



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

## Facultad de Ingeniería

Comparación de datos batimétricos y  
métodos de interpolación, en la Sonda de  
Campeche

T E S I S

Que para optar por el título de:

**Ingeniero Geomático**

P r e s e n t a:

**Violeta del Carmen Martínez Meza**



Director de tesis: Ing. Erik Márquez García

México, D.F., Ciudad Universitaria 2014



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/137/14

Señorita  
VIOLETA DEL CARMEN MARTÍNEZ MEZA  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. ERIK MÁRQUEZ GARCÍA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO GEOMÁTICO.

**"COMPARACIÓN DE DATOS BATIMÉTRICOS Y MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN EN LA SONDA DE CAMPECHE"**

- I. INTRODUCCIÓN
- II. CONCEPTOS NECESARIOS DEL TEMA
- III. OBJETIVO
- IV. MATERIAL Y MÉTODO
- V. RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VII. ANEXOS
- VIII. BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 5 de septiembre del 2014.  
EL PRESIDENTE

M.I JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH\*gar.

## **Sinodales de Examen Profesional:**

Presidente: Dr. Artemio Gallegos García

Vocal: Ing. Erik Márquez García

Secretario: Ing. Marcos Trejo Hernández

1er. Suplente: M.C. Ranulfo Rodríguez Sobreya

2do. Suplente: M.I. Roberto Ascencio Villagómez

***“El Geomático mide, analiza, describe  
y representa nuestro espacio”***

***Erik Márquez García***

## INDICE

<b>Dedicatoria</b>	<b>6</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>7</b>
<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>Introducción</b>	<b>9</b>
<b>1. Conceptos necesarios del tema</b>	<b>10</b>
1.1 Levantamiento hidrográfico	10
1.2 Batimetría.	10
1.3 Línea de Costa	12
1.4 Geodesia	13
1.5 Cartografía	14
1.6 Análisis estadístico	0
1.6.1. Medidas de tendencia central	0
1.6.2. Medidas de dispersión	0
1.7. Modelos Digitales	0
1.7.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)	0
1.7.2. Modelo Digital de Elevación (MDE)	1
1.8 Métodos de Interpolación	2
1.8.1 Kriging	2
1.8.2 Ponderación de la distancia inversa (Inverse Distance Weighting, IDW)	3
1.8.3. Spline	3
1.8.4. Natural Neighbor (Vecino natural)	4
1.8.5. Red irregular de triángulos (Triangular Irregular Networks, TIN)	4
1.9 Percepción Remota	5
1.10 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	5
<b>2. Objetivo</b>	<b>6</b>
2.1. Objetivos específicos	6
<b>3. Área de Estudio</b>	<b>6</b>
<b>4. Material y métodos</b>	<b>7</b>
4.1. Sondeo del B/O Justo Sierra	7
4.2. Cartas náuticas	8
4.3. Topography Experiment/Poseidon (TOPEX/Poseidon)	10

<b>4.4 Metodología</b>	<b>11</b>
<b>5. Resultados</b>	<b>16</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>27</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>27</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>29</b>

## Dedicatoria

A Dios

Y a las personas más importantes de mi vida y que amo con todo mi corazón

María del Carmen Meza Andrade

Pedro Martínez Rojas

Claudia del Carmen Martínez Meza

José Pedro Martínez Meza

## Agradecimientos

A Dios por darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mis padres y hermanos por ser el pilar fundamental de mi vida, por su amor, cariño, comprensión, apoyo, consejos, ayuda en los momentos difíciles y por apoyarme incondicionalmente en cada camino que decido emprender.

Al Ing., Erik Márquez García por aceptar ser mi director de tesis y por la paciencia que me tuvo durante este proceso.

Al doctor Raymundo Lecuanda Camacho por sus comentarios, enseñanzas y por motivarme en este proceso

Al Dr. Artemio Gallegos García, Ing. Marcos Trejo Hernández, M.C. Ranulfo Rodríguez Sobreira, M.I. Roberto Ascencio Villagómez por aceptar ser sinodales de mi examen profesional.

A mis amigos que estuvieron siempre conmigo en mi paso por la universidad.

A mis profesores por sus clases y enseñanzas.

Y a mí universidad por darme la oportunidad de estudiar en la Facultad de Ingeniería.

## Resumen

En el presente trabajo se compararon los datos batimétricos de diferentes fuentes de información en la Sonda de Campeche. Se realizó un análisis estadístico para determinar la confiabilidad de los datos tomando como base comparativa la carta náutica S.M 840 de la Secretaría de Marina, los datos batimétricos que se compararon fueron los obtenidos por el B/O Justo Sierra de la UNAM, del satélite TOPEX/POSEIDON (Topography Experiment/Poseidon, por su nombre y siglas en inglés) así como los de la propia carta.

De la comparación de las fuentes de información se determinó que los datos más representativos fueron los obtenidos del B/O Justo Sierra, ya que el comparativo de éstos con los de la carta náutica presentan una mayor similitud, además de mayor cantidad de datos (7,831 puntos batimétricos) en la zona de estudio.

Una vez seleccionados los datos, se procedió a utilizar los diferentes métodos de interpolación, para determinar el más adecuado de acuerdo a la distribución y número de datos. Se concluyó que los métodos de interpolación más adecuados son: Kriging, Natural Neighbor e IDW (Inverse Distance Weighting, por su nombre y siglas en inglés), dado que sus representaciones son muy similares

El resultado de este trabajo es un primer acercamiento para un adecuado manejo de la información, desde su obtención hasta su procesamiento y representación cartográfica.

## Introducción

En la actualidad es necesario conocer la configuración del relieve marino, ya que es imprescindible para diversos trabajos como: la explotación, exploración, conservación, restauración y administración de los recursos marinos y del subsuelo; en los diseños de construcción de cualquier obra marítima, así como para investigaciones científicas y de modelado de las dinámicas costeras.

Una forma de conocer el relieve marino es a través de datos batimétricos (datos de profundidad), con los cuales se puede hacer una representación del relieve marino. Existen diferentes métodos para la obtención de datos batimétricos que van desde datos puntuales, hasta grandes extensiones, las cuales son obtenidas por sensores remotos.

Los métodos batimétricos nos permiten conocer la topografía del fondo del mar, cuya información a detalle es de vital importancia para la navegación y estudios oceanográficos, así como para la elaboración de cartas náuticas o cartas batimétricas que representan una visión de continuidad del relieve submarino.

Existen diferentes bases de datos con información batimétrica, sin embargo muchas de estas bases no incluyen la información de que método batimétrico fue usado para la obtención de los datos y las correcciones realizadas a los mismos. Por lo que se hace necesario un análisis antes de usarlas para determinar su confiabilidad. Existen fuentes mundiales como ETOPO, GEBCO, TOPEX/POSEIDON, y regionales y/o nacionales.

Para el caso de México existen diferentes instituciones y universidades como: UNAM, CICESE, INEGI, CONABIO, SEMAR, CFE, PEMEX, sin embargo muchas de ellas están catalogadas erróneamente como información confidencial y las accesibles se desconoce el método y equipo de obtención de datos y sus correcciones.

La representación cartográfica de la continuidad del relieve marino, se da a partir de datos batimétricos puntuales, esta continuidad se obtiene empleando métodos de interpolación cuyos resultados se pueden presentar como las isóbatas (línea de igual profundidad), una matriz de datos continuos, modelos digitales de profundidad, código de colores entre otros. La interpolación es un método por medio del cual se estima el dato batimétrico y su posición geográfica ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) a partir de datos batimétricos conocidos.

Existen diferentes métodos de interpolación desde los más sencillos que son los lineales hasta los de funciones continuas, la interpolación permite comparar, a partir de representaciones cartográficas, datos de distintas fuentes y con distinto nivel de detalle.

Este trabajo utilizó datos secundarios de tres diferentes bases batimétricas, se estableció un área común para el análisis que corresponde a la Sonda de Campeche. Las bases batimétricas empleadas fueron: B/O Justo Sierra (UNAM), TOPEX/POSEIDON y la carta náutica de SEMAR.

# 1. Conceptos necesarios del tema

## 1.1 Levantamiento hidrográfico

Fundamentalmente el levantamiento hidrográfico es el procedimiento por el cual se define la configuración del fondo de los océanos y de las aguas navegables de los lagos, ríos y bahías. Dicha ciencia abarca un campo amplio y variado de actividades, las cuales son necesarias para la compilación de cartas náuticas y publicaciones relacionadas con las mismas (SEMAR, 1974).

## 1.2 Batimetría.

La **batimetría** se define como el “estudio de las profundidades oceánicas, lacustres y corrientes de agua continuas como ríos, mediante el trazado de mapas de isóbatas” (Real Academia de la Lengua Española, 2001); también se ha definido como la ciencia que mide las profundidades marinas, para determinar la topografía del mar, cuya finalidad es obtener las coordenadas x, y, z de los puntos. La batimetría requiere la elección de un sistema de referencia que defina la ubicación de un punto en el plano x, y, z (Martínez y Sánchez, 2005).

Las mediciones batimétricas, tienen su origen en el pueblo egipcio, quienes con el uso de piedras atadas a cuerdas examinaban la profundidad del fondo y han evolucionado hasta la fecha (Universidad de Cádiz, 2012).

Los primeros levantamientos batimétricos eran posicionados por métodos astronómicos para el control terrestre del levantamiento geodésico (latitud y longitud), usaban teodolitos para las observaciones astronómicas, distanciómetros para medición de distancias y el escandallo para el sondeo. Las primeras cartas náuticas eran dibujadas y reproducidas de “maduros”, y complementadas con cartas existentes, ya que no se contaba con suficientes datos propios para elaborarlas (SEMAR, 2013).

Los métodos batimétricos han ido evolucionando significativamente, hasta antes del uso del GPS, la batimetría se dividía en la obtención de la planimetría por una parte y la altimetría por otra. Una vez determinadas las bases desde la costa, se liga el levantamiento batimétrico en dos fases:

1. Determinación de la posición de la embarcación
2. Determinar la profundidad.

Estos datos, se representan gráficamente sobre un plano, formando el plano submarino referido a la costa (Farjas, 2000).

En la actualidad, existen muchas maneras de representar el fondo marino, pero la sincronización entre GPS y las sondas, hace que la precisión aumente, que la capacidad sea mucho mayor y que se hallen las coordenadas al instante.

Además de este tipo de obtención, cabe destacar otro método:

Batimetría mediante fotogrametría.- Su uso queda limitado a aguas no muy profundas, siendo esta variable la principal limitación de este método, la batimetría por este método requiere aplicación de correcciones como mareas, índice de refracción, elementos suspendidos, etc., (Farjas, 2000).

Batimetría mediante LIDAR (Light detection and ranging).- La mejora de la tecnología láser permitió crear sistemas capaces de obtener una resolución de hasta 20 cm. Se demostró que el sistema láser neón permitía apreciar hasta una profundidad de más de 10m y en agua turbia de 4 a 6m. LIDAR transmite pulsaciones de luz que son reflejadas por el terreno y por otros objetos. Las pulsaciones recibidas tras la emisión son convertidas de fotones a impulsos eléctricos. La distancia será calculada a partir del tiempo transcurrido entre la transmisión y la recepción. Los trabajos realizados con el LIDAR presentan una gran precisión en fondos menores de 3 metros, con variaciones entre 7 y 20 cm. Este método permite conseguir datos mucho más rápidos que con las técnicas convencionales en embarcaciones (León, 2003).

Batimetría mediante Teledetección.- Se utilizan satélites como; TOPEX-POSEIDON, GEOSAT, LANDSAT MSS, SPOT, RADARSAT., dadas sus características naturales, el agua presenta una mayor reflectividad en las bandas cortas (visible) y menor en las largas (infrarrojo), por lo que el uso de las primeras es básico cuando se pretende separar los elementos en suspensión que se encuentran en la columna de agua (Chuvieco, 2002).

