

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITÈCNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Estudio de la viabilidad de detección de tellinas (*Donax trunculus*) con ecosondas científicas de haz partido”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

Morillo Faro, Andrés

Tutor/a:

Espinosa Roselló, Víctor

Pérez Arjona, Isabel

GANDIA, 2017

Resumen

El mar Mediterráneo ha sido y es una importante fuente de recursos pesqueros. En algunos casos las poblaciones de estos recursos han sufrido un acusado descenso. Este es el caso de las tellinas *Donax trunculus*, cuya presencia se ha visto menguada, en gran medida debido a la contaminación y la sobrepesca. Se hacen necesarios por tanto métodos que permitan evaluar la presencia de esta especie, preferiblemente de forma económica y no invasiva. En este proyecto se realiza un estudio numérico previo, en el cual se lleva a cabo una simulación del hábitat natural de estos bivalvos para analizar la viabilidad de los métodos acústicos en la detección de tellinas enterradas en el lecho marino. Posteriormente, se diseña un estudio experimental y se analizan los resultados de dicho estudio para evaluar la aplicabilidad real de estos métodos y su aplicación a estudios de pesca sostenible.

Palabras clave: Tellinas, Ecosonda, Detección, Ultrasonidos, Pesca Sostenible

Abstract

Mediterranean Sea it's an important source of fishery resources. Often, this resources has suffered a sharp decline. That's the case of *Donax trunculus*, whose presence has been reduced by pollution and overfishing. It's necessary to develop methods that allow to evaluate the presence of this species. Preferably economic and non-invasive methods. A previous numerical study with a simulation of the natural habitat of these bivalves, is carried out in this project to analyze the viability of the acoustic methods in the detection of *Donax trunculus* buried in the seabed. Then, an experimental study is designed and analyzed to evaluate the real applicability of these methods and their application to sustainable fishing studies.

Key words: Donax trunculus, Ultrasound, Sustainable Fishery, Detection

Índice general

Índice general	II
Índice de figuras	III
Índice de tablas	IV
<hr/>	
1 Introducción	1
2 Materiales y Métodos	3
2.1 Simulación	4
2.1.1 Introducción	4
2.1.2 Condiciones de Contorno del Sedimento	9
2.1.3 Condiciones de Contorno del agua	11
2.1.4 Condiciones Iniciales de la Ecosonda	11
2.1.5 Condiciones de Contorno de las Tellinas	12
2.2 Experimental	12
2.2.1 Introducción	12
2.2.2 Diseño del Experimento	13
2.2.3 Preparación del Experimento	14
2.2.4 Toma de Medidas	15
3 Resultados	18
3.1 Resultados Simulación	18
3.2 Resultados del Estudio Experimental	24
3.2.1 TS Total	24
3.2.2 Información Logarítmica (dB)	27
3.2.3 Información Lineal	28
3.2.4 Información de Fase	29
4 Discusión	31
4.1 Conclusión Estudio Teórico	31
4.2 Conclusión Estudio Experimental	31
4.3 Conclusiones Generales	31
4.4 Futuras líneas de estudio	32
Bibliografía	33

Índice de figuras

2.1	Curva Granulométrica del sedimento	4
2.2	Diseño del Sistema Agua/Sedimento y <i>Generador de pulsos</i> en <i>Comsol</i> . Unidades de los ejes en metros.	5
2.3	Colocación de los receptores en el sistema. Unidades de los ejes en metros.	5
2.4	Simulación: Configuración 1. Unidades de los ejes en metros.	6
2.5	Simulación: Configuración 2. Unidades de los ejes en metros.	6
2.6	Simulación: Configuración 3. Unidades de los ejes en metros.	7
2.7	Simulación: Configuración 4. Unidades de los ejes en metros.	7
2.8	Bordes seleccionados con comportamiento de onda plana. Unidades de los ejes en metros.	8
2.9	Bordes seleccionados en la definición de la impedancia. Unidades de los ejes en metros.	8
2.10	Tellinas utilizadas en el experimento	14
2.11	Punto de recogida de sedimento. Circulado en rojo	14
2.12	Montaje del experimento 1	15
2.13	Montaje del experimento 2	15
2.14	Esquema para la realización de los transectos de medida. Movimiento de la ecosonda en la dirección de la flecha roja.	16
3.1	Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 1	18
3.2	Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 1	19
3.3	Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 2	19
3.4	Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores, zona tellina ampliada. Configuración 2	20
3.5	Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 2	20
3.6	Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 3	21
3.7	Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores, zona tellina ampliada. Configuración 3	22
3.8	Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 3	22
3.9	Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 4	23
3.10	Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores, zona tellina ampliada. Configuración 4	23

3.11	Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 4	24
3.12	TS Total. Configuración 1	25
3.13	TS Total. Configuración 2	25
3.14	TS Total. Configuración 3	26
3.15	TS Total. Configuración 4	26
3.16	TS Total. Configuración 5	27
3.17	Análisis del ping 166 en las configuraciones 1 y 2. Envoltente en dB	27
3.18	Análisis del ping 166 en las configuraciones 1, 3, 4 y 5	28
3.19	Análisis del ping 166 en las configuraciones 1 y 2. Envoltente en niveles lineales	28
3.20	Análisis del ping 166 en las configuraciones 1, 3, 4 y 5. Envoltente en niveles lineales	29
3.21	Análisis de fase en las configuraciones 1 y 2	30
3.22	Análisis de fase en las configuraciones 1, 3, 4 y 5	30

Índice de tablas

2.1	Granulometría	3
2.2	Variables del Sedimento Marino	10
2.3	Variables del Agua	11
2.4	Variables que definen el aire (Tellinas)	12
2.5	Especificaciones del transductor utilizado en la toma de medidas. [6]	15

Agradecimientos

Primero de todo, quiero agradecer a mis tutores, Víctor Espinosa Roselló e Isabel Pérez Arjona, que me hayan brindado la oportunidad de llevar a cabo este proyecto de investigación y hayan abierto delante de mí un abanico enorme de aplicaciones acústicas que desconocía.

En segundo lugar, darles las gracias a mis padres, ya que sin su apoyo no habría terminado ni el primer curso de mis estudios. Aquellas llamadas en noviembre de cada año no las olvidaré nunca.

Además, agradecer por toda la ayuda, sobre todo en el estudio experimental, a Susana Llorens. Tardes de mediciones y mañanas de análisis de resultados que sin ella no habrían sido posibles.

También quiero dar las gracias a Sara Selma, sin sus correcciones al final del camino y sus tardes de soportar mis nervios no sé en qué podría haber quedado este proyecto.

Por último, agradecer a Jona, Vicente, Dídac y demás amigos que me habéis acompañado durante toda la carrera y me habéis ayudado y aportado un trocito de vosotros.

Andrés Morillo Faro

Gandía, 4 de Diciembre de 2017.

Introducción

El mar Mediterráneo ha sido un lugar próspero para el desarrollo de una gran diversidad de especies, desde vertebrados como la Tortuga Boba "*Caretta caretta*" hasta bivalvos como la Coquina o Tellina "*Donax trunculus*". Muchas especies animales, además de formar parte del ecosistema, han servido de alimento y sustento económico para las sociedades de la zona mediterránea.

Durante las últimas décadas, diversos factores de origen humano como el vertido de desechos y la contaminación de los mares y océanos, o la sobrepesca de estas especies han propiciado un descenso de su población. Una de las especies explotadas tradicionalmente en la costa valenciana ha sido la tellina, que en los últimos años ha sufrido una merma muy importante en sus poblaciones hasta el punto de suspenderse las autorizaciones para su pesca.

Con el fin de evitar un daño ecológico irreversible, se debe buscar una solución adecuada que permita controlar, tanto el crecimiento de estas poblaciones como el desarrollo normal de las actividades pesqueras.

Como una primera aproximación a la solución del descenso poblacional de tellinas en el Mediterráneo, en este proyecto, se va a llevar a cabo el estudio de la viabilidad de detección y cuantificación de poblaciones de tellinas para favorecer una pesca sostenible utilizando ecosondas científicas.

Los métodos más utilizados para obtener información sobre las poblaciones de bivalvos en zonas costeras han sido, tradicionalmente, las dragas o el buceo; a pesar de los buenos resultados que ofrecen, son costosos en tiempo y dinero y producen un gran impacto ambiental.

Con anterioridad, se han llevado a cabo investigaciones sobre cómo responden los suelos marinos de zonas costeras a pulsos emitidos desde ecosondas *Single Beam* [1] o sobre suelos de hábitats bentónicos con ecosondas del tipo *Side Scan Sonar* [2] [3]. Ambos métodos consiguen una monitorización de los distintos estratos del suelo y permiten identificar las heterogeneidades a partir de la presión recibida en el *backscattering* del haz o haces enviados. Otro método, es el utilizado para detección y cuantificación de otras especies de bivalvos marinos a partir de la información angular que nos ofrece una ecosonda *Split Beam* [4]. Este último método tiene especial interés para este proyecto al conseguirse comprobar la viabilidad del mismo en la detección de navajas "*Ensis*" en las Rías Gallegas.

Siguiendo la metodología de trabajo de este último método, se pretende extrapolarse los resultados obtenidos a poblaciones de tellinas. En este proyecto se

llevará a cabo una simulación del entorno marino de la costa levantina española con el software para cálculo con elementos finitos "*Comsol Multiphysics*", del cual, se obtendrán los análisis teóricos sobre detección de tellinas. Seguidamente, se diseñará el estudio experimental y se analizarán las primeras medidas para comprobar su viabilidad.

Materiales y Métodos

El proyecto propuesto consta de dos estudios complementarios con los que se pretende abordar las bases metodológicas para el control poblacional de tellinas en el mar Mediterráneo mediante técnicas acústicas. Un estudio teórico a partir de una simulación, y un posterior diseño experimental y primeras pruebas.

Como paso previo, se debe realizar una breve investigación sobre el tipo de agua y de sedimento propios de la zona de estudio con el fin de optimizar los parámetros que se utilizarán durante la simulación y la fase experimental. Para ello, se ha realizado una granulometría del sedimento.

Para dicha granulometría, se han cogido como muestra 100g de sedimento del hábitat de las tellinas. Tras la realización del proceso, se han clasificado los resultados en la tabla 2.1.

		Cantidad de Sedimento (g)
Sedimento Total		100
Luz del Tamiz	Tamiz (g)	
> 2mm	89.5	0
> 1mm	108.4	0.1
> 0,5mm	107.8	3.7
> 0,250mm	103.6	49.5
> 0,125mm	80.7	45.2
> 0,063mm	79.3	1.5
< 0,0063mm	69.7	0.1
Error de medida		0.1

Tabla 2.1: Granulometría

En el **Anexo I** se encuentran las imágenes del proceso de tamizado y pesado del sedimento.

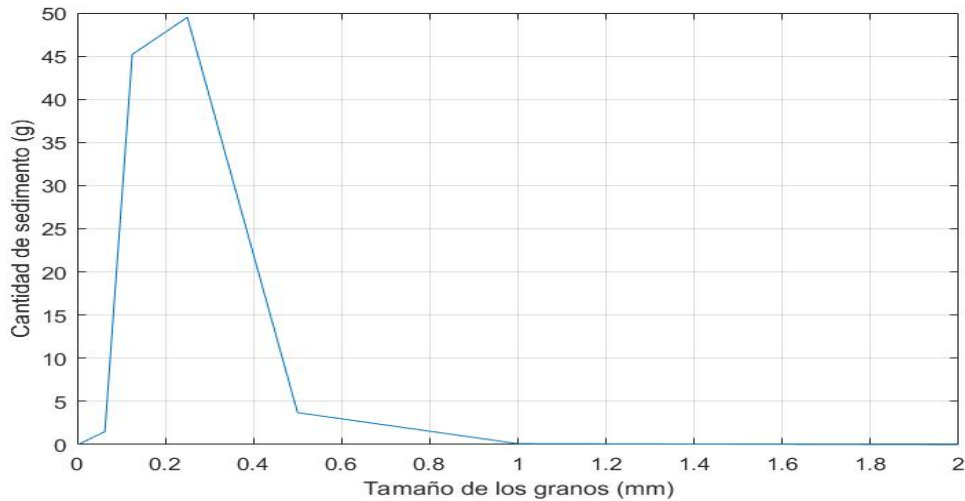


Figura 2.1: Curva Granulométrica del sedimento

Analizando la curva de la figura 2.1 con la tabla de clasificación del grano propuesta por C.K.Wentworth [7] (**Ver Anexo I**), se puede afirmar que se trata de un sedimento del tipo: *Arena de grano medio*, ya que la mayoría del grano se distribuye en torno a valores de $0,2\text{mm}$ y ligeramente superiores.

