

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE GANDÍA
MÁSTER EN EVALUACIÓN Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL DE
ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDÍA

“Métodos de muestreo para el estudio del estado ecológico de fanerógamas marinas en el Mediterráneo”

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Autor/a:
Elena Tamarit Castro

Director/a:
Dra. Isabel Pérez Arjona

GANDÍA, 11 de febrero de 2017

Resumen —

Las praderas de fanerógamas están consideradas entre los ecosistemas marinos más valiosos del planeta, en términos de los bienes y servicios que proveen. *Posidonia oceanica* (L.) Delile es endémica en el Mediterráneo y es la especie más ampliamente distribuida. Las angiospermas marinas están sufriendo un declive alarmante debido a presiones antrópicas, y *P. oceanica* se ha convertido en uno de los principales objetivos de protección en el Mediterráneo y está considerada una especie bioindicadora. Existe una gran diversidad de métodos para el estudio del estado ecológico de fanerógamas marinas, si bien, el cómo obtener información el estado ecológico a través de las medidas tomadas, sigue siendo un reto. Las técnicas acústicas son herramientas adecuadas para el estudio de los fondos marinos de la zona costera sumergida, debido a su capacidad de penetración en la columna de agua. En el presente trabajo, se presenta un caso de estudio en el que se ha utilizado un sónar de barrido lateral orientado verticalmente para la estimación de características estructurales de la vegetación situada sobre el fondo y se compara con medidas tomadas con métodos de muestreo directo.

Palabras clave:

Sónar de barrido lateral, *Posidonia oceanica*, métodos, muestreo, Mediterráneo

Abstract —

Seagrass meadows rank amongst the most valuable coastal ecosystems on Earth in terms of goods and services they provide. *Posidonia oceanica* (L.) Delile is endemic in the Mediterranean Sea, and is the most widely distributed species. Seagrasses are declining at alarming rates due to anthropic pressures, and *P. oceanica* has become one of the main targets of the protection in the Mediterranean Sea, and it is considered as a bioindicator species. There are several methods for the assessment of the ecological status of seagrasses, but obtaining accurate information is still challenging. Hydroacoustic techniques are suitable tools for seabed study in the submerged coastal area, because of their ability to penetrate into the water column. This work presents a case study where an estimation of the bottom seagrass structures had been assessed using a vertically oriented sidescan sonar, and it is compared with direct sampling measurements.

Key words:

Sidescan sonar, *Posidonia oceanica*, methods, sampling, Mediterranean

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	7
3. METODOLOGÍA.....	8
3.1. Área de estudio.....	8
3.1.1. Descripción del área de estudio.....	8
3.1.2. Transectos.....	8
3.2. Trabajos de campo.....	10
3.2.1. Muestreo acústico.....	10
3.2.2. Muestreo directo.....	13
3.3. Procesado de datos.....	15
3.3.1. Muestreo acústico.....	15
3.3.2. Muestreo directo.....	17
3.4. Mapa de integración.....	17
4. RESULTADOS.....	18
4.1. Muestreo acústico.....	18
4.1.1. Visualización con SonarPro.....	18
4.1.2. Análisis con Matlab.....	23
4.2. Muestreo directo.....	28
4.3. Mapa de integración.....	31
5. DISCUSIÓN.....	32
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	34
7. AGRADECIMIENTOS.....	35
8. BIBLIOGRAFÍA.....	36

1. INTRODUCCIÓN

Las fanerógamas marinas comprenden un grupo de 66 especies de plantas con raíces, tallos y flores, que viven en ambientes someros y estuarinos en todos los continentes del mundo, excepto la Antártida. Forman praderas que dan cobijo a miles de especies y juegan un papel importante en la producción pesquera y la estabilización del sedimento [1].

Hay cinco especies de angiospermas, estrictamente marinas, presentes en el Mediterráneo: *Posidonia oceanica* (L.) Delile, que es endémica y es la más extendida; *Cymodocea nodosa*, *Zostera marina*, y *Zostera noltii*, que se encuentran también en el océano Atlántico, y *Halophyla stipulacea*, que fue introducida desde el Mar Rojo [2]. También habitan especies del género *Ruppia*, como *R. maritima* y *R. cirrhosa*, cuya distribución se asocia a aguas salobres. No son consideradas angiospermas marinas, aunque en la costa española se conocen casos donde comparten protagonismo con especies marinas en determinados ambientes costeros [3].

Las angiospermas marinas, mantienen una estructura básica y aspecto similares a las de muchas plantas herbáceas (monocotiledóneas) terrestres conocidas (Figura 1).

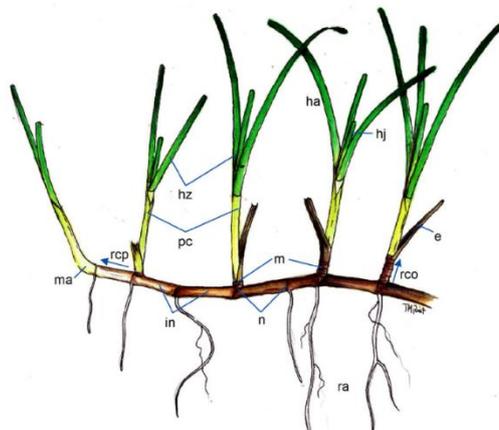


Figura 1. Arquitectura básica de las angiospermas marinas: ma = meristemo apical, m = meristemo de crecimiento; rcp = rizomas de crecimiento plagiotropo; rco = rizomas de crecimiento ortótropo; n = nudos; in = entrenudos, ra = raíces, pc = peciolo, e = escama, hz = haz, ha = hoja adulta, hj = hoja joven. [4].

Los factores ambientales clave que determinan su crecimiento son la luz, los nutrientes, la temperatura y la salinidad, por lo que son considerados como los descriptores más universales del estado de conservación de las praderas, y del efecto de la actividad humana en los ecosistemas marinos [4]. Se consideran especies ingenieras [5], en el sentido que son constructoras de hábitat de los que dependen numerosas especies para refugiarse, fijarse, alimentarse o reproducirse. Su importancia ecológica radica en la biodiversidad marina que habita en estas comunidades marinas. Con sus complejas estructuras tridimensionales, son capaces de modificar el ambiente favoreciendo la sedimentación de partículas y la captación de nutrientes, y aumentan la transparencia del agua al reducir la energía hidrodinámica y producir oxígeno. Estas funciones ecológicas fundamentales, se pueden traducir además en valores socio-económicos.

Se estima que en España existen 1.618,69 km² de praderas de angiospermas marinas, repartidas muy desigualmente según especies y zonas geográficas. El 90% se concentra en el Mediterráneo, ya que las condiciones hidrológicas e hidrodinámicas permiten su desarrollo

en la plataforma de las zonas costeras abiertas hasta 37 metros de profundidad. La mayor extensión corresponde a las praderas de *Posidonia oceanica* (L.) Delile, con una superficie total de 1.159,04 km² en el territorio español [4] y se ha estimado que 12.247 km² en todo el Mediterráneo [6] (Figura 2).



Figura 2. Distribución de las praderas de *P. oceanica* (en marrón)[7].

El crecimiento de la ocupación del litoral, la construcción de infraestructuras, el desarrollo industrial y las actividades agrarias en las zonas costeras, ha provocado un incremento en los impactos sobre los hábitats de las angiospermas marinas. *P. oceanica* se ha visto afectada por daños mecánicos de artes de pesca de arrastre, anclaje de embarcaciones, dragados, eutrofización y otras formas de contaminación, con declives en su población particularmente observados en el norte y el oeste del Mediterráneo. Aunque la regresión de las praderas se suele relacionar con el impacto de actividades humanas, se ha observado declive también en áreas donde las presiones antropogénicas son muy bajas, indicando que otros factores climáticos pueden estar teniendo lugar [8].

Análisis recientes indican que se ha producido una degradación del 34% en los últimos 50 años [9]. En la Lista Roja de las Especies Amenazadas de la UICN se encuentra considerada como “Preocupación Menor” (en inglés “Least Concern”), aunque podría llegar a calificarse como “Vulnerable” en una o dos generaciones si las amenazas no se reducen en el Mediterráneo occidental [7].

La recuperación de las praderas de *P. oceanica* se suele considerar irreversible en la escala temporal humana, porque tiene una reducida tasa de crecimiento de los rizomas, tanto ortótropos o verticales (0,5-1 cm/año) como plagiótropos u horizontales (3-4 cm/año), y una variabilidad genética baja [10]. La gestión de los impactos directos, puede ayudar a promover la resiliencia, aunque esto puede llevar mucho tiempo [11,12]. Desde hace algunas décadas, se ha probado la viabilidad de los trasplantes de angiospermas marinas. En el Mediterráneo, ha fracasado cualquier intento de reforestar un fondo marino con *P. oceanica* debido a la lentitud de la especie para colonizar. Se ha intentado también con *Cymodocea nodosa* en Canarias, ya que es de crecimiento más rápido, y tampoco se ha conseguido [13].

Se hace por tanto necesaria la realización de acciones específicas para mitigar los impactos causantes de regresión de las praderas y la promoción de prácticas respetuosas que salvaguarden su conservación, permitiendo a estos hábitats desarrollar su papel clave en las áreas costeras.

La distribución de los hábitats marinos, y por ende su extensión, es el nivel de conocimiento más básico y elemental para dimensionar su importancia ecológica y el valor de sus servicios. Un esfuerzo colectivo de compilación de la información, su análisis y su selección, permitirá elaborar ecocartografías lo más fieles posible al conocimiento actual sobre la distribución y

extensión de las praderas marinas y proponer medidas específicas de gestión, así como la evaluación de los impactos que reciben.

Métodos para elaborar cartografías de angiospermas marinas

Las técnicas que se han venido utilizando para la elaboración de cartografías biónmicas han sido muy variadas. Las técnicas de muestreo directo como el buceo autónomo, permiten obtener datos precisos y localizados en relación a las características estructurales de la pradera, sus límites de extensión o su cobertura (Figura 3). Sin embargo, este tipo de técnicas conllevan mucho tiempo y un gran esfuerzo físico por parte de los buceadores, así como un considerable esfuerzo económico y proporcionan poca información sobre la distribución espacial debido a su escasa cobertura horizontal [14].



Figura 3. Trabajos de seguimiento por parte de buceadores [4].

Las cámaras de arrastre y los vehículos operados remotamente se han mostrado útiles en la obtención de información sobre la composición de las comunidades biológicas. Pero la calidad de los datos también está limitada por la claridad del agua, y la interpretación de los vídeos requiere grandes esfuerzos de tiempo y ha sido criticada por subjetiva [15, 16].

Los métodos de muestreo indirecto o las técnicas remotas, aportan la cobertura espacial continua de la que carecen los métodos directos. La teledetección óptica, ha sido en muchos trabajos una solución eficiente para cartografiar la existencia de las fanerógamas marinas en la zona intermareal. Sin embargo, en zonas sumergidas estas técnicas están limitadas por la claridad del agua, así como por la cobertura de nubes y la rugosidad de la superficie del mar [17], lo que suele llevar a una subestimación de la extensión del área ocupada por las fanerógamas [14, 18].

Los métodos de acústica activa son técnicas remotas que se han mostrado eficaces para la detección y caracterización de elementos en la columna de agua y el fondo marino, y la estimación de su distancia al observador [19]. Las ondas acústicas se comportan en el agua como ondas mecánicas, de manera que no se atenúan tan rápido como las ondas electromagnéticas. Uno de los sistemas activos más habituales son las ecosondas. Son equipos compuestos por dos elementos: el transceptor, que genera las señales eléctricas, y el transductor, cuyos materiales tienen propiedades piezoeléctricas, que convierten las señales eléctricas del transceptor en vibraciones que generan ondas acústicas en el medio.

El transductor emite paquetes de ondas acústicas con una determinada frecuencia y duración de pulso (pings), y recibe la señal de reflexión (eco) cuando las ondas se encuentran con un obstáculo. El software de la ecosonda proporciona directamente la distancia del objeto, ya que se conoce la velocidad de propagación del sonido en el medio y el tiempo entre la emisión de la onda sonora y la recepción de su eco. A partir del análisis del eco, se puede extraer

información acerca del obstáculo con el que ha chocado, como por ejemplo el relieve del fondo marino [20].

El sónar de barrido lateral (SBL), es un tipo particular de ecosonda consistente en un transductor monohaz con un ángulo transversal ancho y un ángulo longitudinal muy estrecho. Este tipo de transductores trabajan a altas frecuencias, entre 100 y 1000 kHz, en comparación con los 38 kHz de las ecosondas monohaz utilizadas para detectar bancos de peces. Los SBL se instalan en remolques que se sumergen para evitar cualquier tipo de perturbación de la embarcación. Gracias a la orientación transversal oblicua y a su haz de estrecha apertura angular longitudinal y a las altas frecuencias, permite estudiar las características texturales del fondo del mar y detectar objetos.

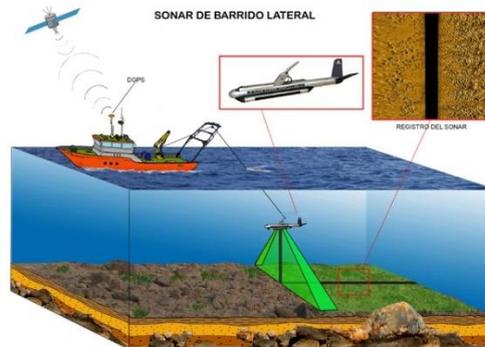


Figura 4. Esquema de un Sonar de Barrido Lateral (SBL).

El SBL ha sido utilizado en numerosos trabajos para detectar y cartografiar praderas de angiospermas marinas [21]. La diferencia de impedancias entre el agua y la vegetación acuática, debida a la densidad de los tejidos (que es diferente de la del medio que los rodea) y a la presencia de huecos en el tejido y burbujas de agua a su alrededor [22], produce una respuesta de retrodispersión (en inglés “backscattering”) más intensa que la procedente de la columna de agua, lo que permite la localización de las estructuras vegetales sobre el fondo.

Algunas de las ventajas de su uso son la rapidez, la visión general a la vez que el detalle necesario, su versatilidad en las distintas configuraciones, y unos costes de operación relativamente bajos. Sin embargo, las imágenes de los SSS no están generalmente dotadas de información batimétrica si no se utilizan SBL interferométricos. Además, el software de postprocesado de las imágenes de SBL depende en gran medida de las interpretaciones visuales subjetivas de las texturas, en oposición a un tratamiento numérico y objetivo de la imagen y de las clasificaciones realizadas con sondas monohaz y multihaz [14]. Requieren por tanto medidas directas (en inglés “groundtruthing”) como la toma de imágenes y medidas in situ para la verificación de las comunidades detectadas.

