



# 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



**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.



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**

## **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 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.

## Contenido

<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>1. Conceptos necesarios del tema</b>	<b>4</b>
1.1 Levantamiento hidrográfico	4
1.2 Batimetría.	4
1.3 Línea de Costa	6
1.4 Geodesia	7
1.5 Cartografía	8
1.6 Análisis estadístico	10
1.6.1. Medidas de tendencia central	10
1.6.2. Medidas de dispersión	10
1.7. Modelos Digitales	10
1.7.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)	10
1.7.2. Modelo Digital de Elevación (MDE)	11
1.8 Métodos de Interpolación	12
1.8.1 Kriging	13
1.8.2 Ponderación de la distancia inversa (Inverse Distance Weighting, IDW)	14
1.8.3 Spline	14
1.8.4. Natural Neighbor (Vecino natural)	15
1.8.5. Red irregular de triángulos (Triangular Irregular Networks, TIN)	15
1.9 Percepción Remota	16
1.10 Sistemas de Información Geográfica (SIG)	16
<b>2. Objetivo</b>	<b>17</b>
2.1. Objetivos específicos	17
<b>3. Área de Estudio</b>	<b>18</b>
<b>4. Material y métodos</b>	<b>19</b>
4.1. Sondeo del B/O Justo Sierra	19
4.2. Cartas náuticas	20
4.3. Experimento topografía (Topography Experiment/Poseidon, TOPEX/Poseidon)	21
4.4 Metodología	22
<b>5. Resultados</b>	<b>27</b>



<b>6. Conclusiones</b>	<b>43</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	<b>44</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>45</b>

## Resumen

En el presente trabajo se compararon los datos batimétricos de tres fuentes de información en la Sonda de Campeche. Los datos batimétricos que se compararon fueron los de la carta náutica S.M.840 3ª edición, los del satélite TOPEX/POSEIDON y los datos integrados de buques oceanográficos y cartas.

De la comparación de las fuentes de información se determinó que los datos de topex tienen una mejor distribución (3,135 puntos batimétricos), sin embargo por las diferencias de profundidad presentadas entre estos y los valores de la carta náutica, se decidió trabajar con los valores de dicha carta, para el comparativo de los métodos de interpolación.

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, dado que sus representaciones son muy similares

Los resultados deberán considerarse como un primer acercamiento a la evaluación y validación 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 no incluyen la información del método batimétrico que fue usado para la obtención de los datos y las correcciones realizadas a los mismos. Por lo que se hace necesario establecer criterios y procedimientos de análisis antes de usarlas para determinar su confiabilidad. Existen fuentes de datos batimétricos mundiales como ETOPO, GEBCO, TOPEX/POSEIDON, y regionales y/o nacionales.

Para el caso de México existen bases de datos batimétricos en proceso de construcción en diferentes instituciones y universidades como: UNAM, CICESE, INEGI, CONABIO, SEMAR, CFE, PEMEX, sin embargo muchas de ellas catalogan esta información como 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 (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 diferentes bases batimétricas, se estableció un área común para el análisis que corresponde a la Sonda de Campeche. Las bases batimétricas empleadas fueron: TOPEX/POSEIDON y la base derivada de la carta náutica de SEMAR S.M 840 3ª edición.

# 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) y la profundidad 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 (Chuvienco, 2002).

Batimetría por sonar de barrido lateral.- El sonar de barrido lateral es un implemento electrónico que consiste en un emisor y 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).

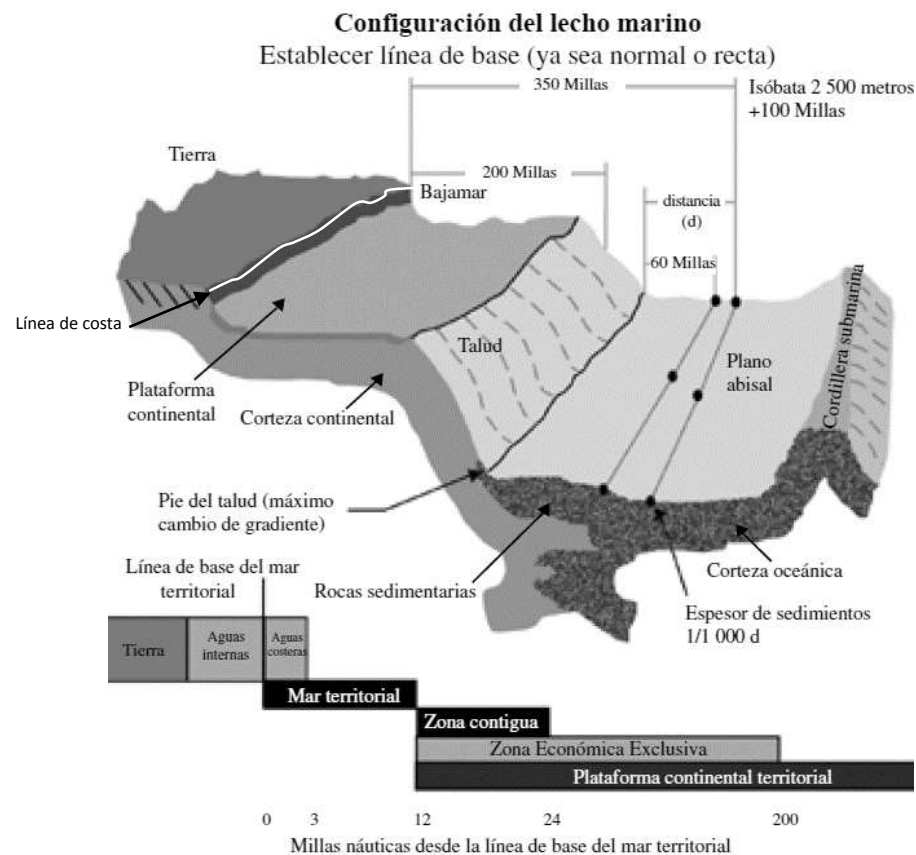
Batimetría por sonar.- Los sonares acústicos son los métodos de batimetría más empleados actualmente. Están basados en el tiempo que emplea una onda acústica en recorrer la distancia que separa al sonar del fondo marino, teniendo en cuenta que el tiempo es doble, ya que la señal transmitida deberá regresar 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

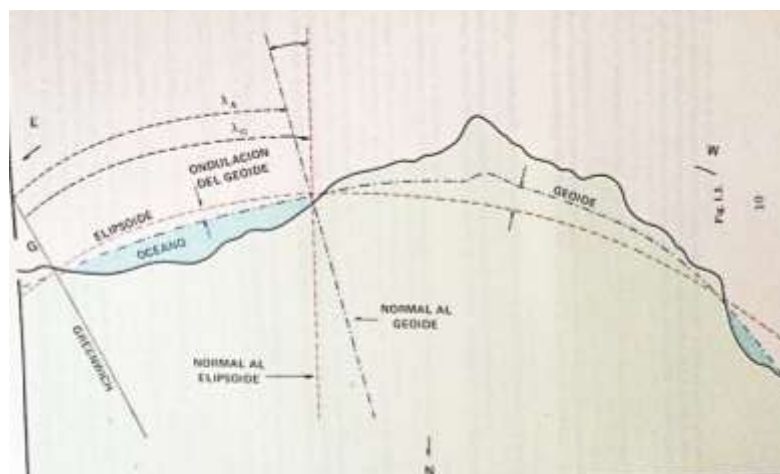
La geodesia es la ciencia que define la forma y dimensiones de la Tierra a través de sus dos ramas; la **gravimetría**, para la determinación de la gravedad de la Tierra y sus anomalías, la gravedad de la Tierra determina su forma y el geode es la superficie equipotencial del campo gravitatorio y la **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.

