombre de la imagen: Cymo1y5 (AAD)(Fig.54)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	posidonia	nulo	total
cym	20.09% 1262	42.49 % 2669	37.41 % 2350	00.00 0	100% 6281
arena	19.44% 1228	46.45% 2935	34.03% 2150	00.08 5	100% 6318
pos	15.77% 431	23.67% 647	60.56% 1655	00.00 0	100% 2733

Media de fiabilidad = 42.37%

Matriz de Confusión

	cymodocea	arena	nulo	total	%
cym	37537	41286	65876	144699	25.94
arena	36	53556	23896	77488	69.11
nulo	314	89	21992	22395	98.20
total	37887	94931	111764	244582	

(B) Nombre de la imagen: Cymo1 (usando sólo la frecuencia de 100 kHz) (AAD)
(Fig. 55)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	posidonia	nulo	total
cym	41.84%	49.05 %	9.11%	00.00	100
	2628	3081	572	0	6281
arena	40.98%	49.78%	9.24%	00.00	100
	2589	3145	584	0	6318
pos	44.53%	43.29%	12.18%	00.00	100
	1217	1183	333	0	2733

Media de fiabilidad = 34.60%

El área de *Cymodocea* muestra un resultado muy bueno en la clasificación (A), utilizando el training set muestreado en ella misma (Fig. 53), ya que la media de fiabilidad es 92.43%.

Al aplicar el training set del área de alta diversidad (B) aumenta la confusión, sobre todo si se usan las dos frecuencias (ver la Fig. 54). La mayor parte de la clase cymodocea se confunde con posidonia y arena, clasificándose correctamente sólo el 20% de los pixels. La media de fiabilidad baja notablemente, alcanzando un valor de 42.37%. Los valores de la Matriz de Confusión indican que del 20.09% de pixels clasificados como cymodocea, sólo el 25.94% eran correctos.

Usando sólo la imagen de 100 kHz (ver la Fig. 55), la confusión con posidonia disminuye, manteniéndose parcialmente con la arena y, el porcentaje de cymodocea bien clasificada, asciende al 41%. Por tanto, se recomienda el uso de la frecuencia de 100 kHz para evaluar las comunidades de *Cymodocea*. En ambos casos (B), la media de fiabilidad baja notablemente (oscilando alrededor del 40%) por lo que los mejores resultados, una vez más, se obtienen utilizando el training set de la propia imagen.

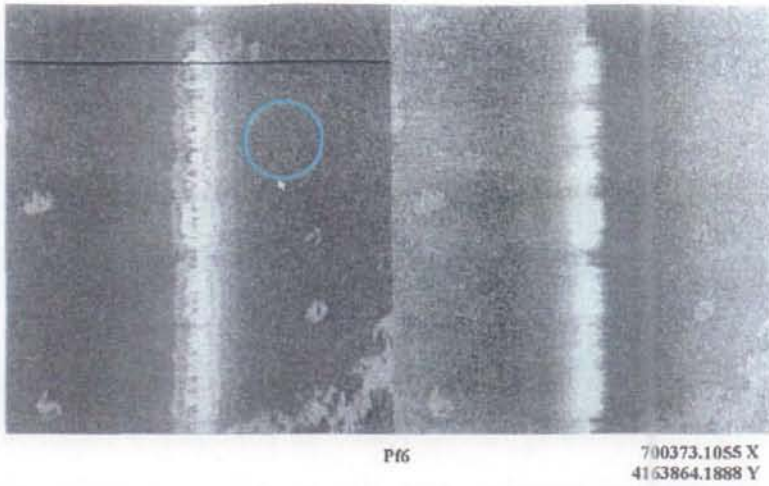


Figura 51



Figura 52



Figura 53

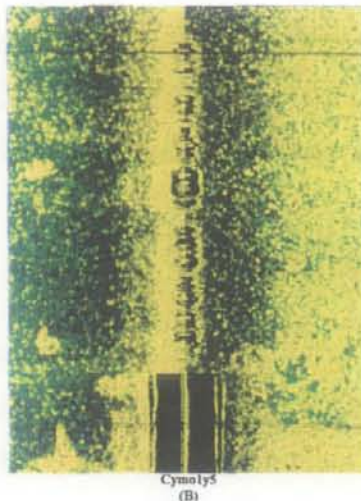


Figura 54

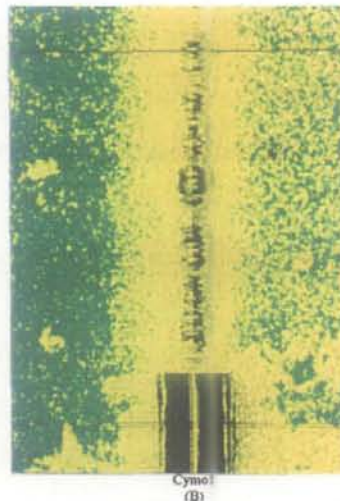


Figura 55

Figuras 51: 100 y 500 kHz, imagen original, **52:** foto submarina, **53:** clasificación de la imagen usando su propio training set, **54:** imagen clasificada usando el training set del área de alta diversidad, **55:** imagen clasificada utilizando únicamente la frecuencia de 100 kHz y el training set del área de alta diversidad.

6.3.2- Mosaicos de los Fondos Tipo

El mosaico se hizo siguiendo 2 metodologías:

- 1- Las imágenes previamente preprocesadas, se exportaron al equipo de tratamiento de imágenes, donde se les aplicó un realce de contraste y filtro. A continuación se unieron formando el mosaico, para ello se utilizó un módulo del programa que permite solapar un área común entre dos imágenes. Posteriormente, se igualan la media y la desviación típica de ambas imágenes. La ventaja de este sistema es que permite hacer mosaicos de zonas muy localizadas, cuyo interés ya se ha observado en las sonografías. La desventaja es que las imágenes, una vez exportadas del equipo de adquisición de sonografías, pierden la georeferenciación, por lo que la localización debe ser visual a base de puntos de control.

- 2- Se unen las sonografías (únicamente preprocesadas) que mantienen la georeferenciación de cada uno de los pixels, utilizando una facilidad del propio equipo de adquisición de imágenes sonar. Este sistema se basa en los datos de navegación que cada fichero lleva aparejado y que al igual que en el caso anterior, se pierde la georeferenciación al exportarlas, además, presenta la desventaja de introducir ruido en las imágenes finales generadas, ya que modifica el tamaño de los pixels al adecuarlos a su posición correcta, deformando la imagen resultante.

6.3.2.1 - Mosaicos de Imágenes Procesadas

Igual que en la sección anterior, en primer lugar, cada imagen (mosaico) se procesa independientemente, esto es, se le aplica el training set generado en cada una de ellas (tipo A). A continuación, cada imagen se procesa con el training set correspondiente al área de alta diversidad (AAD) y esta clasificación se marca como tipo (B), teniendo en cuenta que todas las imágenes tengan el mismo tamaño. Los resultados de estas clasificaciones se reflejan en los valores que presentan las Matrices de Error, que son comentadas a continuación.

Finalmente, la comparación entre los mapas resultantes de estas clasificaciones genera una Matriz de Confusión por cada Fondo Tipo donde se pueden observar los porcentaje de aciertos para cada clase (Stehman, 1992).

6.3.2.1.1.- Posidonia

(A) Nombre de la imagen : botpos15, Fig. 56

Matriz de Error

	posidonia	arena	nulo	total
posidonia	82.34%	17.63%	00.03%	100.00%
	3021	647	1	3669
arena	15.13%	84.57%	00.29%	100.00%
	1544	8630	30	10204

Media de Fiabilidad = 83.46%

(B) Nombre de la imagen : posidon, (AAD) , Fig. 57

Matriz de Error

	cymodocea	posidonia	arena	nulo	total
cymo	7.26%	48.66%	44.08%	00.00%	100%
	311	2085	1889	0	4285
posid	5.90%	47.90%	46.20%	00.00%	100%
	90	731	711	0	1526
arena	6.53%	41.24%	52.23%	00.00%	100%
	154	972	1231	0	2357

Media de fiabilidad = 35.80%

Matriz de Confusión

	posidonia	arena	nulo	total	%
posid.	139598	22359	10	161967	86.19
arena	2047	176936	1679	180662	97.94
nulo	9773	38412	2670	50855	5.25
total	151418	237707	4359	393484	62.67

La Matriz de Error que corresponde a la clasificación de la imagen con el training set generado en ella misma (A) ofrece un buen resultado de fiabilidad (83.46%) (ver Fig. 56). Dicha medida baja a 35.80% al aplicarle a la imagen original el training set del área de alta diversidad (AAD) (clasificación B). Este resultado introduce una gran confusión en la imagen, como se puede observar en la Fig. 57. La Matriz de Error correspondiente a esta

clasificación sólo reconoce un 47.9% de la clase posidonia y de esta cifra, un 86.19% son correctos según presenta la Matriz de Confusión.

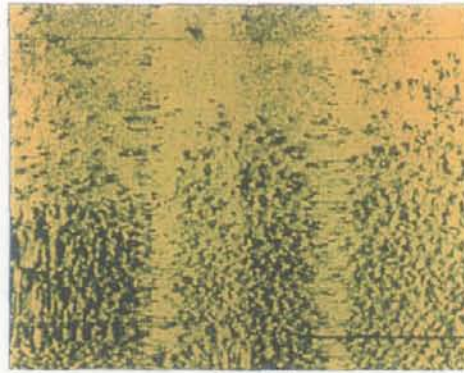


Figura 56

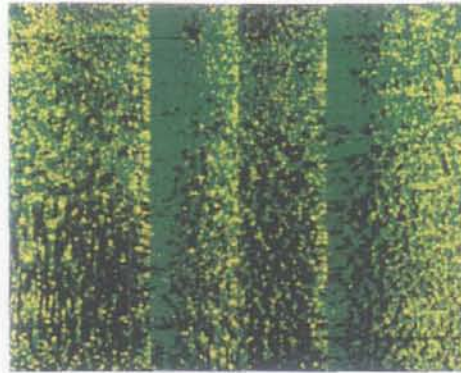


Figura 57

Figura 56 : Imagen clasificada con su propio training set;

Figura 57 : Imagen clasificada utilizando el training set generado en el Area de Alta Diversidad (AAD)

6.3.2.1.2 - Cymodocea

(A) Nombre de la imagen : botcym15, Fig. 58

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	total
cymodocea	80.91 % 10.143	19.09% 2393	00.00% 0	100.00% 12536
arena	10.20% 576	88.33% 4987	1.47% 83	100.00% 5646

Media de fiabilidad = 84.62%

(B) Nombre de la imagen : cymodo, (AAD) Fig. 59

Matriz de Error

	cymodocea	posidonia	arena	nulo	total
cymo	21.24% 910	41.70% 1787	37.06% 1588	00.00% 0	100% 4285
posid	15.99% 244	46.85% 715	37.16% 567	00.00% 0	100% 1526
arena	18.50% 436	39.67% 935	41.83% 986	00.00% 0	100% 2357

Media de fiabilidad = 36.64%

Matriz de Confusión

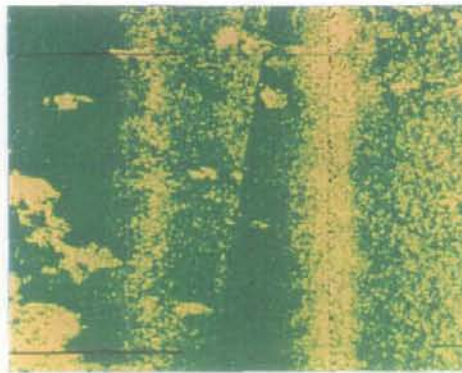
	cymodocea	arena	nulo	total	%
cym	62972	101140	435	164547	38.27
arena	72882	9853	1701	84436	11.67
nulo	141685	285	2531	144501	1.75
total	277539	111278	4667	393484	

En el Fondo Tipo Cymodocea sucede igual que en el Fondo Tipo previamente comentado. Los mejores resultados se obtienen al aplicarse a la imagen original su propio training set (fiabilidad de 84.62%) (A). Un 80.91% se clasifica como cymodocea y un 19% de los pixels se confunden con la clase arena. De la clase arena tambien se obtiene un porcentaje

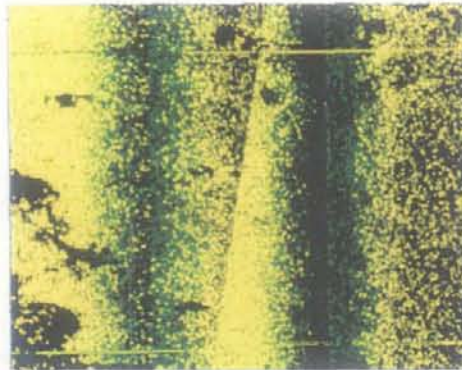
alto (88.33%). La imagen resultante (Fig. 58) muestra claramente las áreas densamente pobladas por *Cymodocea*, apareciendo una cierta confusión en zonas de fondo más despejado.

Estos valores cambian notablemente al aplicar a la misma imagen el training set del área de alta diversidad (**B**) (Fig. 58). La fiabilidad baja a 36.64% y los pixels correspondientes a *cymodocea* se confunden con los de las clases posidonia (41.70%) y arena (37.06%). La Matriz de Confusión muestra que del bajo porcentaje de la clase *cymodocea* reconocido en la matriz de tipo (**B**), sólo un 38.27% son acertados.

La imagen resultante de esta segunda clasificación es muy confusa, ya que la clase arena (que debería ir en amarillo) se confunde cuando ocupa cierta extensión con las clases *cymodocea* y *posidonia*. Como esta confusión no es por igual en las dos imágenes que componen el mosaico, el efecto resultante en la imagen final es una diagonal que en realidad es inexistente.



Botcym15

Figura 58

Cymodo

Figura 59

Figura 58: Imagen del Fondo Tipo *Cymodocea* clasificada con su propio training set;

Figura 59: Imagen del mismo Fondo Tipo, clasificada utilizando el training set generado en el Area de Alta Diversidad (**AAD**)

6.3.2.1.3 - Arena

(A) Nombre de la imagen botare15, Fig. 61

Matriz de Error				
	arena	arena- 1	nulo	total
arena	85.70%	13.66%	00.64%	100.00%
	8808	1404	66	10278
arena- 1	09.34%	90.53%	00.13%	100.00%
	596	5774	8	6378
Media de fiabilidad = 88.11%				

(B) Nombre de la imagen : arena, AAD, Fig. 62

Matriz de Error					
	cymodocea	posidonia	arena	nulo	total
cymo	56.76%	10.48%	32.77%	00.00%	100%
	2432	449	1404	0	4285
posid	39.06%	23.00%	37.94%	00.00%	100%
	596	351	579	0	1526
arena	34.54%	13.58%	51.89%	00.00%	100%
	814	320	1223	0	2357
Media de fiabilidad = 43.88%					

Matriz de Confusión				
	arena	nulo	total	%
arena	43979	348262	392241	11.21
nulo	31	1212	1243	97.51
total	44010	349474	393484	

El Fondo Tipo Arena corresponde con una zona arenosa sin vegetación, como muestra la foto submarina (ver Fig. 60). Dicha imagen se incluye para mostrar los dos tipos de arena presentes en el área, una arena de fracción gruesa constituida por conchas (arena-1) y una de textura más fina (arena). La arena-1, menos abundante, se separa bien de la arena fina, que se reconoce como tal en un 85.70%. La Matriz de Error da una fiabilidad de 88.11%. Esta

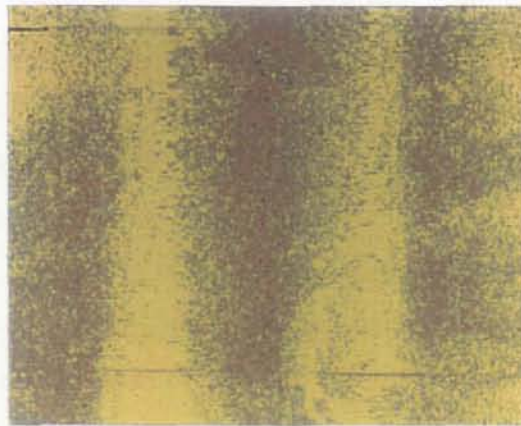
separación es en realidad ficticia, ya que la arena de fracción gruesa se encuentra en una proporción muy pequeña, y al disminuir la escala de detalle se pierde esta diferenciación.

La clasificación realizada sobre la imagen aplicando su propio training set (A) aparece con cierta confusión, originada por el método que se ha seguido al hacer el mosaico (ver Fig. 61). A este efecto hay que unir los cambios en los niveles de gris que están producidos por la ganancia del sensor. En la parte central, donde se ha eliminado la columna de agua durante el preprocesado, permanece una zona de respuesta más clara que formando una banda longitudinal. Estas diferencias en los niveles radiométricos introducen numerosos errores a la hora de interpretar la imagen resultante al ser todo el fondo es realmente homogéneo.

Este tipo de mosaico, al aplicársele la clasificación tipo (B), utilizando el training set del área de alta diversidad (AAD), debería de reconocer sólo la clase arena, mientras que las otras dos clases deberían aparecer como no existentes. La Matriz de Error de esta clasificación "reconoce" a la clase cymodocea en un 56.76% y a la clase posidonia en un 23.0%. Estos valores, al ser falsos, introducen aún mas confusión en la imagen resultante, como se observa en la Fig. 62.