Una aproximación distinta a la cartografía de la vegetación subacuática considera las diferencias en la geometría de la vegetación [23]. Uno de los propósitos de este trabajo es el de utilizar una variación del SBL para la detección de praderas de angiospermas marinas, medir su distribución de alturas, y comparar los resultados obtenidos con la realización de un muestreo directo.

Métodos para evaluar el estado ecológico de angiospermas marinas

La Directiva Marco sobre la Estrategia Marina (2008/56/EC) ha establecido un marco en el que cada Estado Miembro deberá tomar las medidas necesarias para alcanzar un “Buen Estado Ecológico” del medio marino. Las angiospermas marinas se han listado como especies

objetivo a monitorizar, ya que muestran una sensibilidad extraordinaria a cambios en la calidad del agua, como variaciones en la concentración de nutrientes, materia orgánica o aumento de la turbidez, y a perturbaciones inducidas por actividades antrópicas [24].

P. oceanica se ha convertido en uno de los principales objetivos de seguimiento y protección en el Mediterráneo [25,26]. La Directiva Marco del Agua (92/43/CEE) incluye las praderas de *P. oceanica* como hábitats prioritarios (1120: Posidonion oceanicae. Praderas de *P. oceanica*). Esta especie presenta las cualidades requeridas para ser considerada bioindicadora de la calidad del agua: vive en el bentos, tiene longevidad, se distribuye por todo el Mediterráneo y tiene una fuerte capacidad para concentrar compuestos químicos contaminantes [27]. Se han desarrollado índices multivariantes que utilizan estas cualidades para estudiar el estado ecológico de las aguas costeras, como es el caso del POMI (Posidonia oceanica Multivariate Index) ampliamente utilizado en Cataluña [28].

Respecto al estudio del estado ecológico de las praderas, se han descrito una gran cantidad de descriptores estructurales [29]. En la elaboración del presente trabajo, se seleccionaron tres para la realización de un muestreo directo, con el fin de llevar a cabo una comparación con las medidas acústicas adquiridas con el SBL. El motivo de la elección de esos tres, atendió al tiempo y recursos disponibles para hacer el muestreo. El primer descriptor fue la densidad, que es uno de los más importantes, y representa el número de haces por unidad de superficie (convencionalmente 1 m²). La densidad se registra mediante el recuento de haces dentro de un área conocida, considerándose el área de 0,16 m² (un cuadrante de 40x40 cm) como el mínimo óptimo para estimar la densidad de *P. oceanica*. Debido a la distribución agregada de la especie, se considera que el número óptimo de réplicas son 10, y en función de los intereses del estudio, el cuadrante puede situarse en lugares específicos o aleatoriamente [30]. El siguiente descriptor fue la longitud foliar, que tiene una variación estacional y alcanza su máximo en verano, pudiendo llegar a medir más de un metro de longitud. Y el último fue la altura del dosel foliar, que está relacionado con la curvatura que presentan las hojas más largas en su posición natural.

2. OBJETIVOS

Objetivo general

A través de un caso de estudio de una pradera de *P. oceanica* situada en el litoral de la localidad de Denia (Alicante), integrar la información anterior disponible sobre la zona realizada con métodos de muestreo clásicos, con la toma de datos propios. Utilizar una variación del SBL para la detección de la vegetación y estudiar su aplicabilidad para la obtención de medidas estructurales de la pradera.

Objetivos específicos

- Determinación de la configuración del transductor óptima para la detección de vegetación en el fondo.
- Determinación de la distribución de alturas de la pradera a partir de los datos acústicos adquiridos.
- Comparación de los datos acústicos con los datos de un muestreo directo mediante inmersiones de buceo.
- Aplicación del método de procesamiento de datos a unas medidas realizadas en una campaña anterior.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

3.1.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se situó frente al litoral de Dénia, concretamente en el LIC/ZEPA de L'Almadrava (código ES5212005), declarado Lugar de Interés Comunitario (LIC) y Zona de Especial Protección para las Aves Marinas. Se trata de un arrecife-pradera de *P. oceanica* con pequeñas manchas de *Cymodocea nodosa*, que ocupa una superficie de 22,39 km². La zona está influenciada por las actividades antrópicas como el Puerto pesquero-industrial Dénia y por diversos puntos de vertidos de aguas residuales, siendo por tanto un enclave interesante para situar la zona de estudio, además de fácil acceso (Figura 5).

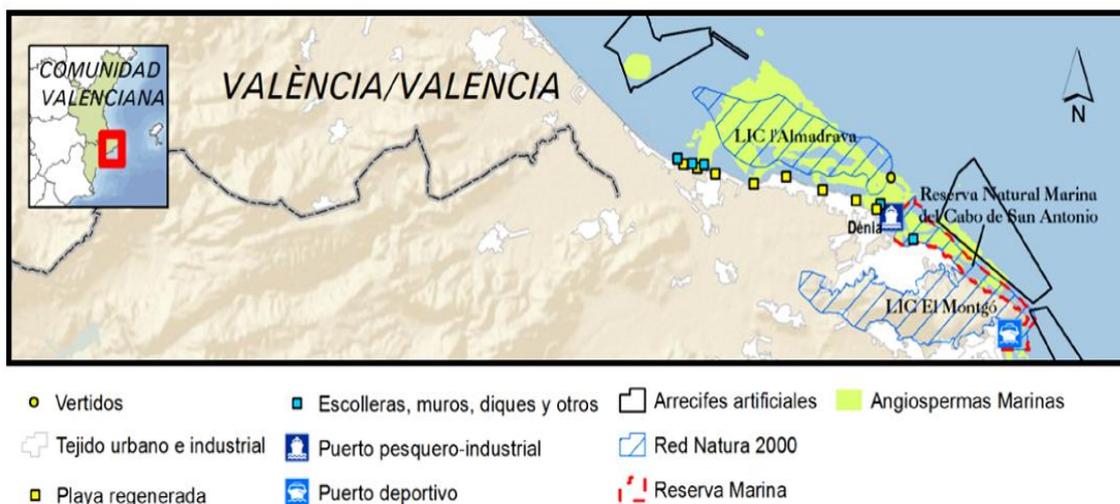


Figura 5. Mapa de distribución de las praderas de angiospermas marinas, presiones antrópicas y medidas de gestión en la zona de estudio (Fuente: [4]).

3.1.2. Transectos

Con el fin de determinar zonas relevantes para la localización de los transectos, se realizó una primera inspección visual mediante el remolque de un buzo en un acuaplano. Se seleccionaron 3 zonas con fondos de características diferenciadas:

- Transecto 1 (T1): Fondo con sustrato arenoso desprovisto de vegetación.
- Transecto 2 (T2): Fondo con sustrato arenoso cubierto de vegetación dispersa.
- Transecto 3 (T3): Fondo con sustrato arenoso enteramente cubierto de vegetación.

Cada transecto tuvo una longitud de 100 metros. Para optimizar el tiempo de navegación, los transectos se situaron de forma consecutiva, siendo la navegación de un total de 450 metros, discurriendo paralelamente a la costa por una profundidad de 5,2 metros (Figura 6).

En el presente trabajo se han incluido los datos de una campaña realizada en el año 2009 en una zona próxima. En ella se realizó un muestreo acústico utilizando la misma metodología que se detalla en este apartado, y un muestreo directo en el que se tomaron varias medidas estructurales. El transecto realizado en 2009 se ha etiquetado como T4. Su punto de inicio

estaba situado a 150 m del Transecto 3, y tuvo una longitud total de 490 m, discurriendo perpendicular a la costa por las profundidades 6, 7 y 8 metros.

- Transecto 4 (T4): Fondo con sustrato arenoso cubierto de vegetación al inicio y desprovisto de vegetación al final.

En la Figura 5, se observan las posiciones de los transectos en una imagen de GoogleEarth®, integrada con la batimetría de la zona (ver referencia en el apartado 3.4. de este trabajo).



Figura 6. Situación de los transectos realizados en 2016 (T1, T2 y T3) y el realizado en 2009 (T4).

Para marcar las posiciones de inicio y fin de los transectos se utilizaron boyas atadas a un cabo lastrado, que fue dejándose caer desde la embarcación. Las coordenadas se registraron con un GPS GN33 de Simrad conectado con la ecosonda. En la Tabla 1, se muestran las coordenadas registradas.

Tabla 1. Coordenadas UTM de inicio y fin de los transectos realizados.

		Inicio	Fin
T1	E	245789.40 m	245889.70m
	N	4305941.68 m	4305911.09m
T2	E	245932.43m	246028.28m
	N	4305883.99m	4305836.48m
T3	E	246071.85m	246228.73m
	N	4305820.41m	4305797.67m
T4	E	246178.29 m	246402.00 m
	N	4305950.69 m	4306397.24 m

3.2. Trabajos de campo

Los trabajos de campo consistieron en un muestreo acústico con el SBL y un muestreo directo. Se llevaron a cabo el día 5 de julio de 2016, y se navegó con una embarcación de recreo de 8,5m de largo (Figura 7).



Figura 7. Embarcación utilizada en los trabajos de campo.

3.2.1. Muestreo acústico

La adquisición de datos acústicos se llevó a cabo utilizando una ecosonda EA400 con un transductor *Sidescan Sonar* de Simrad®. En lugar de ir remolcado en un pez, que es la configuración típica (Figura 4), el transductor se montó en un lateral de la embarcación (a estribor). Mediante un soporte de acero, una pértiga, y una pequeña tabla de madera náutica, el transductor quedó perfectamente fijado y situado por debajo del casco de la embarcación para evitar interferencias (Figura 8).



Figura 8. Colocación del transductor en el soporte.

El cable del transductor se conectó a la ecosonda, situada a cubierto junto con el ordenador de trabajo. La antena del GPS se sujetó en una parte alta de la proa para facilitar la comunicación con los satélites y realizar el posicionamiento. A continuación se realizaron las conexiones necesarias para el funcionamiento de la ecosonda (Figura 9).

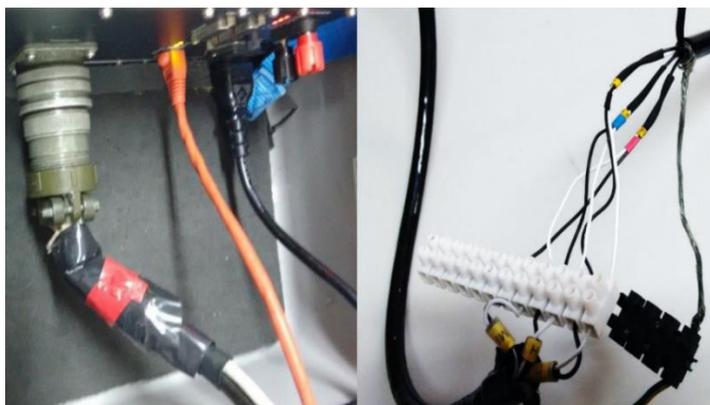


Figura 9. Conexiones de la ecosonda.

A la izquierda de la figura, se encuentra la conexión “ecosonda – transductor”. En el centro, se encuentra el cable de red correspondiente a la conexión “ecosonda – ordenador”. A la derecha de éste, se encuentra el cable de alimentación correspondiente a la conexión “ecosonda – batería”, y finalmente a la derecha de la figura, muestran las conexiones del cable del transductor. Además, existe una conexión “GPS – ordenador”, que se debe configurar a través del software de la ecosonda, y que nos permite tener los datos acústicos correctamente georreferenciados.

Posteriormente, se configuraron los parámetros de emisión del transductor a través del software específico de la ecosonda, el cual permite grabar y visualizar los datos (Figura 10).



Figura 10. Configuración de los parámetros de emisión del transductor.

Los parámetros de emisión del transductor fueron los indicados en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de emisión del transductor.

Parámetro	Valor
Frecuencia	200 kHz
Apertura del haz (hasta caída -3dBs)	49°
Potencia	100 W
Duración del pulso	64 μ s
Tasa de muestreo máxima	10 ping/s
Intervalo de muestreo	975 s
Ancho de banda	0,0123
Intervalo entre ping	0,065 ms

En la Figura 11, se observa una representación esquemática del resultado final del montaje del transductor en relación con la embarcación.

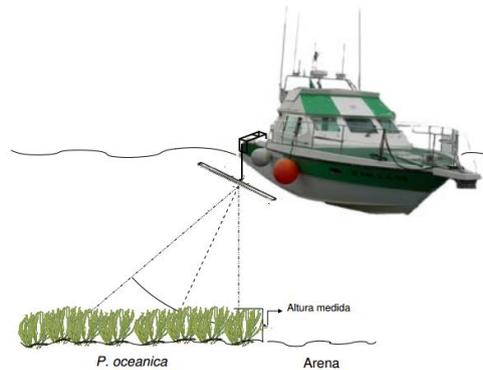


Figura 11. Esquema general del montaje del transductor (Imagen modificada de [14])

El ángulo del haz del transductor tenía una apertura transversal de 49° y una apertura longitudinal de $0,5^\circ$, es decir, en forma de “abanico”. En este trabajo, se consideraron dos posibles orientaciones del transductor para la adquisición de datos. En la primera, el haz emitido incide sobre el fondo de forma perpendicular, es decir, con una inclinación de la dirección de propagación del haz respecto la normal a la superficie de 0° . Ésta orientación totalmente vertical permite la máxima insonificación del fondo. En la segunda el transductor rota 25° , por lo que la insonificación adquiere una forma más oblicua (Figura 12). Esto se realizó con el fin de determinar cuál de las configuraciones resulta óptima para la detección de la vegetación y la posible caracterización de su altura.

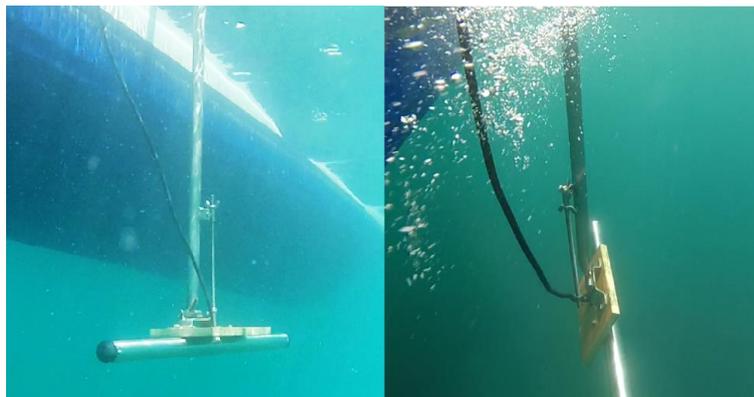


Figura 12. Vista subacuática de la configuración del transductor en ángulo 0° (izquierda) y 25° (derecha).