La forma geométrica de la tierra corresponde con un elipsoide, por ello se vale de sistemas de proyecciones para poderla representar en un plano.

En cartografía 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).

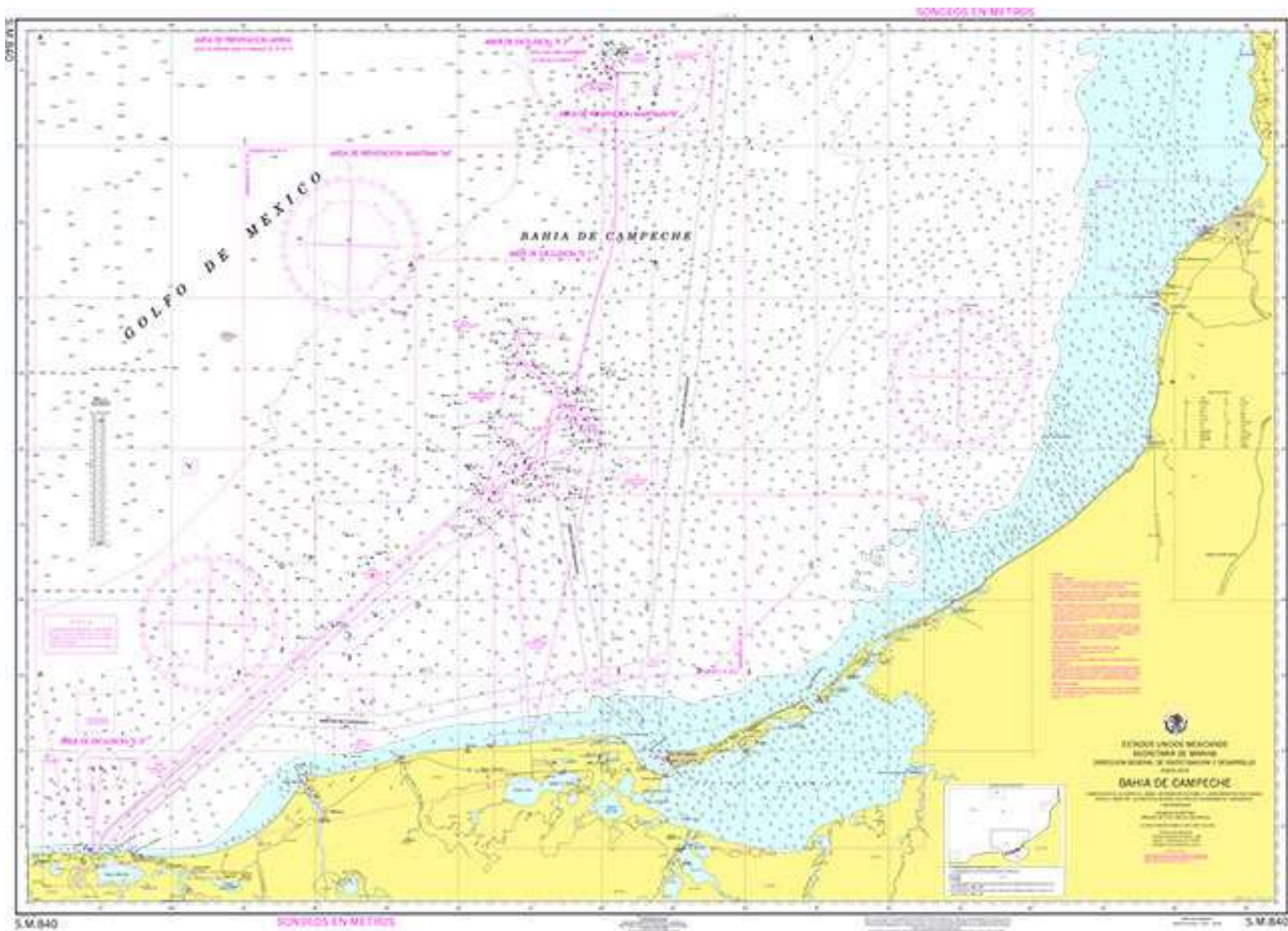


Figura 3. Carta náutica S.M.840 SEMAR 2010

## 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

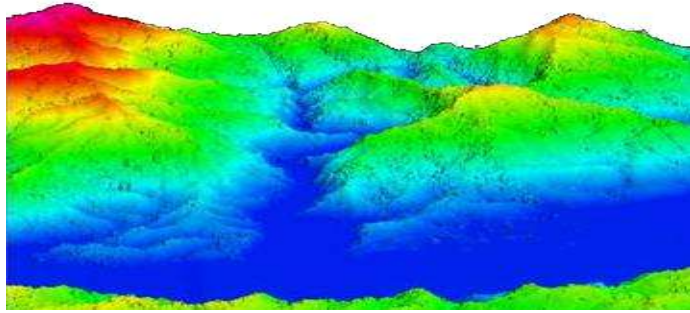
### 1.7.1. Modelo Digital de Terreno (MDT)

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).



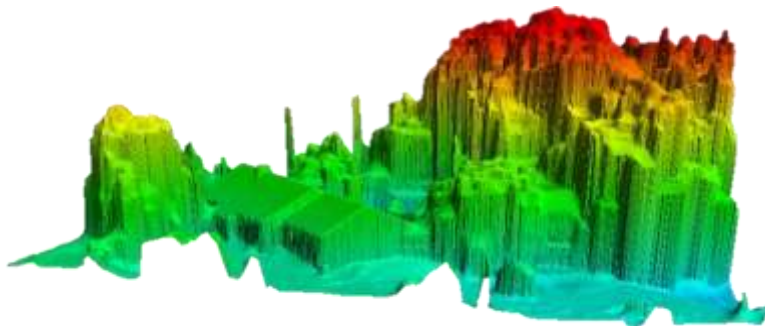
**Figura 4. Modelo digital de elevación con vista en perspectiva**  
Tomado de <http://www.inegi.org.mx>

### 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. Tomadode <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).

Las clasificaciones de los interpoladores se explicarán a continuación:

Métodos puntuales y por áreas o bloque.- los datos conocidos se emplean para interpolar los nodos de una malla, la interpolación se efectúa de punto a punto, la malla interpolada se usa como datos de entrada; la interpolación por área o por bloque se refiere a que dado un conjunto de datos mapeados en un conjunto de área fuente, determina el valor de los para diferentes conjuntos de áreas.

Métodos globales y locales.- los métodos globales se determinan mediante una sola función, la cual es empleada en toda la región, un cambio en un valor de entrada afecta toda el área, tienden a producir superficies suavizadas, sin cambios abruptos; los métodos locales utilizan un algoritmo específico para porciones menores del conjunto total de datos, un cambio en un valor de entrada solo afecta el resultado de un área reducida, en ocasiones un interpolador local se extiende hasta incluir el área total y de esta manera cambia su carácter de local a global.

Métodos exactos y aproximados.- los métodos exactos respetan los datos sobre los cuales se basa la interpolación, la superficie pasa a través de todos los puntos de los cuales se conoce su valor, en los métodos aproximados la superficie no pasa necesariamente a través de todos los puntos de los cuales se conoce su valor.

