

Formato de Presentación

ACIPET

Diseño e implementación de un sistema acústico que permita determinar el impacto del ruido en la fauna marina.

Autor(es):

H Guarín - MM Barrios Bert Instruments Colombia

Categoría: Marque con una "X"

- Artículo Técnico
- Tesis Pregrado
- Tesis Posgrado

Derechos de Autor 2022, ACIPET

Este artículo técnico fue preparado para presentación en el XIX Congreso Regional Colombiano de Petróleo, Gas y Energía organizado por ACIPET en Cartagena, Colombia.
Este artículo fue seleccionado para presentación por el comité técnico de ACIPET, basado en información contenida en un resumen enviado por el autor(es).

RESUMEN

El monitoreo de ruidos submarinos que estudia el impacto producido por una actividad antropogénica incluye tres componentes:

Grabación de ruidos in situ.

Modelación de propagación acústica.

Evaluación de los impactos en la fauna marina a la exposición del ruido.

Primero se debe determinar la línea de base acústica antes de empezar cualquier actividad que genere ruido submarino que pueda afectar la fauna y luego se debe monitorear la generación de ruido durante los trabajos de construcción o instalación.

En nuestra compañía ubicada en Cartagena de Indias, se desarrolló el hardware necesario para grabar en alta fidelidad los ruidos submarinos desde unas horas hasta varios meses. Se construyeron varios anclajes los cuales incluyen lastre, sistemas de flotación, liberadores acústicos y equipos de grabación submarina utilizando hidrófonos omnidireccionales. 1

Se montó uno de los sistemas de grabación de ruido acústico en un equipo de operación remota o ROV para poder perfilar el ruido submarino a varias profundidades en la columna de agua, además permite la grabación de videos 4K y toma de fotografías de alta resolución del hábitat marino donde se están haciendo las mediciones para complementar las imágenes tomadas con el sonar de barrido lateral.

Se construyó un sistema de grabación en tiempo real conectado directamente al buque para tener un sistema de respaldo de datos en caso de pérdida de los anclajes.

Se desarrolló un software para la modelación de propagación acústica utilizando el modelo de propagación de ecuaciones parabólicas utilizando el algoritmo de Split Step con transformadas de Fourier desarrollado por el Dr. Fred Tappert de la Universidad de Miami y se implementaron otros modelos de propagación acústica para poder determinar los niveles de presión acústica generada por una fuente para poder construir mapas del paisaje submarino y determinar los niveles de ruido en cualquier punto del área bajo estudio.

Se han desarrollado las herramientas necesarias para evaluar los efectos de instalación de cables submarinos, instalación de plataformas petroleras, anclajes, operación de generadores eólicos, operaciones de dragado y cualquier operación que genere ruidos que puedan afectar los mamíferos en particular y vida marina en general.

RUIDO AMBIENTAL EN EL OCEANO

El ruido de fondo en el ambiente marino esta compuesto por ruidos geofísicos, biológicos y ruidos hechos por el hombre denominados antropogénicos.

Los ruidos geofísicos incluyen el sonido atribuido a los procesos geofísicos como el viento, lluvia, acción de las olas y terremotos.

Los sonidos producidos por los animales marinos o sonidos biológicos se pueden asociar con comportamientos específicos para cada especie tales como comunicación, navegación, búsqueda y reproducción y está basado en las especies que producen sonidos como indicadores de la salud del ecosistema.

Entre los ruidos antropogénicos, se encuentran los producidos por buques comerciales, botes recreacionales, la exploración de gas y petróleo, sonares, instalación de pilotes, cables, construcción y explosiones submarinas. Durante los últimos 50 años estos ruidos han aumentado considerablemente.

Los mamíferos y especies marinas se han visto severamente impactados incluyendo un sustancial aumento en el estrés, sordera, y cambios de comportamiento.

FUENTES DE RUIDO ANTROPOGENICO

La actividad antropogénica responsable por la mayor contaminación sonora en el océano es la operación de buques de carga, recreacionales, de contenedores, tanqueros y otros como ruido radiado a través del casco y cavitación de los sistemas de propulsión. Aproximadamente hay 60,000 buques de mediano y gran calado. El ruido que ellos producen un sobrelap a los sonidos de bajas frecuencias que utilizan las ballenas para comunicarse entre ellas con sus críos, para mantener sus relaciones sociales, para navegar y orientarse en el océano, alimentarse, para buscar parejas para procrearse y para detectar predadores. Este ruido no afecta solamente a las ballenas sino a los mamíferos y vida animal en el océano.

Otras fuentes de ruido incluyen la instalación de pilotes para obras portuarias, instalación de cables submarinos para la transmisión de datos, construcción de puentes, operaciones de dragado para mantener los canales de navegación, y para la extracción de arena y gravilla e instalación de tuberías. La construcción de parques eólicos marinos son otro factor de generación de ruido el cual no solo entra directamente en la columna de agua, además viaja a través del subsuelo marino durante su instalación y operación en niveles más moderados.

