

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

“Plataforma de simulación para pruebas y evaluación de señales
acústicas en entornos subacuáticos”

Autor: Sergio del Valle Sanz

Tutor/es: M.^a Carmen Pérez Rubio y Santiago Murano

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Septiembre 2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE
COMUNICACIONES**

Trabajo Fin de Grado

“Plataforma de simulación para pruebas y evaluación de
señales acústicas en entornos subacuáticos”

Autor: Sergio del Valle Sanz

Tutor/es: M.^ª Carmen Pérez Rubio y Santiago Murano

TRIBUNAL:

Presidente: Jesus Ureña

Vocal 1º: Alfredo Gardel

Vocal 2º: M.^ª Carmen Pérez Rubio

FECHA: 30 de Septiembre 2021



Universidad
de Alcalá

Escuela Politécnica Superior
Departamento de Electrónica

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA DE COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

**“Plataforma de simulación para pruebas y evaluación de señales
acústicas en entornos subacuáticos”.**

Autor: Sergio del Valle Sanz.

Tutora: M.^a Carmen Pérez Rubio.

Cotutor: Santiago Murano.

Fecha: 30 de Septiembre 2021

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer este proyecto a la gente que siempre me está apoyando.

A mis padres, Vicente y M.^a Isabel, ya que me habéis apoyado siempre y queríais que cerrara esta etapa de mi vida. Sois lo mejor que tengo.

A mis amigos y mi novia, Macarena, porque he estado desaparecido estos últimos meses de estudio y nunca han dejado de animarme.

A mis tutores Carmen y Santiago por vuestro apoyo y dedicación para poder finalizar este objetivo.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	3
ÍNDICE.....	4
ÍNDICE DE TABLAS	8
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y SIMBOLOS	9
Acrónimos	9
Símbolos.....	9
RESUMEN	11
RESUMEN CASTELLANO	11
ABSTRACT.....	12
RESUMEN EXTENDIDO	13
MEMORIA:.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Antecedentes y estado actual del tema.....	15
1.2. Objetivos del TFG	16
1.3. Contexto	16
1.4. Estructura del documento.....	16
2. Conceptos básicos.....	17
2.1. Correlación periódica (AC y CC).....	17
2.2. Correlación aperiódica (AC y CC).....	17
2.3. Cotas de correlación AC (θ_{ac}) y CC (θ_{cc}).....	18
2.4. Sidelobe to Mainlobe Ratio (SMR)	18
2.5. Modulación BPSK	18
2.6. Secuencias Kasami.....	20
2.7. Trazado de rayos	21
2.8. Parámetros fundamentales de la propagación acústica subacuática.....	22
3. Plataforma desarrollada.....	25
3.1. Configuración de la emisión	26
3.2. Configuración de la recepción.....	34
3.3. Configuración de la escena	36
3.4. Configuración del trazado de rayos.....	41

3.5.	Resultados	44
3.6.	Casos de estudio.....	47
3.7.	Conclusiones.....	52
4.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	52
4.1.	Recopilación de logros del trabajo	52
4.2.	Trabajos futuros	52
5.	PRESUPUESTO	53
5.1.	Presupuesto de material y licencias.....	53
5.2.	Presupuesto de las horas de desarrollo	53
6.	PLIEGO DE CONDICIONES.....	54
7.	Manual de usuario	55
7.1.	Introduction.....	55
7.2.	Start window	56
7.3.	Initial window	57
7.4.	Emission configuration Kasami window.....	58
7.5.	Reception configuration Kasami window.....	64
7.6.	Enviroment configuration window	67
7.7.	Ray tracing configuration window	71
7.8.	Result window	75
	Bibliografía	77
	Anexo: códigos.	79
	Señal emitida modulada.....	79
	Señal emitida con el efecto del transductor	79
	Visualizar modelo transductor	80
	Cálculo y visualización de la batimetría.	81
	Cálculo y visualización del gradiente de temperatura.	82
	Cálculo y visualización del coeficiente de absorción.....	82
	Cálculo y visualización del perfil de velocidad del sonido.....	83
	Cálculo y visualización del modelo trazado de rayos.....	83
	Cálculo de los resultados y representación de la correlación y FFT de la señal recibida.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Modulador BPSK [11].	19
Fig. 2. Camino seguido por los rayos [7].	21
Fig. 3. Esquema general de la interfaz de usuario.	25
Fig. 4. Configuración Emisión.	26
Fig. 5. Ejemplo de valores en la aplicación.	27
Fig. 6. Secuencias Kasami 255 bits.	28
Fig. 7. Señal modulada: $N_c=4$ y $f_{se}=2000\text{Khz}$.	28
Fig. 8. Señal modulada ampliada.	29
Fig. 9. Señal portadora.	29
Fig. 10. Características del transductor usado [8].	30
Fig. 11. Modelo de transductor 200LM450 [8].	31
Fig. 12. Modelo de transductor personalizado por el usuario.	31
Fig. 13. Señal con el efecto del transductor 200LM450 [8].	32
Fig. 14. Señal emitida espaciada.	32
Fig. 15. Señal emitida periódica.	33
Fig. 16. Configuración de la recepción.	34
Fig. 17. Configuración de la recepción (valores por defecto).	35
Fig. 18. Transductor recepción 200LM450.	35
Fig. 19. Configuración entorno.	36
Fig. 20. Configuración Batimetría.	36
Fig. 21. Perfil de batimetría.	37
Fig. 22. Gradiente de temperatura.	38
Fig. 23. Perfil gradiente de temperatura.	38
Fig. 24. Ejemplo de configuración del entorno.	40
Fig. 25. Configuración del trazado de rayos.	41
Fig. 26. Ejemplo configuración trazado de rayos.	41
Fig. 27. Coeficiente de absorción.	42
Fig. 28. Perfil de la velocidad del sonido.	42
Fig. 29. Trazado de rayos.	43
Fig. 30. Llegadas al receptor.	43
Fig. 31. Ventana de resultados.	44
Fig. 32. Visualización de la señal recibida, correlación y FFT.	45
Fig. 33. Parámetros de entrada para el cálculo de picos.	46
Fig. 34. Resultados numéricos.	46
Fig. 35. Prueba 1.1 Trazado de Rayos	50
Fig. 36. Prueba 1.2. Trazado de rayos	50
Fig. 37. Prueba 1.3. Trazado de rayos.	51
Fig 38. Atenuación señal recibida por los rebotes.	51
Fig. 39. User Manual: Platform home	55
Fig. 40. User manual: Start window.	56
Fig. 41. User manual: Initial window	57

Fig. 42. User manual: Emission configuration Kasami window.....	58
Fig 43. User manual. Example emission configuration Kasami window	60
Fig 44. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display non-modulated code)	60
Fig 45. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display carrier signal)	61
Fig 46. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display modulated signal)	61
Fig 47. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display signal with transducer effect).....	62
Fig 48. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton see transducer model)	62
Fig 49. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display signals to emit)	63
Fig. 50. User manual. Reception configuration Kasami window.....	64
Fig 51. User manual. Reception configuration Kasami window (Pushbutton see transducer model)	66
Fig. 52. User manual. Enviroment configuration window.....	67
Fig 53. User manual: Example enviroment configuration window	68
Fig 54. User manual. Enviroment configuration Kasami window (Pushbutton see bathymetry)	69
Fig 55. User manual. Enviroment configuration Kasami window (Pushbutton see gradient)	70
Fig 56. User manual. Ray tracing configuration window	71
Fig 57. User manual: Example ray tracing configuration window	72
Fig 58. User manual: Ray tracing configuration window (pushbutton absortion coefficient)	73
Fig 59. User manual: Ray tracing configuration window (pushbutton sound speed profile)	73
Fig 60. User manual: Ray tracing configuration window (pushbutton ray tracing)	74
Fig 61. User manual. Result window	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes empíricos de la ecuación de Chen y Millero [13].....	23
Tabla 2. Casos de estudio. Caso 1.	48
Tabla 3. Casos de estudio. Caso 2.	49
Tabla 4. Presupuesto de material y licencias	53
Tabla 5. Presupuesto de las horas de desarrollo	53
Tabla 6. Options emission configuration Kasami window 1	58
Tabla 7. Options emission configuration Kasami window 2	59
Tabla 8. Options reception configuration Kasami window 1	64
Tabla 9. Options reception configuration Kasami window 2	65
Tabla 10. User manual: Example reception configuration Kasami window.....	65
Tabla 11. Options enviroment configuration window 1	67
Tabla 12. Options enviroment configuration window 2	68
Tabla 13. Options Ray tracing configuration window 1	71
Tabla 14. Options Ray tracing configuration window 2	72
Tabla 15. Editable options result window.....	75
Tabla 16. Parameters Result window.....	76
Tabla 17. Pushbutton options result window	76

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y SIMBOLOS

Acrónimos

AC \equiv *Auto-correlation function* (Función de autocorrelación)

BPSK \equiv *Binary Phase Shift Keying* (Modulación por Desplazamiento de Fase Binario)

BW \equiv *Band Width* (Ancho de banda)

CC \equiv *Cross-correlation function* (Función de correlación cruzada)

FFT \equiv *Fast Fourier Transform* (Transformada rápida de Fourier)

LFSR \equiv *Linear Feedback Shift Register* (Registro de Desplazamiento Realimentado Lineal)

SNR \equiv *Signal-to-Noise Ratio* (Relación señal-ruido)

SMR \equiv *Sidelobe to Mainlobe Ratio* (Relación pico lateral con pico principal)

Símbolos

c \equiv Velocidad del sonido en el aire a una temperatura de 20°C y una presión de 1 atm

f_c \equiv Frecuencia de la portadora

f_{se} \equiv Frecuencia de muestreo

f_{sr} \equiv Frecuencia de muestreo receptor

L \equiv Longitud del código

M \equiv Tamaño de Familia

N_c \equiv Número de ciclos de la portadora

N_{emo} \equiv Número de emisores simultáneos

N_{rep} \equiv Número de repeticiones consecutivas del código

T_e \equiv Tiempo de emisión de un código

T_r \equiv Tiempo de repetición entre emisiones de un código

T_{gap} \equiv Espaciado entre emisiones consecutivas

$T_{shift} \equiv$ Retardo entre emisiones

$O_f \equiv$ Factor de sobremuestreo

$W \equiv$ Velocidad del viento

$V_r \equiv$ Velocidad entre el emisor y el receptor

$PH \equiv$ PH del agua

$c_b \equiv$ Velocidad del sonido en el suelo marino

$n \equiv$ Numero de rayos

$k \equiv$ Coeficiente tipo de propagación

$\Theta_{i_j} \equiv$ Angulo de apertura inicial

$\Theta_{r_j} \equiv$ Angulo de apertura recibida

$Arrivals \equiv$ Numero de rayos que llegan al receptor

$threshold \equiv$ Umbral que debe superar la señal de la correlación

RESUMEN

RESUMEN CASTELLANO

En las últimas décadas ha cobrado especial importancia el empleo de las señales acústicas en medios subacuáticos, dado que señales electromagnéticas presentan unos coeficientes de absorción mayores. La atenuación de las señales electromagnéticas bajo la superficie del mar presenta una absorción de dB/m a una frecuencia de 30 kHz, frente a los dB/km de las señales acústicas.

En este Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha desarrollado una plataforma interactiva mediante MATLAB-GUIDE que consiste en un simulador de señales acústicas en entornos subacuáticos basado en un modelo de trazado de rayos.

Esta herramienta va a permitir al usuario configurar los diversos parámetros como la posición del emisor y el receptor, o factores del medio como ruido, velocidad del viento, batimetría, efecto del transductor, etc. Como resultados la herramienta proporciona gráficas de correlación, espectro en frecuencia y otros valores de interés como las cotas de correlación o el SMR (*Sidelobe to Mainlobe Ratio*).

Palabras clave: herramienta de simulación, señales acústicas, entornos subacuáticos, correlación, modelado canal.

ABSTRACT

In recent decades, the use of acoustic signals in underwater environments has gained special importance since electromagnetic signals have higher absorption coefficients. The attenuation of electromagnetic signals under the sea surface presents an absorption of dB/m at a frequency of 30 kHz, compared to dB/km of acoustic signals.

In this Final Degree Project (TFG) an interactive platform has been developed using MATLAB-GUIDE that consists of a simulator of acoustic signals in underwater environments based on ray tracing.

This tool will allow the user to configure the various parameters such as the position of the emitter and receiver, or several environmental factors, such as noise, wind speed, bathymetry, transducer effects, etc. As a result, the tool will provide graphs of correlation results, frequency spectrum and other values of interest such as correlation levels or SMR (*Sidelobe to Mainlobe Ratio*).

Keywords: simulation tool, acoustic signals, underwater environments, correlation, channel modeling.

RESUMEN EXTENDIDO

El proyecto que se expone en esta memoria pretende facilitar el estudio y análisis del desempeño de señales acústicas en el entorno subacuático. Para ello se ha desarrollado una interfaz de usuario mediante GUIDE, herramienta de Matlab® que permite realizar pruebas y ofrecer resultados en función de los parámetros de configuración.

Las señales acústicas en entornos subacuáticos cada vez tienen más relevancia debido a la necesidad de localizar vehículos submarinos o redes de sensores. Para desplegar cualquier sistema de posicionamiento, el primer paso es la realización de pruebas simuladas para conocer las necesidades y restricciones impuestas por el medio. Debido a la dificultad de desplegar demostradores prácticos en entornos subacuáticos, resulta de especial utilidad disponer de modelos de simulación que permitan generar un amplio banco de pruebas, como paso previo a la realización de pruebas experimentales. La herramienta de simulación presentada en este trabajo permite el diseño de las señales emitidas por los transductores, la configuración de la emisión, la batimetría y los diferentes parámetros que caracterizan el entorno, así como la selección y ubicación del hidrófono receptor. Se utilizará un modelo de trazado de rayos para la simulación de la propagación de señales acústicas y se mostrarán los resultados en diferentes etapas del procesamiento: banda base, señal modulada, señal recibida, y resultados de correlación.

A grandes rasgos, la aplicación presenta los siguientes apartados:

- Configuración de la emisión basada en secuencias Kasami [1]:
 - Configuración de la longitud de la secuencia Kasami a emitir.
 - Configuración de la modulación, siguiendo un esquema BPSK (*Binary Phase Shift Keying*): permite modificar el tipo de portadora (sinusoidal o cuadrada), la frecuencia de la portadora y la frecuencia de muestreo.
 - Permite añadir o no el efecto del transductor.

- Configuración del receptor:
 - Coordenadas donde se encuentra el receptor.
 - Frecuencia de muestreo en el receptor.
 - Permite añadir el efecto del transductor.

- Canal de transmisión:
 - Batimetría
 - Gradiente de temperatura
 - Velocidad del viento
 - Relación señal-ruido (SNR)
 - Características del fondo

- PH.
- Densidad del agua.
- Salinidad.
- Velocidad entre el emisor y receptor.

- Configuración del modelo trazado de rayos.
 - Nº de rayos.
 - Tipo de propagación
 - Ángulos de apertura inicial y final.

- Resultados y visualizaciones.
 - Almacenamiento y visualización de los códigos en banda base o modulados para su posible aplicación en pruebas reales.
 - Visualización del trazado de rayos, perfil de velocidad del sonido o del coeficiente de absorción.
 - Picos de correlación detectados en el receptor.
 - Tiempo de llegada del primer pico de correlación.
 - Amplitud del primer pico de correlación.
 - SMR o relación pico principal a lóbulo lateral.
 - Visualización de la señal recibida
 - Correlación y FFT (*Fast Fourier Transform*)

MEMORIA:

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y estado actual del tema

Las señales acústicas en entornos subacuáticos han cobrado especial importancia por la creciente necesidad de localizar sensores o para el guiado y rastreo de vehículos autónomos subacuáticos (*Autonomous Underwater Vehicles - AUVs*), así como en vehículos subacuáticos operados remotamente (*Remotely Operated Vehicles - ROVs*) [2]. Dado que en el medio subacuático el uso de cables no es económico y práctico, las señales acústicas constituyen una buena solución [3] [4].

Los principales factores que hay que tener en cuenta para el funcionamiento de los sistemas acústicos son: el número y localización de las balizas, respuesta en frecuencia y ancho de banda de los transductores, características del medio (PH, salinidad, batimetría, temperatura, velocidad del viento, etc), ubicación de los transductores y movimiento del emisor y receptor.

Este trabajo presenta una herramienta de simulación en Matlab-Guide totalmente configurable: se comienza con la configuración de las señales a emitir, basada en codificación con secuencias Kasami [1]; continúa con la distribución del emisor y el receptor; luego se configura la batimetría y se simula la propagación de las señales por el medio; finalmente se muestran los resultados en distintas etapas del proceso.

El modelo de propagación que se va a utilizar en esta herramienta será la aproximación del trazado de rayos [5]. El modelo de trazado de rayos se basa en considerar que la energía de la onda se puede concentrar en caminos definidos como si fueran rayos. Esto solo es válido si la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no varía mucho en una longitud de onda, por lo que este modelo funciona mejor para altas frecuencias. El modelo de trazado de rayos calcula los caminos que siguen los rayos y con ello se puede obtener las pérdidas de transmisión producidas por el medio y sus tiempos de propagación [6].

1.2. Objetivos del TFG

El objetivo de este trabajo es proporcionar una herramienta de simulación que permita el diseño de las señales emitidas por los transductores, la configuración de la emisión, la batimetría y los diferentes parámetros que caracterizan el entorno, así como la selección y ubicación del hidrófono receptor. Se utilizará un modelo de trazado de rayos para la simulación de la propagación de señales acústicas y se mostrarán los resultados en diferentes etapas del procesamiento.

1.3. Contexto

Este TFG se sitúa dentro del proyecto de investigación CODEUS (CM/JIN/2019-043).

1.4. Estructura del documento

El documento se divide en los siguientes capítulos:

El Capítulo 1 recoge el resumen del TFG, sus correspondientes objetivos y una visión global del trabajo.

El Capítulo 2 aborda el diseño y desarrollo de la interfaz generada en este proyecto, ofreciendo resultados y conclusiones.

El Capítulo 3 cuantifica el coste de desarrollo de este TFG mediante un presupuesto.

El Capítulo 4 corresponde al pliego de condiciones necesarias para el uso de la aplicación.

El Capítulo 5 contiene el manual de usuario de la interfaz desarrollada.

En el Capítulo 6 aparecen las referencias bibliográficas utilizadas durante el trabajo.

Por último, en el Capítulo 7 se adjuntan como anexo los códigos de las funciones generadas más relevantes.

2. Conceptos básicos

Antes de revisar la plataforma, se repasarán algunos conceptos a los que se hará referencia a lo largo del TFG [1].

2.1. Correlación periódica (AC y CC)

La correlación se utiliza para calcular la similitud entre dos señales, por lo tanto, se puede decir que la correlación es una medida que establece la dependencia de una señal con otra (correlación cruzada) o consigo misma (autocorrelación).

Dado un conjunto de M (tamaño de familia) secuencias binarias de longitud L (longitud del código) siendo $\{A = a_m[\ell] \in \{-1, 1\}; 0 \leq m \leq M-1; 0 \leq \ell \leq L-1\}$, se define su AC (función de autocorrelación) discreta periódica cuando $m = s$ y su CC (función de correlación cruzada) periódica cuando $m \neq s$:

(1)

$$R_{am,as}[\tau] = \sum_{l=0}^{L-1} a_m[l] a_s[l + \tau]$$

Las secuencias son periódicas ya que $\{a_m\} = (\dots, a_m[0], a_m[1], \dots, a_m[L-1], a_m[0], a_m[1], \dots, a_m[L-1], \dots)$ y la suma $l + \tau$ se realiza en módulo L .

2.2. Correlación aperiódica (AC y CC)

La expresión de correlación aperiódica viene dada como:

(2)

$$C_{am,as}[\tau] = \begin{cases} \sum_{l=0}^{L-1-\tau} a_m[l] a_s[l + \tau], & 0 \leq \tau \leq L - 1 \\ \sum_{l=0}^{L-1+\tau} a_m[l - \tau] a_s[l], & 1 - L \leq \tau \leq 0 \end{cases}$$

Cuando $m = s$ se obtiene la AC aperiódica, y cuando $m \neq s$ la CC aperiódica. Con objeto de simplificar, sólo se considera la función en el rango $0 \leq \tau \leq L-1$.

2.3. Cotas de correlación AC (θ_{ac}) y CC (θ_{cc})

Tanto en correlación periódica como en aperiódica, el valor del pico principal de autocorrelación es el mismo. Esto se debe a que, para el desfase cero, el valor de la función de correlación periódica y aperiódica coinciden:

$$C_{am,as}(0) = R_{am,as}(0) \quad (3)$$

$$C_{am}(0) = R_{am}(0) = \sum_{l=0}^{L-1} a_m[l]^2$$

El cálculo del valor máximo de interferencia en la correlación se emplea para evaluar la bondad de una familia de códigos.

$$\theta = \text{máx} \{ \theta_{AC}, \theta_{CC} \} \quad (4)$$

θ_{AC} representa el valor del máximo pico lateral obtenido de entre todas las autocorrelaciones de las M secuencias de la familia y θ_{CC} el pico máximo de correlación cruzada entre ellas.

$$\theta_{AC} = \text{máx} \left\{ \frac{|C_{am,am}[\tau]|}{C_{am,am}[0]} ; \forall m \in [0, \dots, M-1] \forall t \neq 0 \right. \quad (5)$$

$$\theta_{CC} = \text{máx} \left\{ \frac{|C_{am,as}[\tau]|}{C_{am,as}[0]} ; \forall m \in [0, \dots, M-1] \forall t: m \neq s \right.$$

(6)

Tanto la ecuación (5) como la (6) sirven para el caso periódico y aperiódico, cambiando $R_{am,am}$ por $C_{am,am}$ y $R_{am,as}$ por $C_{am,as}$, respectivamente.

2.4. Sidelobe to Mainlobe Ratio (SMR)

Este concepto es similar al cálculo de la cota θ_{AC} pero en la señal se tienen en cuenta los efectos de la modulación, del transductor empleado y los efectos del canal de transmisión.

2.5. Modulación BPSK

Para ajustar la señal al ancho de banda del transductor, es necesaria la modulación de los códigos

La modulación PSK (*Phase shift Keying*) se caracteriza porque la fase de la señal portadora representa cada símbolo de información de la señal moduladora, con un valor angular que el modulador elige entre un conjunto discreto de n valores posibles [12].

La señal modulada resultante, responde a la expresión (7), donde f_c se corresponde a la frecuencia de la portadora.

$$x(t) = \begin{cases} A \sin (2\pi f_c t), & \text{Binario "1"} \\ A \sin (2\pi f_c t + \pi), & \text{Binario "0"} \end{cases} \quad (7)$$

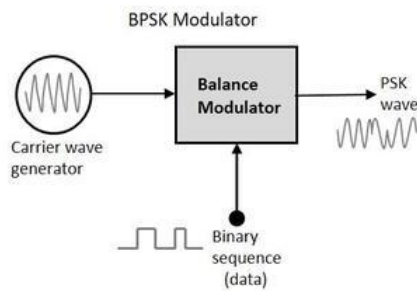


Fig. 1. Modulador BPSK [11].

2.6. Secuencias Kasami

Son secuencias binarias que presentan un comportamiento similar al de una secuencia completamente aleatoria, aunque son generadas de forma determinista (pseudo-aleatorias) [1] [2]. El grado de aleatoriedad lo marcan los siguientes criterios [9]:

- La AC periódica en cualquier instante $\tau \neq 0$ debe ser una constante c de bajo valor:

$$R_A[\tau] = \begin{cases} L, & \tau = 0 \\ c, & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

En donde $\{A = a[l] \in \{-1, 1\}; 0 \leq l \leq L-1\}$.

- En cada período el número de 1 no debe exceder en más de una unidad al número de -1, esto es, $|\sum_{l=0}^{L-1} a[l]| \leq 1$.

- En cada período la mitad de los 1 o -1 consecutivos tienen longitud 1, un cuarto tiene longitud 2, un octavo longitud 3, etc. Además, hay el mismo número de 1 consecutivos que de -1.

2.6.1. Generación

Estas secuencias se generan a partir de secuencias-m [9]. Primero se genera la secuencia m_1 de longitud $L=2^n-1$ mediante el uso de un LFSR (Registro de Desplazamiento Realimentado Lineal) siendo n un número entero. La segunda secuencia m_2 se genera a través del diezmado de la secuencia m_1 con el factor $q=2^{n/2}$ y se comprueba que el resultado de la secuencia tiene un período de longitud $T_{m_2}=2^{n/2}-1$. Una secuencia Kasami se obtiene tomando 2^n-1 bits de las secuencias m_1 y m_2 y sumándolas en módulo-2. El conjunto K de la secuencia Kasami consiste en la secuencia m_1 y el módulo-2 y la longitud de la secuencia m_1 diezmada por el factor q ($L'=2^{n/2}-1$).

$$K = \{m_1, m_1 \oplus m_2, m_1 \oplus Dm_2, m_1 \oplus D^2m_2, \dots, m_1 \oplus D^{L'-1}m_2\} \quad (9)$$

El conjunto de secuencias Kasami contiene $M=2^{n/2}$ secuencias.

2.6.2. Propiedades de correlación

Las AC y CC periódicas de esta familia de secuencias están dentro del rango:

$$A_c(\tau) = \begin{cases} L, & \tau = 0 \\ \{-1, -2^{\frac{n}{2}} - 1, 2^{\frac{n}{2}} - 1\} & \tau \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$C_c(\tau) = \{-1, -2^{\frac{n}{2}} - 1, 2^{\frac{n}{2}} - 1\} \quad \forall \tau \quad (11)$$

2.7. Trazado de rayos

El modelo de trazado de rayos se basa en considerar que la energía de la onda se puede concentrar en caminos definidos como si fueran rayos. Esto solo es válido si la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no varíen mucho en una longitud de onda, por lo que este modelo funciona mejor para altas frecuencias. El modelo de trazado de rayos calcula los caminos que siguen los rayos y con ello se puede obtener las pérdidas de transmisión de transmisión producidas por el medio y sus tiempos de propagación.