Métodos graduales y abruptos.- los graduales producen superficies con cambios graduales como los promedios móviles ponderados con la distancia (IDW), cuando se tiene un número reducido de puntos de control, el resultado puede ser una superficie con cambios abruptos, los métodos abruptos son útiles como en fallas geológicas.

Métodos estadísticos y determinísticos.- incorpora conceptos de estadística 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), como por ejemplo

Kriging, los determinísticos que crean superficies basados en los puntos de medición como el IDW y Spline.

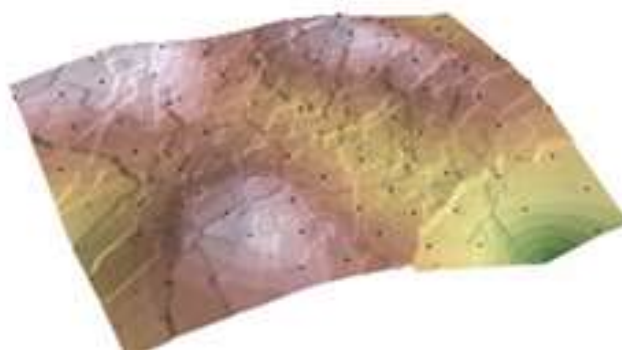
Existen diversos métodos de interpolación, en este caso se utilizarán Kriging, Spline, Natural Neighbor, Inverse Distance Weighting, y TIN ya que estos son los que se utilizan comúnmente.

### 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

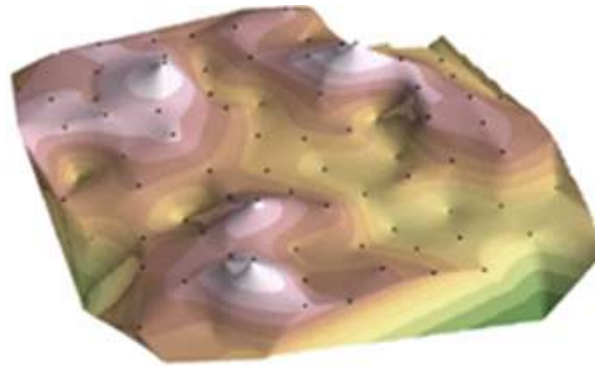


**Figura 6. Representación del resultado de la interpolación por el método de Kriging**

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

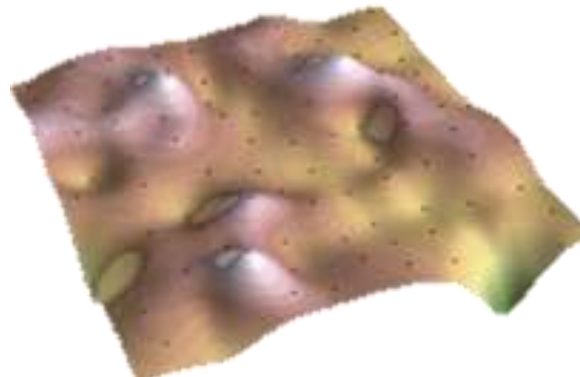


**Figura 7. Representación del resultado de la interpolación IDW**

*Tomado de <http://help.arcgis.com>*

### 1.8.3 Spline

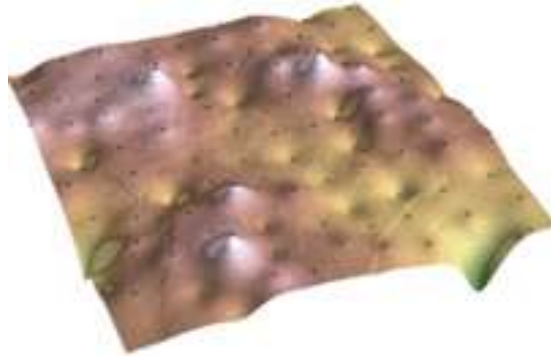
Álvarez y colaboradores (2011) exponen que Spline es un método de interpolación inexacto, ya que altera ligeramente el valor y la posición de los datos, generando un resultado muy suavizado (el valor resultado de la interpolación en los puntos origen sobre los que se realiza la interpolación cambia tras 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)

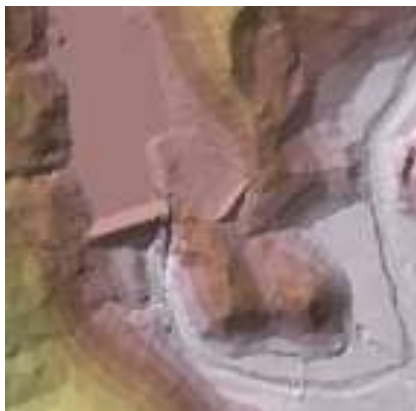
La interpolación de vecino natural, se puede utilizar tanto para la interpolación y la extrapolación, y generalmente funciona bien con puntos de dispersión agrupados. Otro método de promedio ponderado, la ecuación básica que se utiliza en la interpolación vecino natural es idéntica a la utilizada en 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



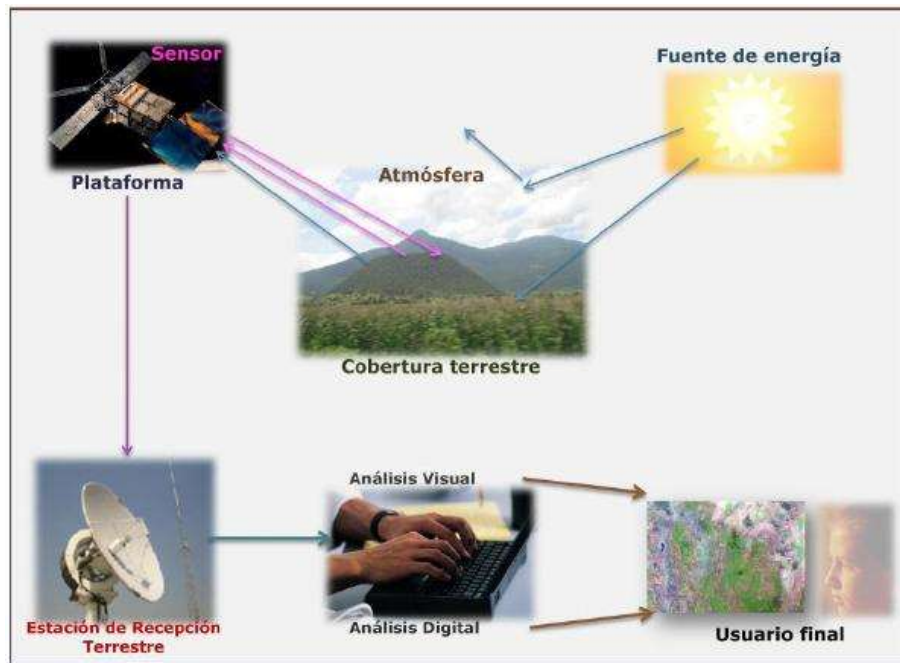
**Figura 10. Resultado de la interpolación TIN**  
Tomado de <http://help.arcgis.com>



## 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, que 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 cuál 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.

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**  
Modificado 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*

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/>

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.

En primera instancia se consideró usar los datos del *B/O Justo Sierra*, sin embargo, la base de datos obtenida de esta tesis está formada por tres conjuntos de datos y no mostraba la información de que puntos corresponden a que fuente.