Durante la fase de exploración petrolera se usan buques con potentes cañones de aire o *Air Guns*, los cuales crean ruidos submarinos de muy alta intensidad para que penetren las diferentes capas profundas permitiendo visualizar los posibles yacimientos. Estas operaciones están reguladas internacionalmente para que antes de comenzar a generar ruido varios observadores confirmen la ausencia de ballenas, delfines y mamíferos en el área por media hora antes de comenzar labores las cuales empiezan a bajos niveles aumentando gradualmente la potencia de salida para dar la oportunidad a los mamíferos para retirarse del área y evitar lesiones.

La generación de ruidos por la industria petrolera no termina con las pruebas sísmicas las cuales identifican los posibles depósitos para luego empezar las fases de instalación de plataformas para la perforación del pozo y la extracción en caso de encontrar hidrocarburos.

A través de los años se ha creado una conciencia internacional para determinar, controlar y minimizar los efectos del ruido antropogénico en el medio ambiente marino con una gran mayoría de países introduciendo legislación y parámetros a seguir para minimizar los efectos del ruido en la vida marina, países entre los que se cuenta Colombia donde las autoridades gubernamentales han introducido normas y regulaciones para preservar la salud y bienestar de la vida marina en nuestros dos océanos y cuerpos de agua.

MONITOREO DE RUIDO SUBMARINO - LINEA DE BASE ACÚSTICA

Escuchando el campo de sonido ambiental submarino se puede obtener una gran cantidad de información relacionada a la dinámica del océano y actividad humana para generar un paisaje acústico. Este paisaje submarino es la adición de las fuentes de sonido que llegan a

un receptor ya sea un equipo de grabación o un animal marino. La percepción de los sonidos depende de la contribución relativa de cada una de las diferentes fuentes, su dirección, propagación, capacidades auditivas del oyente y su historia con sonidos similares (1).

Las medidas de línea de base se deben llevar a cabo antes de que comencen las actividades y trabajos en el océano para poder caracterizar el ruido de fondo o *background noise* y así poder conocer el ruido existente en el área. Las líneas de base se utilizan como referencia para poder comparar la cantidad de ruido introducido durante la instalación de equipos o estructuras. Estas medidas se deben hacer durante largos periodos de tiempo y en diferentes estaciones secas y de lluvias. Debido a los altos costos de equipos y personal esta solución ideal no es práctica por lo que se hacen medidas durante algunas semanas en diferentes estaciones como un compromiso para tener un paisaje acústico representativo.

El monitoreo de ruido submarino se hace por medio de hidrófonos conectados a equipos de grabación en un sistema pasivo los cuales son procesados por medio de software especializado y analizados por biólogos marinos especializados.

Inicialmente la unidad denominada Bel se introdujo para representar la cantidad de potencia perdida, debido a la resistencia de un cable eléctrico y como era una unidad muy grande se decidió utilizar la décima parte por lo que se llamó el decibel (dB). La ganancia (o pérdida) de un sistema se suele expresar como un radio logarítmico de la intensidad de la señal de salida a la intensidad de la señal de entrada.

La métrica básica en acústica submarina es la presión acústica denominada nivel de presión del sonido la cual es medida en dB relativos a 1 μ Pa (micro Pascal). Se tienen otras métricas como son el conteo de especies, intensidad de las llamadas y número de vocalizaciones entre otras.

Se debe caracterizar el medio marino haciendo medidas para generar una línea de base en el área de influencia del proyecto para lo cual se debe determinar la ubicación de zonas sensibles para colocar los anclajes. Se deben incorporar los análisis de los valores de ruido ambiente por el tráfico marino y estado del mar.

De acuerdo con el espectrograma obtenido es posible identificar la especie produciendo la vocalización comparándola con una base de datos o analizándola por un biólogo marino con experiencia en vocalizaciones.

El sonido oceánico ha sido reconocido internacionalmente como una variable esencial del océano para comprender la biología y los ecosistemas marinos por el Panel de Biología y Ecosistemas del Sistema Mundial de Observación de los Océanos (GOOS) (2) y por la convocatoria cuerpo de la Estrategia de Observación del Océano Profundo (3).

La Organización Internacional de Normalización desarrollo la norma ISO 18405 sobre terminología acústica subacuática (4) para ayudar a garantizar que las mediciones de investigación sean repetibles y consistentes en todos los proyectos. Se han convocado una serie de talleres de modelado y mediciones de sonido en el océano con el fin de definir la metodología para analizar los datos acústicos submarinos y presentación de resultados para que se puedan hacer comparaciones válidas entre paisajes sonoros e identificar las tendencias de sonido ambiental en el océano, entre estudios que utilizan diferentes equipos de grabación, protocolos de medición y métodos de procesamiento de señales. Teniendo en cuenta que los paisajes sonoros son inherentemente tridimensionales, son función del tiempo y varían en muchas escalas espaciales y temporales.