Los parámetros requeridos para realizar el trazado de rayos son el número de rayos, el *step*, que es la unidad mínima que avanzará cada iteración de la simulación, el coeficiente de divergencia geométrica, que puede seleccionarse entre esférico o cilíndrico y además los ángulos de apertura de los rayos.

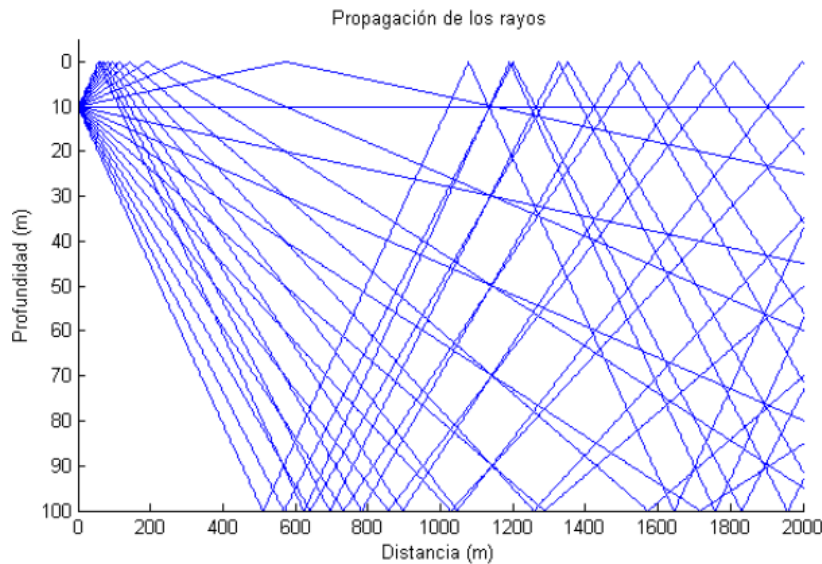


Fig. 2. Camino seguido por los rayos [7].

Puede ampliarse información en [6].

2.8. Parámetros fundamentales de la propagación acústica subacuática.

2.8.1. Velocidad del sonido

La velocidad del sonido se obtiene a partir de la ecuación:

$$c^2 = \gamma \frac{\beta_T}{\rho_o} \quad (12)$$

Donde c es la velocidad del sonido en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, γ es el índice adiabático, β_T es el módulo de compresibilidad isotérmico y ρ_o la densidad de equilibrio. A su vez, estas tres magnitudes son función de la temperatura y de la presión del agua.

La ecuación de Chen y Millero [10] se utilizará para el cálculo de la velocidad del sonido en el medio subacuático y muestra unos coeficientes empíricos que engloban a su vez a otros, que pueden depender de la temperatura (T), presión (P) y salinidad (S):

$$c(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{\frac{3}{2}} + D(T, P)S^2 \quad (13)$$

Donde las funciones $C_w(T, P)$, $A(T, P)$, $B(T, P)$ y $D(T, P)$ son [13]:

$$C_w(T, P) = C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5 + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P + (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3$$

$$A(T, P) = A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4 + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P + (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3)P^2 + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3$$

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P$$

$$D(T, P) = D_{00} + D_{10}P$$

El valor de las constantes empíricas C_{ij} , A_{ij} , B_{ij} y D_{ij} se recoge en la tabla 1.

Coefficiente	Valor	Coefficiente	Valor	Coefficiente	Valor
C_{00}	1402.388	C_{01}	5.03830	C_{02}	$-5.81090 \cdot 10^{-2}$
C_{03}	$3.3432 \cdot 10^{-4}$	C_{04}	$-1.47797 \cdot 10^{-6}$	C_{05}	$3.1419 \cdot 10^{-9}$
C_{10}	0.153563	C_{11}	$6.8999 \cdot 10^{-4}$	C_{12}	$-8.1829 \cdot 10^{-6}$
C_{13}	$1.3632 \cdot 10^{-7}$	C_{14}	$-6.1260 \cdot 10^{-10}$	C_{20}	$3.1260 \cdot 10^{-5}$
C_{21}	$-1.7111 \cdot 10^{-6}$	C_{22}	$2.5986 \cdot 10^{-8}$	C_{23}	$-2.5353 \cdot 10^{-10}$
C_{24}	$1.0415 \cdot 10^{-12}$	C_{30}	$-9.7729 \cdot 10^{-9}$	C_{31}	$3.8513 \cdot 10^{-10}$
C_{32}	$-2.3654 \cdot 10^{-12}$	A_{00}	1.389	A_{01}	$-1.262 \cdot 10^{-2}$
A_{02}	$7.166 \cdot 10^{-5}$	A_{03}	$2.008 \cdot 10^{-6}$	A_{04}	$-3.21 \cdot 10^{-8}$
A_{10}	$9.4742 \cdot 10^{-5}$	A_{11}	$-1.2583 \cdot 10^{-5}$	A_{12}	$-6.4928 \cdot 10^{-8}$
A_{13}	$1.0515 \cdot 10^{-8}$	A_{14}	$-2.0142 \cdot 10^{-10}$	A_{20}	$-3.9064 \cdot 10^{-7}$
A_{21}	$9.1061 \cdot 10^{-9}$	A_{22}	$-1.6009 \cdot 10^{-10}$	A_{23}	$7.994 \cdot 10^{-12}$
A_{30}	$1.100 \cdot 10^{-10}$	A_{31}	$6.651 \cdot 10^{-12}$	A_{32}	$-3.391 \cdot 10^{-13}$
B_{00}	$-1.922 \cdot 10^{-2}$	B_{01}	$-4.42 \cdot 10^{-5}$	B_{10}	$7.3637 \cdot 10^{-5}$
B_{11}	$1.7950 \cdot 10^{-7}$	D_{00}	$1.727 \cdot 10^{-3}$	D_{10}	$-7.9836 \cdot 10^{-6}$

Tabla 1. Coeficientes empíricos de la ecuación de Chen y Millero [13].

A continuación, se puede estudiar cómo varía esta velocidad respecto a la profundidad, para obtener así el perfil de la velocidad del sonido. Para ello, hay que conocer cómo varían la temperatura, la salinidad y la presión respecto a la profundidad.

Puede ampliarse información en [7].

2.8.2. Pérdidas de transmisión

Cuando la señal acústica se propaga por el medio subacuático sufrirá pérdidas debido a la divergencia geométrica, la absorción del medio y los rebotes producidos en las superficies. Estas pérdidas forman un parámetro denominado pérdidas de transmisión, TL (*transmission loss*).

La divergencia geométrica se produce como consecuencia de la propagación de la onda acústica. Lo natural es que la onda se propague de forma esférica. Sin embargo, cuando la relación entre la distancia a la que se propaga la onda y la profundidad del fondo es tal que la onda queda confinada entre la superficie del mar y el fondo, se considera que la propagación es cilíndrica.

Las pérdidas de transmisión para la divergencia esférica y cilíndrica son las siguientes [7]:

$$TL_{esf} = 20 \log(r) \quad (14)$$

$$TL_{cil} = 10 \log(r) \quad (15)$$

La absorción del medio es la parte de la energía de la señal acústica que pasará al medio en forma de calor y consta de dos contribuciones principales: la viscosidad del agua y procesos de relajación.

Estas contribuciones se recogen en el parámetro denominado coeficiente de absorción:

$$\alpha = \frac{A_1 P_1 f_1 f^2}{f^2 + f_1^2} + \frac{A_2 P_2 f_2 f^2}{f^2 + f_2^2} + A_3 P_3 f^2 \quad (16)$$

Donde α tiene unidades de $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ y f es la frecuencia de la señal en kHz. El primer término proviene de la contribución del ácido bórico, el segundo de la contribución del sulfato de magnesio y el tercero de la viscosidad del agua, f_1 y f_2 son las frecuencias de relajación del ácido bórico y el sulfato de magnesio respectivamente, en kHz, y los coeficientes A_i y P_i pueden depender del pH, la salinidad, la profundidad, la temperatura y la velocidad del sonido.

La última contribución a las pérdidas de transmisión se debe a los rebotes de la señal en la superficie del mar o el fondo.

Las pérdidas de transmisión se pueden expresar según la ecuación (17) una propagación esférica, o la ecuación (18) para una propagación cilíndrica:

$$TL_{esf} = 20\log(r) + \alpha r \cdot 10^{-3} + TL_{reb} \quad (17)$$

$$TL_{cil} = 10\log(r) + \alpha r \cdot 10^{-3} + TL_{reb} \quad (18)$$

Donde r es la distancia donde está ubicado el receptor y TL_{reb} son las pérdidas de los rebotes que pueden depender de muchas condiciones y se ha dejado indicado de forma genérica.

3. Plataforma desarrollada

En la Fig.3. se muestra, a grandes rasgos, el recorrido que sigue la aplicación. En primer lugar, se configura la emisión, con una codificación Kasami por defecto; a continuación, se configura la modulación, la posición donde se va a colocar el emisor y el modelo de transductor elegido. Una vez configurada la emisión se procede a configurar la recepción donde se podrá situar la posición del receptor, su frecuencia de muestreo y el modelo de transductor. A continuación, se configura el canal, donde se especifica la batimetría, el gradiente de temperatura, el perfil de la velocidad del sonido y otros parámetros que tendrán especial importancia en la simulación.

Una vez configurados los parámetros de entrada se lanza la simulación se mostrará el trazado de rayos para el entorno previamente definido, así como las llegadas al receptor.

Por último, se analizarán las señales recibidas y las señales resultantes tras el procesado junto con estadísticas de interés, como la cota de autocorrelación o el número de picos detectados.

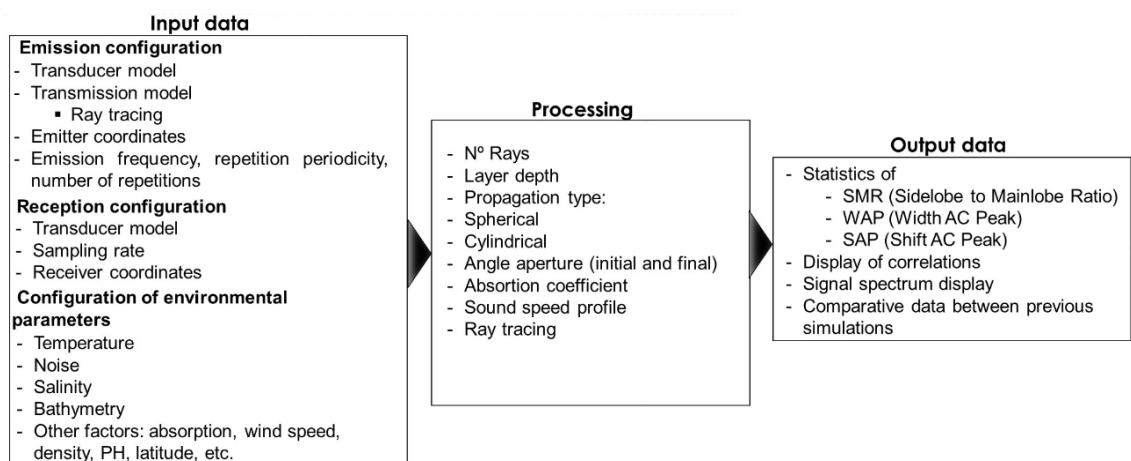


Fig. 3. Esquema general de la interfaz de usuario.

3.1. Configuración de la emisión

En la Fig. 4 se puede observar la ventana donde se podrán configurar los siguientes parámetros para las señales de emisión con codificación Kasami.

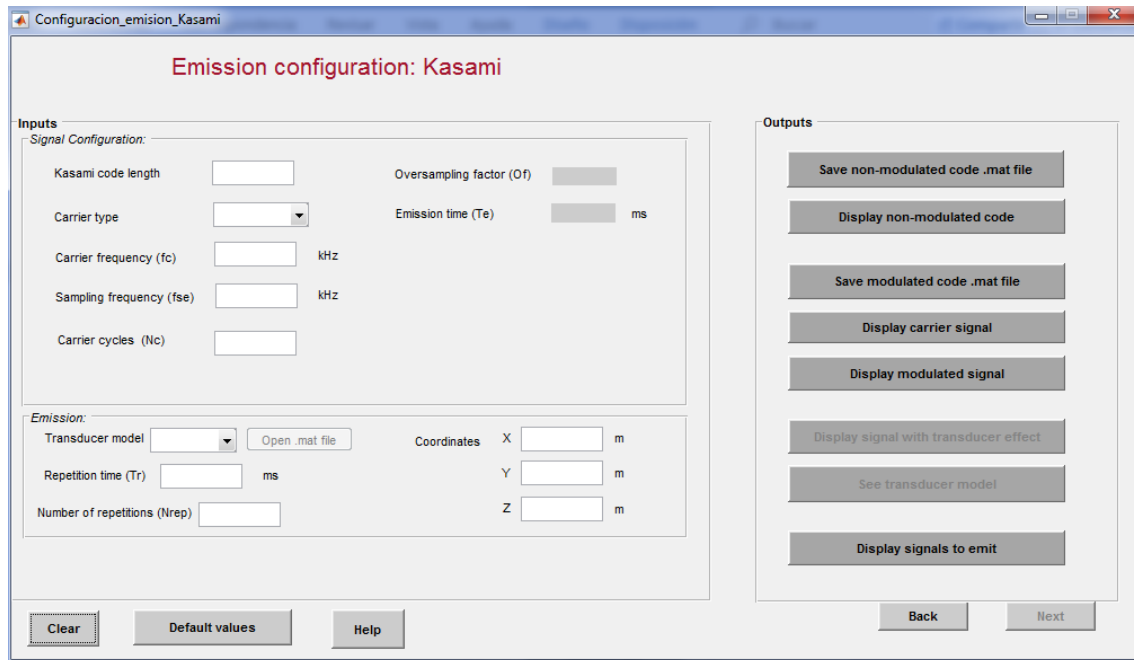


Fig. 4. Configuración Emisión.

El botón 'Default values' introduce unos datos determinados para que el usuario pueda orientarse, 'Clear' elimina cualquier valor que haya en los recuadros y 'Help' abre el archivo correspondiente a dicha ventana en el Manual de Usuario adjuntado en esta memoria. 'Back' redirige al programa a la ventana del esquema general y 'Next' continua a la configuración de los efectos en la señal a emitir.

Para la configuración de propiedades de los códigos, se divide esta ventana en varias secciones:

- Configuración de los parámetros para la señal de emitida.
 - La longitud $L=2^N-1$ viene restringida por N que debe ser un número par. De lo contrario, se manda un mensaje de aviso al usuario para que se modifique el parámetro.
 - Se selecciona la forma de onda de la señal portadora (sinusoidal o cuadrada).
 - Frecuencia de la señal portadora f_c .
 - Frecuencia de muestreo f_{se} de la señal emitida.
 - Número de ciclos de la señal portadora N_c .
 - Se muestra el factor de sobremuestreo Of que se obtiene a través de $Of=f_c/f_{se}$ y siempre va a ser un número entero y la duración de la emisión de un código T_e que es el resultado de $T_e=L \cdot N_c / f_c$.

- Configuración de la emisión.
 - Modelo de transductor utilizado.
 - Numero de repeticiones de un código N_{rep} .
 - Tiempo de cada repetición Tr .
 - Coordenadas donde se encuentra el emisor X, Y, Z
- Salidas
 - Los botones *Save non-modulated code .mat file* y *Save modulated code .mat* file permiten almacenar en la carpeta que esté situado el programa las señales en banda base y/o moduladas que se han generado para su posible aplicación en pruebas reales.
 - Visualiza la señal portadora.
 - Visualiza la señal modulada y sin modular
 - Visualiza el modelo del transductor.
 - Visualiza la señal emitida con el efecto del transductor

A continuación, se presenta un ejemplo de la aplicación para los siguientes valores: $L=255$, $Carrier\ type= sine$, $fc=200\ kHz$, $fse=2000\ kHz$, $Nc=1$, $transducer\ model = 200LM450$, $Tr=10$, $Nrep=4$, $X=0$, $Y=0$, $Z=0$.

En la Fig. 5 se muestran los datos introducidos y los resultados.

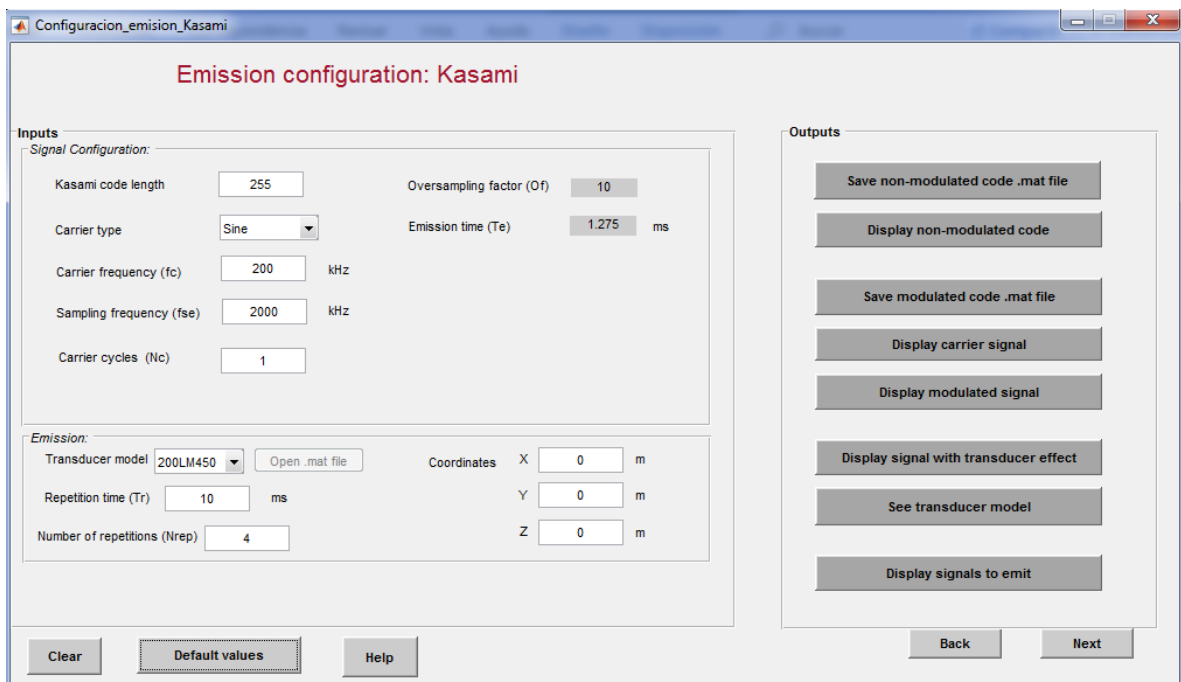


Fig. 5. Ejemplo de valores en la aplicación.

En la Fig. 6 se ofrece un ejemplo de las secuencias Kasami generadas para una longitud $L=255$.

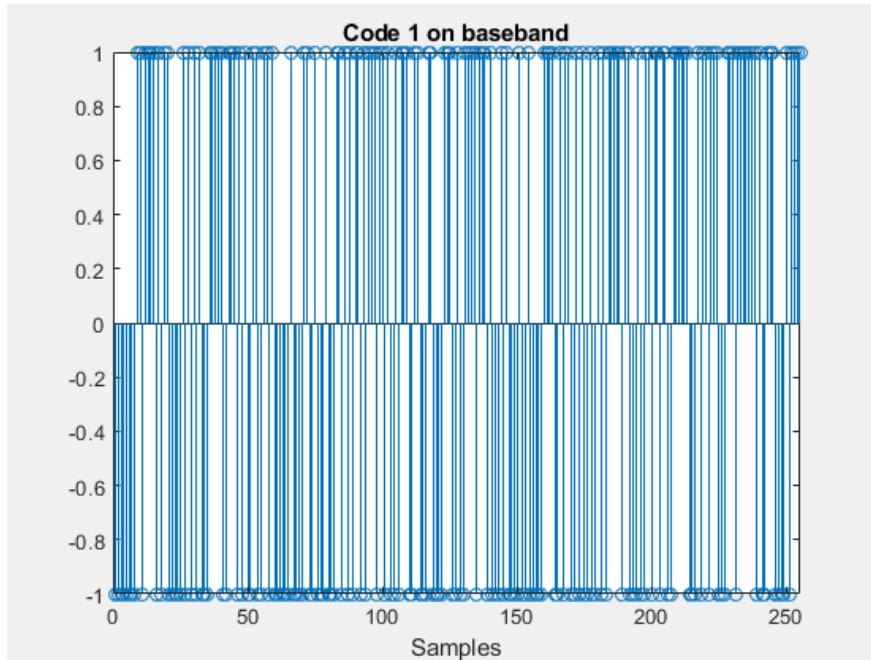


Fig. 6. Secuencias Kasami 255 bits.

En la Fig. 7 se ofrece un ejemplo de la señal modulada considerando un ciclo de una portadora a frecuencia 200 kHz, y un factor de sobremuestreo de 10.

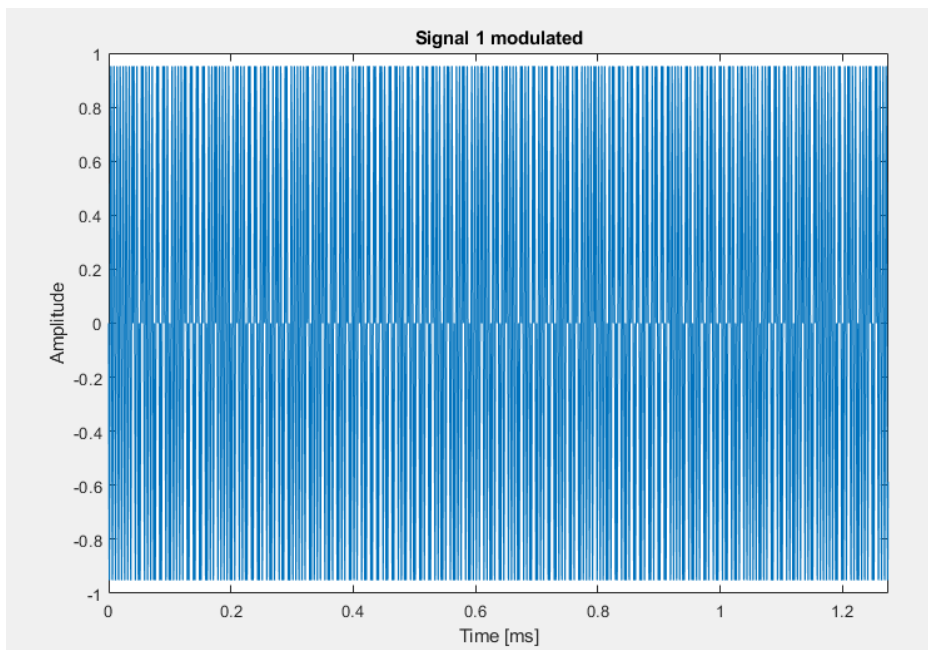


Fig. 7. Señal modulada: $N_c=4$ y $f_{se}=200\text{Khz}$.

En la Fig. 8 se muestra una ampliación zoom de la señal modulada de la Fig.7.

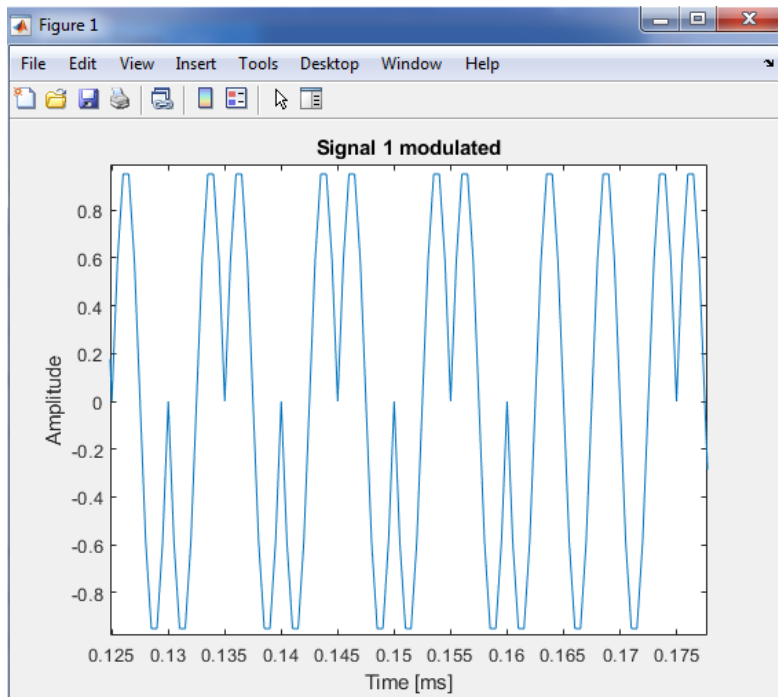


Fig. 8. Señal modulada ampliada.

En la Fig. 9 se ofrece un ejemplo de la señal portadora considerando una señal portadora sinusoidal de un ciclo de trabajo y una frecuencia de 200 kHz.

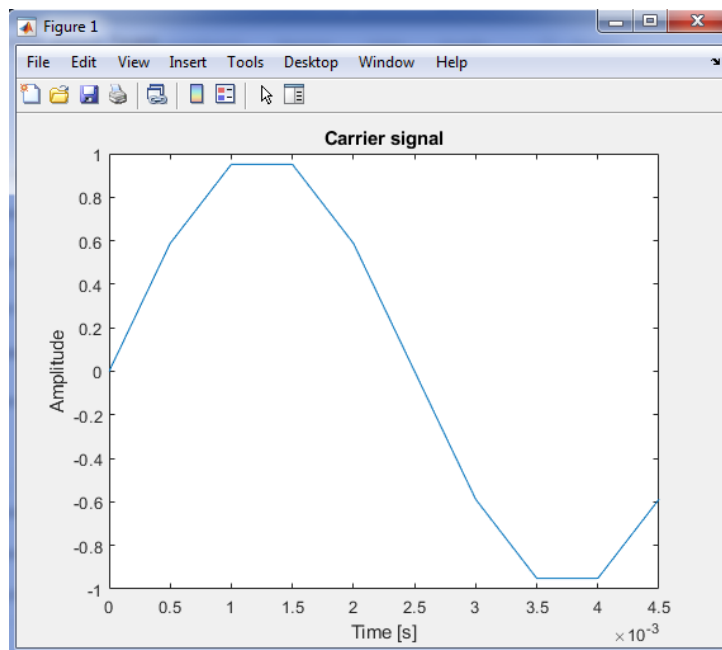


Fig. 9. Señal portadora.