Los conjuntos de información se describen de manera general:

- a) B/O Justo Sierra.- Estos datos fueron recabados en cinco cruces oceanográficos realizados por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM. Se tuvo un total de 818 puntos y se recabaron durante el periodo de 1990 al 2002. Los datos están georreferenciados al elipsoide de Clark 1866 y datum NAD 27

- b) Instituto Mexicano del Petróleo IMP.- Son un total de 10, 993 datos proporcionados en el año 2000. Los datos están georreferenciados al elipsoide de Clark 1866 y datum NAD 27
- c) Secretaría de Marina.- adquiridos a través de la digitalización en tableta con el programa DIGI, realizados estos en el Instituto de Ciencias del Mar.
  - Secretaría de Marina 1997. Carta Tampico a Punta del Morro. SM810. Escala 1:250,000
  - Secretaría de Marina 1997. Carta La Pesca a Punta Jerez. SM 721. Escala 1:100,000
  - Secretaría de Marina 2000. Carta Bahía de Campeche. SM 840. Escala 1:250,000
  - Secretaría de Marina 2000. Carta Veracruz a Puerto de Alvarado SM 822. Escala 1:60,000
  - Secretaría de Marina 2000. Carta Tampico a Progreso. SM 800. Escala 1:1,023,400
  - Secretaría de Marina 2001. Carta Punta Jerez a Tampico. SM 722. Escala 1:100,000

Todas las cartas estaban georreferenciadas por el elipsoide de Clark 1866 y datum NAD 27, con proyección normal de Mercator. De estas cartas digitalizadas se obtuvieron 16,823 datos puntuales de longitud, latitud y profundidad.

Los datos anteriores se encontraban reproyectados a coordenadas geográficas.

Debido a que los valores del B/O Justo Sierra se encuentran contenidos en un archivo con valores del Instituto Mexicano del Petróleo y de la Carta Bahía de Campeche. SM 840 de la Secretaría de Marina año 2000 no fue posible separar los valores respecto a su fuente de información por lo que no se pudo utilizar esta base de datos con la información por separado, por lo que se trabajó con los datos integrados, a los cuales se les denominará de esta forma en el texto.

## 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).

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 3ª edición año 2007 escala 1:250 000 y se empleó el programa Surfer® para su digitalización en pantalla.

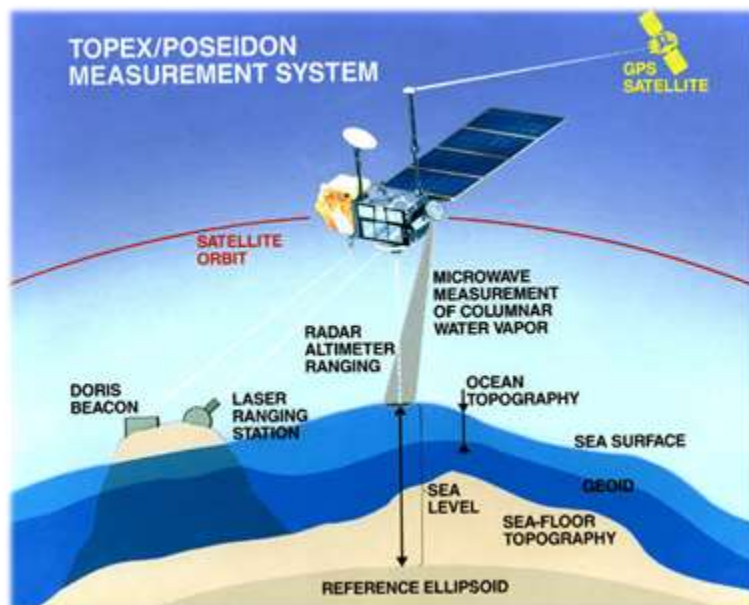
#### 4.3. Experimento topografía (Topography Experiment/Poseidon, TOPEX/Poseidon)

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

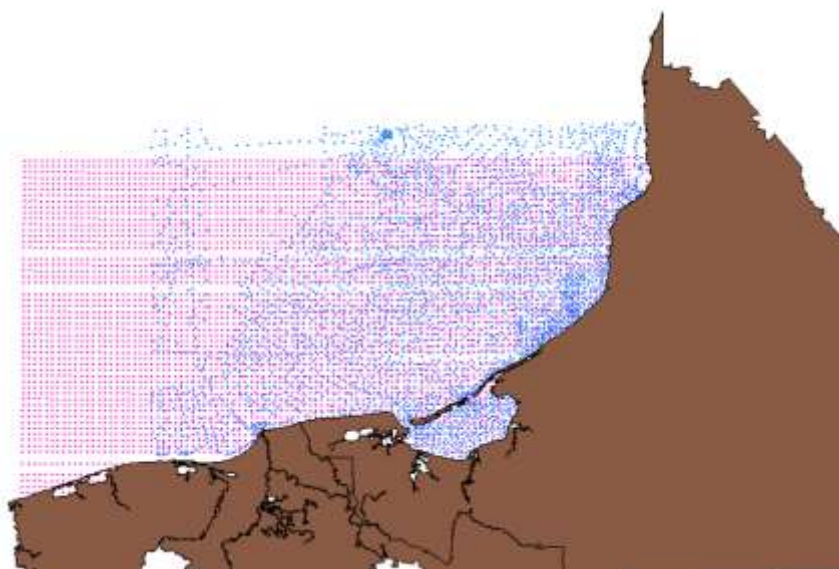
designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, que se mide en unidades de longitud sobre el terreno, en este caso el mar (Tapia, 2007).



**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 dos conjuntos de datos no cubrían por completo esta zona (véase Figura 17), por lo que se delimitó un área común en donde los datos tuvieran la misma cobertura.