Se posicionó la embarcación en las coordenadas de inicio del Transecto 1 y se realizaron los transectos 1, 2 y 3 de forma consecutiva utilizando, en primer lugar, un ángulo de inclinación del transductor de 0° y terminando en las coordenadas de fin del Transecto 3. Se mantuvo una velocidad de navegación en torno a 4 nudos, y se fue deteniendo y activando la adquisición de datos acústicos en las posiciones de inicio y fin de los transectos. Esto permitió tener archivos diferenciados de los 3 transectos, facilitando el procesado de datos posterior. Debido a las buenas condiciones climáticas el día de la campaña, se consideraron despreciables los movimientos de cabeceo, balanceo y guiñada de la embarcación.

Una vez finalizados los transectos, la embarcación volvió a la posición inicial, es decir, a las coordenadas de inicio del Transecto 1, y se repitió la navegación a lo largo de los tres transectos, esta vez utilizando una configuración en ángulo de 25° .

3.2.2. Muestreo directo

Con el fin de obtener datos para validar los resultados acústicos, se llevaron a cabo dos inmersiones con equipo de buceo autónomo en las zonas cubiertas anteriormente por los haces acústicos, concretamente en el T2 y T3, con el objetivo de tomar medidas estructurales y ver si había diferencias estructurales en la vegetación entre estas dos zonas.

Los trabajos subacuáticos tienen asociada una dificultad de los buzos para orientarse correctamente. Para tener seguridad de realizar la verificación de datos (en inglés “groundtruthing”) en las zonas irradiadas acústicamente, se calculó la distancia máxima a cubrir por los buzos con respecto del cabo lastrado que marcaba el transecto.

Puesto que el haz acústico tiene forma de “abanico”, y conociendo el ángulo de inclinación del transductor, la distancia máxima que cubre el haz desde el transecto, se puede calcular por trigonometría. En la Figura 13 se muestra un sencillo esquema de la operación matemática.

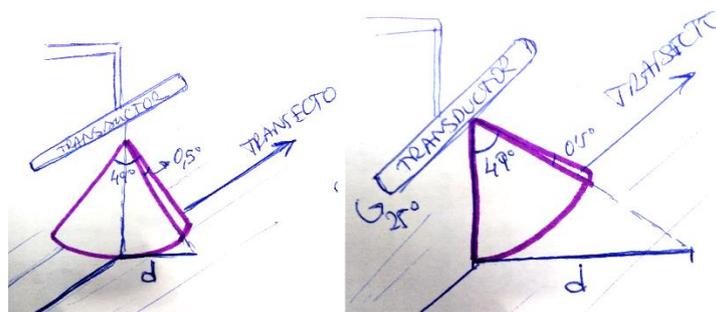


Figura 13. Esquema ilustrativo del cálculo de la distancia cubierta por el haz acústico.

El cálculo se realiza a partir de la Ecuación 1:

$$d = h \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

Donde “d” es la distancia, “h” es la profundidad y α el ángulo de inclinación del transductor respecto del suelo. Resolviendo la Ecuación 1:

- Transductor a 0° : $d = 5,2 \cdot \operatorname{tg} 24,5^\circ = 4,74 \text{ m.}$
- Transductor a 25° : $d = 5,2 \cdot \operatorname{tg} 49^\circ = 5,98 \text{ m.}$

Se estableció que la distancia máxima a separarse del cabo lastrado de forma perpendicular serían 6 metros, situándose los buzos en el lado derecho del cabo lastrado, que fue por donde había pasado el haz acústico.

Cada uno de los dos buzos se equipó con un cuadrante de PVC de 40x40cm construido con materiales de bajo coste (ver Anexo I) como unidad muestral, un jalón con marcas de 10 cm de color rojo y blanco cuyo error de medida era de $\pm 5\text{cm}$, un lápiz y una tablilla. Se lanzaron 10 cuadrantes (réplicas) de forma aleatoria, dejándolos caer desde una altura de 1 m, y dejando al menos 1 m entre réplicas. Se tomaron medidas de los siguientes descriptores estructurales:

- Densidad. Recuento manual de los haces presentes dentro de cada cuadrante.
- Longitud. Medida de la longitud en centímetros de 3 hojas elegidas aleatoriamente, colocando el jalón de forma vertical y estirando la hoja sobre él.

- Altura del dosel foliar. Medida de la altura en centímetros alcanzada por la vegetación. Se consideró "dosel" la zona más alta alcanzada por la curvatura del estrato foliar cuando las hojas aparecen dobladas sobre su propio peso. Se realizó colocando el jalón en el centro del cuadrante.

En la Figura 14 se muestra uno de los cuadrantes utilizados en el muestreo. En la Figura 15, se muestra un detalle del recuento manual de haces y un esquema de las medidas del dosel respecto a la colocación del jalón.



Figura 14. Cuadrante de 40x40 cm utilizado como unidad muestral.

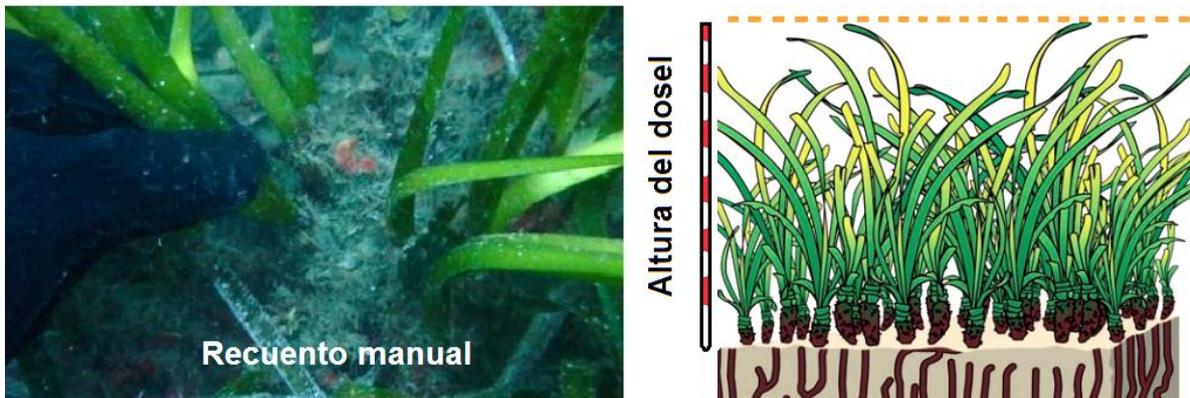


Figura 15. Recuento manual de haces para medidas de densidad y uso del jalón para medidas de longitud y altura del dosel.

Transecto T4

Los trabajos de campo se realizaron el día 25 de Noviembre de 2009.

Muestreo acústico: Se realizó con el mismo modelo de ecosonda, con el transductor montado análogamente en la embarcación, con la configuración 0°, y los mismos parámetros de emisión.

Muestreo directo: Se realizó una inmersión donde se tomaron las siguientes medidas estructurales:

- Longitud de las hojas en centímetros.
- Cobertura del fondo por *P. oceanica*, mata recubierta por algas o arena, en porcentaje (%).

3.3. Procesado de datos

3.3.1. Muestreo acústico

Los datos acústicos adquiridos en los trabajos de campo fueron recogidos por el software específico de la ecosonda y fueron almacenados en ficheros de extensión .raw en una memoria USB.

Ya en oficina, se utilizó el software Sonar5-Pro® para la visualización de los datos. Para ello, los ficheros fueron convertidos a la extensión .uuu mediante una licencia de Sonar5-Pro®. Este software permite estudiar los ecogramas para cada uno de los transectos de una forma muy intuitiva (Figura 16).

En el eje de las X se representan los pings acústicos emitidos a lo largo del transecto, y en el eje Y, se representa la profundidad (R) en metros (en fondo verde). La barra de colores indica la intensidad de eco en unidades de decibelios (dB). En la parte superior de la ventana de trabajo, se muestra información sobre los parámetros utilizados durante la adquisición de datos acústicos, así como las coordenadas geográficas para cada ping emitido.

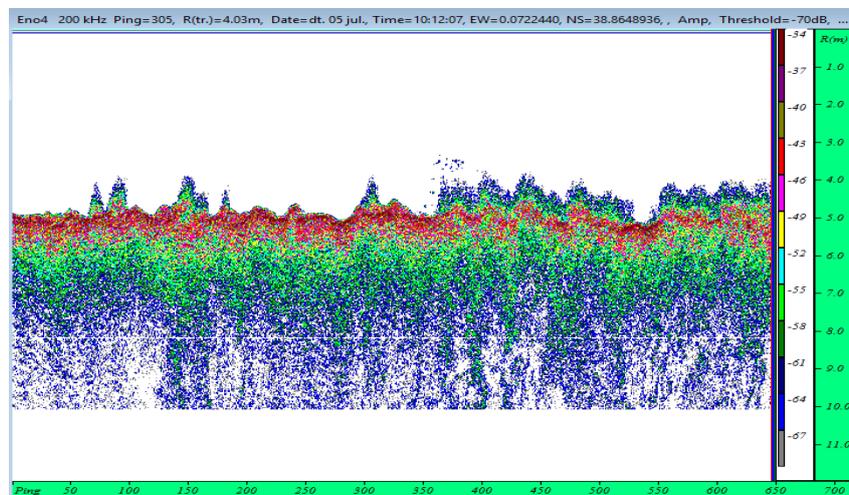


Figura 16. Ejemplo de interfaz de Sonar5-Pro® para una zona con presencia de vegetación.

Con esta visualización, se realizó una comparación con imágenes aéreas de GoogleEarth®, ya que en zonas someras es posible ver estructuras permanentes sobre el fondo en color más oscuro. Esto permite comprobar si los datos acústicos adquiridos están correctamente georreferenciados, por tratarse la vegetación de una estructura casi permanente.

El procesado posterior se realizó con el software Matlab®. Se seleccionaron intervalos de pings a procesar, y se exportaron los archivos con extensión .uuu a .txt. A continuación, se desarrolló un script en Matlab® para convertir los datos de .txt a .mat, que es el formato de archivos propio del programa (ver script en Anexo II), con el fin de realizar así el análisis de detección del fondo.

Algoritmo de detección del fondo

Se desarrolló un script en Matlab® que permite analizar cuantitativamente los datos obtenidos en el muestreo acústico (ver script en Anexo III).

Cada uno de los pings emitidos por el transductor, recibió una señal de reflexión o eco cuando éste se encontró con un obstáculo. Para poder comparar pings de diferentes profundidades es necesario primero realizar una localización del fondo que permita alinearlos y delimitar la duración del eco.

Aplicación de la función TVG

Dentro del algoritmo, esta función permite aplicar una corrección para compensar las pérdidas por transmisión que ocurren en el agua, tanto debido a la propagación como a la absorción de la onda acústica en este medio.

El objetivo fue conseguir valores de amplitud de eco que solo dependieran de las propiedades del blanco (el blanco aquí es el fondo del mar), y no de la distancia a la que se encuentra, puesto que a medida que recorre distancia, ocurren las pérdidas por transmisión.

El nivel de eco detectado por la ecosonda corresponde a la siguiente ecuación:

$$EL = SL + TS - TVG \quad (4)$$

“EL” es nivel de eco, “SL” es el nivel de fuente, “TS” la potencia del blanco (en inglés “*target strength*”) y TVG corresponde a las pérdidas por transmisión.

La forma particular que adquiere el TVG depende de la geometría de la onda acústica que se propaga. En el caso de dispersores en la columna de agua el valor del TVG adquiere la expresión:

$$TVG = 40 \cdot \log R + 2 \cdot \alpha \cdot R \quad (5)$$

“R” es la distancia al transductor y “alpha” el coeficiente de absorción del medio en que se propaga, en este caso el agua del mar.

Se aplicó por tanto la función TVG para que los niveles acústicos (EL) fueran independientes de la profundidad de trabajo, es decir, no estuvieran dando una información sesgada por las pérdidas de transmisión que vienen asociadas. Se corrigió el nivel de eco obtenido sumándole la función TVG. El valor de eco corregido (SV) por tanto, tuvo la siguiente expresión:

$$SV = EL + TVG = SL + TS \quad (6)$$

Detección del fondo

Para cada ping se localiza el máximo y se le resta la duración del pulso emitido. Se eliminaron los valores cercanos al transductor. Se realizó para cada ping la búsqueda del valor máximo de eco, que sirve de referencia para asignar la distancia a la que se detecta el fondo, con la función TVG aplicada.

Integración de la energía

Curva de energía acumulada en toda la columna de agua. Consiste en la suma de la energía en 1,5 metros antes del fondo, permitiendo detectar si hay o no vegetación que la esté acumulando. Se utiliza esta distancia en relación a la longitud máxima que las hojas de *P.oceanica* alcanzan en verano.

Medida de la altura de la vegetación

Con el objetivo de buscar un criterio de coherencia espacial, para cada valor de ping se hizo una media móvil centrada de ventana 10 pings. Consiste en realizar un promedio con los 5 pings anteriores y 5 posteriores, es decir, 10 pings consecutivos. Esto mitiga el efecto del ruido en la medida y genera una curva más suavizada. Este promedio se aplicó posteriormente también a la curva de detección del fondo, para realizar una comparación entre ellas.

3.3.2. Muestreo directo

Los datos tomados en las inmersiones de buceo, se procesaron de la siguiente manera:

- Densidad. El recuento de número de haces por cuadrante, se dividió por el área muestral de 0,16 m². Posteriormente se hizo un promedio de todas las réplicas en cada pradera, obteniéndose dos valores de densidad, uno para la inmersión en T2 y otro para la inmersión en T3.
- Longitud. Para cada cuadrante (réplica) se calculó el promedio de las 3 medidas (subréplicas), así como el promedio del total por inmersión (30 subréplicas), la mediana y la moda.
- Altura del dosel foliar. En lugar de considerar las 10 réplicas de cada inmersión, se hizo un promedio de las medidas considerándose solamente los datos de 5 réplicas en cada una. El motivo de esto fue un error en la toma de medidas que se detectó durante el procesado de datos. Puesto que uno de los objetivos del presente trabajo es el de realizar una comparación entre métodos de muestreo, se ha considerado que estos errores son parte del día a día cuando se trabaja en condiciones subacuáticas. Estos errores pueden ofrecer información sobre las posibles carencias del método de muestreo directo, por lo que los datos se han dejado indicados igualmente con un asterisco, aunque no se haya trabajado con ellos.