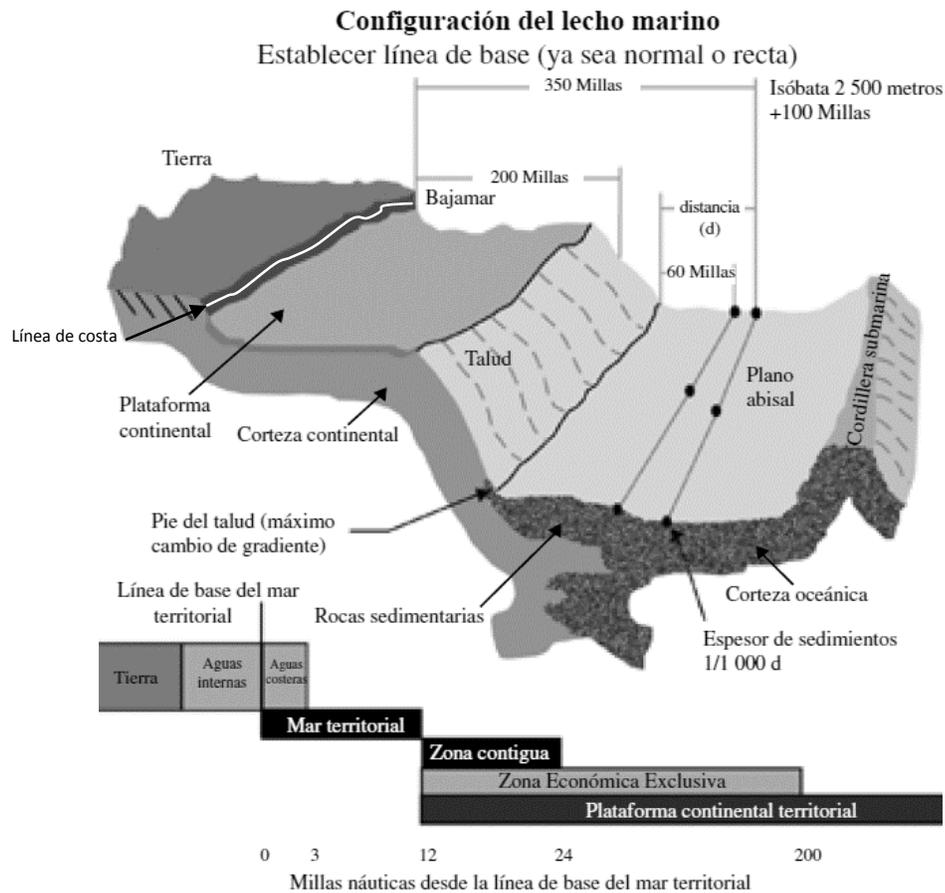
Batimetría por sonar de barrido lateral.- consiste en un emisor receptor de ondas acústicas que va instalado en un objeto remolcado denominado "fish", que va unido a la embarcación mediante un cable de acero, que además de sujetarlo, permite transmitir la información del "fish" al barco. Aunque pueden obtener la batimetría de una zona, la precisión no es muy elevada por lo que suelen ser empleados casi exclusivamente para la obtención de imágenes del fondo (León, 2003).

Batimetría por sonar.- Los sonares acústicos son los métodos de batimetría más empleados actualmente. Están basados en el tiempo que emplea una onda acústica en recorrer la distancia que separa al sonar del fondo marino, teniendo en cuenta que el tiempo es doble, ya que la señal transmitida deberá regresar al sonar. Los sonares acústicos se clasifican según su ancho de haz en sonares de haz estrecho y sonares de haz ancho. Dependiendo del número de haces se clasifican en sonares de haz simple o monohaz y sonares de haz múltiple o multihaz. (León, 2003).

Es de vital importancia tener representaciones del fondo marino y mientras más precisas sean éstas y más aspectos contemplen, mejor será la valoración que se haga del mismo, en este aspecto la representación cartográfica a través de mapas del relieve marino es una herramienta insustituible.

### 1.3 Línea de Costa

Desde el punto de vista de la cartografía náutica, la línea de costa es una línea doble, compuesta por la línea de la pleamar y la línea de la bajamar, de forma que delimita, en sentido horizontal, la zona de transición entre la tierra y el mar allí donde las mareas son apreciables y que se confunden en una sola donde no lo son. La línea de bajamar viene determinada por el Cero Hidrográfico. La "línea de Pleamar" es la línea horizontal que queda determinada por el máximo avance de la marea hacia tierra (Armada Española, 1996). Figura 1



**Figura 1. Configuración del lecho marino**

Bustamante, M.M.A. Maldonado, C.H., (2002). Tomado de *Revista de información y análisis*. Delimitación de espacios marítimos. 19, pp (37 - 44)

## 1.4 Geodesia

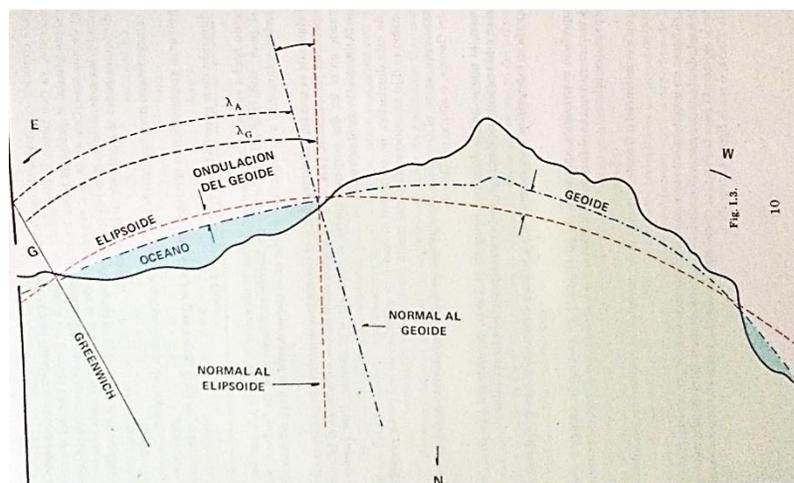
La geodesia es la ciencia que define la forma y dimensiones de la Tierra a través de sus dos ramas; la **gravimetría**, para la determinación de la gravedad de la Tierra y sus anomalías, la gravedad de la Tierra determina su forma y el geode es la superficie equipotencial del campo gravitatorio y la **astronomía de posición** que determina la posición de los puntos del globo a través de la observación de las estrellas y satélites artificiales, en referencia a las leyes de la mecánica celeste (Gomasca, 2009).

La forma de la tierra se representa matemáticamente con más precisión (figura 2), con un **elipsoide** de revolución que se genera al hacer girar una elipse alrededor de su eje menor (SEMAR, 2013).

El **datum** es el conjunto de parámetros que establecen el origen teórico para las coordenadas terrestres latitud y longitud.

El **datum** de referencia vertical, para las elevaciones, con más o menos excepciones, es el de la pleamar promedio o el correspondiente al nivel medio del mar, el **datum** de referencia geográfica, llamado también **datum** de referencia horizontal o geodésica, es la posición adoptada en latitud y longitud de un punto único, al que se están referidos todos los accidentes cartografiados, de una vasta región (SEMAR, 1974).

Un **sistema de referencia** es el conjunto de medidas y reglas para la colocación de los puntos de la superficie terrestre en el espacio, de acuerdo con un sistema establecido de coordenadas (Gomasca, 2009).



**Figura 2. Geodesia teórica**  
SEMAR, 1974. *Compendio de Hidrografía primera parte [Fig. 1.3]*

## 1.5 Cartografía

La **cartografía** es la disciplina que trata con el arte, la ciencia y la tecnología de fabricación y uso de mapas (Asociación Cartográfica Internacional, 2003).

Un **mapa** es una representación de la realidad simbolizada geográfica, que representa las funciones o características seleccionadas, resultante del esfuerzo creativo de la ejecución de su autor de opciones, y está diseñado para su uso cuando las relaciones espaciales son de importancia primordial (Asociación Cartográfica Internacional, 2003).

El **mapa** reúne, analiza datos y medidas de las diversas regiones de la tierra, se encarga del trazado y estudio de estos y es una representación gráfica a una escala reducida de la superficie de la tierra.

Al tener la tierra una forma de matemática de elipsoide, se vale de sistemas de proyecciones para poderla representar en un plano.

Se entiende por **proyección**, la representación en una hoja plana, los puntos y curvas trazadas en una esfera o parte de ésta; las curvas pueden ser meridianos, paralelos, etc. Indiferente de los tipos de proyección usados, todos los mapas tendrán un cierto grado de distorsión, puesto que es imposible reproducir exactamente una esfera en una superficie plana (SEMAR 1974).

Las proyecciones utilizadas en México son: Universal Transversa de Mercator (UTM) y la Cónica conforme de Lambert (CCL); ambas son proyección conforme lo cual nos indica que conservan la forma (ángulo).

En la publicación S-32 “Diccionario Hidrográfico”, de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) de 1996, define una **carta náutica** como “...una carta especialmente destinada para satisfacer los requerimientos de navegación marítima. Mostrando profundidades de agua, tipo de fondo, elevaciones, configuración y límites de la costa, peligros y ayudas a la navegación. Durante su construcción, se le asigna escala y uso basándose en la naturaleza de los datos, determinándose el propósito de navegación, la cobertura y la calidad de los datos que en esta se muestra.”

Las **cartas náuticas** son importantes para la navegación ya que estas permiten al navegante ubicar lugares peligrosos y provee la información para determinar su posición (figura 3).

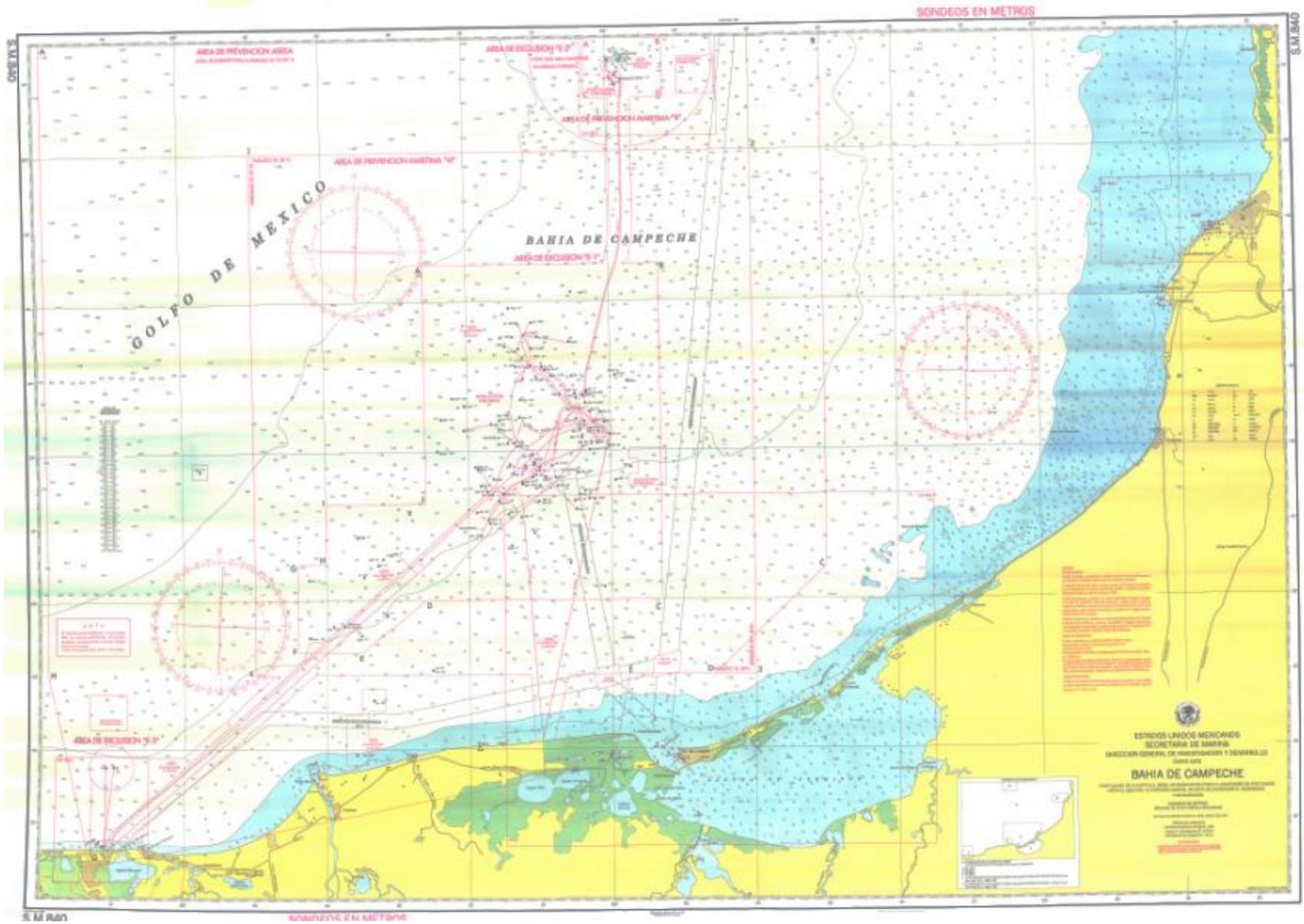


Figura 3. Carta náutica S.M.840 SEMAR 2010

## 1.6 Análisis estadístico

### 1.6.1. Medidas de tendencia central

Son aquellas medidas que nos proporcionan un dato que, con ciertos matices, puede considerarse representante de los  $n$  datos obtenidos del muestreo (Pinilla, 2009)

Media.- es la suma de los valores de todas las observaciones divididas por el número total de datos (promedio).

Mediana.- Es el valor de la serie de datos que divide al conjunto de datos en dos partes iguales.