Figura 60



Botare15

Figura 61



Arena

Figura 62

Figura 60 : foto submarina correspondiente al Fondo Tipo Arena ;

Figura 61 : sonografía clasificada usando su propio training set;

Figura 62 : sonografía del mosaico del Fondo Tipo clasificada con el training set del Area de Alta Diversidad.

En resumen, los resultados de aplicar clasificaciones a imágenes previamente unidas formando un mosaico no son satisfactorios al aumentar la confusión entre clases, como se refleja en las Matrices de Error. Este problema no es debido a la metodología porque es la misma que se utilizó con las fotos obteniendo buenos resultados (en el Área de Alta Diversidad se pudieron reconocer la mayor parte de las especies).

El problema surge cuando se procesan los Fondos Tipo enteros, es decir, después de hacer el mosaico. Los casos estudiados corresponden al registro de dos imágenes para hacer el mosaico del Fondo Tipo completo. Las imágenes unidas se escogieron tomando sonografías con la menor distorsión posible, adquiridas en condiciones semejantes. Se puede observar que al unir estas imágenes aparecen una serie de variables que inciden fuertemente en la respuesta acústica de los píxeles que comprenden cada clase. Entre estas variables, parece ser que la más importante es la iluminación del sensor, por lo que se procederá a hacer un estudio comparativo de imágenes a continuación (denominado validación cruzada). Así mismo, es fundamental resaltar la diferente respuesta acústica dada por el mismo Fondo Tipo. Como el proceso de la clasificación está basado en los valores digitales de cada píxel, estos errores implican que un mismo Fondo Tipo quede clasificado con diferentes clases. Como el training set contiene todas las clases que se pueden encontrar en cada Fondo Tipo, la clasificación obtenida no es satisfactoria.

La conclusión de este apartado es que, las clasificaciones basadas únicamente en los parámetros estadísticos de los valores digitales de la imagen dan como resultado un mapa con alta confusión entre clases.

De los resultados vistos hasta ahora se puede concluir que el mosaico (realizado por el primer tipo de metodología) debería ser interpretado y clasificado utilizando imágenes originales o filtradas. Los diferentes Fondos Tipo pueden ser clasificados más tarde, considerando sus características independientemente y buscando una metodología que puede ser o no inherente a cada uno.

La consecuencia natural de esta sección es realizar el mosaico con la segunda metodología propuesta, como se muestra a continuación.

6.3.2.2 - Mosaicos de Sonografías Preprocesadas

Para hacer el mosaico se tomaron las líneas que componían cada Fondo Tipo de forma aislada. El programa implementado en el equipo de adquisición de imágenes de sonar para hacer mosaicos, remodela en primer lugar el tamaño de los pixels, colocando cada uno (georeferenciado) sobre un eje de coordenadas que sigue las líneas de navegación. Como se disponían de numerosos datos de cada Fondo Tipo para hacer el mosaico de esta manera, se escogieron aquéllas que eran paralelas y tenían la misma dirección de iluminación, de manera que ésta distorsionara el mosaico lo menos posible.

El mosaico resultante, cuyos ejemplos se muestran a continuación en las Figuras 63, 64 y 65, presenta el mismo patrón de distribución y la misma textura que el realizado en el laboratorio de análisis de imágenes, aunque la calidad de las imágenes no ha podido ser previamente mejorada. La desventaja que presentan estos mosaicos es que la herramienta empleada introduce deformaciones en la imagen debida los movimientos del barco (cabeceo, balanceo, etc), por lo que es muy complicado procesar dichos mosaicos *a posteriori*.

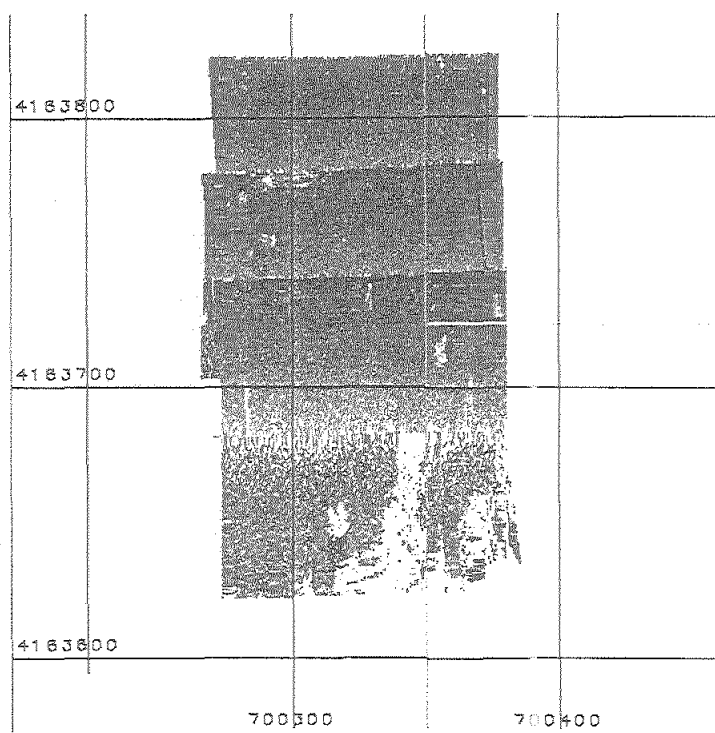


Figura 63: Mosaico del Fondo Tipo Cymodocea

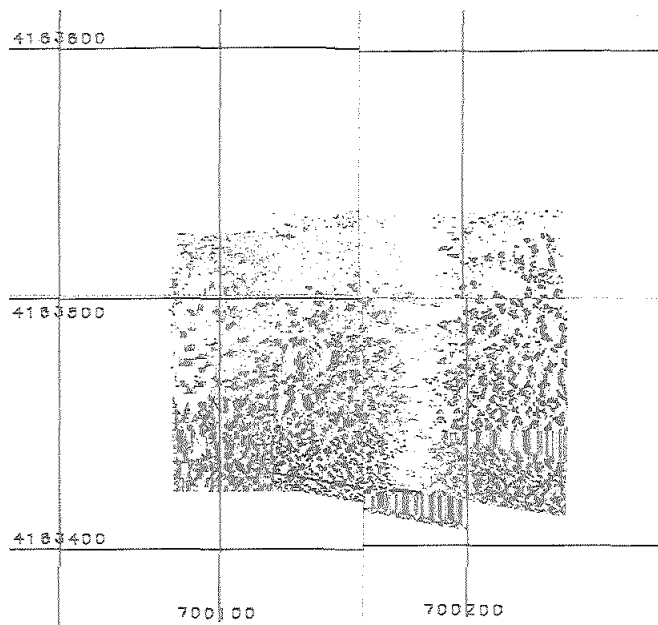


Figura 64 : Mosaico del Fondo Tipo Posidonia

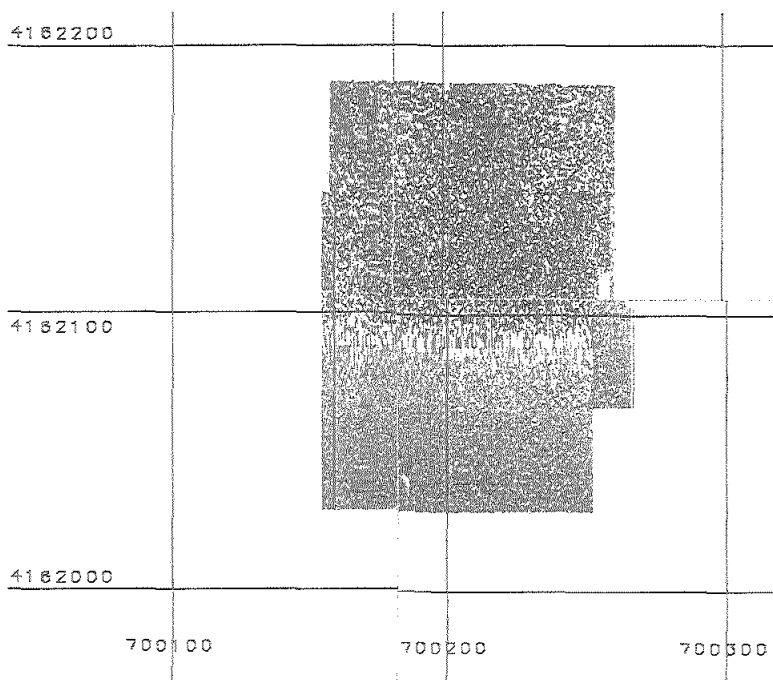


Figura 65 : Mosaico del Fondo Tipo Arena

6.3.3 - Validación cruzada. Verificación de los datos obtenidos

Hasta el momento se ha comentado la metodología más adecuada para procesar e interpretar las sonografías. Asimismo se ha hablado de los principales problemas que presentan, la mayor parte de los cuales son inherentes a su propia naturaleza. En efecto, al ser obtenidas las imágenes por un sensor activo (sonar de barrido lateral) desde un barco en movimiento, hay que tener en cuenta una serie de variables aparte de las ya mencionadas, a la hora de validar los resultados por estudios comparativos. Un efecto muy importante ya comentado al hablar de las clasificaciones es el producido por la iluminación de la sonografía. Cada vez que un pulso acústico se encuentra con un obstáculo (ya sea una planta, roca, o cualquier otro objeto con relieve) en la parte de atrás aparece un vacío de señal que se denomina sombra.

Dado que las derrotas del barco se navegan en diferentes direcciones, al comparar las imágenes obtenidas, las sombras que aparecen no presentan la misma dirección ni igual tamaño, provocando una gran confusión en cualquier procesado comparativo de imágenes.

Para evaluar exactamente este fenómeno se planteó la realización de un estudio de Validación Cruzada, que consiste en un procesado comparativo de imágenes correspondientes a un mismo punto del fondo (localizado por coordenadas), extraídas de sonografías tomadas en diferentes direcciones y con distinto sentido. Este estudio se ha realizado en los Fondos Tipo y, cuando ha sido posible, se han utilizado las obtenidas en las cuatro direcciones del compás.

Se aplicó la metodología estándar a cada una de las imágenes procedentes de cada transecto, aunque en el caso del Fondo Tipo de Cymodocea, debido a su selectividad acústica, se ha procesado además utilizando una sola frecuencia (100 kHz). Todas las imágenes del mismo Fondo Tipo se han cortado con el mismo tamaño para poderlas comparar utilizando el mismo training set, correspondiente a una de ellas.

La validación cruzada consiste, por tanto, en realizar una clasificación en una de las direcciones y aplicar el training set resultante a las otras para obtener el porcentaje de reconocimiento. A continuación de cada operación, se comparan los mapas resultantes mediante la Matriz de Confusión.

En cada Fondo Tipo se muestra un esquema con la dirección de los transectos. Las líneas elegidas para extraer las imágenes están marcadas con una flecha que a su vez indica la

dirección del transecto, acompañada por dos letras que definen cada imagen. Cada derrota viene acompañada de una serie de números, denominados fixes, cuyas coordenadas se conocen exactamente. Los correspondientes a la zona estudiada se han marcado en cada figura en rojo, y forman parte del nombre de la imagen correspondiente.

6.3.3.1 - Arena (100 y 500 kHz)

La clasificación se ha basado en 2 clases (arena y otras) usando 100 y 500 kHz.

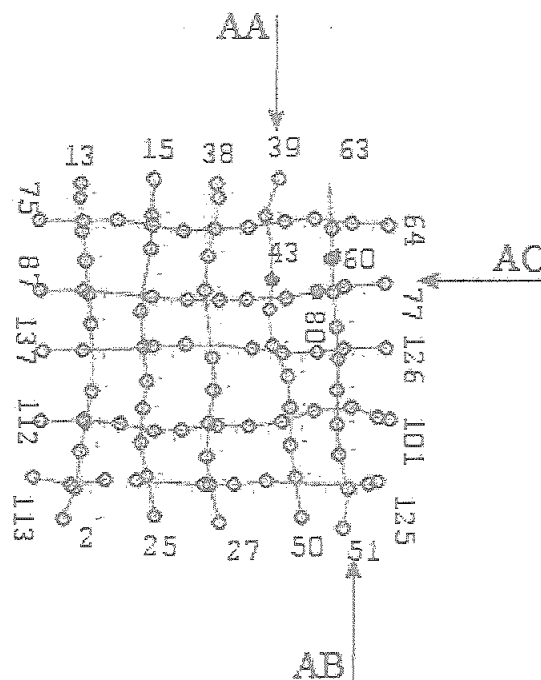


Figura 66: Derrotas correspondientes al Fondo Tipo de Arena

El training set correspondiente a la imagen de AA (Ps1b43) se aplicó a las sonografías correspondientes a las otras direcciones (AC y AB, respectivamente)

AA arena43

Matriz de Error

	arena	otras	nulo	Total
arena	96.54 % 14024	03.28 % 477	00.17 % 25	100.00 % 14526
otras	02.43 % 6	93.12 % 230	04.45 % 11	100.00 % 247

 Media de fiabilidad = 94.83 %
AB (arena60)

Matriz de Error

	arena	otros	nulo	Total
arena	61.70 % 8963	38.27 % 5559	00.03 % 4	100.00 % 14526
otros	28.34 % 70	70.45 % 174	01.21 % 3	100.00 % 247

 Media de fiabilidad = 66.07 %

Matriz de Confusión

	arena	otros	nulo	Total	%
arena	40731	62821	49	103601	39.31
otros	36752	5432	1662	43846	12.39
nulo	306	410	3167	3883	81.56
Total	77789	68663	4878	151330	

AC (arena80)

Matriz de Error

	arena	otros	nulo	Total
arena	74.86 % 10874	25.12 % 3649	00.02 % 3	100.00 % 14526
otros	19.03 % 47	79.76 % 197	01.21 % 3	100.00 % 247

 Media de fiabilidad = 77.31 %

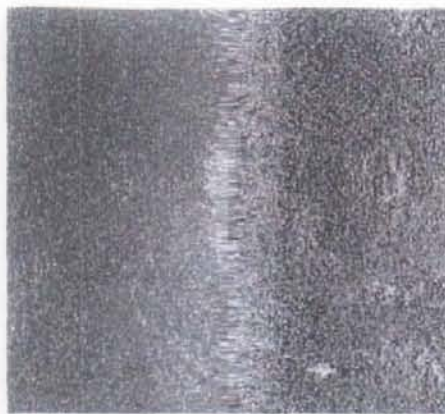
Matriz de Confusión

	arena	otros	nulo	Total	%
arena	25105	88139	5	113249	22.17
otros	27295	5125	697	33117	15.47
nulo	1077	747	3140	4964	63.25
Total	53477	94011	3842	151330	

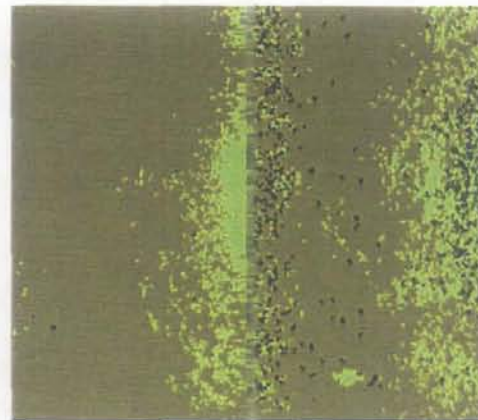
Se separan dos clases, arena (en color marrón) y otros (amarillo). Los pixels sin clasificar aparecen de color negro (ver Fig. 67). La imagen muestra un fondo de arena pura con texturas diferentes, como se aprecia en la foto submarina de dicho fondo (Figura 60). En la mayor parte de las imágenes (originales y clasificadas) aparece una banda brillante (a veces en forma de cruz) que corresponde a arrecifes artificiales (ver Fig. 67).

El training set fue generado a partir de la imagen AA. Al aplicarlo en ella misma, la media de fiabilidad fue de 94.83%. Cuando se aplicó a la imagen AB, que se tomó en sentido opuesto, el valor medio de fiabilidad descendió hasta 66.07%. Por último este training set se aplicó a la imagen tomada perpendicularmente AC, y en este caso los valores de media de fiabilidad subieron hasta 77.3%. La explicación puede estar ligada al hecho de que la escena AC se corresponde prácticamente con el mismo área que AA, mientras que AB se tomó a 30 ó 40 m de ellas.

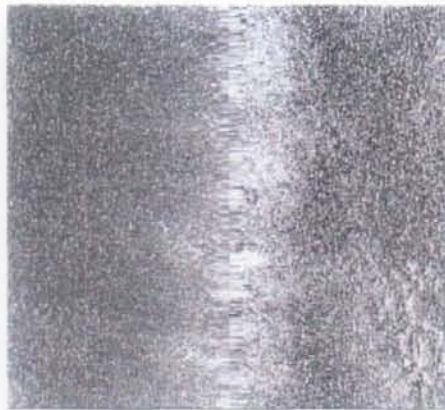
El Fondo Tipo de arena no muestra una estructura marcada ni topografía fuerte y, por tanto, la dirección del transecto no tiene demasiada importancia. Esto se puede observar en los resultados ya que los valores de fiabilidad son aceptables en todas las direcciones del compás, aunque los mejores resultados sean los de aplicar el training set a la imagen de donde se han definido.