3.4. Mapa de integración

A través de una licencia del sistema de información geográfica ArcGIS 10.3., se elaboró un mapa con el fin de integrar la información disponible de la zona con la posición de los transectos realizados. El mapa cuenta con las siguientes capas:

- Un mapa base de la zona de estudio.
- Ecocartografía del litoral de Valencia y Alicante disponible en la web del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Esta ecocartografía se realizó dentro del Plan de Ecocartografías del litoral español, llevado a cabo por la Dirección General de Sostenibilidad de la Costas del mar, y la UTE formada por las empresas HIDTA e IBERINSA en los años 2006 y 2007.
- Los transectos realizados en el muestreo de julio de 2016.
- El transecto realizado en el muestreo de noviembre de 2009.

4. RESULTADOS

4.1. Muestreo acústico

A continuación se muestran los resultados obtenidos tras el análisis de los datos acústicos adquiridos en cada uno de los transectos, y para cada configuración del transductor. Se incluyen capturas de pantalla ampliadas para facilitar la observación del lector.

4.1.1 Visualización con Sonar5-Pro®

Configuración 0°

- Transecto 1 (T1): Fondo con sustrato arenoso desprovisto de *P. oceanica*

En tonos rojos se puede observar la localización del fondo (nivel máximo de eco recibido por la ecosonda) a una profundidad de 5,2 m (Figura 17). Los tonos verdes y azules que hay por debajo, indican que el sonido ha seguido transmitiéndose por el sustrato. Sobre la línea del fondo, en el centro de la figura, se observa en azul una estructura poco definida.

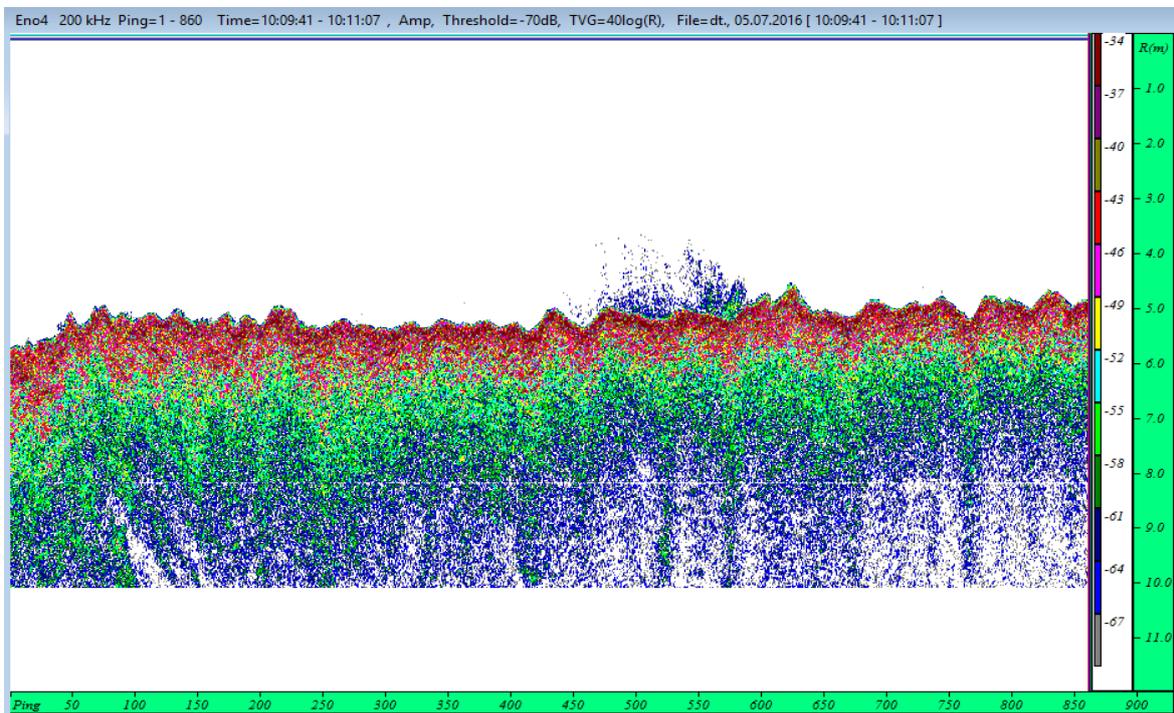


Figura 17. Ecograma del Transecto 1.

En la imagen de GoogleEarth®, no se distingue ninguna estructura permanente en el fondo a lo largo del transecto (Figura 18).



Figura 18. Imagen aérea del Transecto 1.

- Transecto 2 (T2): Fondo con sustrato arenoso cubierto de *P. oceanica* dispersa

Sobre la línea roja del fondo, se observan algunas estructuras diferenciadas en colores azules (Figura 19). Seleccionamos los pings un par de ellas y buscamos sus coordenadas en GoogleEarth. La imagen aérea nos muestra que hay estructuras en el mismo lugar (Figura 20), lo que nos indica que la adquisición de datos está correctamente georreferenciada.

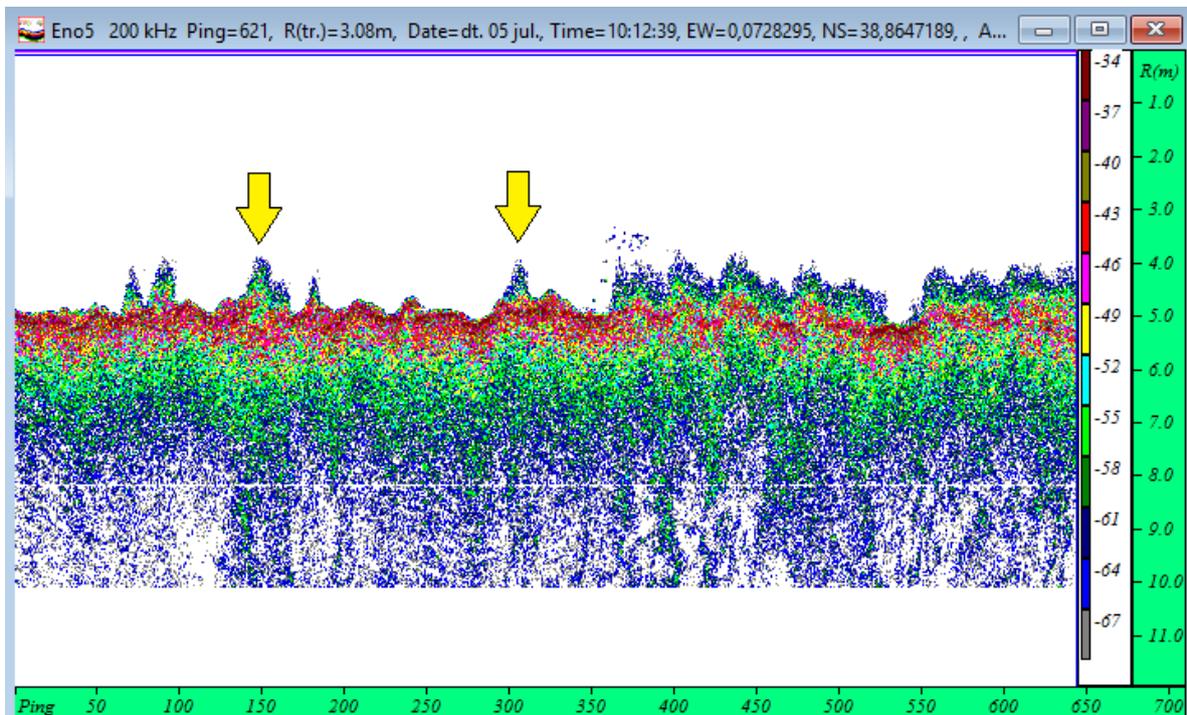


Figura 19. Ecograma del Transecto 2, con selección de dos estructuras.

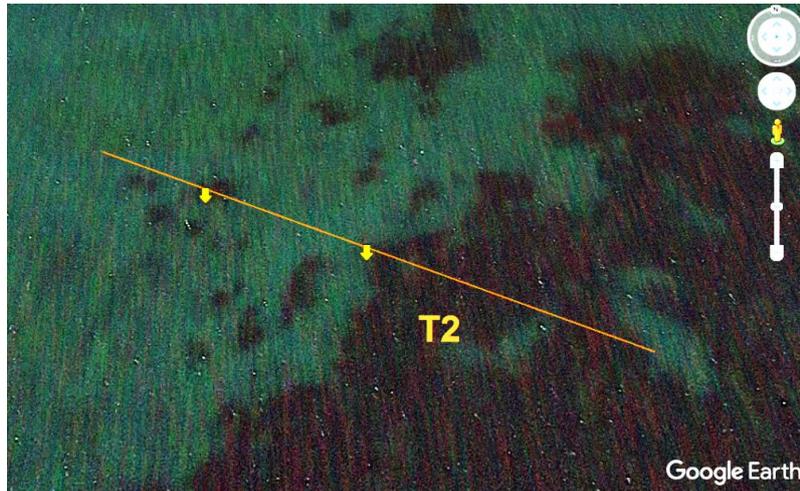


Figura 20. Imagen aérea del Transecto 2, con el posicionamiento de las estructuras seleccionadas.

- Transecto 3 (T3): Fondo con sustrato arenoso enteramente cubierto de *P. oceanica*

Observamos la línea roja del fondo cubierta por estructuras de color azul de forma continua (Figura 21). En la imagen de GoogleEarth, se observa el fondo cubierto también (Figura 22).

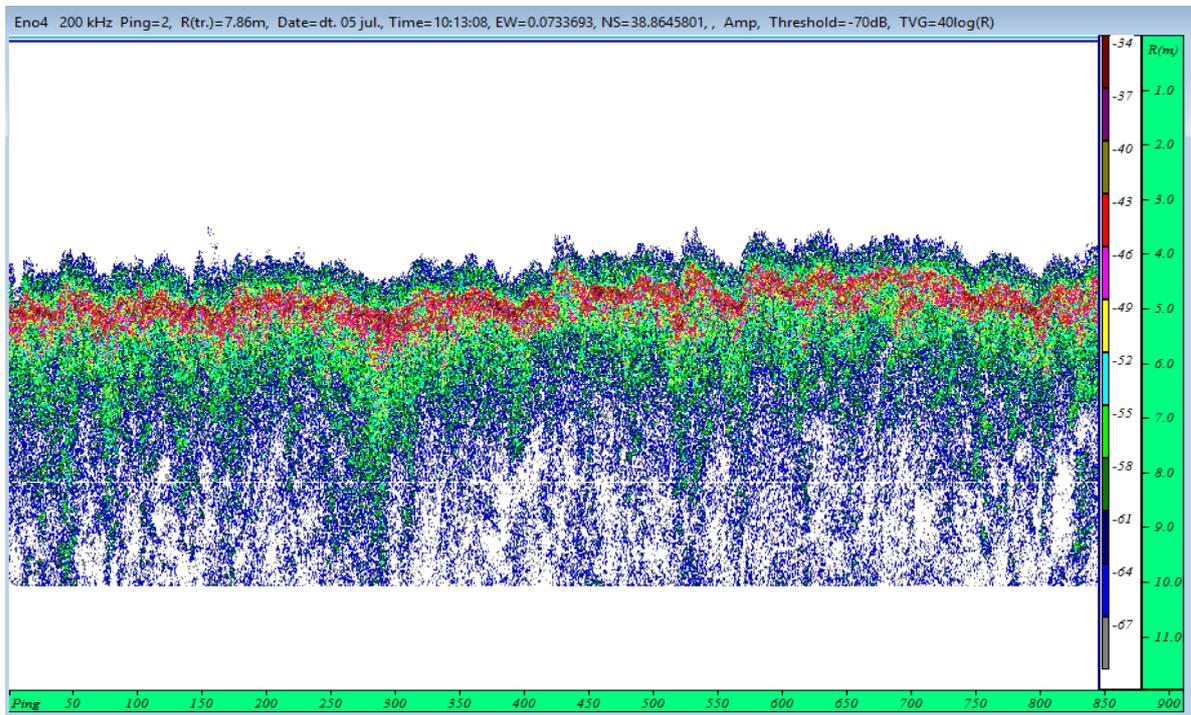


Figura 21. Ecograma del Transecto 3.

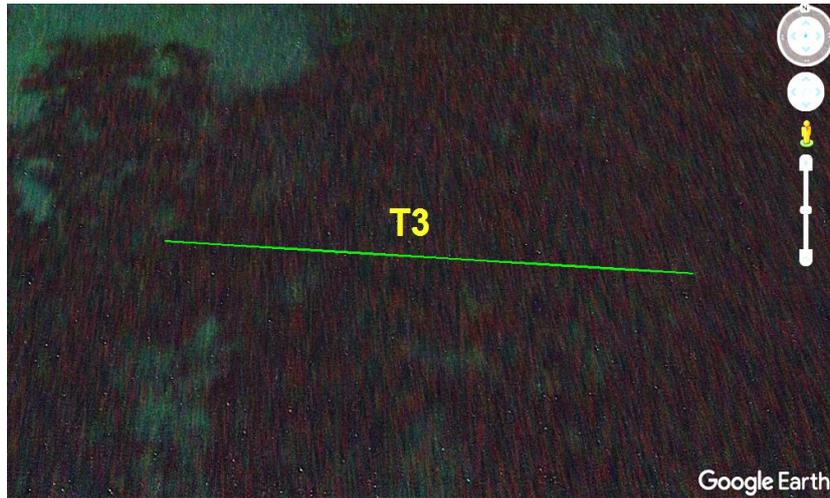


Figura 22. Imagen aérea del Transecto 3.

Configuración 25°

- Transecto 1 (T1): Fondo con sustrato arenoso desprovisto de vegetación. Con esta orientación, la línea del fondo no aparece definida en color rojo como antes (Figura 23). En azul, observamos algunas señales en la columna de agua de forma indefinida.