2.1 Simulación

2.1.1. Introducción

La simulación es el primer paso a seguir en toda investigación, ya que permite conocer los resultados aproximados de forma teórica que ayudarán a modular el diseño experimental y a optimizar la toma de datos cuando se realice el experimento. Con el desarrollo informático actual se pueden llevar a cabo simulaciones prácticamente imposibles de conseguir de forma tradicional, en cuanto a desarrollo de ecuaciones y soluciones con elementos finitos, lo que permite abaratar recursos en tiempo y dinero.

El software que se ha utilizado en este proyecto es *Comsol Multiphysics*. Este software permite obtener resultados numéricos a partir del diseño de un sistema y la aplicación de las leyes físicas que lo rigen. Para poder obtener esos resultados, se deben definir unas condiciones iniciales y de contorno propias a todos los elementos del sistema.

El diseño utilizado en este trabajo, pretende cubrir el paso del transecto definido para la ecosonda por encima de una tellina, y así, poder analizar la información angular proporcionada por los receptores de la misma.

En la figura 2.2, se puede observar el sistema definido en *Comsol Multiphysics*, y en la figura 2.3, la inserción de los receptores en el sistema.

El *receptor 1* está situado en el extremo izquierdo del pistón y el *receptor 2* en el extremo derecho del pistón. Colocados de esta forma se consigue simular la

captura de la información angular del mismo modo que la extrae una ecosonda *Split Beam*.

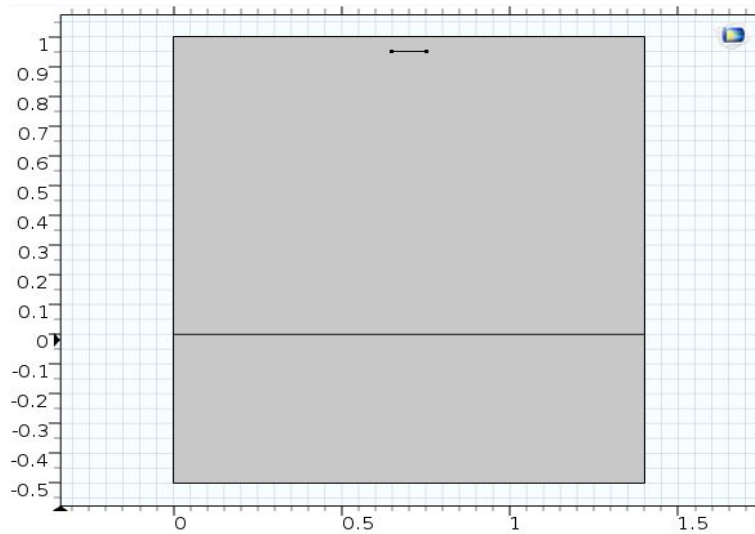


Figura 2.2: Diseño del Sistema Agua/Sedimento y *Generador de pulsos* en *Comsol*. Unidades de los ejes en metros.

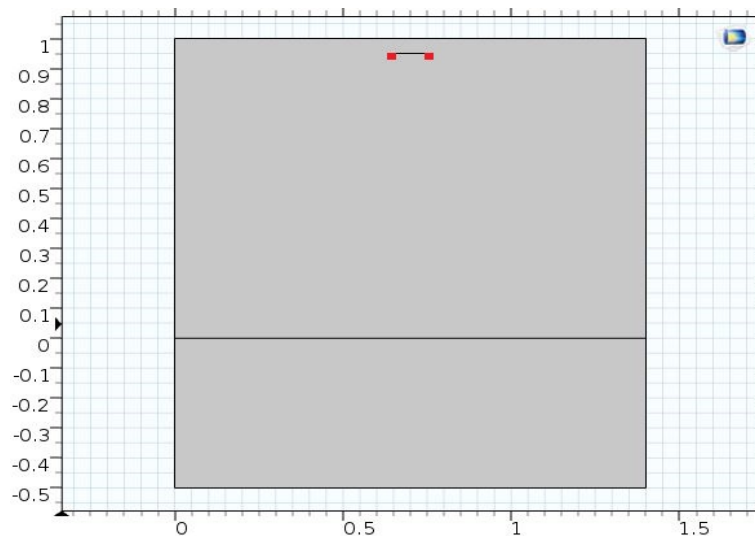


Figura 2.3: Colocación de los receptores en el sistema. Unidades de los ejes en metros.

El estudio se ha llevado a cabo con 4 configuraciones diferentes. En la primera configuración se han extraído los datos de la respuesta del suelo al haz incidente y en el resto, se han extraído los datos de la respuesta del suelo con heterogeneidades (tellinas).

Estas son las 4 configuraciones que se han llevado a cabo:

- **Configuración 1:** Sedimento (Figura 2.4)
- **Configuración 2:** 1 Tellina Centrada (Figura 2.5)
- **Configuración 3:** 1 Tellina Ladeada Izquierda (Figura 2.6)
- **Configuración 4:** 1 Tellina Ladeada Derecha (Figura 2.7)

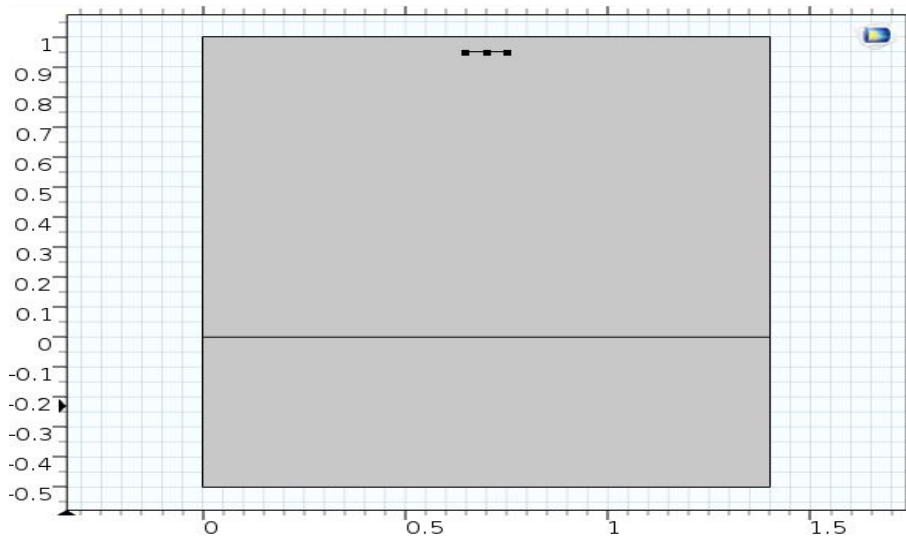


Figura 2.4: Simulación: Configuración 1. Unidades de los ejes en metros.

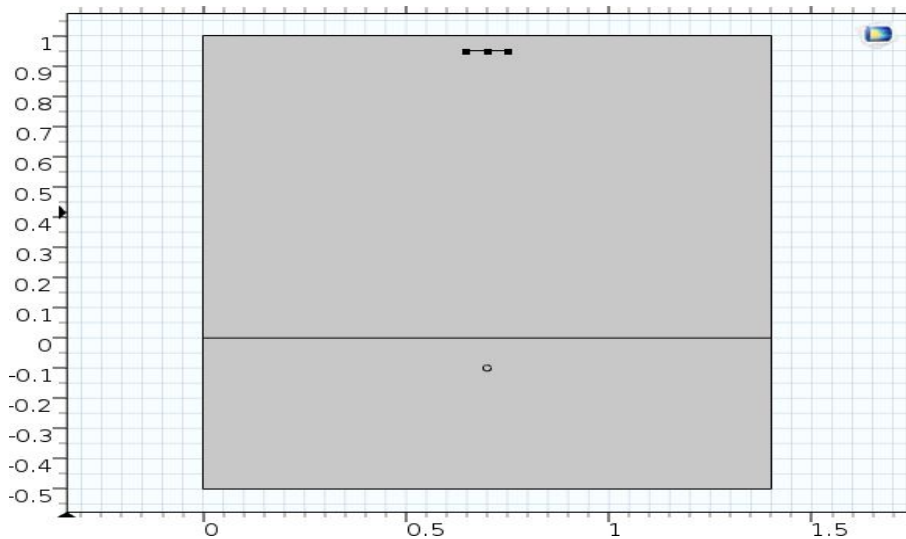


Figura 2.5: Simulación: Configuración 2. Unidades de los ejes en metros.

En las configuraciones 2, 3 y 4, la tellina se encuentra enterrada a 10cm de la superficie del sedimento. En la configuración 2 se encuentra en el centro del pistón, en la configuración 3 se encuentra a 5cm del borde izquierdo del pistón y en la configuración 4, a 5cm del borde derecho del pistón. Al analizar estas tres configuraciones en conjunto, se puede simular la respuesta angular al paso de la ecosonda por encima de una tellina, y así poder comprobar los cambios de fase en el *backscattering* que la caracterizan.

Tras definir el sistema y las configuraciones del mismo, se han definido las ecuaciones físicas que lo sustentan.

El modelo utilizado para la simulación es el *Transient Pressure Acoustic Model* que ofrece el paquete *Acoustics* de *Comsol Multiphysics*. Se ha seleccionado todo el sistema para que se comporte mediante las ecuaciones (1) y (2).

$$\frac{1 * \nabla^2 P_t}{\rho c^2 \nabla t^2} + \nabla \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - q_d) \right) = Q_m \quad (1)$$

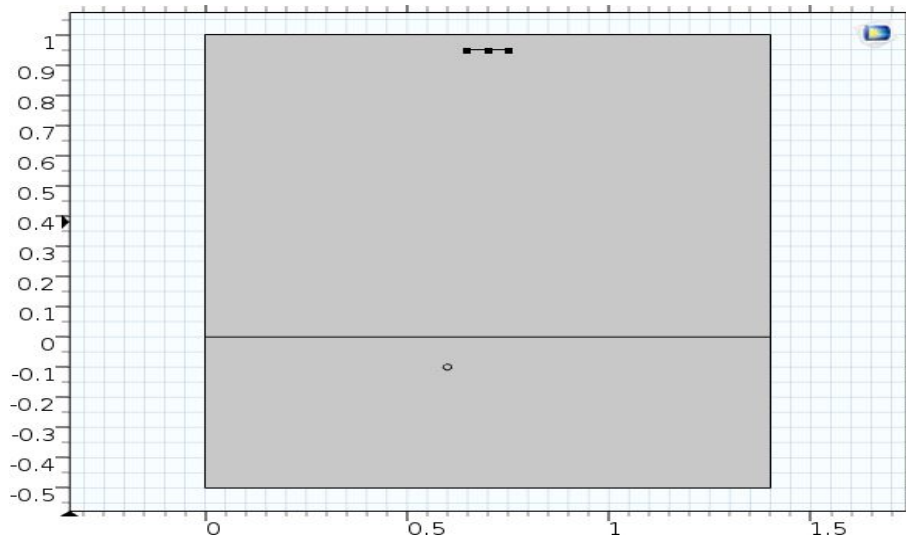


Figura 2.6: Simulación: Configuración 3. Unidades de los ejes en metros.