En la ventana de resultados se observará como quedan los picos de correlación según aumenta el número de ciclos de la portadora.

La aplicación permite añadir el modelo transductor. En el ejemplo se ha añadido el modelo 200LM450 [8] por defecto que presenta una frecuencia central de 200 kHz y un ancho de banda 25 kHz.

El modelo de transductor 200LM450 presenta estas series de características que se muestran en la Fig. 10:

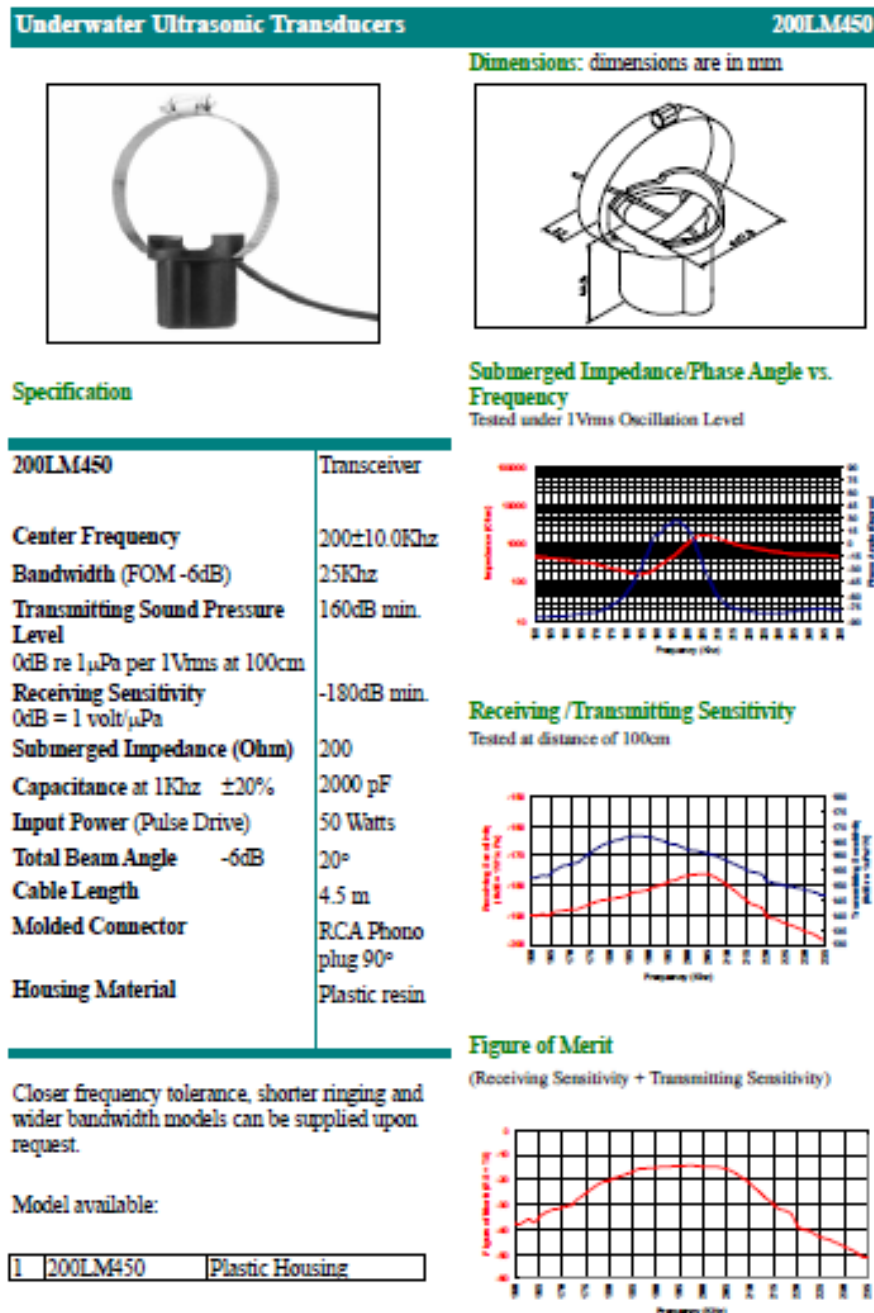


Fig. 10. Características del transductor usado [8].

En la Fig. 11 se ofrece un ejemplo de la respuesta en frecuencia del transductor 200LM450 para una $f_{se}=2000$ kHz.

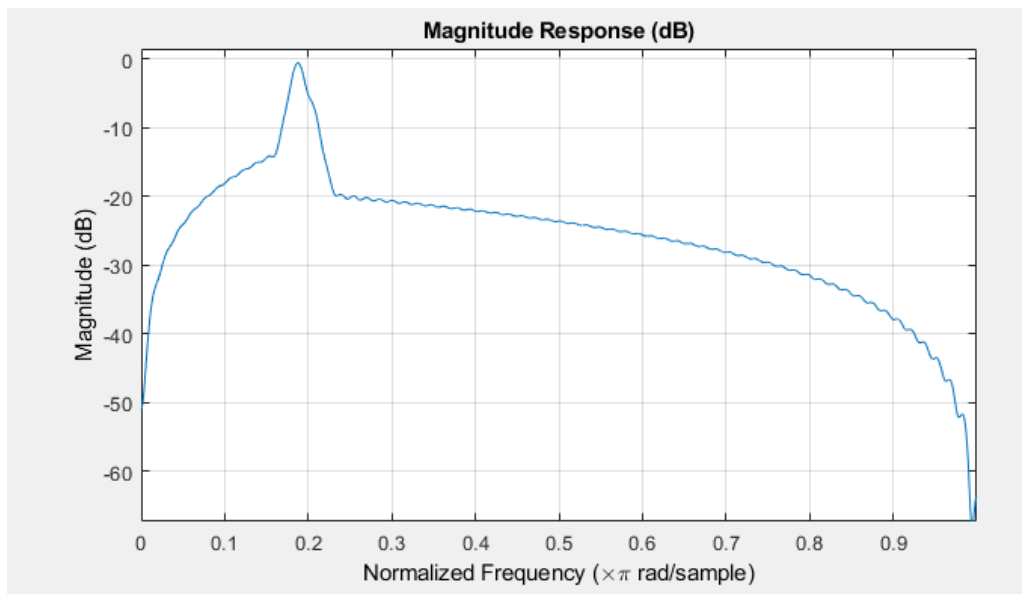


Fig. 11. Modelo de transductor 200LM450 [8].

La aplicación también permite al usuario incluir su propio modelo de transductor seleccionando la opción *open .mat file*. En la Fig. 12 se muestra un ejemplo de otro modelo de transductor creado por el usuario en el que se ha elegido una frecuencia central de 32 kHz y un ancho de banda de 2 kHz.

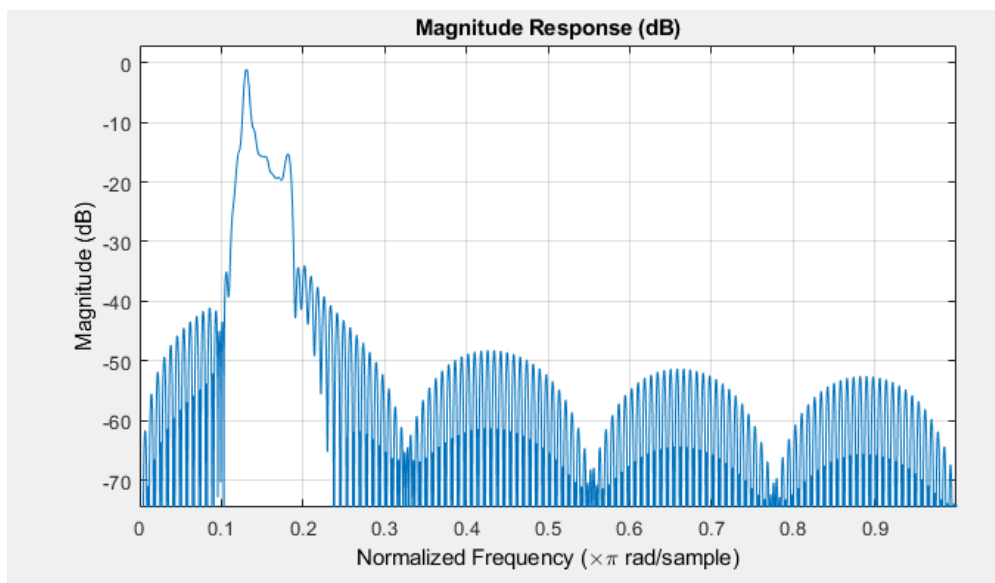


Fig. 12. Modelo de transductor personalizado por el usuario.

El botón “Display signal with transducer effect” visualiza la señal emitida con el efecto del transductor, según se muestra en la Fig. 13.

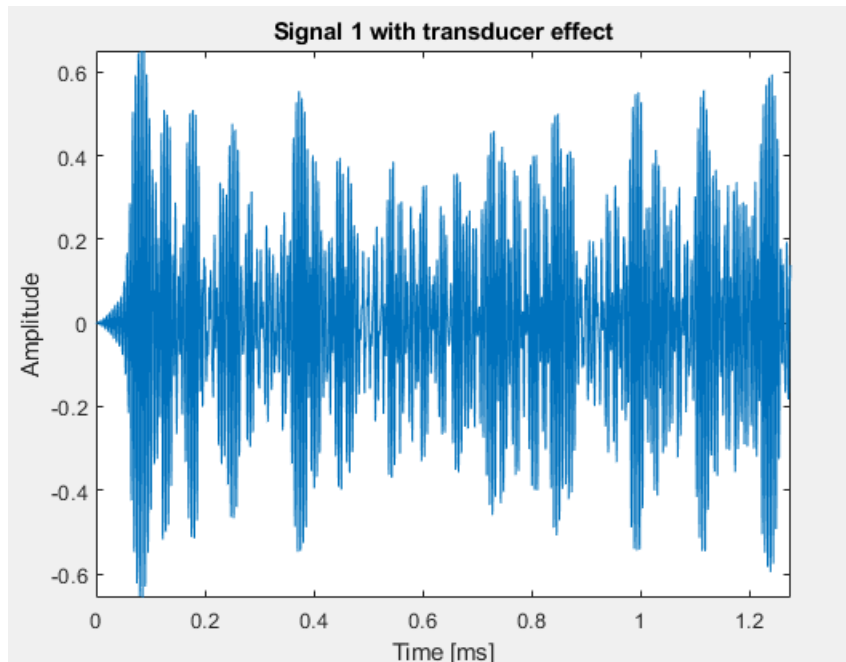


Fig. 13. Señal con el efecto del transductor 200LM450 [8].

Esta herramienta permite al usuario configurar la transmisión, haciéndola periódica o espaciada.

El tiempo de repetición (T_r) entre una emisión y otra debe ser superior o igual al tiempo de emisión (T_e). Cuando T_r es superior a T_e , las repeticiones se separan con una cadena de ceros (T_{gap} en la Fig. 14). Cuando T_r es igual a T_e , las repeticiones están consecutivas sin espaciado (véase la Fig. 15).

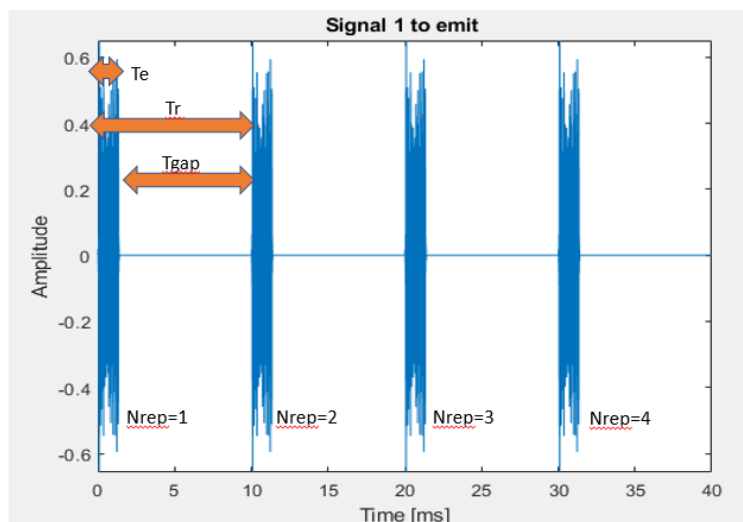


Fig. 14. Señal emitida espaciada.

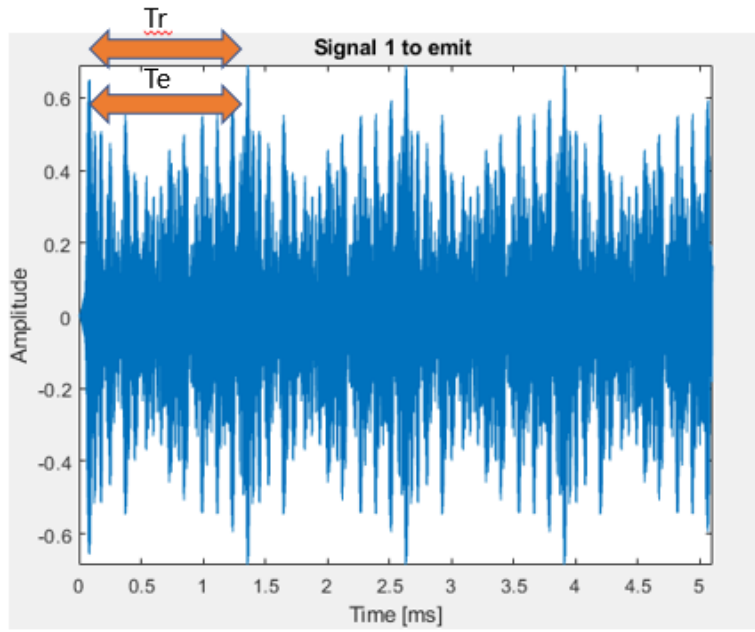


Fig. 15. Señal emitida periódica.

3.2. Configuración de la recepción

En la Fig. 16. se muestra la pantalla de recepción donde se podrán configurar las coordenadas y el efecto transductor del receptor.

La herramienta permite configurar estos parámetros de entrada:

- Modelo de transductor utilizado.
- Frecuencia muestreo del receptor (f_{sr}).
- Coordenadas donde se encuentra el receptor X, Y, Z.

The screenshot shows a software window titled "Configuracion_emision_Kasami" with a sub-window titled "Reception configuration". The sub-window has a section labeled "Inputs" containing a "Reception:" sub-section. This section includes three input fields for "Receiver coordinates" labeled X, Y, and Z, each followed by a unit "m". Below these is a "Receiver Model" dropdown menu and an "Open .mat file" button. Further down is a "Sampling frequency reception (fsr)" input field with a unit "kHz". A "Display receiver model" button is located below the fsr field. At the bottom of the sub-window are three buttons: "Clear", "Default Values", and "Help". At the bottom of the main window are two buttons: "Back" and "Next".

Fig. 16. Configuración de la recepción.

En la Fig. 17 se presenta un ejemplo de la aplicación para los siguientes valores:
 $f_{sr}=1000$ kHz, $transducer\ model = 200LM450$, $X=400$, $Y=5$, $Z=0$.

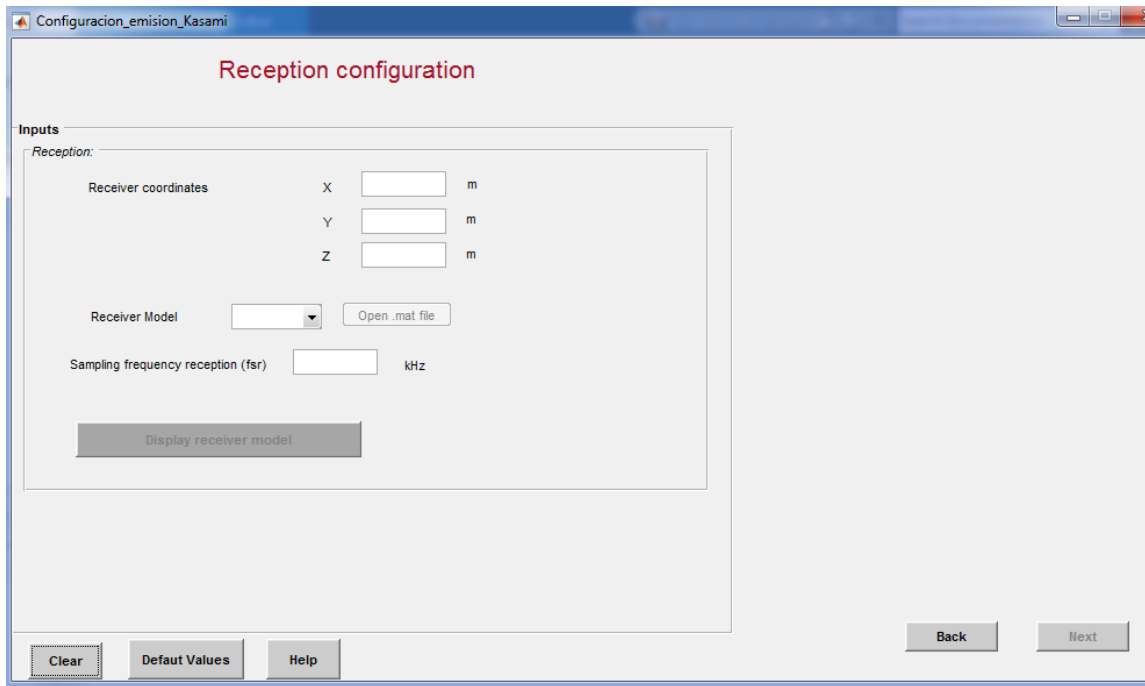


Fig. 17. Configuración de la recepción (valores por defecto).

También se podrá visualizar el modelo del receptor 200LM450 [8] como se observa en la Fig. 18.

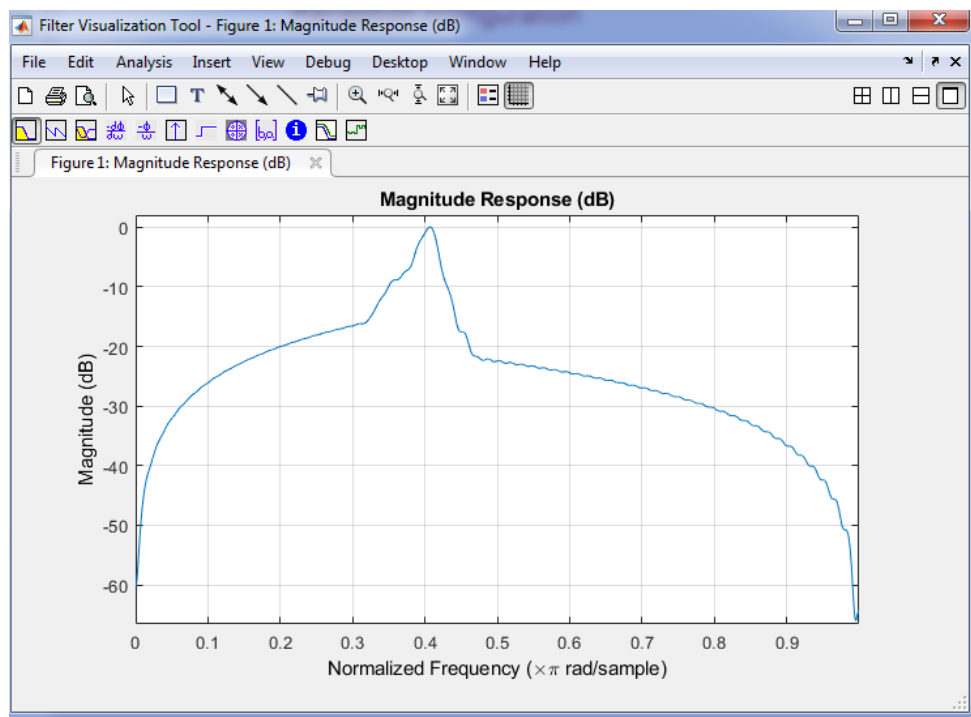


Fig. 18. Transductor recepción 200LM450.

Al igual que en la ventana de emisión, el usuario puede introducir un modelo transductor personalizado.

3.3. Configuración de la escena

En la Fig. 19 se muestra la pantalla de configuración del entorno.

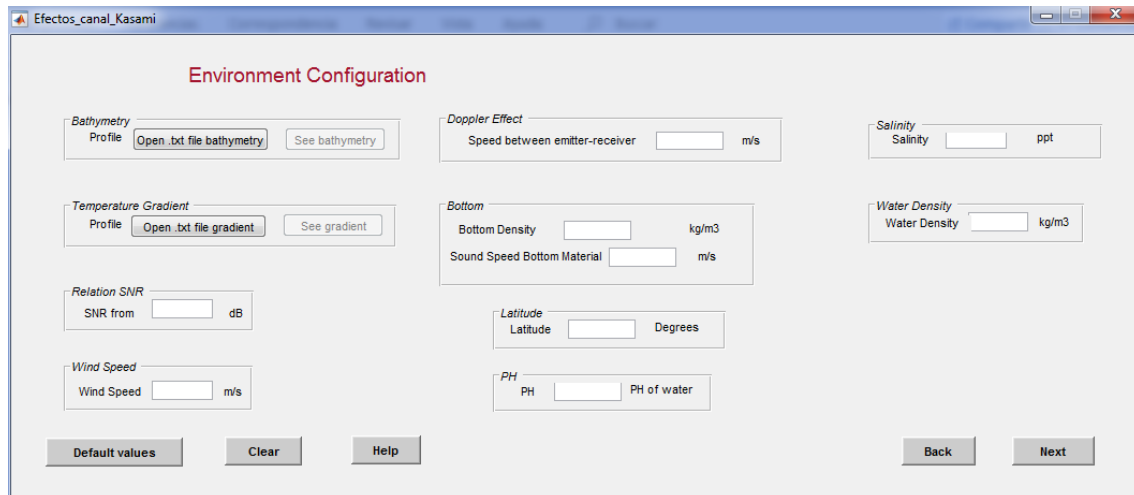


Fig. 19. Configuración entorno.

3.3.1. Batimetría

La batimetría es la medición de las profundidades marinas para determinar la topografía del fondo del mar. Su medición implica la obtención de datos con los valores de la profundidad y la posición de cada uno de los puntos muestreado.

El usuario podrá importar un archivo .txt en el cual tiene que configurar dos columnas, la columna de la izquierda indica el rango de distancia y la de la derecha es la profundidad. Véase la Fig. 20 a modo de ejemplo.

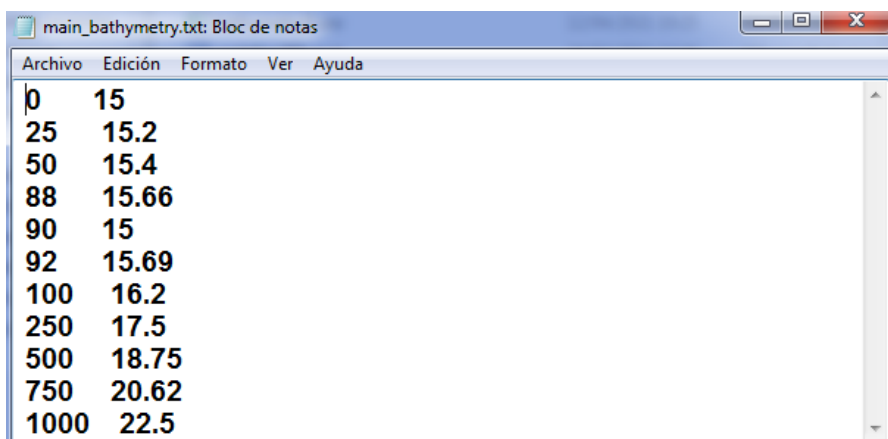


Fig. 20. Configuración Batimetría.

También el usuario podrá visualizarla en la interfaz, como se muestra en la Fig. 21.
En esta figura también se muestra con unos triángulos rojos la posición del emisor y del receptor.

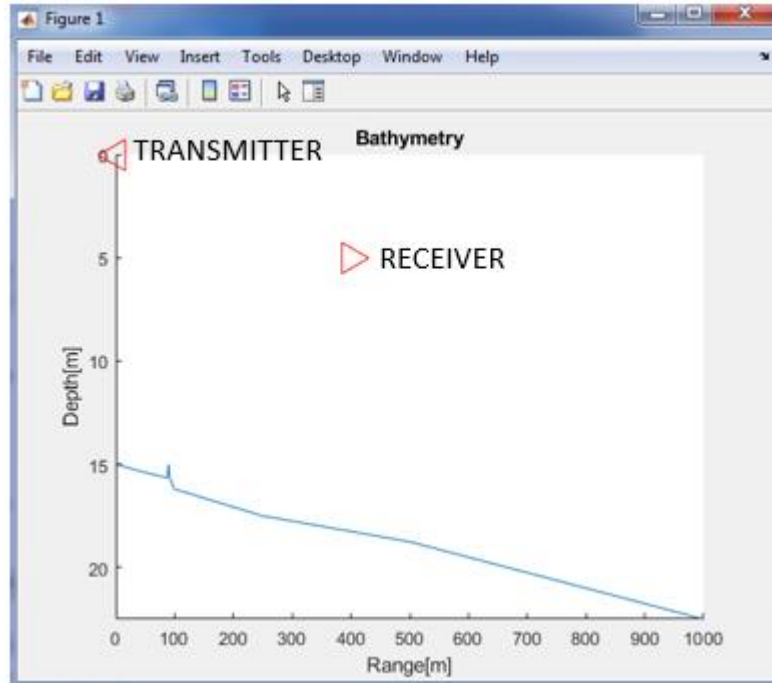


Fig. 21. Perfil de batimetría.