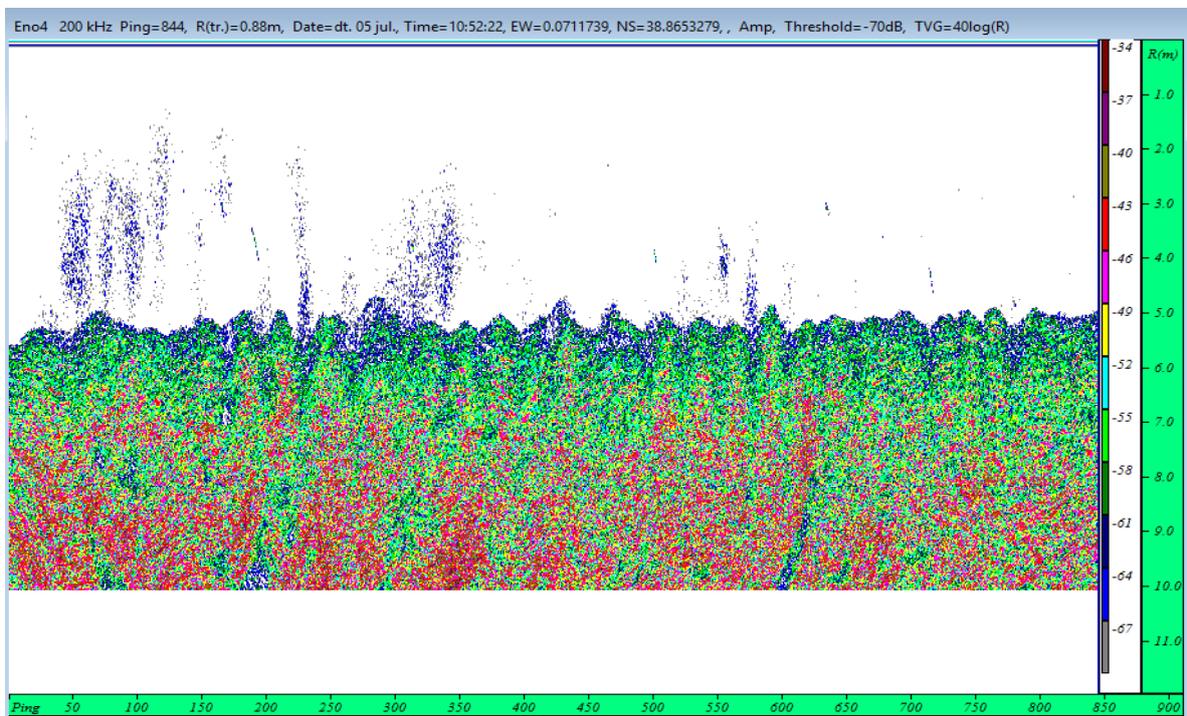


Figura 23. Ecograma del Transecto 1.

- Transecto 2 (T2): Fondo con sustrato arenoso cubierto de vegetación dispersa. Al realizar la comparación con el transecto T1 no se observa ninguna diferencia entre un fondo desprovisto de vegetación y uno con vegetación dispersa. No se distingue la línea del fondo de las estructuras sobre él (Figura 24).

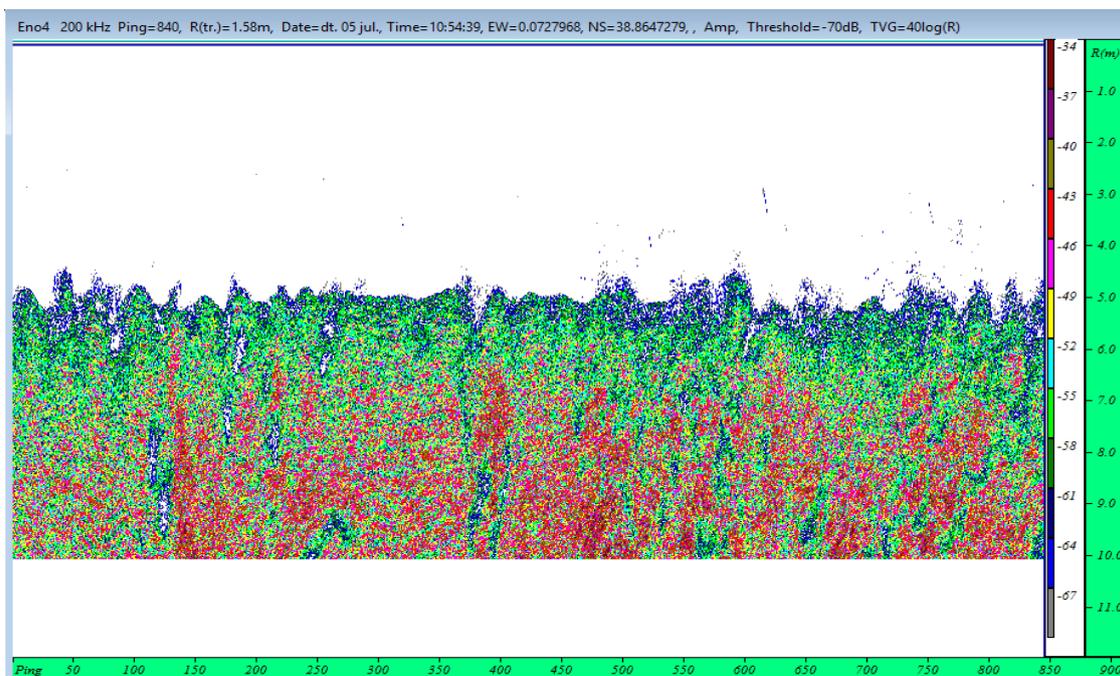


Figura 24. Ecograma del Transecto 2.

- Transecto 3 (T3): Fondo con sustrato arenoso cubierto de vegetación. Al realizar la comparación con los transectos T1 y T2, no se observa ninguna diferencia aparente entre un fondo desprovisto de vegetación, uno cubierto por vegetación dispersa, y uno enteramente cubierto (Figura 25).

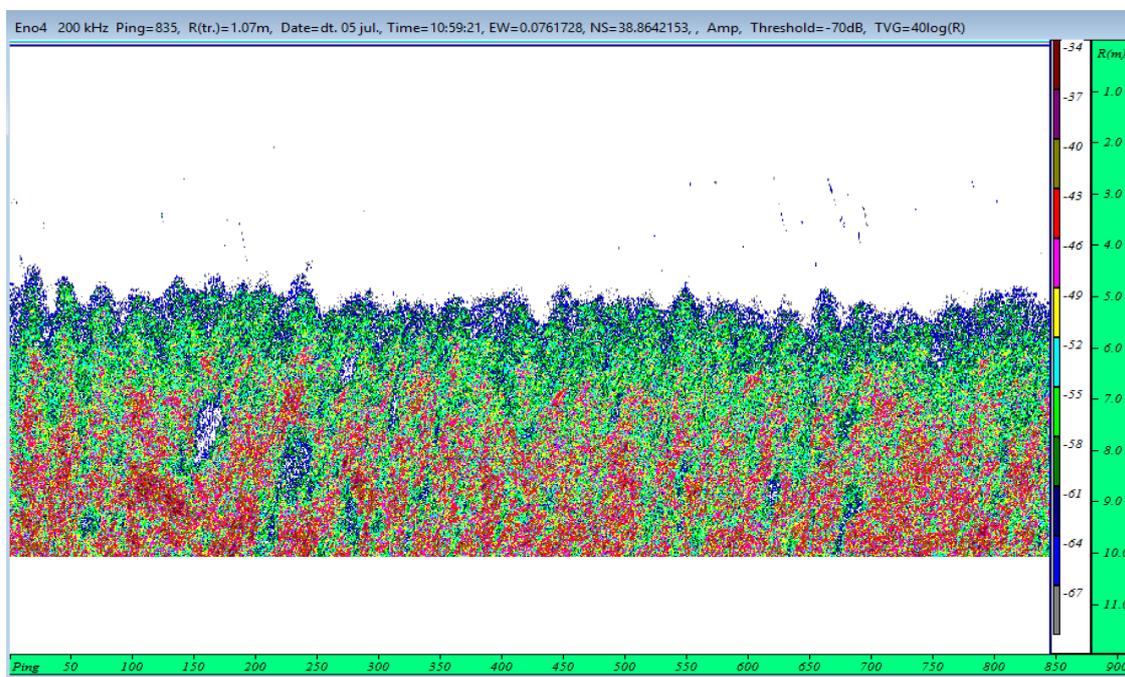


Figura 25. Ecograma del Transecto 3.

Se decide realizar el análisis de Matlab® con la orientación 0°, ya que ha dado mejores resultados. Con esta configuración, se distinguen las estructuras de forma más clara que con la orientación 25°.

4.1.2. Análisis con Matlab®

Detección del fondo

Tras correr el script del algoritmo de detección de fondo, se obtienen en primer lugar los ecogramas con la función TVG aplicada (Figuras 26, 27 y 28). De manera análoga a la visualización con SonarPro®, en el eje de las X están representados los pings acústicos emitidos a lo largo del transecto, y en el eje Y, se representa la profundidad. La barra de colores en unidades de decibelios (dB) indica la intensidad de eco.

- Transecto 1 (T1): Fondo con sustrato arenoso desprovisto de vegetación. Observamos en tonos naranjas la línea del fondo, que está situado a una profundidad de 5,2 metros.

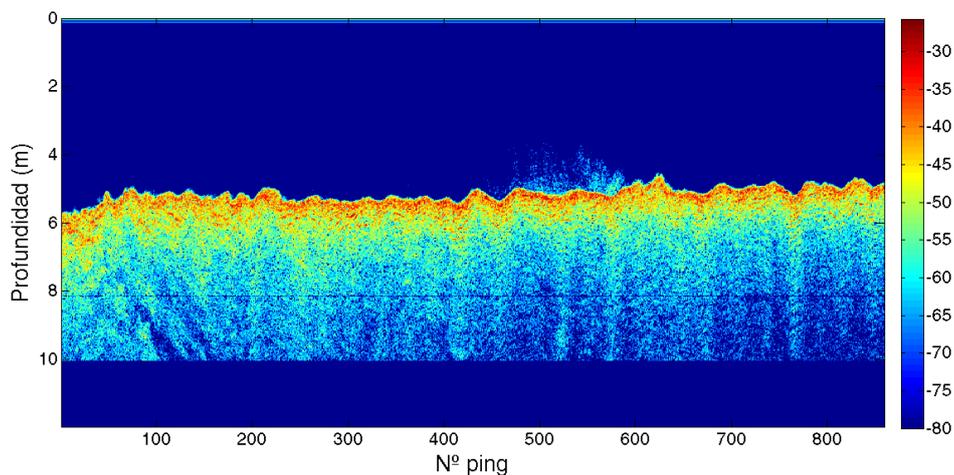


Figura 26. Ecograma de detección del fondo del Transecto 1.

- Transecto 2 (T2): Fondo con sustrato arenoso cubierto de vegetación dispersa.

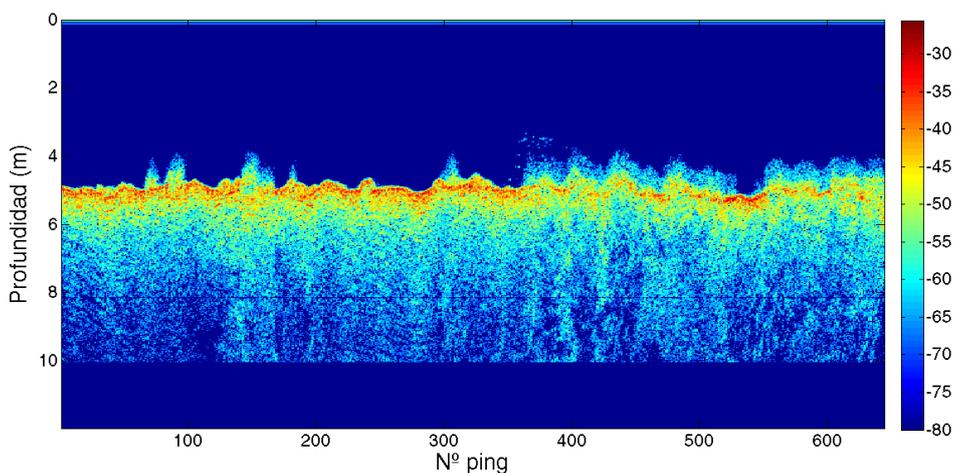


Figura 27. Ecograma del Transecto 2.

- Transecto 3 (T3): Fondo con sustrato arenoso enteramente cubierto de vegetación.

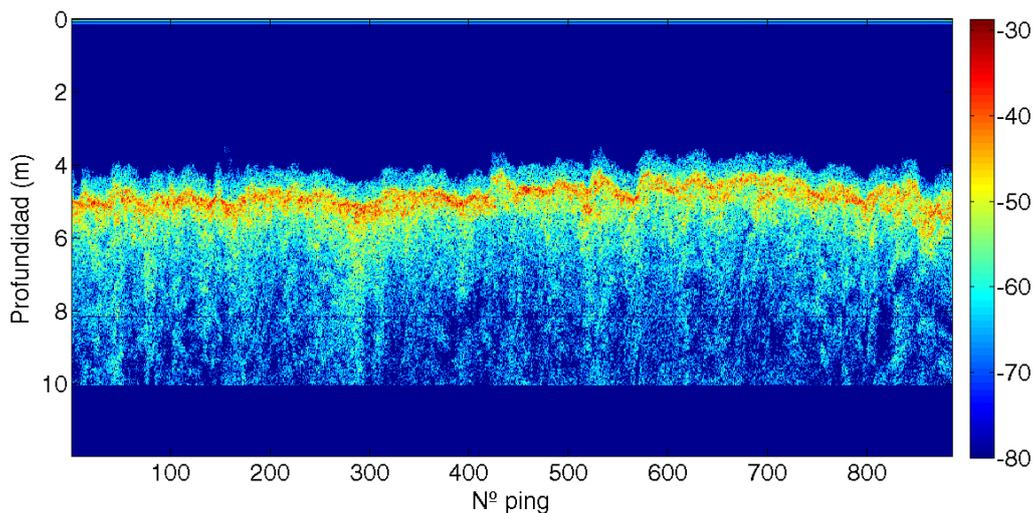


Figura 28. Ecograma del Transecto 3.