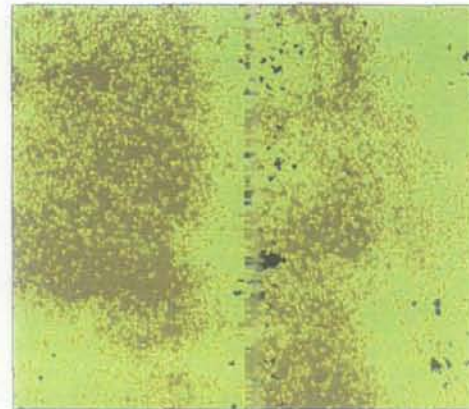
Ps1b43



Arena43(AA)



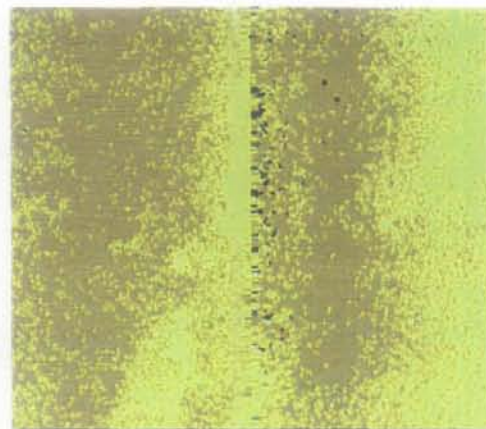
Ps1s60



Arena60(AB)



Ps1i80



Arena80(AC)

Figura 67: Columna de la izquierda, sonografías originales en las tres direcciones disponibles, con sus respectivas clasificaciones a la derecha.

6.3.3.2 - Cymodocea (100 y 500 kHz)

La clasificación se ha basado en 2 clases, cymodocea y arena, usando 100 y 500 kHz.

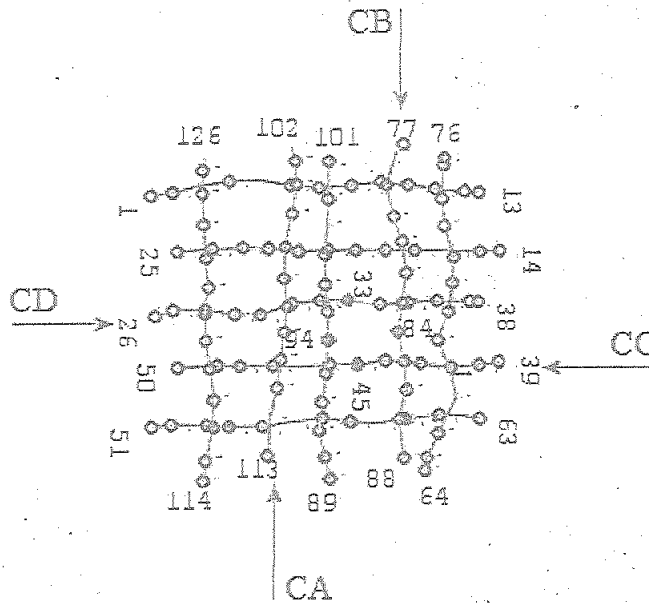


Figura 68: Derrotas del Fondo Tipo Cymodocea

El training set originado en la imagen de la dirección CA se aplicó al resto de las sonografías.

CA (cymodo94)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	Total
cymodocea	93.02 %	05.70 %	01.28 %	100.00 %
	15133	928	208	16269
arena	04.04 %	95.91 %	00.05 %	100.00 %
	85	2018	1	2104

Media de fiabilidad = 94.46 %

CB (cymodo84)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	Total
cymodocea	70.29 % 11436	29.57 % 4810	00.14 % 23	100.00 % 16269
arena	36.07 % 759	63.93 % 1345	00.00 % 0	100.00 % 2104

Media de fiabilidad = 67.11 %

Matriz de Confusión

	cymodocea	arena	nulo	total	%
cymo	76962	23740	5	100707	76.42
arena	6652	29495	53	36200	81.48
nulo	4652	823	3631	9106	39.87
total	88266	54058	3689	146013	

CC (cymodo45)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	total
cymodocea	61.94 % 10077	37.89 % 6164	00.17 % 28	100.00 % 16269
arena	36.60 % 770	63.40 % 1334	00.00 % 0	100.00 % 2104

Media de fiabilidad = 62.67 %

Matriz de Confusión

	cymodocea	arena	nulo	total	%
cymo	64177	35196	3	99376	64.58
arena	17305	24716	52	42073	58.74
nulo	1073	423	3068	4564	67.22
total	82555	60335	3123	146013	

CD (cymodo33)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	Total
cymodocea	68.47 % 11140	31.16 % 5070	00.36 % 59	100.00 % 16269
rena	36.41 % 766	63.50 % 1336	00.10 % 2	100.00 % 2104

Media de fiabilidad = 65.99 %

Matriz de Confusión

	cymodocea	arena	nulo	total	%
cymo	71181	28387	11	99579	71.48
arena	12959	27679	178	40816	67.81
nulo	2123	214	3281	5618	58.40
total	86263	56280	3470	146013	

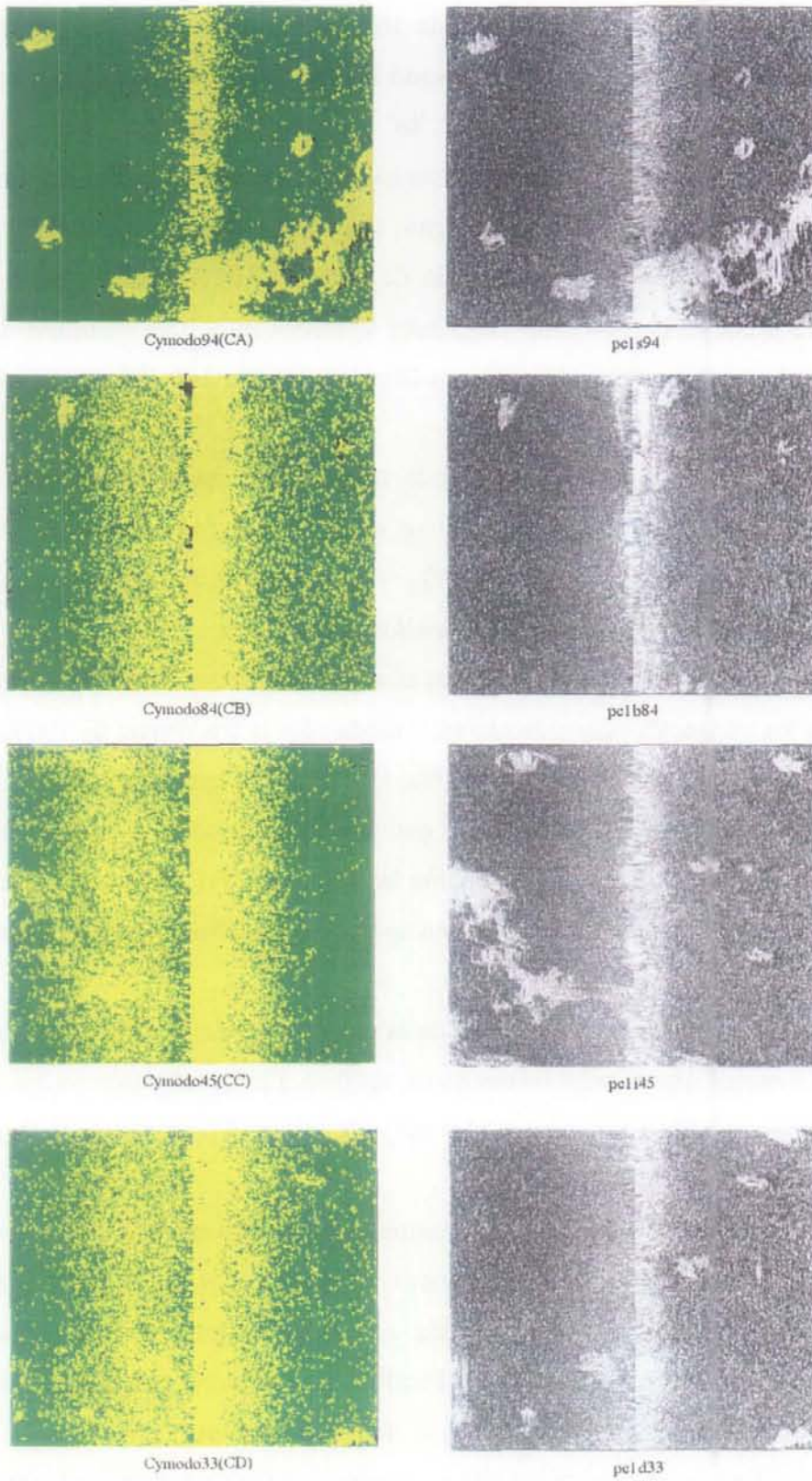


Figura 69 : sonografías originales e imágenes clasificadas usando 100 y 500 kHz

Las plantas de *Cymodocea nodosa* tienen un comportamiento acústico característico; se ven muy nítidas en la imagen de la frecuencia de 100 kHz mientras que en la de 500 kHz apenas son visibles. Por este motivo, se han llevado a cabo dos clasificaciones, una usando ambas frecuencias y otra utilizando sólo la de 100 kHz. Los resultados de ambas clasificaciones se van a comentar de forma conjunta para apreciar mejor las diferencias.

Los resultados más satisfactorios se obtuvieron al aplicar el training set sobre la imagen muestreada (CA), (ver Fig. 69), con una media de fiabilidad de 94.46%, usando las dos frecuencias y 95.13% con la de 100 kHz. Las clases aparecen muy bien definidas desde un punto de vista visual (ver Fig. 69 y 70), principalmente en la de 100 kHz, donde la arena presenta bordes muy nítidos.

El mismo training set aplicado en el sentido opuesto muestra una caída en el valor medio de fiabilidad, que es del 67.11% cuando se usan las dos frecuencias, mientras que usando sólo la de 100 kHz este valor es de 73.59%. Visualmente la clase cymodocea no está muy clara pues aparece con un fino moteado, en ambos casos.

Los valores medios de fiabilidad descienden aún mas cuando se clasifican las imágenes correspondientes a los transectos perpendiculares. Usando sólo la frecuencia de 100 kHz, este descenso es un poco menos acusado (CC 69.59%, CD 68.26%) que si se utilizan las dos frecuencias (CC 62.67%, CD 65.26%). La clase que aparece más confusa es la cymodocea. Esto se produce porque al clasificar conjuntamente las frecuencias de 100 y 500 kHz, como en esta última la pradera de *Cymodocea nodosa* no aparece bien definida, se introduce mucha confusión en el proceso de clasificación.

Hay que destacar el buen resultado visual de la imagen CC de 100 kHz frente a la CC usando las dos frecuencias, que es notablemente más confuso. La mancha arenosa que aparece en el canal de babor se mantiene con unos bordes muy nítidos en el primer caso, mientras que es irreconocible en el segundo.

La matriz de confusión resultante de la comparación de los mapas CA y CB muestra que de los pixels asignados a las clases cymodocea y arena en CB, un 76.42% y 81.48%, respectivamente, son correctos. Estos resultados son mejores que los obtenidos en la comparación con los mapas CD y CC. En este Fondo Tipo los valores de fiabilidad se ven más afectados por el cambio de dirección que por el cambio de sentido.

En ambas clasificaciones se observa que el número de pixels no clasificados (nulos) es bastante bajo.

La Matriz de Confusión obtenida de la comparación de CA y CB, utilizando sólo 100 kHz, muestra que de los pixels reconocidos como cymodocea y arena, un 93.57% y 91.31%, respectivamente, son correctos. Estos resultados se reflejan en el mapa obtenido (ver Fig. 70), donde se observa la buena separación entre clases, aunque la clase cymodocea presente un ligero moteado.

Usando sólo la frecuencia de 100 kHz los porcentajes de aciertos se mantienen mas elevados (siempre por encima del 90% para cymodocea y arena), que los obtenidos en las clasificaciones utilizando las dos frecuencias, como se puede observar en los mapas correspondientes (ver Fig. 69 y 70).

6.3.3.3 - Cymodocea (100 kHz)

Clasificación basada en 2 clases (cymodocea y arena) usando la frecuencia de 100 kHz. El training set se obtuvo de la imagen CA.

CA (cymo1_94)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	Total
cymodocea	94.21 % 22169	04.48 % 1055	01.31 % 308	100.00 % 23532
arena	03.94 % 128	96.06 % 3120	00.00 % 0	100.00 % 3248
Medida de fiabilidad = 95.13 %				

CB (cymo1_84)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	Total
cymodocea	75.24 % 17705	24.69 % 5809	00.08 % 18	100.00 % 23532
arena	28.05 % 911	71.95 % 2337	00.00 % 0	100.00 % 3248
Medida de fiabilidad = 73.59 %				

Matriz de Confusión

	cymodocea	arena	nulo	Total	%
cymodocea	94662	6496	4	101162	93.57
arena	3434	36119	5	39558	91.31
nulo	2091	2	3200	5293	60.46
total	10018	4261	320	14601	

CC (cymo1_33)

Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	Total
cymodocea	71.87 % 16913	28.06 % 6603	00.07 % 16	100.00 % 23532
arena	32.70 % 1062	67.30 % 2186	00.00 % 0	100.00 % 3248

Medida de fiabilidad = 69.59 %

Matriz de Confusión

	cymodocea	arena	nulo	Total	%
cymodocea	87832	9449	3	97284	90.28
arena	3162	40273	6	43441	92.71
nulo	2101	27	3160	5288	57.96
total	9309	4974	316	14601	

CD (cymo1_45)

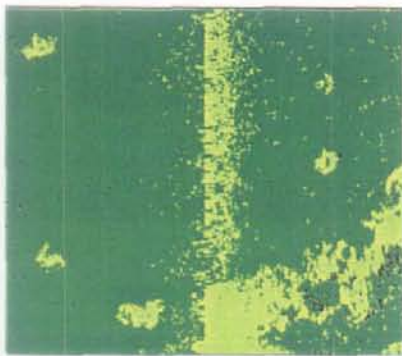
Matriz de Error

	cymodocea	arena	nulo	Total
cymodocea	73.53 % 17304	26.46 % 6227	00.00 % 1	100.00 % 23532
arena	37.01 % 1202	62.99 % 2046	00.00 % 0	100.00 % 3248

Medida de fiabilidad = 68.26 %

Matriz de Confusión

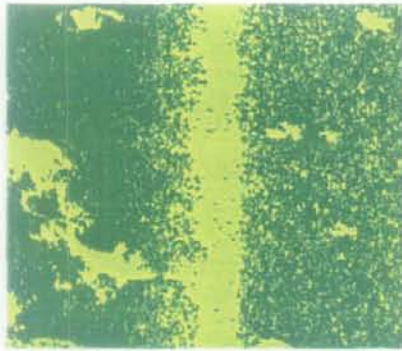
	cymodocea	arena	nulo	Total	%
cymodocea	88725	9864	2	98591	90.00
arena	2339	41882	3	44224	94.70
nulo	110	20	3068	3198	95.93
total	9117	5176	307	14601	



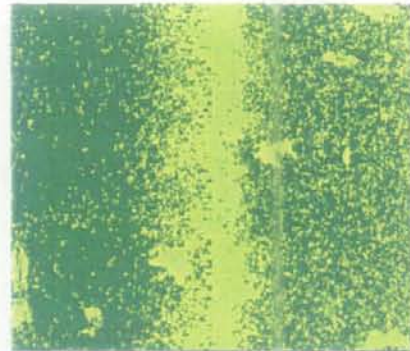
Cymol_94(CA)



Cymol_84(CB)



Cymol_45(CC)



Cymol_33(CD)

Figura 70: Imágenes clasificadas utilizando la frecuencia de 100 kHz

6.3.3.4 - Posidonia (100 v 500 kHz)

Clasificación basada en 2 clases (posidonia y arena) usando 100 y 500 kHz. El training set se tomó de la imagen PA aplicándose después a las demás direcciones :

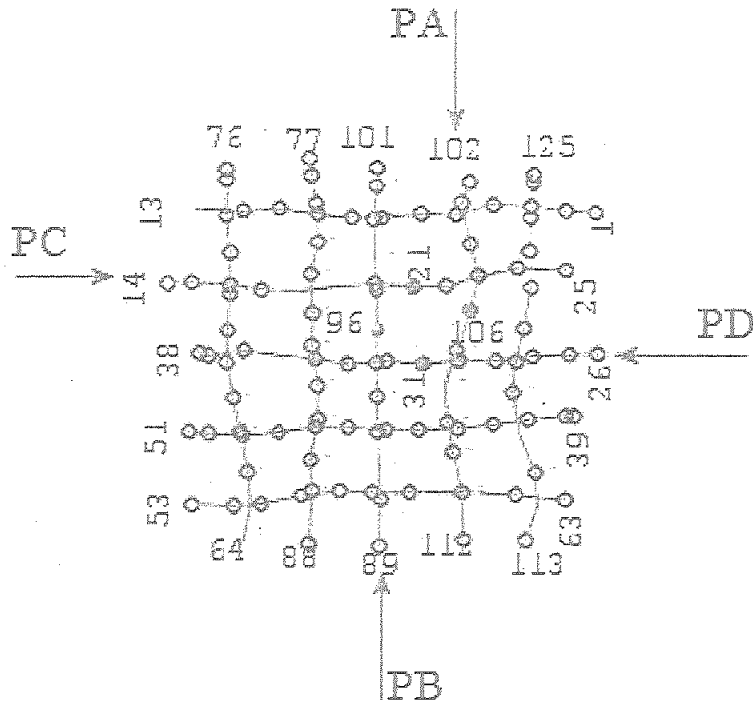


Figura 71: Derrotas correspondientes al Fondo Tipo Posidonia

PA (posid106)