Moda.- Es el dato que más veces se repite.

### 1.6.2. Medidas de dispersión

Estas medidas reflejan la separación o alejamiento de los elementos de una muestra. Estas medidas deben acompañar a las medidas de tendencia central, particularmente a la media, para evitar los efectos que los datos extremos tienen sobre ellas (Pinilla, 2009).

Desviación estándar.- Indica cuánto tienden a alejarse los datos puntuales de la media. Una desviación estándar grande indica que los puntos están lejos de la media y una pequeña que los datos están agrupados cerca de la media.

## 1.7. Modelos Digitales

### 1.7.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)

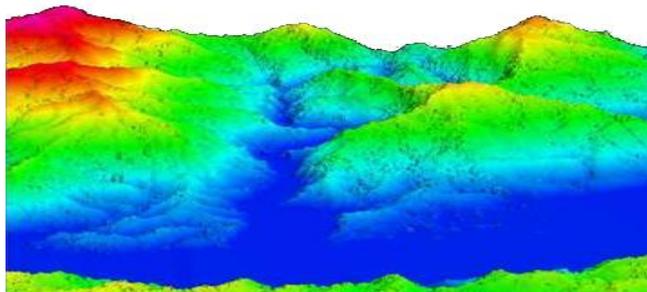
Un modelo digital de terreno (MDT) puede definirse como una representación estadística del terreno, en forma de números digitales, por medio de un conjunto de puntos con coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  respecto a un sistema de Georreferenciación conocido (Miller y Laflamme, 1958). Figura 4

Características de los modelos digitales de terreno (Felicísimo, 1994):

- Los datos están codificados en cifras, lo que permite su tratamiento por medios informáticos
- Los datos están estructurados
- Existe una relación entre la posición geográfica y el valor de la altura.
- Los datos tienen una distribución continua

La construcción de un MDT implica el paso de los valores de altitud tomados en puntos de muestreo a una estructura continua de datos, proceso que se consigue mediante interpolación,

de manera que se estiman valores de altura donde no se dispone de datos (Martínez-Casasnovas, 1999).



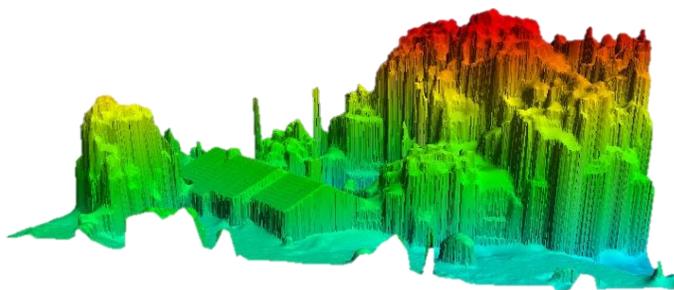
**Figura 4. Modelo digital de elevación con vista en perspectiva**  
Tomado de <http://www.inegi.org.mx>

### 1.7.2. Modelo Digital de Elevación (MDE)

Un modelo digital de elevación según INEGI es “una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo”. Figura 5

Los modelos digitales de elevación se han dividido en dos grupos en función de la representación de los datos: vectorial y raster. Los modelos vectoriales están basados en puntos y líneas, definidas por sus coordenadas. En los modelos raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que forman el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada (Felicísimo, 1994).

Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura rectangular, en estos modelos existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo el método que se emplea para generarlos (INEGI, 2000).



**Figura 5. Modelo digital de elevación TIN fotogramétrica**  
(2014). Lidar Dron. Tomado de <http://lidardron.com/?p=185>

## 1.8 Métodos de Interpolación

La interpolación predice valores en lugares que carecen de puntos de muestra y cumplen tres funciones; estimar valores de  $z$  para ubicaciones particulares ( $x, y, z$ ), estima valores de  $z$  para una cuadrícula rectangular y para cambiar la resolución de la cuadrícula en un archivo *raster* (Oliver, 1990).

La interpolación de datos ofrece la ventaja de proyectar mapas o superficies continuas a partir de datos discretos; sin embargo, la utilización de una buena [sic] cantidad de puntos del área en estudio limita su utilización (Johnston *et al.*, 2001).

La precisión del mapa generado, a partir de las características de un suelo en particular, depende en gran medida de la estructura espacial de los datos, donde entre más fuerte la correlación espacial de los datos, mejor la calidad del mapeo (Kravchenko, 2003).

Hay dos categorías de técnicas de interpolación, la primera son las deterministas que crean superficies basadas en los puntos de medición o fórmulas matemáticas y las Geoestadísticas que se basan en estadísticas y se utilizan para el modelado de superficies de predicción más avanzada que incluye también un cierto grado de la certeza o exactitud [sic] de las predicciones (ArcGIS, 2010).

### 1.8.1 Kriging

Kriging es un algoritmo basado en geoestadística o “arte de modelizar datos espaciales” (Siabato, W. y Yudego, C., 2004), esta técnica tiene en cuenta el comportamiento espacial de la variable a partir de la distancia y el grado de variación entre los puntos (depende de la relación espacial y estadística que hay entre los puntos de la muestra (Moral, 2003).

Este método de interpolación define la altitud como una variable regionalizada, suponiendo que las funciones de correlación espacial pueden explicar en su totalidad o parcialmente la variación espacial de esta, que es la variable estimada que se va a representar a través de funciones homogéneas que se deducen de toda el área de análisis, es decir, los valores próximos de  $z$  (Giraldo-Henao, 2003)

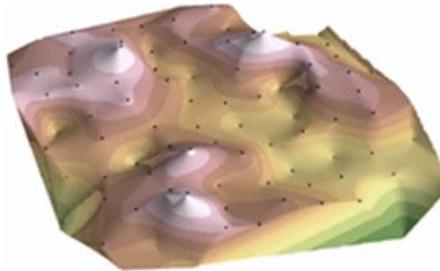
Álvarez y colaboradores (2011) expresaron que los supuestos estimados en este tipo de métodos suponen que la altitud en un punto esté determinada por los valores de los puntos más próximos distribuidos a distancias variables, y que en función de ellas habrá una mayor o menor inferencia Figura 6



**Figura 6. Representación del resultado de la interpolación por el método de Kriging**  
*Tomado de <http://help.arcgis.com>*

### 1.8.2 Ponderación de la distancia inversa (Inverse Distance Weighting, IDW)

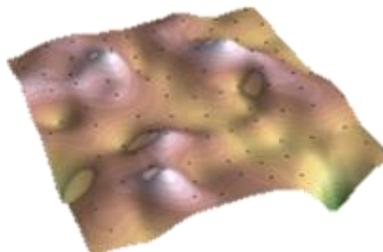
IDW determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de su ubicación. Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. (ArcGIS, 2012). Figura 7



**Figura 7. Representación del resultado de la interpolación IDW**  
*Tomado de <http://help.arcgis.com>*

### 1.8.3. Spline

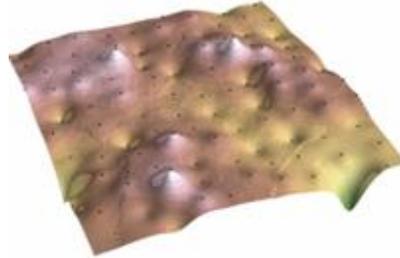
Álvarez y colaboradores (2011) exponen que Spline es un método de interpolación inexacto, ya que altera ligeramente el valor y la posición de los datos, generando un resultado muy suavizado (el valor resultado de la interpolación en los puntos origen sobre los que se realiza la interpolación cambia tras aplicar el proceso). El valor que predice para los lugares donde no existe el dato puede verse alterado, ya que no fuerza a la superficie resultado para que se ajuste de forma exacta a la muestra. Figura 8



**Figura 8. Representación del resultado de la Interpolación Spline** Tomado de <http://help.arcgis.com>

#### 1.8.4. Natural Neighbor (Vecino natural)

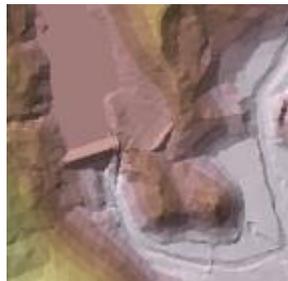
La interpolación de vecino natural, se puede utilizar tanto para la interpolación y la extrapolación, y generalmente funciona bien con puntos de dispersión agrupados. Otro método de promedio ponderado, la ecuación básica que se utiliza en la interpolación vecino natural es idéntica a la utilizada en la interpolación IDW. Figura 9 Este método puede manejar eficientemente grandes conjuntos de datos de punto de entrada. Cuando se utiliza el método de Natural Neighbor, coordenadas locales definen la cantidad de influencia cualquier punto de dispersión tendrá en celdas de salida. (ArcGIS, 2012).



**Figura 9. Representación del resultado de la Interpolación Natural Neighbor**  
Tomado de <http://help.arcgis.com>

#### 1.8.5. Red irregular de triángulos (Triangular Irregular Networks, TIN)

Las TIN son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos), una característica es que el tamaño de los triángulos puede ajustar a la complejidad del terreno, de modo que los triángulos serán más pequeños en zonas con mayor variación de relieve y más grandes en zonas con menor variación. (ArcGIS, 2012) Figura 10

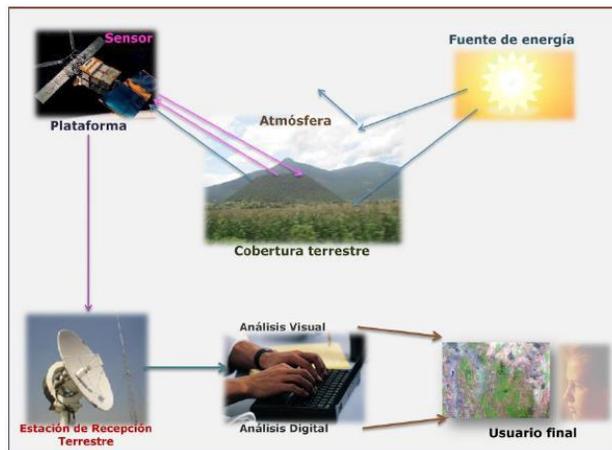


**Figura 10. Resultado de la interpolación TIN**  
Tomado de <http://help.arcgis.com>

## 1.9 Percepción Remota

Consiste en un conjunto de técnicas que permiten obtener información de los objetos a partir del análisis de su respuesta espectral. En general, los sistemas de captura de datos están constituidos por sensores transportados por aeronaves satélites, que son capaces de recibir y almacenar la respuesta espectral de los objetos en varias bandas del espectro electromagnético. La información así obtenida es plasmada en material fotográfico, o bien en archivos digitales que pueden ser analizados mediante algoritmos de clasificación numérica o mediante análisis visual (Bocco, 2004).

La siguiente Figura 11 muestra el proceso de percepción remota.



**Figura 11. Diagrama de los elementos del proceso de Percepción remota o teledetección**

Tomado de <http://www.inegi.org.mx>

## 1.10 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Un **SIG** (Sistema de Información Geográfica) se define como un "...conjunto integrado de medios y métodos informáticos, capaz de recoger, verificar, almacenar, gestionar, actualizar, manipular, recuperar, transformar, analizar, mostrar y transferir datos espacialmente referidos a la Tierra" (Burrough, "*et al.*" 1986) Figura 12

Los SIG son una nueva metodología que permite gestionar y analizar la información espacial, y surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato (Peña, 2006). Es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones. La información geográfica contiene una referencia geográfica de latitud y longitud, los SIG funcionan con dos tipos de información geográfica: el modelo vector y el modelo raster.



Figura 12. Proceso de un sistema de información geográfica

## 2. Objetivo

El presente trabajo tiene por objeto comparar los datos batimétricos obtenidos por diferentes métodos en la Sonda de Campeche, datos obtenidos por sensores remotos (TOPEX/Poseidón), carta náutica S.M 840 de la Secretaría de Marina y cruceros de investigación del B/O *Justo Sierra* de la UNAM. Así como determinar el método de interpolación más adecuado al conjunto de datos batimétricos para esta zona.

### 2.1. Objetivos específicos

- I. Conocer la distribución de los datos batimétricos del buque Justo Sierra, de TOPEX/Poseidón, de la carta náutica de SEMAR y el comparativo entre ellas.
- II. Comparar los resultados de los diferentes métodos de interpolación de los datos batimétricos.
- III. Determinar cual es el mejor conjunto de datos batimétricos y corroborar con la creación de un modelo digital de profundidad del área de estudio.