Representación de pings

Con el fin de estudiar y comparar el nivel de eco recibido por un ping emitido en un fondo de arena y con otro con *P. oceanica*, se elige y representa un ping del T1 y del T3. Para comprender bien la representación, cabe destacar que si bien en las Figuras 26, 27 y 28 aparece en el eje X el total de pings emitidos en cada transecto, debemos imaginar las imágenes como si estuvieran formadas por más de 800 “líneas” verticales, y que de la integración de la información de todas las líneas surge el ecograma. Representar solamente un ping, equivale a representar solamente una de esas “líneas”.

En la Figura 29, se muestra el comportamiento del eco en el ping 300 en el T1. En ella, se observa que el eco adquiere su nivel máximo de forma abrupta en la profundidad de 5,2 m. La señal que se ve al principio, corresponde al ruido generado en la emisión, y la señal posterior al máximo, corresponde a la onda acústica que sigue transmitiéndose por el fondo.

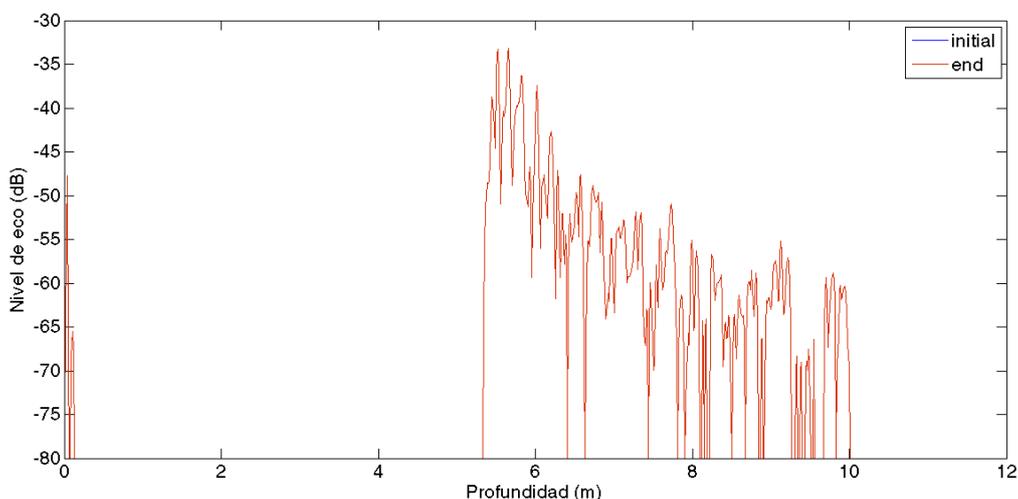


Figura 29. Ecograma del ping 300 en el Transecto 1 (arena).

En la Figura 30, se representa el ping 300 del T3. En ella se observa como a partir de los 4 m se empiezan a recibir niveles de eco, siendo alrededor de los 5,2 m donde la ecosonda recibe el nivel máximo correspondiente a la línea del fondo.

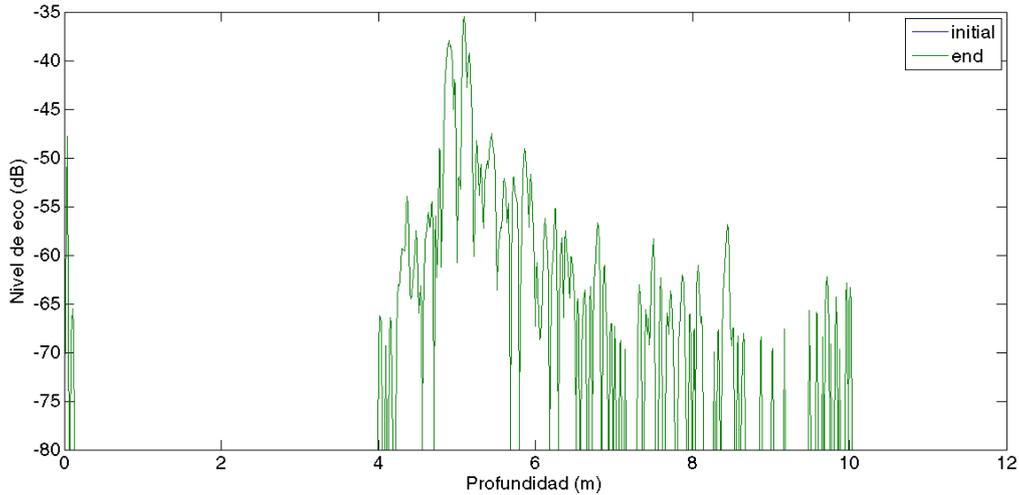


Figura 30. Ecograma del ping 300 en el Transecto 3 (*Posidonia*).

Integración de la energía

La energía acumulada (en decibelios) en el metro y medio anterior al fondo, aparece representada en la Figura 31. En el T1, al ser un fondo desprovisto de vegetación, no hay prácticamente energía acumulada antes de la línea del fondo, salvo por la estructura central que se detectó también en la visualización con SonarPro® y no se pudo identificar por no ser permanente.

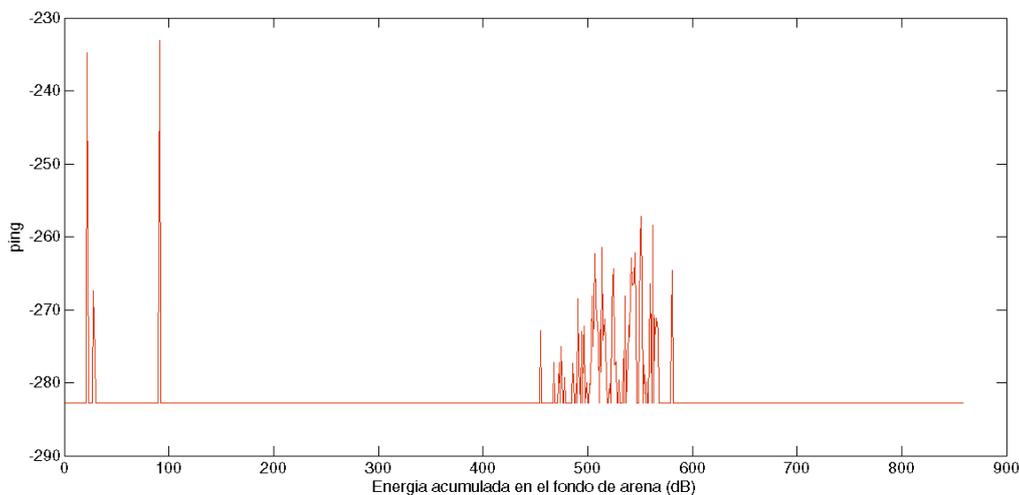


Figura 31. Energía acumulada en el fondo en el Transecto 1.

En la Figura 32, se muestra la energía acumulada en el Transecto 3. Se puede observar que la pradera de *P. oceanica* que cubre enteramente el fondo provoca que se acumule gran cantidad de energía en comparación con un fondo sin cobertura de vegetación.

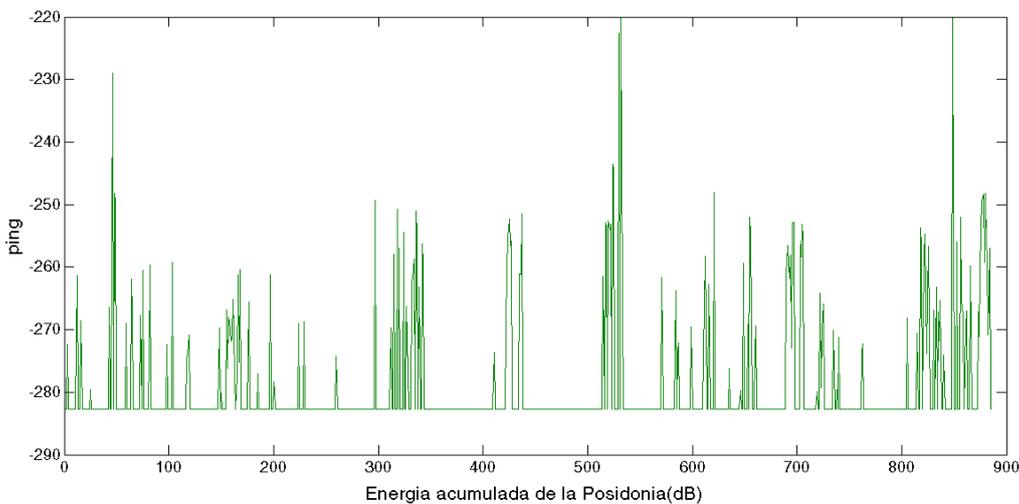


Figura 32. Energía acumulada por *P. oceanica* en el Transecto 3.

Altura de la vegetación

Se representó la altura alcanzada por el dosel de la pradera de *P. oceanica* a lo largo del Transecto 3, a partir de la energía acumulada por esta en cada ping. En la Figura 33, se muestra la curva suavizada que resulta tras aplicar el promediado de pings.

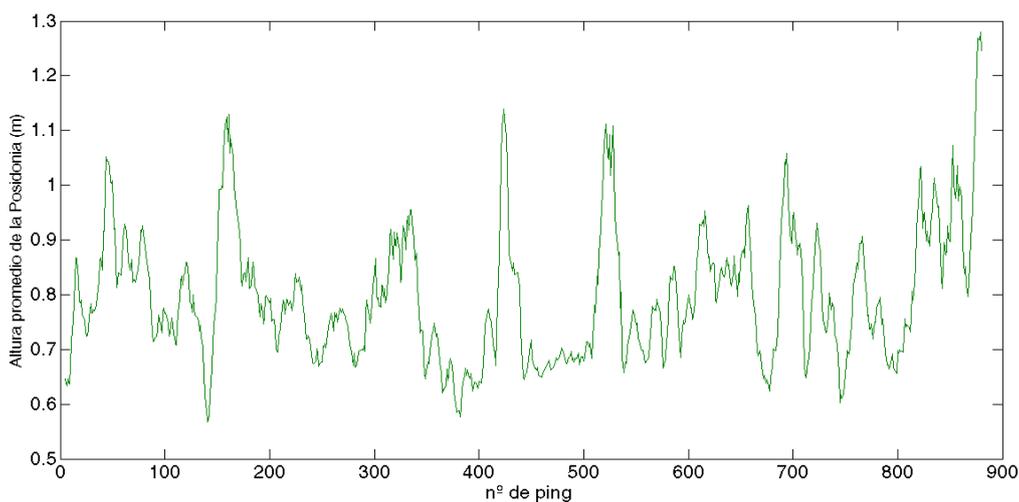


Figura 33. Curva suavizada de la altura del dosel de *P. oceanica* en el Transecto 3.

Se observa que las alturas varían entre 0,6m y 1,2m, resultados que se compararán con las medidas del muestreo directo. El algoritmo de Matlab® además, realiza el cálculo de la altura promedio del dosel de *P. oceanica* en los 885 pings muestreados, ofreciendo un resultado de 0,8 m.

Se representó también la curva suavizada del fondo en el Transecto 1 (Figura 34). Se observa que la distribución de alturas oscila entre 0,2 y 0,4 m. La curva del fondo queda por tanto situada en alturas por debajo de la de vegetación, solamente viéndose interrumpido por la estructura indefinida anteriormente descrita.

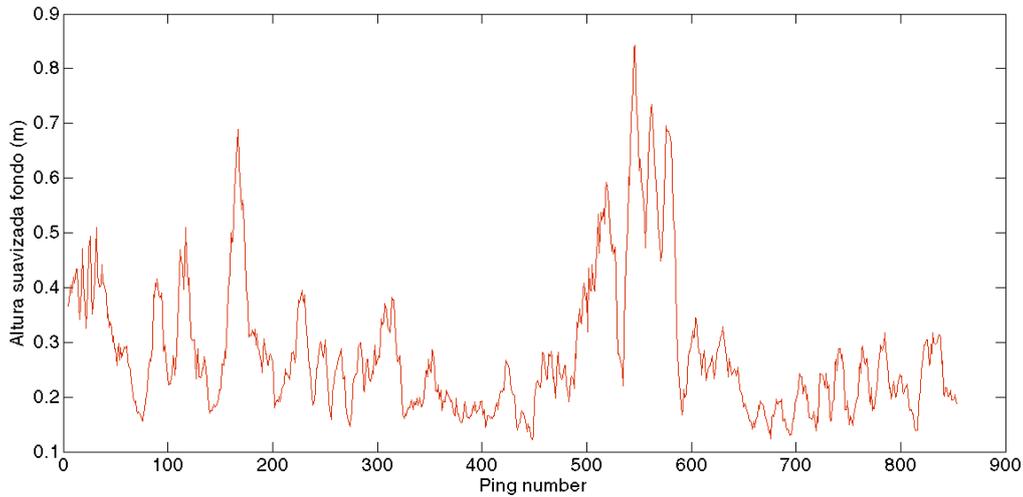


Figura 34. Curva suavizada del fondo en el Transecto 1.

Análisis de los datos acústicos del Transecto T4

El Transecto T4 fue realizado con el transductor orientado a 0° también, por lo que se incluyen aquí los resultados obtenidos tras la aplicación del mismo algoritmo en Matlab®.

Detección del fondo

En la Figura 35, se muestra el ecograma de detección del fondo a lo largo de todo el transecto. De manera análoga a los ecogramas anteriormente mostrados en las Figuras 26, 27 y 28, en el eje de la X se muestra el número de ping, y en el de la Y la profundidad, que también puede llamarse “R”. En este caso, resulta complicada la visualización de vegetación o estructura alguna sobre el fondo.

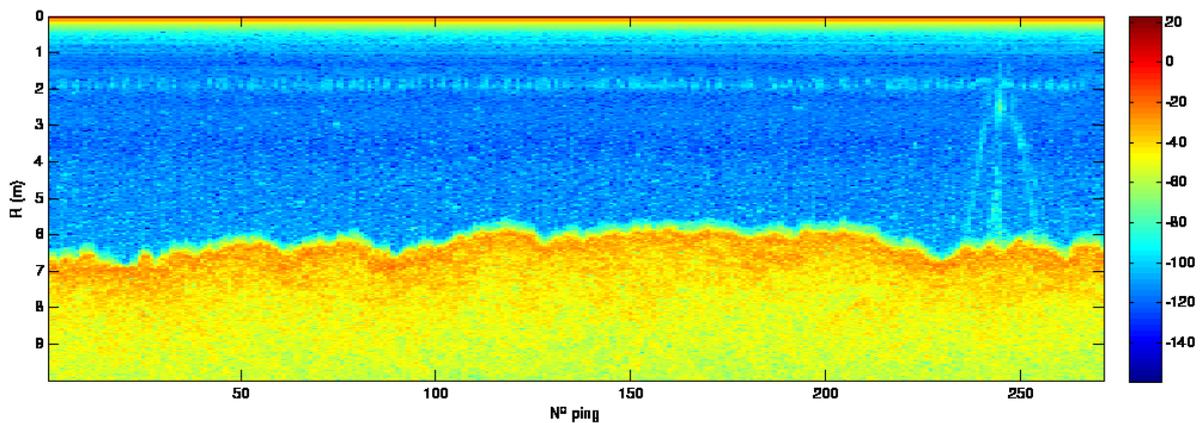


Figura 35. Ecograma de detección del fondo en el Transecto 4.