Matriz de Error

	posidonia	arena	nulo	Total
posidonia	83.06 % 1608	15.29 % 296	01.65 % 32	100.00 % 1936
arena	11.18 % 298	88.67 % 2363	00.15 % 4	100.00 % 2665

Medida de fiabilidad = 85.86 %

PB (posid96)

Matriz de Error

	posidonia	arena	nulo	Total
posidonia	67.77 % 1312	31.77 % 615	00.46 % 9	100.00 % 1936
arena	35.50 % 946	62.66 % 1670	01.84 % 49	100.00 % 2665

Medida de fiabilidad = 65.22 %

Matriz de Confusión

	posidonia	arena	nulo	Total	%
posidonia	12062	68752	1711	82525	14.62
arena	56298	5134	0	61432	8.36
nulo	70	67	3146	3283	95.83
Total	68430	73953	4857	147240	

PC (posid21)

Matriz de Error

	posidonia	arena	nulo	Total
posidonia	68.70 % 1330	29.24 % 566	02.07 % 40	100.00 % 1936
arena	49.79 % 1327	49.38 % 1316	00.83 % 22	100.00 % 2665

Medida de fiabilidad = 59.04 %

Matriz de Confusión

	posidonia	arena	nulo	Total	%
posidonia	20684	45792	3747	70223	29.45
arena	52238	14903	5	67146	22.19
nulo	9	6674	3188	9871	32.30
Total	72931	67369	6940	147240	

PD (posid31)

Matriz de Error

	posidonia	arena	nulo	Total
posidonia	64.20 % 1243	34.76 % 673	01.03 % 20	100.00 % 1936
arena	47.09 % 1255	49.98 % 1332	02.93 % 78	100.00 % 2665

Medida de fiabilidad = 57.09 %

Matriz de Confusión

	posidonia	arena	nulo	Total	%
posidonia	16015	64070	273	80358	19.93
arena	54441	3800	1	58242	6.52
nulo	641	4331	3668	8640	42.45
Total	71097	72201	3942	147240	

Las plantas de *Posidonia oceanica* tienen una fuerte respuesta acústica asociada a un vacío de señal causado por la sombra que producen. Estos fondos presentan una estructura muy definida debido al tamaño y distribución de las plantas. Las clasificaciones están basadas en dos clases: posidonia y arena, que aparecen en la imagen clasificada en verde y amarillo, respectivamente. La clase arena (en tonos claros) incluye las sombras (en blanco) de las plantas que aparecen como matas aisladas.

El training set se obtuvo de la imagen PA y, al aplicarlo sobre ella misma, la media de fiabilidad fue de 85.86 %. La imagen resultante mostraba una buena separación entre clases, desde el punto de vista visual (ver Fig. 72). Este mismo training set aplicado a la imagen PB tuvo un valor medio de fiabilidad de 65.22 %, apareciendo las clases medianamente diferenciadas pero con los colores invertidos, la arena en verde y la posidonia en amarillo. La Matriz de Confusión corrobora estos resultados, pues, de los pixel clasificados como posidonia y arena, sólo un 14.62% y 8.36%, respectivamente, son correctos.

Con las imágenes tomadas en la perpendicular, el valor medio de fiabilidad cae mas, así para la PC fue de 59.04 % y para la PD de 57.09 %. Estas imágenes presentan una gran confusión entre clases. En la primera, la estructura de *P. oceanica* se aprecia débilmente,

mientras que en la segunda los colores aparecen cambiados aunque la estructura granulosa de *P. oceanica* se distingue bien. En ambas clasificaciones, los valores de reconocimiento de las clases que aparecen en la Matriz de Confusión son muy bajos, sobre todo en la PD que no se supera el 20%.

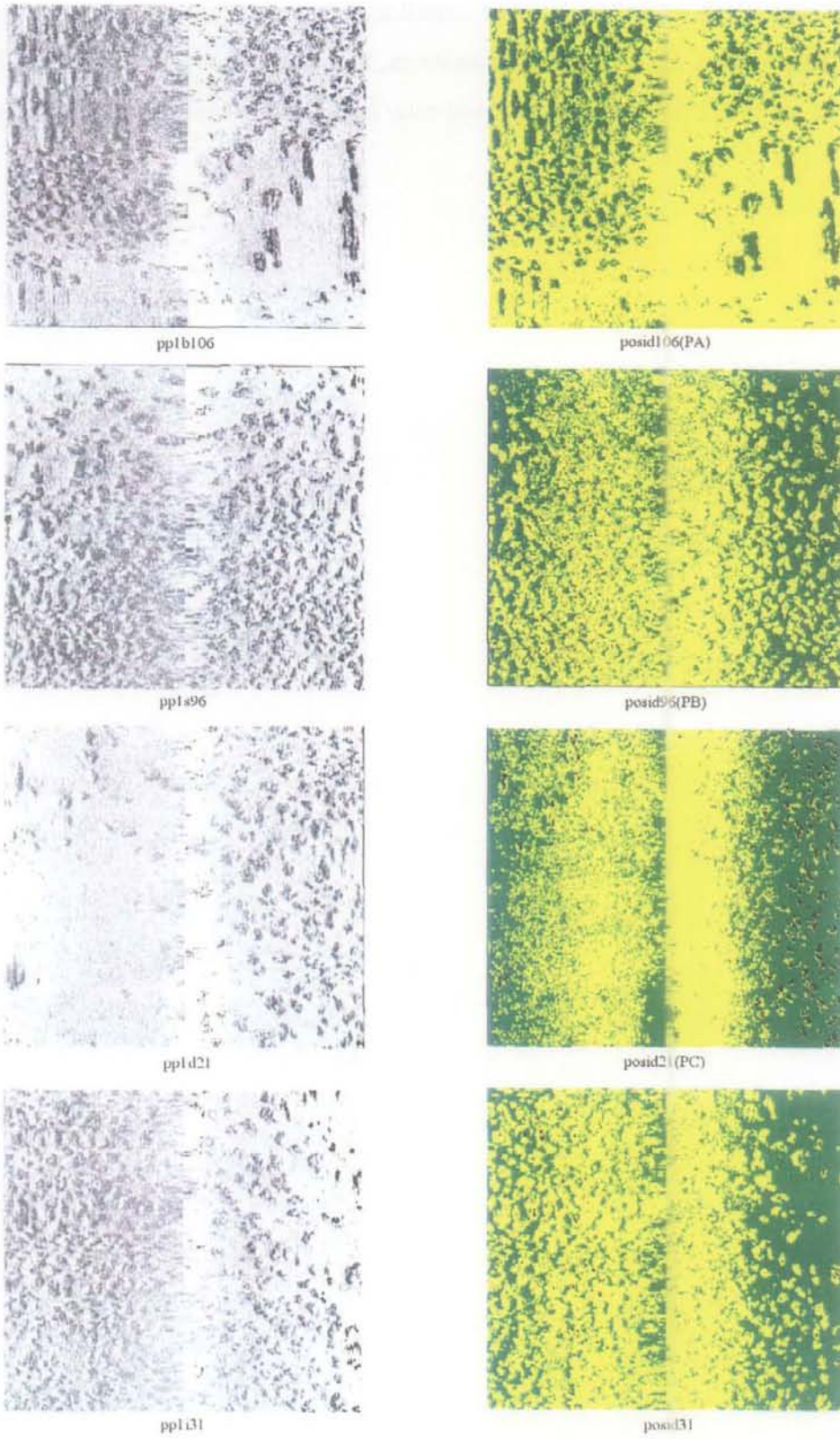


Figura 72: Imágenes originales y clasificadas de Fondo Tipo de Posidonia

6.3.4 - Conclusiones

El proceso de clasificación que se ha aplicado a cada Fondo Tipo, cuyos resultados se han verificado mediante imágenes ópticas submarinas, se ha denominado proceso de clasificación estándar. Este proceso ha consistido en hacer una clasificación supervisada utilizando cuatro imágenes, que corresponden a 100 y 500 kHz, y éstas mismas pero filtradas con EDP y realce Gaussiano. Para hacer la clasificación se ha usado el clasificador de Mínima Distancia y a la imagen resultante se le aplicó un filtro LIFE de 5x5 para suavizarla.

El mosaico de sonografías debe realizarse mediante el programa implementado en el propio equipo de adquisición de imágenes sonar. Dicho programa mantiene la georeferenciación de cada pixel colocándolos en su sitio exacto al llevar incluida la información de los ficheros de navegación. El mayor defecto, es la deformación puntual de las imágenes que se corresponde con los movimientos del barco.

El mosaico realizado con la utilidad correspondiente del equipo de análisis de imagen presenta una alta confusión de valores digitales, esto significa que el mismo Fondo Tipo puede aparecer con diferentes valores de gris y viceversa, es decir, diferentes fondos tipo pueden aparecer con los mismos valores digitales. Este factor hace que la clasificación tradicional no sea adecuada tanto desde el punto de vista visual como numérico. Sólo en algunos casos de imágenes pequeñas con poca diversidad, la clasificación da resultados satisfactorios.

En resumen, para hacer cartografía de los fondos marinos, los mejores resultados han sido los obtenidos utilizando el programa especialmente diseñado y compatible con el equipo de adquisición de imágenes sonar en tiempo real. Posteriormente, se recomienda procesar las imágenes más representativas siempre y cuando presenten la calidad suficiente.

Se analiza el problema, que aparece al comparar imágenes de una misma zona tomadas en diferentes direcciones y sentidos, causado por la iluminación y el vacío de señal que aparece en las sombras (validación cruzada). Los valores de reconocimiento de un training set aplicado al mismo fondo con diferentes iluminaciones bajan ligeramente al comparar imágenes tomadas en diferente sentido, y descienden notablemente si las imágenes presentan direcciones perpendiculares entre sí. Se concluye que dicho problema afecta en mayor grado a los Fondos Tipo de mayor volumen topográfico, como es el caso de Posidonia (planta de gran

porte), aunque en todos ellos se hace notar, por lo que es fundamental tenerlo en cuenta a la hora de realizar un mosaico.

6.4 - Frecuencias óptimas para la caracterización acústica de cada tipo de fondo

A la hora de estudiar las sonografías, el hecho de disponer de dos imágenes tomadas simultáneamente en frecuencias distintas y, por tanto, con propiedades diferentes (en cuanto a alcance de rango y resolución), permite hacer un estudio de la frecuencia óptima para la separación de clases en procesos de clasificación, calculando los valores medios de divergencia (Swain y King, 1973; Swain y Davis, 1978; Singh, 1984).

Este valor es una medida de separabilidad entendiendo ésta como la distancia normalizada entre las clases A y B, fruto de establecer su diferencia absoluta entre medias, promediada por la suma de sus desviaciones típicas. El objeto es calcular el valor de divergencia para un espacio multivariante (tantas variables como bandas intervienen en la clasificación), considerándose el vector de medias y matriz de varianza-covarianza entre pares de categorías. Esta medida se calcula según la siguiente fórmula :

$$D_{AB} = 0.5 \text{ Tr} [(V_A - V_B) (V_B^{-1} - V_A^{-1})] + 0.5 \text{ Tr} [(V_A^{-1} + V_B^{-1}) (M_A - M_B) (M_A - M_B)^T]$$

donde D_{AB} es la medida de divergencia entre las categorías A y B; Tr es la suma de los elementos de la diagonal de la matriz []; V_A y V_B son las matrices de varianza - covarianza de las categorías A y B; M_A y M_B son los vectores de medias correspondientes a las mismas categorías y bandas y T indica la matriz traspuesta (Chuvieco, 1990).

Cuanto mayor sea la divergencia, mayor será la separabilidad entre clases, como para las bandas incluidas. Calculando un valor promedio de divergencia se deduce la banda óptima para la separabilidad entre clases (Jensen, 1996).

En el presente estudio, se calcularon los valores medios de divergencia para las clasificaciones obtenidas en cada Fondo Tipo (Posidonia, Cymodocea y Arena, Figuras 56, 58 y 60, respectivamente, ya comentadas en la sección 6.3.2). Dichas clasificaciones se realizaron siguiendo la metodología estándar, esto es, utilizando las imágenes preprocesadas y las mismas filtradas con el EDP. Los valores de divergencia media totales corresponden a las cuatro bandas en su conjunto.

Arena

Nombre de la imagen : botare15 , (ver Fig. 56, sección 6.3.2)

Divergencia Media

total (1234)	1473
100 EDP	1273
100	422
500 EDP	323
500	40

Posidonia oceanica

Nombre de la imagen : botpos15, (ver Figura 58, sección 6.3.2)

Divergencia Media

total (1234)	970
100 EDP	819
100	519
500 EDP	81
500	44

Cymodocea nodosa

Nombre de la imagen : botcym15 , (Fig. 60, sección 6.3.2)

Divergencia Media

total (1234)	1420
100 EDP	1322
100	466
500 EDP	136
500	60

6.4.3.1 - Hipótesis sobre las causas de la selectividad acústica de *Cymodocea nodosa*

El nivel del eco que produce un objeto sumergido es consecuencia, entre otros, de su tamaño y de la relación entre su impedancia acústica y la del agua (impedancia acústica = densidad por velocidad de propagación del sonido). Cuanto mayor sea el contraste de impedancias, mayor es el coeficiente de reflexión. Por ejemplo, una roca (Kinsler 1982), del

fondo del mar tiene una impedancia acústica del orden de diez veces la del agua (en condiciones estándar de temperatura y salinidad). Una bolsa de aire presenta un cambio de impedancia respecto del agua del orden de 4000, es decir presenta un coeficiente de reflexión mucho más elevado que la roca a igualdad de tamaño.

Hay que tener en cuenta que el nivel de retrodifusión de un elemento depende de múltiples factores, aparte de los citados que, aunque de menor magnitud, pueden variar ligeramente las respuestas obtenidas, como son los que modifican la velocidad de propagación en el agua (T^a y salinidad), la directividad del sonar, la superficie de retrodifusión del blanco, etc.

Del mismo modo, al tratarse de una agrupación de elementos, y no del eco de un elemento aislado, la señal retrodifundida es una composición de señales individuales procedentes de distintos cilindros con una distribución aleatoria. Por simplificación, estos efectos de menor magnitud no han sido considerados en este estudio.

1ª Hipótesis:

A la vista de lo anterior, podría formularse la hipótesis de que la detección acústica de la *C. nodosa* es debida al eco que producen los canales aeríferos del interior de las hojas. Estos canales se pueden asimilar por simplificación a cilindros, geometría ampliamente estudiada en la bibliografía. Según Stanton (1988), el nivel de blanco de retrodifusión (magnitud que mide la intensidad del eco) de un tubo de longitud finita depende de su longitud, si ésta es menor que el radio de la primera zona de Fresnell ($L < (r\lambda)^{1/2}$, siendo L = longitud del tubo, λ = longitud de onda (1500/frecuencia del sonar), y r = distancia del sonar al tubo).

Pero sobre todo, la intensidad del eco depende del radio del tubo comparado con la longitud de onda del sonar. Para radios de tubo a , tales que $2\pi \cdot a$ sea menor que la longitud de onda, la intensidad del eco crece al aumentar la frecuencia. Es decir, que el eco debería dar mayor intensidad a 500 kHz que a 100 kHz.

Para radios mayores ($2\pi \cdot a > \lambda$), podría suceder que a 100 kHz se produjese una resonancia del tubo que diera lugar a un eco de mayor nivel que a 500 kHz, pero sería necesario que todos los tubos que insonifica el sonar, o casi todos, tuviesen el mismo radio para que se repitiese y reforzase el efecto de la resonancia.

2ª Hipótesis:

Una hipótesis mas creíble es suponer que el eco de alta intensidad a 100 kHz y el de baja intensidad a 500 kHz, son producidos por el sistema radicular de *Cymodocea nodosa* que contiene aire, por lo que pueden dar ecos de alto nivel tanto a 100 como a 500 kHz pero están enterradas bajo una capa de fango o arena. Esta capa absorbería las ondas sonoras de una manera muy selectiva con la frecuencia.

Según Hamilton (1987), que ha recopilado multitud de medidas de absorción del sonido en los sedimentos del fondo marino, puede estimarse que la absorción es de 20 dB por metro a la frecuencia de 100 kHz, mientras que la absorción para 500 kHz es de 100 dB por metro. Esto quiere decir que el eco que produce la raíz de *C. nodosa* enterrada a 20 cm tiene una intensidad 40 veces mayor a 100 kHz que a 500 kHz y si está enterrada a 40 cm tiene una intensidad 1600 veces mayor.