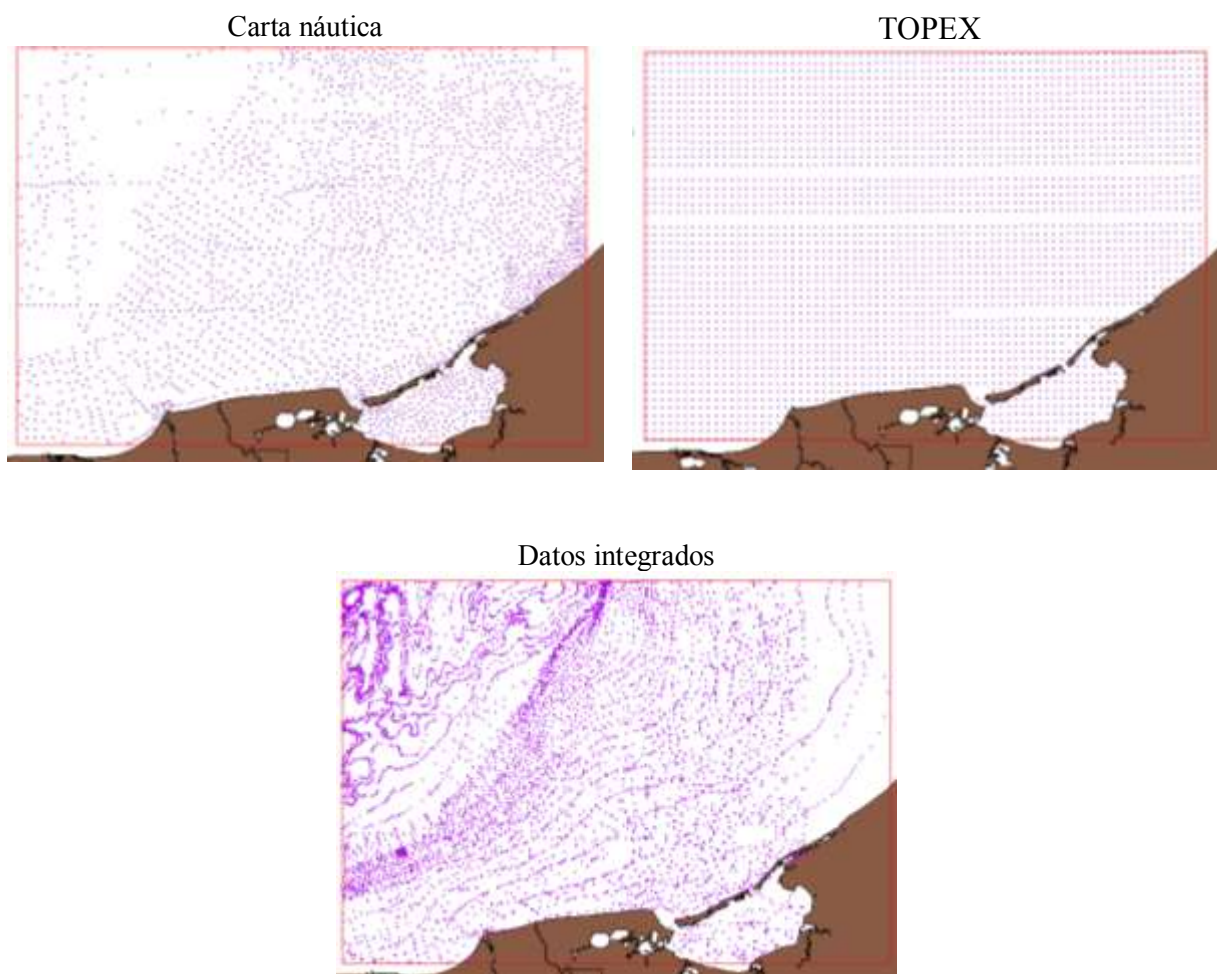
**Figura 17. Puntos de las diferentes fuentes utilizadas**

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**

	TOPEX/ Poseidón	Carta náutica	Datos integrados
No. de datos	3135	2485	7831

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:

## Distribución de cuadrángulos

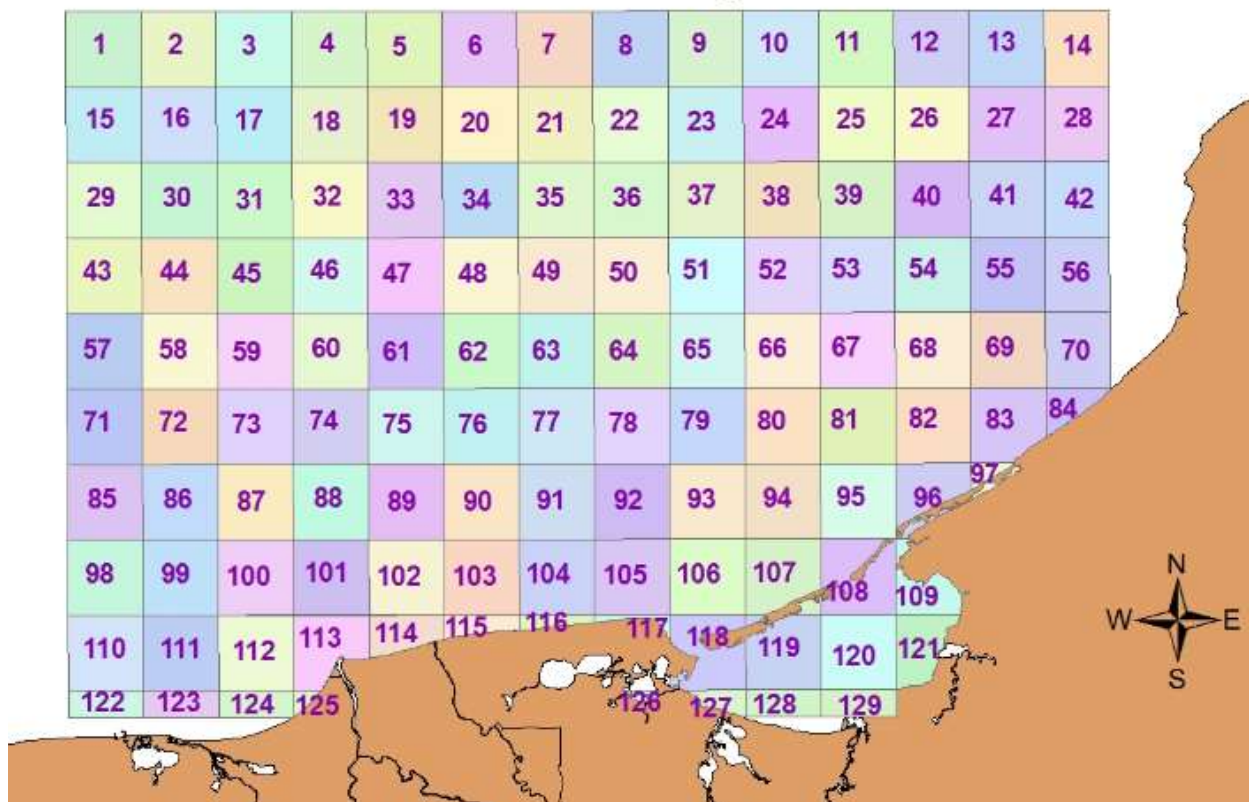


Figura 19. Área dividida en cuadrángulos de 10' de long x 10' de lat.

Para poder hacer comparativos de cada uno de los cuadrángulos, se determinó su densidad.

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.