## 3. Área de Estudio

La Sonda de Campeche se localiza en la porción occidental de la Península de Yucatán frente a las costas del estado de Campeche y Tabasco, en la plataforma continental de México, al sureste de la República Mexicana. (Fumas y Sumayda, 1987)

La Sonda de Campeche es un área de alta biodiversidad y al mismo tiempo una región de intensa expansión industrial costera que incluye puertos industriales y pesqueros, explotación petrolera o industria pesquera (Yañez-Arancibia y Sánchez Gil, 1986)

Según el mapa fisiográfico submarino del golfo de México, la zona de estudio se encuentra en la División geomorfológica plano Atlántico, en la provincia Golfo de México, entre la sección Este-México subsección Tabasco y la sección Yucatán-Campeche subsección interior (1B<sub>4c</sub> y 1B<sub>5a</sub>). Figura 13.

La Sonda de Campeche, en un área aproximada de 8000 km<sup>2</sup>, cuenta con el 90% de las instalaciones para la extracción y el procesamiento del petróleo crudo y gas natural que hay en el Suroeste del Golfo de México, es actualmente la región más importante del país desde el punto de vista de producción de hidrocarburos.



**Figura 13. Submarine physiographic map of the gulf of Mexico**  
Obtenido de Geological Society of America Bulletin, Bergantino, R.N  
Submarine Regional Geomorphology of the Gulf of México,

## 4. Material y métodos

### 4.1. Sondeo del B/O Justo Sierra

Los datos del *B/O Justo Sierra* fueron obtenidos de la tesis “Comparaciones de los datos batimétricos obtenidos por el satélite TOPEX/Poseidón y los recabados por los barcos que navegan en el golfo de México” de Jesús Manuel Tapia López.

La base de datos de batimetría del B/O fue recabado en cinco cruceros oceanográficos realizados por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM (1990 - 2002), están georreferenciados con el elipsoide de Clark 1866 y Datum de Norteamérica (NAD27), (Tapia, 2007).

El B/O Justo Sierra fue abanderado el 20 de noviembre de 1982, posee su muelle y edificio de operaciones en Tuxpan, Ver. Tiene como área de acción el Golfo de México y el Caribe Mexicano, ésta embarcación es propiedad de la UNAM y tiene por objetivos: primero, realizar las investigaciones básicas comprendidas en el programa de trabajo de los científicos; segundo, como el país requiere de personal altamente calificado, fortalecer los programas de formación de recursos humanos mediante la experiencia en el mar y la obtención de datos y materiales para la tesis de licenciatura posgrado, particularmente para las de especialización, maestría y doctorado en ciencias del mar del Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM; tercero, participar con otras instituciones nacionales de educación superior e investigación, en un amplio programa a largo plazo, de exploración sistemática de la zona económica exclusiva de México; y cuarto, realizar estudios específicos por encargo de otras instituciones (UNAM, 2009 ). Figura 14



**Figura 14. El buque Justo Sierra**  
Notimex (2011) CNN México. Tomado de: <http://mexico.cnn.com/>

#### 4.2. Cartas náuticas

Con el fin de dotar a los buques con la información apropiada para una navegación segura, la SEMAR, desarrolló el Programa Nacional de Cartografía Náutica (PNCN), el cual consiste en un mosaico de 404 cartas náuticas a diferentes escalas y para los diferentes propósitos de la navegación que cubren las aguas mexicanas. El PNCN tiene un avance de 182 cartas de papel editadas a la fecha correspondiente al 45% de su cobertura total. Todas estas cartas se encuentran consideradas en el **Catálogo de Cartas y Publicaciones Náuticas** correspondiente al año 2013(SEMAR, 2013). Figura 15



**Figura 15. Catálogo de cartas y publicaciones náuticas 2013**  
Secretaría de Marina (2005). Tomado de <http://digaohm.semar.gob.mx>

El actual mosaico cartográfico nacional cuenta con cartas regionales, con lo que se cubren ambos litorales, incluyendo la Zona Económica Exclusiva (ZEE); sin embargo, es necesario producir cartas náuticas principalmente: costeras, de aproximación y portulanos en escalas de entre (1: 250 000 y mayores), con esto se cubriría con más detalle las aproximaciones a la costa, radas, bahías, fondeaderos, etc. (SEMAR, 2013).

**Clasificación Internacional según su escala** (SEMAR, 2013).

**Escala pequeña:** Cartas de escalas menores o iguales a 1:2 000 000.

**Escala Mediana:** Generales: 1:2 000 000 – 1:350 000, Costeras: 1: 350 000 - 1:75 000.

**Escala Grande:** Aproximaciones: 1:75 000 – 1:30 000, Portulanos: Mayores a 1:30 000, Atracaderos o Fondeaderos: Escalas muy grandes.

La SEMAR a través de la Dirección general adjunta de oceanografía, hidrografía y meteorología (DIGAOHM), edita la Cartografía Náutica Nacional ajustando sus escalas a las necesidades de navegación en sus puertos y aguas navegables, clasificándolas en los siguientes propósitos de navegación y escalas:

**Propósito y Escala:**

**Regionales e internacionales:** 1:1 500 000 y menores, **Generales:** 1:499 999 a 1:350 000.

**Costeras:** 1:349 999 a 1:600 000, **Aproximaciones:** 1:59 999 a 1:17 500. **Portulanos:** 1:17 499 a 1:4 000, **Fondeaderos:** 1:3 999 y mayores.

**Propósito u Objetivo:**

**Regionales:** Carta náutica para grandes travesías. Abarcan grandes proporciones de los océanos o mares incluyendo el mapamundi. El rango de las escalas será igual o menor a 1: 1 500 000.

**Generales:** Satisfacen la navegación oceánica. El rango de las escalas se encuentra entre 1:499 999 a 1:350 000.

**Costeras:** Permiten desarrollar navegación cercana a la costa, apoyándose en referencias como las ayudas a la navegación y los puntos sobresalientes de la costa. Sus escalas varían entre 1: 349 999 a 1:60 000.

**Aproximaciones:** Permiten acercarse de manera segura a los puertos y canales del litoral después de llevar una navegación oceánica o una costera. Sus escalas se encuentran entre 1:59 999 a 1:17 500.

**Portulanos:** Diseñadas para recalar a puerto y zonas de fondeo, utilizar las instalaciones y zarpar de ahí con seguridad. Sus escalas varían entre 1:17 499 a 1:4 000.

Las profundidades de estas cartas están referidas al nivel Bajamar Media Inferior en el Océano Pacífico, Golfo de México y Mar Caribe (SEMAR, 2013).

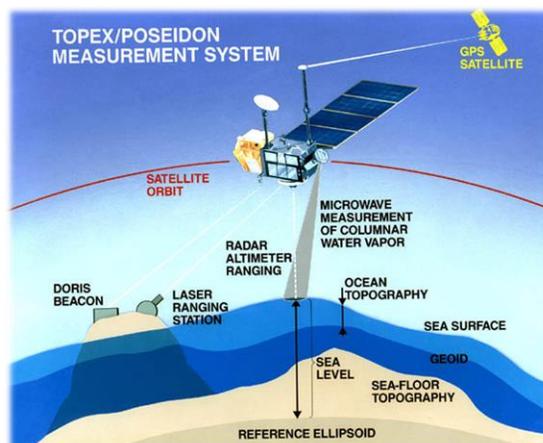
Para este trabajo, se empleó la carta náutica Bahía de Campeche S.M 840 con proyección Mercator, referida al sistema geodésico mundial (WGS84), con escala 1:250 000, tercera edición de marzo 2007 y se empleó el programa Surfer® para su digitalización en pantalla.

#### 4.3. Topography Experiment/Poseidon (TOPEX/Poseidon)

Los datos del satélite TOPEX/Poseidón fueron obtenidos de la tesis “Comparaciones de los datos batimétricos obtenidos por el satélite TOPEX/Poseidón y los recabados por los barcos que navegan en el golfo de México” de Jesús Manuel Tapia López.

Lanzado en 1992 TOPEX/Poseidón es una misión conjunta de la NASA agencia espacial de EE.U.U y el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), la agencia espacial Francesa, con el objetivo general de proporcionar el nivel del mar global de alta precisión (altura del océano) mediciones en coordenadas relativas al centro de la Tierra. A partir de esta información, los patrones de circulación oceánica pueden ser mapeados. El análisis de los datos TOPEX/Poseidón ayuda a entender cómo los océanos interactúan con la atmósfera, y mejorar nuestra capacidad de predecir el clima global. Figura 16

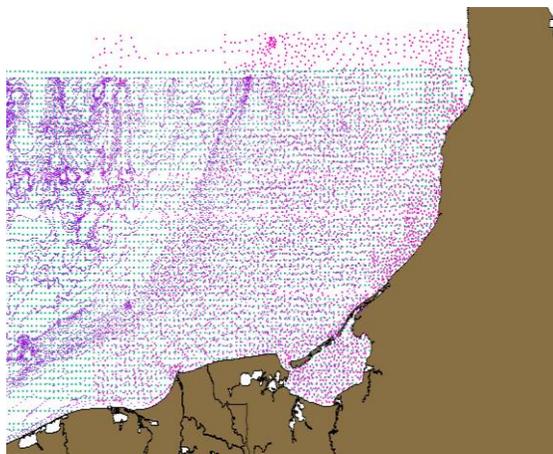
TOPEX/POSEIDON está referido al Sistema Mundial Geográfico de Referencia de 1980 (WGRS80), su resolución espacial es de 2'' lo cual se traduce en 60m en el terreno, la cual designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, que se mide en unidades de longitud sobre el terreno, en este caso el mar (Tapia, 2007).



**Figura 16. TOPEX/POSEIDON**  
 NASA SCIENCE MISSIONS (1992)  
 Obtenido de <http://science.nasa.gov>

#### 4.4 Metodología

Una vez recabada la información de las fuentes descritas anteriormente, se procedió a delimitar el área de estudio ubicada en la Sonda de Campeche, se observó que los tres conjuntos de datos no cubrían por completo esta zona (véase Figura 17), por lo que se delimitó un área común en donde los tres conjuntos de datos tuvieran la misma cobertura.



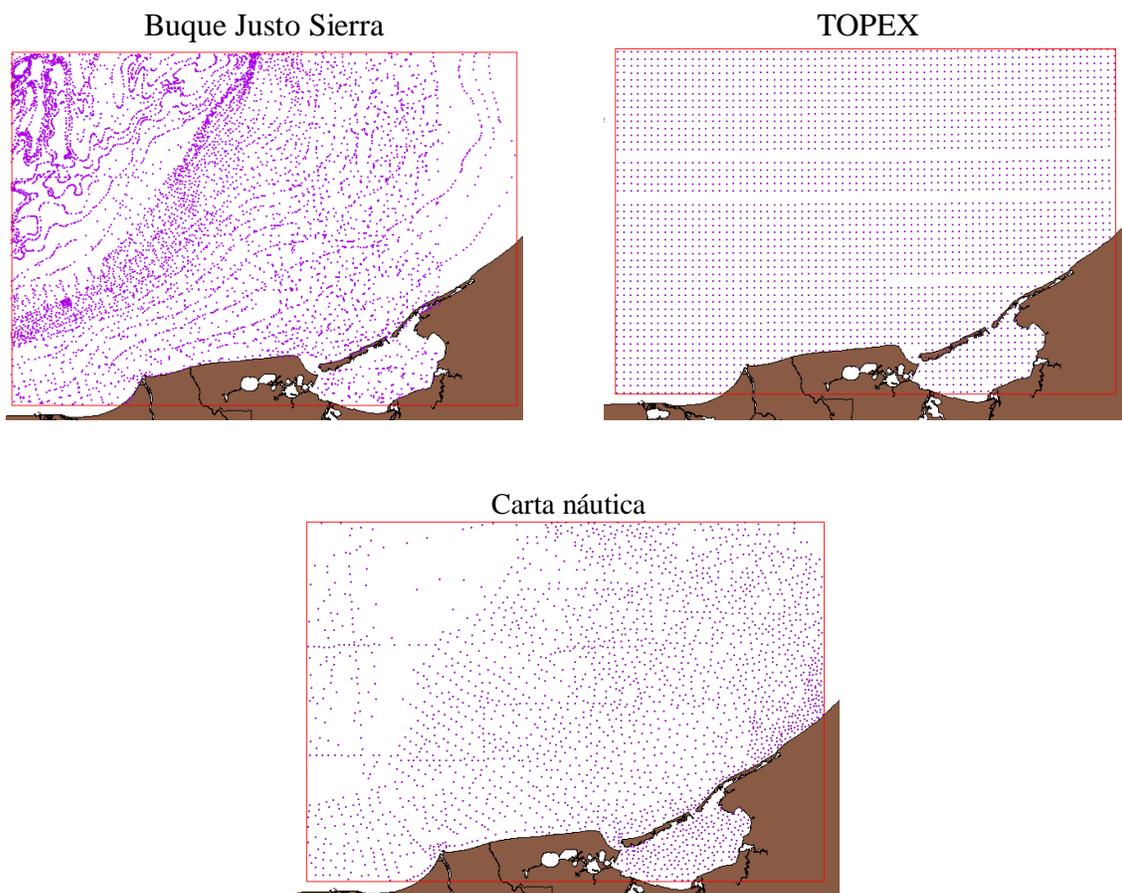
**Figura 17. Puntos de las diferentes fuentes utilizadas**

La Tabla 1 presenta las coordenadas UTM de los vértices del área de estudio seleccionada.