3.3.2. Gradiente de temperatura

El gradiente de temperatura es la variación de la temperatura respecto a la profundidad.

El usuario podrá importar un archivo .txt en el cual tiene que configurar dos columnas, la columna de la izquierda indica la profundidad y la de la derecha es la temperatura. Véase el ejemplo de la Fig. 22.

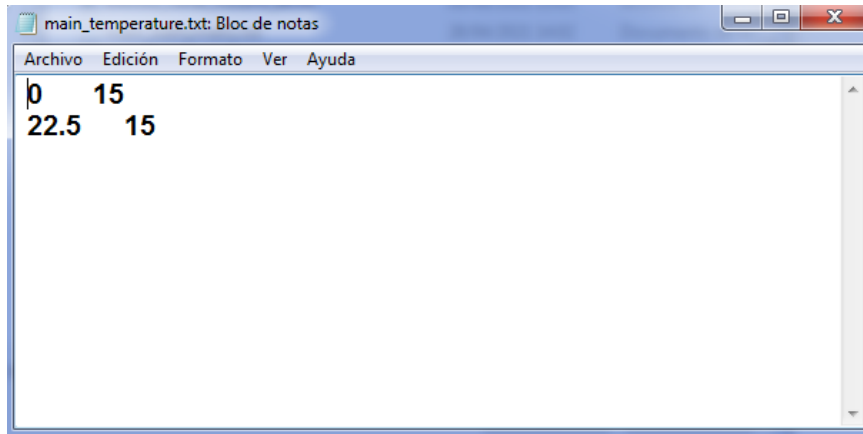


Fig. 22. Gradiente de temperatura.

El gradiente de temperatura se puede visualizar de forma gráfica en la interfaz, como se muestra en la Fig. 23.

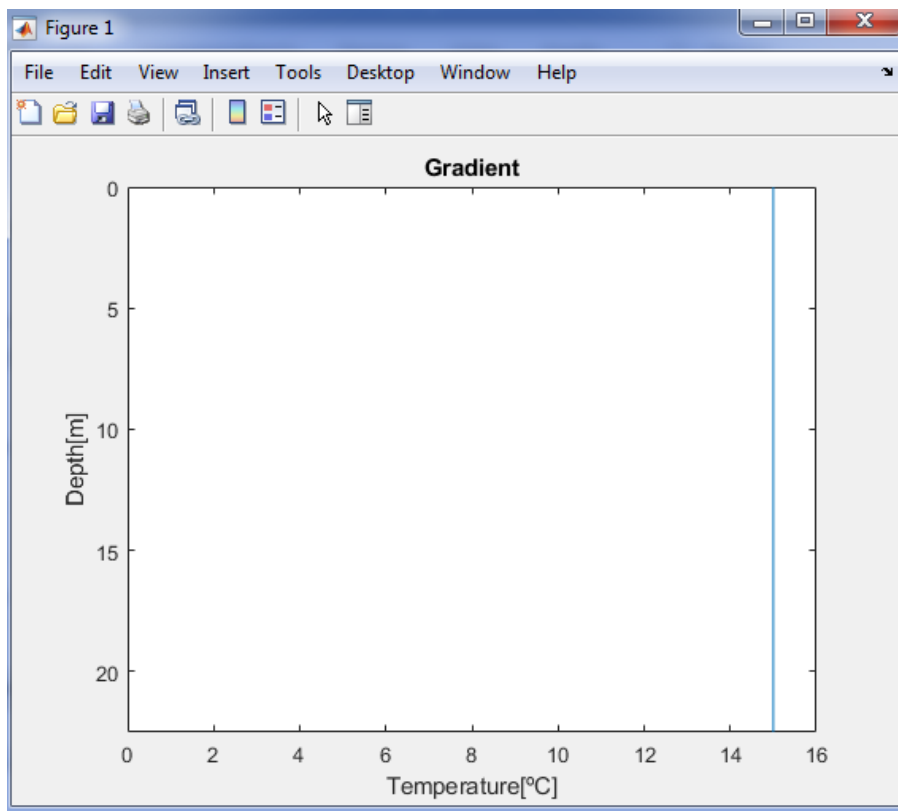


Fig. 23. Perfil gradiente de temperatura.

3.3.3. Relación SNR

La relación SNR (*Signal to Noise Ratio*) se define como la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe. Este margen es medido en decibelios.

3.3.4. Efecto Doppler

El efecto Doppler es otro de los mecanismos adicionales a considerar. Dada la naturaleza del medio subacuático, el emisor o el receptor (o ambos) pueden estar en movimiento al realizar las medidas. En ese caso, se produce el efecto Doppler, consistente en un desplazamiento de la frecuencia. El efecto Doppler se modela con la siguiente ecuación:

$$f_s' = f_s \left[1 - \frac{\vec{v}_r}{c} \right] \quad (11)$$

Donde f_s' es la nueva frecuencia de muestreo, f_s es la frecuencia de muestreo configurada, \vec{v}_r es la velocidad relativa entre emisor y receptor y c es la velocidad del sonido.

Otros parámetros que puede configurar el usuario son:

- Velocidad del viento.
- La densidad y la velocidad del sonido en el fondo marino.
- Latitud.
- PH del agua.
- Salinidad.

3.3.5. Efecto Multicamino

El efecto multicamino es causado por la propagación de las señales por diferentes caminos, que hace que obtengamos una señal en la recepción formada por la interacción de las distintas señales que han viajado por caminos diferentes.

A continuación, en la Fig. 24 se muestran los datos introducidos para un caso concreto: $SNR=8$, $Wind\ Speed=8.33\ m/s$, $V_r=5\ m/s$, $Bottom\ density=1941\ kg/m^3$, $Sound\ Speed\ Bottom\ material=1749\ m/s$, $Latitude = -45.9866\ Degrees$, $PH=7$, $Salinity=33.24$, $Water\ density=1024$.

The screenshot shows a software window titled "Efectos_canal_Kasami" with a sub-header "Environment Configuration". The interface contains several input fields and buttons:

- Bathymetry:** Profile (Open .txt file bathymetry), See bathymetry
- Temperature Gradient:** Profile (Open .txt file gradient), See gradient
- Relation SNR:** SNR from 8 dB
- Wind Speed:** Wind Speed 8.33 m/s
- Doppler Effect:** Speed between emitter-receiver 5 m/s
- Bottom:** Bottom Density 1941 kg/m³, Sound Speed Bottom Material 1749 m/s
- Salinity:** Salinity 33.24 ppt
- Water Density:** Water Density 1024 kg/m³
- Latitude:** Latitude -45.9866 Degrees
- PH:** PH 7 PH of water

At the bottom, there are buttons for "Default values", "Clear", "Help", "Back", and "Next".

Fig. 24. Ejemplo de configuración del entorno.

3.4. Configuración del trazado de rayos

En la siguiente ventana de la herramienta se configura el modelo de propagación. La reflexión y refracción de las ondas acústicas bajo el agua se ha modelado en la herramienta de simulación utilizando la aproximación del trazado de rayos.

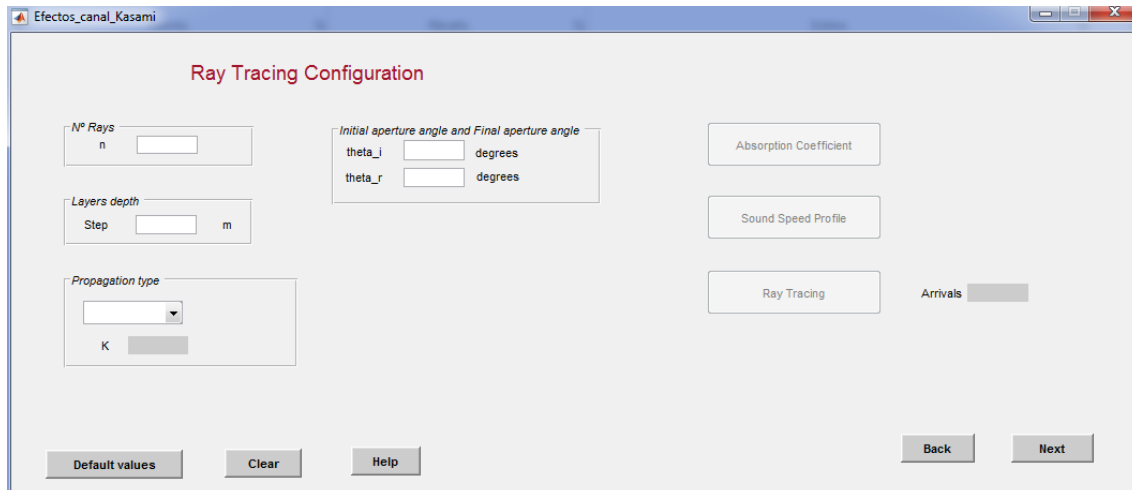


Fig. 25. Configuración del trazado de rayos.

Los parámetros requeridos para realizar el trazado de rayos son el número de rayos, el *step*, que es la distancia entre capas en la que va a ir avanzando la simulación, el coeficiente de divergencia geométrico, que puede seleccionarse entre esférico o cilíndrico y los ángulos de apertura. Si el coeficiente de divergencia es cilíndrico su valor es 10 y si es esférico 20.

A continuación, en la Fig. 26 se muestran los datos introducidos para un caso concreto: $n=501$, $Step=0.1$, $Propagation\ type=Spherical$, $Theta_i=10\ degrees$, $Theta_r=-10\ degrees$.

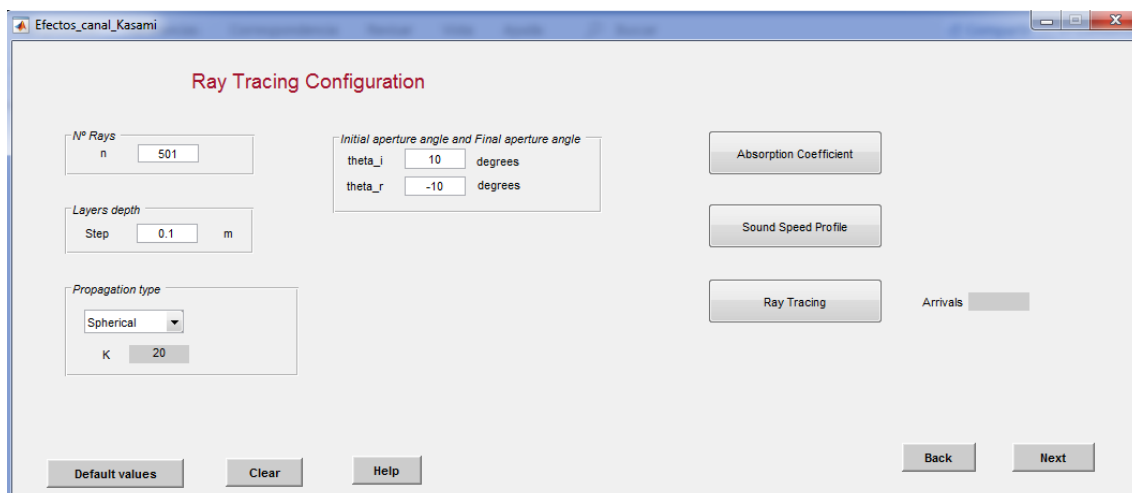


Fig. 26. Ejemplo configuración trazado de rayos.

En esta ventana el usuario puede visualizar el coeficiente de absorción (Fig. 27), que ha sido calculado con los parámetros que se han introducido en la ventana de efectos, que depende de la profundidad, temperatura, salinidad, PH y frecuencia de la portadora; también se podrá visualizar el perfil de la velocidad del sonido (Fig. 28) calculado a través de la ecuación de Chen y Millero (10). Por último, como se muestra en la Fig. 29 el usuario puede visualizar el trazado de rayos.

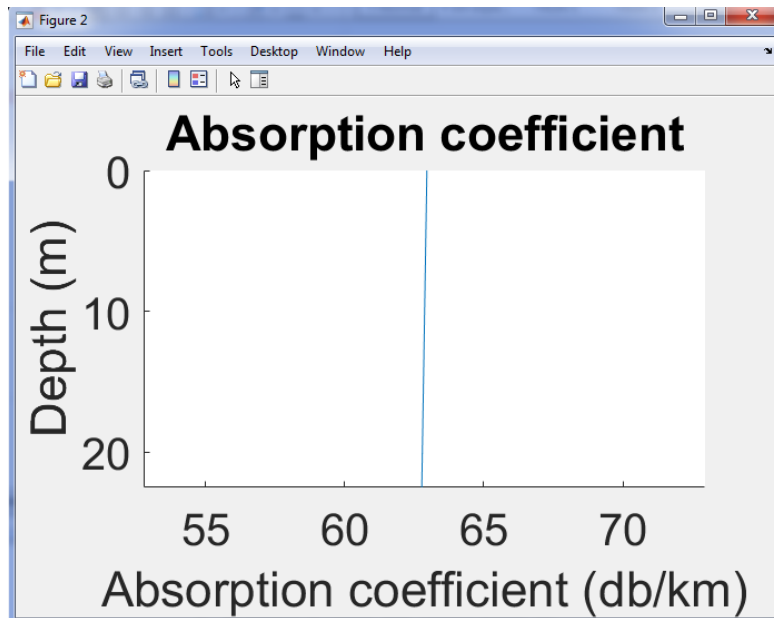


Fig. 27. Coeficiente de absorción.

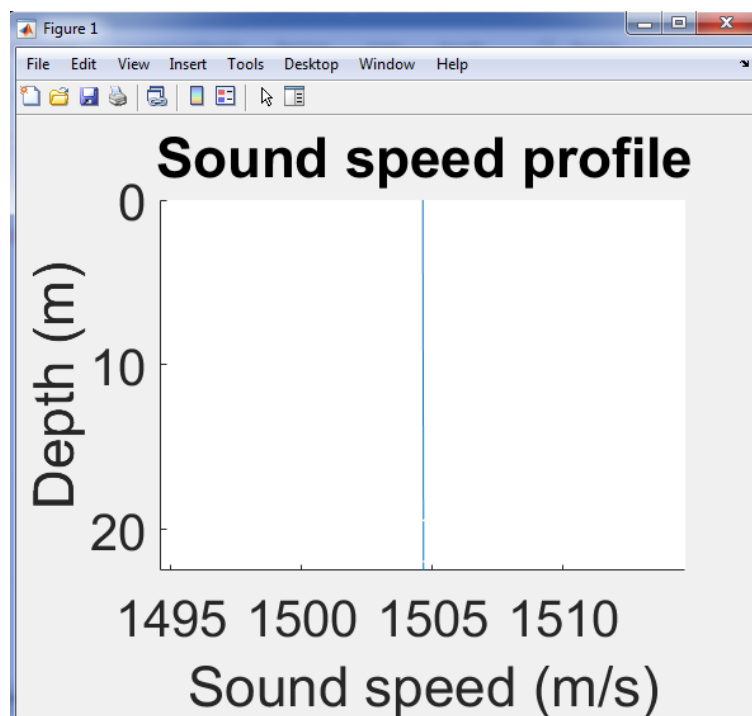


Fig. 28. Perfil de la velocidad del sonido.

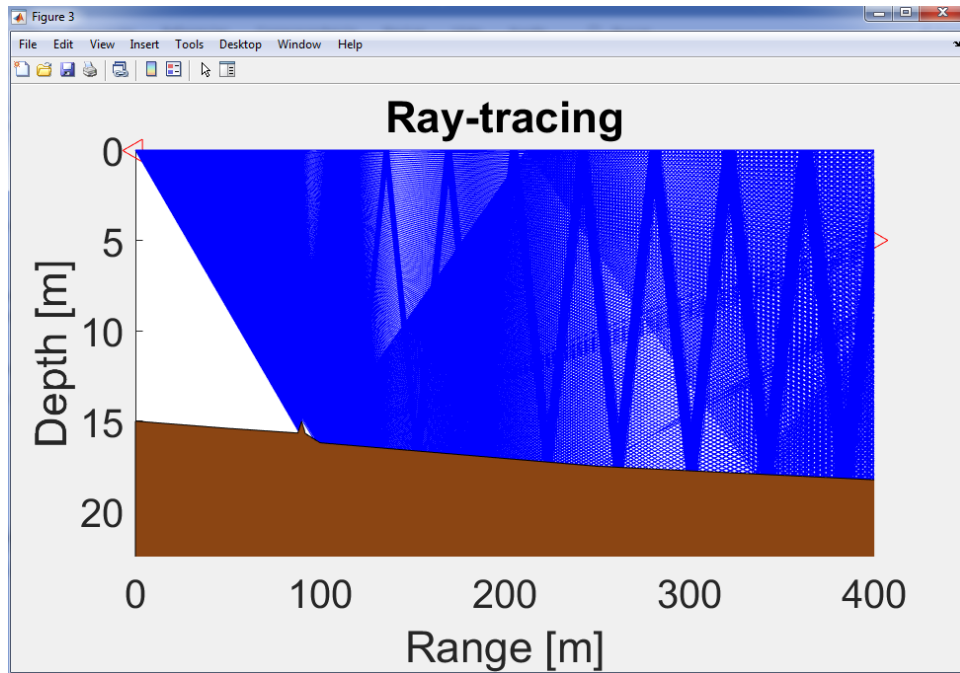


Fig. 29. Trazado de rayos.

En la Fig. 29 se lanzaron 501 rayos con un ángulo de apertura de 20° , se consideró un *step* de 0.1 m y un perfil de temperatura constante, por lo que los rayos siguen una línea recta. Por último, en esta ventana se indica los rayos que ha incidido en el receptor (véase la Fig. 30).

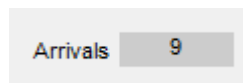


Fig. 30. Llegadas al receptor.

3.5. Resultados

3.5.1. Procesamiento mediante correlación

En la ventana anterior se reconstruye la señal recibida función del número de llegadas que proporciona el trazado de rayos, sus pérdidas y sus tiempos de propagación. A continuación, en la ventana de resultados se calcula la correlación de la señal recibida el código original emitido. Las señales de correlación pueden contener varios picos provocados por los distintos caminos de propagación de la señal (multicamino). También se muestra cada una de las repeticiones por separado y su *FFT*. A continuación, en la Fig. 31 se muestra la pantalla de resultados de la aplicación.

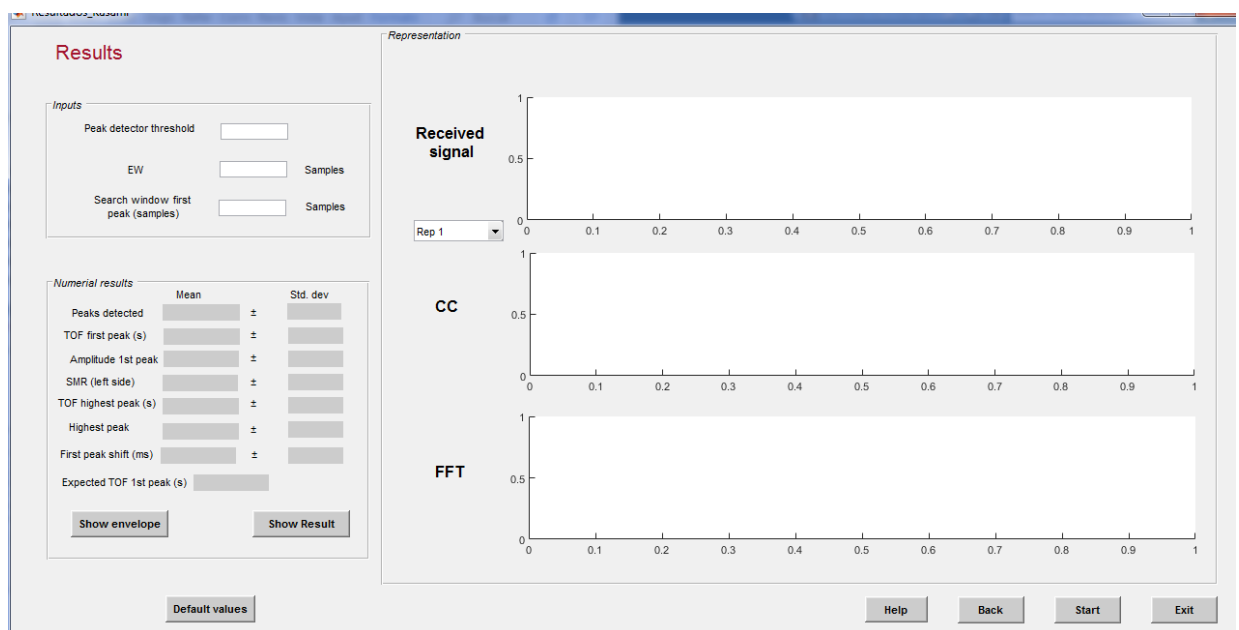


Fig. 31. Ventana de resultados

En la Fig. 32 se muestra un ejemplo donde se visualiza la señal recibida, la correlación y la FFT con los parámetros que se han mencionado en las ventanas anteriores.

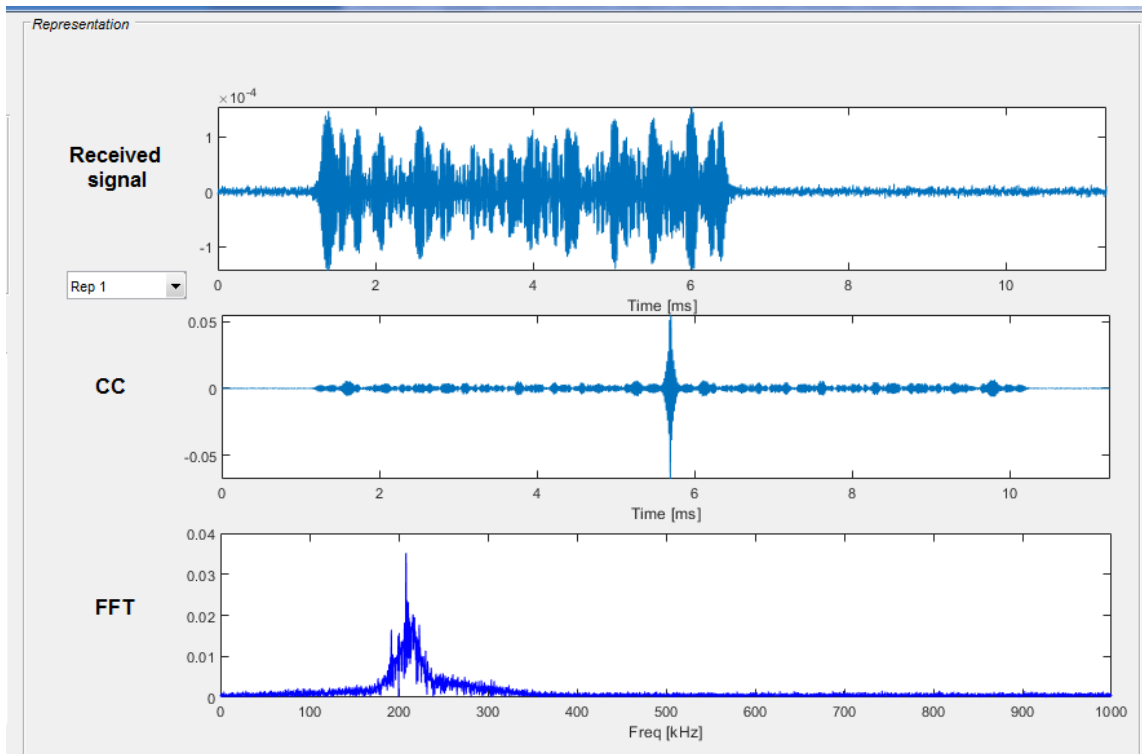


Fig. 32. Visualización de la señal recibida, correlación y FFT.

3.5.2. Detección de picos

En cada una de las señales se busca el primer pico (primera llegada) y esta búsqueda se realiza calculando el pico de mayor energía y se establece una ventana de búsqueda configurable a la izquierda de dicho pico. Si el algoritmo detecta un pico que supere un cierto umbral, se designará ese pico como primera llegada, mientras que si no se encuentra un pico que supere las especificaciones, se asume que la primera llegada coincide con el pico de mayor energía.

Los parámetros de entrada para el cálculo de picos son:

- *Peak detector threshold*: Es el umbral que debe superar la señal de correlación para considerarse pico.
- *EW*: Es la cantidad de muestras hacer cero, para ir borrando cada pico detectado y buscar el siguiente pico.
- *Search window first peak (samples)*: Es la ventana de búsqueda de picos de mayor energía.

En la Fig.33 se muestra un ejemplo de los valores de estos parámetros.

Inputs

Peak detector threshold

EW Samples

Search window first peak (samples) Samples

Fig. 33. Parámetros de entrada para el cálculo de picos.

3.5.3. Parámetros de calidad

Los parámetros de calidad que ofrece la herramienta son los siguientes:

- *Peaks detected*: Es la cantidad de picos detectados en la señal de correlación.
- *TOF first peak (Time of flight first peak)*: Es el tiempo de vuelo del primer pico detectado en la señal de correlación.
- *Amplitude 1st peak*: La amplitud del primer pico de la señal de correlación.
- *SMR*: Es la relación entre la amplitud del máximo lóbulo lateral a la izquierda del primer pico, dividido por la amplitud del primer pico de la correlación.
- *TOF highest peak*: Tiempo de vuelo del pico de mayor amplitud de la correlación.
- *Highest peak*: Amplitud del pico de mayor energía.
- *Expected TOF 1st Peak*: Instante de tiempo donde debería estar el primer pico.
- *First peak shift*: Es la diferencia entre el instante donde debería estar el primer pico, y el detectado.

En la Fig. 34 se puede observar un ejemplo con los resultados obtenidos.

Numerical results

	Mean		Std. dev
Peaks detected	1	±	0
TOF first peak (s)	3.2105	±	0.0005773
Amplitude 1st peak	0.0486251	±	0.0173456
SMR (left side)	0.430244	±	±0.010586
TOF highest peak (s)	3.2105	±	0.0005773
Highest peak	0.0486251	±	0.0173456
First peak shift (ms)	2.94464	±	0.0005773
Expected TOF 1st peak (s)	0.265865		

Show envelope Show Result

Fig. 34. Resultados numéricos

3.6. Casos de estudio.

A continuación, se van a realizar varios casos de estudio con diferentes parámetros y se hará un análisis de cómo afectará en la ventana de resultados.