Los mamíferos marinos, tortugas y peces son afectados por la generación de ruido debido a los trabajos de perforación, pilotaje, tendido de cable submarino, etc, Por eso se deben tener en cuenta:

- Distancia a la cual se encuentra el umbral de perturbación del comportamiento
- Audiogramas (sensibilidad auditiva a las diferentes frecuencias) para cada especie y clasificación de especies según su capacidad auditiva a las diferentes frecuencias
- Clasificación de las especies de mamíferos marinos y tortugas identificadas según su grupo funcional auditivo
- Para cada uno de los grupos de peces, determinar su vulnerabilidad al sonido con base en sus características fisiológicas, de manera que puedan ser clasificadas de la siguiente forma:
 - Vulnerabilidad alta al sonido
 - Presencia de aparatos auditivos especializados
 - Vulnerabilidad media al sonido: Especies con vejiga natatoria
 - Vulnerabilidad baja al sonido: especies sin vejiga natatoria

Como no existía ninguna compañía Colombiana con capacidad de hacer estudios de propagación acústica, generación de líneas de base acústica, verificación de fuentes de sonido y monitoreo durante operaciones las cuales se debían contratar en el exterior a unos precios bastante elevados, Bert Instruments Colombia S.A.S. con base de operaciones en Cartagena de Indias, vió una ventana de oportunidad para presentar una solución global transfiriendo tecnología de punta al país utilizando nuestra infraestructura, profundos conocimientos del tema y capacidades demostradas de diseño electrónico y mecánico para aguas someras, intermedias, profundas y ultra-profundas.

GRABADORA DE DATOS



Ilustración 1. Grabadora de datos con hidrófono intercambiable.

La primera fase para ofrecer una solución integral consistió en el diseño y fabricación de una grabadora de ruido submarino con un hidrófono externo intercambiable con una sensibilidad de 170 dBV re:1 μ Pa, con capacidad de grabar señales acústicas de banda ancha con tasas de muestreo hasta de 200 kilohertz y guardarlas en memoria de estado sólido para minimizar el consumo de potencia, operada por medio de baterías con capacidad de adquirir datos continuamente o con un ciclo de operación variable donde el sistema se despierta, toma datos por un tiempo pre-determinado y vuelve a dormir para repetir ese ciclo durante la duración del proyecto.

La electrónica se introduce en un tubo sellado con capacidad de soportar presiones a profundidades hasta de 1,000 metros con la opción de usar un tubo certificado para operación a 3,500 metros, en caso de ser necesario para monitorear proyectos en aguas ultra profundas. Ilustración 1.

Las grabaciones obtenidas son analizadas por un biólogo marino especializado en reconocimiento e identificación de vocalizaciones animales. Los datos son procesados para la creación de una línea de base acústica y la creación de modelos de propagación acústica.

SISTEMA DE ANCLAJE

Para medir y cuantificar el ruido submarino se instalan uno o varios anclajes con estaciones de grabación aproximadamente a 10 metros del lecho marino. Estos anclajes pueden estar conectados a la superficie por medio de una boya para conocer su posición en el momento de recuperarlos. Se puede añadir un sistema de radio telemetría a una boya que envía los datos en tiempo real a una estación remota.

Desafortunadamente al marcar la ubicación del anclaje con una boya visible en la superficie se aumenta exponencialmente la posibilidad del robo de esta por personas inescrupulosas. Para prevenir esta situación donde no solo se pierden los equipos sino los datos adquiridos con considerables costos de buque, preparación y personal, creando serios retrasos en el proyecto se ha diseñado un anclaje con liberadores acústicos (*Acoustic Releases*) donde la boya superior se encuentra de 10 a 20 metros del lecho marino como se puede observar en la ilustración No. 2.

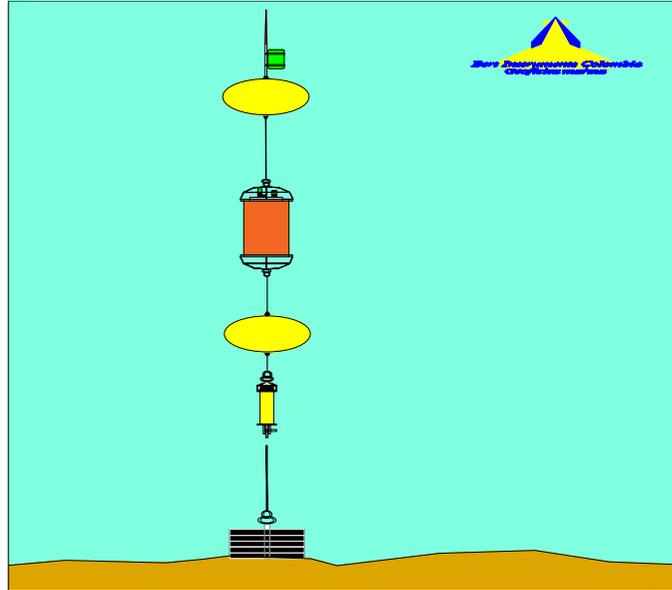


Ilustración 2. Sistema de anclaje

El sistema tiene un lastre unido por una cadena al grillete electromecánico del liberador acústico, el cual va conectado a una boya de flotación y una línea a la parte inferior del sistema de grabación y en su parte superior una línea con otra boya de flotación para terminar en un sistema posicionador que se activa al llegar a la superficie.