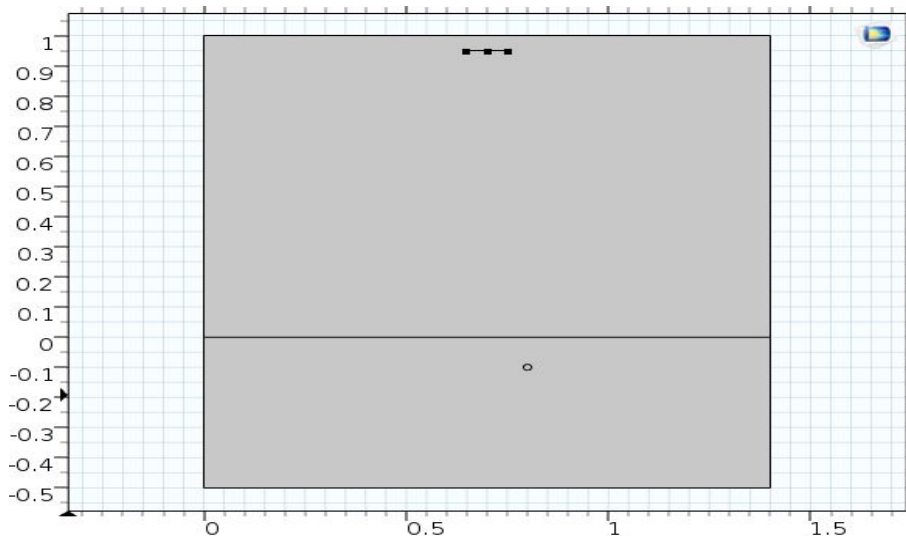


Figura 2.7: Simulación: Configuración 4. Unidades de los ejes en metros.

$$p_t = p_2 + p_b \quad (2)$$

Ha sido necesario forzar el borde del sistema para que se comporte con condiciones de onda plana para evitar reflexiones no deseadas. En la figura 2.8 se pueden observar los bordes definidos (en azul) con la ecuación (3).

$$-n\left(\frac{1}{\rho}(\nabla p_t - q_t)\right) + \frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{c}\frac{\nabla p^2}{\nabla t}\right) = Q_i \quad (3)$$

Para definir la impedancia en los bordes de las tellinas, se ha utilizado la definición *Sound Hard Boundary* que ofrece *Comsol Multiphysics*. En la figura 2.9 se puede observar los bordes seleccionados (en azul) y definidos con la ecuación (4).

$$-n\left(\frac{-1}{\rho}(\nabla p_t - q_t)\right) = 0 \quad (4)$$

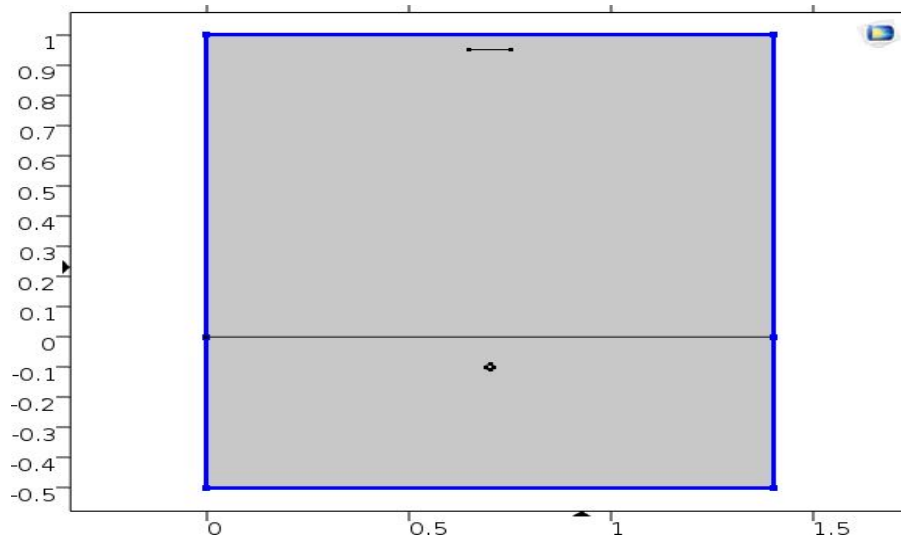


Figura 2.8: Bordes seleccionados con comportamiento de onda plana. Unidades de los ejes en metros.

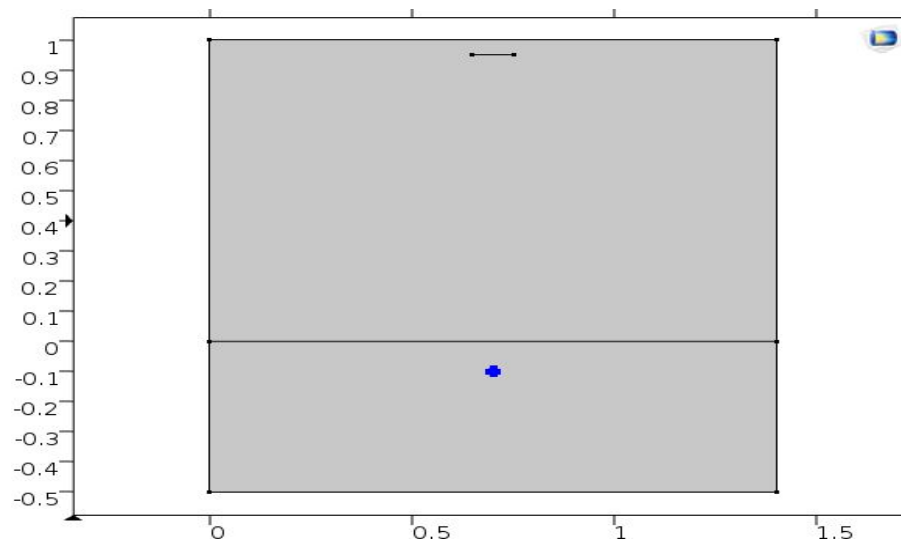


Figura 2.9: Bordes seleccionados en la definición de la impedancia. Unidades de los ejes en metros.

En todo sistema que se quiera simular, es necesario definir las condiciones iniciales del mismo. En este trabajo se han definido con las ecuaciones (5) y (6).

$$p = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Una vez definido el sistema de manera general, se ha procedido a definir las variables implicadas con valores numéricos específicos.

2.1.2. Condiciones de Contorno del Sedimento

El sistema que se ha representado en este proyecto es una simplificación de la interfase agua/sedimento con las condiciones propias del ambiente de costa mediterránea en el que habitan las tellinas.

El sedimento ha sido tratado como un material poroelástico debido a que está formado por grano de arena muy fino, lo que hace que su definición en el software de simulación sea un poco más compleja que si se tratara de un sólido.

El sedimento ha sido definido a partir de tres tipos de parámetros: básicos, módulos y otros. En cada tipo se expondrán las variables que se definen, las cuales quedan mostradas en la tabla 2.2.

Parámetros Básicos de simulación del sedimento marino Dentro de los parámetros básicos se han agrupado todas las variables necesarias para representar cualquier sistema.

- **Porosidad (ϵ):** Índice de porosidad del sedimento definido en 47 %.
- **Densidad (ρ_d):** Densidad propia del sistema poroelástico calculada a partir de la densidad de los granos de arena sólidos del sistema (ρ_g) y el índice de porosidad del propio sistema siguiendo la relación:

$$\rho_d = \rho_g * (1 - \epsilon) \quad (7)$$

Se ha definido la densidad de los granos en: 2650 kg/m^3 . Por lo cual, la densidad total del sistema es: $1404,5 \text{ kg/m}^3$

- **Permeabilidad (κ):** Índice que mide la capacidad del sedimento para dejar pasar las ondas del pulso antes de deformarse. Se ha definido en 10^{-10} m^2
- **Compresibilidad del fluido (χ):** Propiedad del sedimento que define la capacidad del mismo para comprimirse por el efecto del haz incidente y del agua y mantener el resto de parámetros constantes. Se ha definido con la siguiente relación:

$$\frac{1}{\rho_d * C_0^2} \quad (8)$$

- **Viscosidad Dinámica (μ):** Propiedad del sedimento que define la característica del mismo a resistir deformaciones. Se ha definido en $44 * 10^9 \text{ Pa} * \text{s}$

Módulos en simulación del sedimento marino En los parámetros de los módulos se han agrupado las definiciones que permiten caracterizar el sedimento en cuanto a la compresión debido a presiones externas.

- **Bulk Modulus (Bulk):** Definición de la resistencia del sedimento a la compresión uniforme, se ha especificado con la siguiente relación:

$$Kb + \frac{0,15}{j(\pi * Kb)} \quad (9)$$

donde $Kb = 4,36 * 10^7$ es el valor del *Bulk Modulus* entre granos.

- **Shear Modulus (Shear):** Definición de la resistencia del sedimento a la compresión en cizalla de una presión externa, se ha especificado con la siguiente relación:

$$G + \frac{0,15}{j(\pi * G)} \quad (10)$$

donde $G = 2,61 * 10^7$ es el valor del *Shear Modulus* entre granos.

Otros parámetros de simulación del sedimento marino En otros se han definido las variables propias de los materiales poroelásticos:

- **Biot-Willis (Biot):** Relación entre el valor de compresibilidad de los granos y el valor del *Bulk Modulus*. Se ha definido con la siguiente ecuación:

$$1 - \frac{K_b}{K_s} \quad (11)$$

donde K_b es el valor del *Bulk Modulus* entre granos y K_s el valor del *Bulk Modulus total*.

- **Tortuosidad (τ):** Relación entre la distancia real que debe recorrer una partícula de fluido para unir dos puntos del sedimento y la misma distancia en línea recta. Se ha definido en 1,25

Variable	Valor
ρ_d	$1404,5 \text{Kg}/\text{m}^3$
ε	0,47
κ	$1 * 10^9 \text{m}^2$
χ	$1 / (\rho_d * C_0^2)$
μ	$44 * 10^9 \text{Pa} * \text{s}$
<i>Bulk</i>	$4,36 * 10^7 + j2,0817 * 10^6 \text{Pa}$
<i>Shear</i>	$2,61 * 10^7 + j1,2462 * 10^6 \text{Pa}$
<i>Biot</i>	0,99879
τ	1,25

Tabla 2.2: Variables del Sedimento Marino

2.1.3. Condiciones de Contorno del agua

El segundo material que se ha definido en la simulación de este sistema ha sido el agua. Al tratarse de un fluido homogéneo, el agua se puede definir de manera más sencilla que el sedimento marino. El valor de las variables queda definido en la tabla 2.3.

La columna de agua que se ha definido es de $1m$ de altura para simular las condiciones que se encontrarán en el estudio experimental.

Las variables necesarias para definir el agua son las siguientes:

- **Velocidad de propagación (C_0):** Debido a que el sistema está compuesto de agua salada y sedimento poroso, la velocidad de propagación se puede definir como la velocidad de propagación del sonido en el agua del mar. Se ha definido en $1500m/s$.
- **Densidad del agua (ρ_f):** Densidad propia del agua. Definida en $1000kg/m^3$.
- **Viscosidad Dinámica (μ):** Variable que define la propiedad del agua como fluido para resistir deformaciones. Se ha definido en $10^{-3}Pa * s$
- **Compresibilidad del fluido (χ):** Propiedad del agua como fluido que define la capacidad del mismo para comprimirse y mantener el resto de parámetros constantes. Se ha definido en

$$\frac{1}{\rho_f * C_0^2} \quad (12)$$

donde ρ_f es la densidad del agua y C_0 la velocidad de propagación del sonido en el agua.

Variable	Valor
C_0	$1500m/s$
ρ_f	$1000kg/m^3$
μ	$1 * 10^{-3}Pa * s$
χ	$1/2,25 * 10^9$

Tabla 2.3: Variables del Agua

2.1.4. Condiciones Iniciales de la Ecosonda

De manera simplificada, se puede tratar la generación de los *pings* emitidos por la Ecosonda como un pistón que emita un pulso senoidal a la frecuencia de trabajo.

Para este primer estudio teórico y por limitaciones de cálculo del software utilizado, la frecuencia de trabajo para el pulso emitido por el pistón ha sido definida en $38Khz$.

En el entorno de trabajo de *Comsol Multiphysics* y utilizando el estudio "*Pressure Acoustics, Transient*", se ha dibujado una línea que actúa como un pistón y se ha definido en ella la condición inicial de presión "*Pressure*" a partir de la siguiente ecuación:

$$5\sin(2\pi f_0 t) * (t \leq \frac{1}{f_0}) \quad (13)$$

donde $f_0 = 38\text{KHz}$ y t es el tiempo en cada instante de la simulación.

2.1.5. Condiciones de Contorno de las Tellinas

El tercer material que se ha definido es el utilizado para simular las tellinas. El valor de las variables utilizadas está en la tabla 2.4.

La concha de las tellinas unidas al aire que expulsan las mismas, tiene una impedancia acústica mayor a la del sedimento y a la del agua, razón por la cual es interesante este estudio; debido a esa gran diferencia de impedancia, para una primera aproximación y como estudio teórico simplificado, se han simulado como si fueran pequeñas burbujas de aire de 2cm de diámetro enterradas en el sedimento. Se han definido las siguientes variables:

- **Velocidad de propagación (C_{aire}):** Se ha tomado, aproximadamente, el valor la velocidad de propagación del sonido en el aire. Se ha definido en 343m/s .
- **Densidad del aire (ρ_{aire}):** Densidad propia del aire. Definida en $1,2\text{kg/m}^3$.
- **Impedancia Acústica Característica del aire (Z_{aire}):** Se ha definido en $4,2\text{Pa} * \text{s/m}$.

Variable	Valor
C_{aire}	343m/s
ρ_{aire}	$1,2\text{kg/m}^3$
Z_{aire}	$4,2\text{Pa} * \text{s/m}$

Tabla 2.4: Variables que definen el aire (Tellinas)

Una vez obtenidos los resultados teóricos se exportan y tratan en el software de *MathWorks, Matlab*, para poder representar y analizar en profundidad los datos.