Esta hipótesis justifica de manera más evidente que el sonar de barrido lateral detectara mucho mejor *C. nodosa* a 100 kHz que a 500 kHz.

6.4.4 - Conclusiones. Metodología Estándar

Las frecuencias identificadas como óptimas en los Fondos Tipo pueden variar dependiendo de la calidad de la imagen. En general, hay que hacer notar que la frecuencia de 500 kHz, con mayor resolución pero menor rango, a veces puede ser muy útil para estudios detallados de un determinado área. Por otra parte, las imágenes obtenidas con la frecuencia de 100 kHz muestran un mejor contraste y un más amplio rango, por tanto, esta frecuencia suele ofrecer mejores resultados. Teniendo en cuenta los datos previos, se puede concluir que la mejor frecuencia para el estudio de los diferentes Fondos Tipo es la de 100 kHz, sobre todo si se hace sobre una imagen tratada con el filtro EDP (Edge Preserving).

Una de las conclusiones de los subcapítulos anteriores era describir una metodología estándar que ofreciera los mejores resultados a la hora de tratar un área con alta diversidad, con ambas especies y diferentes tipos de fondos. Esta metodología es la que se ha seguido para hacer el mapa de distribución, comentada posteriormente, y presenta los siguientes pasos:

- 1- Preprocesado acústico (eliminación de columna de agua, etc)
- 2- Recorte de las subescenas y cambio de formato

- 3- Realce de contraste Gaussiano
- 4- Filtro EDP
- 5- Clasificación Supervisada utilizando 4 bandas (100 y 500 kHz originales y las mismas filtradas) y Clasificador de Mínima Distancia.
- 6- Filtrado posterior con LIFE
- 7- En la comparación de imágenes, ya sean originales o tratadas, es fundamental que éstas correspondan a líneas tomadas en el mismo sentido y con la misma dirección.

Hay que destacar que en todas las imágenes se ha llegado siempre hasta el paso cuatro, mientras que la clasificación, al depender de numerosos factores, sólo se ha aplicado en casos muy concretos.

El uso de las dos frecuencias ha sido siempre fundamental, sobre todo a la hora de identificar *C. nodosa* por su selectividad acústica, explicada con anterioridad (ver 6.4.3.1) en el presente capítulo.

6.5 - Evaluación de los ecosistemas

En este apartado se trata la aplicación de esta metodología en la evaluación de la cobertura de las praderas y su calidad.

6.5.1 - Posidonia oceanica

Las imágenes denominadas en el gráfico posimataislada, tanto la original como la tratada con el filtro EDP (ver Figuras 73 A y B), muestran una zona arenosa donde se está empezando a establecer *P. oceanica*; realmente no es una pradera ya que *P. oceanica* aparece como matas aisladas con sus sombras correspondientes. Este patrón de distribución se repite a menudo en los límites superiores de la pradera de *P. oceanica* (en las zonas mas someras).

A medida que la pradera va desarrollando esta estructura, se va volviendo más densa sin perder el aspecto granular que la caracteriza, como se aprecia en la imagen posid1y5palos (ver Figuras 73 C y D).

La siguiente imagen Posdeg1y5 (ver Figuras 73 E y F) corresponde al Fondo Tipo denominado posidonia degradada, tomada frente al puerto de Mazarrón. Esta zona se corresponde con una pradera de *P. oceanica*, donde se pescaba habitualmente con redes de arrastre, que destrozaban los sistemas de rizomas en lugares puntuales, destruyendo la estructura característica de una pradera bien desarrollada, y dando lugar a un patrón de distribución en forma de parches (Siljeström et al, 1998). Dichas imágenes se tomaron después de llevar varios años prohibida la pesca en esta zona, por tanto, estas imágenes muestran una pradera degradada que comienza a recuperarse, caracterizada por presentar una textura mas homogénea, menos granular y similar a *C. nodosa* pero, a diferencia de ésta, la respuesta acústica es fuerte y permanece semejante en ambas frecuencias.

La siguiente imagen, Posdeg1y5palos (ver Figuras 73 G y H), muestra una pradera de *P. oceanica* degradada, cuya textura sólo se adivina en algunos puntos ya que está muy deteriorada. Son individuos de poco porte (no se aprecian sombras) y la calidad de esta pradera se puede considerar baja.

Hay que destacar que en todas las imágenes de *P. oceanica* la respuesta es similar en 100 y 500 kHz.

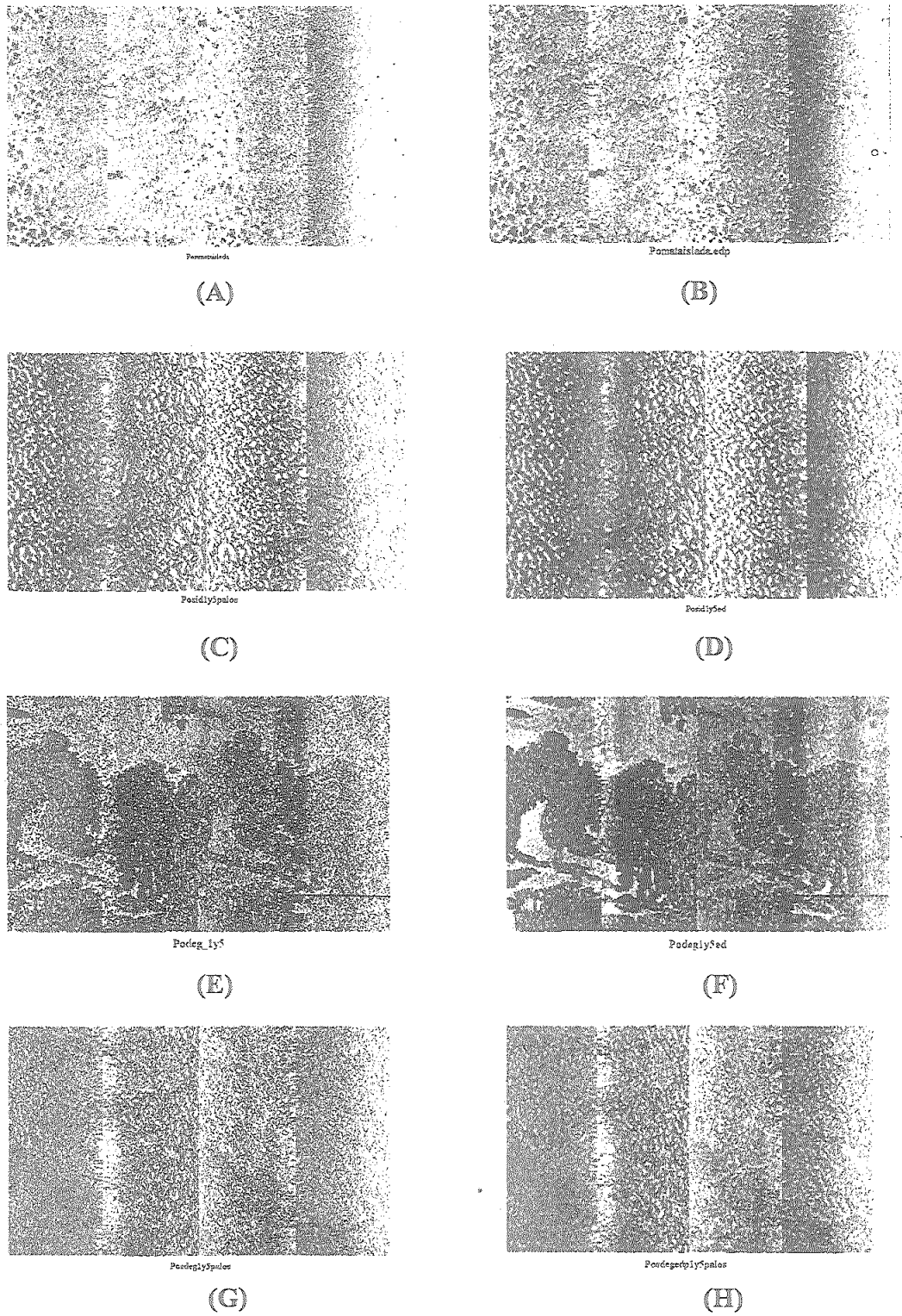


Figura 73: (A y B) *P. oceanica* mata aislada y con EDP respectivamente; (C y D) *P. oceanica* densa y con EDP; (E y F) *P. oceanica* degradada Mazarrón y con EDP; (G y H) *P. oceanica* degradada Palos y con EDP.

6.5.2 - Cymodocea nodosa

Esta especie es capaz de asentarse sobre suelos de textura mas pesada y a ella corresponde la imagen denominada Fango (ver Fig. 74 A y B). Esta es representativa del Fondo Tipo fango tomada frente al puerto de Mazarrón en una zona extremadamente degradada. Este tipo de fondo se caracteriza por dar una respuesta acústica débil y presentar textura homogénea.

Las pradera de *C. nodosa* sólo se puede evaluar desde el punto de vista de densidad, ya que no presenta una estructura tan definida como *P. oceanica*, al tener un aspecto masivo y homogéneo. En la imagen Cymodeg (ver Fig. 75 A y B) se aprecia el patrón que presentan los límites de la pradera irregulares y desflecados, que contrastan con los límites de una pradera de *P. oceanica*. Es importante resaltar que *Cymodocea nodosa*, al ser una especie pionera, coloniza mas fácil y rápido que *P. oceanica*, que tarda más en alcanzar el clímax. La ausencia de estructura bien definida en las praderas de *Cymodocea nodosa* provoca que la detección de la degradación del ecosistema sólo se aprecie cuando los individuos han comenzado a desaparecer dejando claros, como se aprecia en la imagen Cymodeg.

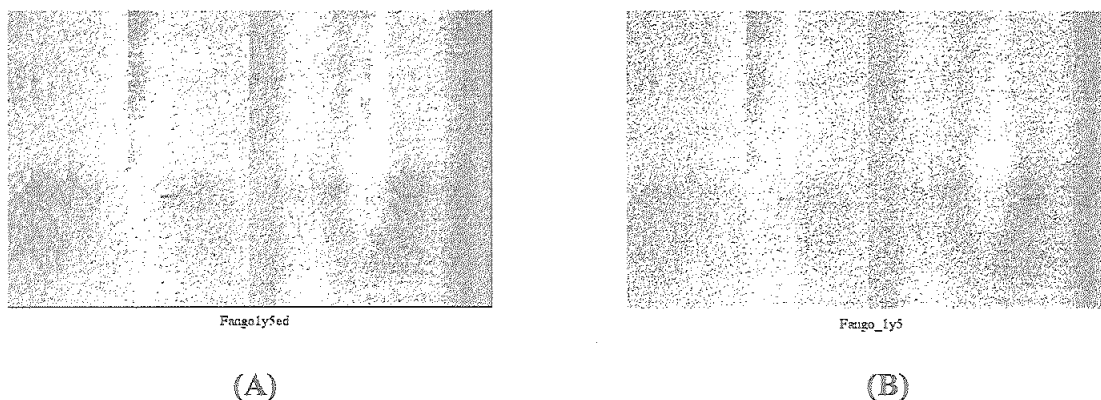


Figura 74: (A y B) Fango y con EDP

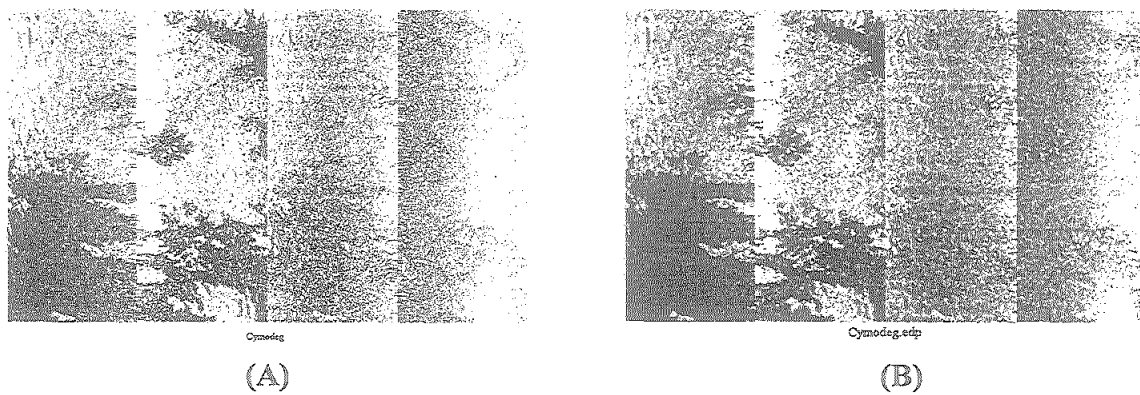


Figura 75: (A y B) *C. nodosa* degradada y con EDP

6.5.3 - Conclusiones

La evaluación de la calidad de las praderas de fanerógamas ha de hacerse en función de las características morfológicas y respuesta acústica de cada especie.

Así, en el caso de *P. oceanica*, planta de gran porte con robustos rizomas que forma unas comunidades con una estructura muy fuerte y visible, la evaluación debe hacerse en función de dicha estructura y de la cobertura alcanzada por la vegetación (Pergent et al, 1995). Esta puede verse afectada por actividades antrópicas aisladas (como la pesca de arrastre, cuyas puertas destrozan los sistemas de rizomas), en cuyo caso, la comunidad aparece afectada sólo en algunas zonas y la vegetación se muestra siguiendo un patrón de parches que todavía mantienen su estructura relativamente intacta.

En el caso de que la comunidad de *P. oceanica* esté extremadamente degradada, la estructura aparece muy desdibujada en las sonografías, mostrando sólo una vaga textura que recuerda a la de las praderas densas de dicha especie.

La especie *C. nodosa*, caracterizada morfológicamente por un menor porte, presenta, sin embargo, un comportamiento acústico muy selectivo en cuanto a su respuesta en las diferentes frecuencias, por lo que, una vez caracterizada, habrá que evaluar básicamente las imágenes de 100 kHz.

Esta especie aparece con una textura muy homogénea en las praderas bien desarrolladas (muy densas), mientras que en las áreas más degradadas o cuya pradera está formándose, la vegetación aparece más disgregada, siguiendo un patrón de parches con los bordes desflecados. Como consecuencia, la mejor forma de evaluar la pradera de *C. nodosa* es en función de su densidad y cobertura.

En resumen, la calidad de ambas praderas estudiadas deben ser evaluadas, en primer lugar, en función de su cobertura y densidad. En las praderas de *P. oceanica*, dicha calidad dependerá también de su textura.

6.6- Mapas de distribución. Comparación de resultados usando RoxAnn.

La aplicación de la metodología previamente descrita se quiso demostrar en el Área Test. Primero se unieron las sonografías preprocesadas (sin la columna de agua pero georeferenciadas) formando mosaicos línea a línea. El programa utilizado para hacer el mosaico mantiene la georeferenciación correcta de las sonografías, utilizando los datos de navegación, que siempre deben ser sin procesar, aún a riesgo de deformar la imagen.

Estos mosaicos resultaron de mala calidad para el posterior procesado de sus imágenes, como se ha comentado en la sección 6.3.2., debido entre otras razones a que una misma especie podía presentar muy diferentes respuestas acústicas y viceversa, diferentes fondos aparecían con el mismo nivel de gris, o las rayas introducidas por el programa encargado de hacer el mosaico, originadas por los cabeceos y movimientos del barco.

La solución adoptada fue la de hacer un mosaico usando pocas imágenes que fueran de calidad similar y donde los tipos de fondo se distinguieran básicamente por sus texturas, como los ejemplos que corresponden a los Fondos Tipo (ver sección 6.3.2, Figuras 63, 64 y 65). Al comprobar posteriormente que estos datos empeoraban notablemente al unir líneas más largas, como las del Area Test (algunas hasta de 2Km), se tuvo que hacer uniendo pequeñas áreas.

De esta forma, se hizo el mapa de distribución a un mayor detalle aunque de forma menos automática. Los resultados se plasman en la Figura 76. En dicho mapa se ha hecho así mismo un cálculo de las superficies cubiertas por cada tipo de fondo, ya que estos datos servirán para un posterior seguimiento de las praderas del área. Esta aplicación cobra un importante valor si se tiene en cuenta la realización de futuros estudios medioambientales de praderas, que son zonas protegidas por su elevado valor ecológico.

A continuación, se comparó el mapa de distribución resultante con el mapa de distribución generado con otra metodología acústica, como es el clasificador de fondos RoxAnn.