Tabla 1:  
**Coordenadas del área de estudio**

X	Y
465205.73	2216796.487
721737.787	2217169.896
465952.548	2043534.661
720990.969	2043908.07

Los datos que no se encontraban dentro de esta área se eliminaron en cada una de las fuentes de información y se trabajó con cada conjunto de datos por separado, como se muestra en la siguiente Figura 18.



**Figura 18. Conjuntos de datos ajustados a la nueva área de estudio**

Posteriormente, se procedió a conocer la cantidad de puntos batimétricos en el área definida, de cada uno de los conjunto de datos, para lo cual se desplegaron los puntos y se realizó un conteo automatizado. Tabla 2.

Tabla 2:

**Total de datos por conjunto de datos**

	B/O Justo Sierra	TOPEX/ Poseidón	Carta náutica
No. de datos	7831	3135	2485

Uno de los alcances de este trabajo, es conocer, cómo se encuentran distribuidos los puntos batimétricos y el comparativo entre las fuentes de datos, para lo cual se realizó una estadística básica de los datos considerando cuadrángulos y áreas paralelas a la costa.

El análisis por cuadrángulos se realizó dividiendo el área en secciones de 10' de longitud x 10' de latitud (figura 19). Haciendo ésta división se obtuvo un total de 129 cuadrángulos divididos de la siguiente forma:

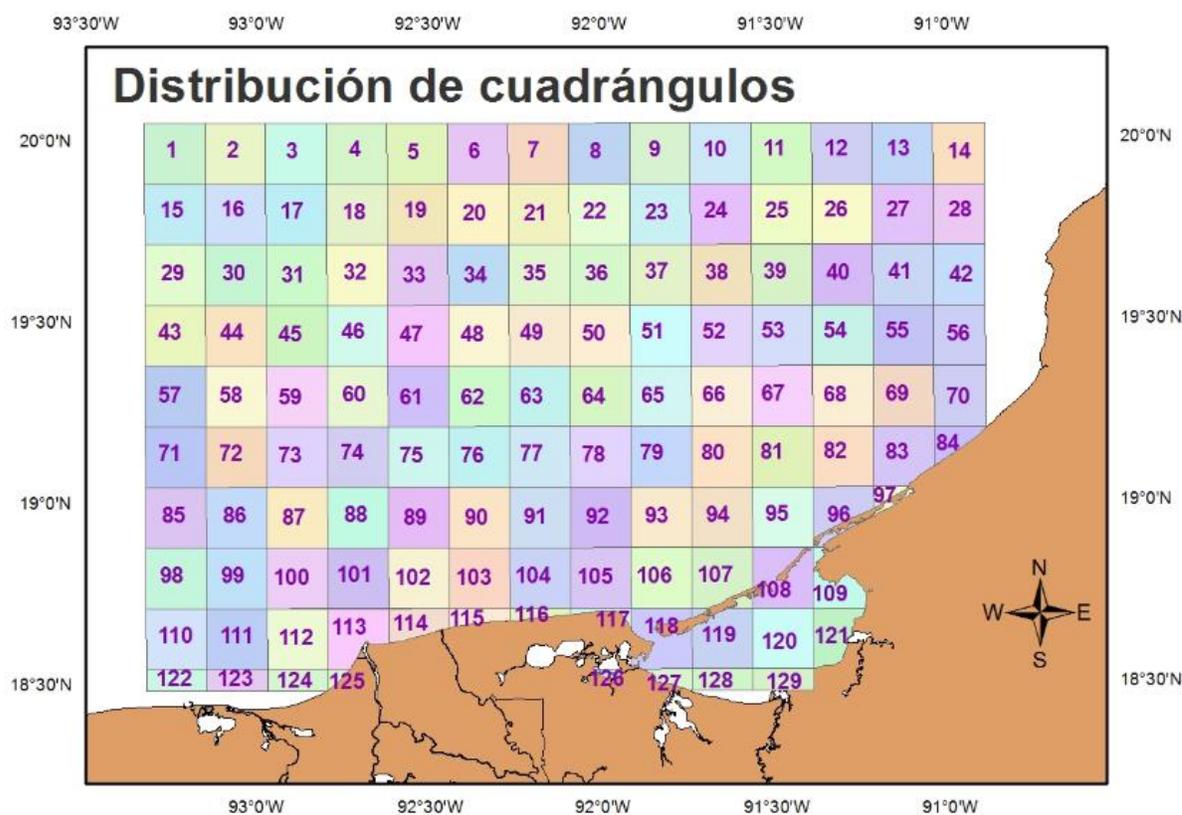
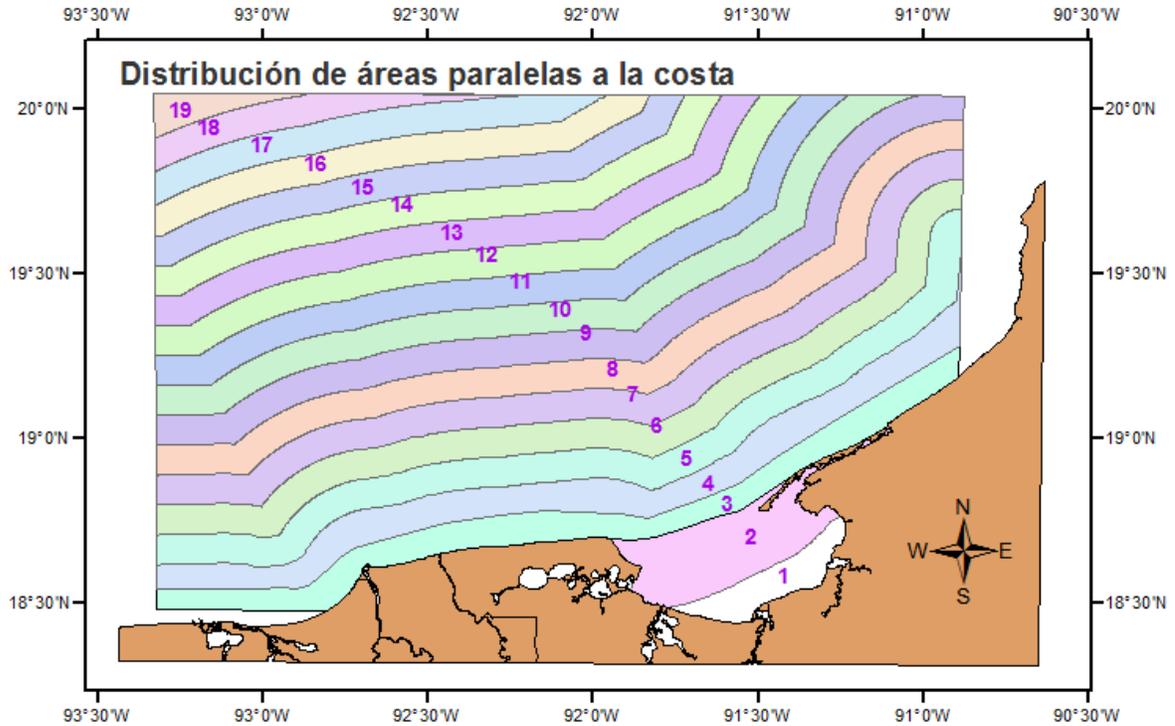


Figura 19. Área dividida en cuadrángulos de 10' de long x 10' de lat.

Para poder hacer comparativos de cada uno de los cuadrángulos, se determinó su densidad de puntos por unidad de área.

Para el análisis de las áreas paralelas a la costa éstas se hicieron en intervalos de 10 km entre ellas, las cuales se observan en la figura 20, para conocer la distribución de los datos respecto a la costa.



**Figura 20. Distribución de áreas paralelas a la costa**

Este análisis permitió conocer qué conjunto de datos presenta mejor distribución en el área de estudio.

Una vez seleccionada la base de datos se generaron archivos *raster* que son matrices de celdas o pixeles que permiten realizar visualizaciones en 3D, los métodos de interpolación usados fueron IDW (Inverse Distance Weighting, por su nombre y siglas en ingles), Kriging, Natural Neighbor, Spline y TIN, (Triangulated Irregular Network, por su nombre y siglas en inglés).

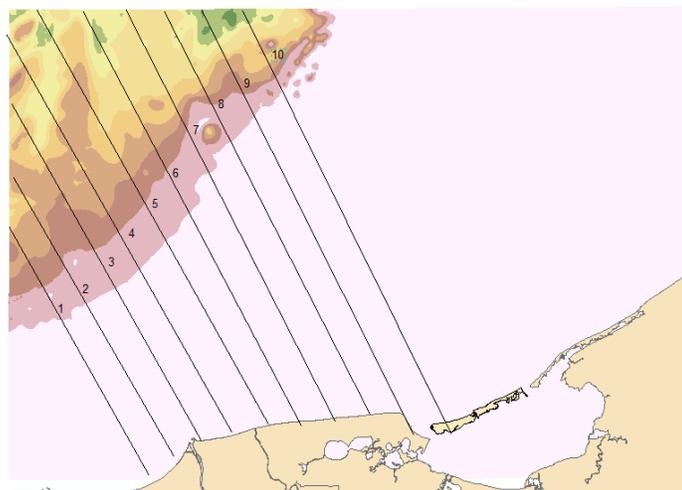
Tabla 3:

**Valores usados para interpolación**

Barco		
Kriging	Output cell size	809.229561
	Kriging method	ordinary
	semivariogram model	spherical
	Search radius	variable
	Search radius settings	12
Natural Neighbor	Output cell size	809.229561
Spline	Output cell size	809.229561
	Spline type	Regularized
IDW	Output cell size	809.229561
	Search radius	variable
	Search radius settings	12
TIN	SF_type	masspoints

Los valores arrojados por el software no se modificaron (tabla 3), ya que se consideró que para hacer modificaciones tendríamos que conocer la forma del fondo marino.

Una vez obtenidos los resultados se realizó un análisis cualitativo de manera visual del despliegue cartográfico de las interpolaciones y un análisis cuantitativo que se realizó por medio de perfiles batimétricos perpendiculares a la costa, figura 21.



**Figura 21. Distribución de perfiles para comparativo**

## 5. Resultados

Del análisis estadístico de las base de datos batimétricos se obtuvo que la información del buque es el que contiene mayor cantidad de datos, teniendo una diferencia de 4696 datos con respecto a Topex y de 5346 respecto a la carta náutica. La diferencia entre la carta náutica y Topex es de 650 datos.

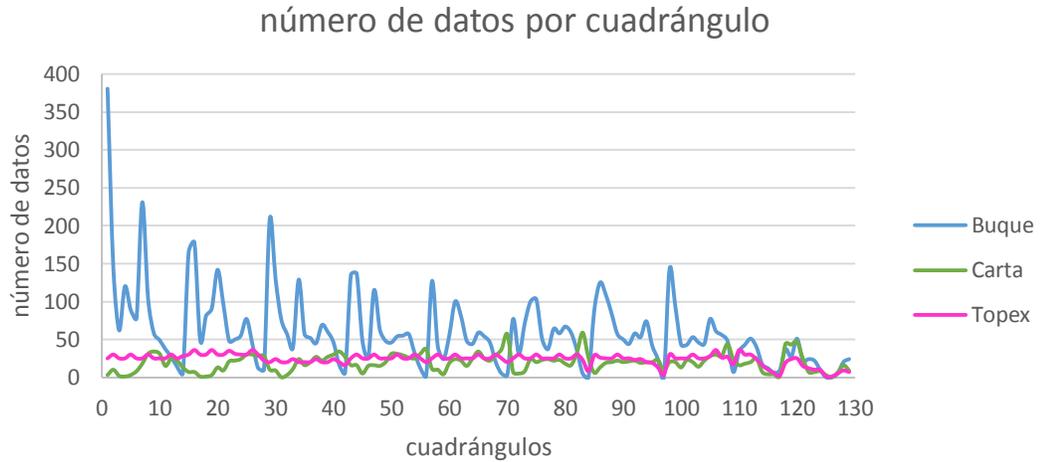
La tabla 4 muestra la distribución espacial analizada por cuadrángulos.