### Distribución de áreas paralelas a la costa

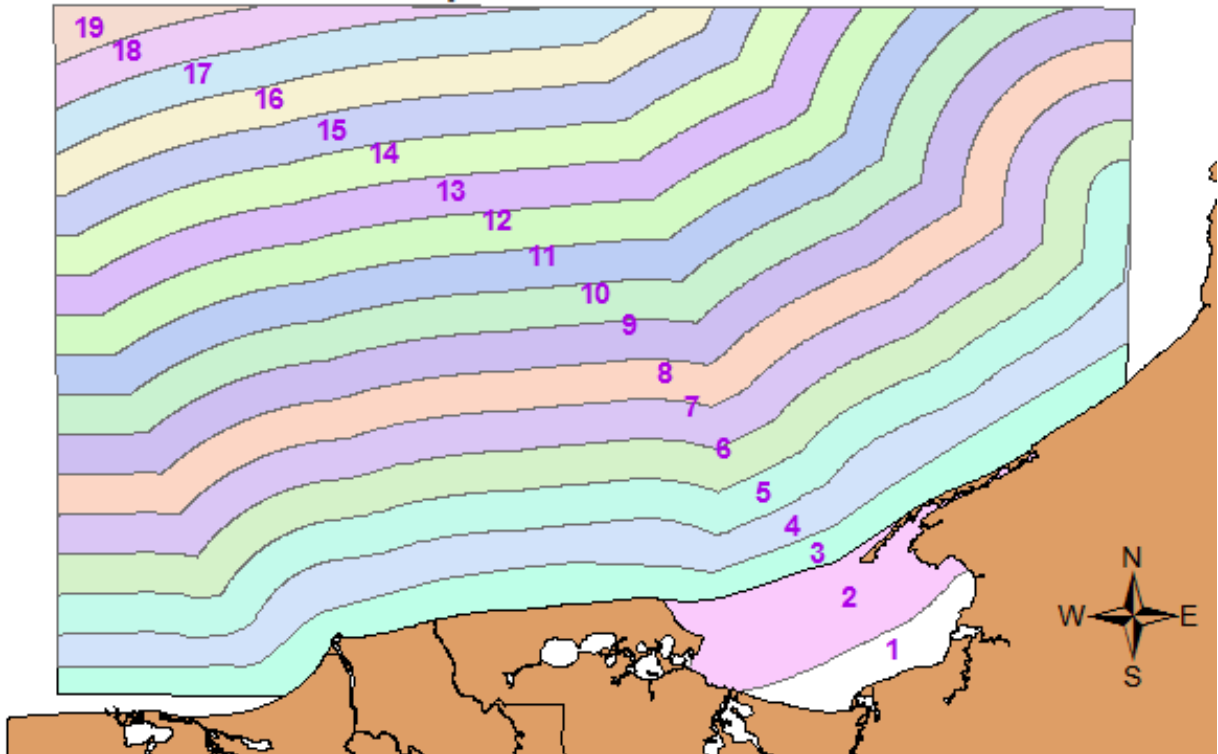


Figura 20. Distribución de áreas paralelas a la costa

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 píxeles que permiten realizar visualizaciones en 3D, los métodos de interpolación usados fueron IDW (Inverse Distance Weighting, por su nombre y siglas en inglés), Kriging, Natural Neighbor, Spline y TIN, (Triangulated Irregular Network, por su nombre y siglas en inglés).

Tabla 3:  
Valores usados para interpolación

		Carta náutica	
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 por medio del despliegue de las interpolaciones, en 3D y de isóbatas y un análisis cuantitativo que se realizó por medio de perfiles batimétricos perpendiculares a la costa, figura 21.

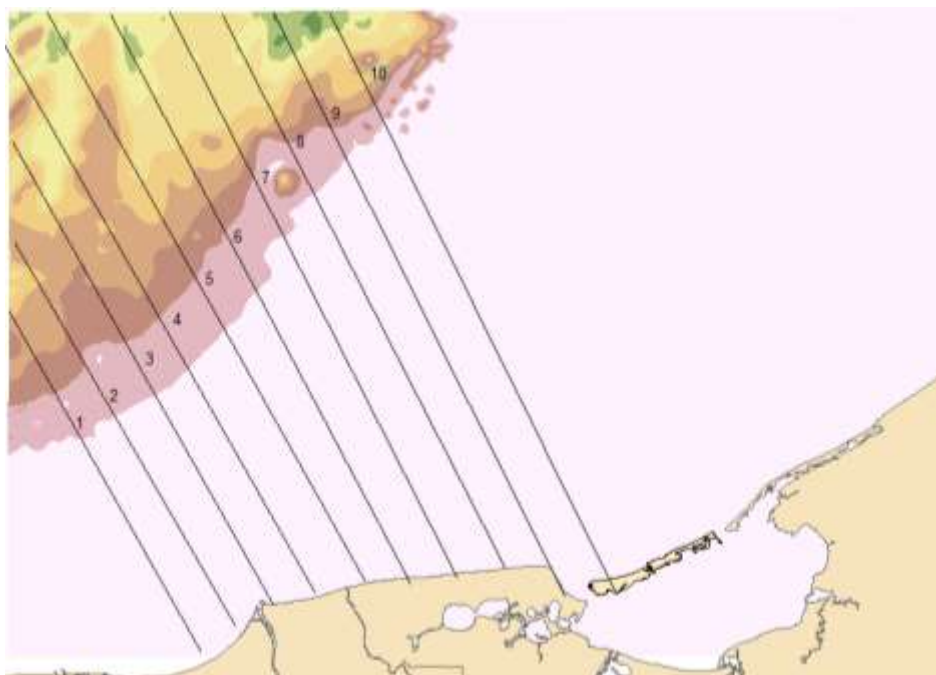


Figura 21. Distribución de perfiles para comparativo

## 5. Resultados

Del análisis estadístico de las base de datos batimétricos se obtuvo que la información integrada (buque y cartas náuticas) 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 de referencia (S.M 840 3ª edición). La diferencia entre la carta náutica y Topex es de 650 datos, como los datos integrados contienen información de siete cartas y no se pueden diferenciar que punto corresponde a que fuente se decidió hacer el comparativo de la carta base con los puntos de Topex.

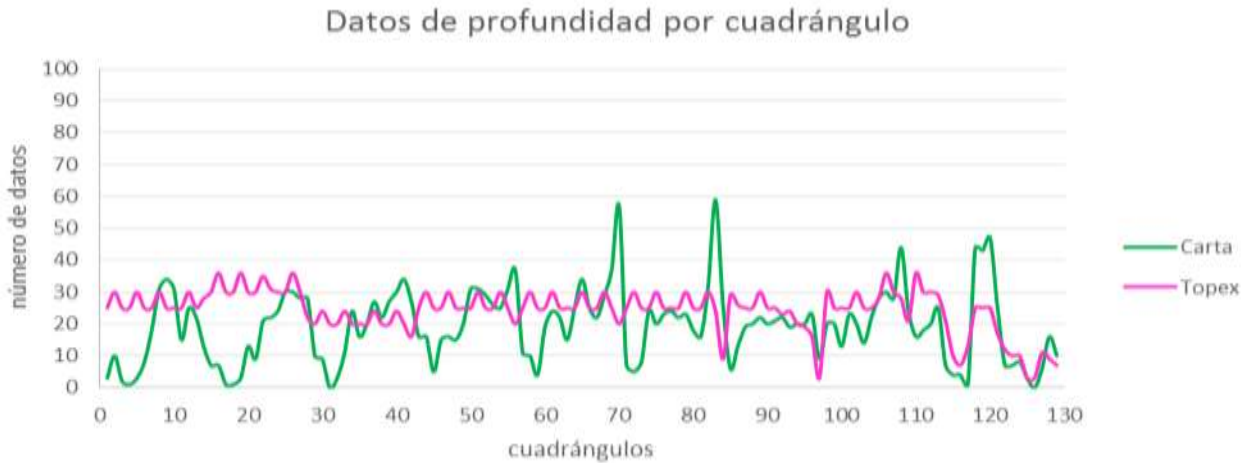
La tabla 4 muestra la distribución espacial analizada por cuadrángulos.