Los parámetros fijos que serán comunes en todos los casos son:

- *Nrep=50.*
- *Modelo transductor emisor: 200LM450.*
- *Modelo transductor receptor: 200LM450.*
- *Portadora: sinusoidal.*
- *$f_c=200$ kHz.*
- *$f_{se}=2000$ kHz.*
- *$f_{sr}=1000$ kHz*
- *$T_r=100$ ms.*
- *N° rayos (n)=100.*
- *Step=0.1 m.*
- *Propagation type=Spherical (K=20)*
- *Theta_i=-10.*
- *Theta_r=10.*
- *Bathymetry: Bathymetry_1.txt.*
- *Gradient: Gradient_1.txt.*
- *Wind speed=8.33 m/s.*
- *Doppler effect=5 m/s.*
- *Bottom density=1941 Kg/m³.*
- *Sound speed bottom material=1749 m/s.*
- *Latitude=-45.9866 Degrees.*
- *PH=7.*
- *Salinity=33.24 ppt.*
- *Water density=1024 Kg/m³.*

La Tabla 2 recoge las distintas pruebas realizadas para comprobar el efecto del aumento de longitud o número de ciclos de portadora sobre el SMR. Asimismo, se han realizado pruebas con distintos niveles de relación señal-ruido.

Prueba	L	nc	SNR	Xe,Ye,Ze	Xr,Yr,Zr	Te	SMR (avg)
1.1	63	1	10	0,0,0	100,5,0	0.315ms	0.271669
1.2	63	2	10	0,0,0	100,5,0	0.63ms	0.253715
1.3	63	5	10	0,0,0	100,5,0	1.57ms	0.23457
2.1	63	3	10	0,0,0	100,5,0	0.945ms	0.239094
2.2	255	3	10	0,0,0	100,5,0	3.825ms	0.209873
2.3	1023	3	10	0,0,0	100,5,0	15.345ms	0.209065
3.1	63	3	-10	0,0,0	100,5,0	0.945ms	0.274397
3.2	255	3	-10	0,0,0	100,5,0	3.825ms	0.197378
3.3	1023	3	-10	0,0,0	100,5,0	15.345ms	0.178543

Tabla 2. Casos de estudio. Caso 1.

En las pruebas 1.1, 1.2 y 1.3 se observa que el SMR mejora muy poco con el número de ciclos de la portadora (nc). El aumento de nc influye principalmente en el ancho de banda de la FFT de la señal recibida haciéndolo más estrecho.

En las pruebas 2.1, 2.2 y 2.3 se observa que el SMR mejora a medida que aumentamos la longitud del código (L), esto es principalmente porque a medida que aumentamos la longitud los lóbulos laterales de la correlación son menores.

En las pruebas 3.1, 3.2 y 3.3 se observa que, aunque se introduzca ruido a la señal si se aumenta la longitud (L) el SMR mejora.

La Tabla 3 recoge el segundo caso de estudio que se ha enfocado a analizar el SMR, el pico de mayor amplitud y el número de llegadas al receptor.

Prueba	L	PH	Xe,Ye,Ze	Xr,Yr,Zr	Doppler effect	SMR	Highest Peak	Arrivals receiver
1.1	63	7	0,0,0	100,5,0	5	0.2671	0.0219	4
1.2	63	9	0,0,0	100,5,0	5	0.2920	0.02526	8
1.3	63	11	0,0,0	100,5,0	5	0.3195	0.001857	8
2.1	255	7	0,0,0	100,5,0	1	0.2167	0.092	4
2.2	255	7	0,0,0	100,5,0	5	0.2532	0.07311	8
2.3	255	7	0,0,0	100,5,0	7	0.2739	0.031	8
3.1	63	7	0,0,0	100,5,0	10	0.3395	0.0219	4
3.2	255	7	0,0,0	100,5,0	10	0.2581	0.089	8
3.3	1023	7	0,0,0	100,5,0	10	0.1972	0.3822	8

Tabla 3. Casos de estudio. Caso 2.

En las pruebas 1.1, 1.2 y 1.3 se observa que el SMR empeora si aumenta el PH del agua. Esto es debido a que afecta directamente a la velocidad de propagación y a la atenuación de la señal.

En las pruebas 2.1, 2.2 y 2.3 se observa que el SMR empeora si aumentamos el efecto Doppler

En las pruebas 3.1, 3.2 y 3.3 se observa que el SMR mejora a medida que aumentamos la longitud del código (L), pero a su vez es peor que los resultados de la tabla 2 ya que el efecto Doppler es mayor, por eso los resultados son algo peores que en la tabla anterior.

En la Fig.35 se observa el camino que siguen los rayos en la prueba 1.1. Apenas hay rebotes

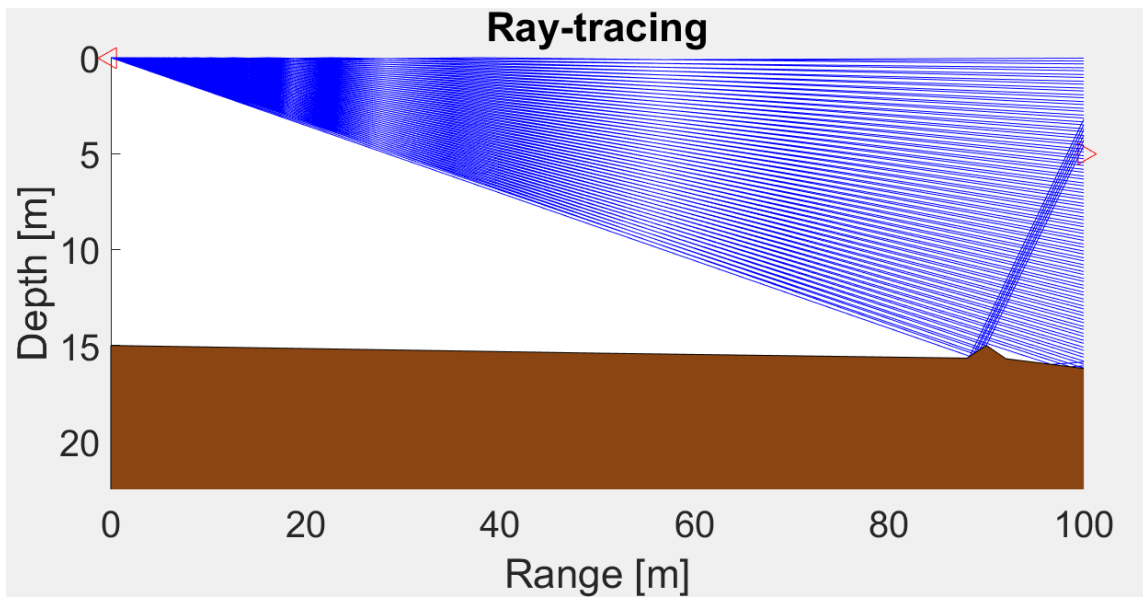


Fig. 35. Prueba 1.1 Trazado de Rayos

En la Fig.36 se observa el camino que siguen los rayos en la prueba 1.2.

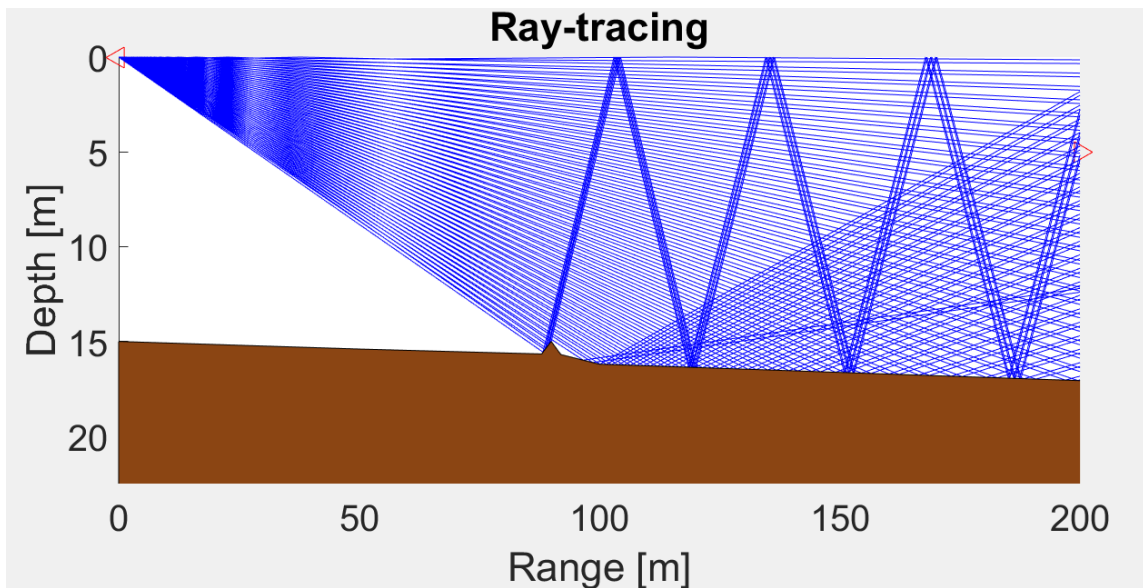


Fig. 36. Prueba 1.2. Trazado de rayos

En la Fig.37 se observa el camino que siguen los rayos en la prueba 1.3. Se producen muchos rebotes y provoca que la señal de correlación se replique la señal transmitida con mayor atenuación (véase Fig.38).

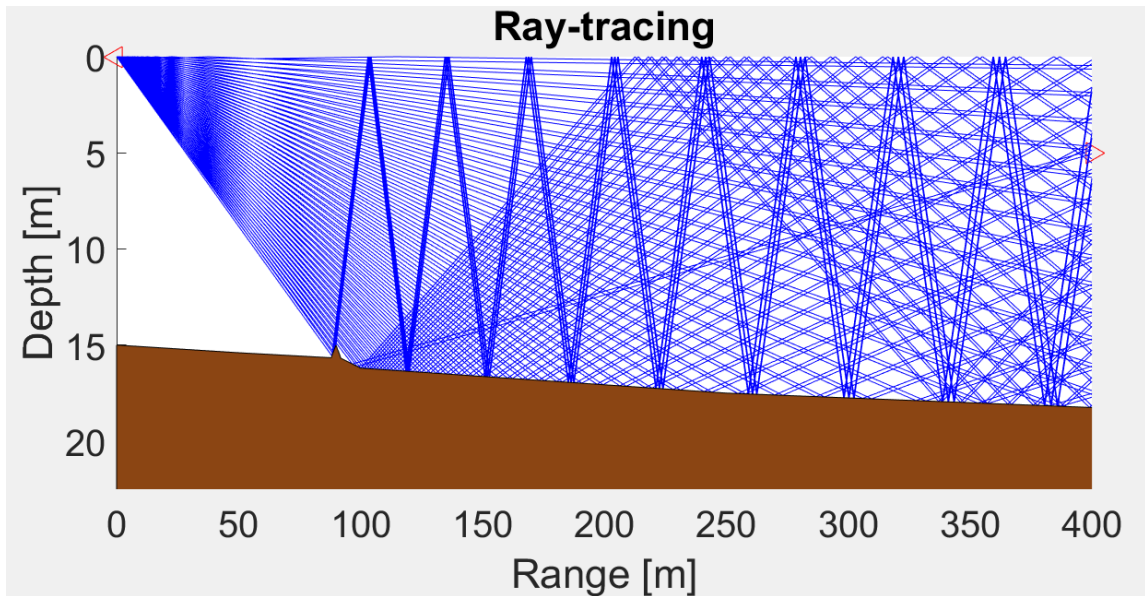


Fig. 37. Prueba 1.3. Trazado de rayos.

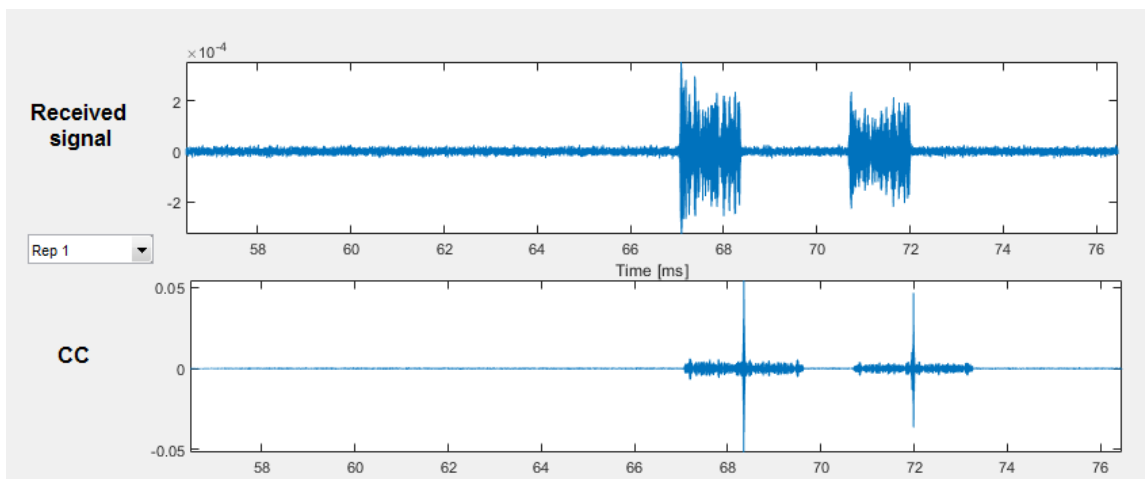


Fig 38. Atenuación señal recibida por los rebotes.

3.7. Conclusiones

Se ha desarrollado una herramienta de simulación que permite analizar los efectos en la señal acústica codificada del canal subacuático siguiendo el modelo del trazado de rayos y ofrece resultados en la estimación de la medida de instantes de llegada, lo que permite la toma de decisiones como paso previo al diseño de prototipos experimentales. La herramienta se basa en la emisión de códigos Kasami, ampliamente utilizados en sistemas de localización acústicos por sus buenas propiedades de correlación. Permite configurar la longitud de la secuencia emitida, y los parámetros típicos de la modulación BPSK (frecuencia de la portadora, número de ciclos y frecuencia de muestreo). Además, permite añadir el efecto de los transductores, configurar parámetros del canal, así como típicos del entorno subacuático. Para cada etapa de la simulación, la herramienta ofrece resultados visuales y numéricos de interés.

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1. Recopilación de logros del trabajo

Este trabajo de fin de grado ha desarrollado una herramienta de simulación para testear y evaluar las señales acústicas en el entorno subacuático. La herramienta es útil tanto para investigadores del área, pudiendo analizar diseños de emisión, como para alumnos iniciados en el tema, ofreciendo una comprensión más fácil de la propagación de las señales acústicas en el medio subacuático, teniendo en cuenta los parámetros del entorno.

El programa permite generar y almacenar códigos en formato .mat para su uso en sistemas prácticos.

A nivel personal, este proyecto ha supuesto una oportunidad para poder conocer el modelo de propagación del trazado de rayos. Además, ha servido para aprender la programación en Matlab.

4.2. Trabajos futuros

De cara a trabajos futuros, se proponen las siguientes mejoras y ampliaciones que no pudieron ser abarcadas por el presente TFG:

- Incorporación de más técnicas de codificación: CSS, Zadoff_Chui, etc.
- Permitir al usuario incluir más de un emisor.
- Realizar prototipos experimentales en base a la herramienta de simulación.

5. PRESUPUESTO

5.1. Presupuesto de material y licencias

Material / licencia	Cantidad	Precio unitario (€)	Período de amortización (años)	Uso (meses)	Coste de amortización (€)
Ordenador	1	800	5	12	150
Licencia Matlab 2019b	1	800	1	12	600
Licencia Windows 10	1	145	1	9	108,75
Licencia Microsoft Office 2016	1	150	1	9	112,5
Total		3.130 €		971,25 €	

Tabla 4. Presupuesto de material y licencias

5.2. Presupuesto de las horas de desarrollo

Elemento desarrollado	Horas	Coste
Estudio de los modelos de propagación de señales acústicas en Entornos subacuáticos	80	4.800 €
Interfaz gráfica Matlab-GUIDE	150	6.000 €
Pruebas y correcciones de errores	75	3.000 €
Escritura de la memoria	40	2.400 €
Escritura del manual de usuario	10	480 €
Total	278	16.680 €

Tabla 5. Presupuesto de las horas de desarrollo

6. PLIEGO DE CONDICIONES

Para la programación y utilización de la aplicación se requieren los siguientes elementos:

- Ordenador.
- Licencia Matlab para versión 2019b o superiores.
- Conexión a internet para realizar pruebas experimentales.

7. Manual de usuario

Dado que el Manual de Usuario será extraído para su uso por parte de los usuarios y debe ser autocontenido, algunas de las figuras o descripciones vistas en la memoria serán replicadas para ofrecer explicaciones del funcionamiento del sistema. Este manual de usuario está traducido al inglés para poder ser usada con estudiantes e investigadores extranjeros.

7.1. Introduction

To execute the program from Matlab, right click on Herramienta_cod.m and Run, as shown in Fig.38.

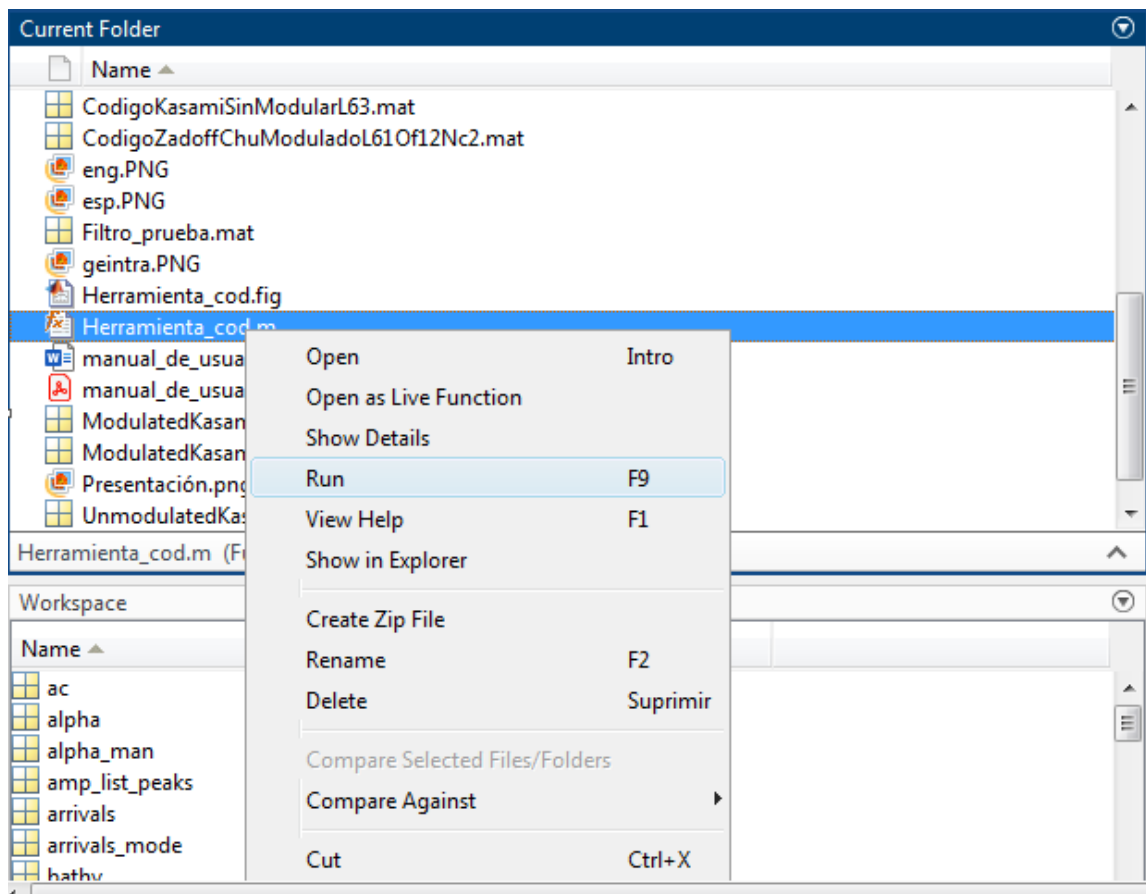


Fig. 39. User Manual: Platform home

7.2. Start window

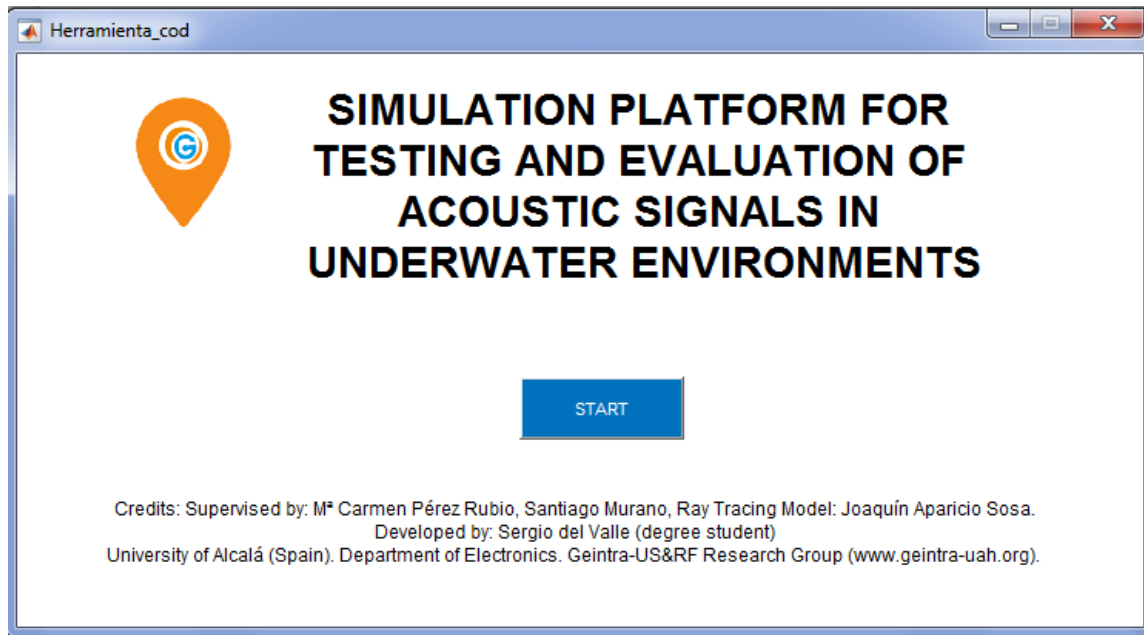


Fig. 40. User manual: Start window.

Press start to continue.

7.3. Initial window

This window displays the different sections that follows the application.

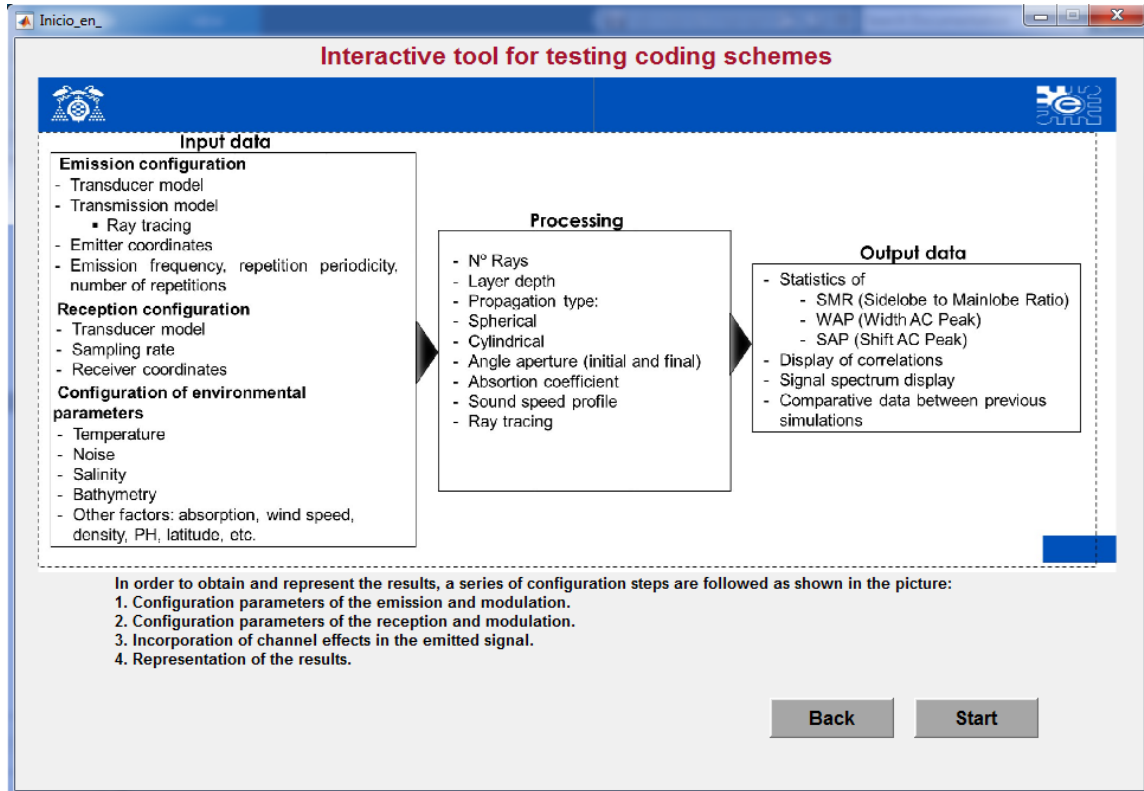


Fig. 41. User manual: Initial window

Press start to continue.