Altura de la vegetación

Tras aplicar el promediado de pings, se generó la curva suavizada de la altura del dosel de la pradera de *P. oceanica* a lo largo del Transecto 4, que aparece mostrada en la Figura 36.

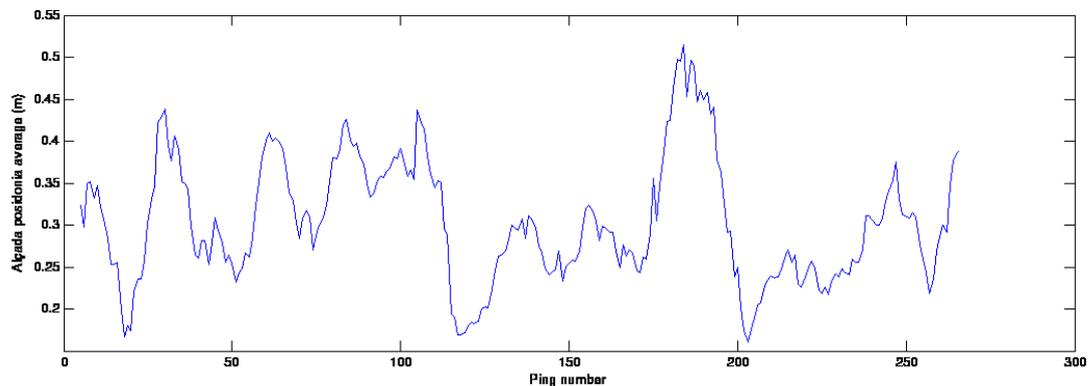


Figura 36. Curva suavizada de la altura del dosel de *P. oceanica* en el Transecto 4.

En ésta ocasión, se obtuvo un promedio de altura del dosel de 0,31m. Este valor se comparará más adelante con el que se obtuvo en el muestreo directo

4.2. Muestreo directo

Inmersión en T2

Los resultados brutos obtenidos de las medidas estructurales tomadas por los buzos, se muestran en la Tabla 3. Las etiquetas L1, L2 y L3, corresponden a las 3 medidas de longitud (subréplicas) por cuadrante (réplica).

Tabla 3. Resultados brutos obtenidos en la inmersión en el Transecto 2.

Cuadrante	Nº haces	L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)	Altura dosel (cm)
1	30,0	45,0	60,0	50,0	120,0*
2	60,0	70,0	90,0	75,0	130,0*
3	52,0	90,0	95,0	85,0	-
4	25,0	90,0	75,0	85,0	-
5	85,0	80,0	90,0	90,0	-
6	39,0	60,0	68,0	70,0	76,7
7	64,0	40,0	90,0	86,0	50,0
8	62,0	105,0	55,0	95,0	60,0
9	32,0	60,0	50,0	55,0	45,0
10	73,0	100,0	95,0	105,0	51,7

Con estos resultados, se calcularon los siguientes parámetros estadísticos: el promedio de haces por cuadrante, el promedio de todas las longitudes de hojas y el promedio de la altura del dosel para la estación (inmersión). Además, en el caso de la longitud de las hojas, se calculó también la mediana y la moda (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados obtenidos del cálculo de parámetros estadísticos en la inmersión en T2.

	Nº haces	L (cm)	Altura dosel (cm)
Promedio	52,2	76,8	56,7
Moda	-	90	-
Mediana	-	82,5	-

El promedio de haces por cuadrante fue de 52,2. Con este valor, se calculó la densidad de haces por m², sabiendo que un cuadrante de 40x40 cm son 0,6 m². El resultado fue una densidad de 326,3 haces/m².

Respecto a la longitud de las hojas, se obtuvo una longitud promedio 77 ± 5 cm, la moda fue 90 cm, y la mediana fue 82,5 cm.

Tal como se indicó en el capítulo anterior (ver apartado 3.3.2.), debido a errores en la toma de medidas de la altura del dosel, solo se consideraron 5 réplicas para el cálculo de la altura promedio, que resultó ser de 57 ± 5 cm. Las medidas no consideradas se indican con un (*).

Inmersión en T3

Los resultados obtenidos de las medidas estructurales tomadas por los buzos, se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados brutos obtenidos en la inmersión en el Transecto 3.

Cuadrante	nº haces	L1 (cm)	L2 (cm)	L3 (cm)	Altura dosel (cm)
1	40,0	75,0	100,0	70,0	110,0*
2	80,0	90,0	110,0	120,0	130,0*
3	50,0	90,0	100,0	110,0	140,0*
4	80,0	60,0	80,0	110,0	-
5	75,0	100,0	40,0	90,0	-
6	56,0	90,0	95,0	60,0	60,0
7	41,0	72,0	82,0	40,0	73,3
8	55,0	44,0	86,0	55,0	71,7
9	65,0	52,0	42,0	45,0	66,7
10	85,0	60,0	62,0	68,0	63,3

Con estos resultados, se calcularon los mismos parámetros estadísticos que con los anteriores (Tabla 6).

Tabla 6. Resultados obtenidos del cálculo de parámetros estadísticos en la inmersión en T3.

	Nº haces	L (cm)	Altura dosel (cm)
Promedio	62,7	76,6	67,0
Moda	-	90	-
Mediana	-	77,5	-

En esta ocasión se obtuvieron 62,7 haces por cuadrante. Con este valor, se calculó la densidad de haces por m², obteniéndose un valor de 391,87 haces/m².

Respecto a la longitud de las hojas, se obtuvo un valor promedio de 77 ± 5 cm, una moda de 90 cm, y una mediana de 77,5 cm.

Respecto a los resultados de la altura del dosel, análogamente a la anterior inmersión, se consideraron solamente los datos de 5 réplicas. El valor de altura promedio fue 67 ± 5 cm.

Finalmente, tras observar la similitud entre los datos de densidad, se calcularon los valores promedio de densidad, longitud y altura del dosel promedios del conjunto de las dos inmersiones, es decir, para la pradera (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados totales obtenidos para la pradera.

	Densidad (haces/m ²)	L (cm)	Altura dosel (cm)
Promedio entre T1 y T2	359,1	76,7	61,8

Se obtuvo una densidad de 359,1 haces/m², una longitud promedio de las hojas de 77 ± 5 cm, y una altura del dosel promedio de 62 ± 5 cm.

Inmersión en T4

El informe de la inmersión indicaba los resultados de los descriptores medidos en función de la profundidad, puesto que el transecto fue perpendicular a la costa. A continuación se muestran los resultados (Tabla 8):

Tabla 8. Resultados brutos obtenidos en el Transecto 4.

Profundidad (m)	L (cm)	Cobertura (%)		
		<i>P. oceanica</i>	Mata	Arena
5	35	80	0	20
5,5	40	60	20	20
6	35	40	30	30
6,5	35	10	40	50
7	0	0	30	70
7,5	0	0	0	100

A partir de los datos de longitud de las hojas en las profundidades donde había presencia de *P. oceanica*, que fueron 5m, 5,5m, 6m y 6,5m, se calculó el promedio de longitud, que dio un resultado de 36 ± 5 cm.

4.3. Mapa de integración

De la integración de la ecocartografía con los transectos realizados, se elaboró el siguiente mapa (Figura 37).

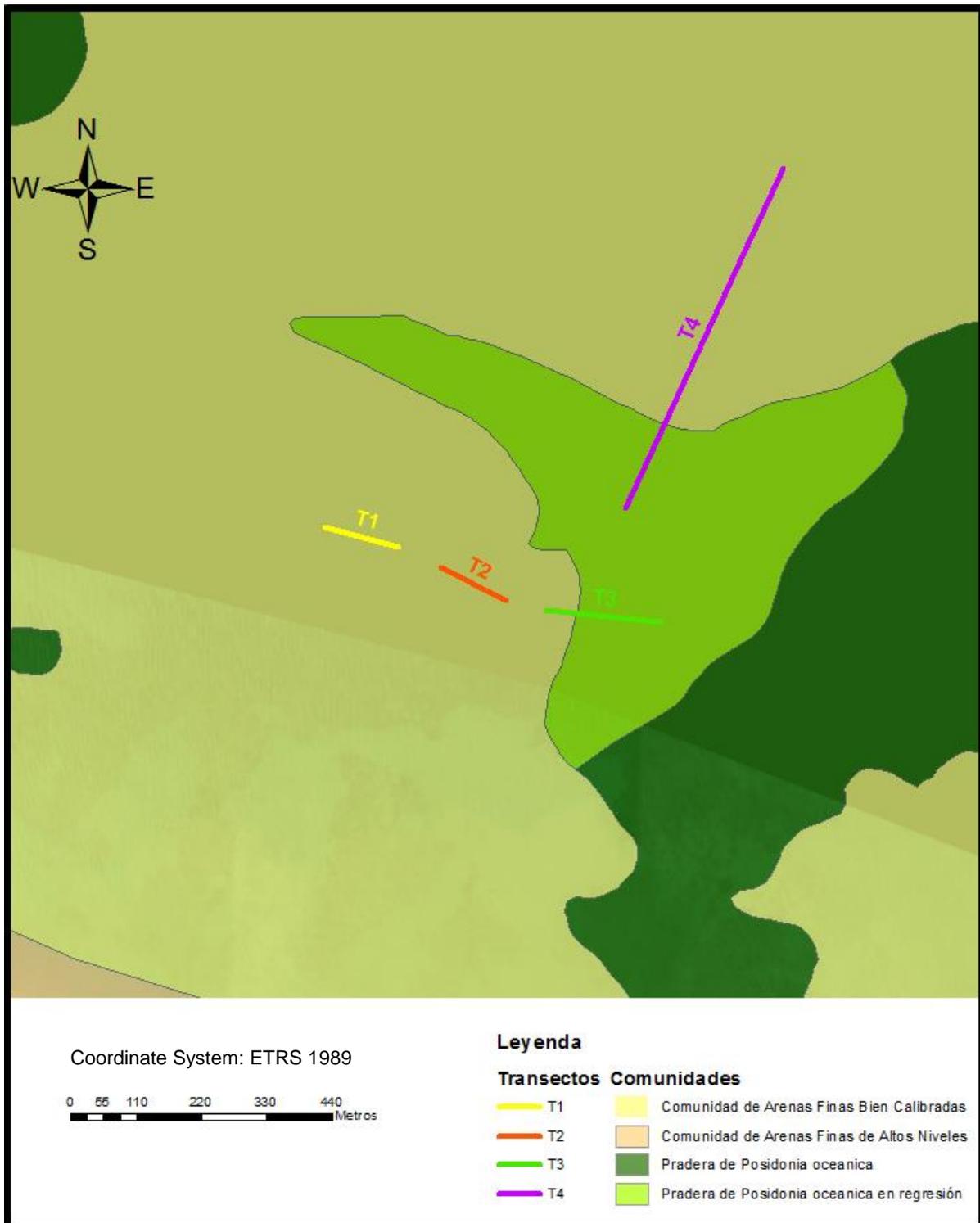


Figura 37. Mapa de integración.

5. DISCUSIÓN

Las características de propagación de las ondas acústicas en la columna de agua y los procesos de rebote que tienen lugar cuando ésta intercepta algún obstáculo antes del fondo, proporcionan a las técnicas acústicas un alto potencial como herramienta para el estudio del fondo marino.

El montaje del SBL en un lateral de la embarcación, con el transductor orientado verticalmente, y una dirección de propagación del haz respecto la normal a la superficie de 0°, resultó ser la configuración óptima para detectar vegetación en el fondo marino.

En la visualización con SonarPro®, en el Transecto 1 se localizó la profundidad de la línea del fondo a 5,2m, y se observó una estructura indefinida. Al realizar la comparación con la imagen aérea, no se vio ninguna estructura permanente, por lo que esta estructura podría corresponder a algún organismo móvil, como por ejemplo los peces. En el Transecto 2, las estructuras seleccionadas correspondían geográficamente con estructuras permanentes en la imagen aérea. Como el transecto se trazó por un fondo de cubierto por manchas de *P. oceanica*, se puede inferir que dichas estructuras corresponden a la vegetación. En el Transecto 3, el fondo apareció cubierto por estructuras de color azul, que también tuvieron correspondencia con la imagen aérea. Puesto que el transecto se trazó por un fondo enteramente cubierto por *P. oceanica*, se puede inferir que las estructuras visualizadas corresponden a la vegetación.

Con la configuración del transductor a 25°, no se pudo observar ninguna diferencia aparente entre un fondo desprovisto de vegetación, uno cubierto por vegetación dispersa, y uno enteramente cubierto, por lo que esta configuración no parece óptima para la detección de vegetación. Se observaron algunas señales en azul en la columna de agua, que no se pudieron identificar, y podrían ser ruido.

En los ecogramas obtenidos con la aplicación del algoritmo de detección de fondo, con la función TVG aplicada, se puede realizar una discriminación visual entre fondo con y sin vegetación, gracias a la adquisición de datos en el Transecto 2, que tiene vegetación dispersa.

El ping 300 alcanzó de forma abrupta su nivel máximo de eco en el fondo con arena, sin embargo, en el fondo con vegetación, la señal fue mucho menos abrupta. La ecosonda recibió niveles de eco a partir de los 4 m, siendo el máximo de eco en los 5,2 m. Esta diferencia en la señal, corresponde con presencia de vegetación que se eleva 1,2 metros sobre el fondo.

Algo muy similar ocurrió con la energía acumulada antes de la línea del fondo, siendo mayor en el Transecto 3 cubierto de *P. oceanica* que en el fondo con arena, por lo que se deduce que la vegetación es la responsable de la acumulación de esa energía. En el agua de mar, el sulfato de magnesio provoca la atenuación del sonido por pérdida de energía [31]. Dada la circunstancia de que el magnesio es el átomo central de la molécula de clorofila, se sugiere que se realicen investigaciones futuras con el fin de determinar si la acumulación de energía observada tiene relación con la actividad fotosintética de la cobertura vegetal.