Tabla 4:

Total de datos por cuadrángulo

cuad.	Buque	Topex	carta												
1	381	25	3	34	129	20	24	67	46	25	22	100	43	25	13
2	145	30	10	35	57	20	16	68	20	30	29	101	43	25	23
3	62	25	2	36	52	20	20	69	5	25	37	102	53	30	20
4	120	25	1	37	45	24	27	70	3	20	57	103	46	25	14
5	89	30	3	38	70	20	22	71	77	25	7	104	44	25	22
6	78	25	8	39	60	20	27	72	31	30	5	105	77	28	28
7	231	25	18	40	46	24	30	73	71	25	8	106	61	36	30
8	104	30	31	41	16	20	34	74	100	25	24	107	68	30	28
9	58	25	34	42	6	16	27	75	104	30	20	108	48	28	44
10	49	25	31	43	135	25	16	76	51	25	23	109	7	21	24
11	37	25	15	44	137	30	16	77	37	25	24	110	34	36	16
12	27	30	25	45	48	25	5	78	64	25	22	111	43	30	18
13	14	25	22	46	26	25	15	79	58	30	23	112	51	30	20
14	5	28	13	47	115	30	16	80	67	25	18	113	42	29	25
15	165	30	7	48	63	25	15	81	59	25	16	114	28	21	7
16	178	36	7	49	48	25	20	82	36	30	32	115	12	10	4
17	49	30	1	50	46	25	31	83	5	24	59	116	6	7	4
18	81	30	1	51	54	30	31	84	0	9	26	117	13	13	1
19	91	36	3	52	55	25	29	85	88	29	6	118	40	25	44
20	142	30	13	53	57	25	26	86	125	26	13	119	32	25	43
21	96	30	9	54	32	30	25	87	109	25	19	120	51	25	47
22	48	35	21	55	12	25	31	88	84	25	20	121	22	17	25
23	51	31	22	56	2	20	37	89	57	30	22	122	24	12	7
24	55	30	24	57	127	25	11	90	50	25	20	123	23	10	7
25	77	30	30	58	41	30	10	91	44	25	21	124	10	10	8
26	44	36	30	59	24	25	4	92	58	23	22	125	11	3	3
27	12	30	28	60	56	25	19	93	53	24	19	126	0	3	0
28	10	22	28	61	100	30	24	94	74	20	20	127	5	11	6
29	209	20	10	62	81	25	22	95	42	19	20	128	20	9	16
30	130	24	9	63	48	25	15	96	40	16	23	129	25	7	10
31	76	20	0	64	44	25	25	97	0	3	9				
32	57	20	3	65	59	30	34	98	143	30	20				
33	39	24	11	66	54	25	25	99	93	25	20				

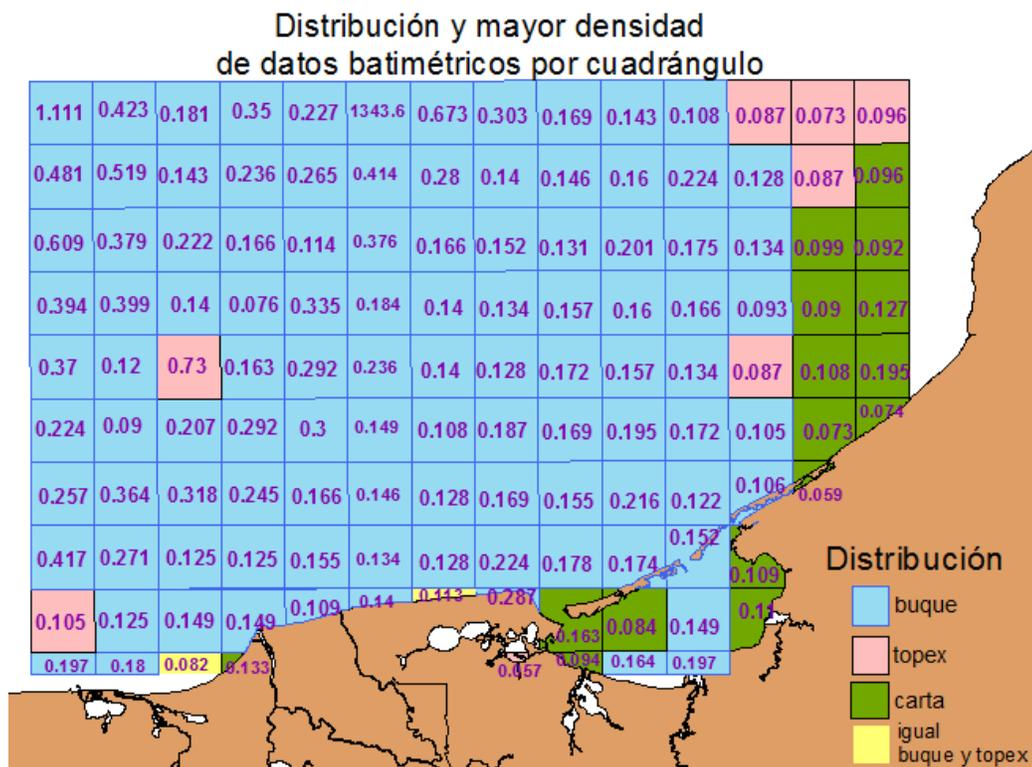
Abreviaciones: en cuad. equivale a cuadrángulo



**Figura 22. Total de datos batimétricos por cuadrángulo**

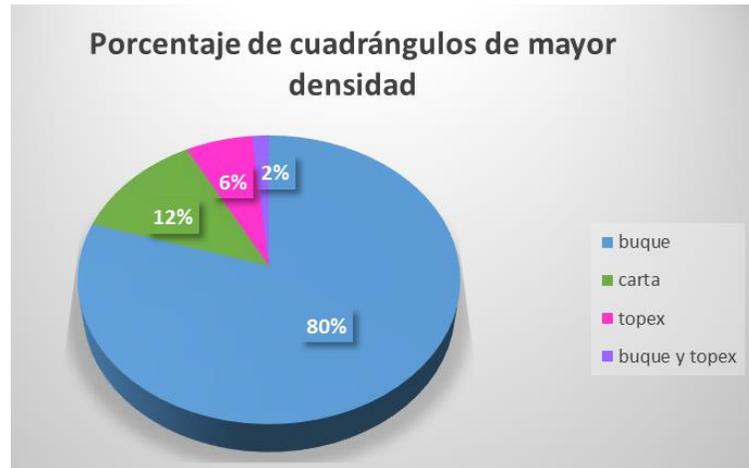
En la gráfica de la figura 22 se observó que los datos del buque tienen mayor número de datos en la mayoría de los cuadrángulos. Topex muestra mayor continuidad de datos, aunque en cuanto a datos son menores.

En la figura 23 se observan las áreas donde cada conjunto de datos tiene mayor densidad, el color azul representa los datos del buque, el color rosado los de topex, el verde los datos de la carta y el amarillo los cuadrángulos donde el buque y topex tienen igual densidad.



**Figura 23. Distribución y densidad de datos batimétricos por cuadrángulo**

Obtenido:



**Figura 24. Porcentaje de distribución de densidad por cuadrángulo**

Realizando el análisis de las densidades por área de cada cuadrángulo, se obtuvo que; en 103 cuadrángulos, la densidad de puntos del buque es mayor, en 16 la carta presenta mayor densidad, en 8 cuadrángulos topex presenta mayor cantidad de datos y por último se encontró que hay 2 cuadrángulos que tienen la misma densidad del buque y de Topex (figura 24).

Del análisis de las áreas paralelas a la costa se obtuvo que los datos del buque (tabla 5) son los que muestran mayor cantidad de datos en todas las áreas.

**Tabla 5:**  
**Total de datos de cada conjunto de datos respecto a distancia a partir de la costa**

paralelo	buque	topex	carta
1	96	81	69
2	206	113	186
3	304	201	256
4	376	227	230
5	322	239	198
6	433	222	200
7	593	242	211
8	531	233	189
9	476	237	186
10	402	199	150

paralelo	buque	topex	carta
11	457	187	153
12	406	162	104
13	427	156	115
14	502	151	82
15	525	144	64
16	559	131	38
17	552	118	36
18	348	67	13
19	316	25	5

**Nota.** Distancias en km a partir de la costa

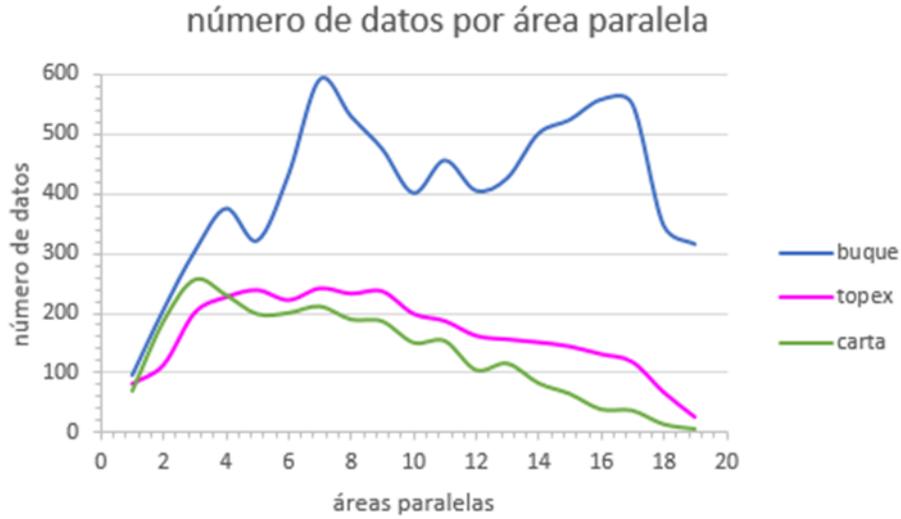


Figura 25. Número de datos por áreas paralelas a la costa

En la figura 25 se observa la forma en cómo se encuentran distribuidos los datos en las áreas paralelas a la costa.

Distribución y mayor densidad de datos batimétricos por áreas paralelas

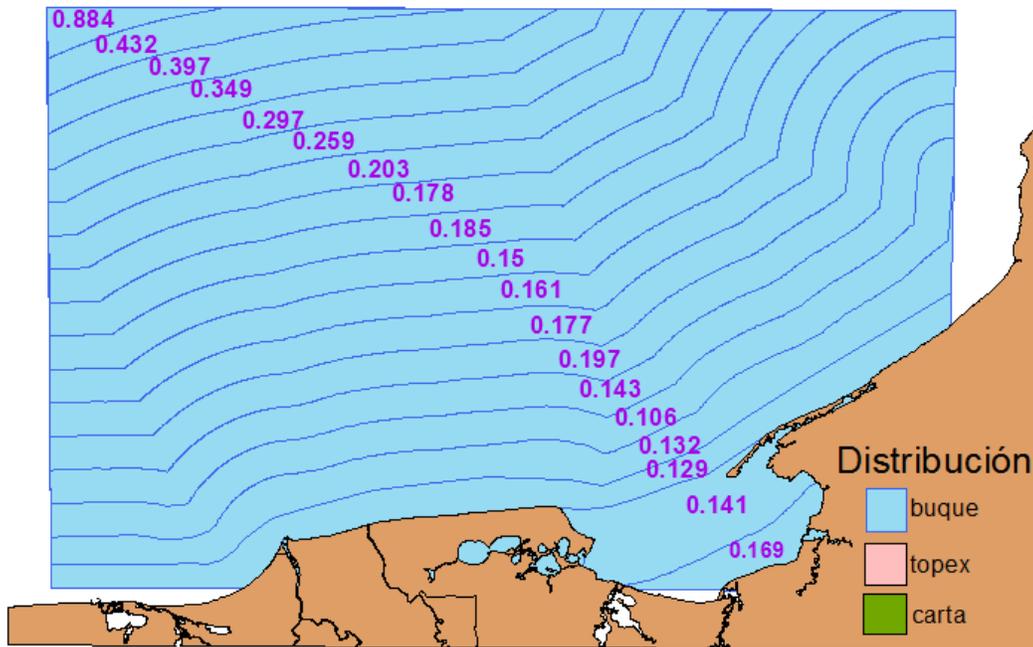


Figura 26. Distribución y mayor densidad de datos batimétricos por áreas paralelas

En la figura 26 podemos observar que la cantidad de datos del buque representa mayor distribución y densidad de datos por áreas paralelas, en cuanto a los valores de Topex y la Carta podemos observar en la tabla 6 que sus datos y densidad, van disminuyendo conforme se alejan de la costa.

Realizando el análisis de las densidades por cada área paralela a la costa, se obtuvo que; en las 19 áreas, la densidad de puntos del buque es mayor.

Tabla 6:  
Densidad de datos de cada conjunto de datos respecto a distancia a partir de la costa

paralelo	buque	topex	carta	paralelo	buque	topex	carta
1	0.169	0.143	0.121	11	0.185	0.076	0.062
2	0.141	0.077	0.127	12	0.178	0.071	0.046
3	0.129	0.085	0.108	13	0.203	0.074	0.055
4	0.132	0.08	0.081	14	0.259	0.078	0.042
5	0.106	0.079	0.065	15	0.297	0.081	0.036
6	0.143	0.073	0.066	16	0.349	0.082	0.024
7	0.197	0.08	0.07	17	0.397	0.085	0.026
8	0.177	0.078	0.063	18	0.432	0.083	0.016
9	0.161	0.08	0.063	19	0.884	0.07	0.014
10	0.15	0.074	0.056				

Del análisis anterior los datos del buque presentan una mejor distribución horizontal en la mayoría de las áreas comparadas (cuadrángulo y paralelas).