2.2 Experimental

2.2.1. Introducción

Un diseño experimental acotado y completo es necesario, ya que permite simular todas las situaciones que se pueden dar en el hábitat de las tellinas de manera controlada.

Mediante este estudio se ha captado la respuesta del sistema, con varias configuraciones, a la incidencia del haz de una ecosonda de uso científico *Simrad EK60*.

Seguidamente, se han transformado y analizado los datos obtenidos con la Ecosonda *Simrad EK60* en *Matlab*. Se ha representado la información de Potencia de las columnas de agua y sedimento para poder analizar de forma visual los cambios que se experimentan en esa información dependiendo de si existe o no población significativa de tellinas.

2.2.2. Diseño del Experimento

El estudio experimental llevado a cabo en este proyecto es de una magnitud suficiente como para separarlo en varias fases que se expondrán a continuación.

Enumeración y Recogida de materiales En la primera fase del diseño, se ha elaborado la lista de los materiales necesarios para llevar a cabo el experimento.

- Piscina de $10 \times 5 \times 1,5 m^3$ de volumen.
- Sedimento marino propio de la zona de hábitat de las tellinas.
- Agua con las características propias de la zona de hábitat de las tellinas.
- Tamiz de $2 mm$ de luz.
- Caja de plástico de $60 \times 40 \times 29 m^3$.
- Sistema de posicionamiento mecanizado para el movimiento de la ecosonda.
- Ecosonda EK60 de Simrad.
- Tellinas.

Con las tellinas almacenadas, se ha recogido sedimento de una zona con población de tellinas de la costa cercana al Puerto de Gandía, la zona está marcada en la figura 2.11.

Tras la recogida de sedimento, se ha procedido al tamizado del mismo con el tamiz de luz $2 mm$. Este tamaño de luz permite separar el grano más grueso de este tipo de sedimento, de las conchas y desechos que pueden alterar nuestras primeras medidas de aproximación.

Como se ha expuesto en la introducción de este mismo trabajo, al ser la finalidad del mismo la de recoger y exponer una primera aproximación del estudio experimental, tan solo se han llevado a cabo unas primeras medidas con el fin de ver la viabilidad del propio estudio.



Figura 2.10: Tellinas utilizadas en el experimento



Figura 2.11: Punto de recogida de sedimento. Circulado en rojo

2.2.3. Preparación del Experimento

El siguiente paso en el estudio experimental es la preparación del mismo. Para ello, se ha colocado la caja llena de sedimento dentro de la piscina de tal manera que, quedando esta centrada, no se tendrán problemas con reflexiones no esperadas del haz en los laterales de la piscina.

Con la caja en el interior de la piscina se ha procedido al llenado de la misma con agua del puerto que tiene unas características similares a la de la zona de estudio de donde se ha extraído el sedimento.

En las figuras 2.12 y 2.13 se puede ver el montaje del experimento

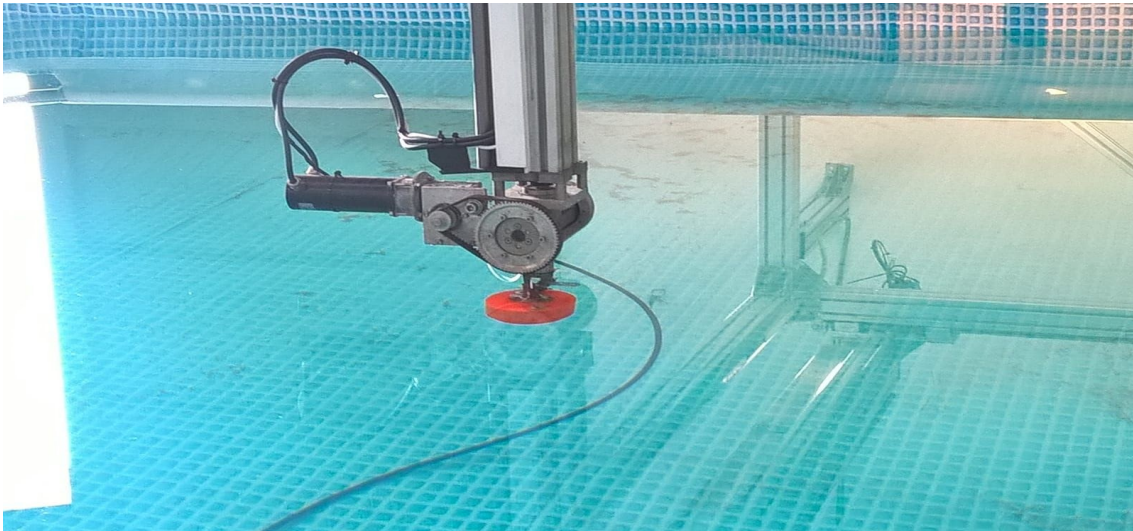


Figura 2.12: Montaje del experimento 1

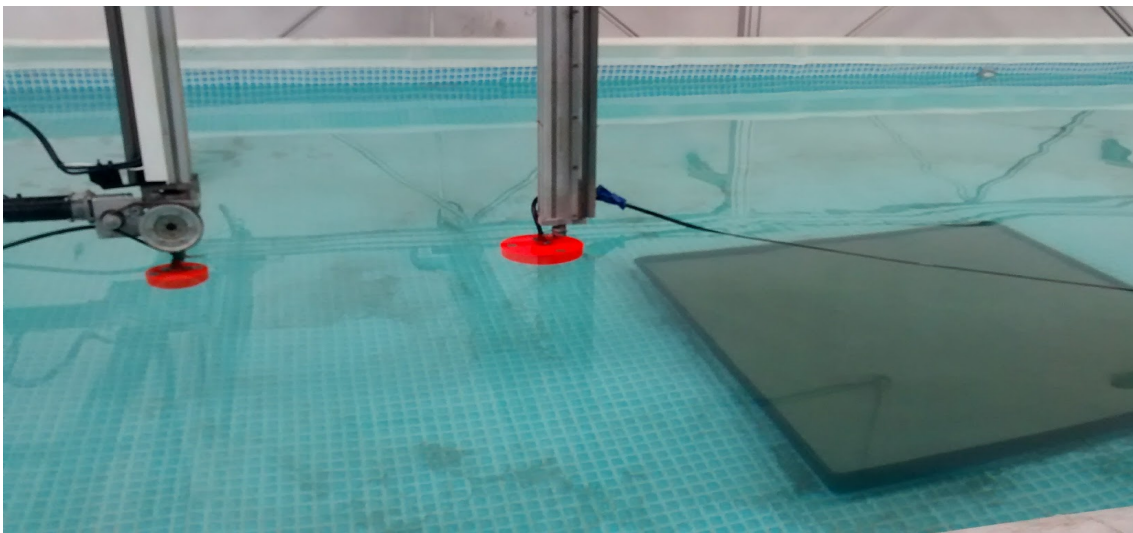


Figura 2.13: Montaje del experimento 2

2.2.4. Toma de Medidas

Una vez llena la piscina de agua y dejada reposar durante un día, se ha llevado a cabo la toma de medidas.

El transductor de la ecosonda que se ha utilizado para la toma de medidas tiene las especificaciones de la tabla 2.5. Para mayor detalle de las especificaciones del transductor, en el **Anexo II** se encuentra la hoja de especificaciones que ofrece el fabricante.

Modelo	Frecuencia Nominal	Ángulo de apertura del haz ($-3dB$)
ES200-7C	200KHz	7°

Tabla 2.5: Especificaciones del transductor utilizado en la toma de medidas. [6]

Por limitaciones de la piscina, las medidas se toman a $0,8m$ del sedimento.

Con el ángulo de apertura del haz de 7° y a la distancia de $0,8m$, se consigue un círculo de insonificación de $0,098m \approx 0,1m$ de radio utilizando la siguiente ecuación:

$$a = \operatorname{tg}(\alpha) * b \quad (14)$$

donde a es el radio en metros que se quiere calcular, α , el ángulo de apertura de haz a $-10dB$ en grados y b , la altura a la que radia el transductor en metros.

Según la hoja de especificaciones del transductor (**Anexo II**), el nivel de los lóbulos laterales respecto al lóbulo principal es menor de $-23dB$. Debido a que ese nivel es mucho menor que el del principal, no hay problemas en las mediciones a pesar de que el ancho de haz de los lóbulos laterales coincide prácticamente con el ancho de la caja utilizada.

Con esa disposición, se ha diseñado un plan de acción para la toma de todas las medidas necesarias para la primera aproximación experimental. En la figura 2.14 se muestra el transecto que se ha llevado a cabo por configuración.

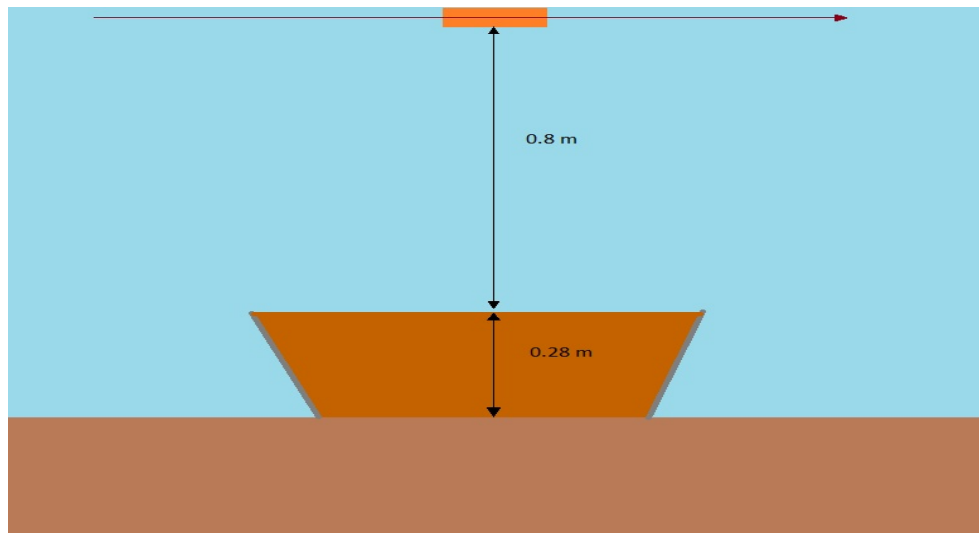


Figura 2.14: Esquema para la realización de los transectos de medida. Movimiento de la ecosonda en la dirección de la flecha roja.

Las configuraciones llevadas a cabo son las siguientes:

- **Configuración 1:** Sedimento
- **Configuración 2:** Esfera de calibración ($13mm$) a $7cm$
- **Configuración 3:** 1 Tellina a $7cm$
- **Configuración 4:** 3 Tellinas a $7cm$
- **Configuración 5:** 7 Tellinas a $11cm$

La configuración 1 se realiza como medida de control y caracterización del sedimento. Esta configuración es necesaria para que, llegado el momento de tomar

medidas en el hábitat natural, se tenga una medida controlada de la respuesta del sedimento.

Para evaluar la viabilidad del método para la detección de elementos enterrados en la arena se propone utilizar en primer lugar una esfera de calibración. Posteriormente se evalúa la respuesta acústica para distintas densidades de tellina (1, 3 y 7 individuos).

La configuración 1 se realiza como medida de control para comprobar experimentalmente que se detectan elementos enterrados. En este caso se ha enterrado una esfera de calibración de 13mm.

Las configuraciones 3 y 4 se realizan tratando de simular las tellinas enterradas a poca profundidad. Este enterramiento sucede en épocas calurosas, primavera y verano, cuando las tellinas están cerca de la superficie del sedimento para alimentarse.

La configuración 5 se realiza tratando de simular la profundidad a la que se entierran las tellinas en épocas frías, sobretodo invierno, y en momentos de temporal marino. En estas épocas, los oleajes son fuertes y las corrientes marinas podrían desplazar mar adentro a las tellinas acabando con las poblaciones. Por ello se entierran más profundamente.

Resultados

3.1 Resultados Simulación

Una vez finalizada la simulación con todas las configuraciones, *Comsol Multiphysics* permite exportar los datos en ficheros de texto e importarlos a *Matlab* para poder analizar de forma más precisa los resultados.

A fin de facilitar el estudio en conjunto de todas las muestras, cada configuración ha sido guardada en dos matrices atendiendo al receptor que ha captado la información y, posteriormente, han sido representadas en gráficas de Presión frente al Tiempo para poder comparar el comportamiento temporal de cada configuración.