7.4. Emission configuration Kasami window

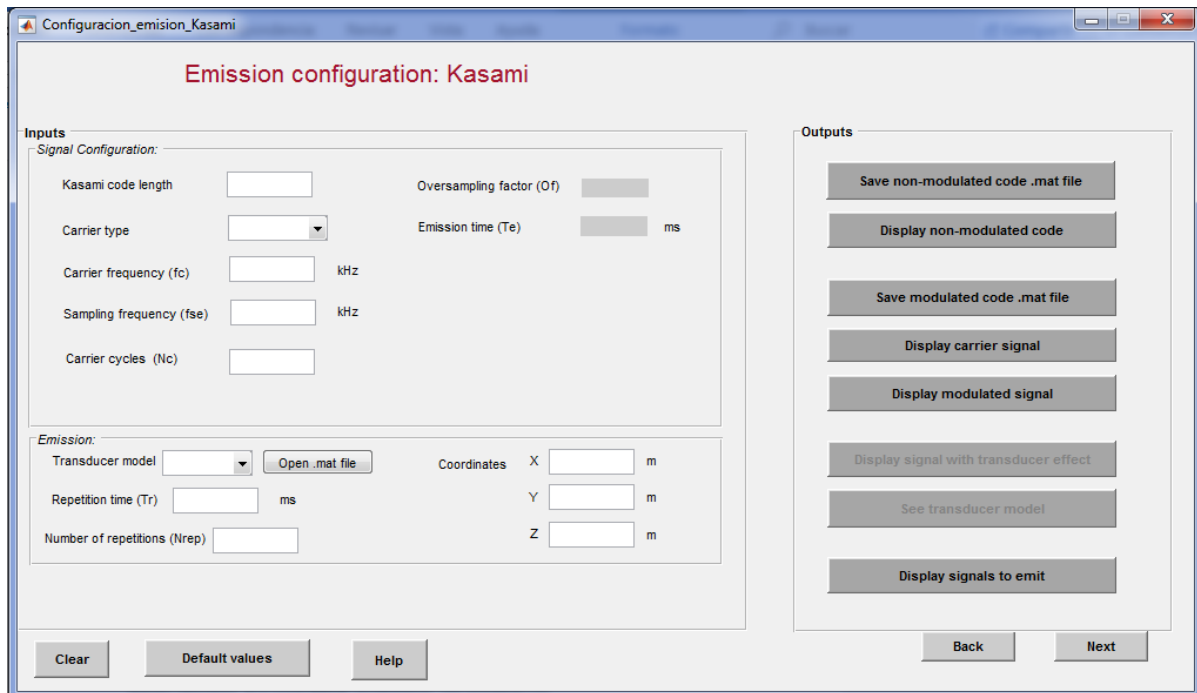


Fig. 42. User manual: Emission configuration Kasami window

Naming	Definition	Remarks
<i>Kasami code length</i>	Code length	$L=2^N-1$. N must be even.
M	Family size	$M=2^{N/2}$.
f_c	Carrier frequency	
f_{se}	Sampling frequency	
N_c	Number of Carrier cycles	
O_f	Oversampling factor	$O_f=f_{se}/f_c$. This value is approximated to the nearest integer and the f_c is modified.
T_e	Duration of the emission of a code	$T_e=L \cdot N_c / f_c$
T_{gap}	Space between consecutive emissions	
N_{rep}	Number of code repetitions	
<i>Transducer model</i>	Add transducer effect	200LM450 No Add Model (.mat)
<i>Carrier type</i>	Type of Carrier signal	Sine o square
X, Y, Z	Emitter coordinates	[m]

Tabla 6. Options emission configuration Kasami window 1


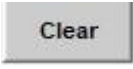
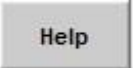
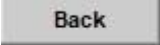
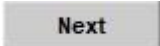
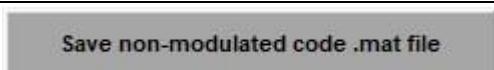
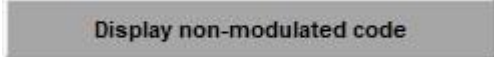


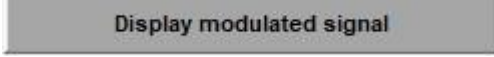
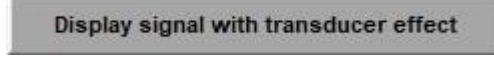


Button	Definition
	Enter certain values in the configuration fields to provide better guidance to the user
	Removes any values entered in the configuration fields.
	Opens user's guide.
	Returns to previous window.
	Advances to next window.
	Stores in the working directory the non-modulated code
	Displays the generated non-modulated Nemo codes. See Figure 6.
	Stores in the working directory the modulated code.
	Displays the carrier signal to be used to modulate the signal. See Figure 7.
	Displays the signal modulated. See Figure 8.
	Displays the signal modulated codes with transducer effect. See Figure 9.
	Indicates the frequency response of the transducer used, as well as its main characteristics. See Figure 10.
	Displays the Nemo codes to be emitted. See Figure 11.

Tabla 7. Options emission configuration Kasami window 2

Example.

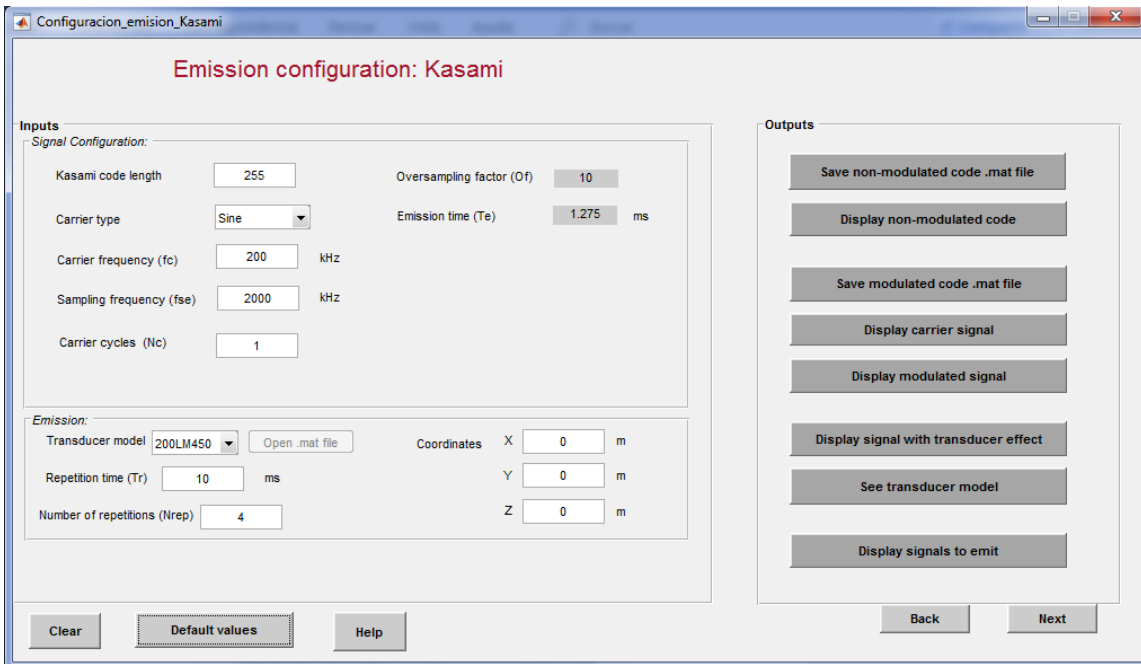


Fig 43. User manual. Example emission configuration Kasami window

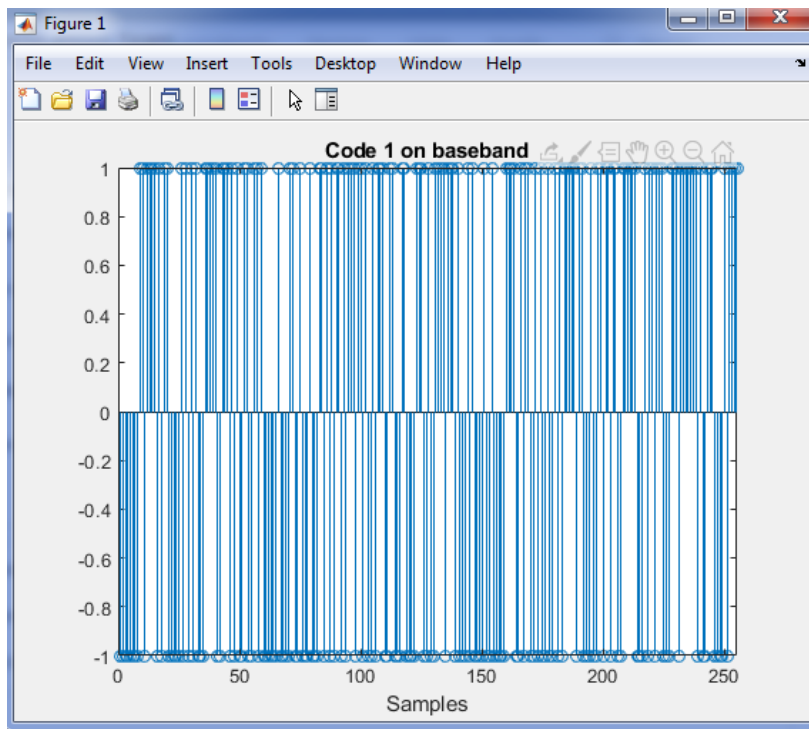


Fig 44. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display non-modulated code)

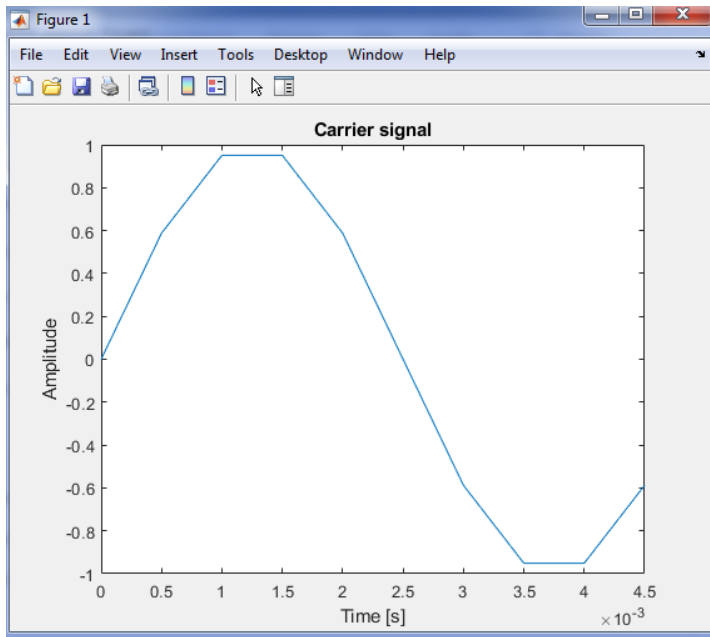


Fig 45. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display carrier signal)

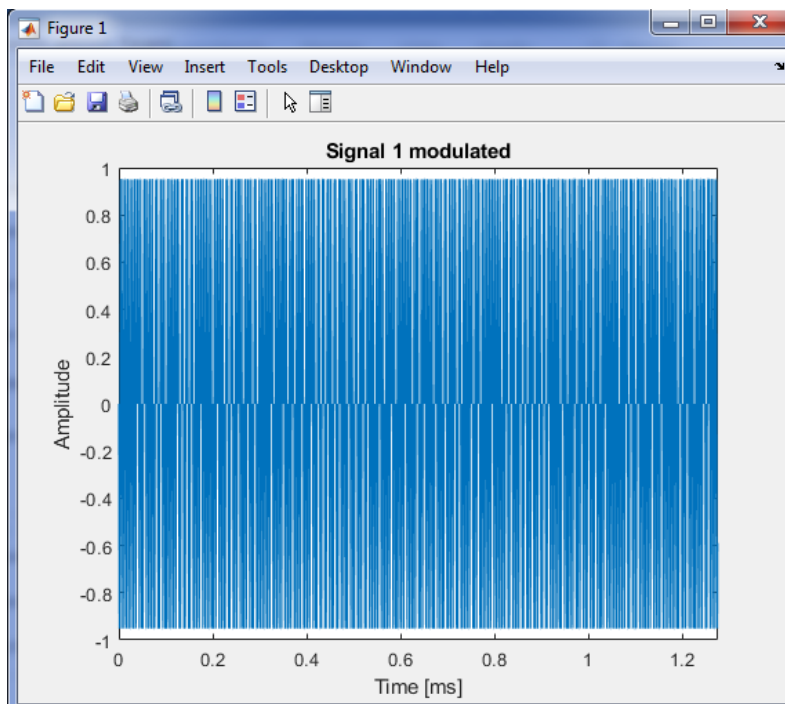


Fig 46. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display modulated signal)

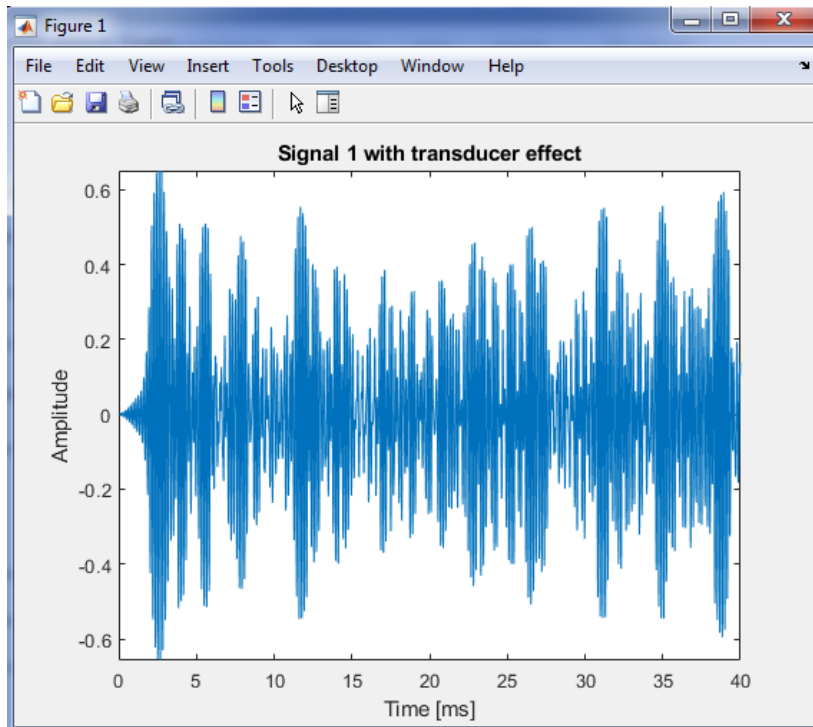


Fig 47. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display signal with transducer effect)

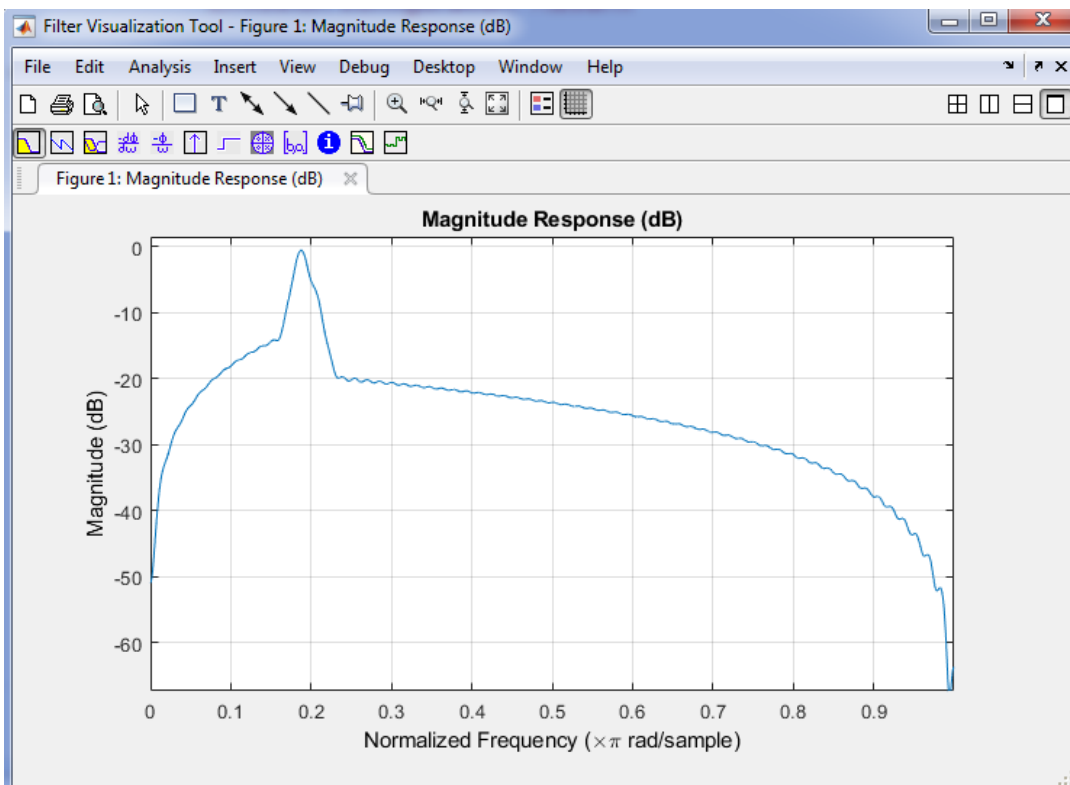


Fig 48. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton see transducer model)

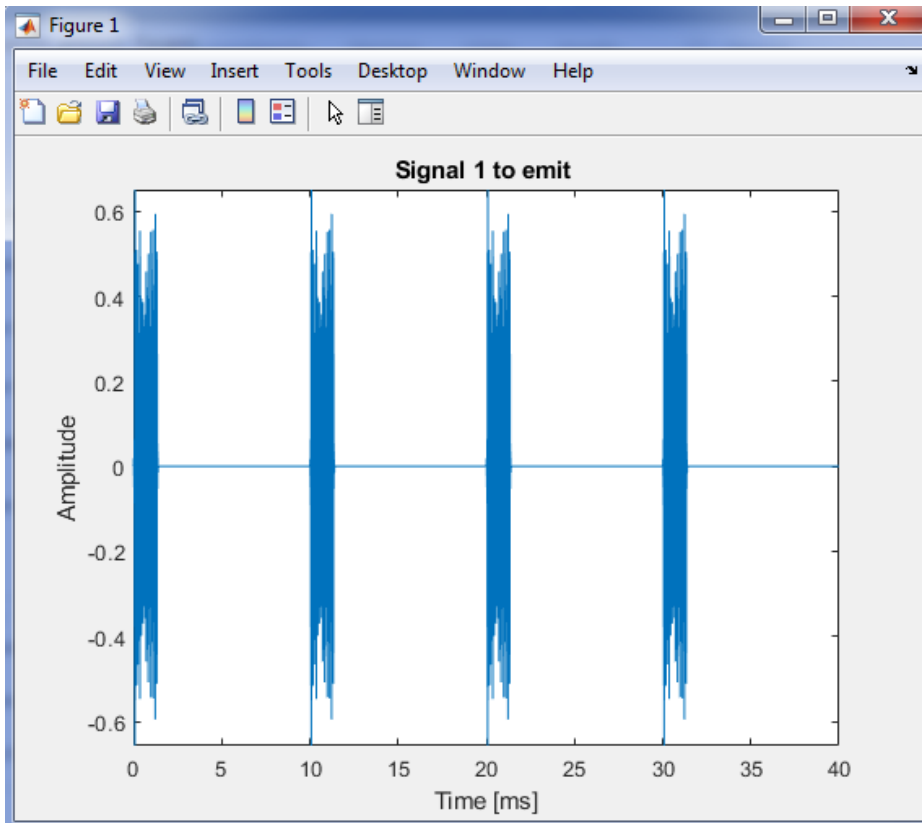


Fig 49. User manual. Emission configuration Kasami window (Pushbutton Display signals to emit)

7.5. Reception configuration Kasami window

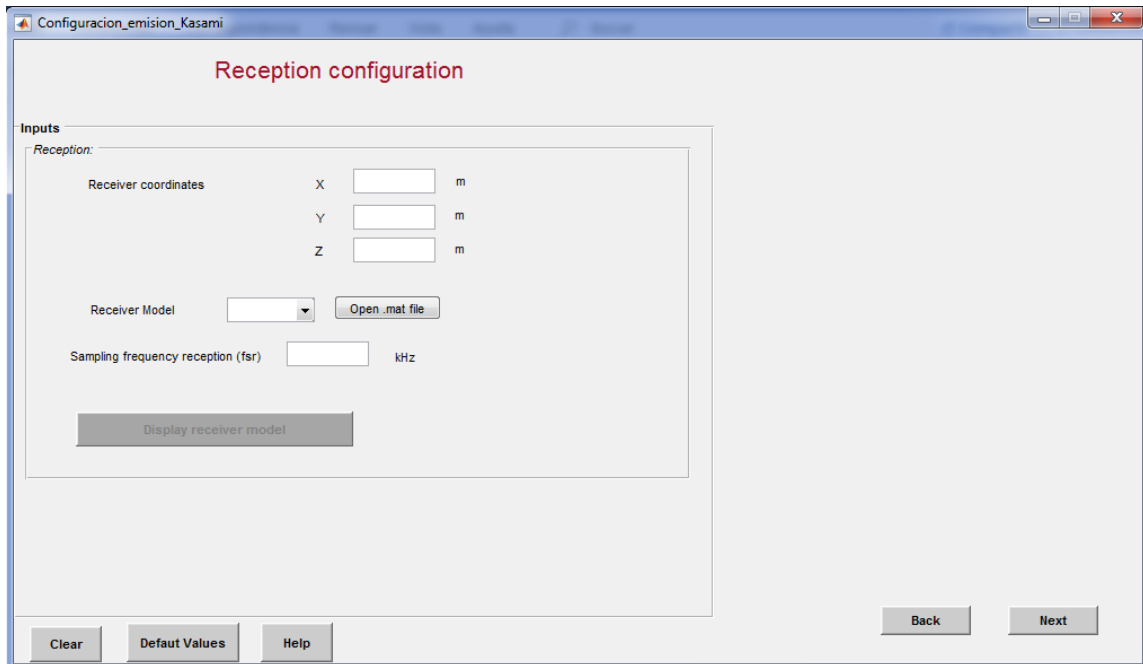


Fig. 50. User manual. Reception configuration Kasami window

Naming	Definition	Remarks
X, Y, Z	Receiver coordinates	[m]
<i>Receiver model</i>	Add transducer effect	
<i>fsr</i>	Sampling frequency	[kHz]

Tabla 8. Options reception configuration Kasami window 1

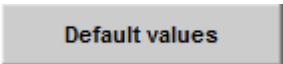
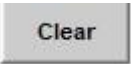
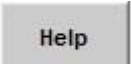
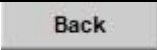
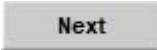
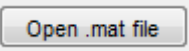
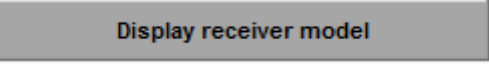
Button	Definition
	Enter certain values in the configuration fields to provide better guidance to the user
	Removes any values entered in the configuration fields.
	Opens user's guide.
	Returns to previous window.
	Advances to next window.
	select a file from the directory
	Indicates the frequency response of the transducer used. See Figure 14.

Tabla 9. Options reception configuration Kasami window 2

Example.