Tabla 4:

### Total de datos por cuadrángulo

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

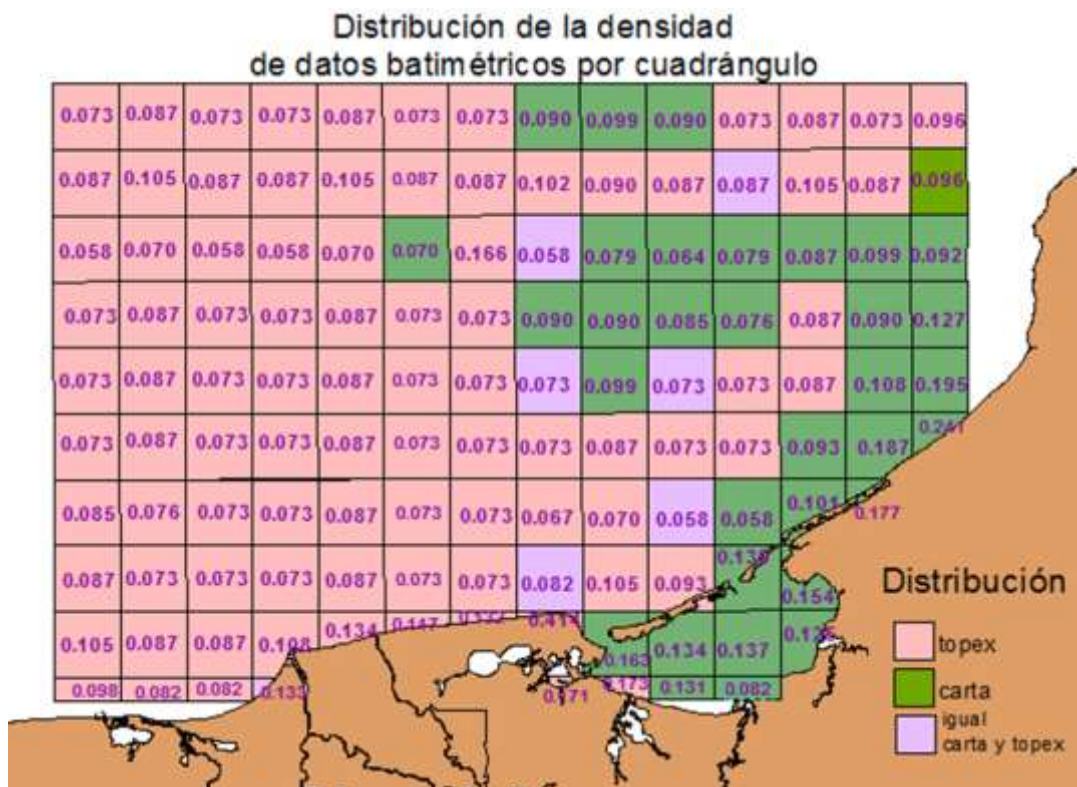
Abreviaciones: en cuad. equivale a cuadrángulo



**Figura 22. Distribución horizontal datos batimétricos por cuadrángulo**

En la gráfica de la figura 22 se observó que los datos de Topex además de tener mayor cantidad de valores, presentan una mayor continuidad de datos batimétricos en los cuadrángulos, debido a que el satélite hace un barrido homogéneo.

En la figura 23 se observan las áreas donde cada conjunto de datos tiene mayor densidad, el color rosado representa los valores de Topex, el verde los datos de la carta y el lila los cuadrángulos donde Topex y la carta tienen igual densidad.



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

Obtenido:

### Porcentaje de cuadrángulos de mayor densidad



Figura 24. Porcentaje de distribución de densidad por cuadrángulo

Realizando el análisis de las densidades por área de cada cuadrángulo, se obtuvo que; Topex representa mayor densidad de datos en 88 cuadrángulos, la carta náutica tiene mayor densidad de datos en 34 cuadrángulos y se tienen 7 cuadrángulos donde la densidad de valores es la misma. (Figura 24).

Del análisis de las áreas paralelas a la costa se obtuvo que los datos de Topex (tabla 5) son los que muestran mayor cantidad de datos por área.

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

paralelo	topex	carta	paralelo	topex	carta
1	81	69	11	187	153
2	113	186	12	162	104
3	201	256	13	156	115
4	227	230	14	151	82
5	239	198	15	144	64
6	222	200	16	131	38
7	242	211	17	118	36
8	233	189	18	67	13
9	237	186	19	25	5
10	199	150			

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.

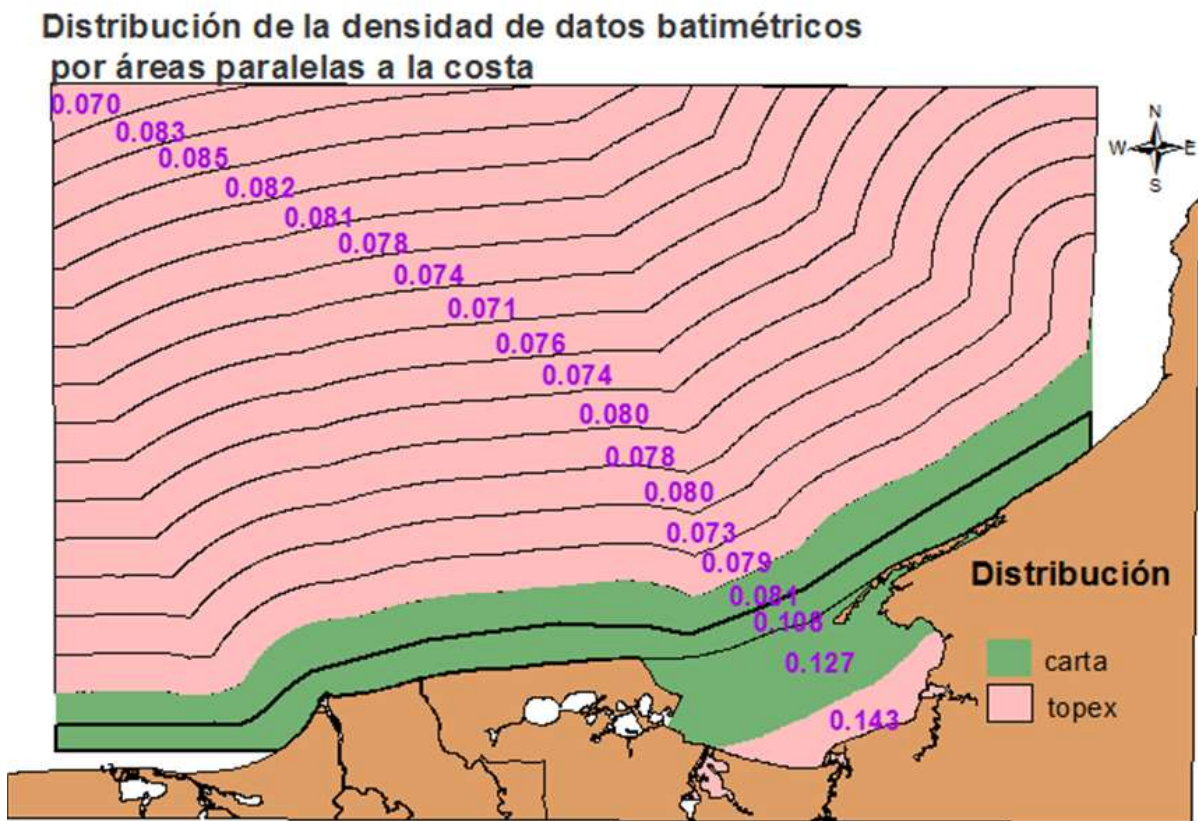


Figura 26. Distribución y mayor densidad de datos batimétricos por áreas paralelas

En la figura 26 podemos observar las áreas donde cada conjunto de datos tiene mayor densidad.