En la figura 3.1 se aprecian dos fenómenos interesantes. En primer lugar, en instantes cercanos a 0, se puede visualizar la presión máxima del pulso emitido por el pistón. El segundo dato, y que más interesa para este estudio, se encuentra en torno al tiempo $1,3 \times 10^{-3}$ s. En ese tiempo aparece una discontinuidad en ambos receptores. Esa discontinuidad es debida al *backscattering* que ha producido la incidencia del pulso en la superficie del sedimento.

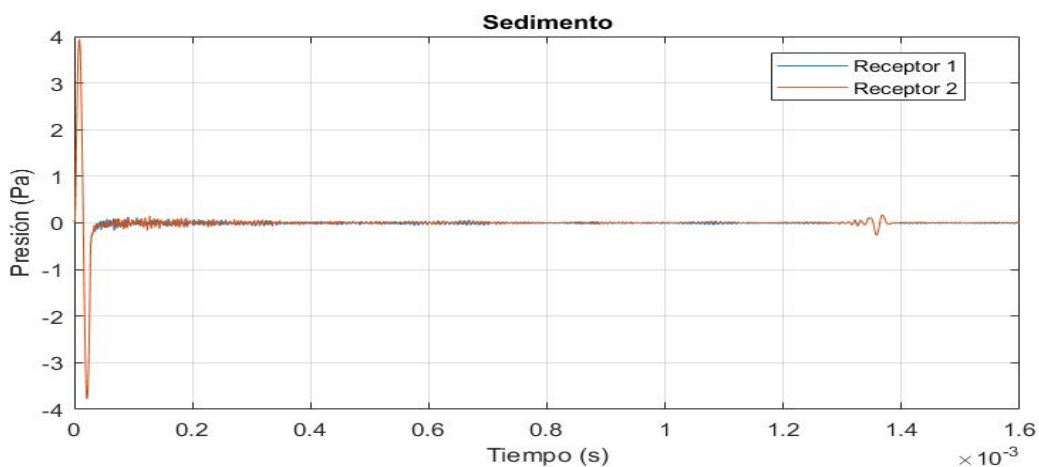


Figura 3.1: Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 1

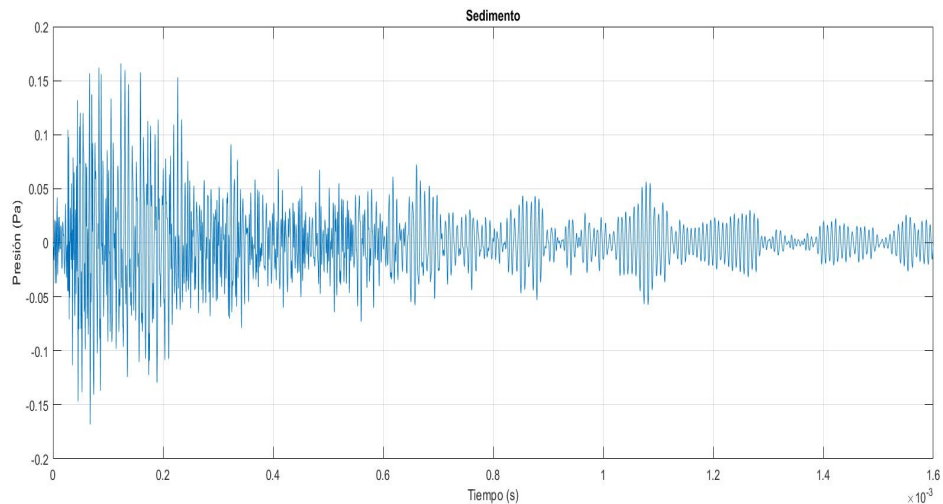


Figura 3.2: Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 1

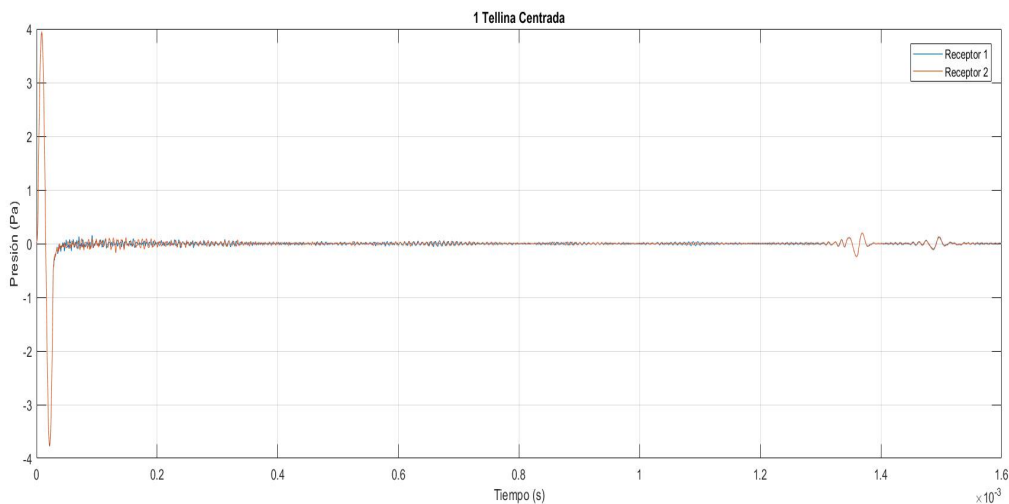


Figura 3.3: Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 2

En la figura 3.2, se ha calculado la diferencia entre la señal que recibe el Receptor 1 y la señal que recibe el Receptor 2. Este cálculo pretende simular, de forma básica, las diferencias que calculan las ecosondas *Split Beam* para conocer la distancia a la que se encuentran los objetos.

Se puede comprobar que el valor de la presión de la resta de ambas señales en los tiempos donde se encuentra el eco de la superficie del sedimento, es prácticamente nulo ya que las dos señales tienen una fase y una presión similares.

Con la respuesta del suelo caracterizada, se ha procedido a representar la presión en los receptores para la segunda configuración. La figura 3.3 muestra como, un tiempo después de que aparezca el backscattering del sedimento, aparece otro de menor nivel. Se aprecia que la onda llega a ambos receptores con, prácticamente, la misma fase, este hecho certifica que la tellina se encuentra a la misma distancia de ambos.

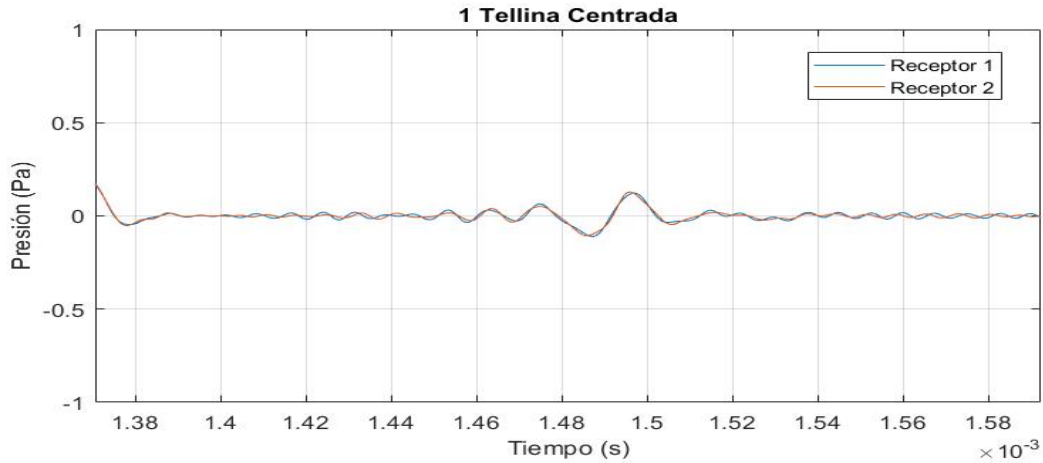


Figura 3.4: Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores, zona tellina ampliada. Configuración 2

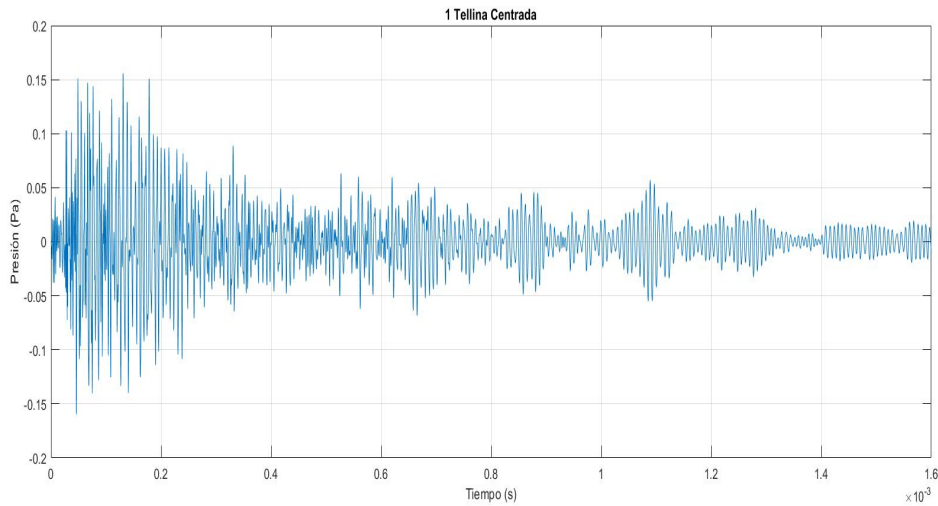


Figura 3.5: Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 2

En la figura 3.4 se observa con mayor precisión que la diferencia entre ambas señales es mínima, y en la figura 3.5, se puede comprobar que la resta de las señales en recepción, aunque no llegan en perfecta fase, es mínima la variación y por ello aparece una suma de presión ínfima en torno al tiempo $1,5 \times 10^{-3}$ s. Tiempo en el que se encuentra el máximo de presión de la onda reflejada por la tellina.

Seguidamente, se han representado los datos de la presión recibida en los receptores para las configuraciones 3 y 4. En la configuración 3, la tellina se encuentra colocada 5cm a la izquierda del pistón, y en la configuración 4, 5cm a la derecha del pistón.

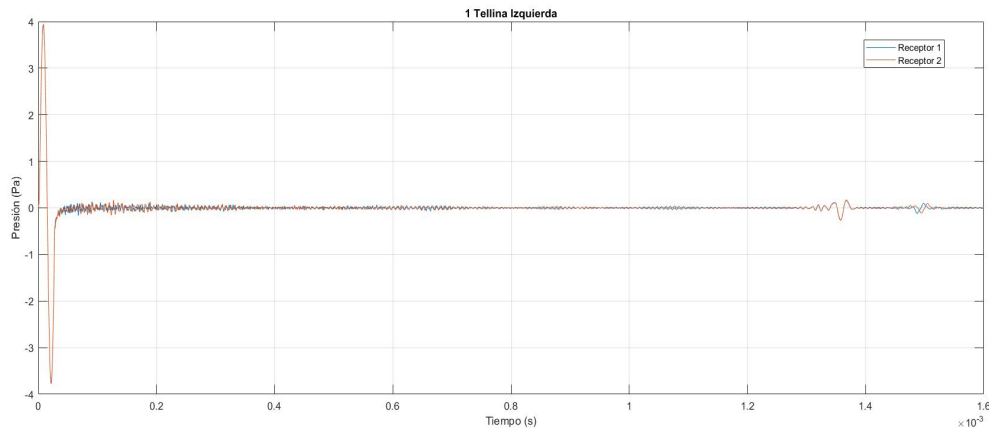


Figura 3.6: Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 3

En la figura 3.6 se puede ver cómo la onda de presión en los receptores llega con un desfase en el tiempo, esto se debe a que un receptor está ligeramente más cerca de la tellina que el otro. En este caso, se advierte que el Receptor 1 es más cercano a la posición de la tellina debido a que la presión del pulso rebotado llega antes que en el Receptor 2. También se puede comprobar que la superficie del sedimento está a la misma distancia de ambos, al fijarse en que la onda llega con la misma fase a los dos Receptores.

Si se amplía la gráfica 3.6 en los instantes donde aparece la discontinuidad producida por la tellina (3.7), se puede ver claramente la diferencia de fase de las ondas recibidas.

Siguiendo la ecuación (15), se calcula la diferencia de fase exacta entre ambas ondas. En este caso, para los valores de los instantes temporales de la figura 3.7, el valor de la diferencia de fase es de $1,6713rad$.

$$\phi = (2\pi f_0 * t_{R2}) - (2\pi f_0 * t_{R1}) \quad (15)$$

Donde $f_0 = 38000Hz$, t_{R1} es el instante de tiempo para el máximo de presión en el receptor 1 y t_{R2} es el instante de tiempo para el máximo de presión en el receptor 2.