Un sistema de liberación acústica consiste, en una consola de superficie que tiene conectado un hidrófono omnidireccional colocado en el agua sobre la borda del buque y un sistema de liberación operado acústicamente conectado al equipo de grabación con una o varias boyas creando una flotabilidad positiva contrarrestada por un lastre desechable.



Ilustración 3. Consola de control con hidrófono y liberador acústico

A través del hidrófono, la consola de control se comunica con el liberador por medio de una serie de pulsos acústicos utilizando una técnica denominada *handshake*, esta técnica es un proceso de negociación que establece las normas de comunicación entre la consola y el liberador acústico enviando varios mensajes. El primer mensaje interroga al liberador acústico el cual responde reconociendo la interrogación. Se introduce el código de liberación en la consola de superficie que envía el comando de apertura al liberador para que abra el grillete electromecánico, este grillete suelta la cadena que lo une al lastre y la boya de flotación lleva al sistema hacia la superficie donde se activa un localizador para recuperar el equipo.

Los anclajes con las grabadoras, por lo general operan continuamente durante 15 días desde su lanzamiento hasta su recuperación y tienen la capacidad de operar continuamente por varios meses en caso de ser necesario. Como una medida de seguridad, debido a la alta

probabilidad que se roben o se pierda el equipo, se tiene a bordo del buque un sistema redundante con el que se graban datos en diferentes estaciones a lo largo de una ruta pre-determinada para así tener grabaciones de respaldo en caso de pérdida de los anclajes.

A bordo del buque se tiene un equipo de operación remota, ROV, el cual se utiliza para grabar videos y fotografías alrededor de los puntos donde se han instalado los anclajes para conocer visualmente su entorno utilizando dos cámaras de video tipo 4K con capacidad de grabar imágenes de 23 megapíxel. Este ROV además se utilizará para amarrar una línea de vida al anclaje para su recuperación en caso de que el liberador acústico falle y no abra el grillete electromecánico para así poder izar el equipo y recuperar el sistema con los datos.

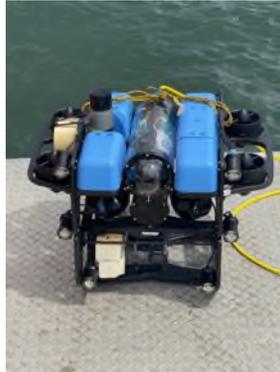


Ilustración 4. ROV con posicionador subacuático USBL

El ROV tiene 8 motores, 6 luces tipo LED con 9,000 lumen y un sistema de posicionamiento subacuático tipo USBL para conocer en coordenadas geográficas su posición en el lecho marino.

LABORES DE CAMPO

Previo al comienzo de labores de campo, un equipo de ingenieros acústicos, electrónicos, mecatrónicos y mecánicos, ejecutan las labores de calibración y pruebas en nuestro laboratorio en Cartagena, luego los equipos se montan en el buque y se hacen pruebas de mar antes de zarpar.

Una vez en el sitio de monitoreo y antes de comenzar operaciones, se hace una calibración utilizando un “pistonphone calibrator” con un nivel de señal conocido. De esta manera se conocerán las ganancias del sistema para el post procesamiento y además poder verificar la correcta operación del equipo y conocer los ruidos generados por el buque.

Se graban continuamente las muestras con un alto ancho de banda y un *duty cycle* programable. Los datos se graban en memorias de estado sólido para minimizar el consumo de potencia.

Al terminar la fase de adquisición de datos el equipo es recogido, subido a bordo y los datos se analizan para generar el paisaje acústico, calcular la densidad de potencia espectral y niveles de presión de banda ancha. Nuestro software calcula los niveles ambientales de sonido y la detección de ruido antropogénico y natural.

MODELACION DE PROPAGACION ACUSTICA

Las mediciones puntuales suministran una información bastante localizada por lo que es bastante difícil cubrir un área grande del océano por lo que se debe recurrir al modelaje acústico, para poder producir mapas de niveles de presión del sonido en cualquier punto del volumen de océano observado.

Existe un gran número de modelos acústicos que se pueden correr en una computadora los cuales tienen como entrada la velocidad de sonido en el agua y capas del subsuelo, propiedades geoacústicas y geometría del emisor y el receptor las cuales describen las propiedades físicas del océano y con esta información se buscan soluciones a la ecuación de onda con el fin de generar mapas de los niveles de presión del sonido para un volumen grande.

Para poder describir el comportamiento del sonido de una manera aceptable es necesario tener datos aceptables del medio ambiente oceánico, los cuales incluyen medidas de la velocidad del sonido a lo largo de la columna de agua en varios puntos, datos batimétricos con un sistema monohaz o multihaz y temperatura de la columna de agua en diferentes puntos ya sea por medidas directas o de bases de datos. Es muy útil conocer las características del lecho marino utilizando un sonar de barrido lateral y datos geoacústicas de las diferentes capas del subsuelo que se obtiene con un perfilador de subsuelo. Además, se deben conocer los datos neteo-marinos para conocer la presión atmosférica, vientos, mareas y precipitación ya sea tomados directamente en el área o de bases de datos suministrados por la dirección marítima, DIMAR.

Los datos faltantes del medio ambiente se pueden obtener por medio de la inversión acústica (4), este es un procedimiento para determinar las propiedades físicas a partir de datos experimentales obtenidos en el campo para determinar un modelo físico al cual se introduce el ruido en el origen para así obtener un modelo del volumen total del océano bajo estudio.

Un buen modelo de propagación permite obtener mapas de ruido a diferentes profundidades en diferentes épocas del año, teniendo en cuenta las variaciones en el medio ambiente y en diferentes escenarios para poder analizar el impacto de una determinada fuente de sonido en cualquier punto, como función del espectro de frecuencia para poder evaluar sus efectos y el impacto potencial en la fauna marina presentes en el área durante la ejecución de los trabajos, las zonas de influencia, los perfiles de propagación del sonido y pérdidas por transmisión.

Los resultados del modelo se pueden utilizar en el proceso de obtención de los permisos necesarios para la ejecución de estos. La validez de estos modelos se verifica con los datos obtenidos durante las labores de construcción con el correspondiente conjunto de datos para poder verificar que se han cumplido con las normas internacionales en la generación de ruido submarino.

Para modelar la propagación acústica de señales sobre canales submarinos existen varios métodos para resolver numéricamente las ecuaciones de propagación entendiendo como canal el medio donde se propaga la señal.

En un canal de aguas someras las ondas acústicas viajan en un trayecto directo y también viajan rebotando desde la superficie al lecho marino. Para estimar la propagación se hacen unas consideraciones iniciales dónde la velocidad del sonido es constante y que la superficie y el lecho marino son suaves y así calcular las trayectorias de propagación. Una vez se determinen las trayectorias de propagación conocidas como trayectorias de rayos (*ray tracing*), la ubicación de la fuente, el receptor y la señal transmitida por la fuente se puede estimar la potencia recibida. Este tipo de propagación donde llegan al receptor múltiples rayos se conoce como propagación multi-trayectorias.

El estudio de modelado acústico define la fuente, estima las propiedades acústicas, y caracteriza los niveles de emisión y zonas de efectos acústicos potenciales (efectos perjudiciales y de comportamiento).

Para los estudios de propagación se utilizan varios modelos con un énfasis especial en la propagación utilizando el método de ecuaciones parabólicas del Dr. Tappert.

Entre los métodos para modelar la propagación acústica se pueden mencionar el modelo de Kraken, este es un modelo de modo normal (*normal mode*) (5, 6) para ambientes variables con el rango en coordenadas Cartesianas para fuentes en línea o coordenadas cilíndricas para fuentes puntuales.

El KrakenC (7) se utiliza cuando se tiene la parte real y la imaginaria haciendo el análisis como números complejos para ambientes variables con el rango. Se tiene el Scooter el cual es un modelo de campo rápido, basado en elementos finitos para calcular en ambientes independientes del rango el cual está basado en el cálculo directo de la integral espectral aproximando la presión y propiedades materiales aproximando por partes como elementos lineales.

El modelo Bellhop de trazado de rayos y haces Gaussianos (8) es un programa que calcula los campos acústicos en entornos oceánicos a través del trazado de haces, siendo el entorno un medio acústico con una velocidad del sonido que puede depender del alcance y la profundidad. En la ilustración No. 5 se observan los resultados obtenidos en profundidades hasta de 150 metros a una frecuencia de 200 Hz.

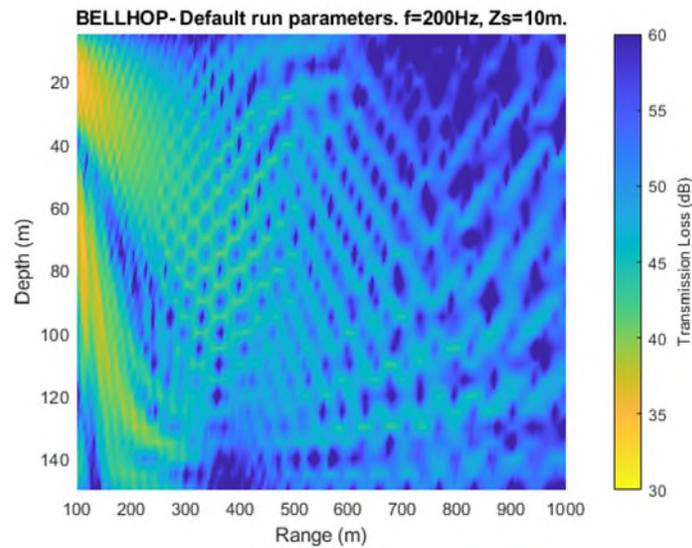


Ilustración 5. Propagación con modelo Bellhop

Nuestro método preferido para la modelación es el método de Ecuaciones Parabólicas con el Split Step Fourier Algorithm desarrollado por Tappert y Harding. Nuestro software utiliza nuestra súper computadora de 21 Terraflops (veinte un mil millones de millones de operaciones de punto flotante por Segundo o 21×10^{12} operaciones por Segundo)

Como Ingeniero Electrónico tuve la gran fortuna de tener al Dr. Frederick Tappert como mi profesor de acústica submarina durante mis estudios de doctorado en el departamento de Física Marina Aplicada en la escuela Rosenstiel de la Universidad de Miami (RSMAS), pues el Dr. Tappert desarrolló el modelo de ecuación parabólica (PE) y el Split-Step Fourier Algorithm para estudiar la propagación acústica en el océano el cual es el estándar de facto utilizado en la propagación de ondas en el océano y es considerado internacionalmente el padre del modelo de PE.

En desde 1989 hasta 1993 el Dr. Tappert en compañía de su estudiante Kevin Smith desarrollo el UMPE, *University of Miami Parabolic Equation Model* (9), modelo que ha sido mejorado a través de los años.

En la ilustración No. 6 se observa un resultado típico de la propagación utilizando el método de Split step para una fuente de 500 Hz a una profundidad de 32 metros (10).

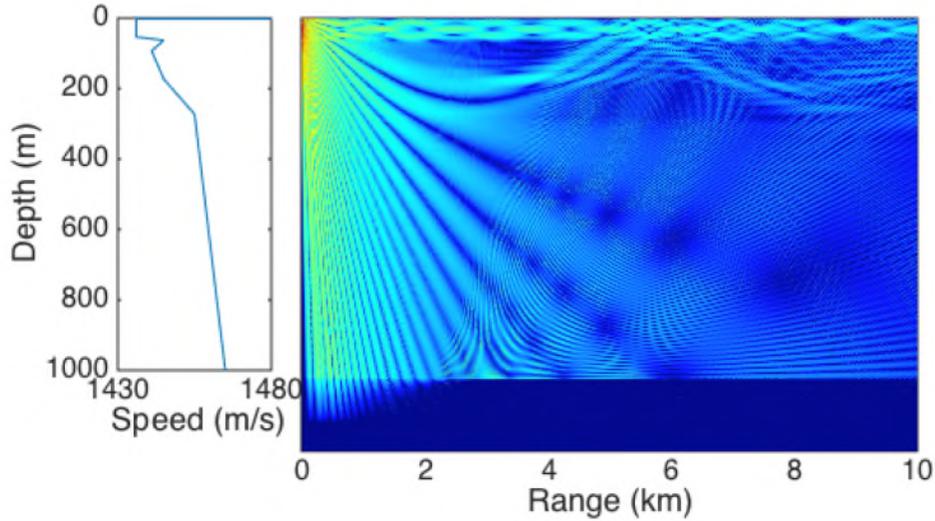


Ilustración 6. Modelo de propagación para una fuente de 500 Hertz a una profundidad de 32 metros (10)

PAISAJE ACÚSTICO SUBMARINO

Existen diferentes paquetes de software para determinar el paisaje submarino y poder extraer de las grabaciones datos para identificar las fuentes presentes, sus amplitudes individuales y sus interacciones para poder analizar como los animales perciben y responden a los sonidos.

En la ilustración No. 5 se puede observar la densidad de probabilidad espectral diaria con percentiles. Para obtener estos resultados se introducen los datos acústicos, generalmente como archivos tipo WAV los cuales incluyen la fecha y hora y la información de calibración del equipo utilizado para la grabación.

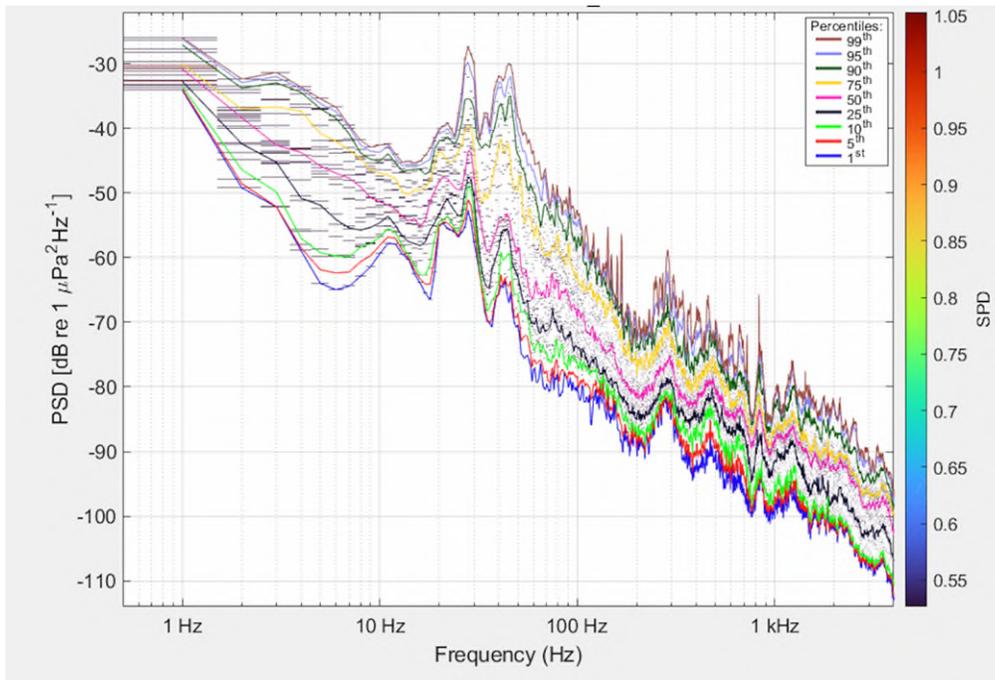


Ilustración 7. Densidad de probabilidad espectral diaria

En la ilustración No. 6 se observa la salida de un archivo tipo WAV de 16 bits tomada durante 24 horas.

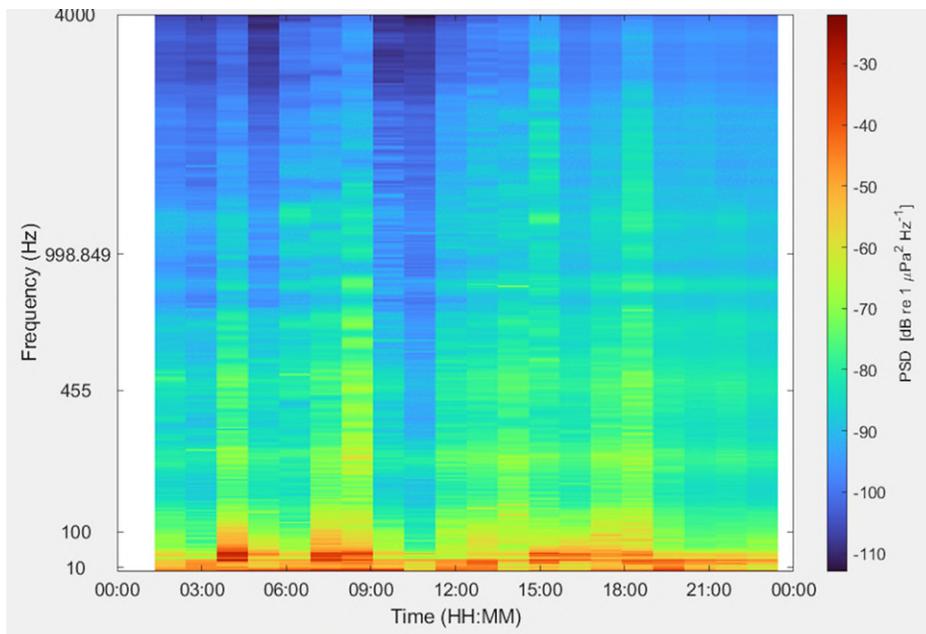


Ilustración 8. Salida archivo WAV de 24 horas de duración

Los hidrófonos capturan las señales acústicas las cuales se graban y estas se deben convertir a niveles de sonido RMS dB y niveles espectrales en dB utilizando transformadas rápidas de Fourier para promediar.

La ilustración No. 7 presenta el nivel espectral vs. la frecuencia de una señal hasta 100 kHz.

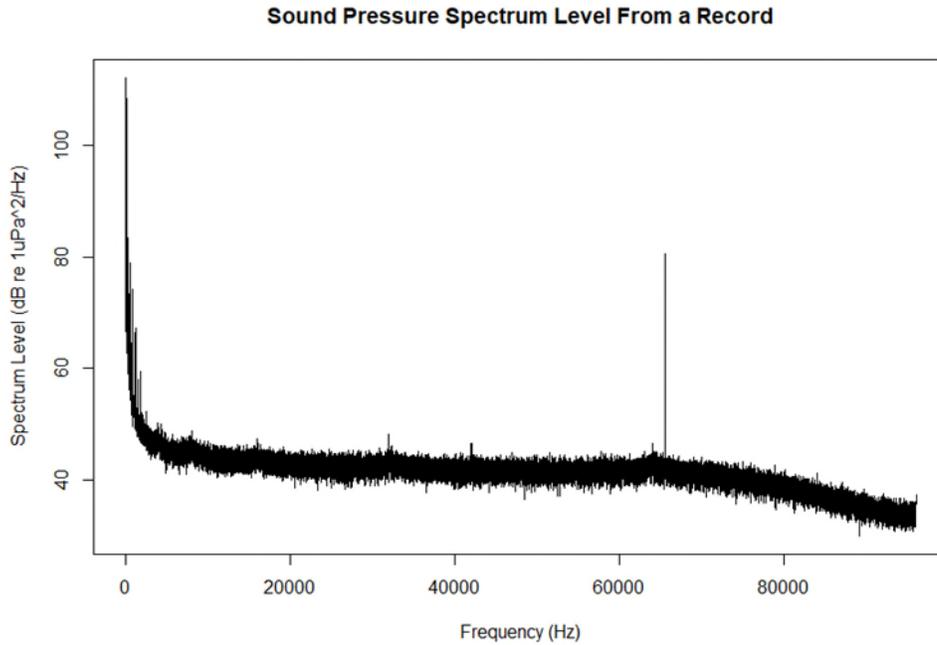


Ilustración 9. Niveles espectrales de la presión del sonido

Se debe tener en cuenta que los sensores no tienen la misma sensibilidad para todas las frecuencias, es decir, no tiene una respuesta de frecuencia plana por lo que la respuesta de cada sensor se debe ajustar utilizando filtros digitales para ajustar esta respuesta de frecuencia no lineal.

En la ilustración No. 8 se observa la gráfica de la sensibilidad del sistema vs. la frecuencia de respuesta.

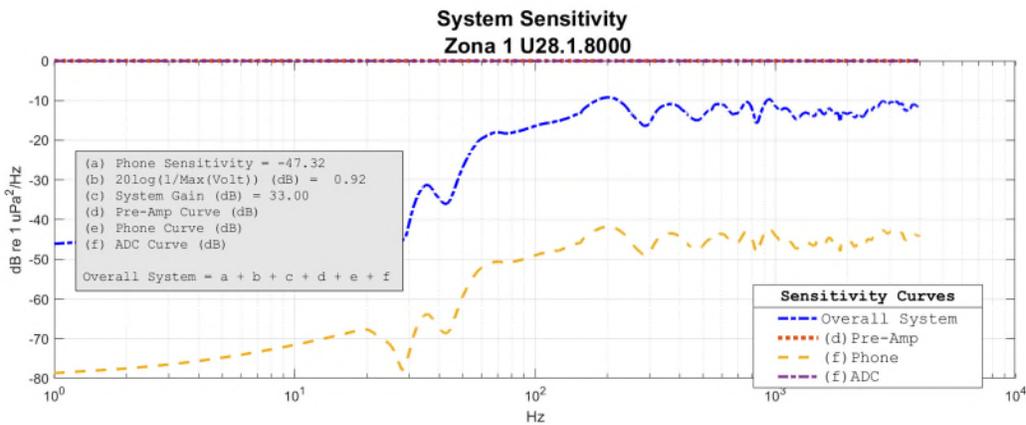


Ilustración 10 Corrección de frecuencia de respuesta

CONCLUSIONES

Se ha desarrollado el hardware necesario y se han construido varios sistemas de grabación de ruido submarino montados en anclajes individuales para poder medir y cuantificar la línea de base acústica, los cuales cuentan con un sistema de liberadores acústicos para mantener los sistemas cerca del lecho marino y su posterior recuperación.

Se ha montado un sistema de grabación acústica en un ROV el cual permite medidas en la columna de agua a diferentes profundidades y además permite la visualización, video grabación y levantamiento fotográfico del lecho marino para complementar las imágenes obtenidas con el sonar de barrido lateral para visualizar el hábitat de las especies marinas.

Se ha desarrollado el software necesario para poder modelar la propagación acústica utilizando el modelo de Ecuaciones Parabólicas Split Step del Dr. Tappert con el fin de generar mapas de niveles de presión acústica con los que se puedan evaluar los efectos del ruido generado durante proyectos de construcción sobre la fauna marina y se han implementado y evaluado diferentes paquetes de software para modelación acústica, hacer estudios de propagación acústica, generación de líneas de base acústica, verificación de fuentes de sonido y monitoreo durante operaciones. Todo lo anterior para la conservación de la fauna marina.

REFERENCIAS

- (1) Miksis, J. et Al. “*Exploring the Ocean through Soundscapes*”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 14, issue 1, pp. 26-34.
- (2) GOOS
- (3) Estrategia de Observación del Océano Profundo
- (4) D. F. Gingras and P. Gerstoft. “*Inversion for geometric parameters in shallow water: Experimental Results*”. J. Acoust. Soc. América, 97: pp. 3589–3598, 1995.
- (5) M.B. Porter, “*The KRAKEN normal mode program*,” Rep. SM-245, SACLANTSEN, La Spezia, Italy, 1991.
- (6) M.B. Porter and E.L. Reiss, “*A numerical method for bottom interacting ocean acoustic normal modes*,” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 77, pp. 1760-1767, May 1985.
- (7) M.B. Porter and E.L. Reiss, “*A numerical method for ocean-acoustic normal modes*” J. Acoust. Soc. Am., Vol. 76, pp. 244-252, July 1984.
- (8) M.B. Porter and H.P. Bucker, “*Gaussian beam tracing for computing ocean acoustic fields*,” J. Acoust. Soc. Amer., Vol. 82, pp.1349-1359, 1987.
- (9) Smith, Kevin B. and Frederick D. Tappert. “*UMPE: The University of Miami Parabolic Equation Model. Version 1.0.*” (1993).
- (10) S.D Frank and A.N. Ivakin, JASA, “*Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 30, 070003 (2017)*”

AGRADECIMIENTOS

Deseamos agradecer la colaboración del Ingeniero Elkin Ruiz en la evaluación e implementación de los diferentes modelos de propagación, y al Ingeniero Ronald Heredia en la construcción de los anclajes.