Para conocer la distribución vertical, se trabajó con los valores de profundidad de cada una de las bases de datos por cuadrángulo y por área paralela a la costa, para ello se compararon los valores de las profundidades máximas y mínimas.

Para realizar el comparativo de las profundidades en ambos casos, se utilizó como base la carta náutica, ya que esta es la publicada por la Secretaría de Marina (datos oficiales), se consideran como datos correctos.

Al comparar los datos de las profundidades mínimas del buque respecto a la carta en cada cuadrángulo, se encontró que hay 18 cuadrángulos donde la profundidad mínima es igual, 73 cuadrángulos tienen una diferencia de 1-10 metros, 25 están entre 11-100m y 13 tienen una diferencia mayor de 100m. Comparando los datos de las profundidades máximas de la carta y del buque por cuadrángulo, se encontró que hay 13 cuadrángulos donde la profundidad entre estos es igual, 93 cuadrángulos tienen una diferencia de 1-10 metros, 17 están entre 11-100m y en 11 tienen una diferencia mayor a 100m.

Cotejando los datos de las profundidades mínimas de la carta y de topex por cuadrángulo, no hay cuadrángulos que tengan la misma profundidad, 22 cuadrángulos se encuentran en el rango de 0.3-10, 78 cuadrángulos se encuentran en la diferencia de 11-100m y 29 cuadrángulos tienen profundidades mayores a 100m.

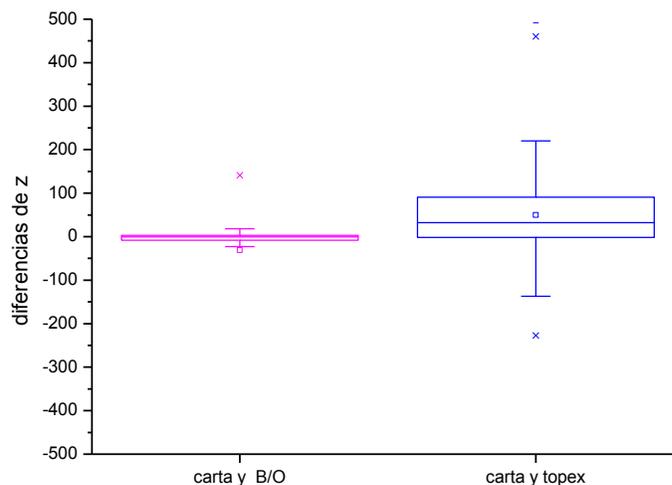
Al comparar los datos de las profundidades máximas de la carta y de topex por cuadrángulo, se encontró que hay 2 cuadrángulos donde la diferencia de profundidades es 0, en 48 cuadrángulos la profundidad varía de 0.1-10m, en 67 la diferencia se encuentra en el rango de 10.7m-100m, y en 12 cuadrángulos la diferencia es mayor a 100m.

En la tabla 7, se resumen las diferencias mínimas y máximas de los cuadrángulos.

**Tabla 7: Comparativo de profundidades por cuadrángulo**

rangos	carta y buque	carta y topex	carta y buque	carta y topex
0	18	0	13	2
0-10	73	22	90	48
<10-100	25	78	16	67
<100	13	29	10	12
	mínimas		máximas	

Para respaldar la información anterior, se obtuvo la diferencia de profundidades de cada conjunto de datos por cuadrángulo se compararon dichas diferencias de la carta con respecto al buque y de la carta con respecto a topex y se observó que los valores de la carta con el buque son más homogéneos mientras que la carta con topex tienen una mayor variación Figura 27.



**Figura 27. Diferencia de profundidades por cuadrángulos**

Ahora comparando por áreas paralelas a la costa obtuvimos que los datos de las profundidades mínimas de la carta y del buque por área paralela, se encontró que hay 2 áreas donde la profundidad entre estos es igual, 5 áreas tienen una diferencia de 0.2-10 metros, 7 están entre 11-100m y 5 tienen una diferencia mayor de 100m.

Al comparar los datos de las profundidades mínimas de la carta y de topex por área paralela, se encontró que no hay áreas donde la profundidad entre estos es igual, ninguna área tienen una diferencia de 1-10 metros, 10 están entre 11-100m y 9 tienen una diferencia mayor de 100m.

Cotejando los datos de las profundidades máximas de la carta y del buque por áreas paralelas, hay 2 áreas que tienen la misma profundidad, 14 áreas se encuentran en el rango de 0.28-10, 1 área se encuentran en la diferencia de 11-100m y 2 áreas tienen profundidades mayores a 100m.

Al comparar los datos de las profundidades máximas de la carta y de topex por cuadrángulo, se encontró no hay áreas paralelas donde la diferencia de profundidades es 0, en 10 áreas la profundidad varía de 0.6-10m, en 7 la diferencia se encuentra en el rango de 10.7m-100m, y en 2 áreas la diferencia es mayor a 100m

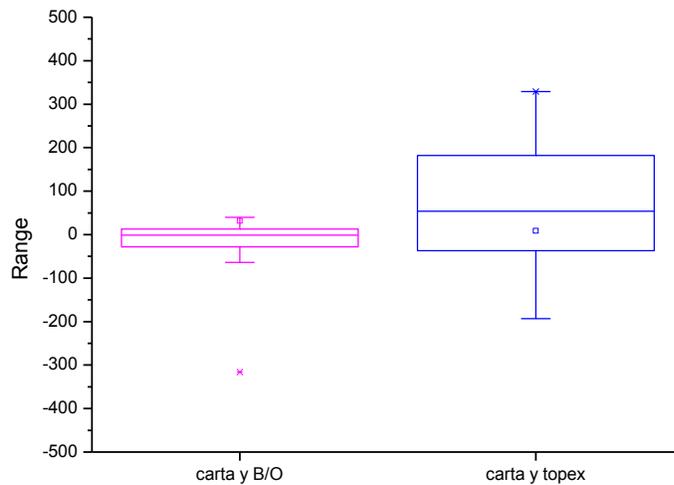
La tabla 8 resume las diferencias mínimas y máximas de las áreas paralelas a la costa.

Tabla 8:  
**Comparativo de profundidades por áreas paralelas a la costa**

rangos	carta y buque	carta y topex	carta y buque	carta y topex
0	2	0	2	0
0-10	5	0	14	10
<10-100	7	10	1	7
<100	5	9	2	2
	mínimas		máximas	

De la tabla anterior, se puede observar que los valores del buque son los que tienen diferencias menores de profundidad respecto a la carta.

Para respaldar la información anterior, se obtuvo la diferencia de profundidades de cada conjunto de datos por área paralela a la costa, se compararon dichas diferencias de la carta con respecto al buque y de la carta con respecto a topex y se observó que los valores de la carta con el buque son más homogéneos mientras que la carta con topex tienen una mayor variación Figura 28.



**Figura 28. Diferencia de profundidades área paralela a la costa**

Del análisis de distribución espacial horizontal y vertical, se concluye que los datos de buque son los que presentan una mejor distribución y menor diferencia de profundidades con respecto a la carta, por lo que se decidió trabajar con esta información para seleccionar el método de interpolación.

### **Métodos de Interpolación**

Teniendo la información batimétrica del buque en coordenadas X,Y Z, se procedió a realizar la interpolación de cada uno de los métodos seleccionados.

Los resultados que obtuvimos se muestran en la siguiente Figura 29.