Analizando la figura 3.8, se puede comprobar que la tellina está enterrada hacia un lateral del pistón al haber un máximo en torno al tiempo $1,5 * 10^{-3}s$. Este máximo se debe a que la onda llega con una diferencia de fase muy alta en un receptor respecto del otro.

Al calcular la diferencia de presión entre los dos receptores, las ondas en contrafase se suman y permiten visualizar y ubicar con buena precisión las tellinas en el sedimento.

En las figuras 3.9 y 3.10 se puede comprobar la declaración vertida a partir de la figura 3.6 y explicada en la figura 3.7. En este caso, el receptor más cercano a la tellina es el Receptor 2 y eso favorece que la presión del pulso reflejado llegue antes que al Receptor 1.

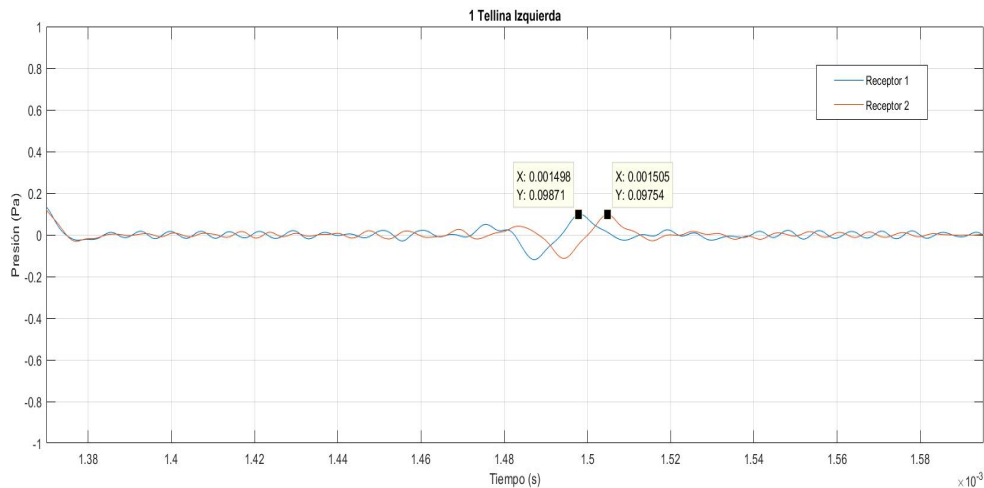


Figura 3.7: Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores, zona tellina ampliada. Configuración 3

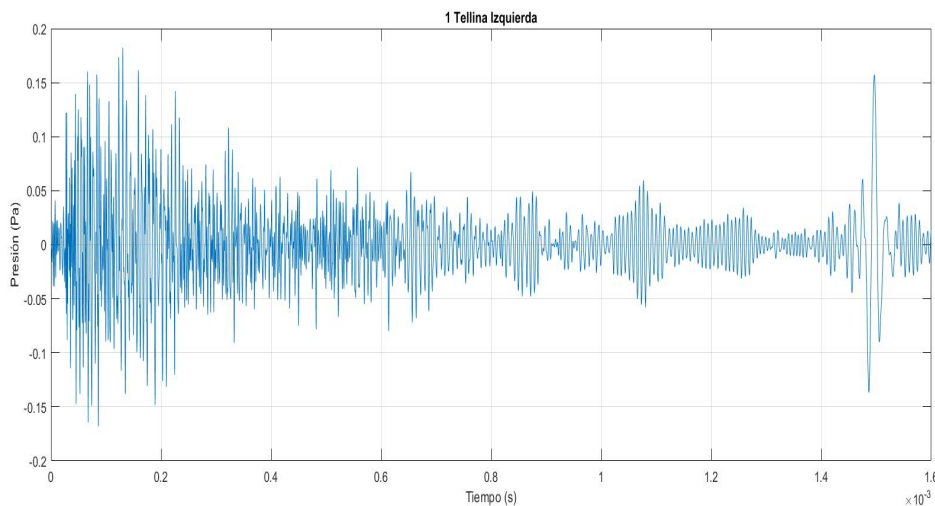


Figura 3.8: Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 3

Al resolver la ecuación (15) con los datos de la figura 3.10, el resultado es de $-1,4326rad$.

También se puede confirmar la declaración vertida a partir de la figura 3.8 al comprobar que en la figura 3.11 la suma de la fase en los instantes de tiempo donde se encuentra la tellina, es completamente simétrica a esta. Información que permite conocer de qué lado del pistón está enterrada la tellina.

En este punto, es viable afirmar que se pueden diferenciar, de manera teórica, tellinas enterradas en materiales poroelásticos similares a los sedimentos encontrados en sus hábitats naturales.

Siguiendo con el estudio, al relacionar las tres configuraciones con tellina, se puede analizar el comportamiento real de la fase en los receptores.

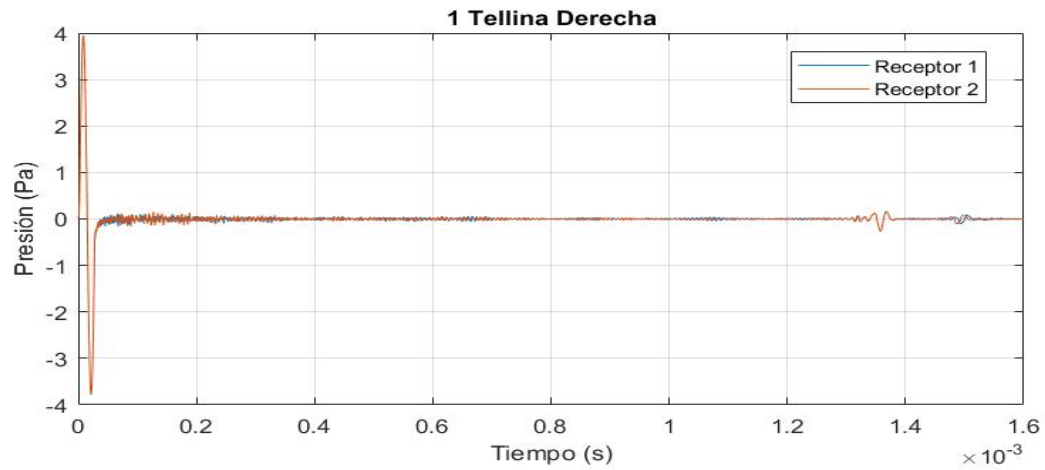


Figura 3.9: Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores. Configuración 4

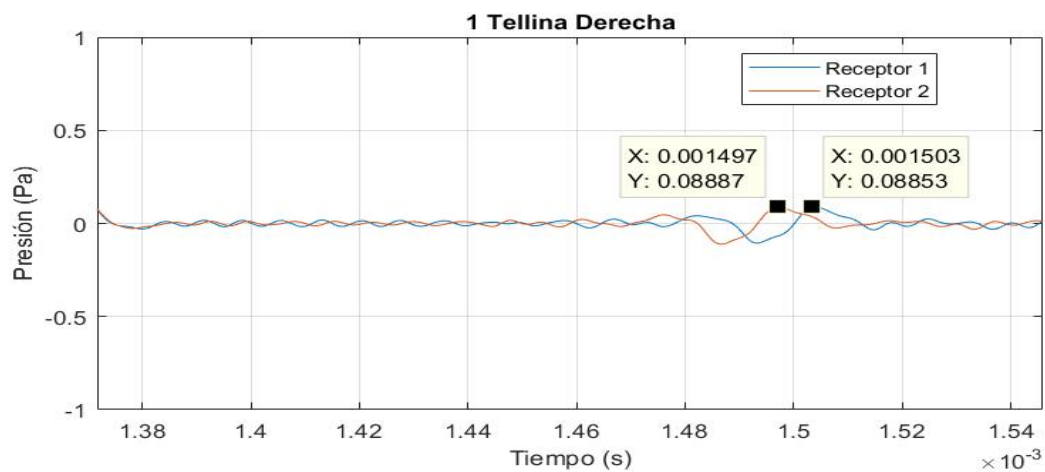


Figura 3.10: Representación Gráfica de la Presión en los dos Receptores, zona tellina ampliada. Configuración 4

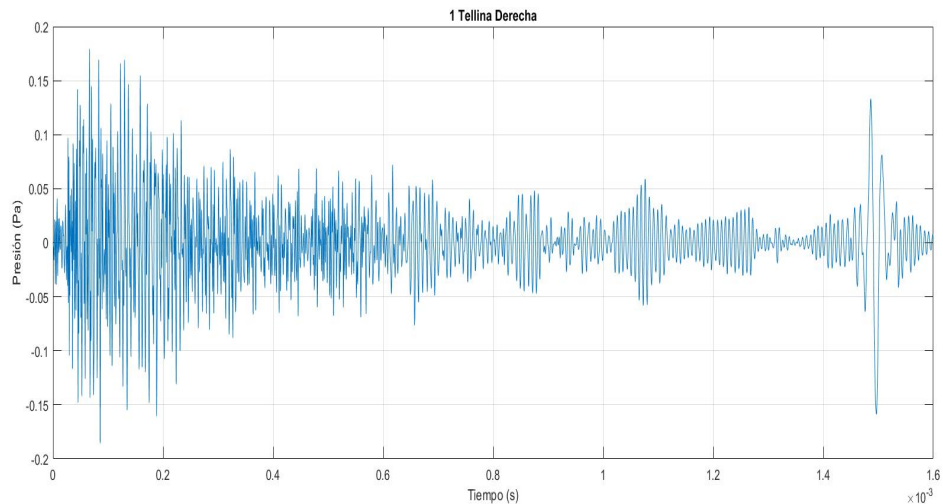


Figura 3.11: Representación Gráfica de la Diferencia de Señales en los Receptores. Configuración 4

Si se analizan los resultados del cálculo de la fase en el orden: Configuración 3 ($1,6713rad$), Configuración 2 ($0rad$), Configuración 4 ($-1,4326rad$); resulta un cambio de fase del que se puede deducir que existen elementos en el interior del sedimento.

Estos elementos se pueden posicionar analizando el cambio de fase. Si existe un cambio de fase negativo, el elemento habrá sido detectado primero por el receptor 1. En caso contrario, si el cambio de fase es positivo, el elemento habrá sido detectado en primer lugar por el receptor 2.

3.2 Resultados del Estudio Experimental

Con las medidas realizadas y los datos exportados en *Matlab*, se ha extraído la información de *TS* (Target Strenght ó medida del coeficiente de reflexión del objetivo).

Este análisis del *TS* proporciona información del nivel de potencia, en dB, que reflejan los materiales respecto al pulso generado por la ecosonda. Está cuantificado en valores de "dB" por debajo de cero.

Los análisis de estos primeros resultados se han llevado a cabo a partir de cuatro representaciones del sistema distintas. *TS* total, Información de un ping en dB, Información de un ping en lineal e Información de fase por profundidad.

3.2.1. TS Total

En este análisis se han representado 340 pings emitidos durante el transecto en las cinco configuraciones. Estos pings son suficientes para representar completamente la caja de sedimento y unos *cm* del suelo de la piscina.

En las figuras 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16 se puede observar el TS de todo el transecto para todas las configuraciones: Sedimento, esfera de calibración de 13mm, 1 tellina a 7cm, 3 tellinas a 7cm y 7 tellinas a 11cm respectivamente.

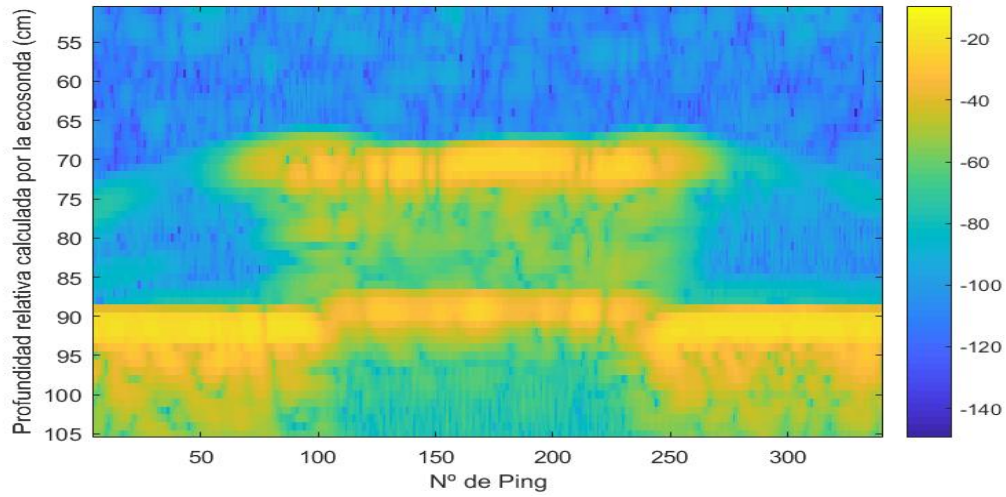


Figura 3.12: TS Total. Configuración 1

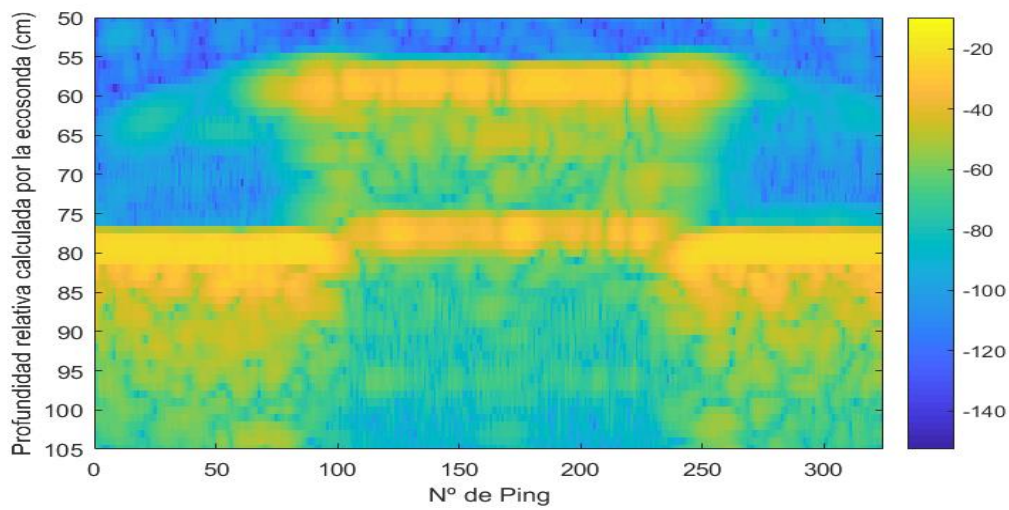


Figura 3.13: TS Total. Configuración 2

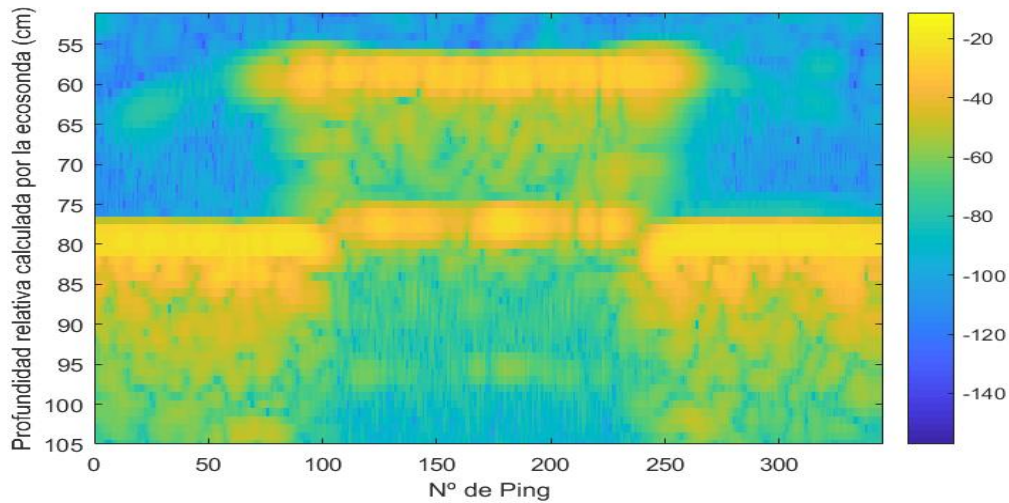


Figura 3.14: TS Total. Configuración 3

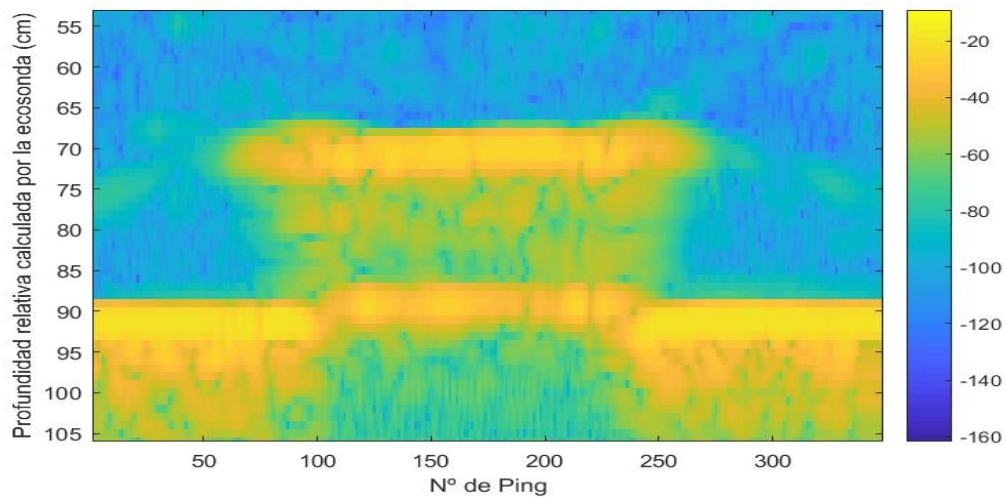


Figura 3.15: TS Total. Configuración 4

Con este análisis no se ha conseguido distinguir ningún cambio significativo en el interior del sedimento, aunque sí que ha servido para diferenciar la superficie del sedimento y la superficie de la piscina y así poder ver el sistema en perspectiva.

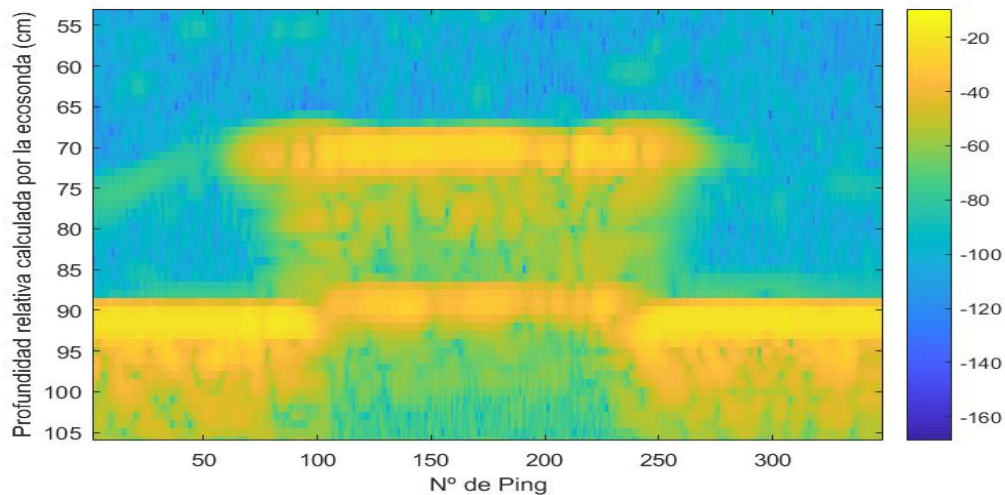


Figura 3.16: TS Total. Configuración 5

3.2.2. Información Logarítmica (dB)

Debido a que el anterior análisis no ha proporcionado suficiente información sobre el interior del sedimento, se ha llevado a cabo un análisis más en profundidad. Para ello, se ha elegido un ping en el que se sabe que se encuentra la esfera o las tellinas enterradas (ping nº 166) y se han representado los niveles de presión (dB) en todas las profundidades de la columna agua/sedimento.

En la figura 3.17, se puede observar la representación gráfica de la envolvente del ping 166 de la configuración de la esfera de calibración y de la configuración de sedimento.

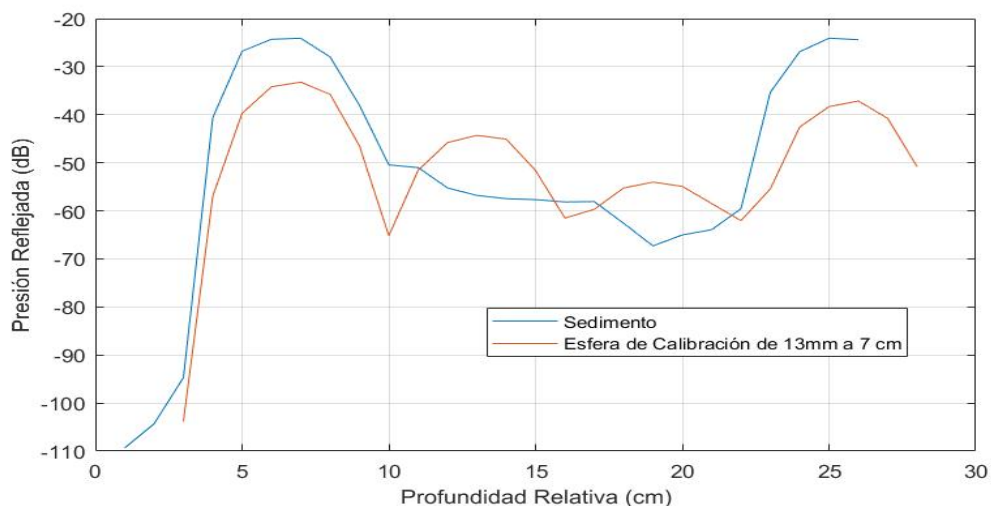


Figura 3.17: Análisis del ping 166 en las configuraciones 1 y 2. Envoltura en dB

En la figura 3.18, se puede observar la representación gráfica de la envolvente del ping 166 de las tres configuraciones de tellina y de la configuración de sedimento.

Analizando la gráfica anterior, se puede ver la diferencia en torno a la profundidad relativa de 13 cm. En ella aparece una irregularidad en las líneas de 1, 3 y

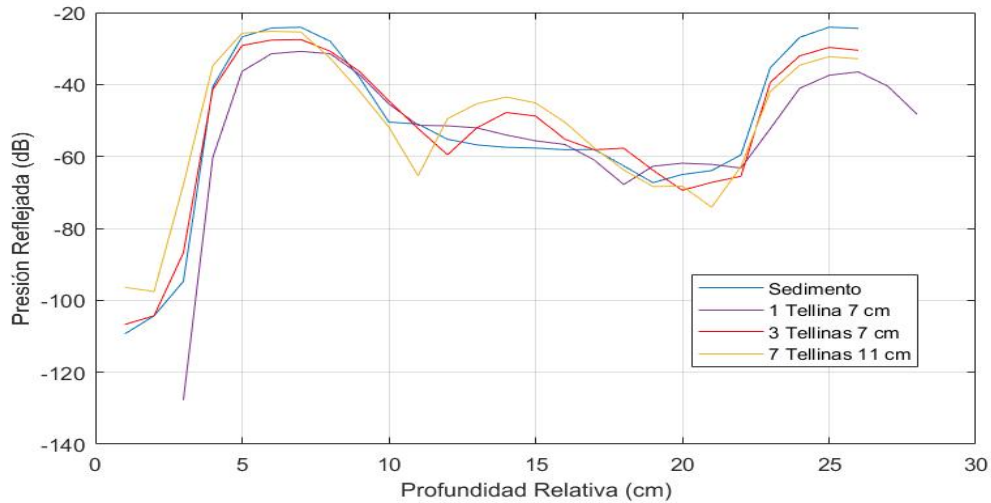


Figura 3.18: Análisis del ping 166 en las configuraciones 1, 3, 4 y 5

7 tellinas que no aparece en la de sedimento. Este máximo de presión se debe al *backscattering* de las tellinas enterradas.

También se puede observar como la línea de 7 tellinas, amarilla en la figura 3.18, es mayor tanto en profundidad como en nivel de presión debido a que, al haber más tellinas, el *backscattering* es mayor.

3.2.3. Información Lineal

El tercer análisis que se ha llevado a cabo es similar al segundo análisis. Se ha representado la envolvente del ping n° 166 en niveles lineales de presión y el resultado para las dos primeras configuraciones es la gráfica de la figura 3.19.