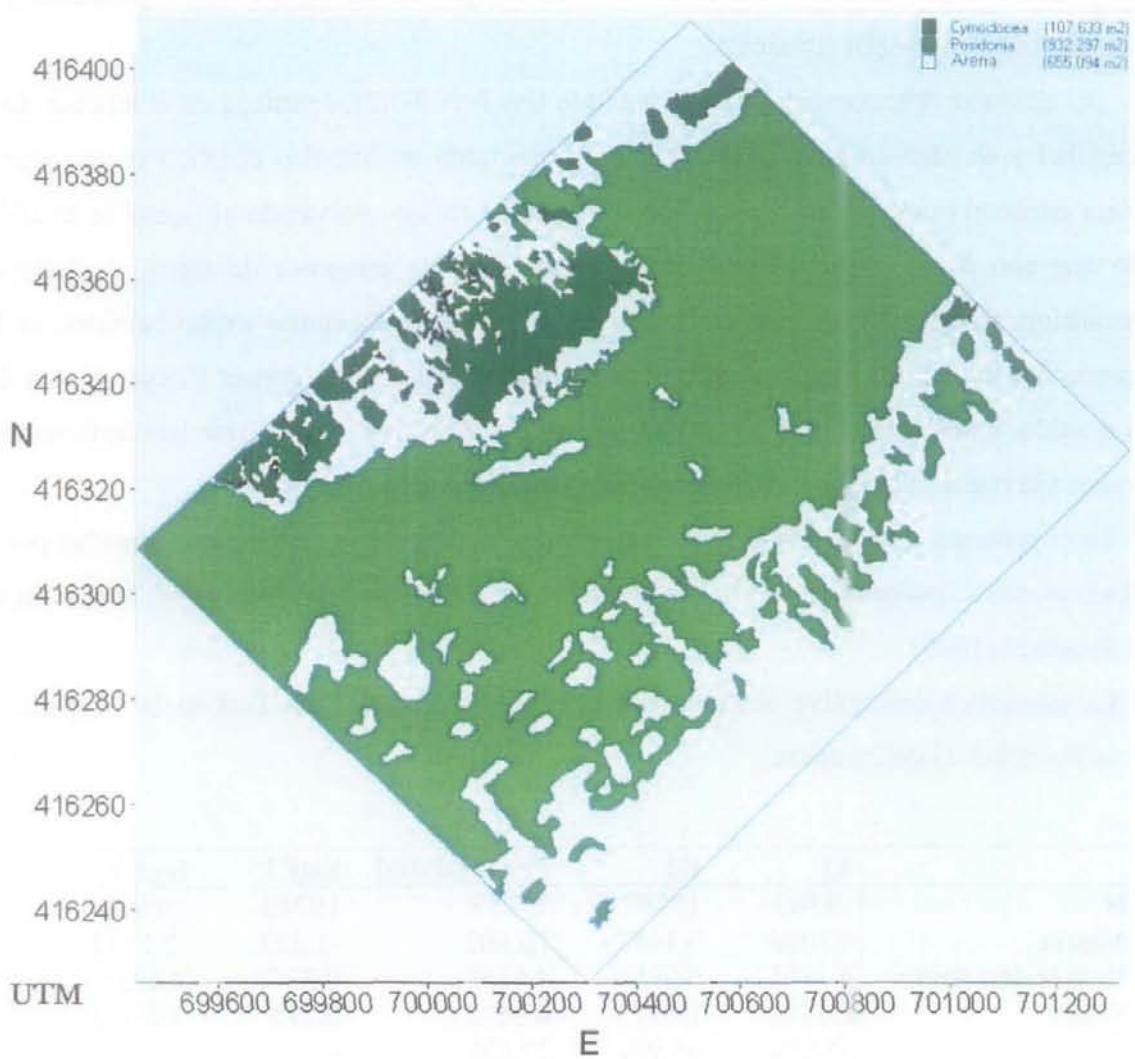


Figura 76 : Mapa de distribución con medidas de superficie de cada tipo de cobertura.

6.6.2 - Resultados obtenidos con RoxAnn

De forma paralela, se tomaron datos de forma simultánea con un ecosondador RoxAnn que fueron posteriormente tratados en el Instituto de Investigación del Agua (VKI, Dinamarca) y la Universidad de Lyngby (Dinamarca).

El ecosondador, comentado en el capítulo tres (ver 3.3.2), se utiliza en el cálculo de la profundidad y se basa en la medida del tiempo que tarda un impulso acústico en recorrer la distancia desde el punto de emisión al fondo, donde se refleja, volviendo al punto de emisión, por lo que son datos puntuales de carácter diferente a las imágenes de sonar. A partir de aproximaciones aritméticas y predicciones basadas en determinaciones experimentales, se ha observado que existe una relación entre la naturaleza del fondo y el primer y segundo eco del pulso emitido. Estos son los dos parámetros que el RoxAnn usa para realizar la clasificación y equivalen a la rugosidad (E1) y a la dureza (E2) (Siwabessy et al, 1999).

En el presente capítulo no se va a discutir sobre el procesado de los datos tomados por el RoxAnn, ya que se pueden ver en la bibliografía citada (Sørensen y Madsen, 1994; Nielsen et al, 1996; Sørensen, 1999).

La estadística descriptiva obtenida con el RoxAnn para el Area Test en la campaña de 1997 se muestran a continuación:

	E1	E2	Profundidad	logE1	logE2
N	19789	19789	19789	19789	19789
Media	0.3098	0.1447	16.402	-1.227	-2.1245
Desviación típica	0.1101	0.0954	4.5337	0.3265	0.6235
Sesgo	1.6471	1.6973	0.0572	0.275	-0.0602
CV	35.5%	65.9%	27.6%	-	-

El análisis de los rasgos espaciales de los datos de RoxAnn, que incluyen las dos especies estudiadas más tres tipos de arena (en función de su textura y profundidad), se muestran en la Fig. 77. En dicha figura se observa que el Fondo Tipo Posidonia (en azul) aparece como una nube grande y difusa que rodea las medidas de *C. nodosa* (verde), así como a las tres medidas que corresponden a las zonas arenosas (en tonos de amarillo a naranja).

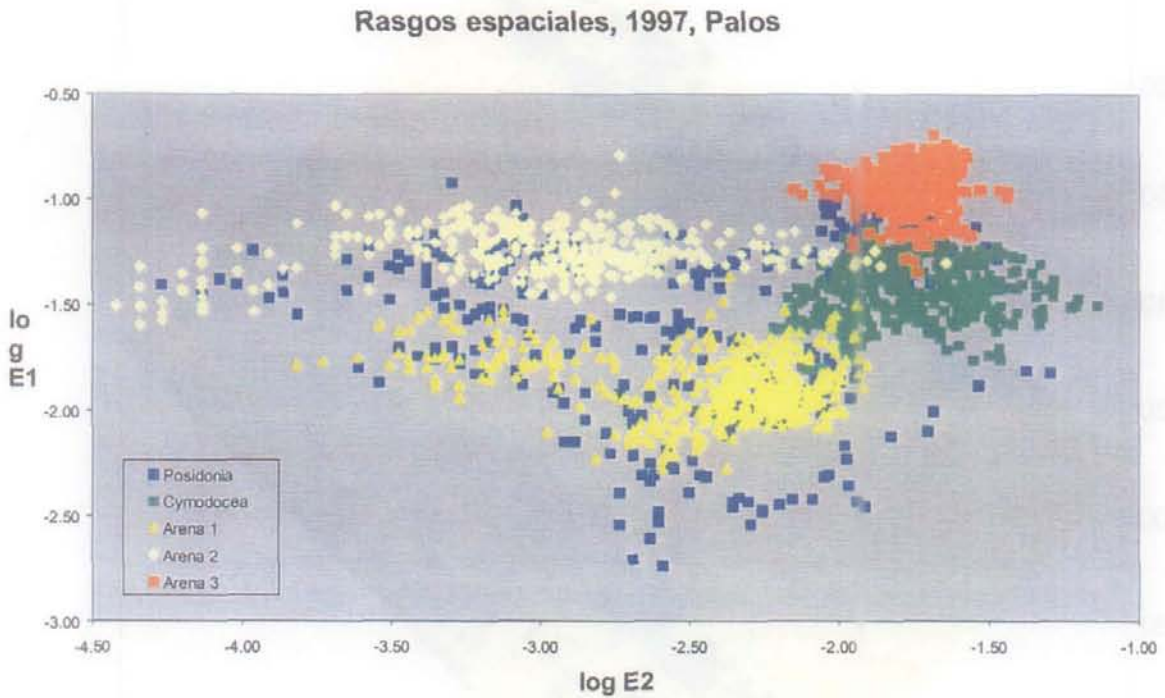


Figura 77. Distribución espacial de los datos de RoxAnn tomados en Cabo de Palos, 1997.

También se puede apreciar que a pesar de la confusión introducida por los valores correspondientes a *Posidonia oceanica*, las medidas de *Cymodocea nodosa* están suficientemente separadas de las producidas por las zonas arenosas. Por tanto, se ha elaborado un mapa de distribución, siguiendo la metodología puesta a punto por el equipo responsable del procesado de estos valores (Sørensen et al., 1998), basada en el kriggeado de los valores logarítmicos de E1 y E2. El mapa es el resultado de la clasificación del fondo basada en los siguientes valores:

Clase	Frecuencia	Porcentaje	Frecuencia Acumulada	Porcentaje Acumulado
Cymodocea	5707	32.4	5707	32.4
Arena 1	1347	7.7	7054	40.1
Arena 2	8909	50.6	15963	90.7
Arena 3	1630	9.3	17593	100.0

El mapa resultante, con las dos clases definidas (cymodocea y arena), se muestra en la Fig. 78.

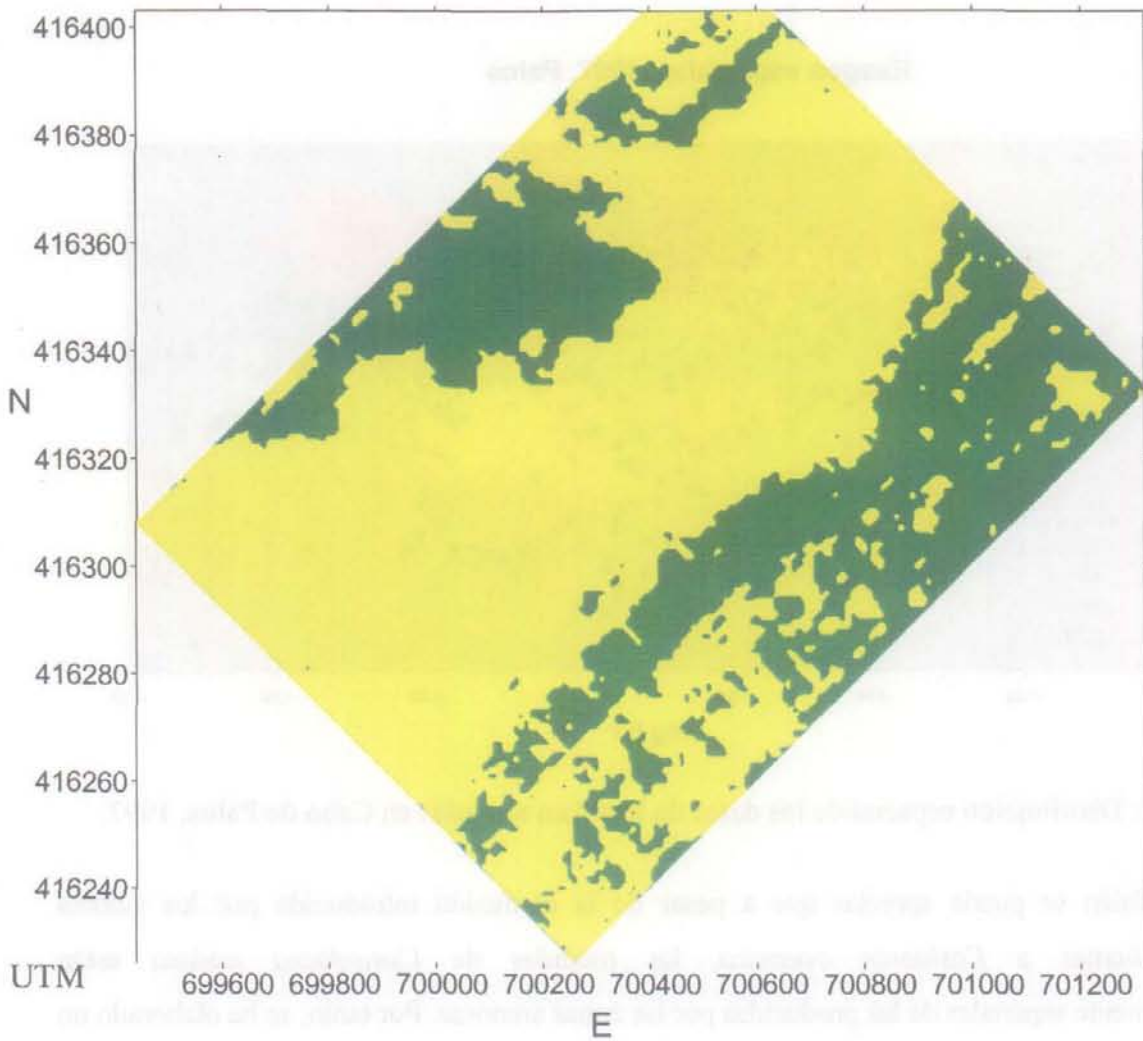


Figura 78. Mapa de distribución con las clases cymodocea (en verde) y arena (en amarillo), basado en las medidas tomadas con el RoxAnn.

Si se comparan el mapa de distribución que se muestra en la Fig. 76 (generado a partir de los mosaicos de imágenes sonar) con el de la Fig. 78, se puede apreciar que, si bien en la Fig. 78 no se incluye la clase posidonia, el contorno de la zona arenosa coincide en gran medida con su distribución en la Fig. 76. Esto indica que los resultados obtenidos usando el ecosondador con clasificador de fondos RoxAnn tienen su utilidad, aunque habrá que seguir estudiando la detección y separación de otro tipos de fondos de áreas cubiertas por *Posidonia oceanica*.

Como conclusión, puede observarse una buena correspondencia entre los dos sistemas hidroacústicos, el sonar y el clasificador de fondos RoxAnn, aunque éste último, por el momento, no ofrece tan buenos resultados como el primero.

CONCLUSIONES

1. El sistema de adquisición de imágenes sonar constituye una excelente herramienta para la caracterización de los fondos marinos y para la separación de las comunidades bentónicas. Produce buenos resultados para la discriminación de especies concretas, siempre y cuando presenten una respuesta acústica selectiva en alguna de las frecuencias utilizadas. En términos generales, pueden diferenciarse distintos tipos de fondo y especies vegetales y monitorizarse a lo largo del tiempo de forma rápida, no agresiva para el medio ambiente, con bajos costes y en áreas extensas.
2. Los resultados obtenidos con el sonar de barrido lateral son más fiables que los derivados de la ecosonda RoxAnn, de carácter puntual.
3. Es posible diferenciar las especies de macrófitos estudiadas mediante sonografías, debido a la estrecha relación existente entre sus características morfo-anatómicas y su comportamiento acústico. Para ello se requiere el empleo de más de una frecuencia (100 y 500 kHz en el presente trabajo).
4. Con el rango de trabajo, 65m por canal, se han obtenido excelentes resultados, dado que ofrece suficiente cobertura y un buen nivel de detalle.
5. *Cymodocea nodosa* se caracteriza por presentar una gran selectividad en su respuesta acústica para las frecuencias de 100 y 500 kHz. En 100 kHz ofrece una fuerte respuesta, apreciándose una textura masiva y densa con cierto aspecto granular. En 500 kHz la respuesta es tan débil que es difícil reconocer ningún rasgo distintivo.
6. *Posidonia oceanica* presenta una fuerte respuesta acústica en las dos frecuencias utilizadas, caracterizándose en ambas por su fuerte estructura y textura bien definida, que puede ser masiva o lineal, dependiendo de la densidad de la vegetación.

7. El preprocesado de las imágenes sonográficas tiene una gran importancia para obtener resultados de calidad, ya que permite reconocer y compensar los errores, ruidos y distorsiones, mejorando la calidad de los datos de entrada.
8. La naturaleza de la imágenes suministradas por el sistema de visualización de datos empleado, en formato PCX, supone una gran limitación para el posterior procesamiento de la información dado que disminuye el rango espacial y radiométrico de los datos capturados por el sensor.
9. Las sonografías obtenidas con la frecuencia de 100 kHz presentan mayor calidad para este tipo de estudios ya que la relación rango/resolución es la adecuada para captar la estructura de *Posidonia oceanica* y la respuesta acústica de *Cymodocea nodosa*.
10. El filtro más adecuado entre los utilizados para realzar las imágenes de esta naturaleza, resulta ser el EDP (Edge Preserving Filter), dado que consigue encontrar los límites de separación entre clases con diferente comportamiento acústico, a la vez que homogeneiza el contenido de las mismas.
11. Como resultado de las consideraciones anteriores se propone la siguiente metodología de procesado para discriminar mediante sonografías las dos especies de macrófitos sumergidos estudiadas:
 - 1°. Preprocesado acústico de la imagen, incluyendo anamorfosis, ganancia y longitud del cable.
 - 2°. Separación de subescenas y cambio de formato .DAT a formato .PCX
 - 3°. Aplicación de filtro EDP (Edge Preserving Filter) y realce de contraste gaussiano.
 - 4°. Clasificación supervisada de la imagen, empleando 4 bandas de información correspondientes a las frecuencias de 100 y 500 kHz, originales y filtradas.
 - 5°. Aplicación de filtro LIFE (Linear Preserving Filter).
 - 6°. El procedimiento debe aplicarse secuencialmente en imágenes adquiridas en derrotas de la misma dirección y sentido.