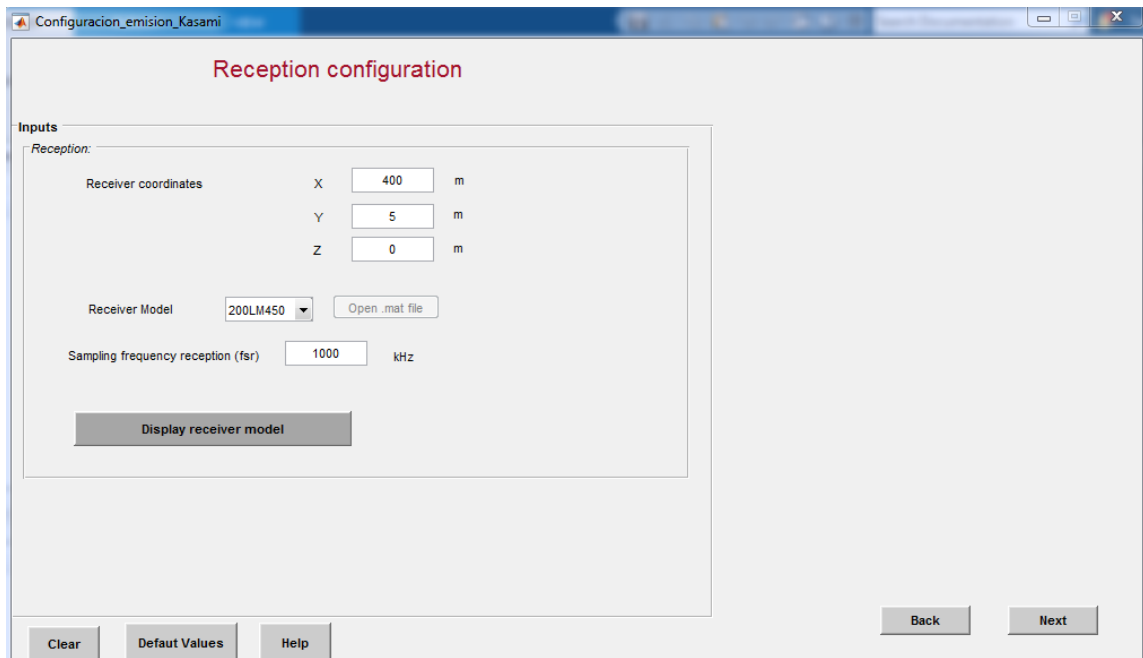


Tabla 10. User manual: Example reception configuration Kasami window

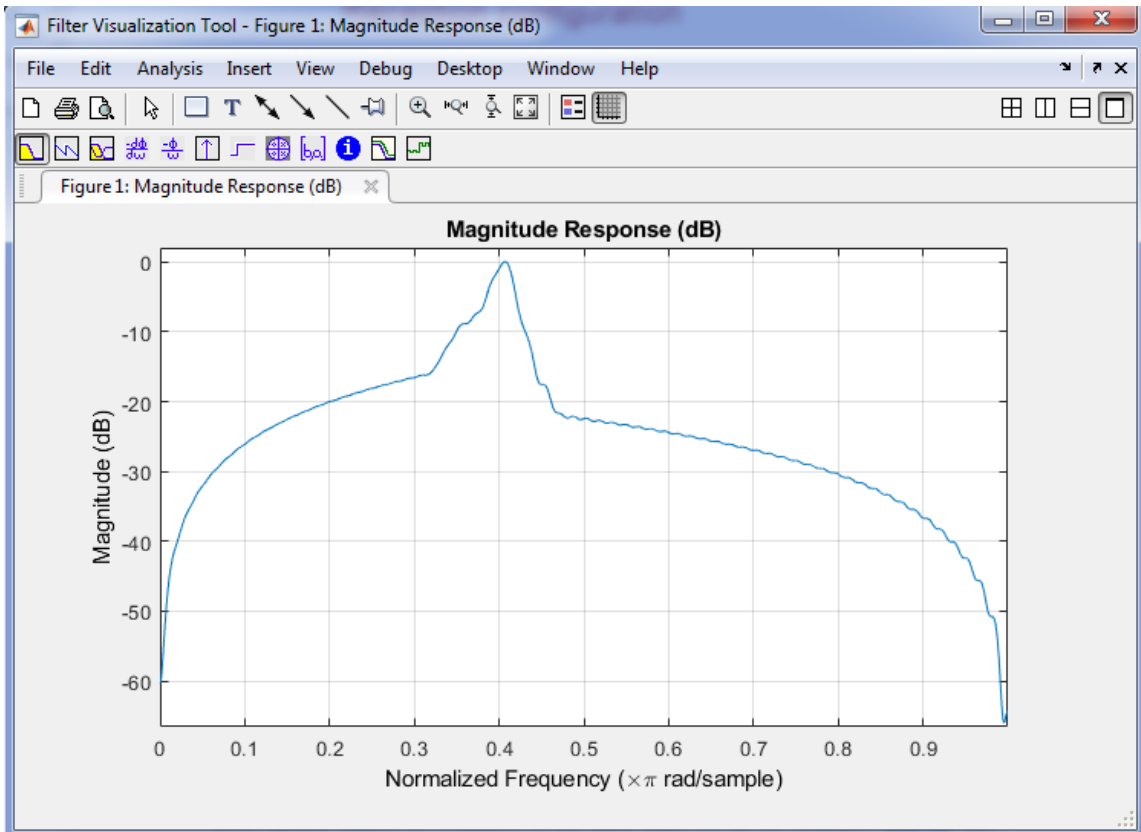


Fig 51. User manual. Reception configuration Kasami window (Pushbutton see transducer model)

7.6. Environment configuration window

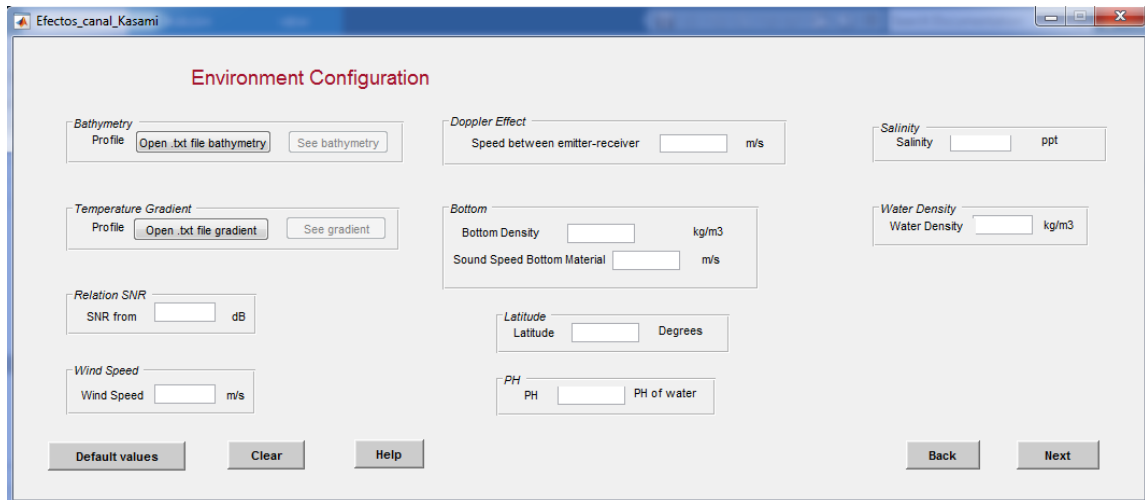


Fig. 52. User manual. Enviroment configuration window

Naming	Definition	Remarks
<i>Relation SNR</i>		[dB]
<i>Wind speed</i>		[m/s]
<i>Speed between emiter-receiver</i>		[m/s]
<i>Bottom density</i>		[Kg/m3]
<i>Sound speed bottom density</i>		[m/s]
<i>Latitude</i>		Degrees
<i>PH</i>		PH of water
<i>Salinity</i>		[ppt]
<i>Water density</i>		[Kg/m3]

Tabla 11. Options enviroment configuration window 1

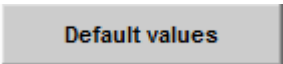

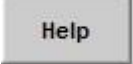
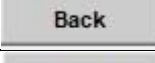
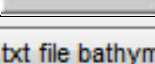
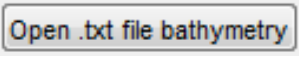
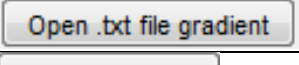
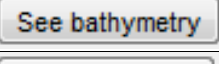
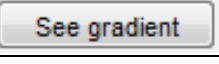
Button	Definition
	Enter certain values in the configuration fields to provide better guidance to the user
	Removes any values entered in the configuration fields.
	Opens user's guide.
	Returns to previous window.
	Advances to next window.
	Select a .txt file from the directory the bathymetry profile
	Select a .txt file from the directory the gradient profile
	Displays the bathymetry. See Figure 17.
	Displays the bathymetry. See Figure 18.

Tabla 12. Options environment configuration window 2

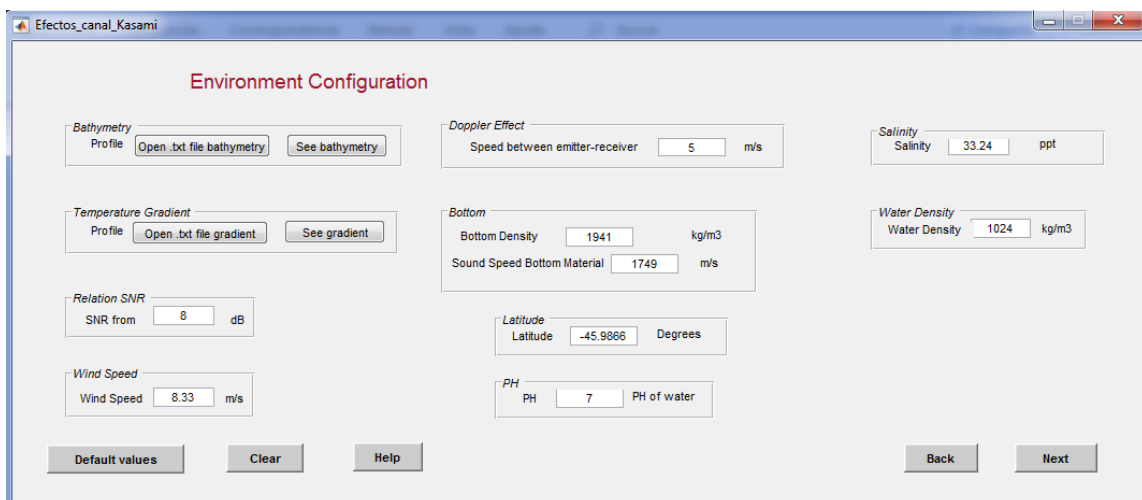


Fig 53. User manual: Example environment configuration window

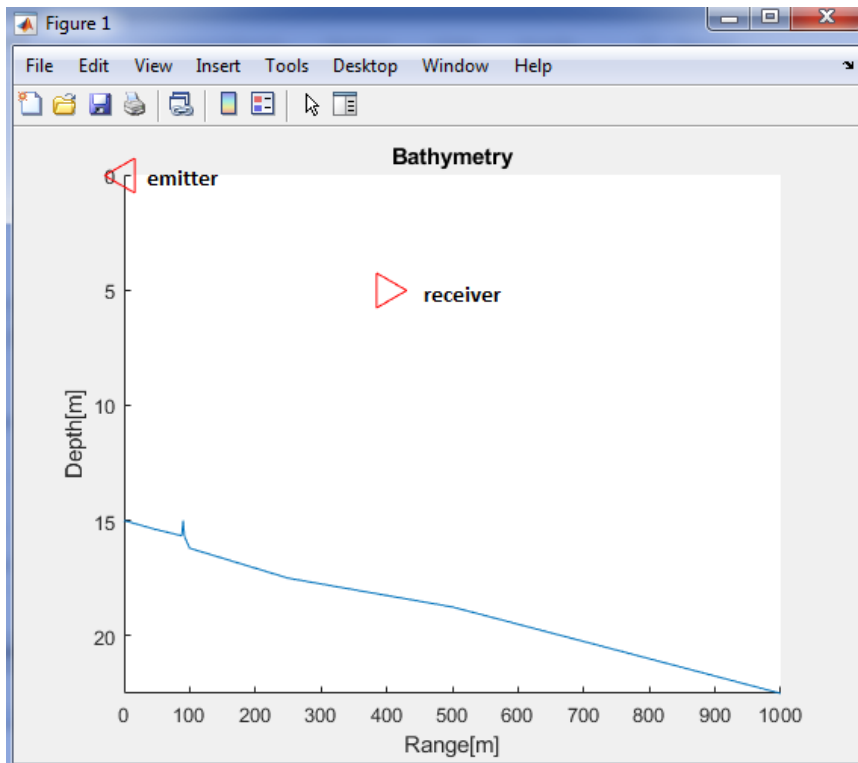


Fig 54. User manual. Enviroment configuration Kasami window (Pushbutton see bathymetry)

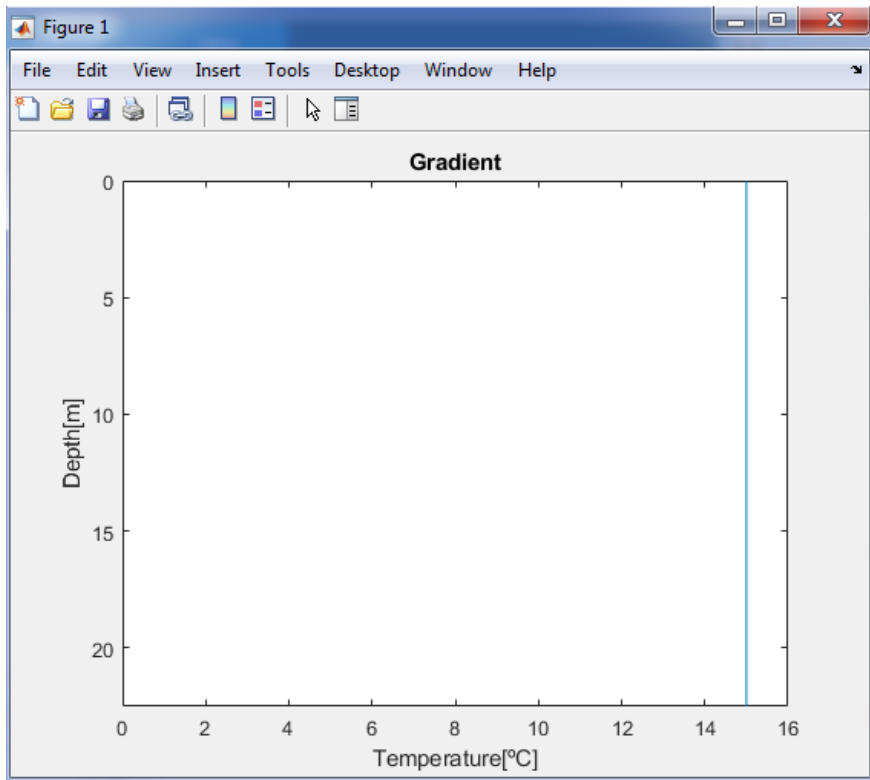


Fig 55. User manual. Enviroment configuration Kasami window (Pushbutton see gradient)

7.7. Ray tracing configuration window

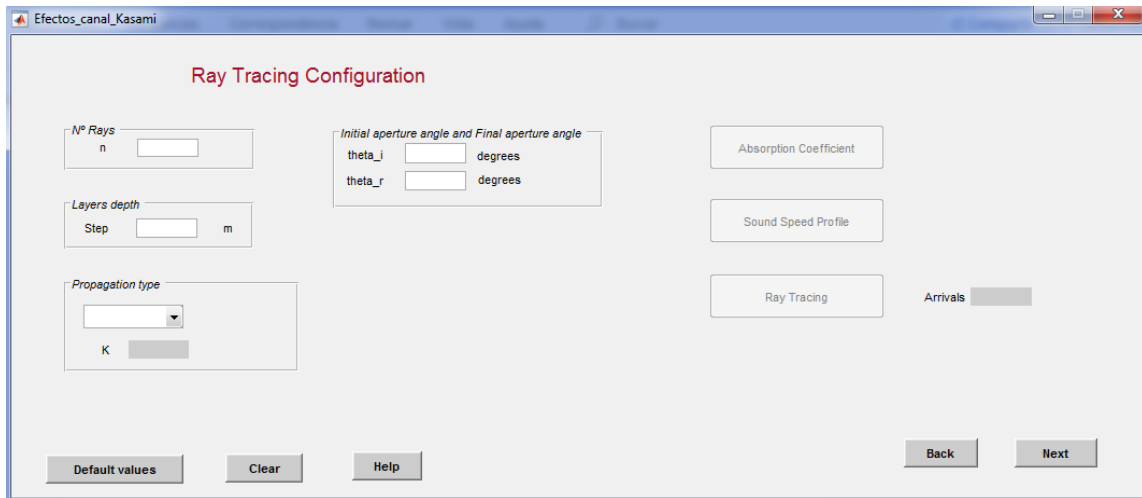


Fig 56. User manual. Ray tracing configuration window

Naming	Definition	Remarks
<i>NºRays</i>	Number of rays leaving the emitter	
<i>Step</i>	The water column is sampled in layers of constant depth and constant	[m]
<i>Propagation type</i>	Propagation type: spherical or cylindrical	spherical cylindrical
<i>K</i>	Coefficient of geometric divergence	K=20 -> spherical K=10 -> cylindrical
<i>Theta_i</i>	Initial opening angle	Degrees
<i>Theta_r</i>	Final opening angle	Degrees
<i>Arrivals</i>	Number of rays received by receiver	Figure 24

Tabla 13. Options Ray tracing configuration window 1

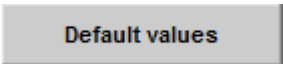

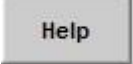
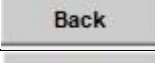
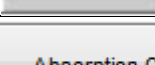
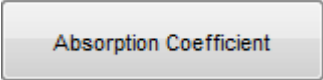

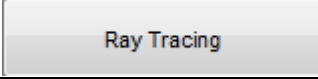
Button	Definition
	Enter certain values in the configuration fields to provide better guidance to the user
	Removes any values entered in the configuration fields.
	Opens user's guide.
	Returns to previous window.
	Advances to next window.
	Display the Absorption coefficient. See Figure 21
	Display the Sound speed profile. See Figure 22.
	Display the Ray-tracing. See Figure 23.

Tabla 14. Options Ray tracing configuration window 2

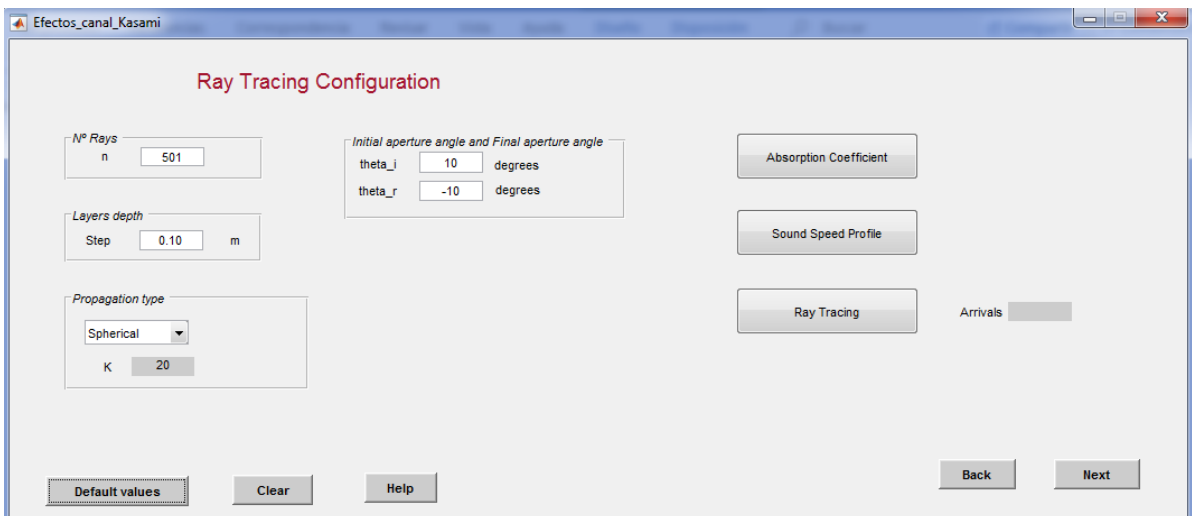


Fig 57. User manual: Example ray tracing configuration window

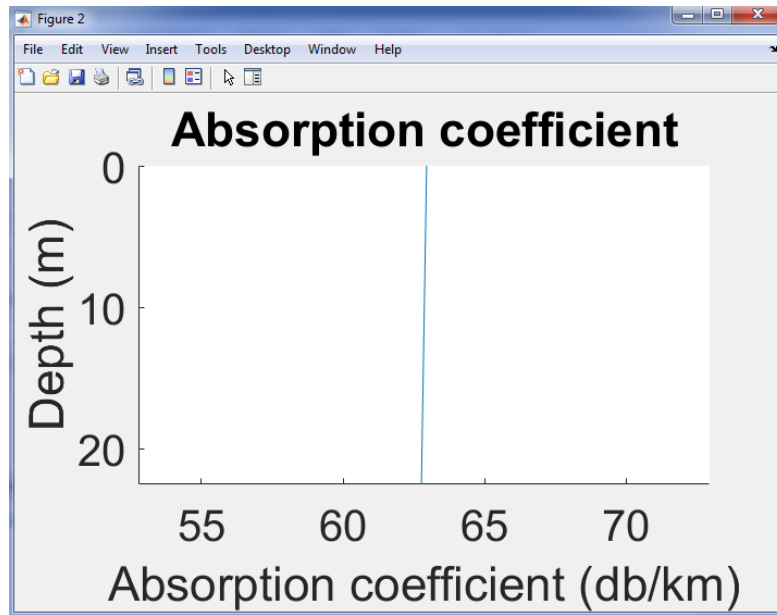


Fig 58. User manual: Ray tracing configuration window (pushbutton absorption coefficient)

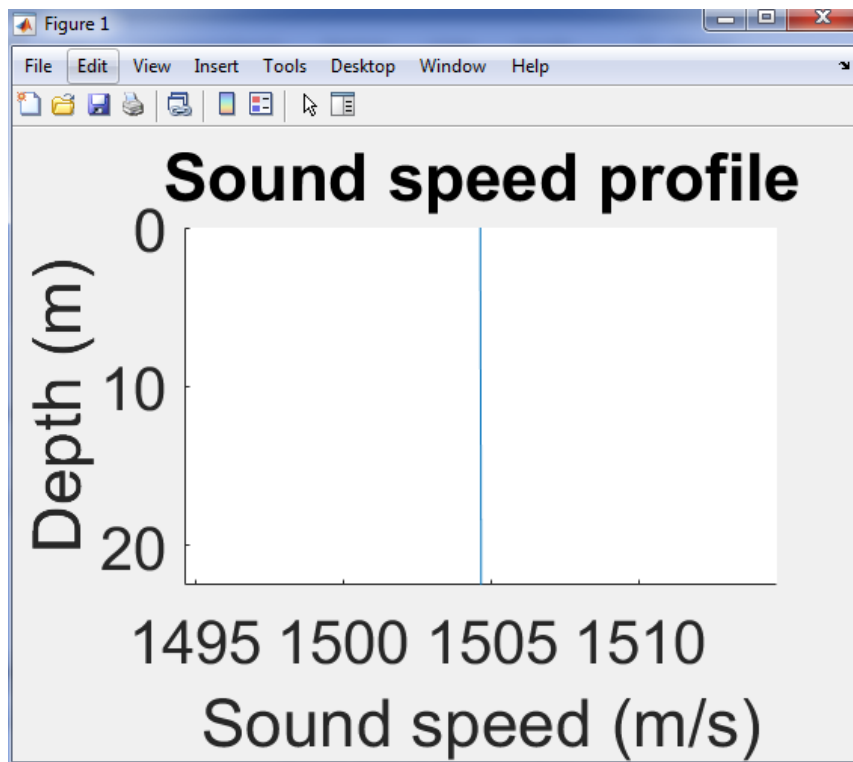


Fig 59. User manual: Ray tracing configuration window (pushbutton sound speed profile)

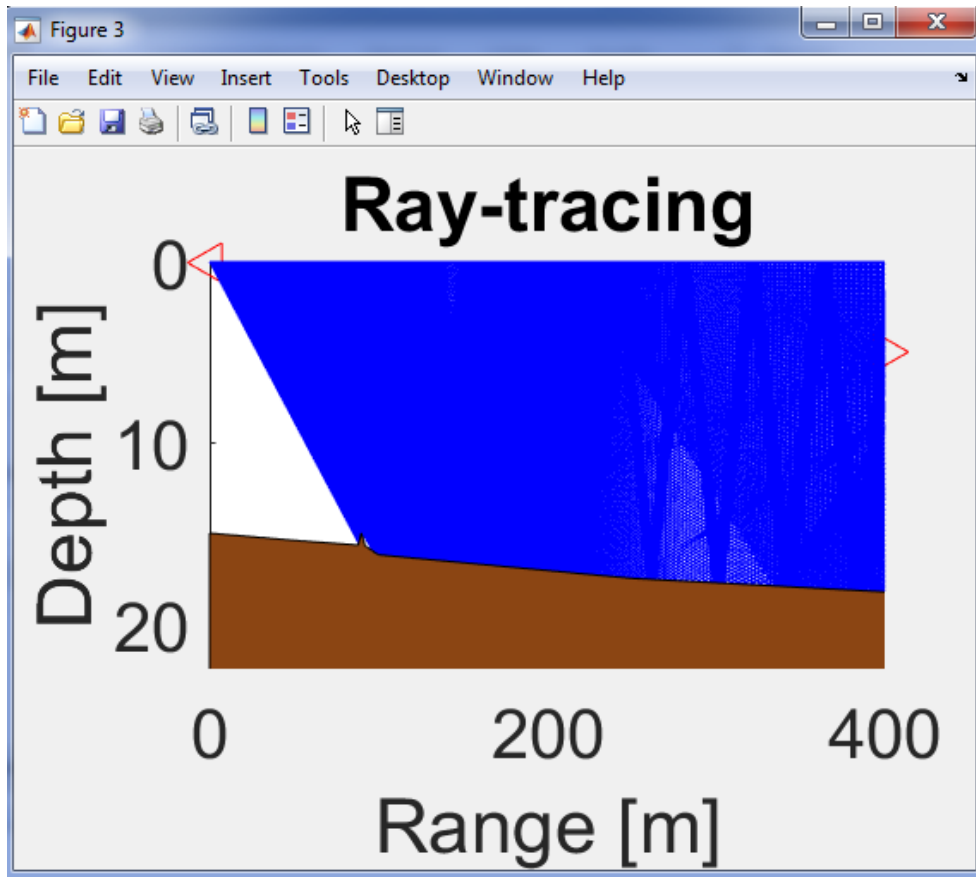


Fig 60. User manual: Ray tracing configuration window (pushbutton ray tracing)

7.8. Result window

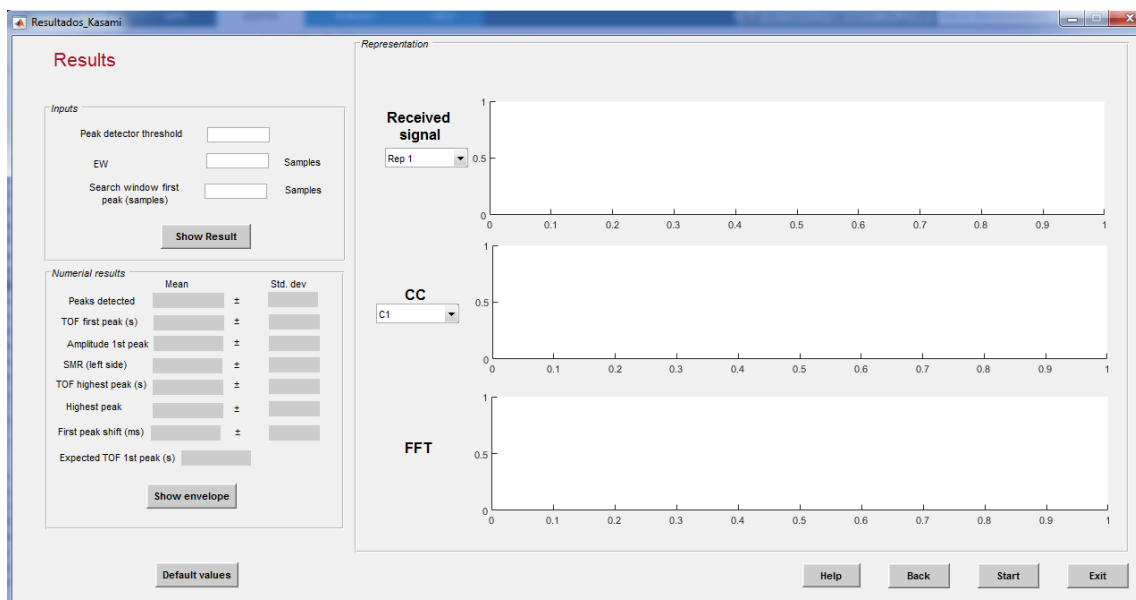


Fig 61. User manual. Result window

Naming	Definition	Remarks
<i>Peak detector threshold</i>	It is the threshold that the correlation signal must exceed to be considered as a possible peak.	
<i>EW</i>	It is the number of samples to be zero, to "erase" each peak detected and find the next maximum that exceeds the threshold.	[samples]
<i>Search window first peak</i>	It is the peak search window (in samples) around the highest energy peak.	[samples]