La altura promedio del dosel de la pradera en el T3 calculada con el algoritmo, fue de 0,8 m (u 80 cm). Este resultado difiere en 13 cm con respecto del dato obtenido en campo (67 ± 5 cm). Esto indica una coherencia buena por no ser una diferencia desorbitada, pero sugiere que el método acústico y el método directo debieran utilizarse de forma conjunta, reforzando la idea de que las técnicas remotas necesitan un *groundtruthing*, y a su vez, las técnicas de muestreo directo requieren el diseño de metodologías que aseguren la máxima exactitud en la toma de medidas por parte de los muestreadores, ya que el trabajo en condiciones subacuáticas lleva siempre asociado el hándicap del esfuerzo físico.

En el caso del Transecto 4, resulta complicada la visualización de vegetación sobre el fondo. Por su parte, el muestreo directo no incluyó la medida de la altura del dosel, pero sí la de la longitud de las hojas. Se midieron unos valores de longitud de 35 a 40 cm, que tienen una buena coherencia con que el muestreo se realizara en el mes de noviembre, ya que la longitud de las hojas es estacional, y en esas fechas es menor que en verano. Las hojas de esa longitud no suelen doblarse sobre sí mismas por su propio peso, sino que se mantienen rectas, por lo que la longitud de las hojas y la altura del dosel, podrían considerarse equivalentes en este caso. El valor promedio fue de 36 ± 5 cm, que si se compara con el promedio de distribución de alturas calculado por el algoritmo (30 cm) parece que existe cierta coherencia. No obstante, teniendo en cuenta que el transecto se trazó perpendicular a la costa, se sugiere que en estudios futuros se trate de establecer si existe relación entre la exactitud del método y la posición de los transectos con respecto a la profundidad.

Los parámetros estadísticos calculados para la longitud de las hojas en los transectos T2 y T3 fueron muy similares, indicando que se trataba de la misma pradera. La longitud promedio de las hojas medidas entre los dos transectos fue 77 ± 5 cm, que contrasta con la moda que en ambos tuvo un valor de 90 cm, y con la mediana que fue de 82,5 cm y 77,5 cm respectivamente. De esto se deduce que las longitudes de las hojas no siguen una distribución normal, ya que si lo fueran, el promedio, la mediana y la moda, serían iguales. Por tanto, se sugiere que en próximos estudios, se recomienda no dar el resultado únicamente del promedio, ya que los datos están concentrados alrededor de 90 cm. Tampoco serviría dar el resultado del promedio con la desviación típica, porque esta sería muy grande y daría poca información, por lo que se recomienda ir con cautela cuando calculamos parámetros para representar las muestras.

Las densidades obtenidas en ambos transectos refuerzan la idea de que se trata de una misma pradera. El valor promedio para la pradera fue de 359 haces/m², lo que según la clasificación incluida en la referencia [26], indica que corresponde a una pradera en equilibrio dinámico o tendiendo a la regresión. Este dato muestra coherencia con la ecocartografía consultada que aparece incluida en el mapa de integración, ya que la zona estaba catalogada como "Pradera de *P. oceanica* en regresión".

En el Transecto 4, no se realizaron medidas de densidad, pero los datos de porcentaje de cobertura de *P. oceanica* en relación con la cobertura de mata muerta cubierta de algas, sugieren que la vegetación observada no presentaba un buen estado ecológico. La cobertura de arena al final del transecto, coincide también con la ecocartografía consultada, que catalogaba la zona como "Comunidad de arenas finas bien calibradas". No obstante, se observa en la ecocartografía que el trazado del Transecto 2, discurrió también por la zona de arenas, lo que contrasta con la visualización y georreferenciación de las manchas de *P. oceanica* realizadas en el muestreo acústico y directo del presente trabajo. Esto sugiere que la ecocartografía de 2006, debió realizar una interpolación un tanto amplia de los polígonos, y pone de manifiesto la necesidad de desarrollar metodologías con un enfoque multidisciplinar, con el fin de poder integrar una mayor cantidad de información en la elaboración de ecocartografías. La adquisición de datos acústicos con el SBL con la configuración utilizada en el presente trabajo, se muestra como una técnica con gran resolución de la detección del fondo, resultando en una gran versatilidad para obtener información sobre distintas características estructurales. Considerando los costes económicos en comparación con los derivados de las campañas de buceo, convierten a esta herramienta en una alternativa de bajo coste a otros sensores acústicos más especializados y un complemento a los métodos directos, con un potencial de aplicación para el estudio del estado ecológico de fanerógamas marinas.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se ha detectado la presencia de una pradera de *P. oceanica* mediante un sónar de barrido lateral.

Se ha determinado que la configuración óptima del transductor para la detección de vegetación en el fondo es 0°, es decir, la insonificación máxima vertical.

Se ha observado una coherencia entre el muestreo directo, la detección acústica y las imágenes aéreas respecto a la presencia y posicionamiento de la pradera.

Se ha obtenido la distribución de las alturas de la vegetación a través de la aplicación de un algoritmo de detección del fondo a los datos acústicos.

Se han realizado tres medidas estructurales de la pradera mediante el uso de la metodología clásica de inmersiones de buceo autónomo, observándose las ventajas de precisión que se derivan de la medida directa, así como los posibles errores que pueden ocurrir durante el muestreo.

Se ha determinado que la longitud de las hojas no sigue una distribución normal a partir del cálculo de parámetros estadísticos.

Se ha inferido que los datos obtenidos de densidad, indican que se trata de una pradera en equilibrio dinámico, con tendencia a la regresión, estableciendo correspondencia con una cartografía anterior de la zona.

Y se plantean dos futuras líneas de investigación. Por una parte, se sugiere un estudio más profundo sobre la acumulación de energía en la vegetación cuando esta es insonificada con ondas acústicas, en relación con la actividad fotosintética. Por otra parte, se plantea la aplicación de las metodologías descritas en este mismo trabajo en una pradera con mayor densidad, como por ejemplo en una reserva marina, con el objetivo de estudiar si la retrodispersión de las ondas acústicas está relacionada con el estado ecológico de la pradera. Ambas líneas enmarcadas en el estudio de la aplicabilidad de la detección acústica como un método complementario a los muestreos directos para evaluar características estructurales y ecológicas de la pradera, más allá de la cartografía convencional.

7. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiera mostrar un profundo agradecimiento a Isabel Pérez Arjona por la tutorización de este trabajo.

También quiero dar las gracias a Miguel Rodilla, Vicent Puig, Susana Llorens y César Bordehore por haber realizado un trabajo en equipo fantástico que hizo posible el desarrollo de los trabajos de campo. Trabajos que no se hubieran georreferenciado si Lucio Calise no hubiera intervenido días antes para ayudarme a poner en funcionamiento el GPS de la ecosonda. Ha sido un placer trabajar con todos vosotros.

De la misma manera, quiero agradecer a Núria Tamarit, Imanol Morata, María Campo, Sara García, Noelia Arto y Jonatan Álvarez por sus consejos útiles y su gran interés mostrado en este trabajo.

Finalmente, dar las gracias a mi familia por su apoyo incondicional.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Green, E. P., & Short, F. T. (2003). *World atlas of seagrasses*. Univ. of California Press.
- [2] Artioli, Y., Friedrich, J., Gilbert, A. J., McQuatters-Gollop, A., Mee, L. D., Vermaat, J. E., Pollehne, F. (2008). Nutrient budgets for European seas: a measure of the effectiveness of nutrient reduction policies. *Marine Pollution Bulletin*, 56(9), 1609-1617.
- [3] Pergent, G., Bazairi, H., Bianchi, C. N., Boudouresque, C. F., Buia, M. C., Clabaut, P., ... & Orfanidis, S. (2012). Les herbiers de Magnoliophytes marines de Méditerranée. *Résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques*. IUCN, Gland, Switzerland and Má laga, Spain, 80.
- [4] Ruiz, J. M., Guillén, J. E., Ramos Segura, A., & Otero, M. M. (2015). Atlas de las praderas marinas de España. *Instituto Español de Oceanografía, Instituto de Ecología Litoral, International Union for Conservation of Nature, Spain*.
- [5] Coleman, F. C., & Williams, S. L. (2002). Overexploiting marine ecosystem engineers: potential consequences for biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution*, 17(1), 40-44.
- [6] Telesca, L., Belluscio, A., Criscoli, A., Ardizzone, G., Apostolaki, E. T., Fraschetti, S., ... & Alagna, A. (2015). Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. *Scientific reports*, 5, 12505.
- [7] Pergent, G., Gerakaris, V., Sghaier, Y., ZAKHAMA-SRAIER, R., Fernández Torquemada, Y. & Pergent-Martini, C. 2016. *Posidonia oceanica*. The IUCN Red List of Threatened Species 2016: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20161.RLTS.T153534A76571834.en>. (Consultado el día 9 de Febrero del 2017).
- [8] Boudouresque, C. F., Bernard, G., Pergent, G., Shili, A., & Verlaque, M. (2009). Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review. *Botanica Marina*, 52(5), 395-418.
- [9] Colantoni, P., Galignani, P., Fresi, E., & Cinelli, F. (1982). Patterns of *Posidonia oceanica* (L.) Delile beds around the Island of Ischia (Gulf of Naples) and in adjacent waters. *Marine Ecology*, 3(1), 53-74.
- [10] Marbà, N., Duarte, C. M., Holmer, M., Martínez, R., Basterretxea, G., Orfila, A., ... & Tintoré, J. (2002). Effectiveness of protection of seagrass (*Posidonia oceanica*) populations in Cabrera National Park (Spain). *Environmental Conservation*, 29(04), 509-518.
- [11] Badalamenti, F., Alagna, A., D'Anna, G., Terlizzi, A., & Di Carlo, G. (2011). The impact of dredge-fill on *Posidonia oceanica* seagrass meadows: Regression and patterns of recovery. *Marine pollution bulletin*, 62(3), 483-489.
- [12] Fraschetti, S., Guarnieri, G., Bevilacqua, S., Terlizzi, A., & Boero, F. (2013). Protection enhances community and habitat stability: evidence from a Mediterranean Marine Protected Area. *PloS one*, 8(12), e81838.

- [13] Pérez, M., Díaz, E. & Ruiz, J.M. 2015. Las praderas marinas de España: una visión general. Las angiospermas marinas. En: Ruiz, J.M., Guillén, J.E., Ramos Segura, A. & Otero, M.M. (Eds.). Atlas de las praderas marinas de España. IEO/IEL/UICN, Murcia-Alicante-Málaga: 37-53.
- [14] Sánchez Carnero, N. (2012). Técnicas acústicas y software libre: aplicaciones en la gestión costera.
- [15] Crawford, C. M., Mitchell, I. M., & Macleod, C. K. A. (2001). Video assessment of environmental impacts of salmon farms. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 58(2), 445-452.
- [16] Short, F., Carruthers, T., Dennison, W., & Waycott, M. (2007). Global seagrass distribution and diversity: a bioregional model. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350(1), 3-20.
- [17] McCarthy, E. M., & Sabol, B. (2000). Acoustic characterization of submerged aquatic vegetation: military and environmental monitoring applications. In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition* (Vol. 3, pp. 1957-1961). IEEE.
- [18] Lurton, X. (2010). *An introduction to underwater acoustics - principles and application*. 2nd Edition, Springer, Berlin Heidelberg.
- [19] Llorens Escrich, S. (2016). Caracterización del target strength de piensos comerciales mediante ecosondas monohaz y de haz partido
- [20] Sánchez-Carnero, N., Rodríguez-Pérez, D., Couñago, E., Aceña, S., & Freire, J. (2012). Using vertical Sidescan Sonar as a tool for seagrass cartography. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 115, 334-344.
- [21] Wilson, P. S., & Dunton, K. H. (2009). Laboratory investigation of the acoustic response of seagrass tissue in the frequency band 0.5–2.5 kHz. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4), 1951-1959.
- [22] Sabol, B. M., Eddie Melton, R., Chamberlain, R., Doering, P., & Haurert, K. (2002). Evaluation of a digital echo sounder system for detection of submersed aquatic vegetation. *Estuaries and Coasts*, 25(1), 133-141.
- [23] Martínez-Crego, B., Alcoverro, T., & Romero, J. (2010). Biotic indices for assessing the status of coastal waters: a review of strengths and weaknesses. *Journal of environmental monitoring*, 12(5), 1013-1028.
- [24] Boudouresque, C. F., Bernard, G., Bonhomme, P., Charbonnel, E., Diviacco, G., Meinesz, A., Tunesi, L. (2012). Protection and conservation of *Posidonia oceanica* meadows.
- [25] Pergent, G., Boudouresque, C. F., Avon, M., & Gravez, V. (1991). La protection légale de la Posidonie en France: un outil efficace-Nécessité de son extension à d'autres pays méditerranéens. *Les espèces marines à protéger en Méditerranée*, 29-33.
- [26] Pergent, G., Pergent-Martini, C., & Boudouresque, C. F. (1995). Utilisation de l'herbier à *Posidonia oceanica* comme indicateur biologique de la qualité du milieu littoral en Méditerranée: état des connaissances. *Mésogée*, 54, 3-27.

- [27] Romero, J., Martínez-Crego, B., Alcoverro, T., & Pérez, M. (2007). A multivariate index based on the seagrass *Posidonia oceanica* (POMI) to assess ecological status of coastal waters under the water framework directive (WFD). *Marine Pollution Bulletin*, 55(1), 196-204.
- [28] Panayotidis, P., Boudouresque, C. F., & Marcot-Coqueugniot, J. (1981). Microstructure de l'herbier de *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. Microstructure of *Posidonia oceanica* (Linnaeus) beds. *Botanica marina*, 24(3), 115-124.
- [29] Pergent-Martini, C., Leoni, V., Pasqualini, V., Ardizzone, G. D., Balestri, E., Bedini, R., ... & Boumaza, S. (2005). Descriptors of *Posidonia oceanica* meadows: Use and application. *Ecological Indicators*, 5(3), 213-230.
- [30] Gambi, M. C., & Dappiano, M. (2004). *Mediterranean marine benthos: A manual of methods for its sampling and study*. Società Italiana di Biologia Marina.
- [31] Medwin, H. (2005). *Sounds in the sea: From ocean acoustics to acoustical oceanography*. Cambridge University Press.