Los pasos 1º, 2º, 3º y 6º tienen validez general para todas las sonografías, mientras que el 4º y 5º mejoran la discriminación de las especies en determinados casos.

12. La elaboración de mosaicos se debe realizar con el programa específico del equipo de adquisición de datos de sonar, que utiliza imágenes preprocesadas y mantiene la georeferenciación. La imagen generada no debe ser clasificada como un todo, ya que el proceso de unión introduce distorsiones radiométricas al no tener en cuenta la dirección y sentido del sensor.
13. El proceso de clasificación de imágenes adquiridas con distinta dirección y sentido da lugar a errores en la asignación de los píxeles a las diferentes categorías, que son tanto mayores cuanto más acusada es la dimensión vertical del objeto estudiado, como es el caso de *Posidonia oceanica*, a causa de la confusión de valores digitales que introducen las sombras. Este problema puede reducirse mediante la clasificación secuencial de imágenes de áreas reducidas, obtenidas en una misma derrota del barco, y su progresiva adición hasta completar el mapa de distribución de clases en el área de estudio.

Por último, en lo que se refiere a recomendaciones generales para posteriores estudios basados en esta misma metodología, cabe hacer las siguientes:

- 1ª. Debe desarrollarse un software específico capaz de recuperar la información original adquirida por el sensor, manteniendo los datos de navegación, y partir de información sin ningún tipo de compresión. En particular, el formato de imagen .PCX que suministra por defecto el sistema utilizado constituye un impedimento en el tratamiento de imágenes.
- 2ª. Aplicar la metodología propuesta para la caracterización acústica utilizando diferentes frecuencias a las ya utilizadas. Esta metodología podrá ser desarrollada y aplicada a otras especies vegetales submarinas de interés medioambiental y/o comercial.
- 3ª. Profundizar en clasificaciones basadas en la textura, dado que existe evidencia de que una parte sustancial de la información contenida en las sonografías se relaciona con los patrones de agregación de los píxeles más que con el valor digital de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

- Abarzuza, J., (1991). *Sonar de barrido lateral y penetradores de sedimentos*. Instituto Hidrográfico de la Marina, Cadiz: 207 pp.
- De Andrés, J.R., Rey, J. y Salinas, J.M., (1991), Detección de arribazones submarinos de algas por métodos indirectos: un nuevo procedimiento. *Technical Report of the Instituto Español de Oceanografía*, 93: 38 pp.
- Anonyme, (1991). *Posidonia oceanica meadows in the Mediterranean Sea: Status and Distribution*. *Mediterranean Sea Project, Greenpeace International*: 25 pp.
- Arber, A., (1920). *Water plants; a study of aquatic angiosperms*. Cambridge Univ. Press. 436 pp.
- Ardizzone, G.D. y Miglinolo, A., (1982). Modificazioni di una prateria di *Posidonia oceanica* (L.) Delile del Medio Tirreno sottoposta ad attività di pesca a strascio. *Naturalista Sicil.* S IV, VI (Suppl.) 3: 509-515.
- Arnoff, S., (1982). Classification accuracy: a user approach. *Photogrammetric Engineering and remote Sensing*. 48: 1299-1307.
- Astier, J.A., (1984). Impacts des aménagement littoraux de la Rade de Toulon, liés aux techniques d'endigage, sur les herbiers a *Posidonia oceanica*. *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. & Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., Fr., 1: 255-259.
- Augier, H., (1986). L'herbier a *Posidonia oceanica*, son importance pour le littoral mediterraneen, sa valeur comme indicateur biologique de l'état de sante de la mer, son utilisation dans la surveillance du milieu, les bilans ecologiques et les etudes d'impact. *Vie Marine*, 7: 85-113.

- Augier, H. y Boudouresque, C.F., (1970). Végétation marine de l'Île de Port-Cros. V.- La Baie de Port-Man et le problème de la régression de l'herbier de posidonies. *Bull. Mus. Hist. Nat. Marseille, Fr.*, 30: 145-164.
- Avery, T.E. y Berlin G.L., (1985). *Interpretation of Aerial Photographs*. Burgess Publ. Co, 554 pp.
- Ayala, F.J., Casero, L., Celma, J., García, A., Romana, M. Y Sinić, D., (1985). *Métodos de reconocimiento del subsuelo Marino*. Instituto Geológico y Minero de España, 316 pp.
- Badal, I., (2000). [Http://www.gencat.es/darp/pesca/faneroga/cfanind.htm](http://www.gencat.es/darp/pesca/faneroga/cfanind.htm)
- Ballesta, L., Pergent, G., Pergent-Martini, C. y Pasqualini, V., (2000). Distribution and dynamics of *Posidonia oceanica* beds along the Albères coastline. *Comptes Rendus Académie des Sciences / Life Sciences*, 323: 407-414.
- Bay, D., (1979). Etude in situ de la production primaire d'un herbier de *Posidonia oceanica* (L.)Delile, dans la baie de Calvi, Corse. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.*, 25-26 (4) : 201-202.
- Belderson, R.H. y Kenyon, N.H., (1976). Long-Range Sonar Views of Submarine Canyons. *Mar. Geol.*, 22:M69-M74.
- Ben Mustapha, A., y Hattour, A., (1987). *Posidonia meadows in the Coast of Tunisia: Gulf of Hammamet. Greenpeace Mediterranean Project Report*: 19 pp.
- BIOSONAR project (EU MAS3-CT95-0026) (1999). *Sonar Technology for Monitoring and Assessment of Benthic Communities*, Final Report.
- Blackinton, J.G., Williams, J.F., Hills, D. y Kossalos, J.G., (1986). First Results from a Combination Sidescan and seafloor Mapping System. *Proc. Offshore Tech. Conf. OTC*, 4478.

- Blanc, J.J. y Jeudy de Grissac, A., (1984). Erosions sous-marines des herbiers a *Posidonia oceanica* (Mediterranee). *International Workshop Posidonia oceanica Beds. GIS Posidonie Publ.*, 1: 23-28.
- Blanc, J.J. y Jeudy de Grissac, A., (1989). Réflexions géologiques sur la régression des herbiers à Posidonies (départements du Var et des Bouches-du- Rhône). In *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Meinesz, A., Fresi, E. y Gravez, V. edit., GIS Posidonie publ., Fr., 2: 273-285.
- Boudouresque, C. F., Giraud, G. y Perret, M., (1977). *Posidonia oceanica*. Bibliographie. Univ. Aix-Marseille II-CNEXO, Fr., 1-191.
- Boudouresque, C. F. y Meinesz, A., (1982). Decouverte de l'herbier de Posidonie. *Cah. Parc nation. Port-Cros*, 4: 1-79.
- Bourcier, M., (1980). Régression d'un herbier á *Posidonia oceanica* en une quinzaine d'années dans une baie soumise a l'action lointaine de deux emissaires urbains. *V Jour Etud Poll. Cagliari CIESM*. 735-738.
- Bourcier, M., (1982). Evolution au cours des quinze dernières années des bioecoenoses benthiques et de leurs facies dans une baie Mediterranéenne soumise a l'action de deux emissaires urbains. *Tethys*, 10 (4): 303-313.
- Brasier, M.D., (1975). An outline history of seagrass communities. *Palaeontology* 18:681-702.
- Brayle, A.,(1991). La Posidonia: Una efemérides para remontarse en el tiempo. *Mundo Científico*, nº 117, vol 11: 1000-1002.
- Brekhovskikh, L.M. y Lysanov, Yu. P., (1982). *Fundamentals of Ocean Acoustics*, 2nd Ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Fed. Rep. Of Germany, 207 pp.

- Brongniart, A., (1828). *Prodrome d'une histoire des végétaux fossiles*. Paris, viii + 223 p (p. 112-115)
- Campbell, B.J., (1996). *Introduction to Remote Sensing*. 2nd ed. The Guilford Press, New York 557pp.
- Carbó, R. y Molero A.C., (1997). Scattering Strength of a Gelidium Biomass Bottom. *Applied Acoustics* (aceptado 30 Enero 1997).
- Carbó, R. y Ranz C., (1986). Theoretical and experimental results of the reflective properties of a homogeneous target surrounded by a sandy-medium. *Acustica*, 61, 130-136.
- Carbó, R., (1991). Backscattering of acoustic pulses by a set of molluscs buried in sandy seabeds. *Journal Acoustique*, 4, 69-80.
- Cervenka, P. y de Moustier, C., (1993). Side Scan Sonar Image Processing Techniques, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol 18, 2 : 108-122.
- Chavez, P.S., (1986). Processing techniques for digital sonar images from GLORIA. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52 (8): 1133-1145.
- Chavez, P.S. Jr, Schoonmaker, J.W.Jr y Anderson, J.A., (1987). Digital Mosaicking and Merging of Dissimilar Data Sets - GLORIA, Magnetic and Bathymetric. *Proceedings Third McKelvey Conference*, Denver, Colorado.
- Chesterman, W.D., Clywick, P.R. y Stride, A.H., (1958). An acoustic aid to sea bed survey. *Acústica*, 8:285-290.
- Chivers, R.C., Emerson, N. y Burns, D.R., (1990). New acoustic processing for underway surveying. *Hydro. J.*, 56: 9-17
- Chuvienco, E., (1190). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Ed. Rialp, 453 pp

- Clay, C.S., Medwin H., (1977). *Acoustical Oceanography*. John Wiley & Sons, New York, pp. 178-213.
- Clarke, T.L., Proni, J.R. y Huff, L.C., (1988) Joint CGS-AOML Acoustical Bottom Echo-Formation Research II: Field Experiment Results and Recommendations for Echo-Sounder Design. NOAA Technical Memorandum ERL AOML-67.
- Cochran, W.G., (1977). *Sampling techniques*. John Wiley & Sons. New York.
- Congalton, R.G., (1988). A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54: 593-600.
- Congalton, R.G., (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37: 35-46.
- Congalton, R.G. y Green, K., (1993). A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59: 641-644.
- Congalton, R.G. y Green, K., (1999). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: principles and practices*. Lewis Publishers. New York. 137pp
- Cracknell, A.P. y Hayes, L. (1991). *Introduction to Remote Sensing*. London: Taylor & Francis, 293 p. 1991
- Cronquist, A., (1988). *The evolution and classification of flowering plants*. Second Edition. The New York Botanical Garden, Bronx, New York 10458, U.S.A., 555 pp.
- Curran, P.J. (1988). *Principles of Remote Sensing*. London: Longman, 282 pp.
- Danforth, W.W., O'Brien, T.F. y Schwab, W.C., (1991). Near real-time mosaics from high-resolution sidescan sonar, an image processing technique to produce hard-copy mosaics 'on site' proved successful during USGS Open-File Report 97-686, 77 pp.

- Dawes, C.J., (1986). *Botanica marina*, Edit. Limusa, 527 pp.
- De Bruin, S. y Gorte, B.G.H., (2000). Probabilistic image classification using geological map units applied to land-cover change detection. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 21, nº 12, 2389-2402.
- Denisson, W. y Kirman, H., (1996). Seagrass survival model. In *Seagrass Biology: proceeding of an international workshop*. Australia, 291-293 pp.
- Duchartre, M.P., (1872). Quelques observations sur les caractères anatomiques des *Zostera* et *Cymodocea*, a propos d'une plante trouvée près de Montpellier. *Bull. Soc. Bot. Fr.* 19, 289-302
- Duck, R.W. y Mc Manus, J., (1990). Uses of sidescan sonar in lakes and reservoirs. *6th-International IAEG Congress, Delf Univ. of Technology*, (D.G. Price Ed.), pp. 1081-1085.
- Duck, R.W.; McManus, J. y Lord, J., (1993). Seismicity and Bed Sediment Morphology in a Perthshire Reservoir, UK., *Geomorphology and Sedimentology of Lakes and Reservoirs*: 225-239.
- Drury, S.A., (1987). *Image Interpretation in Geology*. Allen & Unwin Inc. 243 pp.
- Etter, P.C., (1991). *Underwater Acoustic Modeling: Principles, Techniques and Applications*. Ed. Elsevier Applied Science, 305 pp.
- Fish, J.P. y Carr, A.H., (1990). *Sound underwater images; a data*. American Underwater Search and Surveys Ltd, Lower Cape Publishing Orleans, MA, 189 pp.
- Fish, J.P. y Carr, A.H., (1991). *Sound Underwater Images: A guide to the Generation and Interpretation of Sonar Data*.

- Flemming, B.H., Kleim, M. y Denbigh, P.M., (1982). *Side scan sonar techniques*: CapeTown. Soth Africa. W.G.A. Russel-Cargil.
- Font Quer, P., (1993). *Diccionario de Botánica*. Edit. Labor S.A., 1244 pp.
- Foster-Smith, R y Gilland, P. (1997). Mapping the seabed. *CoastNET*, 2, (3), 1pp.
- Frappa, M. y Duprat, M., (1982). Relations entre la réponse acoustique (5 kHz) et la nature litologique des fonds marins. *Geophy. Res.* 5: 405-419.
- Frisk, G., (1994). *Ocean and Seabed Acoustics: a Theory of Wave Propagation*. PTR Prentice Hall, 299pp.
- Fukunaga, K., (1986). Statistical Pattern Classification. *Handbook of Pattern recognition and Image Processing*. Academic Press, pp. 3-32.
- Gallegos, C.L. y Kenworthy, W. J., (1996). Seagrass depth limits in the Indian River Lagoon (Florida, USA): application of an optical water quality model. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 42: 267-288.
- Gloux, B., (1984). Méthodes acoustiques et informatiques appliquées la cartographie rapide et détaillée des herbiers. In: *International Workshop on Posidonia oceanica Beds* (C.F.Boudouresque, A. Jeudy de Grissac and J. Olivier, Ed.), GIS Posidonie publ., 1: 45-48, Fr.
- Gill, S. K., Mero, T.N. y Parker, B.B., (1992). NOAA Operational Experience with Acoustic Sea Level Data. *Sea Level Measurement and Quality Control*, Joint IAPSO/IOC Workshop, October 12-13. Paris, France.
- González, R.C. y Woods, R.E., (1992). *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Publ. Company. 716 pp.

- Green, M. y Cunningham, D. (1998). Seabed imaging techniques. *Hydro International*. 2, (1), 4pp.
- Greenpeace, (1991). *Posidonia oceanica: El bosque sumergido*. Proyecto mediterráneo. Inf. El Cairo, Egipto, 34 pp.
- Hamilton, E.L., (1987). Acoustic properties of sediments. *Acoustics and Ocean Bottom*, (A. Lara, C. Ranz, R. Carbó Ed.) CSIC Madrid, pp. 3-58.
- Hartog, C., (1970). *The Sea-grasses of the world*. North-Holland publ. Co., 273 pp.
- Hay, A.M., (1988). The derivation of global estimates from a confusion matrix. *International Journal of Remote Sensing*, 9: 1395-1398.
- Heald, G. J., y Pace, N.G., (1996). An analysis of the 1st and 2nd backscatter for seabed classification. *Proc. 3rd European Conference on Underwater Acoustic*, 24-28 June, vol. II: 649-654.
- Hirata, M., Koga, N., Shinjo, H., Fujita, H., Gintzburger, G. y Miyazak, A., (2001). Vegetation classification by satellite processing in a dry area of north-eastern Syria. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 22, n° 4, 507-516.
- Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. y Collins, J., (1994). *Global Positioning System. Theory and Practice*. Springer Verlag, 355 pp.
- James, M., (1985). *Classification Algorithms*. London, Collins, 209 pp.
- Jan, D. y Minot, J., (1989). Les traitements d'image en sonar lateral. *Le Onde Electrique*, vol 69, 3: 13-19.

- Jensen, R.J. (1996). *Introductory digital image processing. A remote sensing perspective*. Prentice-Hall, Inc., 231 pp.
- Jeudy de Grissac, A., (1984). Effets des herbiers a *Posidonia oceanica* sur la dynamique marine et la sédimentologie littorale. *International Workshop Posidonia oceanica Beds*. GIS Posidonie Publ., 1: 437-443.
- Kerneis, A., (1960). Contribution à l'étude faunistique et écologique des herbiers de posidonies de la région de Banyuls. *Vie Milieu*, Fr., 11:145-187.
- Kinsler, L.E. y Frey, A.R., (1982). *Fundamentals of Acoustics*. 3° edición, Ed. John Wiley & Sons, New York. Pp. 397-440.
- Klein, M., (1971). The use of Side Scan Sonar to identify Sea Floor Characteristics. *Proceeding of the International Symposium on the engineering Properties of sea-floor Soils and their Geophysical Identification*, 289-295
- Laban, C. (1998). Seabed mapping. *Hydro International*, 2, (1), 4pp.
- Labrandero, J.L. (1978). *Aplicación de Métodos Digitales al Reconocimiento de Suelos Mediante Sensores Remotos*. Tesis Doctoral. Univ. Autónoma de Madrid. Fac. de Ciencias
- Ledoyers, M., (1962). Etude de la faune vagile des herbiers superficiels de Zosteracées et de quelques biotopes d'algues littorales. *Rec. trav. Stn. mar. Endoume.*, Fr., 25 (39):117-235.
- Lee, C y Landgrebe, D.A., (1991). Feature Selection Based on Decision Boundaries. In *Proc. IEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp: 1471-1474.