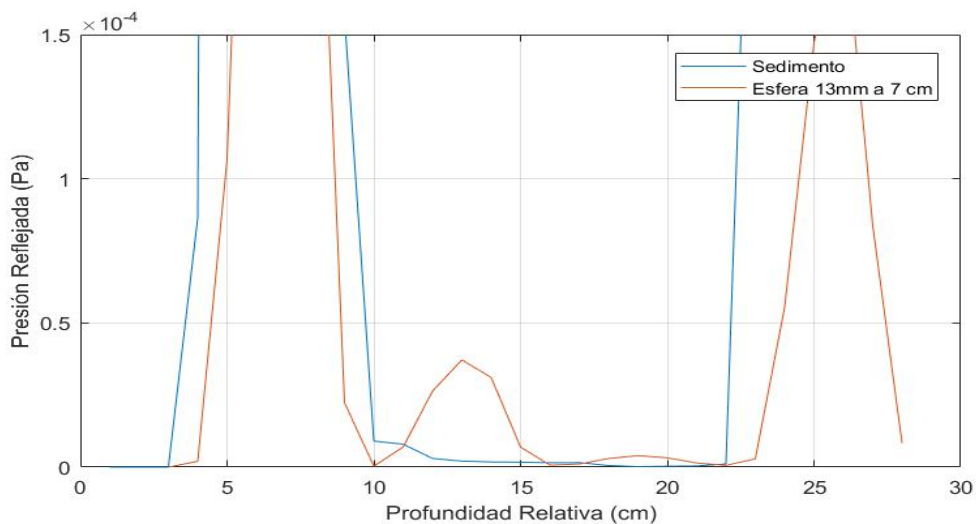


Figura 3.19: Análisis del ping 166 en las configuraciones 1 y 2. Envolvente en niveles lineales

En la gráfica de la figura 3.20, se ha representado la envolvente del ping n° 166 en niveles lineales de presión para las configuraciones 1, 3, 4 y 5.

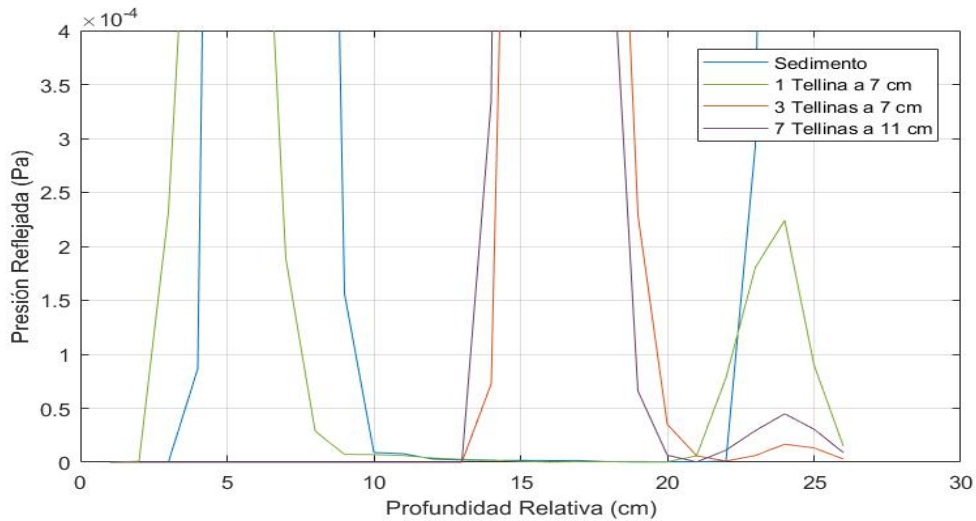


Figura 3.20: Análisis del ping 166 en las configuraciones 1, 3, 4 y 5. Envoltorio en niveles lineales

Se puede comprobar cómo está claramente representado el *backscattering* propio de la superficie del sedimento, entre 3 y 10cm relativos, y el del suelo de la piscina, entre 22 y 30cm relativos. En torno a 13cm aparecen las irregularidades que reflejan el interior del sedimento excepto en la configuración 3 (Una tellina), en la que no aparece ninguna irregularidad. En este caso se puede afirmar que esas irregularidades vienen dadas por el *backscattering* de las tellinas.

Se puede comprobar también, que cuanto mayor es la energía reflejada en el interior, menor es la energía que refleja el suelo de la piscina.

3.2.4. Información de Fase

El cuarto método consiste en analizar la información de la fase mecánica en el sentido *alongship*, es decir, en el sentido en el que avanza la ecosonda.

En la figura 3.21 se han representado las curvas de las configuraciones 1 y 2 (en la configuración 2, la esfera ha sido colocada también a 12cm de profundidad).

Analizando la figura 3.22, se puede comprobar que para los pings en los que se encuentran las tellinas (en torno al ping 45), en las representaciones de las configuraciones 3, 4 y 5, existe una respuesta estable de la información angular. En la representación de 7 Tellinas a 11 cm, la estabilidad es menor debido a que se encuentran a mayor profundidad. Mientras que en la representación de la configuración 1, la respuesta de la información angular es incoherente.

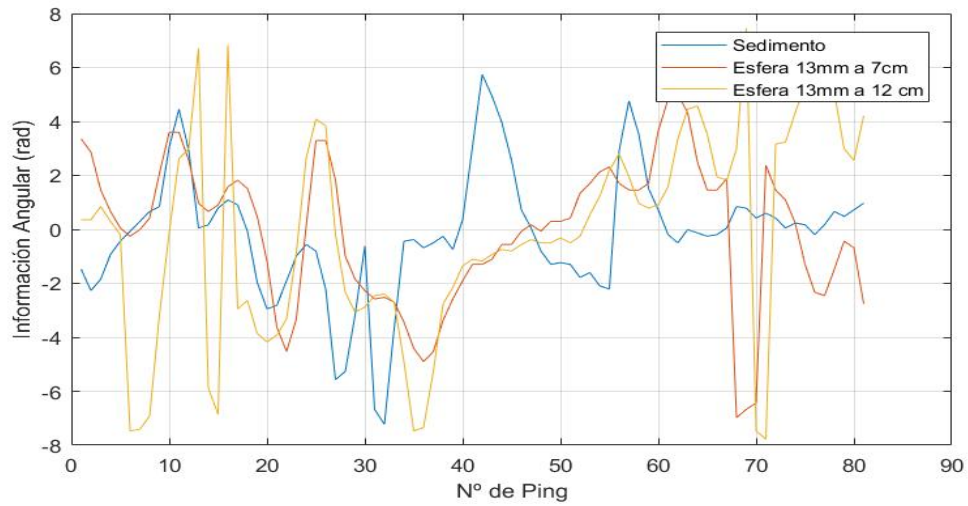


Figura 3.21: Análisis de fase en las configuraciones 1 y 2

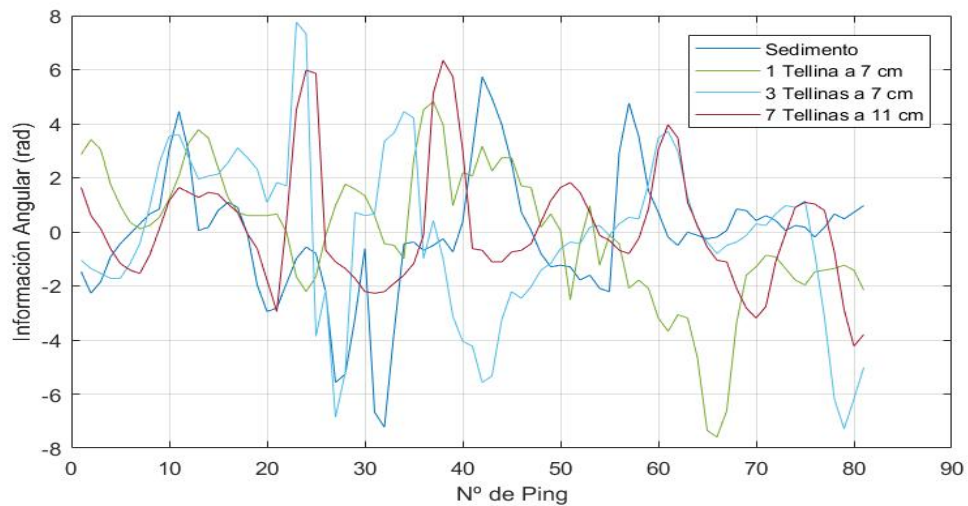


Figura 3.22: Análisis de fase en las configuraciones 1, 3, 4 y 5

Discusión

4.1 Conclusión Estudio Teórico

Analizando los resultados teóricos de este trabajo, se puede afirmar que, al analizar el sistema agua-sedimento con los parámetros propios de la zona costera donde se encuentra el hábitat de las tellinas, existen diferencias suficientemente significativas entre las diferentes configuraciones propuestas, para aceptar como viable la detección teórica de tellinas tanto por propiedades de la envolvente de la intensidad de los ecos como por diferencias de fase entre sectores de transductores de tipo partido.

4.2 Conclusión Estudio Experimental

Tras analizar los cuatro tipos de análisis con las cinco configuraciones distintas, se puede afirmar que, como primera aproximación, este parece ser un buen método para detectar tellinas en suelos marinos controlados. Además, hay indicios de la posibilidad de cuantificar esos moluscos en función de la información de *TS* del *backscattering*, al encontrarse pequeñas variaciones para diferentes poblaciones.

4.3 Conclusiones Generales

Para finalizar este trabajo y basándonos en los objetivos y resultados del mismo, se pueden afirmar las siguientes conclusiones:

- Los resultados teóricos extraídos de la simulación del entorno natural de la costa de Levante del mar Mediterráneo, permiten detectar pequeñas heterogeneidades e incrustaciones en el sedimento que lo compone.
- El análisis y representación de la información de *TS* de todos los pings en general, permite conocer las irregularidades el fondo marino, pero no permite detectar pequeñas heterogeneidades en el interior del mismo.

- La representación de la envolvente de un ping específico emitido en una zona conocida del sedimento, ofrece información sobre las incrustaciones en el interior del sedimento.
- Analizando los resultados del estudio experimental en conjunto con la caracterización granulométrica del sedimento, es correcto afirmar que, con la emisión de un haz de 200KHz en este tipo de sedimento, se pueden detectar pequeños bivalvos de tamaño inferior a 2cm.
- Es necesario extender el alcance de este estudio para valorar si los métodos acústicos pueden suponer una mejora en la calidad y en los costes del mapeado interno de los sedimentos que conforman los suelos marinos de las zonas costeras. Este hecho permitiría tener un mejor conocimiento de las poblaciones de bivalvos en general, y de tellinas en particular, que posibilitara un control de las mismas y que, de esta manera, se permitiera una mejor gestión de la pesca para su sostenibilidad.

4.4 Futuras líneas de estudio

El fin de este trabajo no termina con el mismo. En el futuro, se deberían llevar a cabo estudios en los que se tuvieran en cuenta las variables que, en esta primera aproximación, no se han podido estudiar.

En el futuro, el modelo del estudio experimental que se ha desarrollado en este trabajo se debería ampliar dotándolo de más configuraciones:

- Deberían hacerse transectos que permitieran el estudio según la posición en la que se ha quedado la tellina tras su entierro en el sedimento.
- Para tener datos significativos del experimento, deberían llevarse a cabo, al menos, 20 tomas de medidas por cada transecto. Estas tomas permitirían calcular medias y desviaciones que acercaran el resultado experimental al caso real.
- Como estudio controlado, debería calcularse la proporción de conchas y otras impurezas que existen en el sedimento. Se deberían realizar medidas con distintas proporciones que acercaran todavía más el resultado experimental con el caso real.
- Por último, un estudio de campo en el propio hábitat de las tellinas concedería la oportunidad de llevar a la práctica todos estos estudios teóricos y experimentales. Esto permitiría relacionar los estudios realizados en este proyecto con un caso real para dar una respuesta coherente y válida a la propuesta de este estudio.

Bibliografía

- [1] E.Hutin, Y. Simard y P. Archambault. Acoustic detection of a scallop bed from a single-beam echosounder in the St. Lawrence. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 966-983, 2005.
- [2] R.E. Grizzle, L.G. Ward, J.R. Adams, S.J. Dijkstra y B. Smith. Mapping and characterizing oyster reefs using acoustic techniques, underwater videography and quadrat counts. *American Fisheries Society Symposium*, volumen 41, páginas 152-159, 2005.
- [3] Y.C. Allen, C.A. Wilson, H. Roberts y J. Supan. High Resolution Mapping and Classification of Oyster Habitats in Nearshore Louisiana Using Sidescan Sonar. *Estuaries and Coasts*, 28:435-446, 2005.
- [4] N. Sanchez. Técnicas acústicas y software libre: Aplicaciones en la gestión costera. *Tesis Doctoral*, Universidad da Coruña, 2012
- [5] M. Kimura. Frame bulk modulus of porous granular marine sediments *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120: 699, 2006.
- [6] www.Simrad.com
- [7] C. K. Wentworth A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments *The Journal of Geology*, 1922