B/O Justo Sierra

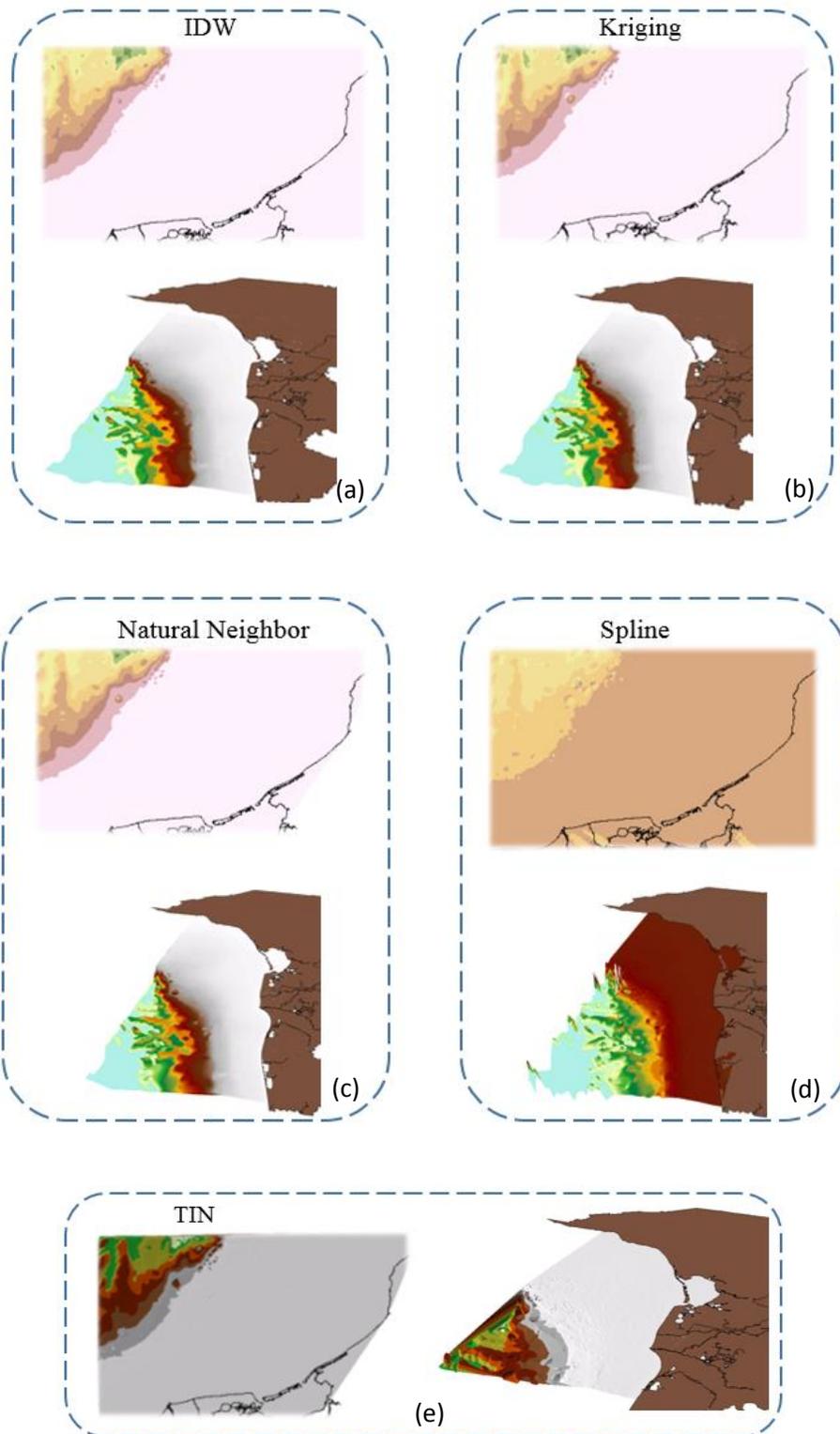


Figura 29. Interpolación de los datos del B/O Justo Sierra

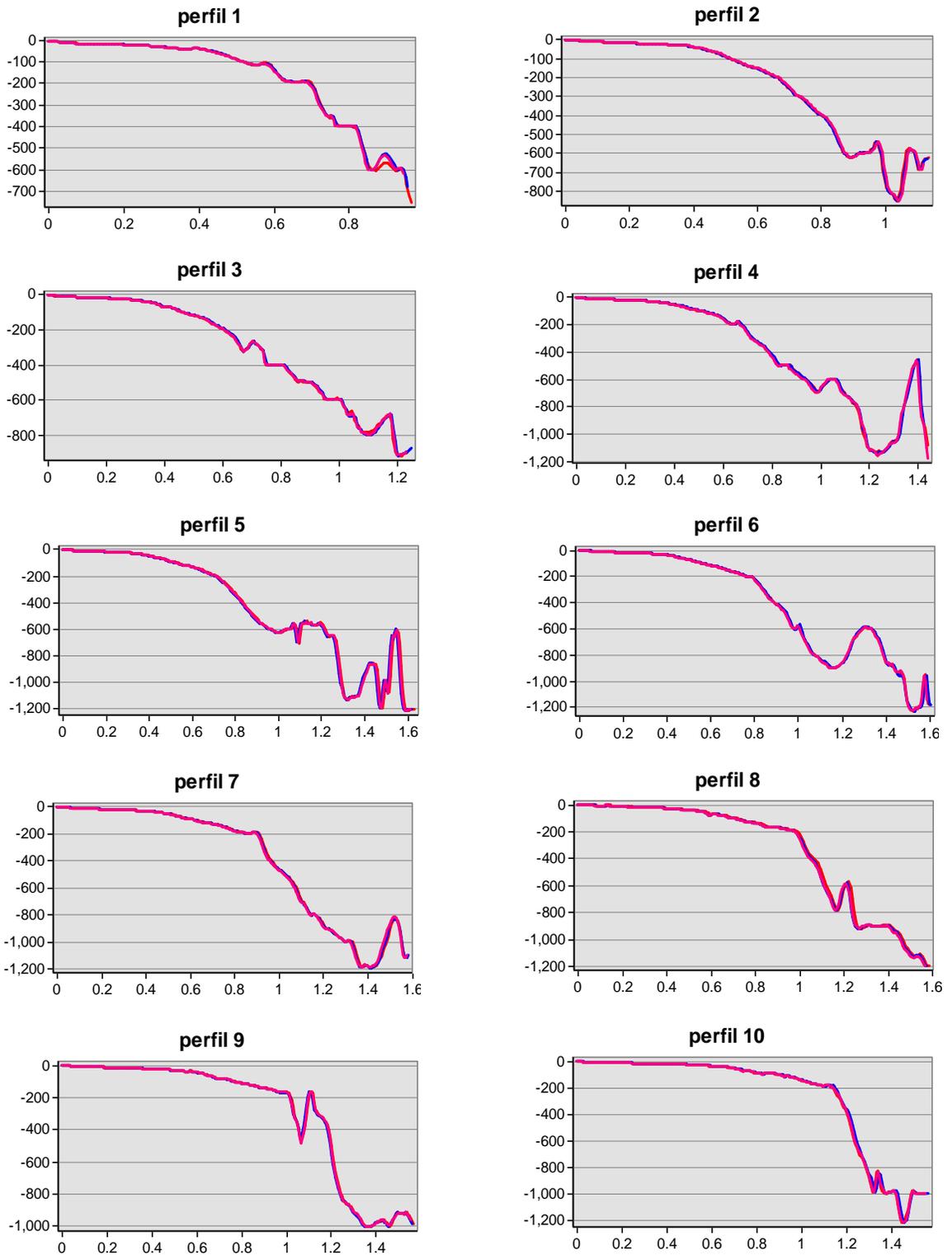
Del análisis de estos modelos digitales en 3D se observa que IDW, Kriging y Natural Neighbor son los que representan **mayor continuidad**.

Spline generó picos exagerados en lugares donde los otros métodos presentan una forma plana, aunque este método es apropiado para usarse en topografía, solo se utiliza en casos donde no hay cambios muy abruptos, en este caso tenemos un cambio vertical muy marcado en la plataforma continental, por lo que este método **se descarta**.

Red irregular de triángulos (TIN) se basa en la generación de red de triángulos, estos no hacen visible la forma del fondo marino, aunque los valores de las distancias de los triángulos se puede modificar para obtener triángulos más pequeños, no es recomendable, ya que supone que la variación de profundidades es lineal, lo cual no pasa en este caso de estudio, por lo cual también **se descartó**.

Comparando Ponderación de la distancia inversa (IDW), vecino natural (Natural Neighbor) y Kriging, sabemos que IDW tiende a producir patrones circulares en zonas con poca densidad de puntos conocidos, no alterando los puntos muestreados, dichos patrones pueden ser interpretados como islas u hoyos, por lo que IDW se recomienda para bases de datos pequeñas con datos distribuidos de forma regular. La interpolación de vecino natural tiene muchas características positivas, se puede utilizar tanto para la interpolación y la extrapolación, y generalmente funciona bien con puntos de dispersión agrupados; Kriging asume que los datos más cercanos a un punto conocido tienen mayor peso e influencia sobre la interpolación, influencia que va disminuyendo conforme se aleja del punto de interés, Kriging define la altitud como una variable regionalizada, se basa en el principio de que la variable es muy irregular para ser modelada por una simple función matemática.

Para definir cuál de estos tres métodos es el más adecuado para la representación, se realizaron perfiles perpendiculares a la costa, para observar cómo varían entre ellos, la Figura 30 presenta los perfiles obtenidos de cada método de interpolación.



**Figura 30. Comparativo de perfiles de las interpolaciones IDW, Kriging y Natural Neighbor**

*Las medidas están en metros y "x" en escala 1:1, 000,000*

Elegir un método de interpolación es complicado como en este caso, ya que los tres métodos generaron representaciones similares, esto nos indica que no existe un método de interpolación único para hacer en este caso la representación del fondo marino.

## 6. Conclusiones

Se considera que los datos del Buque son los mejores para usar un método de interpolación, ya que este conjunto de datos es el que tiene mayor cantidad de valores de profundidad y estos valores son similares a los datos oficiales de la Secretaría de Marina, lo cual no da más confianza en su uso, a pesar de desconocer las correcciones a las que este conjunto fue sometido.

Red irregular de triángulos (TIN) supone que la distancia entre profundidades siempre es lineal, -lo cual no sucede en el fondo marino-, así que por más que la distancia entre puntos se haga menor siempre considerará esta linealidad y por ello se descartó.

En Spline se observa la generación de “picos” en la superficie marina, siendo esta interpolación la única que muestra estos resultados se considera que no es viable.

De la comparación de los perfiles obtenidos de las diferentes interpolaciones, se observó que Kriging, Ponderación de la distancia inversa (IDW) y vecino natural (Natural Neighbor) representan el fondo marino de una forma similar.

Podemos concluir que no existe un método de interpolación especial para batimetrías, ya que cada representación es útil para situaciones específicas, el método que tenemos que elegir es el que mejor se ajuste a la cantidad y al comportamiento de los datos con que contamos.

Los mejores resultados para este conjunto de datos los presentaron Kriging, IDW y Natural Neighbor.

Hay que tener presente que los factores más importantes para tener una interpolación correcta es tener una base de datos confiable y la cantidad de datos con la que esta cuenta, como en este caso.

## 7. Recomendaciones

Al momento de generar las bases de datos es necesario que cuenten con metadatos que contengan toda la información anterior, para que al momento que se utilicen se tenga la certeza de que los datos son confiables.

Utilizar bases de datos confiables es importante, por lo que se recomienda que al momento de proporcionar los datos estos especifiquen que método y equipo batimétrico se utilizó. Así mismo indicar posprocesos utilizados, como por ejemplo las correcciones realizadas.

Es importante conocer a que sistema de referencia horizontal y vertical están referidos estos datos.

Al momento de elegir un conjunto de datos, se recomienda que se compare con una base de datos oficial para tener la seguridad de que estos sean confiables y no dejarse llevar por la cantidad de datos, sino por la calidad de ellos.

Elegir un método de interpolación no es fácil, por lo que se recomienda conocer bien la teoría para elegir el método más adecuado al conjunto de datos que se tiene y para la representación que se necesita y cuando se conozcan los métodos analizarlos y compararlos y eliminar los que presenten mayores diferencias.

## Bibliografía

ArcGIS Resources (2012). *Cómo funciona IDW*. [ONLINE] Available at: <http://resources.arcgis.com/>. [Last Accessed abril 2014].

ArcGIS Resource Center (2010). *Como funciona Kriging*. [ONLINE] Available at: <http://help.arcgis.com/>. [Last Accessed abril 14].

Asociación Cartográfica Internacional (2003). *Definiciones*. [ONLINE] Available at: <http://icaci.org>. [Last Accessed octubre 14]

Bañuelos, S.L. Manzanarez, G.N. 'Tema 1. Análisis estadístico de datos muestrales'. In: *Probabilidad y estadística*. México, D.f.

Bocco, G. (2004). *Cartografía y sistemas de información geográfica en el manejo integrado de cuencas*. [ONLINE] Available at: <http://www.inecc.gob.mx/>. [Last Accessed julio 14].

Bourrough, P. A. "Principles of Geographical Information System for Land Resources Assesment" 1986, Oxford Science Publications (UK) 1ª edición.

Chuvieco, E. (2002): *Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel, Madrid, 586 pp.

Felicísimo, A., 1994. Modelos digitales de terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa Ediciones, Oviedo.

García, G.J. Cebrian A.F, (2006). La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicación a la provincia de Albacete.

Giraldo-Henao, Ra. (2003) *Introducción a la Geoestadística. Teoría y aplicaciones*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Estadística

Gomarasca, M.A, (2009). 'Geomatics'. In: e.g. Tolkien, J.R.R., *Basics of Geomatics*. 1st ed. Milano, Italy: Springer. pp.(5-6).

INEGI, (2010). *Obtención de coordenadas con GPS en ITRF y su relación con WGS84 y NAD27*. 1st ed. México, D.f.: Departamento de Evaluación Geodésica.

INEGI, (2000) *Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción*. [ONLINE] Available at: <http://www.inegi.org.mx/>. [Last Accessed mayo 14].

Instituto hidrográfico de la marina (1996). *Línea de costa*. [ONLINE] Available at: [www.armada.mde.es](http://www.armada.mde.es). [Last Accessed junio 14].

Johnston K., Ver Hoef J.M., Krivoruchko K., Lucas N. 2001. Using ArcGis Geostatistical Analyst. ESRI.

Kravchenko A. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of American Journal 67

León, M.J.D., (2003-2004). *Del escandallo a los sondarores multihaz*. España: Escuela de Hidrografía.

Martínez-Casasnovas, J.A., 1999. Modelos digitales de terreno: Estructuras de datos y aplicaciones en el análisis de formas del terreno y en Edafología. QUADERNS DMACS Núm. 25, Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, Universitat de Lleida, Lleida

Martínez, W. y Sánchez, L. (2005). *Hacia un nuevo sistema vertical de referencia en Colombia*. Bogotá-Munich: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Mequetrefe (2013). *¿Qué es una Batimetría?* [ONLINE] Available at: <http://detopografia.blogspot.mx/>. [Last Accessed mayo 14].

Miller, C.L. y Laframme, R.A., 1958. *The digital terrain model – theory and application*. Photogrammetric Engineering.

Moral, F.L. (2003) *La representación gráfica de las variables regionalizadas. Geoestadística lineal*. Cáceres. Servicio de publicaciones de la Universidad de Extremadura.

Oliver, M.A y Webster, R. 1990. Kriging: *A method of interpolations for geographical information systems*. Int. J. Geographical Information Systems. Vol. 4

Organización hidrográfica internacional, (1996). *Diccionario Hidrográfico*. 5th ed. Mónaco: Organización hidrográfica internacional.

Peña, L.J., (2006). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*.. 4th ed. España: Editorial Club Universitario.

Pinilla, M.D.V., (2009). *Análisis estadístico de datos muestrales*. 1st ed. México.

Portal de posicionamiento de Andalucía. *Hidrografía*. [ONLINE] Available at: <http://www.ideandalucia.es/> [Last Accessed mayo 14].

SEMAR, (1974). 'Nociones de Geodesia'. In: Secretaría de Marina (ed), *Compendio de hidrografía primera parte*. 1st ed. México, D.f.: Secretaría de Marina.

SEMAR, (1974). 'Hidrografía'. In: Secretaría de Marina (ed), *Compendio de hidrografía segunda parte*. 1st ed. México, D.f.: Secretaría de Marina.

SEMAR, (2013). *Programa nacional de cartografía náutica 2013*. 1st ed. México, D.f.: Secretaría de Marina.

Siabato, W. y Yudego, C. "Geoestadística y Medio Ambiente". Territorio y Medio Ambiente: Métodos Cuantitativos y Técnicas de Información Geográfica. Aportaciones al XI Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección (Asociación de Geógrafos Españoles) y

Departamento de Geografía Universidad de Murcia. Conesa, C. y Martínez, J.B. Eds. Murcia, 2004.

Tapia, L.J.M., (2007). *Comparación de los datos batimétricos obtenidos por el satélite TOPEX/POSEIDON y los recabados por los barcos que navegan en el golfo de México*. 1st ed. México, D.f.

Universidad Nacional Autónoma de México (2009). *Equipos hidroacústicos*. [ONLINE] Available at: <http://www.buques.unam.mx/>. [Last Accessed abril 14].

Universidad Politécnica de Madrid (2000). *Tema 13: Levantamientos Batimétricos*. [ONLINE] Available at: <http://ocw.upm.es>. [Last Accessed mayo 14].

Fairbridge, R.W. (Ed.) (1968). "*Encyclopedia of Oceanography*". ACOUSTICS (Underwater) (pag. 15-22), BATHYMETRY (pag.104-110), SOUNDINGS (pag. 823-829).

<http://digaohm.semar.gob.mx/imagenes/hidrografia/CATALOGO2013.pdf>