- Lefevre, J-R., Valerio, C. y Meinesz, A., (1984). Optimisation de la technique de la photographie aerienne pour la cartographie des herbiers des Posidonies. In: *International Workshop on Posidonia oceanica Beds*, (C.F. Boudouresque, A. Jeudy de Grissac and J. Olivier, Ed.), GIS Posidonie Publ., Fr. 1: 49-55 .
- Lillesand, T.M., y Kiefer, R.W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley and Son. 721 pp.
- De Lustrac J., Carbó R., (1968). Réponse percussionnelle des sphères et cylindres creux immergés. *Acustica*, 20, 21-27.
- MacLenan, D.N. y Simmonds, E.J., (1992). *Fisheries Acoustics* , Ed. Chapman & Hall, London. pp.21-23
- Maggi, P., (1973). Le problème de la disparition des herbiers à posidonies dans le Golfe de Giens (Var). *Sci. Pêche., Bull. Inst. Pêches. marit.*, Fr., (221): 7-20.
- Maggi, P., Gruet, Y. y Lassus, P., (1977). Influence de la pollution urbaine sur la vitalité des herbiers à posidonies dans le Golfe de Giens (Var). *Sci. Pêche., Bull. Inst. Pêches. marit.*, Fr., (269): 5-13.
- Magorrian, B.H., Service, M. y Clarke, W., (1995). An acoustic bottom classification survey of Strangford Lough, Northern Ireland. *J. Mar. Biol. Ass. UK*, 75, 987-992
- Maravall D., (1993). *Reconocimiento de Formas y Visión Artificial*. RA-MA Editorial. Madrid, 433 pp.
- Mason, D.C., LeBas, T., Sewell, I. y Angelikaki, C., (1991). Deblurring of GLORIA side-scan sonar images. *Marine Geophysical researches*, 14, 125-136.
- Mather, P.M., (1987). *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. Chichester. John Wiley & Sons, 352 pp.

- Mazel, C., (1985). *Side Scan Sonar*. Training Manual. Kein Associates, Inc. 150pp.
- Mazzella, L., Scipione, M.B., Gambi, M.C., Fresi, E., Buia, M.C., Russo, G.F., De Maio, R., Lorenti, M., y Rando, A., (1986). *Le praterie sommerse del Mediterraneo*. Stazione zoologica "Anthon Dohrn" di Napoli, 59 pp.
- Medwin, H. y Clay, C.S., (1988). "Fundamentals of Acoustic Oceanography", *Ed. Academic Pres, Boston*. Pp. 354-362
- Meinesz, A. y Lefevre, J.R., (1978). Destruction de l'étage infralittoral des Alpes-Maritimes (France) et de Monaco par les restructurations du rivage. *Bull. Ecol., Fr.*, 9(3): 259-276.
- Meinesz, A., Astier, J.M. y Lefevre, J.R., (1981a). Impact de l'aménagement du domaine maritime sur l'étage infralittoral du Var, France (Méditerranée occidentale). *Ann. Inst. Oceanogr. Paris, Fr.*, 57 (2): 65-77.
- Meinesz, A., Cuvelier, M. y Laurent, R., (1981b). Méthodes récentes de cartographie et surveillance des herbiers de phanérogames marines. Leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Vie Milieu, Fr.*, 31 (1): 27-34.
- Miller, R.L.; Swan, F.S. y Cheng, C.F., (1991). Digital Preprocessing Techniques for GLORIA II Sonar Images. *Geo-Marine Letters*, 11: 23-31.
- Molenaar, H., Barthélémy, D., De Reffye, P., Meinesz, A. y Mialet, I. (2000). Modelling architecture and growth patterns of *Posidonia oceanica*. *Aquatic Botany*, 66, 85-99.
- Molinier, R y Picard, J., (1952). Recherches sur les herbiers de Phanérogames marines du littoral Méditerranéen Française. *Ann. Inst. Océanogr. Fr.* 27 (3): 157-234.
- Moreno, A., Siljeström, P. y Rey, J., (1998). Benthic Phanerogam species recognition in side scan sonar images : Importance of the sensor direction. *Proceedings of the Fourth European Conference on Underwater Acoustics*, Roma, 173-177.

- Nagao, M. y Matsuyama, T., (1979). Edge Preserving Smoothing. *Computer Graphics and Image Processing*, Academic Press, pp: 394-407.
- Narasimha Rao, P.V., Vidyadhar, M.S.R.R., Malleswara Rao, T. CH. y Venkataratnam, L., (1995). An adaptative filter for speckle suppression in synthetic aperture radar images. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 16, nº 5, 877-889.
- Nasu, N. y Honjo, S., (1993). *Oceanographics Research and Development*. Springer Verlag. Tokyo, 224pp.
- Newton, R.S. y Stefanon, A., (1975). Application of side scan sonar in marine biology, *Marine Biology*, 31: 287-291.
- Nielsen, A.A., Larsen, R, y Conradsen, K., (1996). *RoxAnn Measurements and Video based Mussel Mapping from Øresund, Denmark: Data Report*. Dept. of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark (Lyngby), 14 pp.
- Ott, J.A., (1980). Growth and production in *Posidonia oceanica* (L.) Delile. *Mar. Ecol.*, 1: 47-64.
- Overton, K.J. y Weyouth, T.E., (1979). A noise reducing preprocessing algorithm. *Proc. Pattern Recog. And Image Processing*, pp. 98-507
- Parker, B., (1998). Marine applications of GPS in the National Ocean Service. *Proceedings, International Symposium on Marine Positioning*. Florida Institute of Technology, Melbourne, FL.
- Pasqualini, V., Pergent-Martini, C., Clabaut, P. y Pergent, G., (1998). Mapping of *Posidonia oceanica* using aerial photographs and side-scan sonar: Application of the island of Corsica (France). *Estuarine Coastal Shelf Science*, 47: 359-367.

- Pasqualini, V., Clabaut, P., Pergent, G., Benyussef, L. y Pergent-Martini, C., (2000). Contribution of side scan sonar to the management of mediterranean littoral ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2): 367-378.
- Patrick, E.A.,(1972). *Fundamentals of Pattern Recognition*. Prentice-Hall, Engewoods Cliffs, 314 pp.
- Pérès, J.M., (1984). La regression of des herbiers a *Posidonia oceanica*. In *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. & Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., Fr., 1: 445-454.
- Pérès, J.M. y Picard, J., (1964). Nouveau manuel de bionomie benthique de la Méditerranée. *Rec. trav. Stn. mar. Endoume.*, Fr., 31 (47): 1-137.
- Pérès, J.M. y Picard, J., (1975). Causes de la raréfaction et de la disparition des herbiers de *Posidonia oceanica* sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Aquat. Bot.* 1(2): 133-139.
- Pergent, G. y Pergent-Martini, C., (1991). Leaf renewal cycle and primary production of *Posidonia oceanica* in the Bay of Lacco Ameno (Ischia, Italy) using lepidochronological analysis. *Aquatic Botany*, 42: 49-66.
- Pergent, G., Romero, J., Pergent-Martini, C., Mateo, M.A. y Boudouresque, C.F., (1994). primary production stocks and fluxes in the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. *Marine Ecology Progress Series*, 106: 139-146.
- Pergent, G. y Pergent-Martini, C. y Boudouresque, C.F., (1995). Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée: Etat des connaissances. *Mésogée*, 54: 3-29.
- Pergent, G., Rico-Raimondino, V. y Pergent-Martini, C., (1997). Fate of primary production in *Oosidonia oceanica* meadow of the Mediterranean. *Aquatic Botany*, 59: 307-321.

- Pergent, G., Mendez, S., Pergent-Martini, C. y Pasqualini, V., (1999). Preliminary data on the impact of fish farming facilities on *Posidonia oceanica* meadows in the Mediterranean. *Oceanologica Acta*, 22(1): 95-107.
- Pergent-Martini, C., Rico-Raimondino, V. y Pergent, G., (1994). Primary production of *Posidonia oceanica* in the Mediterranean basin. *Marine Biology*, 120: 9-15.
- Pergent-Martini, C., (1998). *Posidonia oceanica*: a biological indicator of past and present mercury contamination. *Marine Environmental Research*, 45(2): 101-111.
- Pergent-Martini, C., (2000). Utilisation des herbiers de phanérogames marines dans la gestion du littoral méditerranéen. Diplôme d'Habilitation à Diriger des Recherches. Université de Corse: 1-90.
- Pinilla, R.C., (1997). Transformaciones de Fourier en Teledetección. Universidad de Jaen.
- Prisley, S.P. y Smith, J., (1987). Using classification error matrices to improve the accuracy of weighted land-cover models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53: 1259-1263.
- Ramos-Esplá, A., (1984). Cartografía de la pradera superficial de *Posidonia oceanica* en la bahía de Alicante (SE, España). *International Workshop Posidonia oceanica Beds*, Boudouresque C.F., Jeudy de Grissac A. & Olivier J. edit., GIS Posidonie publ., Fr., 1: 57-61.
- Rey, J. y Díaz del Río, V., (1989). Cartografía de los fondos marinos en la Bahía de Palma (Baleares, España) : distribución de las praderas vegetales y sedimentos superficiales. In: *International Workshop on Posidonia oceanica Beds*, (C.F. Boudouresque, A.; Meinesz, E. Fresi and V. Gravez ,Ed.): 2: 29-41., GIS Posidonie Publ., Fr.

- Rico-Raimondino, V., (1995). Contribution à l'étude des stocks et flux d'éléments dans les herbiers à *Posidonia oceanica*. Thèse Doctorat Ecologie, Université d'Aix-Marseille II: 1-248.
- Richards, J.A., (1993). *Remote Sensing Digital Imaging Analysis: An introduction*, 2nd ed. Berlin. Springer-Verlag, 340 pp.
- Sabins, F. Jr., (1986). *Remote Sensing. Principles and Interpretation* (Freeman and Co., New York).
- Sanchez Lizaso, J.L., (1993). *Estudio de la pradera de Posidonia oceanica (L) Delile de la Reserva Marina de Tabarca (Alicante): Fenología y producción primaria*. Tesis Doctoral, Universidad de Alicante, 121 pp.
- Sanchez Lizaso, J.L.; Gillen Nieto, J.E. y Ramos Esplá, A.A., (1990). The regression of *Posidonia oceanica* meadows in El Campello (Spain). *Rapp. Comm. Int. Mer Medit.* 32, 1, B-I 10: 7.
- Sanz, J.L. y Rey, J., (1983). Estudio de campos de algas con sonar de barrido lateral. *Bulletin of the Instituto Español de Oceanografía*, vol 1, 1: 115-118.
- Sauvageau, M.C. (1891a). Sur la racine des Cymodocées. *Ass. Fr. Av. Sci. Congr. Marseille*.
- Sauvageau, M.C., (1891b). *Sur les feuilles de quelques monocotyledones*. (Editor G. Masson, Paris).
- Schowengerdt, R.A., (1997). *Remote Sensing: models and methods for image processing*. San Diego, California: Academic Press.
- Searle, R.C. y Kidd, R.B., (1984). GLORIA Digital Image Processing and Interpretation of the Saharan Sediment Slide, Eastern North Atlantic, EOS. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 65: 1082-1083.

- Searle, R.C., Le Bas, T.P., Mitchell, N.C., Somer, M.L., Parson, L.M. y Patriat, P.H., (1990). GLORIA Image Processing: The State of the Art. *Marine Geophysical Research*, 12: 21-39.
- Seibold, E. y Berger, W.H., (1993). *The Sea Floor. An Introduction to Marine Geology*. 2d edition. Springer Verlag, 366 pp.
- Seidman, J.B., (1972). Some practical applications of digital filtering in image processing. *Proceedings of Computer Image Processing and Recognition Symposium*, University of Missouri, Columbia, Missouri.
- Schembri, P. J., (2001). Universidad de Malta, 2001.
[Http://www.science.plymouth.ac.uk/departments/learn/malta/Eco5.htm](http://www.science.plymouth.ac.uk/departments/learn/malta/Eco5.htm)
- Siljeström, P., Moreno, A. y Rey, J., (1994), Caracterización de comunidades de *Posidonia oceanica* a través del tratamiento digital de sonografías. *Proceedings VIII Symposium Ibérico de Bentos Marino*: 107-107.
- Siljeström, P., Rey, J. y Moreno, A., (1995). Seafloor characterization through side scan sonar image processing. *Int. Journal of Remote Sensing*, vol 16, no 4, 625-632.
- Siljeström, P., Rey, J., Moreno, A., Rodríguez, A, y Perez, E., (1995 b). Identification of riverbed structures aided by side scan sonar image processing. *Proceedings 17th International Cartographic Conference*, Barcelona, vol 1, 42-49.
- Siljeström, P., Rey, J. y Moreno, A., (1996). Characterization of phanerogam communities (*Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa*) using side-scan-sonar images. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 51: 308-315.
- Siljeström, P., Moreno, A., y Rey, J., (1998). Monitoring sea meadows for the sustainability of fisheries resources. *Proceedings 27th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Tromsø*, 171-174.

- Siljeström, P., Moreno, A., Carbó, R., Rey, J. Y Cara, J., (2001). Selectivity in the acoustic response of *Cymodocea nodosa* (Ucria) Ascherson. *Int. J. of Remote Sensing*. En prensa RES 105061
- Singh, A., (1984). Some Clarifications About the Pairwise Divergence Measure in Remote Sensing. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 5, pp. 623-627.
- Siwabewssy, P.J.W., Penrose, J.D., Kloser, R.J. y Fox, D.R., (1999). Seabed habitat classification. *Proc. International Conference on High Resolution Surveys in Shallow Waters DSTO*, 18-20 October, Sidney, Australia.
- Sørensen, P.S., (1999). *A study of common mussels (Mytilus edulis), neptune grass (Posidonia oceanica) and Cymodocea nodosa based on hydroacoustic measurements*. Tesis Doctoral, Dept. of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark (Lyngby), 168 pp.
- Sørensen, P.S. y Madsen, K.N.,(1994). *The Statistical Basis for Use of RoxAnn Measurements to Prepare Distribution Maps*. Report de VKI a Øresundkonsortiet A/S, 53 pp.
- Sørensen, P.S.; Madsen, K.N.; Nielsen, A.A.; Schultz, N; Conradsen, K y Oskarsson, O., (1998). Mapping of the benthic communities Common mussel and Neptune grass by use of hydroacoustic measurements. *3rd European Marine Science & Technology Conference*, Session report of Seafloor characterisation session, European Commission.
- Sokal, R.R. y Rohlf, F.J., (1979). *BIOMETRIA. Principios y métodos estadísticos en la investigación biológica*. Universidad del estado de Nueva York. H. Blume Ediciones. Madrid, 832 pp.
- Stanton, T.K., (1988). Sound scattering by cylinders of finite length. *Journal of Acoustic Society of America*, 83 (1), 55-67.

- Stehman, S.V., (1992). Comparison of systematic and random sampling for estimating the accuracy of maps generated from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58: 1343-1350.
- Sutton, J.L., (1979). Underwater acoustic imaging. *Proceedings of IEEE, April 1979*, vol: 67, 4: 554-566.
- Swain, P.H. y King, R.C., (1973). Two effective feature selection criteria for multispectral remote sensing. *International Conference on Pattern Recognition*. Washington.
- Swain, P.H. y Davis, S.M., (1978). *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. McGraw-Hill, 180pp.
- Thomas, I. L. y Allcock, G.M., (1984). Determining the confidence level for a classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 50: 1491-1496.
- Tomlinson, P.B., (1982). *Anatomy of the Monocotyledons* (Edited by C.R. Metcalfe, Clarendon Press, Oxford).
- Urick, R.J., (1967). *Principles of Underwater Sound for Engineer*. Ed. McGraw-Hill, New York. pp. 243-250.
- Urick, R.J., (1975). *Principles of Underwater Sound*. 2ª edición , Ed. McGraw-Hill, New York. pp. 104-114.
- Wang, M. Y Howarth, P.J., (1993). Modeling errors in remote sensing image classification. *Remote Sensing of Environment*, 45: 261-271.
- Watelet, A., (1866). *Description des Plantes fossiles du Bassin de Paris*. Paris, 264 pp.+ Atlas with 60 plates.

Wentzell, H.F. y Ziese, R., (1988). New Echosounding Methods for Shallow Water and Deep Sea Surveying, advances in UW Tech. Oceanology 16: 25-41.

UNIVERSIDAD DE SEVILLA

Reunido el Tribunal integrado por los abajo firmantes en el día de la fecha, para juzgar la Tesis Doctoral de D.ña Adela Koveuo López titulada Caracterización de Praderas de Posidonia Oceánica (L. Delile) y Cyrtodocca nodosa (Vais) Asherson por imágenes acústicas acordó otorgarse la calificación de _____

Sevilla, 31 de enero

2002

El Vocal,

El Vocal

El Vocal

[Signature]

[Signature]

[Signature]

El Presidente

El Secretario

El Doctorado

[Signature]

[Signature]

[Signature]