Tabla 15. Editable options result window

Naming	Definition	Remarks
<i>Peaks detected</i>	It is the number of peaks detected.	
<i>TOF first peak</i>	It is the flight time of the first peak detected	[s]
<i>Amplitude 1st peak</i>	The amplitude of the first peak	
<i>SMR (left side)</i>	Side-lobe to Main-lobe Ratio. It is the ratio of the amplitude of the maximum side lobe to the left of the first peak, divided by the amplitude of the first correlation peak.	
<i>TOF highest peak</i>	Flight time of the highest amplitude peak.	[s]
<i>Highest peak</i>	Amplitude of the highest energy peak	
<i>Expected TOF 1st peak</i>	Instant of time where the first peak should be	[s]
<i>First peak shift</i>	It is the difference between the instant where the first peak should be, and the one detected.	[ms]

Tabla 16. Parameters Result window



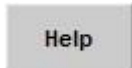

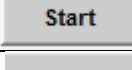
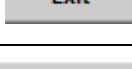
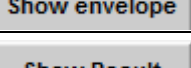
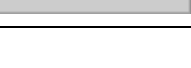
Button	Definition
	Enter certain values in the configuration fields to provide better guidance to the user
	Removes any values entered in the configuration fields.
	Opens user's guide.
	Returns to previous window.
	Advances to emission configuration window.
	Exit application
	Shows the currently selected correlation in a separate window
	shows the graph of the received signals, correlation, FFT and the results

Tabla 17. Pushbutton options result window

Bibliografía

- [1] M. C. Pérez, “Generación y correlación eficiente de códigos binarios derivados de conjuntos de secuencias complementarias para sistemas ultrasónicos”, tesis doctoral, Universidad de Alcalá, 2009
- [2] T. Kasami. “Weight distribution formula for some class of cyclic codes”. Technical report R-285, Coordinated Science Lab. University of Illinois, 1968
- [3] A.Y. Teymorian, W. Cheng, L. Ma, X. Cheng, X. Lu, Z. Lu. “3D Underwater Sensor Network Localization” . IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 8 no 12, pp. 1610-1621, 2009.
- [4] J. Aparicio, A. Jiménez, F.J. Álvarez, D. Ruiz, C. De Marziani, J. Ureña. “Characterization of an underwater positioning system based on GPS surface nodes and encoded acoustic signals” . IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 65, no. 8, pp. 1773-1784. 2016.
- [5] Y. Bai, P. Bouvet. “Orthogonal Chirp Division Multiplexing for Underwater Acoustic
- [6] P.C. Etter. “Underwater Acoustic Modeling and Simulation” . CRC Press, 4a ed., 2018.
- [7] J. Aparicio, “Modelo de Propagación Acústica Subacuática y su aplicación en sistemas de posicionamiento” , tesis doctoral, 2014, UAH.
- [8] ProWave Electronic Corp. ProWave200LM450, Underwater Ultrasonic Ceramic Transducer. Último acceso febrero 2021 [Online]. Disponible: [ProWave 200LM450 \(prowave.com.tw\)](http://prowave.com.tw).
- [9] P. Fan, M. Darnell, “Sequence Design for communications applications”, 1996, Computer Science.
- [10] “Technical Guides: Speed of Sound in Sea-Water”, página gestionada por Communication Technology. Disponible en: http://www.comm-tec.com/Library/Technical_Papers/speedsw.pdf

[11] <https://www.hebergementwebs.com/tutorial-de-comunicacion-digital/comunicacion-digital-modulacion-por-desplazamiento-de-fase>

[12] Enrique García, José A. Paredes, Fernando J. Álvarez, M. Carmen Pérez, Juan Jesús García, "Spreading sequences in active sensing: A review", *Signal Processing*, vol. 106, pp. 88-105, 2015

[13] J. Aparicio, E. García, A. Jiménez, F. Álvarez, J. Ureña, "Modelo de Propagación Acústica Subacuática y su Aplicación en Sistemas de Posicionamiento", *CONECtrónica*, 139, 40, 2010.

Anexo: códigos.

Se incluyen algunos códigos que se consideran relevantes.

Señal emitida modulada

```
% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
Nemo=1;
% % str2double(get(handles.edit2,'String'));
Te=evalin('base','Te');
codigo_kasami_modulado=crear_kasami_modulado;
assignin('base','codigo_kasami_modulado',codigo_kasami_modulado);
%guardo en workspace code
t=0:Te/length(codigo_kasami_modulado):Te-
Te/length(codigo_kasami_modulado);

figure;
for i=1:Nemo
    subplot(Nemo,1,i)
    plot(t,codigo_kasami_modulado(i,:))
    ylabel('Amplitude');
    %xlabel('Tiempo [ms]');
    title(['Signal ',num2str(i),' modulated']);
    xlim([0 Te]);
end
xlabel('Time [ms]');
```

Señal emitida con el efecto del transductor

```
% --- Executes on button press in pushbutton18.
function pushbutton18_Callback(hObject, eventdata, handles)
Nemo=1;
assignin('base','Nemo',Nemo);
Te=evalin('base','Te');
Tr=evalin('base','Tr');
Nrep=evalin('base','Nrep');
codigo_kasami_transductor=crear_kasami_transductor;
assignin('base','codigo_kasami_transductor',codigo_kasami_transductor)
;
t=0:Te/length(codigo_kasami_transductor):Te-
Te/length(codigo_kasami_transductor);
% tttotal=(Nrep*Tr);
% assignin('base','tttotal',tttotal);
```

```

% t=0:tttotal/length(codigo_kasami_transductor):tttotal-
tttotal/length(codigo_kasami_transductor);

for i=1:Nemo
    maximoy(i,:)=max(codigo_kasami_transductor(i,:));
    minimoy(i,:)=min(codigo_kasami_transductor(i,:));
end

ymax=max(maximoy);
ymin=min(minimoy);

figure;
for i=1:Nemo
    subplot(Nemo,1,i)
    plot(t,codigo_kasami_transductor(i,:))
    ylabel('Amplitude');
    xlabel('Tiempo [ms]');
    title(['Signal ',num2str(i),' with transducer effect']);
    ylim([ymin ymax]);
    xlim([0 Te]);
%     xlim([0 tttotal]);
end
xlabel('Time [ms]');

```

Visualizar modelo transductor

```

% --- Executes on button press in pushbutton13.
function pushbutton13_Callback(hObject, eventdata, handles)
transductor=get(handles.popupmenu2,'Value');
if transductor==2
    ProWave200LM450=evalin('base','ProWave200LM450');
    fvtool(ProWave200LM450)
elseif transductor==4
    filt=evalin('base','filt');
    fvtool(filt)
end

```

Cálculo y visualización de la batimetría.

```
% --- Executes on button press in pushbutton9.
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
bathy=evalin('base','bathy');
T=table(bathy);
assignin('base', 'T', T);
bathymetry = splitvars(T, 'bathy');
assignin('base', 'bathymetry', bathymetry);
Xe=evalin('base', 'Xe');
assignin('base', 'Xe', Xe);
Ye=evalin('base', 'Ye');
assignin('base', 'Ye', Ye);
Ze=evalin('base', 'Ze');
assignin('base', 'Ze', Ze);
Xr=evalin('base', 'Xr');
assignin('base', 'Xr', Xr);
Yr=evalin('base', 'Yr');
assignin('base', 'Yr', Yr);
Zr=evalin('base', 'Zr');
assignin('base', 'Zr', Zr);
figure
hold on
plot(bathymetry.bathy_1,bathymetry.bathy_2);
axis ij
axis ([0 max(bathymetry.bathy_1) 0 max(bathymetry.bathy_2)])
plot(Xe, Ye, 'r<', 'MarkerSize',15);
% plot the emisor position
plot(Xr, Yr, 'r>', 'MarkerSize',15);
% plot the receiver position
title ("Bathymetry");
xlabel ("Range[m]");
ylabel ("Depth[m]");

for i=1:length(bathymetry.bathy_2)
    if bathymetry.bathy_2(i) >= Yr
        else
            warndlg({'Change Yr Receiver Coordinate.'},'Warning');
            break;
        end
    if bathymetry.bathy_2(i) >= Ye
        else
            warndlg({'Change Ye Receiver Coordinate.'},'Warning');
            break;
        end
end
end
```

Cálculo y visualización del gradiente de temperatura.

```
function pushbutton10_Callback(hObject, eventdata, handles)
gradient=evalin('base','gradient');
G=table(gradient);
assignin('base','G',G);
grad = splitvars(G, 'gradient');
assignin('base','grad',grad);
figure
plot(grad.gradient_2,grad.gradient_1);
axis ij
axis ([0 max(grad.gradient_2+1) 0 max(grad.gradient_1)])
title ("Gradient");
xlabel ("Temperature[°C]");
ylabel ("Depth[m]");
z=evalin('base','z');
if (z<max(grad.gradient_1))
    warndlg({'Change Temperature Profile.'},'Warning');
end
```

Cálculo y visualización del coeficiente de absorción.

```
% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
pH=evalin('base','pH');
fc=evalin('base','fc');
figure_mode=1;
assignin('base','figure_mode',figure_mode);
z=evalin('base','z');
step=evalin('base','step');
S=evalin('base','S');
Latitude=evalin('base','Latitude');
gradient=evalin('base','gradient');
cluster_mode=evalin('base','cluster_mode');
figure_mode=evalin('base','figure_mode');

[c, Temp] = chen_millero(z, step, S, Latitude, gradient);
assignin('base','c',c);
assignin('base','Temp',Temp);

alpha = abs_coeff_FG(z, step, Temp(:,2), S, pH, fc, cluster_mode,...
    figure_mode);
assignin('base','alpha',alpha);
```

Cálculo y visualización del perfil de velocidad del sonido.

```
% --- Executes on button press in pushbutton12.
function pushbutton12_Callback(hObject, eventdata, handles)

z=evalin('base','z');
step=evalin('base','step');
S=evalin('base','S');
Latitude=evalin('base','Latitude');
gradient=evalin('base','gradient');
cluster_mode=evalin('base','cluster_mode');
figure_mode=1;
assignin('base','figure_mode',figure_mode);

[c, Temp] = chen_millero(z, step, S, Latitude, gradient);
assignin('base','c',c);
assignin('base','Temp',Temp);

if cluster_mode == 0
    if figure_mode == 1
        figure(1);
        hold on
        axis ij
        axis([min(c)-10 max(c)+10 0 z])
        plot(c,0:step:z); set(gca,'FontSize',30)
        title('Sound speed profile');
        xlabel('Sound speed (m/s)');
        ylabel('Depth (m)');
        hold off
    end
end
```

Cálculo y visualización del modelo trazado de rayos.

```
% --- Executes on button press in pushbutton13.
function pushbutton13_Callback(hObject, eventdata, handles)
bathy=evalin('base','bathy');
T=table(bathy);
assignin('base','T',T);
bathymetry = splitvars(T,'bathy');
assignin('base','bathymetry',bathymetry);
Xe=evalin('base','Xe');
assignin('base','Xe',Xe);
Ye=evalin('base','Ye');
assignin('base','Ye',Ye);
```

```

Ze=evalin('base','Ze');
assignin('base','Ze',Ze);
Xr=evalin('base','Xr');
assignin('base','Xr',Xr);
Yr=evalin('base','Yr');
assignin('base','Yr',Yr);
Zr=evalin('base','Zr');
assignin('base','Zr',Zr);

n=evalin('base','n');
theta_i=evalin('base','theta_i');
theta_f=evalin('base','theta_f');
step=evalin('base','step');
z=evalin('base','z');

Wind_speed=evalin('base','Wind_speed');
Water_density=evalin('base','Water_density');
Bottom_density=evalin('base','Bottom_density');
k=evalin('base','k');
TL_bot_man=evalin('base','TL_bot_man');
c_b=evalin('base','c_b');
zz = 0:step:z;
assignin('base','zz',zz);

z=evalin('base','z');
step=evalin('base','step');
S=evalin('base','S');
pH=evalin('base','pH');
fc=evalin('base','fc');
cluster_mode=evalin('base','cluster_mode');
figure_mode=0;
assignin('base','figure_mode',figure_mode);
Latitude=evalin('base','Latitude');
gradient=evalin('base','gradient');
[c, Temp] = chen_millero(z, step, S, Latitude, gradient);
alpha = abs_coeff_FG(z, step, Temp(:,2), S, pH, fc, cluster_mode,...
    figure_mode);
assignin('base','alpha',alpha);
assignin('base','c',c);
assignin('base','Temp',Temp);

bathy=evalin('base','bathy');
T=table(bathy);
assignin('base','T',T);
bathymetry = splitvars(T, 'bathy');
assignin('base','bathymetry',bathymetry);
Xe=evalin('base','Xe');
assignin('base','Xe',Xe);
Ye=evalin('base','Ye');

```

```

assignin('base', 'Ye', Ye);
Ze=evalin('base', 'Ze');
assignin('base', 'Ze', Ze);
Xr=evalin('base', 'Xr');
assignin('base', 'Xr', Xr);
Yr=evalin('base', 'Yr');
assignin('base', 'Yr', Yr);
Zr=evalin('base', 'Zr');
assignin('base', 'Zr', Zr);

[data_ray, ray_pos] = ray_tracing_slope(n, Ye, theta_i,...
    theta_f, zz, Xr, c, step, alpha, Wind_speed, fc, Bottom_density,
Water_density, c_b, k,...
    TL_bot_man, bathy);

assignin('base', 'data_ray', data_ray);
assignin('base', 'ray_pos', ray_pos);

ray_plot(ray_pos, n, Xr, z, Yr, Ye, bathy)

n=evalin('base', 'n');
theta_i=evalin('base', 'theta_i');
theta_f=evalin('base', 'theta_f');
refine_mode=evalin('base', 'refine_mode');
RTOF_mode=evalin('base', 'RTOF_mode');
raytracing_mode=evalin('base', 'raytracing_mode');
arrivals_mode=evalin('base', 'arrivals_mode');
CONDOR_PROCESS=evalin('base', 'CONDOR_PROCESS');
n_buoys=evalin('base', 'n_buoys');
fse=evalin('base', 'fse');
SNR_relation=evalin('base', 'SNR_relation');
Wind_speed=evalin('base', 'Wind_speed');
Water_density=evalin('base', 'Water_density');
Bottom_density=evalin('base', 'Bottom_density');
k=evalin('base', 'k');
TL_bot_man=evalin('base', 'TL_bot_man');
c_b=evalin('base', 'c_b');
codigo_kasami_emitido=evalin('base', 'codigo_kasami_emitido');
zz = 0:step:z;
assignin('base', 'zz', zz);

fse=fse*1e3;
fc=fc*1e3;

signal_emi_bb=baseband(codigo_kasami_emitido, fse, fc);
assignin('base', 'signal_emi_bb', signal_emi_bb);

[data_ray, ray_pos, arrivals, signal_rec, TLoss] =...

```

```

        channel(z, Ye, Yr, step, fc, n, theta_i, theta_f, Xr, Wind_speed,
Bottom_density,...
        Water_density, c_b, k, signal_emi_bb, fse, SNR_relation,
TL_bot_man, Xr,...
        cluster_mode, refine_mode, c, alpha, raytracing_mode,
arrivals_mode,...
        bathy, RTOF_mode, n_buoys, CONDOR_PROCESS, figure_mode);

fse=fse/1e3;
fc=fc/1e3;

assignin('base', 'data_ray', data_ray);
assignin('base', 'ray_pos', ray_pos);
assignin('base', 'arrivals', arrivals);
assignin('base', 'signal_rec', signal_rec);
assignin('base', 'TLoss', TLoss);
assignin('base', 'alpha', alpha);

[filas columnas] = size(arrivals);
set(handles.text90, 'string', filas);

```

Cálculo de los resultados y representación de la correlación y FFT de la señal recibida.

```

% --- Executes on button press in pushbutton19.
function pushbutton19_Callback(hObject, eventdata, handles)

cambia_muestra=0;
assignin('base', 'cambia_muestra', cambia_muestra);
selector=get(hObject, 'Value');
assignin('base', 'selector', selector);
set(handles.uipanel8, 'visible', 'on')

IFW=evalin('base', 'IFW');
EW=evalin('base', 'EW');
threshold=evalin('base', 'threshold');
signal_rec=evalin('base', 'signal_rec');
Nrep=evalin('base', 'Nrep');
Nc=evalin('base', 'Nc');
Of=evalin('base', 'Of');
Tr=evalin('base', 'Tr');
Te=evalin('base', 'Te');
fsr=evalin('base', 'fsr');
fse=evalin('base', 'fse');
fc=evalin('base', 'fc');
c=evalin('base', 'c');
Xe=evalin('base', 'Xe');

```



```

Ye=evalin('base','Ye');
Xr=evalin('base','Xr');
Yr=evalin('base','Yr');

distance=round(sqrt((Xr-Xe)^2+(Yr-Ye)^2));
assignin('base','distance',distance);
TOFaux=(distance/mean(c));
TOF=TOFaux*1000;
assignin('base','TOF',TOF);

codigo_kasami_modulado=evalin('base','codigo_kasami_modulado');
assignin('base','codigo_kasami_modulado',codigo_kasami_modulado);

set(handles.uipanel8, 'visible','on')
set(handles.uipanel9, 'visible','on')
set(handles.uipanel10, 'visible','on')

selector_signal_rec=get(handles.popupmenu26,'Value');
Tv=TOF+Tr; % --- tiempo en ms
assignin('base','Tv',Tv);

% signal_ventana_aux = zeros(Nrep, round(Tv*fse));
codigo_kasami_modulado_subsamp=resample(codigo_kasami_modulado, fsr,
fse);
assignin('base','codigo_kasami_modulado_subsamp',codigo_kasami_modulado_subsamp);

for i=1:Nrep
    if selector_signal_rec==i
        signal_ventana_aux = signal_rec(round(TOF+Tr*(i-1)-
Tr/2)*fse+1:round(TOF+Tr*(i-1)+Tr/2)*fse);
        signal_ventana(i,:)=resample(signal_ventana_aux, fsr,
fse);
        corr(i,:) = xcorr2(signal_ventana(i,:),
codigo_kasami_modulado_subsamp);
        assignin('base','corr',corr(i,:));

        t=[1/fsr:1/fsr:(length(signal_ventana(i,:))/fsr)]+TOF-
Tr/2;
        maximoy=max(signal_ventana(i,:));
        minimoy=min(signal_ventana(i,:));
        ymax=max(maximoy);
        ymin=min(minimoy);
        axes(handles.axes12)
        plot(t,signal_ventana(i,:))
        ylim([ymin ymax]);
        xlim([TOF-(Tr/2) TOF+(Tr/2)]);
        xlabel('Time [ms]');
    end
end

```

```

t=[1/fsr:1/fsr:(length(corr(i,:))/fsr)]+TOF-Tr/2;

maximoy=max(corr(i,:));
minimoy=min(corr(i,:));
ymax=max(maximoy);
ymin=min(minimoy);
axes(handles.axes15)
plot(t,corr(i,:))
ylim([ymin ymax]);
xlim([TOF-(Tr/2) TOF+(Tr/2)]);
xlabel('Time [ms]');

axes(handles.axes13)
[FDT,f]=fourier_transform(signal_ventana(i,:),fse,'frec');
plot(f, FDT,'b');
xlim([0 fse/2]);
xlabel('Freq [kHz]')
end
end

for i=1:Nrep
    signal_ventana_aux = signal_rec(round(TOF+Tr*(i-1)-
Tr/2)*fse+1:round(TOF+Tr*(i-1)+Tr/2)*fse);
    signal_ventana(i,:)=resample(signal_ventana_aux, fsr,
fse);
    corr(i,:) = xcorr2(signal_ventana(i,:),
codigo_kasami_modulado_subsamp);
    assignin('base','corr',corr(i,:));

[max_peak,list_peaks,amp_list_peaks,disc_beacon,ref_beacon] =
detecto_picos_ZC_5B_v7(corr(i,:),threshold,IFW,EW);

assignin('base','max_peak',max_peak);
assignin('base','list_peaks',list_peaks);
assignin('base','amp_list_peaks',amp_list_peaks);
assignin('base','disc_beacon',disc_beacon);
assignin('base','ref_beacon',ref_beacon);

[masim,posi] = max2(corr(i,:),EW);
[maximo,pos_maximo] = max(abs(corr(i,:))); %Aplicar el
valor absoluto de la correlación%

SMR(i,:)=masim/maximo;
assignin('base','SMR',SMR(i,:));

distance=sqrt((Xr-Xe)^2+(Yr-Ye)^2);
assignin('base','distance',distance);

```

```

        peaks_detected_aux(i,:)=length(list_peaks);

        TOF_first_peak_aux(i,:)=TOF-(Tr/2)+(list_peaks(1)/(fsr))-
length(codigo_kasami_modulado_subsamp)/fsr;

        Amplitude_first_peak_aux(i,:)=amp_list_peaks;

        TOF_highest_peak_aux(i,:)=TOF-
(Tr/2)+mean(pos_maximo/(fsr))-
length(codigo_kasami_modulado_subsamp)/fsr;;

        Highest_peak_aux(i,:)=max_peak;

%           First_peak_shift_aux(i,:)=TOF-
(Tr/2)+abs((distance/mean(c))-(list_peaks(1)/(fsr)));

        Expected_TOF_first_peak_aux(i,:)=distance/mean(c);

First_peak_shift_aux(i,:)=abs(Expected_TOF_first_peak_aux(i,:)*1000-
TOF_first_peak_aux(i,:));

end
peaks_detected_avg = mean(peaks_detected_aux);
TOF_first_peak_avg = mean(TOF_first_peak_aux);
First_peak_shift_avg=mean(First_peak_shift_aux);
Highest_peak_avg=mean(Highest_peak_aux);
Amplitude_first_peak_avg=mean(Amplitude_first_peak_aux);
TOF_highest_peak_avg=mean(TOF_highest_peak_aux);
Expected_TOF_first_peak_avg=mean(Expected_TOF_first_peak_aux);

peaks_detected_std=std(peaks_detected_aux);
TOF_first_peak_std=std(TOF_first_peak_aux);
First_peak_shift_std=std(First_peak_shift_aux);
Highest_peak_std=std(Highest_peak_aux);
Amplitude_first_peak_std=std(Amplitude_first_peak_aux);
TOF_highest_peak_std=std(TOF_highest_peak_aux);
Expected_TOF_first_peak_std=std(Expected_TOF_first_peak_aux);

assignin('base','peaks_detected_avg',peaks_detected_avg);
assignin('base','TOF_first_peak_avg',TOF_first_peak_avg);

assignin('base','Amplitude_first_peak_avg',Amplitude_first_peak_avg);
assignin('base','TOF_highest_peak_avg',TOF_highest_peak_avg);
assignin('base','Highest_peak_avg',Highest_peak_avg);

```

```

    assignin('base','First_peak_shift_avg',First_peak_shift_avg);

assignin('base','Expected_TOF_first_peak_avg',Expected_TOF_first_peak_avg);

    assignin('base','peaks_detected_std',peaks_detected_std);
    assignin('base','TOF_first_peak_std',TOF_first_peak_std);

assignin('base','Amplitude_first_peak_std',Amplitude_first_peak_std);
    assignin('base','TOF_highest_peak_std',TOF_highest_peak_std);
    assignin('base','Highest_peak_std',Highest_peak_std);
    assignin('base','First_peak_shift_std',First_peak_shift_std);

assignin('base','Expected_TOF_first_peak_std',Expected_TOF_first_peak_std);

    set(handles.text59,'string',TOF_first_peak_avg/1000);
    set(handles.text60,'string',peaks_detected_avg);
    set(handles.text61,'string',Amplitude_first_peak_avg);
    set(handles.text63,'string',TOF_highest_peak_avg/1000);
    set(handles.text68,'string',Highest_peak_avg);
    set(handles.text70,'string',Expected_TOF_first_peak_avg);
    set(handles.text72,'string',First_peak_shift_avg);

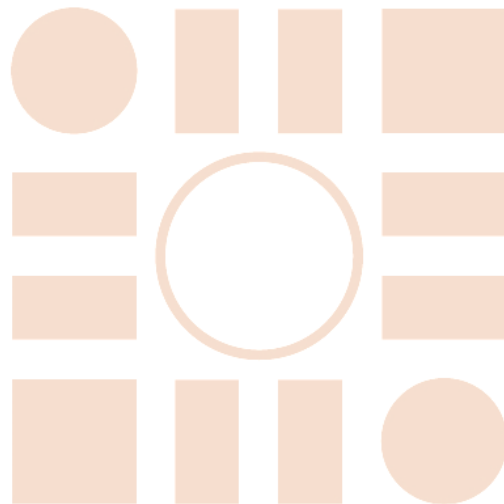
    set(handles.text82,'string',peaks_detected_std);
    set(handles.text83,'string',TOF_first_peak_std/1000);
    set(handles.text84,'string',Amplitude_first_peak_std);
    set(handles.text86,'string',TOF_highest_peak_std/1000);
    set(handles.text87,'string',Highest_peak_std);
    set(handles.text89,'string',First_peak_shift_std/1000);

    SMR_avg_code=mean(SMR);
    SMR_std_code=std(SMR);

    set(handles.text62,'String',SMR_avg_code);
    set(handles.text85,'String',num2str(SMR_std_code));

```

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá