



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Conformación de un modelo
batimétrico de alta resolución
de la Bahía de La Paz**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Celia Gama Osorio

DIRECCIÓN DE TESIS

Dra. Ligia Pérez Cruz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos Académicos

A la *Universidad Nacional Autónoma de México*, por el apoyo brindado para poder estudiar desde el nivel bachillerato hasta la licenciatura, dándome la oportunidad del saber, obteniendo el conocimiento académico para desarrollarme profesionalmente, además del desarrollo personal que he tenido a lo largo de este tiempo, para ser una persona de bien.

A la *Facultad de Ingeniería*, que durante estos años me dio sabiduría, desarrollo personal, material y equipo para mi aprendizaje. Además de regalarme experiencias inolvidables en las instalaciones de la facultad, así como en las prácticas de campo.

A la *Dra. Ligia Pérez Cruz* por ser mi directora de tesis y dedicarme el tiempo para revisar la tesis así como darme la oportunidad de ir a dos campañas oceanográficas.

A mis sinodales, *Dra. María Adela Monreal Gómez*, *Dr. Osvaldo Sánchez Zamora*, *Dr. Joaquín Eduardo Aguayo Camargo* y *Dr. David Alberto Salas de León*, quienes se tomaron el tiempo de leer esta tesis, brindándome conocimiento y experiencia, por medio de sus comentarios, los cuales permitieron el mejoramiento de este trabajo.

A la *M. en C. Ana R. Escalante Ruíz* por dedicarme tiempo en corregirme la redacción de la tesis así como aclararme algunos términos.

A el *M. en C. Miguel Ángel Díaz Flores* por dedicarme el tiempo y explicarme así como asesorarme en el procesamiento de los datos de batimetría. Así mismo por enseñarme el proceso de adquisición de los datos en las campañas oceanográficas.

Al *Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, por el apoyo prestándome la llave física del software CARIS.

A *M. en C. Arturo Ronquillo* y al *M. en C. Francisco Ponce* por el apoyo y su enseñanza durante mi servicio social.

A la *tripulación de B/O Puma de la UNAM* por el apoyo que nos brindan al momento de maniobrar para la adquisición de los datos. Por hacerme sentir en casa y transmitirme sus conocimientos durante las campañas. De igual manera a la *tripulación de B/O Justo Sierra* ya que tuve la oportunidad de ir a una campaña oceanográfica en esta embarcación.

El desarrollo de este trabajo fue gracias al proyecto DGAPA-PAPIIT IN101012 "Estudio de la Hidrodinámica y Paleoceanografía en tres cuencas del Golfo de California".

Agradecimientos Personales

A la *vida*, al *universo* por permitirme cumplir mis sueños, dándome cada día más experiencias buenas que me hacen desarrollarme y ser la persona que soy y con esto poder trascender en la vida de los demás ayudando con el conocimiento, experiencias y amor, adquirido a lo largo de mi vida.

A *mi mamá, Irma Osorio* por ser una guerrera y sacarme adelante a pesar de las adversidades, dedicándome tiempo para mí desarrollo, dándome amor en cada momento, apoyarme en todo momento y en cada decisión que tomó, enseñarme a no vencerme a seguir mis sueños, gracias por darme la vida y no dejarme en ningún momento.

A *mi abuelito, Antonio Osorio* por el cariño que me ha brindado desde que nací, transmitirme su conocimiento que ha adquirido a lo largo de su vida, dándome su ejemplo y su apoyo incondicional.

A *Alfonso Hernández Pérez*, por brindarme apoyo constante, amor incondicional, conocimiento, esperanza, fuerza en cada momento de mi vida. Gracias por ser un compañero de vida.

A *mi familia* por ser parte fundamental en mi vida y por el apoyo que me brindan en todo momento.

A *cada uno de mis compañeros* con quienes conviví a lo largo de la carrera, de los cuales aprendí demasiado, no sólo académicamente sino también de manera personal, gracias por todas las experiencias buenas o malas de todas me llevo un aprendizaje.

A *mis compañeros del Acervo* en el laboratorio de Paleoclimas y Paleoclimas por la convivencia, conocimiento transmitido, experiencias, juegos y compañerismo que viví durante mi estancia.

Dedicada a mi madre y a mi abuelito

A la memoria de mi abuelita Celia Aranda por siempre ser la luz que ilumina mi camino.

“Cada vez que piensas que no puedes hacer algo,
alguien más piensa que si se puede”
Robert Kiyosaki.

“Si tú no luchas por tus sueños,
alguien te contratará para que trabajes por los suyos”
Steve Jobs.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	ii
RESUMEN.....	iii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Justificación.....	3
2. ÁREA DE ESTUDIO.....	3
3. ANTECEDENTES.....	8
3.1 Estudios previos en el área.....	8
3.2 Ecosondas	11
3.2.1 Ecosondas Monohaz.....	12
3.2.2 Ecosondas Multihaz.....	12
3.3 Propagación acústica en el mar.....	14
3.4 Velocidad del sonido.....	14
3.5 Reflexión y Refracción del sonido.....	15
4. MÉTODOS.....	17
4.1 Adquisición de los datos.....	18
4.2 Equipo	20
4.3 Procesamiento de datos batimétricos utilizando software CARIS HIPS y SIPS.....	22
4.3.1 Inicio del procesamiento de datos.....	22

5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	26
6. CONCLUSIONES.....	38
REFERENCIAS.....	40
ANEXO I.....	43
Glosario.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Bahía de la Paz en el Golfo de California.	4
Figura 2. A) Mapa batimétrico y, B) distribución de los sedimentos en la Bahía de la Paz (Modificado de Cruz-Orozco et al., 1996).	9
Figura 3. A) Transectos considerados en el levantamiento batimétrico de la Bahía de la Paz. B) Mapa batimétrico generado con 9,024 puntos de muestreo (Del Monte-Luna et al., 2005).	10
Figura 4. Cobertura de las ecosondas. A) multihaz. B) monohaz.	13
Figura 5. Principio de la reflexión.	16
Figura 6. Principio de la refracción (tomado de Bureau Hidrográfico Internacional, 2010).	17
Figura 7. A) Mapa de la trayectoria PALEOMAR I y, B) Mapa de la trayectoria PALEOMAR II.	19
Figura 8. Mapa de las trayectorias PALEOMAR I y PALEOMAR II, estudio completo.	20
Figura 9. Sistema de la ecosonda multihaz EM300 (1) arreglo de transductores transmisores y (2) arreglo de transductores receptores, (3) transceiver conectado con el sistema de posicionamiento y (4) consola de operaciones (modificado de Kongsberg SIMRAD AS, 2003).	21
Figura 10. Archivo de las medidas del barco.	23
Figura 11. Pasos para crear el proyecto. A) Apertura del proyecto, B) Añadir el proyecto con el nombre de la campaña o nombre que tengan los datos (esto es con el fin de tener organizados los proyectos), C) Añadir el archivo del barco y D) Añadir los días del levantamiento batimétrico.	24
Figura 12. Perfil de la marea en los días de las campañas oceanográficas.	25
Figura 13. Limpieza de los datos.	25
Figura 14. Datos limpios.	26
Figura 15. Mapa de la Bahía de La Paz con Batimetría.	27
Figura 16. Mapa batimétrico de la Bahía de La Paz empalme de las dos campañas oceanográficas Paleomar I y Paleomar II.	28
Figura 17. Cuenca Alfonso de color café junto con la Cuenca Lobos, los tres puntos negros que se observan son los umbrales, mientras que los puntos morados son los canales, y la zona azul es el escarpe.	29
Figura 18. Mapa batimétrico 3D rotado 180° hacia el Sur, umbrales marcados con flechas.	30
Figura 19. Mapa batimétrico 3D orientado NE-SW, flecha negra umbral, flecha naranja depresión y flecha rojas canales.	31
Figura 20. Mapa batimétrico 3D orientado E-W, flechas negras umbrales, flechas azules canales y flecha naranja escarpe.	32

Figura 21. Localización de los cuatro perfiles en la batimetría de la Bahía de la Paz. 33

Figura 22. A) Localización del perfil AB. B) Sección en 3D con escala de colores, la cual indica la profundidad en metros. C) Sección en 2D con la localización de los umbrales, la Cuenca Alfonso, Cuenca Lobos y una depresión. 34

Figura 23. A) Localización del Perfil CD. B) Sección en 3D con escala de color que representa la profundidad. C) Sección en 2D donde se localizan dos umbrales. 35

Figura 24. A) Localización del perfil EF. B) Sección en 3D con escala de color que representa la profundidad. C) Sección en 2D donde se localiza la Cuenca Alfonso dos umbrales y la depresión. 36

Figura 25. A) Localización del perfil GH. B) Sección en 3D con escala de color que representa la profundidad. C) Sección en 2D donde se localiza la Cuenca Alfonso y una pendiente ascendente. 37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de las masas de agua que se encuentran en la bahía de La Paz (Monreal-Gómez et al., 2001). 7

Tabla 2. Cuadro comparativo entre los estudios previos y éste. 11

Tabla 3. Rango de frecuencias utilizadas en la batimetría (tomado de Michaud et al., 2009). 14

Tabla 4. Resumen de los perfiles. 38

RESUMEN

En este trabajo se presenta el primer modelo batimétrico de alta resolución de la Bahía de La Paz y de la zona que comunica a ésta con la Cuenca de la Paz en el Golfo de California a través de Boca Grande. La adquisición de los datos batimétricos se realizó en las expediciones oceanográficas PALEOMAR I (2014) y PALEOMAR II (2016), en el contexto del proyecto "Estudio de la Hidrodinámica y Paleoceanografía en tres cuencas del Golfo de California". Para llevar a cabo la adquisición de datos se utilizó una ecosonda multihaz marca Simbrad-Kongsberg Modelo EM300. Los datos adquiridos se corrigieron con base en: 1) mediciones de la velocidad del sonido en la zona de estudio, 2) los registros de mareas de estaciones cercanas durante el periodo de levantamiento de datos y, 3) ajustes por el movimiento del buque. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software CARIS HIPS y SIPS versión 7.0 y posteriormente SURFER para obtener imágenes en 3D; así como, cuatro perfiles. Éstos permitieron identificar con mayor precisión algunos rasgos importantes en el piso marino. El levantamiento batimétrico se realizó en 245 transectos y está conformado por 52,647,910 datos puntuales, a partir de la isóbata de 50 m y hasta la isóbata de 900 m en la Boca Grande cerca de la Cuenca de la Paz. En la Bahía de la Paz las isóbatas más someras, de 50 y 75 m se localizaron en la porción sur, en las regiones cercanas a la península y a la zona de las Islas (Partida y Espíritu Santo). La profundidad aumenta gradualmente hasta alcanzar 420 m (Cuenca Alfonso). El perfil batimétrico que cruza Boca Grande desde las islas hasta el extremo de la península, se caracteriza por dos depresiones que alcanzan 430 m y 440 m (en Cuenca Lobos) y tres umbrales a 265, 315 y 245 m de profundidad de NW a SE, los que inhiben el paso de las aguas intermedias y profundas provenientes del golfo hacia el interior de la bahía. La región que abarca Boca Grande, en dirección hacia la Cuenca de La Paz, se caracteriza por un abrupto cambio en la batimetría, escarpe, en donde se observan profundidades de hasta 900 m. La topografía del fondo marino influye en la circulación oceánica, ya que dirige el flujo de agua y puede retener agua en las cuencas.

1. INTODUCCIÓN

En la exploración del lecho marino y de los márgenes continentales, se han usado métodos geofísicos siendo éstos, de importancia para la comprensión de la estructura de la Tierra. Estos métodos se han vuelto indispensables para los estudios de la geofísica marina.

En la geofísica marina existen diversas herramientas para su exploración, una de ellas son los métodos acústicos, los cuales se basan en el registro mediante receptores sensibles a las frecuencias de emisión características, de los instrumentos de los ecos del lecho marino (ecosondas).

Existen dos tipos de ecosondas, una es la monohaz y otra es la multihaz, la diferencia entre ellas es la cantidad de haces que emiten al fondo marino. En este estudio se utilizó una ecosonda multihaz.

El levantamiento batimétrico de la Bahía de la Paz en este estudio, se realizó en dos expediciones oceanográficas a bordo del B/O El Puma de la UNAM, en las expediciones oceanográficas (Paleomar I-2014 y II-2016) la ecosonda empleada fue una multihaz Simrad-Kongsberg EM300.

La Bahía de La Paz es el cuerpo costero más grande de Baja California Sur, tiene una significativa complejidad oceanográfica y una gran actividad pesquera y biológica con una alta productividad primaria; por estas razones es de gran interés científico y económico (Obeso-Nieblas, 2003). La bahía tiene como frontera dos islas: Isla Partida e Isla Espíritu Santo y gracias a su existencia, la bahía forma parte de un refugio que provee de alimento y sirve para el desove de diversas especies marinas, y presenta procesos biológicos y físicos importantes (Obeso-Nieblas et al., 2004).

La batimetría juega un papel importante en la dinámica oceanográfica de la bahía, en particular en la zona más profunda (Cuenca Alfonso), debido a que propicia la generación de un giro ciclónico que promueve un aumento en la

productividad primaria (Monreal-Gómez et al., 2001; Molina Cruz et al., 2002).

El conocimiento de la batimetría en la Bahía de La Paz, en el Golfo de California, es importante para el desarrollo económico, social y cultural del estado de Baja California Sur y del país, mismo que nos ayudará a realizar y a comprender diversas actividades para el aprovechamiento y la preservación de sus recursos.

Los estudios batimétricos previos que se han llevado a cabo en la Bahía de la Paz están limitados por la resolución de los equipos utilizados (generalmente ecosondas monohaz y GPS) y/o por la infraestructura (embarcaciones pequeñas), por lo que la resolución de los mapas generados es baja y está limitada principalmente a zonas someras. En el procesamiento de datos se omiten algunos parámetros de corrección como la corrección por marea; sin embargo, durante las últimas tres décadas el desarrollo de la tecnología ha sido de gran ayuda para desarrollar equipos con mayor resolución y para conocer a mayor detalle el fondo marino. La oceanografía o la dinámica marina se estudia desde varios puntos de vista, experimental, observacional y teórico, por lo que en los estudios de circulación mediante modelación numérica se requiere de una buena batimetría de la zona e estudio. Por lo que, en este estudio se propone realizar un mapa actualizado de alta resolución de la Bahía La Paz y su comunicación con el Golfo de California a través de Boca Grande, para llegar a Cuenca de la Paz que incluya, adquisición de datos multihaz, procesado de datos con software especializado, eliminando el efecto de la marea, desde los 50 m de profundidad y hasta los 700 m, con los siguientes objetivos:

1.1 Objetivos

Objetivo general

Conformar un mapa batimétrico de la Bahía de la Paz, Golfo de California, con base en datos de alta resolución obtenidos durante las campañas oceanográficas PALEOMAR I y PALEOMAR II.

Objetivos particulares

- Adquirir datos batimétricos de alta resolución de la Bahía de la Paz utilizando una ecosonda multihaz de 135 haces.
- Generar un mapa batimétrico detallado del área de estudio mediante el procesamiento, calibraciones y correcciones de datos.

1.2 Justificación

Como consecuencia de la baja resolución de los perfiles batimétricos hasta ahora disponibles se presentan discrepancias significativas entre las lecturas reales y las que se basan en los mapas disponibles, lo cual representa una limitante para diversos estudios y la navegación, por ello es importante contar con suficientes datos finos y elaborar un estudio detallado de la batimetría de la región tener una aplicación práctica.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de La Paz se encuentra ubicada al este de la Península de Baja California, a 200 km al norte de la boca del Golfo de California aproximadamente entre 24.15° y 24.97° de latitud N y 110.30° y 110.75° de longitud W (Figura 1). Tiene una longitud de 91 km y 60 km de ancho y un área de aproximadamente 4500 km² (Jiménez-Illescas et al., 1997).

La Bahía presenta una forma semi-elíptica y su eje mayor está en dirección nornoroeste-sursureste. Está limitada por tierra firme hacia el oeste y tiene contacto con el Golfo de California al noreste por medio de dos bocas; una es llamada Boca Grande, la cual constituye la zona principal de intercambio de agua. Boca Grande se ubica entre Punta Cabeza Mechudo y el extremo norte de Isla Partida. La segunda frontera abierta se conoce como Canal de San Lorenzo, se ubica al sureste, entre el extremo sur de la Isla Espíritu Santo y Punta Las Pillitas (Álvarez et al., 1997), este canal es muy estrecho y de poca profundidad (Molina-

Cruz, et al., 2002)

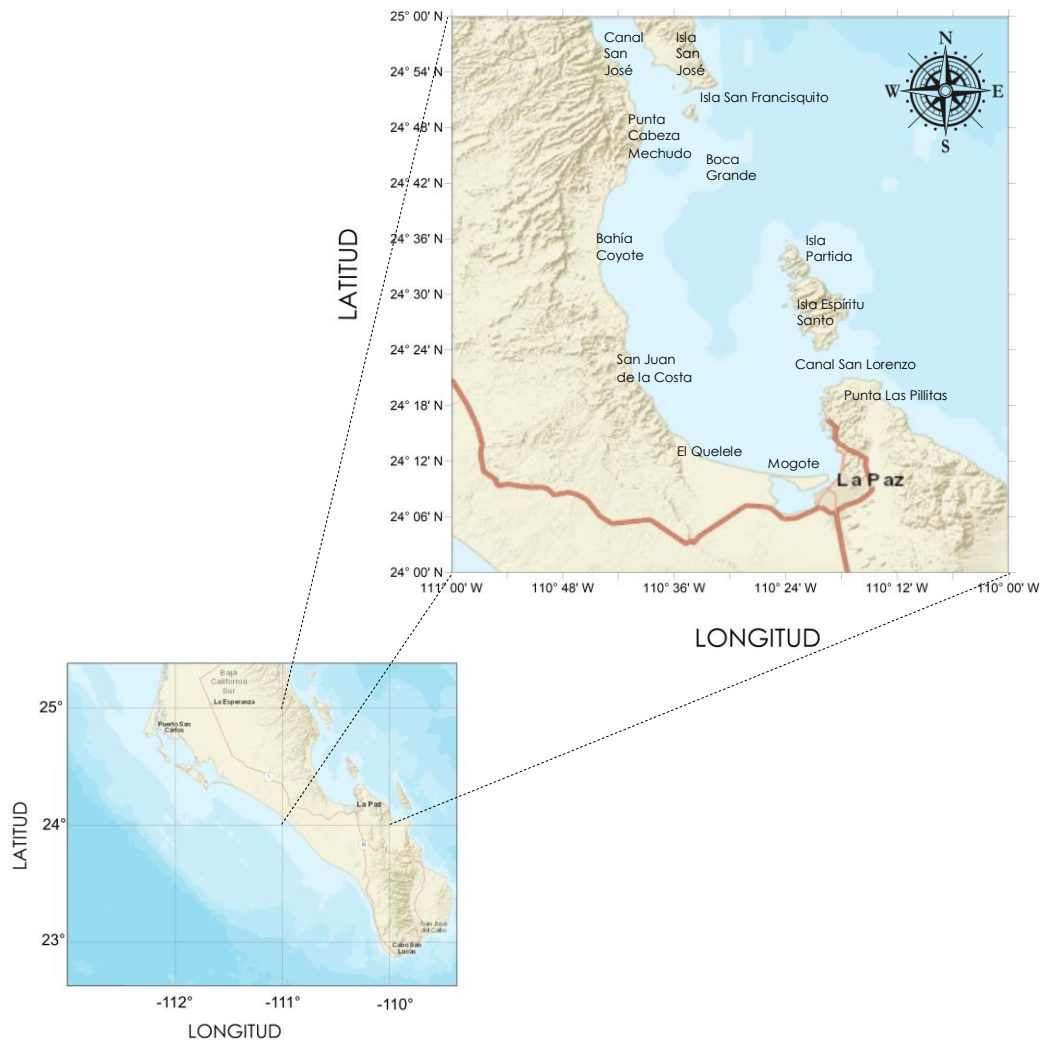


Figura 1. Localización de la Bahía de la Paz en el Golfo de California.

Al sur de la Bahía de La Paz se ha ido desarrollando una laguna costera conocida como “Ensenada de La Paz”, con profundidades muy someras, además de estar protegida de mar abierto por “El Mogote” que es una barrera arenosa. La laguna está comunicada con la Bahía de La Paz por medio de un canal formado entre la costa sur de la bahía y la barra arenosa (Álvarez et al., 1997). De igual manera la Ciudad de La Paz se encuentra al sur de la bahía (Figura 1).

En general, la Bahía de La Paz es más profunda al norte, mientras que al sur es más somera (Álvarez et al., 1997). Al noroeste de la bahía se ha descrito una región profunda de más de 400 m, separada por un umbral suave en la Boca Grande con una profundidad estimada de 250 m (Jiménez-Illescas et al., 1997). Mientras que al sur la profundidad va disminuyendo gradualmente hasta 2.6 m (Del Monte-Luna, 2005). El Canal San Lorenzo presenta una profundidad máxima de 19 m (Jiménez-Illescas et al., 1997).

La marea en la Bahía de La Paz tiene un comportamiento semi-diurno, es decir, cada ciclo de la marea presenta dos flujos y dos reflujos en un día, con discrepancias que se atribuyen principalmente al viento (Obeso-Nieblas et al., 1993). De igual manera que la mitad sur del Golfo de California, el reflujo más intenso se encuentra entre la pleamar superior y la bajamar inferior, por lo tanto, las corrientes de marea son fuertes, aún más fuertes que las de flujo. Esto ocasiona que los canales de las lagunas costeras de la bahía se mantengan sin azolve (Jiménez-Illescas et al., 1997).

Los patrones de viento que se presentan son del noroeste, del norte y del suroeste. Los vientos del noroeste son conocidos regionalmente como "Coromuel", los vientos del norte como "Nortes" y los del suroeste como "Coyas" (Obeso-Nieblas et al., 2002).

La humedad relativa es de 50% durante el día, provocado por un clima semidesértico (Jiménez-Illescas et al., 1997). Las lluvias son muy escasas a lo largo del año, más en invierno y primavera, mientras que la precipitación máxima se presenta entre los meses de julio y octubre, lo cual está relacionado con los huracanes, vientos del suroeste y tormentas tropicales (Obeso-Nieblas, 2003). La circulación de los cuerpos de agua es determinada principalmente por las mareas y por los vientos estacionales de la región (Reyes-Salinas et al., 2003). Durante los vientos del norte el flujo costero gira en sentido contrario a las manecillas del reloj a la altura de El Mogote, estableciéndose una condición de

reflujo permanentemente por el Canal San Lorenzo y en la parte norte de la Isla Partida; lo que produce dos zonas de divergencia, una de ellas en la parte oeste de la Isla Espíritu Santo y otra en la costa sur del Canal de San Lorenzo. Cuando se presentan los vientos del sur, pareciera que la bahía se dividiera en dos zonas y aparentemente se generan tres giros, dos de ellos en sentido de las manecillas del reloj a la altura de El Quelele, desarrollando una zona de divergencia frente a la playa norte de El Mongote y el otro giro, con sentido antihorario, en la costa oeste de la Isla Espíritu Santo y la Isla Partida. Los vientos generan un reflujo continuo por el Canal San Lorenzo (Obeso-Nieblas et al., 2002).

La precipitación promedio anual es de 180 mm y la evaporación promedio anual es de 300 mm, lo que quiere decir que la evaporación excede a la precipitación y esto conlleva al aumento de salinidad, además de que el aporte permanente de agua dulce es habitualmente nulo (Jiménez-Illescas et al., 1997).

Las corrientes de menor intensidad se presentan en la parte más profunda de la bahía y debido a la presencia de la alta productividad en la cuenca, se beneficia la existencia de sedimentos laminados (Jiménez-Illescas et al., 1997).

Un mecanismo importante en la bahía es la fertilización, la cual es provocada por el giro ciclónico en gran parte del invierno, ayudado por los vientos del noroeste, puesto que el giro ciclónico causa divergencia superficial y afloramientos. Al momento que se invierten los vientos de noroeste a suroeste, se daría un giro anticiclónico ubicado entre la punta sur de la Isla Espíritu Santo y San Juan de la Costa. Este giro provocaría una convergencia superficial, por lo tanto, existiría un hundimiento de la termoclina y de la picnoclina (Jiménez-Illescas et al., 1997).

En verano se presentan tres masas de agua en la Bahía de La Paz: Agua del Golfo de California (AGC), Agua Superficial Tropical (AST), Agua Subtropical Subsuperficial (AStSs), (Monreal-Gómez et al., 2001) (Tabla1). Mientras que en otoño e invierno se presentan dos masas de agua en la parte profunda de la bahía; Agua del Golfo de California (AGC) y Agua Subtropical Subsuperficial

(AStSs). A finales de primavera se han observado AGC y AStSs con el arribo de Agua Superficial Tropical (AST) en la costa sureste de la Boca Norte (Obeso-Nieblas et al., 2014). La Bahía de La Paz cuenta con un umbral batimétrico a lo largo de Boca Grande el cual impide la intrusión de Agua Intermedia del Pacífico (AIP) que se encuentra en la región adyacente al Golfo de California (Castro et al., 2006; Obeso-Nieblas et al., 2007). Este umbral también puede obstruir la entrada de agua profunda al Golfo de California y por consecuencia ayuda a disminuir el contenido de oxígeno del agua profunda de la Bahía de la Paz (Obeso-Nieblas et al., 2014).

Masas de agua	Salinidad y Temperatura
AGC	Salinidad ≥ 35.00 , Temperatura $>12^{\circ}\text{C}$
AST	Salinidad < 35.00 , Temperatura $\geq 18^{\circ}\text{C}$
AStSs	$34.50 < \text{Salinidad} < 35.00$, $9^{\circ}\text{C} < \text{Temperatura} < 18^{\circ}\text{C}$

Tabla 1. Características de las masas que se encuentran en la bahía de La Paz (Monreal-Gómez et al., 2001).

En la Bahía de La Paz el tipo de estructura termohalina en la parte profunda de la bahía se forma mediante un equilibrio, por parte del comportamiento de los procesos atmosféricos (insolación, evaporación, precipitación y mezcla) y el intercambio de agua con regiones adyacentes de mar abierto (Boca Grande). Es de esperar que en la parte norte de la bahía (parte profunda) la influencia de las aguas del Golfo de California sea más intensa que en la parte sur (parte somera), ya que los procesos locales son los que dominan (Salinas-González et al., 2003).

3. ANTECEDENTES

3.1. Estudios previos en el área

Los trabajos de batimetría en la bahía de la Paz que han sido publicados son muy pocos. La mayoría de éstos son de baja resolución, utilizando equipos GPS y ecosonda monohaz (Tabla 2), con ciertas limitaciones como la cobertura espacial y el no considerar las correcciones pertinentes, p. ej., correcciones por marea (Tabla 2).

Uno de los primeros estudios de batimetría en la Bahía de la Paz fue realizado por Cruz-Orozco et al. (1996). Los autores llevaron a cabo un levantamiento batimétrico en la bahía en 1985, a bordo del guardacostas "Santos Degollado" de la Armada de México. En ese estudio se empleó una ecosonda del tipo monohaz marca Furuno modelo FE-MK-II, que es un sistema para aguas poco profundas. Los autores mencionan en este trabajo que el procesamiento de los datos fue limitado.

Los resultados de este estudio (Figura 2) evidencian la presencia de zonas someras, con pendientes suaves que se consideran como resultado de la sedimentación del material transportado por medio de los arroyos y mencionan los siguientes rasgos importantes:

- Una zona con profundidad máxima de 400 m localizada en la parte norte de la bahía, denominada Cuenca Alfonso.
- Un canal bien definido por un intervalo de 220 a 340 m de profundidad.
- La presencia de una falla llamada "La Tijera" ubicada en la posición media de la bahía, la cual divide a la bahía en dos partes, al norte la parte más profunda y al sur, la somera.

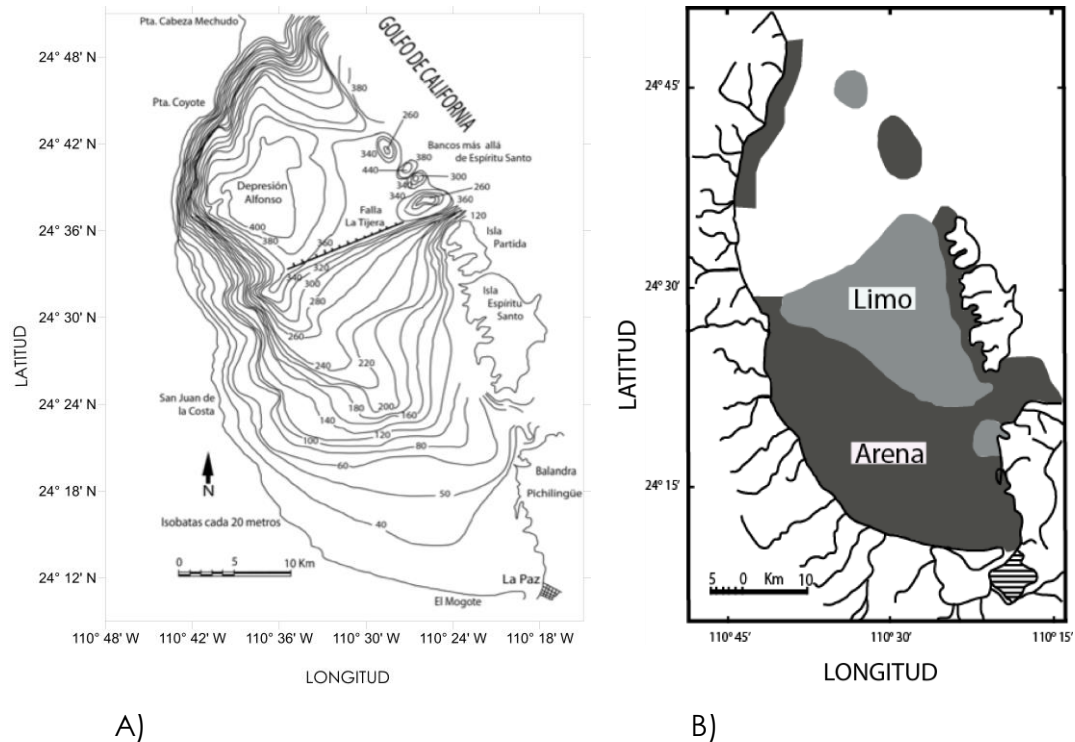


Figura 2. A) Mapa batimétrico y, B) distribución de los sedimentos en la bahía de la Paz (Modificado de Cruz-Orozco et al., 1996)

Nava-Sánchez et al. (2001), realizaron un estudio estructural y sedimentológico en el margen peninsular del Golfo de California, y llevaron a cabo cuatro levantamientos batimétricos en áreas específicas, uno de ellos en la Bahía de la Paz, a bordo del B/O “El Puma” de la UNAM, utilizando una ecosonda monohaz Edo Westen con una frecuencia de 3.5 kHz, para profundidades que varían de 30 a 1200 m. Los perfiles batimétricos se digitalizaron e interpretaron con el software Surfer y los mapas batimétricos de contorno en bruto, se obtuvieron a diversas escalas y para el detalle final se aplicó el software CANVAS.

Nava-Sánchez et al. (2001) indican que la Cuenca Alfonso tiene 22.2 km de ancho, 25 km de largo y 400 m de profundidad y que se encuentra limitada por un umbral a 320 m de profundidad. Por otra parte, mencionan que la Cuenca Lobos presenta 4.2 km de ancho, 9.7 km de largo y 420 m de profundidad, misma que es considerada la más pequeña del Golfo de California.

Del Monte-Luna et al. (2005) realizaron un levantamiento batimétrico en 45 transectos longitudinales en zig-zag, en la región sur y en el margen occidental de la Bahía de La Paz a profundidades menores de 200 m, a bordo de la embarcación CICIMAR-IPN XV. La distancia entre los transectos fue de 50 m y se utilizó un sistema de GPS -a manera de ecosonda- modelo GPSMAP 188C Color/Sounder (Figura. 3A).

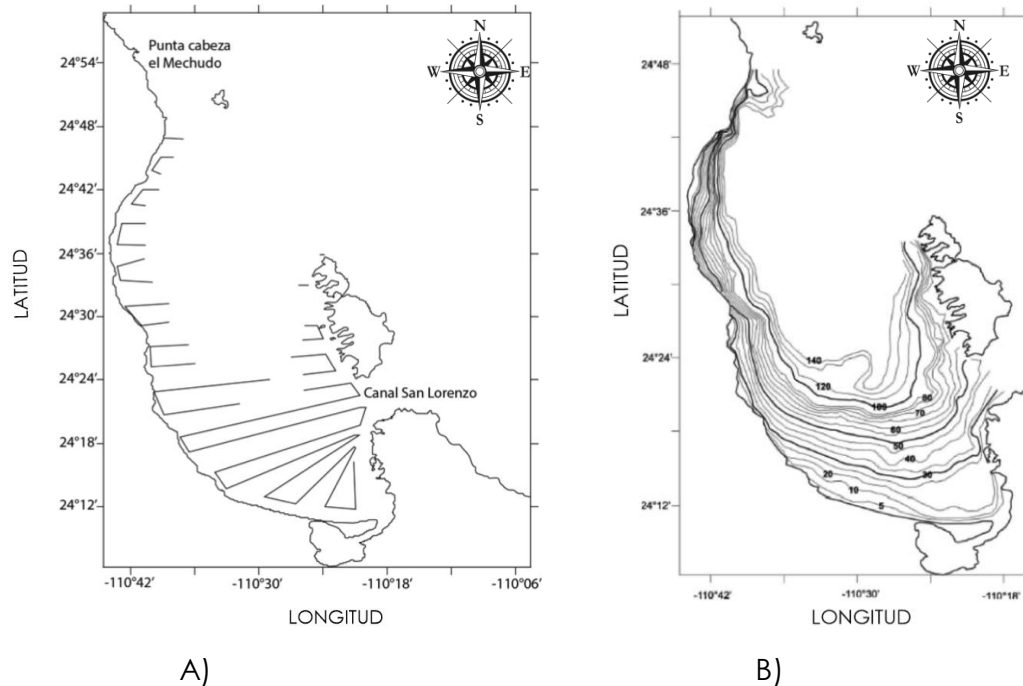


Figura 3. A) Transectos considerados en el levantamiento batimétrico de la Bahía de la Paz. B) Mapa batimétrico generado con 9,024 puntos de muestreo (Del Monte-Luna et al., 2005).

En ese estudio, la profundidad mínima registrada por el GPS fue de 2.6 m; los autores mencionan que debido al tipo de embarcación y al instrumento utilizado, en la mayoría de los casos no fue posible obtener lecturas en profundidades mayores a 200 m (Figura 3B). Otro de los inconvenientes que señalan, es que estos datos no fueron calibrados con respecto a las correcciones por el efecto de la marea.

Cuadro comparativo

Autor y año	Región	Embarcación	Transectos/ Datos	Tipo de ecosonda y/o sistema de posicionamiento	Software para el procesamiento de datos	Calibración de datos
Cruz-Orozco, et al. 1996	Toda la Bahía de La Paz	Guardacostas "Santos Degollado" de la Armada de Mexico	No especifica	Monohaz, Marca Furuno Modelo FE-MK-II	No especifica	No se realizó
Nava-Sánchez, et al. 2001	Toda la Bahía de La Paz	B/O "El Puma" de la Universidad Nacional Autónoma de México"	No especifica	Monohaz, modelo Edo Westen con frecuencia de 3.5 kHz profundidades 30 m-1200 m	Surfer para diagonalizar e interpretar los perfiles batimétricos y Canvas	No se realizó
Del Monte-Luna 2005	Canal de San Lorenzo hasta Punta Cabeza Mechudo	CICIMAR-IPN XV (lancha)	45 transectos longitudinales en zig-zag, 9024 datos	GPS Modelo GPSPMAP 188C color/Sounder	No especifica	No se realizó
Este estudio	La Bahía de La Paz y el área de la Boca Grande	B/O "El Puma" de la Universidad Nacional Autónoma de México"	245 transectos y 52,647,910 datos	Multihaz, marca Simrad-Kongsberg EM300 con una frecuencia de 30 kHz y 135 haces	Caris HIPS and SIPS 7.0 para la limpieza de los datos y Surfer para la realización de imágenes 2D y 3D.	Perfil de velocidad del sonido a través del perfilador CTD. Datos de Mareas

Tabla 2. Cuadro comparativo entre los estudios previos y éste.

3.2. Ecosondas

Para explorar y conocer la corteza continental se han empleado métodos directos e indirectos. Sin embargo, para estudiar a detalle el fondo oceánico se utilizan métodos indirectos como son los de ecosondas, mismos que se han perfeccionado con el tiempo.

Una ecosonda es un equipo electrónico que permite obtener la profundidad de un cuerpo que se encuentra en agua, mediante la reflexión de un haz de ultrasonidos (Ballester Mora, 2010).

Estos instrumentos emplean los principios físicos de la propagación del sonido en el mar con la finalidad de conseguir un registro continuo con medidas

confiables de profundidades. La ecosonda mide el tiempo transcurrido entre las ondas acústicas emitidas desde el transductor, hasta que su eco es registrado después de reflejarse en el lecho marino (Michaud et al., 2009).

3.2.1 Ecosondas Monohaz

Las primeras ecosondas fueron las monohaz y obtenían un único valor por cada punto a lo largo del transecto de estudio. Este instrumento sólo tiene un transductor que produce un pulso acústico (confinado a un haz en forma de cono de 3 a 20 grados) que llega de manera directa al suelo marino. Para obtener el cien por ciento de un área específica es necesario hacer varios transectos (líneas) equidistantes para que no quede ningún espacio sin analizar (Figura 4b).

Una de las deficiencias de las ecosondas monohaz es la anchura del haz ya que este es grande, lo que provoca la pérdida de resolución (Michaud et al., 2009).

3.2.1 Ecosondas Multihaz

La necesidad de perfeccionar la técnica para analizar el fondo marino ha aumentado con el tiempo. Para esto, se han desarrollado las ecosondas multihaz, mismas que sirven para explorar áreas más grandes y con una mayor calidad de datos. La particularidad de las ecosondas multihaz es que pueden emitir una cantidad mayor de haces acústicos (entre 16 y 1400) al mismo tiempo. Los haces de la ecosonda se emiten en forma de abanico, transversalmente al rumbo del buque y cada uno de ellos identifica una profundidad. Dependiendo de las características de la ecosonda multihaz, como la frecuencia de los impulsos emitidos, la profundidad de la columna de agua y la configuración de los transductores; el ancho areal de la franja de barrido, puede llegar a medir de 2 a 5 veces más la profundidad del fondo o relieve oceánico (Figura 4a).

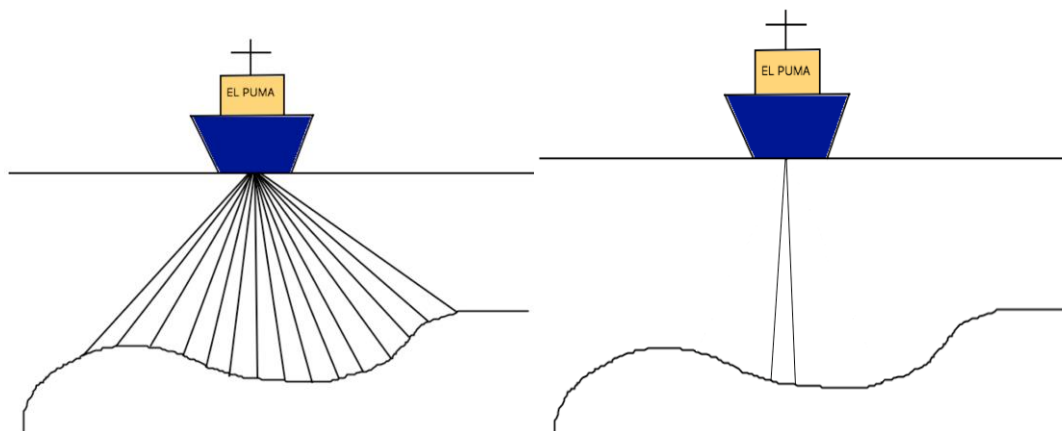


Figura 4. Cobertura de la ecosondas. A) multihaz. B) monohaz.

El funcionamiento de una ecosonda multihaz consiste en generar un gran número de haces para cada ping¹. Los haces están en diferentes direcciones, que abarca un abanico perpendicular a la trayectoria del buque. A lo largo de cada haz, se estima que el rango de tiempo estimado de llegada al fondo del mar y regresa al receptor. La estimación de rango de cada haz da la profundidad relativa del fondo relieve marino con respecto al barco. El barco está en movimiento hacia delante, y los pings consecutivos da un mapa continuo de la zona de estudio. Este mapa de resolución está determinado por la anchura del haz y la resolución del alcance (Saracin et al., 2014).

Existen dos tipos de ecosondas: unas para aguas profundas y otras para aguas someras, una de sus diferencias es el ancho de cobertura, ya que ésta aumenta con la profundidad (COMET MetEd, 2015).

Para considerar que tipo de ecosonda es saber las frecuencias en las que trabaja cada ecosonda según el rango de profundidad, en la tabla 3 se presenta la relación frecuencia profundidad, a menor profundidad mayor frecuencia de la ecosonda a utilizar.

¹ Ciclo de transmisión-recepción.

Ecosondas	Profundidad	Frecuencia
Grandes profundidades	100 a 12000 m	10 – 15 khz
Medias profundidades	30 a 3000 m	30 – 50 khz
Pequeñas profundidades	5 a 500 m	80 – 120 khz
Muy somero	0 a 100 m	200 – 400 khz

Tabla 3. Rango de frecuencias utilizadas en la batimetría (tomado de Michaud et al., 2009).

3.3. Propagación acústica en el mar

El agua de mar es un medio variante, por eso es de gran importancia tener conocimiento de las propiedades físicas del agua de mar y de la propagación de las ondas acústicas; ya que estas ondas se emplean en la mayoría de los sensores usados para la determinación de la profundidad (Bureau Hidrográfico Internacional, 2010).

En el agua, los sonidos se propagan con mayor rapidez y menor pérdida de energía, transmitiéndose en el mar a una velocidad de propagación que van de 1400 a 1600 m por segundo, debido a que el agua de mar no se encuentra comprimida, es decir, no se puede reducir el volumen por lo que la absorción es mínima (Anónimo, 2016).

3.4. Velocidad del sonido

La estructura de la velocidad del sonido en agua de mar, está relacionada con la temperatura, la salinidad y la presión, en cualquier punto dado en el océano. El incremento de uno u otro de estos parámetros puede resultar en el aumento de la velocidad (Ranz-Guerra, 2007).

Para obtener el perfil de la velocidad del sonido, requerido para la calibración de las ecosondas, se utilizan diferentes instrumentos; el más común es el “perfilador de la velocidad del sonido” (VSP por sus siglas en inglés), el cual se

caracteriza por tener un sensor de presión para medir la profundidad, un transductor y un reflector, a una cierta distancia de separación entre ellos. La velocidad del sonido se calcula por medio de la ecuación $c = 2D/\Delta t$ donde:

c = velocidad del sonido

$2D$ = es el doble de la distancia entre el transductor y el reflector

Δt , es el doble del tiempo que se tarda la señal entre el transductor y el reflector (Bureau Hidrográfico Internacional, 2010).

Otro equipo es un multisensor que mide la conductividad (salinidad), la temperatura y la presión (profundidad) (CTD por sus siglas en inglés), en donde a los datos medidos por este equipo se les aplica la ecuación de Coppins:

$$c(Z, T, S) = 1449.05 + c[4.57 - c(0.0521 - 0.00023 \cdot T)] + [1.333 - c(0.0126 - 0.00009 \cdot S)](Z - 35) + c(Z)$$

en donde:

c : velocidad del sonido.

Z : profundidad.

T : temperatura.

S : salinidad.

3.5. Reflexión y Refracción del sonido

La reflexión, es el proceso en el cual existe un cambio de dirección de la trayectoria de una onda acústica cuando choca con la superficie (Figura 5).

En la reflexión existen tres elementos: onda incidente, línea normal o perpendicular a la superficie y onda reflejado. Se llama ángulo de incidencia al que forma la normal y la onda incidente, mientras que el ángulo que forma la normal y la onda reflejada se llama ángulo de reflexión (Anónimo, 2016).

La reflexión ideal debe cumplirse dos leyes:

1. La onda incidente, la onda reflejante y la normal debe de estar en el mismo plano.
2. El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión $\theta = \theta'$.

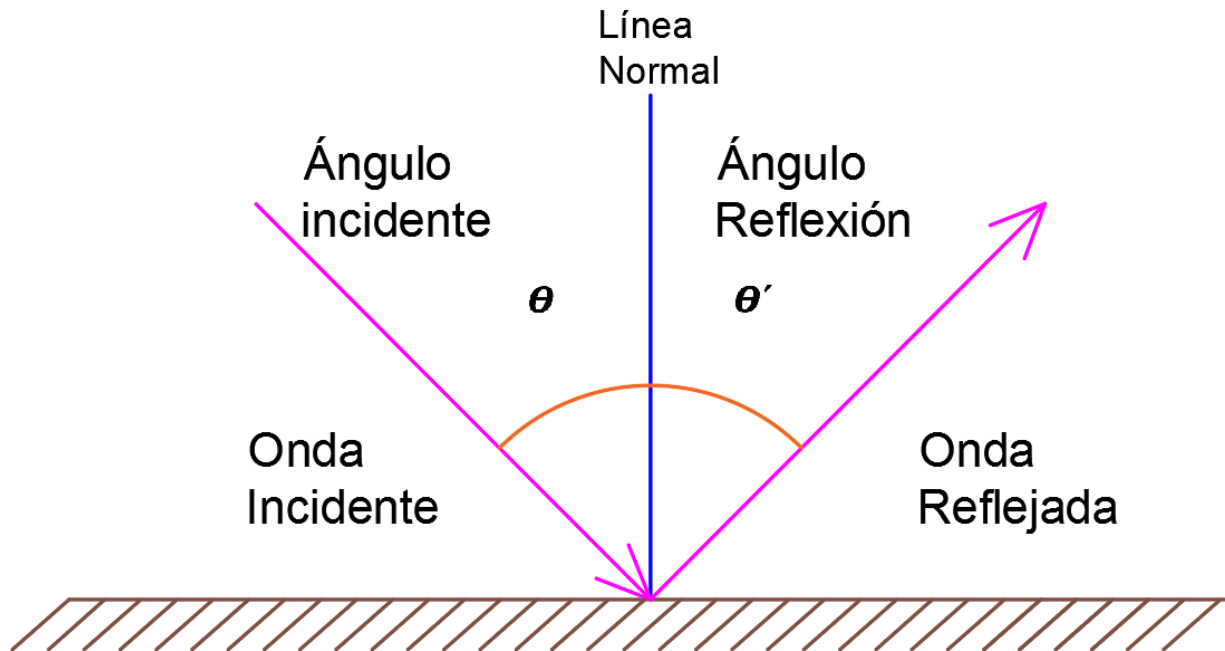


Figura 5. Principio de la reflexión

La refracción, es el proceso en el cual la dirección de propagación de la onda acústica es alterada debido a un cambio en la velocidad del sonido dentro del medio de propagación, o a medida que la energía pasa a través de una interfaz, representando una discontinuidad de velocidad del sonido entre dos medios.

De acuerdo a la Ley de Snell y considerando dos medios (Figura 6) con velocidades diferentes, c_1 y c_2 , si c_1 es mayor que c_2 , la dirección de propagación de la onda acústica es alterada y el ángulo de transmisión será más pequeño que el ángulo de incidencia. En contraste, si c_1 es más pequeño que c_2 , la dirección de

propagación de la onda acústica es cambiada y el ángulo de transmisión será mayor que el ángulo de incidencia. Para la incidencia normal no ocurre refracción (Bureau Hidrográfico Internacional, 2010).

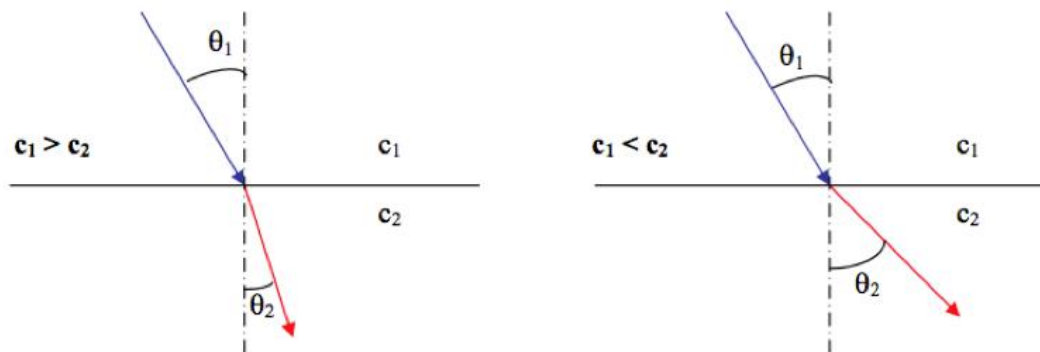


Figura 6. Principio de la refracción (tomado de Bureau Hidrográfico Internacional, 2010)

4. MÉTODOS

Durante las campañas oceanográficas Paleomar I y Paleomar II, se llevó a cabo la adquisición de los datos batimétricos, a continuación, se describen detalladamente las herramientas, instrumentos usados y datos batimétricos.

Por la cantidad de datos que se obtienen con la ecosonda multihaz, es necesario contar con un equipo de cómputo con gran capacidad de almacenamiento, además de un software especializado para la batimetría.

En la adquisición de datos batimétricos hay que llevar una serie de pasos previos:

- Calibrar el equipo, con respecto a los movimientos inherentes del barco como el balanceo, cabeceo, guiñada de rumbo.
- Calibrar la ecosonda con respecto a la velocidad del sonido. Es necesario tomar muestras de la columna de agua para conocer la temperatura, salinidad y

presión que se encuentran en la zona de estudio y para conocer las variaciones climáticas estacionales, estas mediciones pueden ser tomadas con un CTD.

Los datos obtenidos se aplican al software de la ecosonda antes de realizar las mediciones o, en su defecto, durante el procesamiento de datos batimétricos, aplicando un perfil de velocidad del sonido.

Esta calibración se utiliza cuando el área de estudio no supera una profundidad entre 20 o 30 m (Ballesteros, 2010).

- Al adquirir los datos es necesario capturar todas las anomalías que se presentan al momento de realizar el estudio, es decir, una bitácora que debe contener horas, fechas, coordenadas de inicio y término de la línea, ya que al momento de procesar los datos, se podrá identificar rápidamente algún problema que se presente.
- Planificar bien el transecto para que sea más fácil efectuar el estudio y las líneas que se realicen sean lo más precisas según la finalidad del estudio.

Cabe señalar que los datos están afectados por las condiciones oceánicas estacionales, como las mareas y el viento y las propiedades acústicas en la columna de agua. Así como, la operación de los instrumentos; por ejemplo, cuando se pierde el fondo, por ejemplo, el equipo no detecta el suelo marino y agregar el calado del buque, es decir la profundidad de agua necesaria para que un buque flote libremente y se mide verticalmente desde la parte inferior de la quilla hasta la línea de flotación. Por lo tanto, es necesario realizar diversas correcciones para obtener un modelo batimétrico más preciso del fondo marino

4.1. Adquisición de los datos

La adquisición de datos se realizó en las campañas oceanográficas PALEOMAR I y PALEOMAR II en la Bahía de La Paz, del 21 al 28 de noviembre de 2014 y del 10 al 17 de febrero de 2016, respectivamente. Las campañas oceanográficas se realizaron a bordo del Buque Oceanográfico "El Puma" de la UNAM (Figura 7 y

Figura 8).

La primer campaña oceanográfica consistió en hacer el levantamiento en el interior de la Bahía de La Paz, para poder obtener una cobertura amplia del suelo marino y así cubrir toda la bahía (Figura 7A), mientras que la segunda campaña se realizó al noroeste de la bahía donde se encuentra la Boca Grande, entre Isla Partida e Isla San José (Figura 7B).

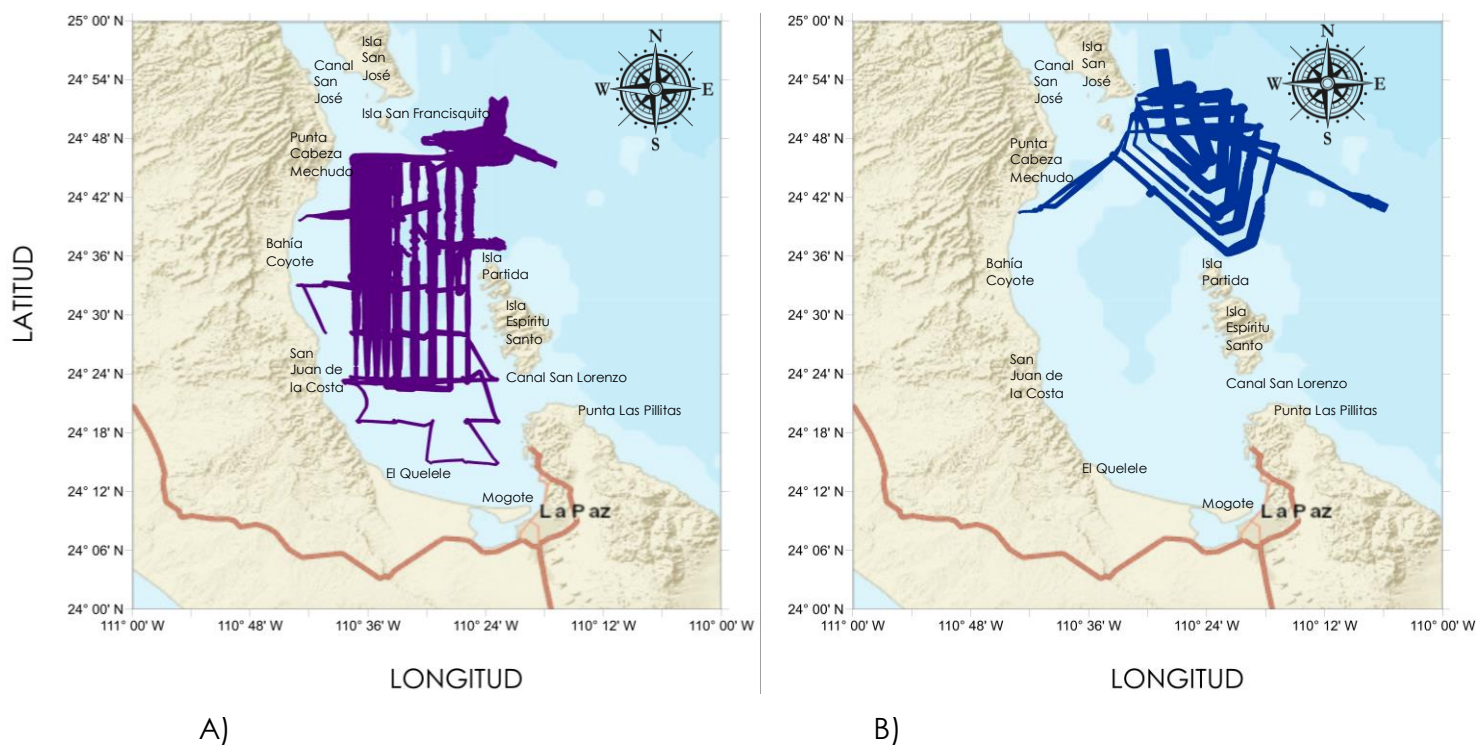


Figura 7. A) Mapa de la trayectoria PALEOMAR I y, B) Mapa de la trayectoria PALEOMAR II.

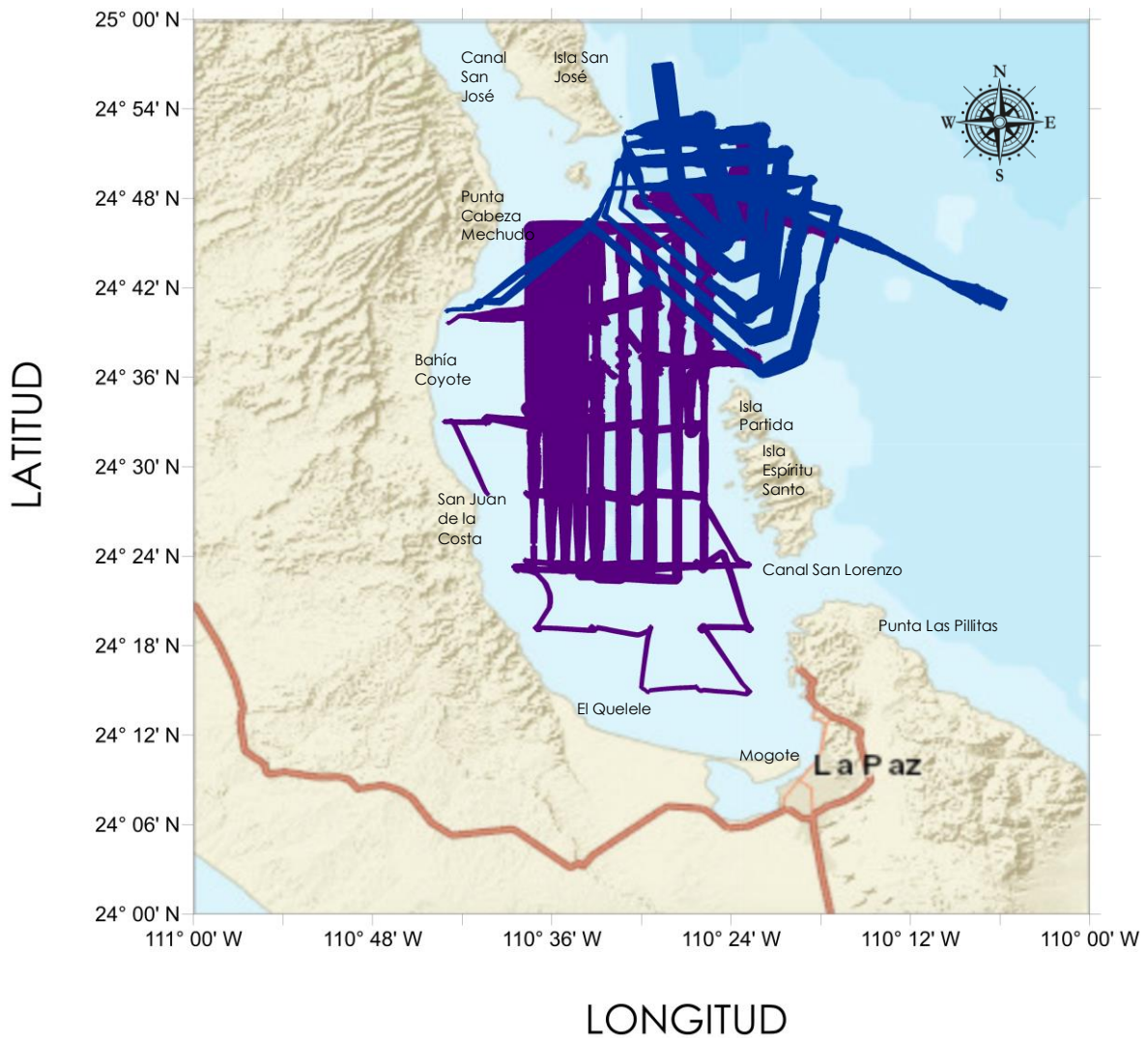


Figura 8. Mapa de las trayectorias PALEOMAR I y PALEOMAR II, estudio integral.

4.2. Equipo

Para obtener los datos de la batimetría se utilizó una ecosonda Multihaz marca Simrad-Kongsberg EM300 que se encontraba en el B/O El Puma, la cual cuenta con un transductor de frecuencia 30 kHz y dispara 135 haces para tener una cobertura angular de hasta 150°. La anchura de la franja del eco del sonar depende de la profundidad, con una anchura máxima de 5000 m y una profundidad máxima de 5000 m. La separación del haz es normalmente

equidistante. La ecosonda EM300 opera con diferentes longitudes de pulso, que varían con respecto a la profundidad, para aguas poco profundas, menores a 500 m, el área de barrido o abanico (*swath*) se reduce considerablemente, mientras que para aguas mayores a 2000 m, el *swath* llega a medir entre 4 a 5 km dependiendo de las características de la columna de agua (Kongsberg SIMRAD AS, 2002).

La ecosonda consiste básicamente de 4 partes que deben estar instaladas en el buque, las cuales son: un arreglo de transductores-transmisores y un arreglo de transductores receptores, que están instalados en la quilla del barco; un transceiver conectado a los sistemas de movimiento, tiempo y posicionamiento instalado en la cubierta. Y por último, la consola de operación que se encuentra en el laboratorio central (Figura 9).

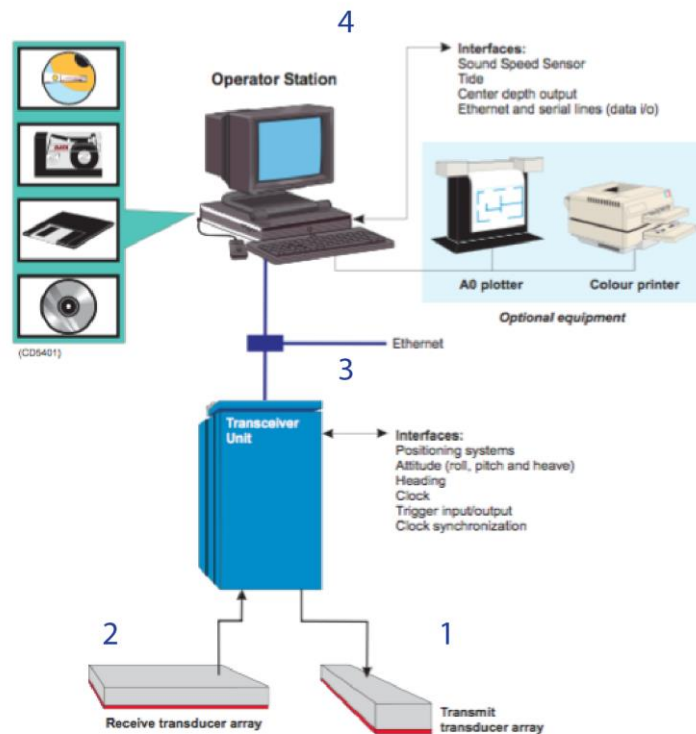


Figura 9. Sistema de la ecosonda multihaz EM300 (1) un arreglo de transductores transmisores, (2) un arreglo de transductores receptores, (3) el transceiver y (4) consola de operaciones (tomado y modificado de Kongsberg SIMRAD AS, 2003)

4.3. Procesamiento de datos batimétricos utilizando software CARIS HIPS y SIPS

El software y la paquetería empleada en el procesamiento de los datos obtenidos en las campañas oceanográficas PALEOMAR I y PALEOMAR II fue CARIS (Computer Aided Resource Information System) y la paquetería HIPS y SIPS, la cual incorpora un conjunto de herramientas para el procesamiento de datos batimétricos que permite manejar grandes cantidades de información en menor tiempo. Algunas características de CARIS son:

- Soporta más de 40 formatos.
- Puede generar varias salidas, p. ej. aci, incluyendo también modelos digitales del terreno.
- Es posible visualizar distintos formatos de datos.
- Incorpora las últimas técnicas de procesamiento hidrográfico para reducir el tiempo del análisis de datos.

4.3.1. Inicio del procesamiento de datos

Contar con una imagen base en formato TIFF del área de estudio.

Contar con los datos de marea de las estaciones cercanas al área de estudio, correspondientes a los días en que se realizó el levantamiento batimétrico, esto con el fin de llevar a cabo las correcciones pertinentes. Estos datos deben tener un formato específico que se encuentra en la carpeta de CARIS el cual se llama "Tidezero" con formato .tid.

- En caso de no contar con los datos de mareas, estos datos se pueden obtener de software especializados. Un ejemplo es WXTide32, que es un software gratuito (predice mareas 1970 a 2037). Tiene alrededor de 9,500 estaciones en el mundo, de las cuales aproximadamente 300 se encuentran en América del Norte.

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, se pueden comenzar a procesar los

datos, para lo cual es conveniente seguir los siguientes pasos:

1. Realizar el archivo de las medidas del barco, para este paso es necesario tener las distancias correctas, lo más importante es el calado del barco. En caso de haber hecho los estudios de la batimetría en algún barco de la UNAM las dimensiones se pueden encontrar en las siguientes páginas (Figura 10):

- <http://www.buques.unam.mx/especificacionesPUMA.htm>
- <http://www.buques.unam.mx/especificacionesJS.htm>²

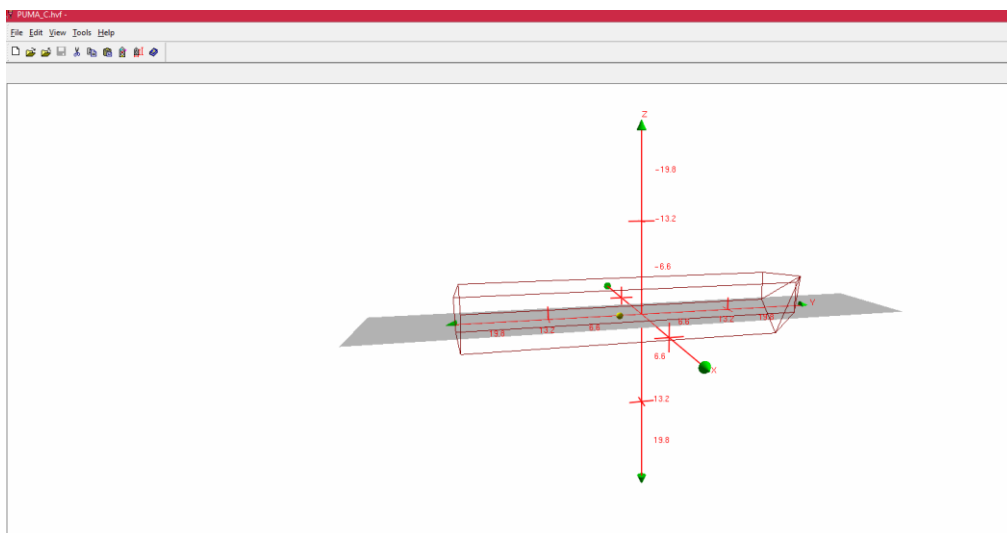


Figura 10. Archivo de las medidas del barco.

2. Realizar el proyecto, el cual debe llevar el nombre de la campaña; así como, también los días en los que se realizó (Figura 11).

² Nota importante: para la elaboración del archivo de barco es necesario que la fecha sea anterior a la fecha de los datos que se van a procesar, con el fin de que el programa detecte los datos (Figura 11).

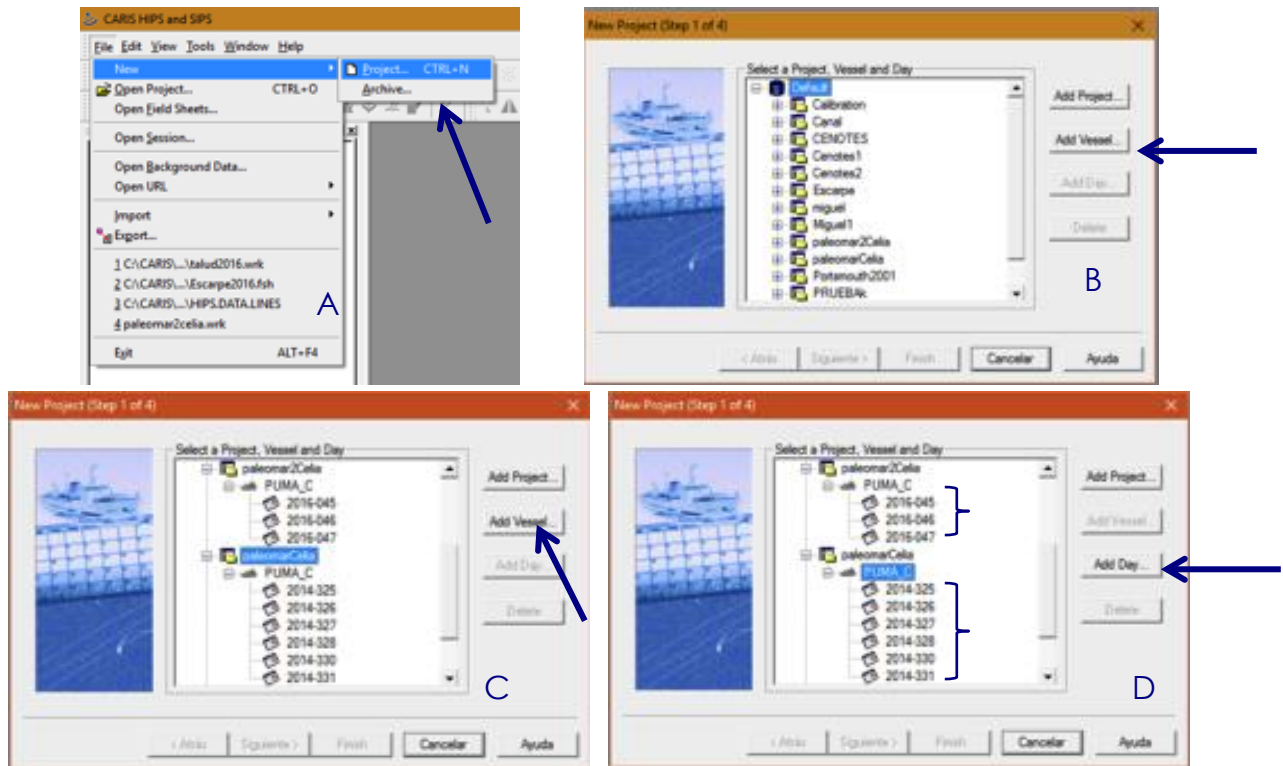


Figura 11. Pasos para crear el proyecto. A) Apertura del proyecto, B) Añadir el proyecto con el nombre de la campaña o nombre que tengan los datos, C) Añadir el archivo del barco y D) Añadir los días del levantamiento batimétrico.

3. Importar los datos de la campaña. CARIS sólo acepta los formatos. all, .out, .raw, .depth, y .mb57. En caso de obtener datos por varios días seguidos es necesario separarlos y ponerle a cada uno la fecha que fue levantado, así será más fácil distinguir los trayectos.
4. Una vez hecho, se carga la marea y se aplica el *merge*³ para que las líneas cambien de color amarillo a verde, este cambio de color solamente indica que se le ha aplicado el *merge* (Figura 12).

³ Merge es el proceso de cálculo de las posiciones finales y profundidades de sondeo, basado en todas las entradas pertinentes, tales como profundidades observadas, información de navegación y la dinámica del depósito que son *gyro*, *heave*, *pitch*, *roll*, y marea (CARIS, 2008).

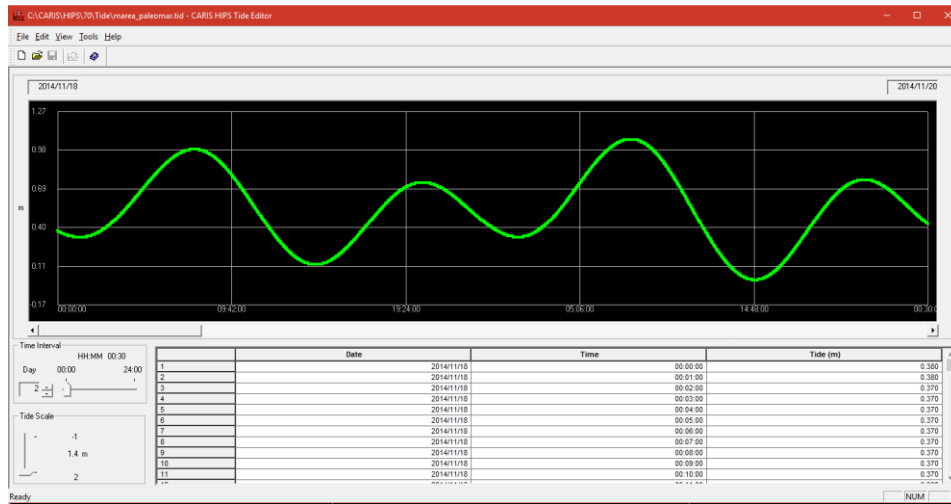


Figura 12. Perfil de la marea en los días de las campañas oceanográficas.

5. Realizar una hoja de campo, es decir se delimita la zona donde se requiere hacer la superficie.
6. Realizar la superficie inicial.
7. Limpiar los datos de forma manual como son *Swath editor* y *Subset⁴ editor*, estas son herramientas de CARIS HIPS y SIPS. Otra manera de limpiar los datos es mediante filtros (Figura 13).

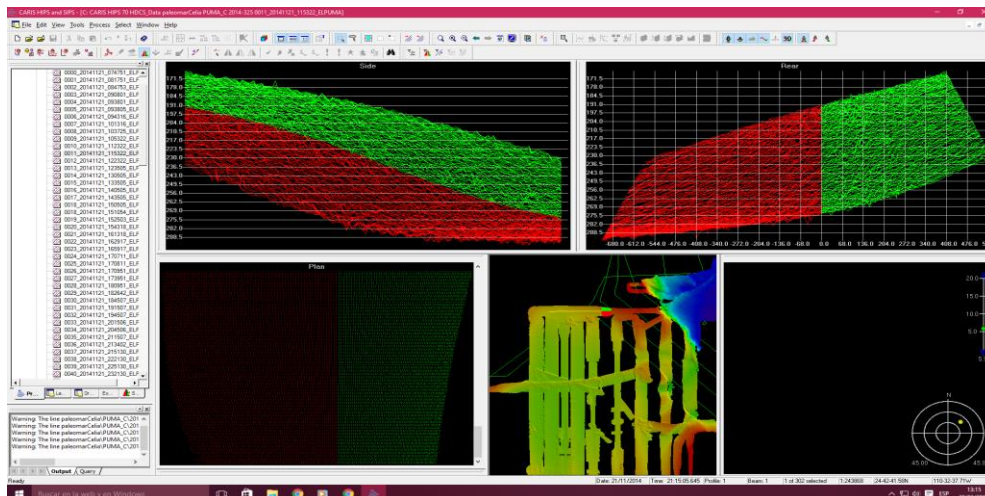


Figura 13. Limpieza de los datos.

⁴ Se utiliza durante la limpieza de resonancia para limitar el número y el alcance de los sondeos de ser cargado en la memoria (CARIS, 2008).

8. Aplicar de nuevo el *merge*, posteriormente recalcular la superficie y realizar una superficie final (Figura 14).

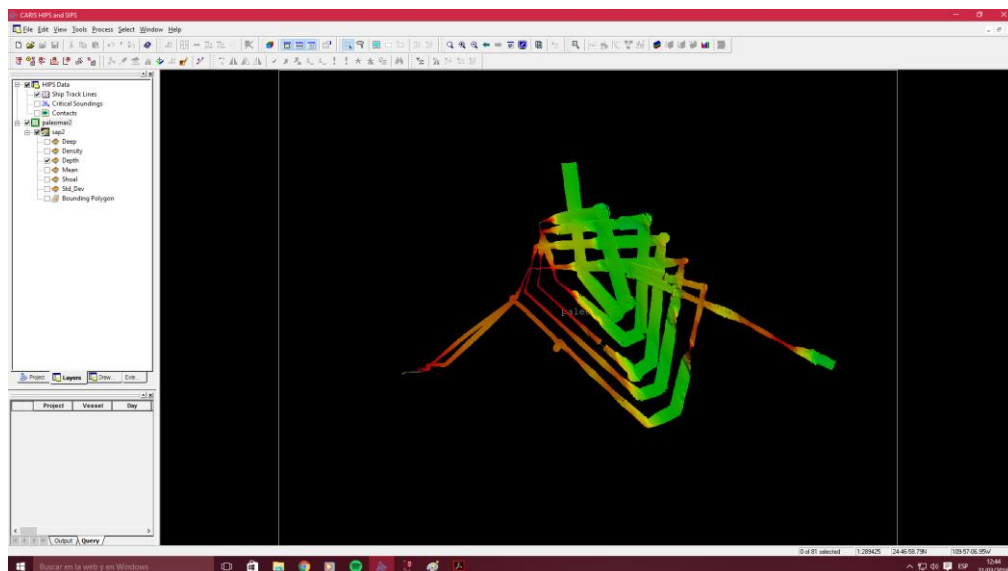


Figura 14. Datos limpios.

9. Extraer los datos para poder ponerlo en otro software de interpolación, como por ejemplo Surfer (Manual de Caris, 2011).

5. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los resultados obtenidos a lo largo de las campañas oceanográficas PALEOMAR I y PALEOMAR II, forman un mapa batimétrico, donde se usó el software SURFER el cual interpola los datos para poder obtener las curvas de nivel del mapa.

El mapa obtenido en SURFER se limitó para que sólo existiera interpolación de los datos obtenidos en las campañas. Es por ese motivo que no se ven las curvas de nivel en algunas zonas continuas o se observan huecos de información, ya que, en esas partes no se obtuvieron datos en las campañas.

En el mapa batimétrico se observan profundidades menores a 25 m y no mayores a 900 m. Las zonas más profundas se ubicaron en la parte noreste, en

Boca Grande (región de Paleomar II) (Figura 15 y Figura 16).

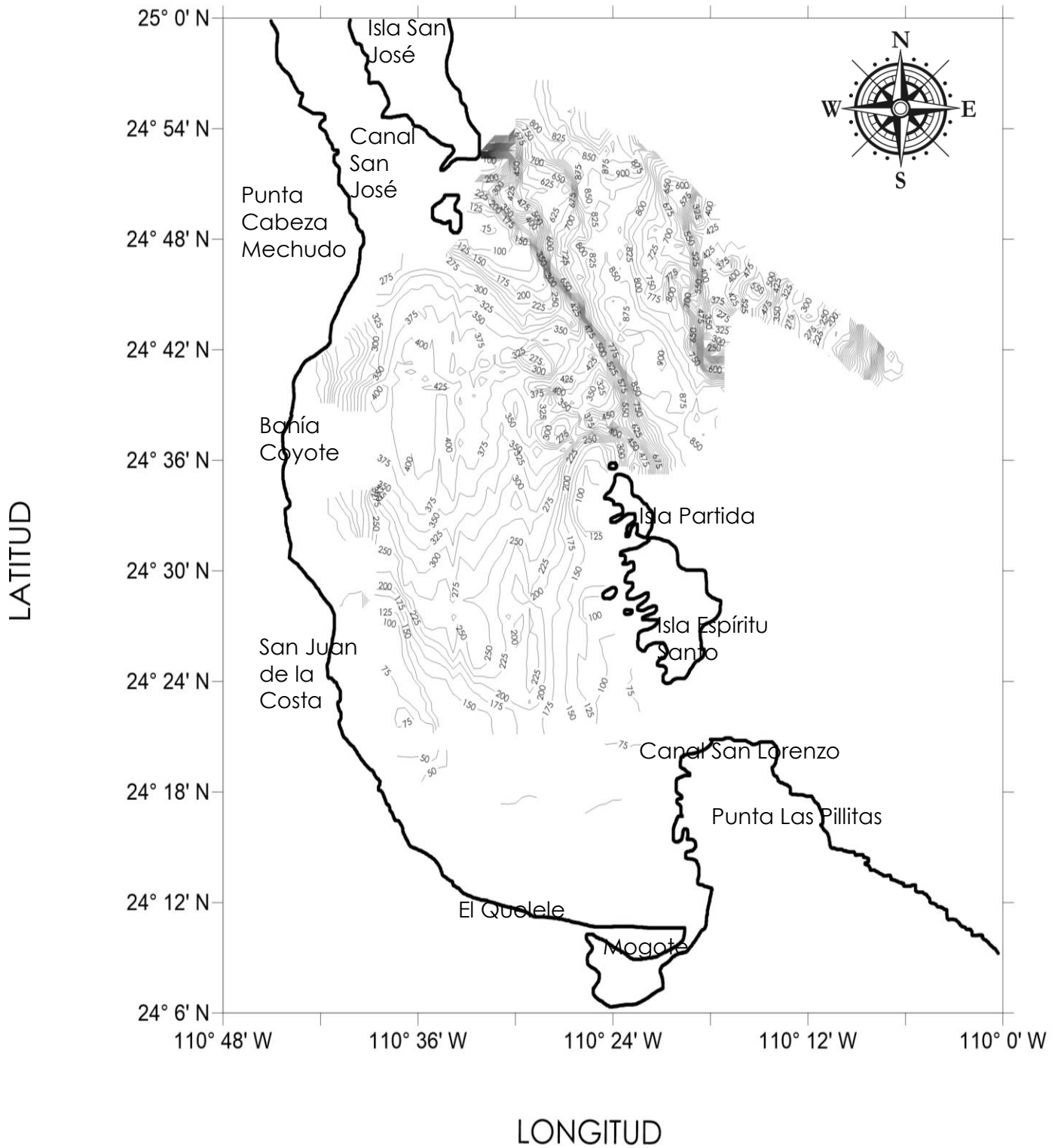


Figura 15. Mapa batimétrico de la Bahía de La Paz.

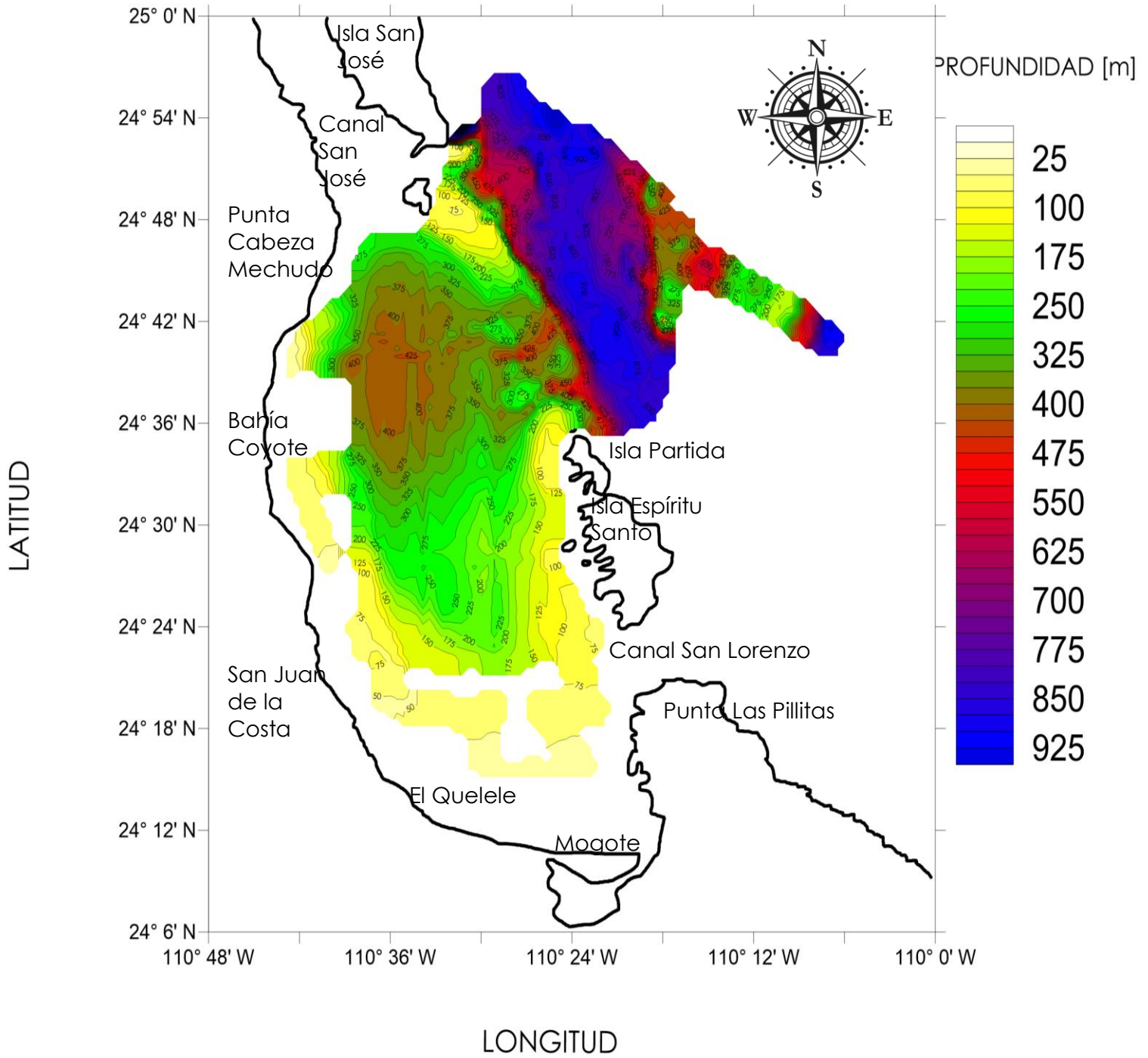


Figura 16. Mapa batimétrico de la Bahía de La Paz después integrar las dos campañas oceanográficas Paleomar I y Paleomar II.

Las características encontradas por este estudio son la Cuenca Alfonso, la Cuenca Lobos, los tres umbrales, unos pequeños canales y un escarpe como se muestra en la figura 17.

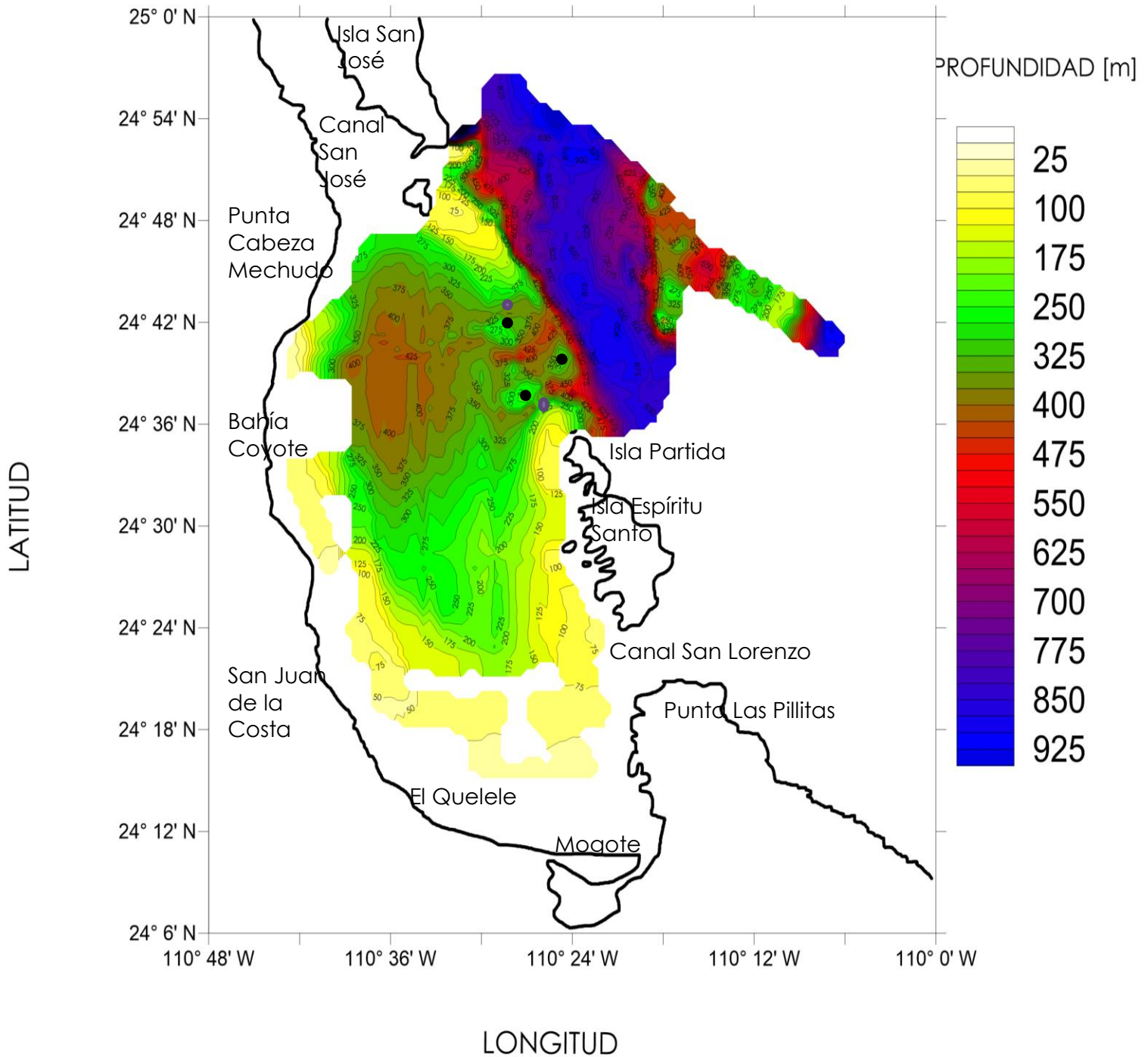


Figura 17 . Cuenca Alfonso de color café junto con la Cuenca Lobos, los tres puntos negros que se

observan son los umbrales, mientras que los puntos morados son los canales, y la zona azul es el escarpe.

Se muestran imágenes en 3D de la batimetría de la Bahía de La Paz en diferentes orientaciones, para observar los rasgos de la misma (Figuras 18-20). En la figura 17 se puede observar la ubicación de los tres umbrales encontrados en este estudio, de color café se presentan la Cuenca Alfonso y la Cuenca Lobos, mientras que la el escarpe se muestra de un color azul.

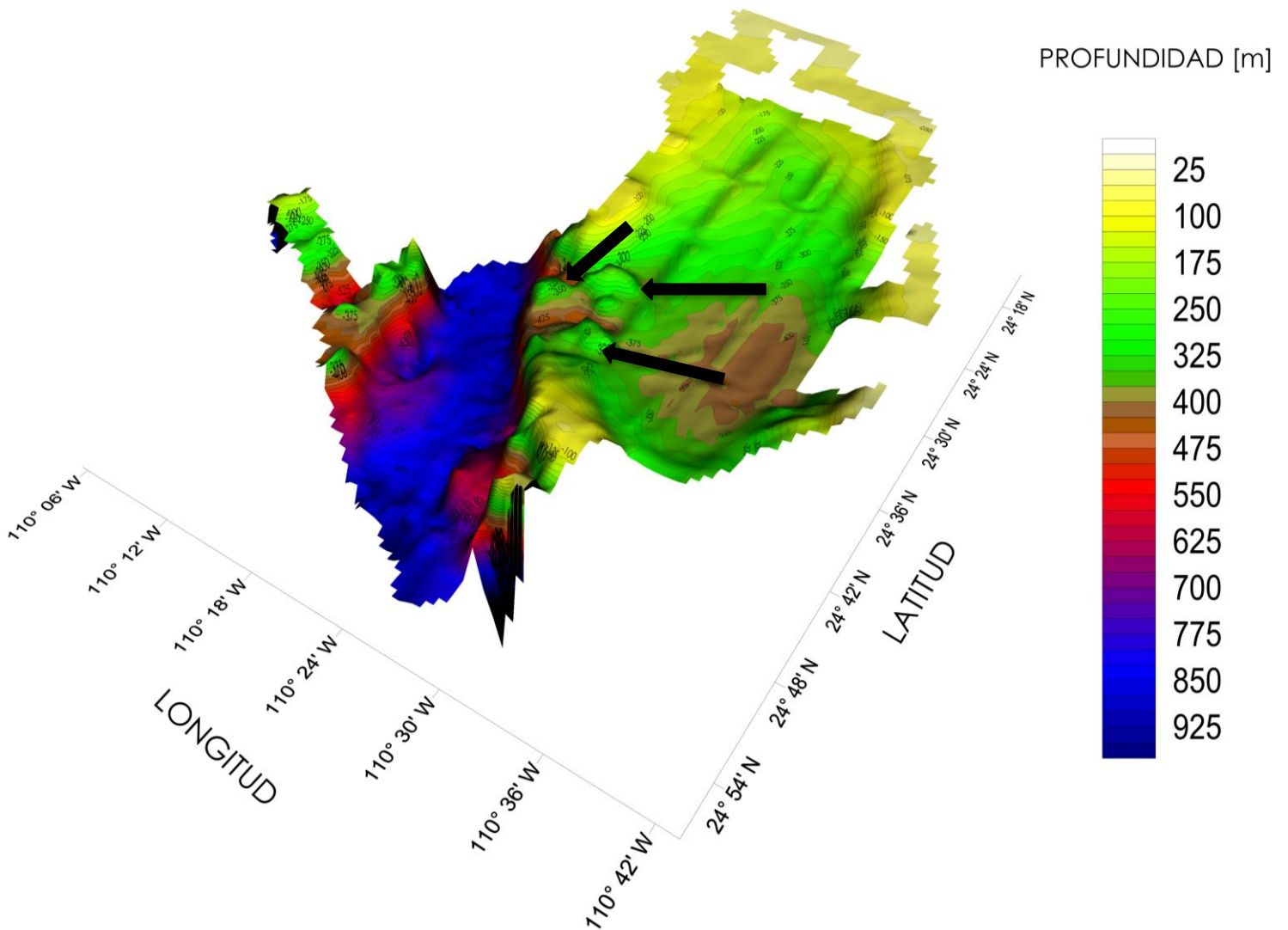


Figura 18. Mapa batimétrico 3D rotado 180° hacia el Sur, umbrales marcados con flechas.

En la figura 19 se observa el cambio abrupto de profundidades teniendo así las profundidades más altas con colores azules y las profundidades más bajas con tonalidades amarillas-verdes, desde este ángulo se observa más detalladamente un umbral y se alcanza a notar unos pequeños canales que acompañan a los umbrales.

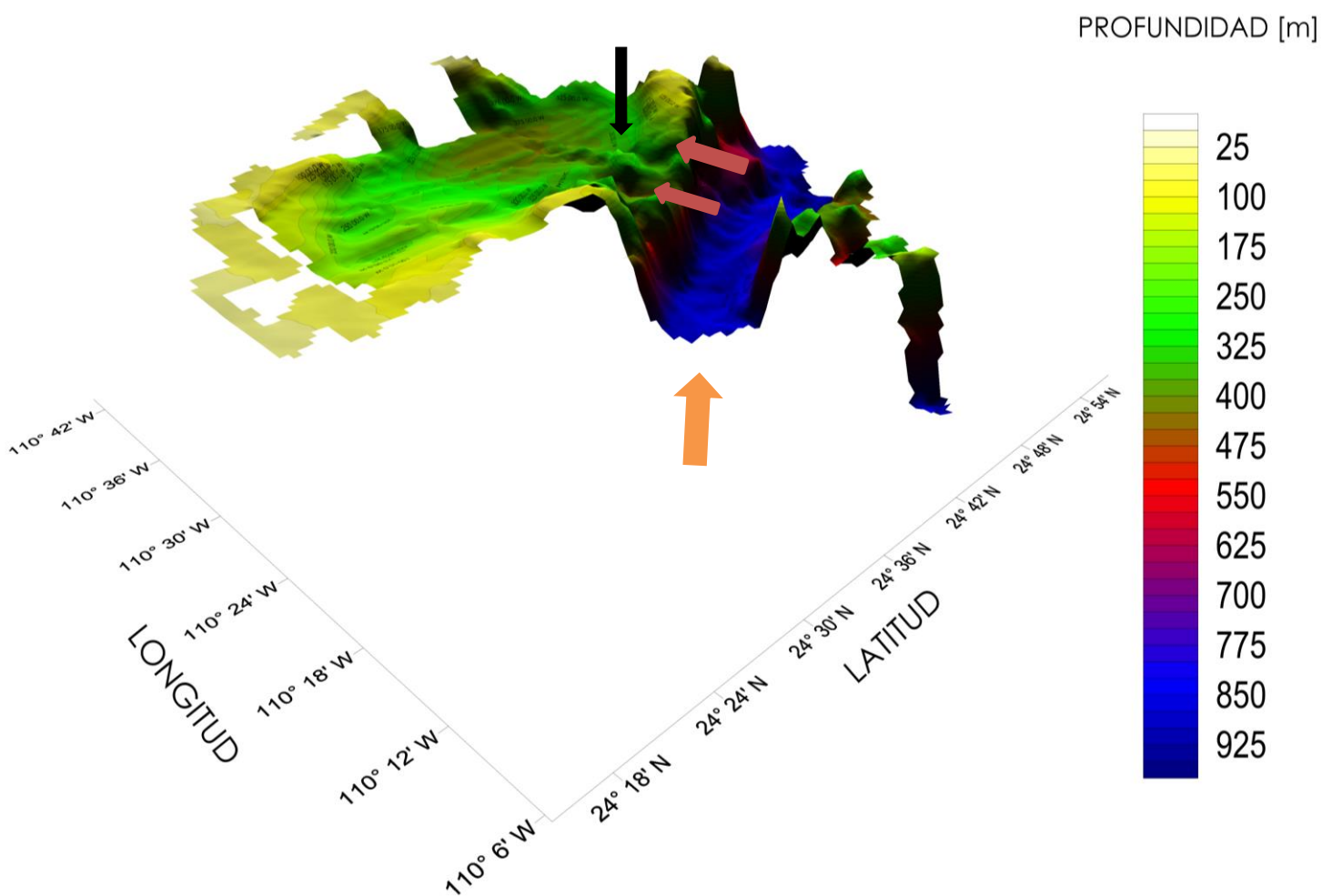


Figura 19. Mapa batimétrico 3D orientado NE-SW, flecha negra umbral, flecha naranja depresión y flecha rojas canales.

En la figura 20 se observa los canales más a detalle, junto con los umbrales que en esta imagen se alcanzan a observar los tres y posteriormente se presenta el escarpe, el cual llega a tener una profundidad de 900m.

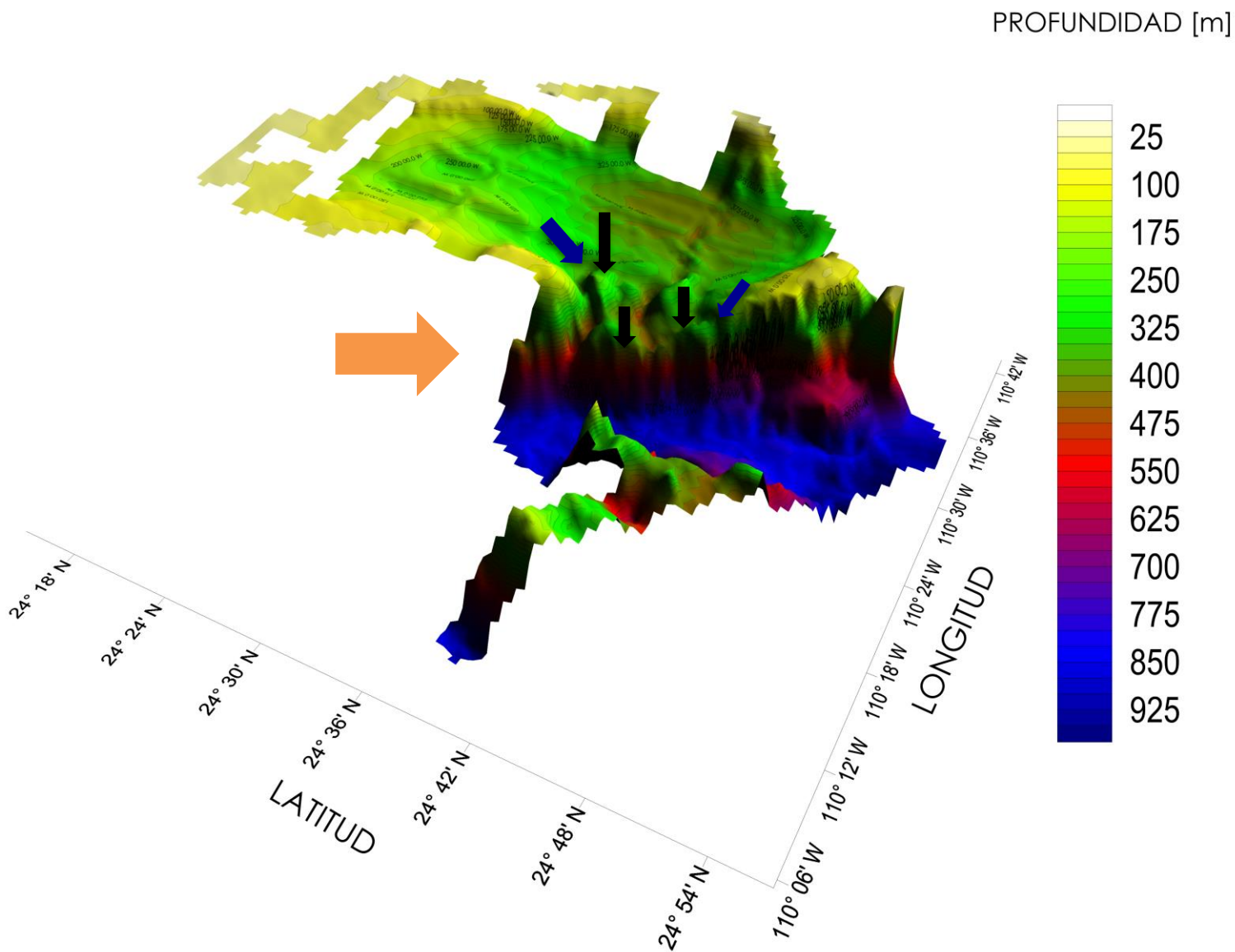


Figura 20. Mapa batimétrico 3D orientado E-W, flechas negras umbrales, flechas azules canales y flecha naranja escarpe.

Se definieron cuatro perfiles a lo largo y ancho de la bahía, para observar con mayor resolución los rasgos topográficos (Figura 21).

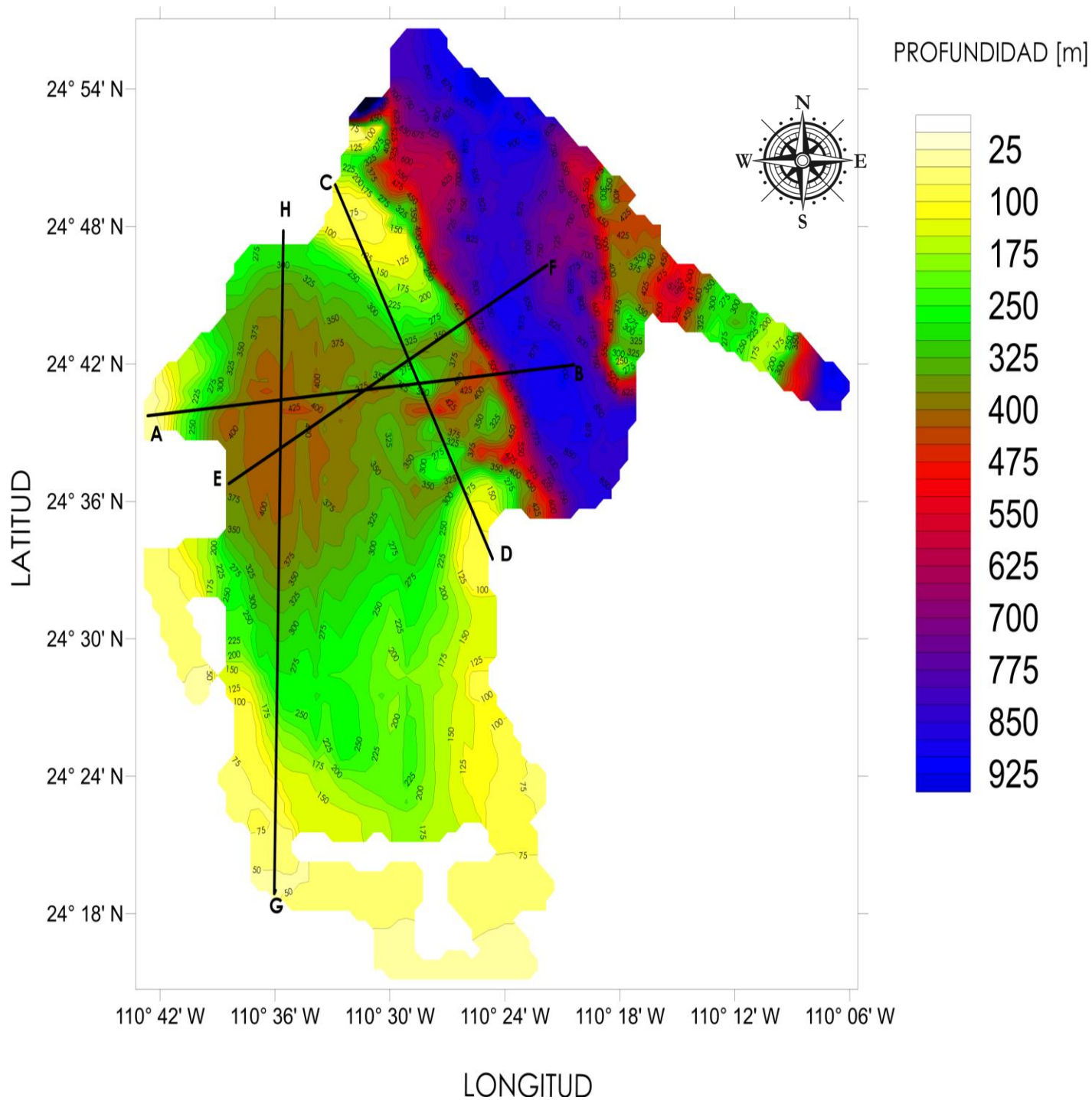


Figura 21. Localización de los 4 perfiles en la batimetría de la Bahía de la Paz.

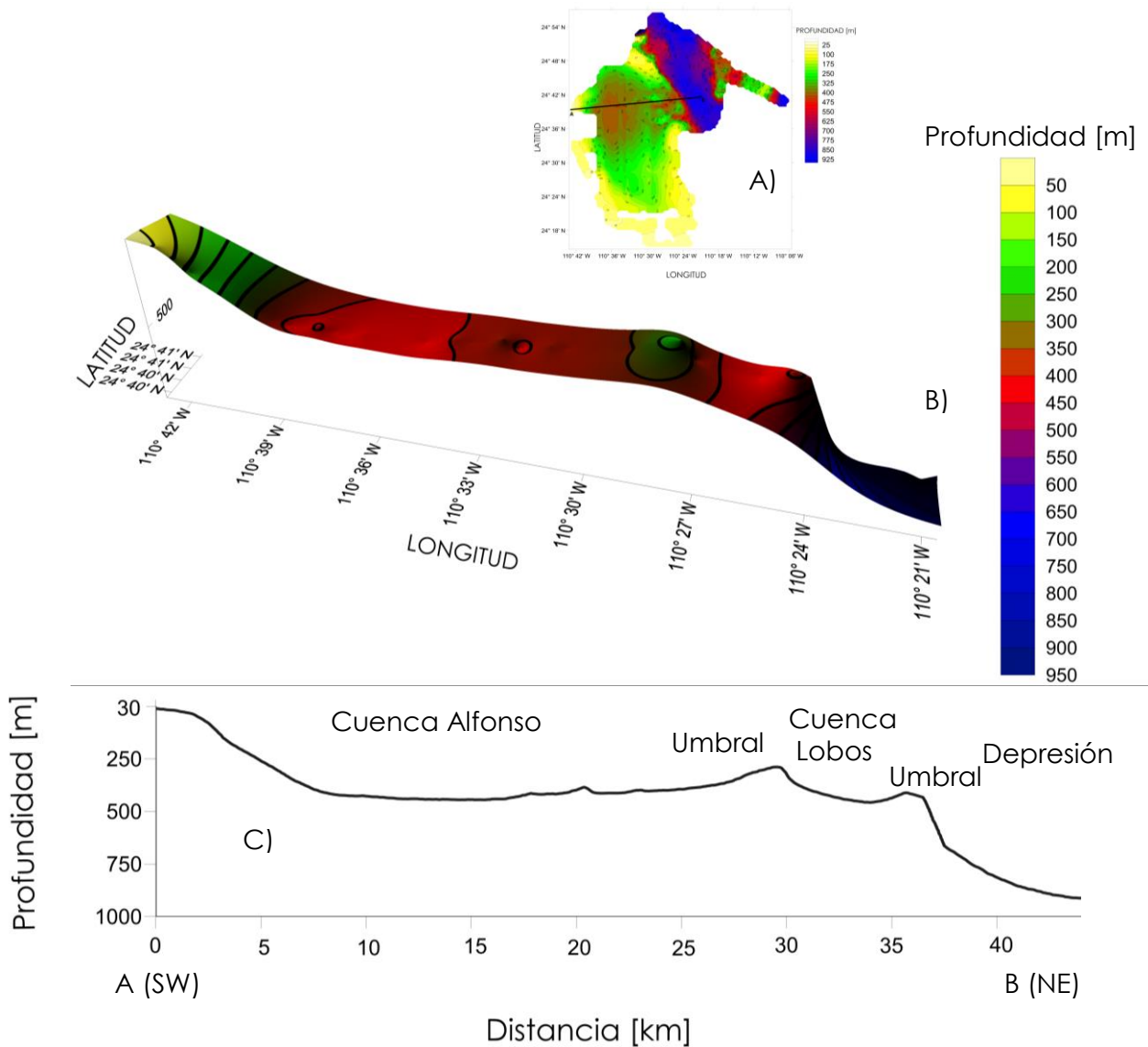


Figura 22. A) Localización del perfil AB. B) Sección en 3D con escala de colores, la cual indica la profundidad en metros. C) Sección en 2D con la localización de los umbrales, la Cuenca Alfonso, Cuenca Lobos y una depresión.

En el perfil AB se observa que la profundidad máxima de la Cuenca Alfonso es de 420 m, la cual está delimitada por la presencia de un umbral a 265 m de profundidad. Seguido del cual se encuentra la Cuenca Lobos con una profundidad de 440 m, delimitada hacia el NE por un umbral a 390 m de profundidad. Este rasgo topográfico delimita la región de la Bahía de La Paz con la parte profunda de la Cuenca de La Paz, a través de la Boca Grandes (Figura 22).

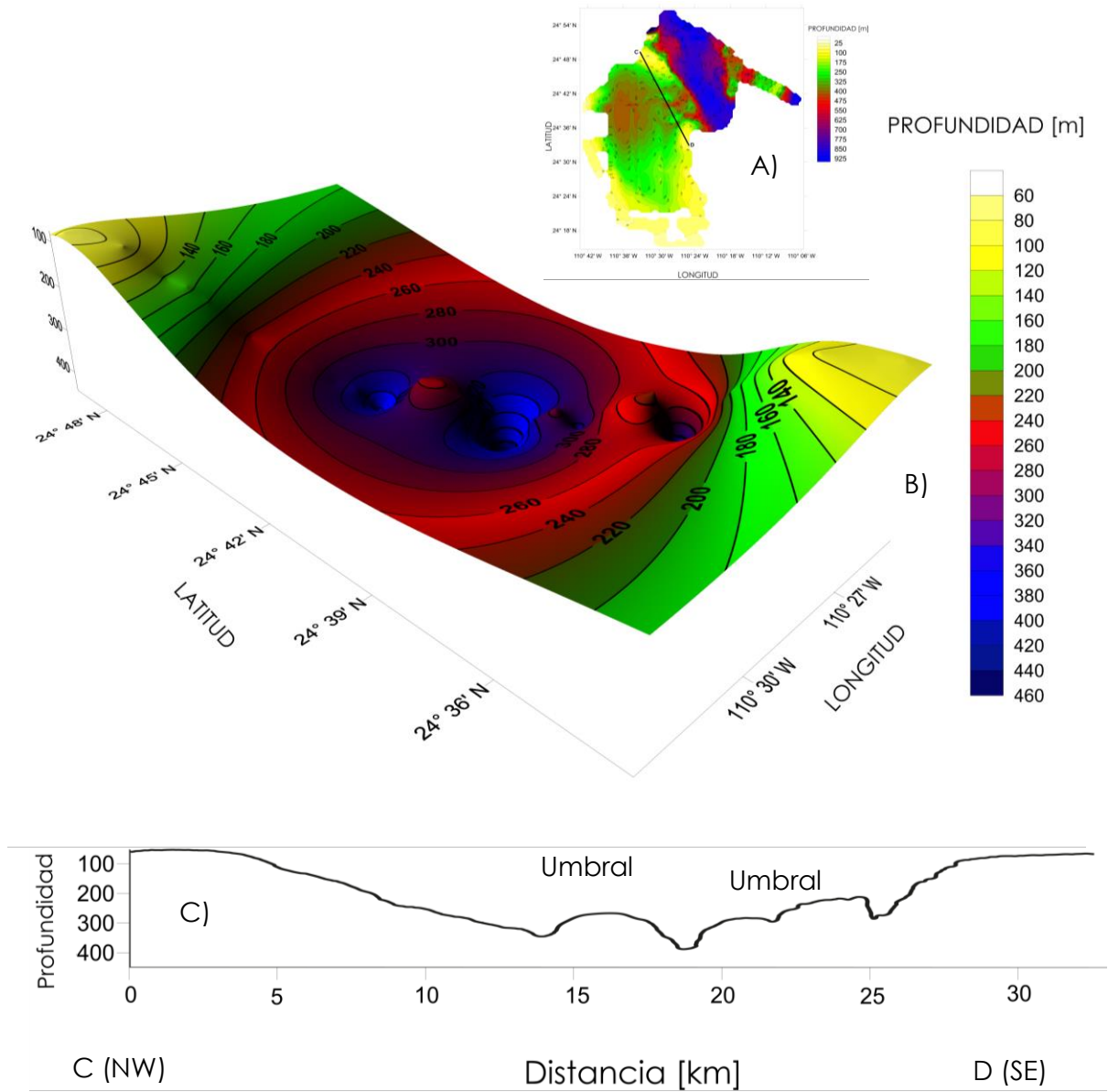


Figura 23. A) Localización del Perfil CD. B) Sección en 3D con escala de color que representa la profundidad. C) Sección en 2D donde se localizan dos umbrales.

El perfil C-D, con dirección NW-SE, presenta una pendiente suave que va desde 100 m hasta 360 m de profundidad, y en el punto que intersecta con el perfil A-B, se observa el umbral a 265 m. Seguido al umbral la profundidad cae a 430 m y posteriormente se observa otros rasgos topográficos, un amplio umbral que va de 315 m a 245 m de profundidad, de ahí se presente una pendiente ascendente.

Este perfil se presenta en Boca Grande (Figura 23).

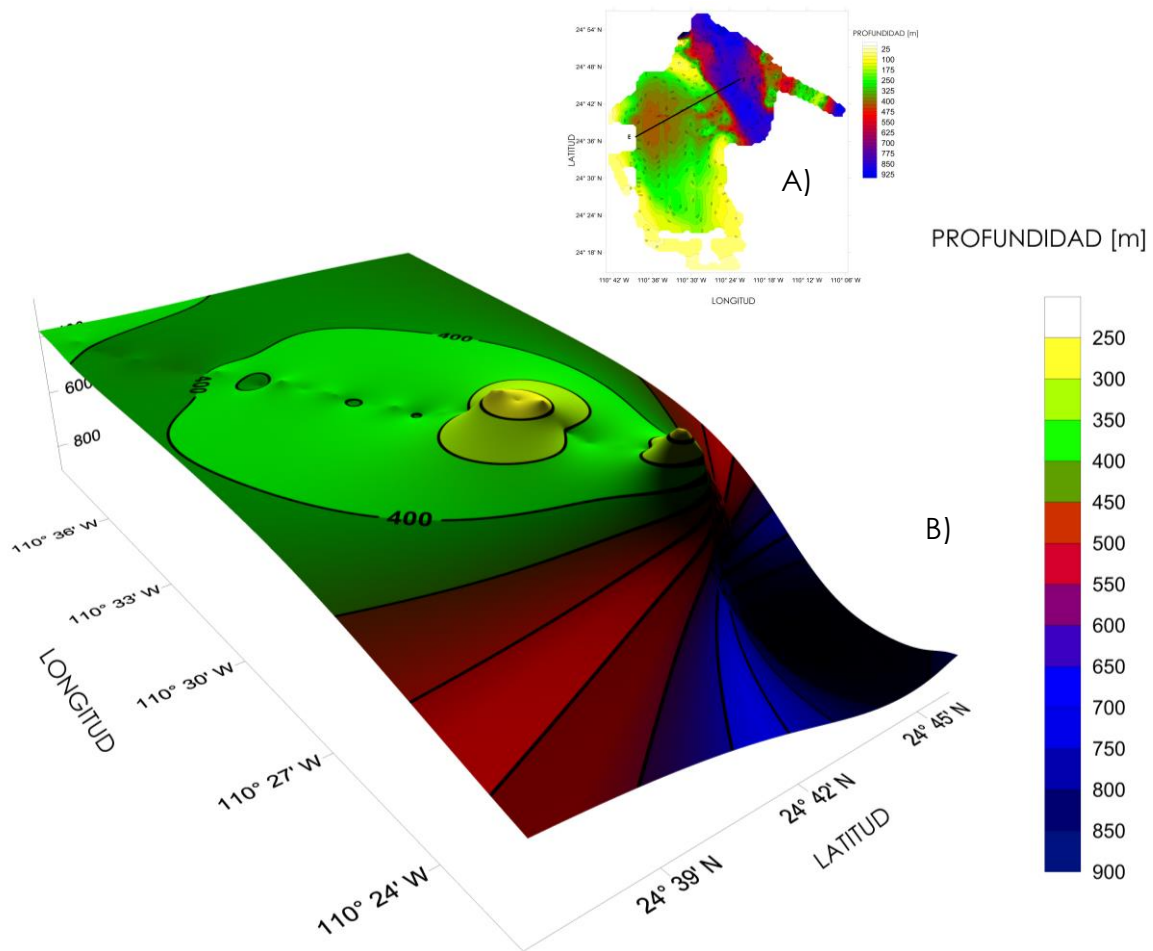


Figura 24. A) Localización del perfil EF. B) Sección en 3D con escala de color que representa la profundidad. C) Sección en 2D donde se localiza la Cuenca Alfonso dos umbrales y la depresión.

En el perfil EF se observa la Cuenca Alfonso con una profundidad que varía de 410

a 420 m, delimitada por un umbral a una profundidad de 300 m, seguida de una suave depresión a 370 m, delimitada por otro umbral con una profundidad de 282 m, que limita la comunicación con una zona mucho más profunda que alcanza 856 m de profundidad (Figura 24).

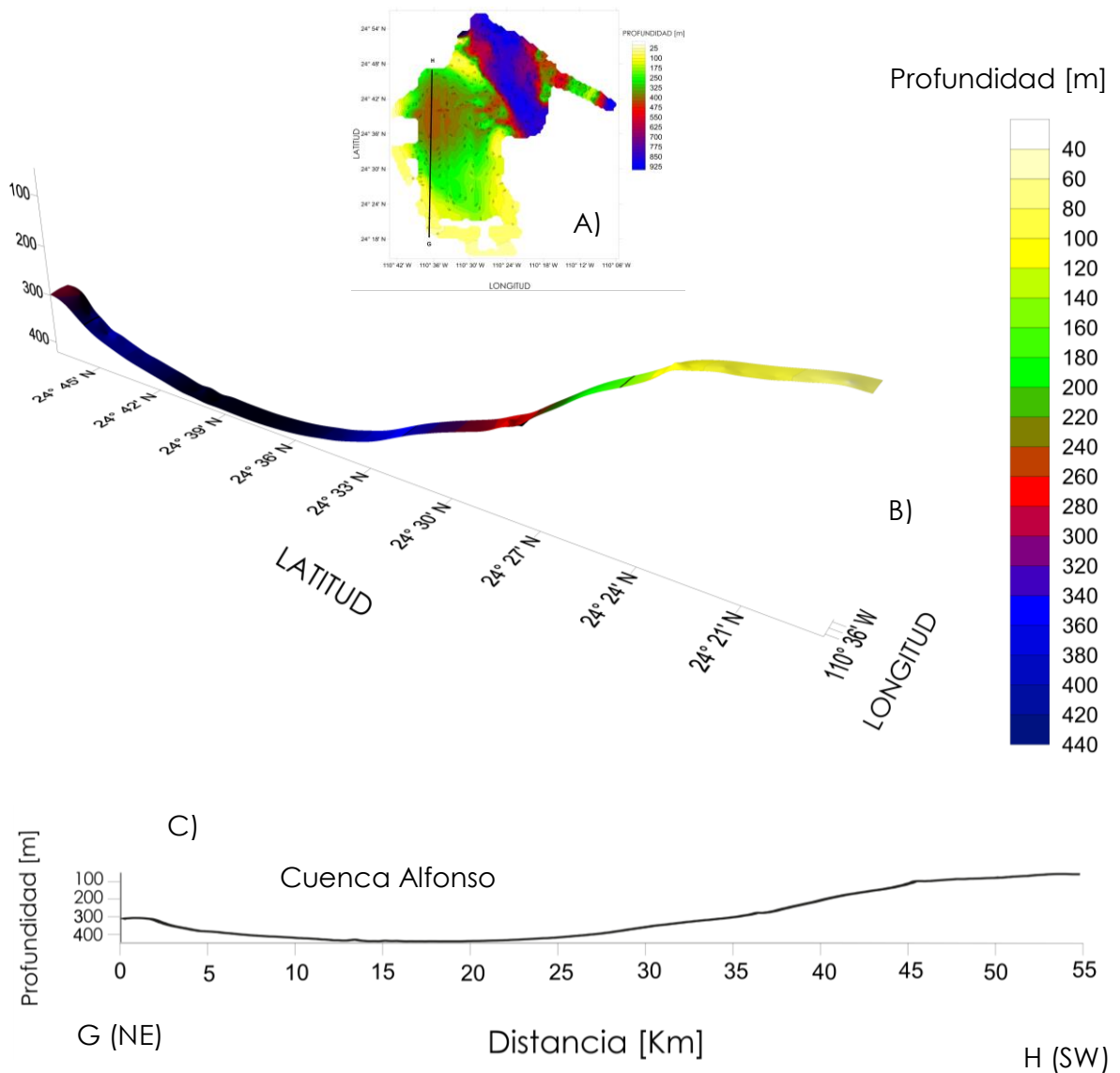


Figura 25. A) Localización del perfil GH. B) Sección en 3D con escala de color que representa la profundidad. C) Sección en 2D donde se localiza la Cuenca Alfonso y una pendiente ascendente.

El perfil G-H cruza la bahía del SW al NE, en donde se observa un gradiente de profundidad, en donde la parte más profunda de la Bahía de La Paz se localiza en la Cuenca Alfonso con profundidad de 420 m (Figura 25).

Perfil	Orientación	Observaciones
AB	SW-NE	Separación de la Cuenca Alfonso con la Cuenca Lobos por medio de un umbral.
CD	NW-SE	Distribución de uno de los umbrales el cual no permite el paso del Agua Intermedia del Pacífico.
EF	SW-NE	Presenta la Cuenca Alfonso, parte del umbral, además del Canal Espíritu Santo.
GH	NE-SW	Presenta la variación gradual de la profundidad siendo más profundo al norte que al sur.

Tabla 4. Resumen de los perfiles.

6. CONCLUSIONES

En el levantamiento batimétrico se realizaron 245 transectos obteniendo 52,647,910 datos puntales de la Bahía de La Paz y de Boca Grande, Golfo de California, en el B/O "El Puma" durante las campañas oceanográficas PALEOMAR I (2014) y PALEOMAR II (2016). Con estos datos se elaboraron tres mapas batimétricos en 3D, dos mapas en 2D y cuatro perfiles para poder observar los detalles del fondo marino.

Los mapas y los perfiles muestran detalladamente la forma del relieve del piso marino, lo que nos permite reconocer estructuras, las cuales nos ayudan a los próximos estudios, como por ejemplo: los estudios de circulación marina, ya que estos requieren de una buena batimetría para obtener una simulación confiable del patrón de corrientes.

En esta zona de estudio se presentan un relieve conformado por cuencas y umbrales, siendo estos últimos los que inhiben el paso de las aguas intermedias y profundas provenientes del Golfo de California hacia el interior de la bahía.

Algunos resultados que son comparables con los estudios anteriores son: en el área norte de la Bahía de La Paz donde se encuentra Cuenca Alfonso, la Cuenca Lobos y tres umbrales ubicados en Boca Grande. En su mayoría de los estudios previos sólo hacen mención a un umbral, sin embargo, es este estudio se encuentran tres umbrales importantes, que nos ayudaran a la comprensión de fenómenos físicos presentes en la bahía. Además no solo nos muestra las cuencas y los umbrales, si no también pequeños canales que se encuentran en los bordes, antes de llegar al escarpe que se encuentra en Boca Grande.

La Batimetría obtenida en este estudio fue realizada con una ecosonda multihaz, la cual tiene mayor resolución, que una batimetría realizada con una ecosonda monohaz, lo cual permitió identificar características más detalladas como por ejemplo, los tres umbrales y los pequeños canales. Para obtener estos rasgos con una ecosonda monohaz es más complicado ya que tienen que estar muy juntos los haces para que se pueda obtener una homogeneidad en la adquisición de los datos, en ambos casos es necesario tener una buena planeación para los transectos, sin embargo, si se quiere realizar una batimetría tan detallada usando una monohaz, aun es mayor la planeación, por que no sólo es el problema de la distancia de los haces, sino también el tiempo de adquisición los datos, por ejemplo, una multihaz realiza una sólo transecto y lanza 135 haces, entonces con una monohaz tiene que hacer 135 transectos para obtener la misma resolución de los datos.

Los estudios batimétricos son fundamentales para el estudio del clima y la circulación. Los oceanógrafos han empezado a trabajar con los geólogos marinos y los geofísicos para asegurar la adquisición correcta de los datos batimétricos.

REFERENCIAS

- Álvarez-Arellano, A. D., H. Rojas S., J. J. Prieto Mendoza** (1997). *Geología de la Bahía de La Paz* 13-29. En: Urban R. J. Y M. Ramirez R. (eds) 1997. *La Bahía de La Paz, Investigaciones y conservación*. Universidad Autónoma de Baja California Sur, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Scripps Institution of Oceanography, La Paz. B. C. S. 345 pp.
- Anónimo.** (2016). *Propagación del sonido en el mar*. Instituto Latinoamericano de la Comunicación educativa.
http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/htm/sec_8.html
- Anónimo.** (2016). *Las Ondas*. Recursostic.educacion.es
http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/4esofisicaquimica/4quincena11/4q11_contenidos_2a.htm
- Ballester Mora, L., García Sala, D.** (2010). *Estudio batimétrico con ecosonda multihaz y clasificación de Fondos*. Proyecto final de carrera. UPC. Barcelona, España.
- Bureau Hidrográfico Internacional** (2010). *Manual de hidrografía*. Publicación C-13. Organización Hidrográfica Internacional. Monaco.
- CARIS**, (2016). <http://www.caris.com/>
- CARIS**, (2008). *Manual de entrenamiento HIPS and SIPS 6.1*. Tampico, Tamaulipas. México.
- CARIS**, (2011). *Manual de entrenamiento HIPS and SIPS 7.1*. Cuernavaca. México.
- Castro R., R. Durazno, A. Mascarenhas, CA. Collins, A. Trasviña** (2006). *Thermohaline variability and geostrophic circulation in the southern portion of the Gulf of California*. *Deep-Sea Research* 1 53: 188-200.
- COMET MetEd**, (2015). *Introducción a la hidrografía, programas de la comunidad de UCAR*. Colaboración con la NOAA.
- Cruz-Orozco, R., C. Martínez Noriega, A. Mendoza Maravillas** (1996). *Batimetría y sedimentos de la Bahía de la Paz*, B. C. S., México. *Oceánides*, 11(1):21-27.

- Del Monte-Luna, P., F. Arreguín-Sánchez, L. Godínez-Orta, C. A., López Ferreira** (2005). *Batimetría actualizada de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México*. CICIMAR Océánides, 20 (2):75-77.
- Douglas, R.G., Gorsline, D., Grippio, A., Granado, I., González-Yajimovich, O.,** (2002). *Holocene Ocean-climate variations in Alfonso Basin, Gulf of California, Mexico*. Proceeds, 18th PACLIM Workshop, pp. 7-20.
- Jiménez-Illescas, A. R., M. Obeso N., D. A. Salas de León** (1997). *Oceanografía Física de La Bahía de la Paz*. B. C. S. 31-41. En: Urban R. J. Y M. Ramirez R. (eds) 1997. *La Bahía de La Paz, Investigaciones y conservación*. Universidad Autónoma de Baja California Sur, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Scripps Institution of Oceanography, La Paz. B. C. S. 345 pp.
- Kongsberg SIMRAD AS** (2002). *Operator manual EM300 Multibeam echo sounder base versión*. Horten, Norway.
- Kongsberg Maritime AS** (2003). *EM300, 30kHz multibeam echo sounder for depths reaching 5000 meters*, Horten, Norway.
- Michaud, F., Ratzov, G., Sallarès, V., Collot, J. Y., Pazmiño, N., & de la Torre, G.** (2009). *Métodos e Instrumentación acústica para la exploración en Geofísica Marina*. *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador desde la costa continental hasta las islas Galapagos*, 9-28.
- Molina-Cruz, A., Pérez Cruz, L., Monreal-Gómez, M. A.,** (2002). *Laminated sediments in the Bay of La Paz, Gulf of California: a depositional cycle regulated by pluvial flux*, *Sedimentology* 49: 1401-1410.
- Monreal-Gómez, M. A., A Molina-Cruz y D.A. Salas-de-León,** (2001). *Water masses and Cyclonic circulation in Bay of La Paz, Gulf of California, during June 1998*. *Journal of Marine Systems* 30: 305-315.
- Nava-Sánchez E. H., S. Gorsline D., Molina-Cruz A.,** (2001). *The Baja California península borderland: Structural and sedimentological characteristics*. *Sedimentary Geology* 144 (2001) 63-82
- Obeso-Nieblas, M., Jiménez-Illescas, A. R., Troyo-Diéguez, S.,** (1993). *Modelación de la marea en la Bahía de la Paz*, B.C.S. Inv. Mar. CICIMAR, 1993. Vol. 8 No.1 México.
- Obeso-Nieblas, M., Gaviño-Rodríguez J. H. Jiménez-Illescas, A. R & Shirasago-**

- Gérman B.**, (2002). *Simulación Numérica de la circulación por marea y viento del norte y sur en la bahía de La Paz, B.C.S.* *Oceánides*, 17(1):, 1-12.
- Obeso-Nieblas, M.**, (2003). *Variabilidad espacio-temporal de las condiciones oceanográficas de la Bahía de La Paz, BCS, México.* Tesis de doctorado, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, La Paz, 337pp.
- Obeso-Nieblas, M., B Shirasago, I Sánchez-Velasco & JH Gaviño-Rodríguez**, (2004). *Hydrographic variability in Bahía de La Paz, BCS, México, during the 1997-1998 El Niño.* *Deep-Sea Research II* 51:689-710.
- Obeso-Nieblas, M., B Shirasago-Germán, Gaviño-Rodríguez, J. H., Obeso-Huerta, H., Pérez-Lezama, EL., Jiménez-Illescas, A. R** (2007) *Hydrography at the North Mouth of La Paz Bay, Baja California Sur, México.* *Ciencias Marinas* (2007), 33(3): 281-291
- Obeso-Nieblas, M., Gaviño-Rodríguez, J. H., Obeso-Huerta, H., Muñoz-Casillas S. I.**, (2014). *Variabilidad espacial termohalina, masas de aguas y circulación geostrofica en Bahía de La Paz, Golfo de California.* *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol. 49 No. 3
- Ranz-Guerra, C.**, (2007). *Aguas muy poco profundas en austica subamrina. Factores que limitan la propagación de señales.* *Revista de Acustica* vol. 38. N 1 y 2 . Madrid España.
- Salinas-González, F., Zaytsev, O., Makarov, V.**, (2003) *Formación de la estructura termohalina del agua en la Bahía de La Paz de verano a otoño.* *Ciencias Marinas* (2003), 29(1): 51-65.
- Saracin, A., Calin, A.**, (2014). *Bathymetric measurements-principales and utility.* *International Journal of Energy and Environment*, Volume 8, 2014.

ANEXO I

Glosario

Anóxicas: Son zonas de agua marina, agua dulce o de aguas subterráneas en las que el oxígeno disuelto está agotado. Esta condición se encuentra generalmente en las áreas con un limitado intercambio de agua y con procesos de eutrofización en progreso.

Bajamar inferior: La bajamar más baja que ocurre en un día de marea por los efectos de la declinación de la Luna y el Sol. (La de menor nivel entre las dos bajamares de cualquier día de marea semi-diurna. La bajamar que tiene lugar diariamente durante los periodos de la marea diurna.

Cuenca: Depresión del fondo marino de extensión variable y de forma mas o menos equidimensional en un plano horizontal la cual es relativamente profundos.

Dinámica: Estudia los movimientos del agua de los mares, océanos, etc., considerando los mecanismos o causas que originan dicho movimientos.

Divergencia: Estructura de la corriente sobre la horizontal, de tal manera que los flujos se presentan en diferentes direcciones partiendo de un centro o una zona común.

Estratificación: Condición del fluido que implica la existencia de dos o más capas horizontales arregladas según su densidad, de tal manera que las capas menos densas están sobre las más densas.

Estructura termohalina: Es un cuerpo de agua, la estructura termohalina está dada por los valores de temperatura y salinidad para cada elemento del flujo. La estructura termohalina contiene la información sobre la distribución

de densidades en el flujo y por tanto la conformación del campo de masa.

Flujo: Movimiento de agua hacia el interior de una cuenca al subir la marea.

Humedad relativa: Es la cantidad de vapor de agua contenida en el aire, en cualquier momento determinado, normalmente es menor que el necesario para saturar el aire.

Masas de agua: Un volumen de agua usualmente identificado por valores típicos de temperatura y salinidad que le son característicos y que permiten distinguirlo de las aguas circundantes. Su formación ocurre en la interfaz con la atmósfera y por la mezcla de dos o más tipos de agua.

Marea: Es la variación provocada por la atracción del sol y la luna diferenciándola de los movimientos del nivel del mar que tiene otros orígenes, por ejemplo, el acarreo del esfuerzo del viento o las variaciones de la presión atmosférica.

Marea semidiurna: Es la variación del nivel del mar provocada por la marea en un lugar que produce dos pleamares y dos bajamares en un periodo de 24 hrs.

Merge: Es el proceso de cálculo de las posiciones finales y profundidades de sondeo, basado en todas las entradas pertinentes, tales como profundidades observadas, información de navegación y la dinámica del depósito que son *gyro*, *heave*, *pitch*, *roll*, y marea (CARIS, 2008).

Picnoclina: Es la capa del océano donde existe el máximo gradiente vertical de densidad. La mayoría de las veces coincide con la termoclina, y como ésta tiene gran variación estacional en latitudes medias y casi nulas en latitudes altas.

Pleamar superior: La pleamar más alta que ocurre en un día de marea producida

por los efectos de declinación de la Luna y el Sol.

Productividad primaria (pp): Es la cantidad de carbono fijado por organismos autotrófos a través de la síntesis de material orgánico proveniente de compuestos inorgánicos como el CO₂ y H₂O utilizando energía derivada de la radiación solar o de reacciones químicas por unidad de tiempo sobre la base de área (mg C m⁻² h⁻¹) o volumen (mg C m⁻³ h⁻¹).

Reflujo: Movimiento de la corriente de marea hacia afuera de una cuenca .

Subóxicas: Descripción de una zona de agua entre el óxico y anóxico en el que la concentración de oxígeno es muy baja.

Surgencia: Ascenso de aguas subsuperficiales, más frías y con mayor concentración de nutrientes, que reemplazan las aguas superficiales en la zona restringidas del océano.

Termoclina: Capa de agua que presenta un cambio abrupto de la temperatura con la profundidad. En los océanos se puede encontrar termoclinas temporales, las cuales tienen una variación estacional (anual) y termoclinas permanentes.

Referencia del Glosario

COMET MetEd, (2015). *Introducción a la hidrografía, programas de la comunidad de UCAR.* Colaboración con la NOAA.

Lavin, M. F. (1997). *Contribuciones a la Oceanografía Física en México.* Unión Geofísica Mexicana, Monografía N°3.