Realizando el análisis de las densidades por cada área paralela a la costa, se obtuvo que; en 16 áreas la densidad de puntos de Topex es mayor lo que representa el 84% del área total, mientras que en 3 áreas la densidad de la carta es mayor lo que representa el 16% del área total, sin embargo este porcentaje corresponde a la zona costera. Figura 27

### Porcentaje de áreas paralelas con mayor densidad



Figura 277. Porcentaje de distribución de densidad por cuadrángulo

Del análisis anterior los datos de topex presentan una mejor distribución horizontal en la mayoría de las áreas comparadas (cuadrángulo y paralelas), excepto para las zonas costeras.

Para conocer la diferencia de profundidades por cuadrángulo y por área paralela a la costa, se trabajó con los valores de profundidad, para lo cual se compararon los valores de las profundidades máximas y mínimas.

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 0.3-10m, 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.



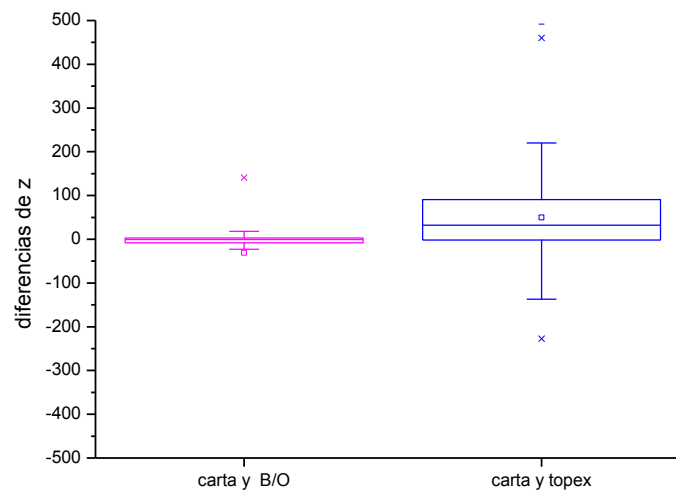
Por lo que se observó que no existe una similitud de valores de profundidad entre topex y la carta, esto puede ser debido al marco de referencia vertical, nivel medio del mar para las cartas y elipsoide WGRS80 de Topex

En la tabla 6, se resumen las diferencias mínimas y máximas de los cuadrángulos.

**Tabla 6: Comparativo de profundidades por cuadrángulo**

rangos	carta y topex	carta y topex
0	0	2
0-10	22	48
<10-100	78	67
<100	29	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 a topex y se observó que estos tienen una variación considerable Figura 28.



**Figura 288. Diferencia de profundidades por cuadrángulos datos integrados, carta y topex**

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.

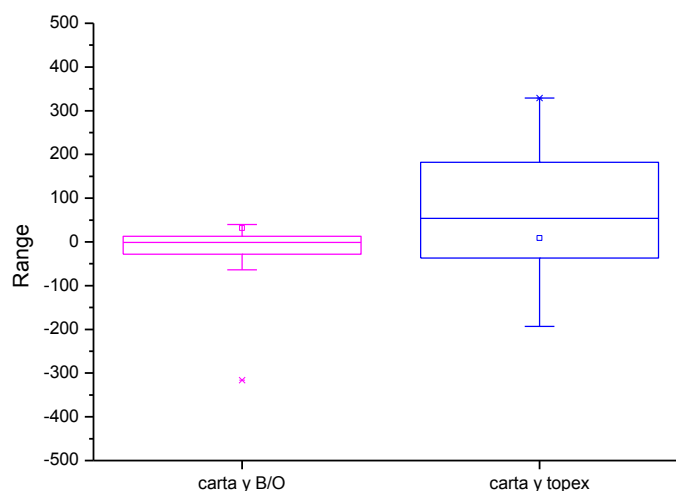
Al comparar los datos de las profundidades máximas de la carta y de topex por cuadrángulo, se encontró no hay áreas paralelas donde la diferencia de profundidades es 0, en 10 áreas la profundidad varía de 0.6-10m, en 7 la diferencia se encuentra en el rango de 10.7m-100m, y en 2 áreas la diferencia es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

La tabla 7 resume las diferencias mínimas y máximas de las áreas paralelas a la costa.

Tabla 7:  
**Comparativo de profundidades por áreas paralelas a la costa**

rangos	carta y topex	carta y topex
0	0	0
0-10	0	10
<10-100	10	7
<100	9	2
	mínimas	máximas

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 a topex y se observó que tienen una variación considerable Figura 29.



**Figura 29. Diferencia de profundidades área paralela a la costa**

Del análisis de la distribución horizontal se concluye que los datos de Topex son los que representan una mejor distribución, sin embargo se observó que las profundidades entre ellos no son semejantes. Por lo cual se consideró que para realizar el comparativo de los métodos de interpolación se utilizarán los datos de la carta náutica publicada por la Secretaría de Marina (datos oficiales).

## **Métodos de Interpolación**

Teniendo la información batimétrica de la carta náutica en coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , se procedió a realizar la interpolación de cada uno de los métodos a comparar, estos fueron seleccionados bajo el criterio de clasificación de las formas de interpolación (estadísticos, determinísticos, puntuales, globales, exactos, inexactos), que fueron explicados en el capítulo 1 conceptos necesarios del tema y se realizaron las visualizaciones de estos modelos digitales en 3D. (Figura 30)

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

La Red irregular de triángulos (TIN) se basa en la generación de red de triángulos, debido a que este método obedece a un sistema lineal de ecuaciones, hace difícil una representación de calidad de la superficie ya que esta no tiene comportamientos lineales, sino más bien caóticos, aunque los valores de las distancias de los triángulos se puede modificar para obtener triángulos más pequeños, no es recomendable, ya que en este caso supone que la variación de profundidades es lineal, aunque se considera que la representación de este método es de poca calidad, se trabajara con este para el próximo comparativo.

Para percibir las diferencias que se generan al aplicar los distintos métodos de una forma más concreta, se generaron isóbatas para distinguir las discrepancias entre estos. (Figura 31)

Debido a la base triangular que generó la interpolación de TIN, al realizar las isóbatas de esta interpolación, se generaron picos muy notables por lo que estas no tienen la suavidad de los otros métodos, dichos picos pueden confundirse con valores extremos y esto le resta confiabilidad por lo que el método de interpolación por TIN **se descarta**.

IDW tiende a producir patrones circulares en zonas con poca densidad de puntos conocidos, este tipo de patrones se pueden observar en la parte superior izquierda aunque esto no altera los puntos muestreados, dichos patrones pueden ser interpretados como islas u hoyos, por lo que se recomienda usar este método con datos distribuidos de forma regular, para este caso de estudio este método **se descarta**.

Spline predice valores para los lugares donde no existe dato pero el resultado puede verse alterado ya que este método no se ajusta a los valores de entrada, por lo que es inexacto, se esto se pudo observar al ser comparado con Kriging y Natural Neighbor, debido a esto este método **se descarta**.

Un amplio espaciamiento de isóbatas corresponde a un terreno con pendientes suaves, este tipo de pendiente se observó al realizar las isóbatas de la interpolación de Natural Neighbor, lo cual comprueba que esta interpolación genera superficies suavizadas, lo cual no se observa en los otros métodos, que esta superficie sea suave no es motivo para descartarla ya que la superficie generada pasa por los puntos muestra, por lo que se seguirá trabajando con este método.

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, 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 los dos métodos restantes es el más adecuado para la representación, se realizaron perfiles perpendiculares a la costa, para observar cómo varían entre ellos, la Figura 32 presenta los perfiles obtenidos de cada método de interpolación.

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

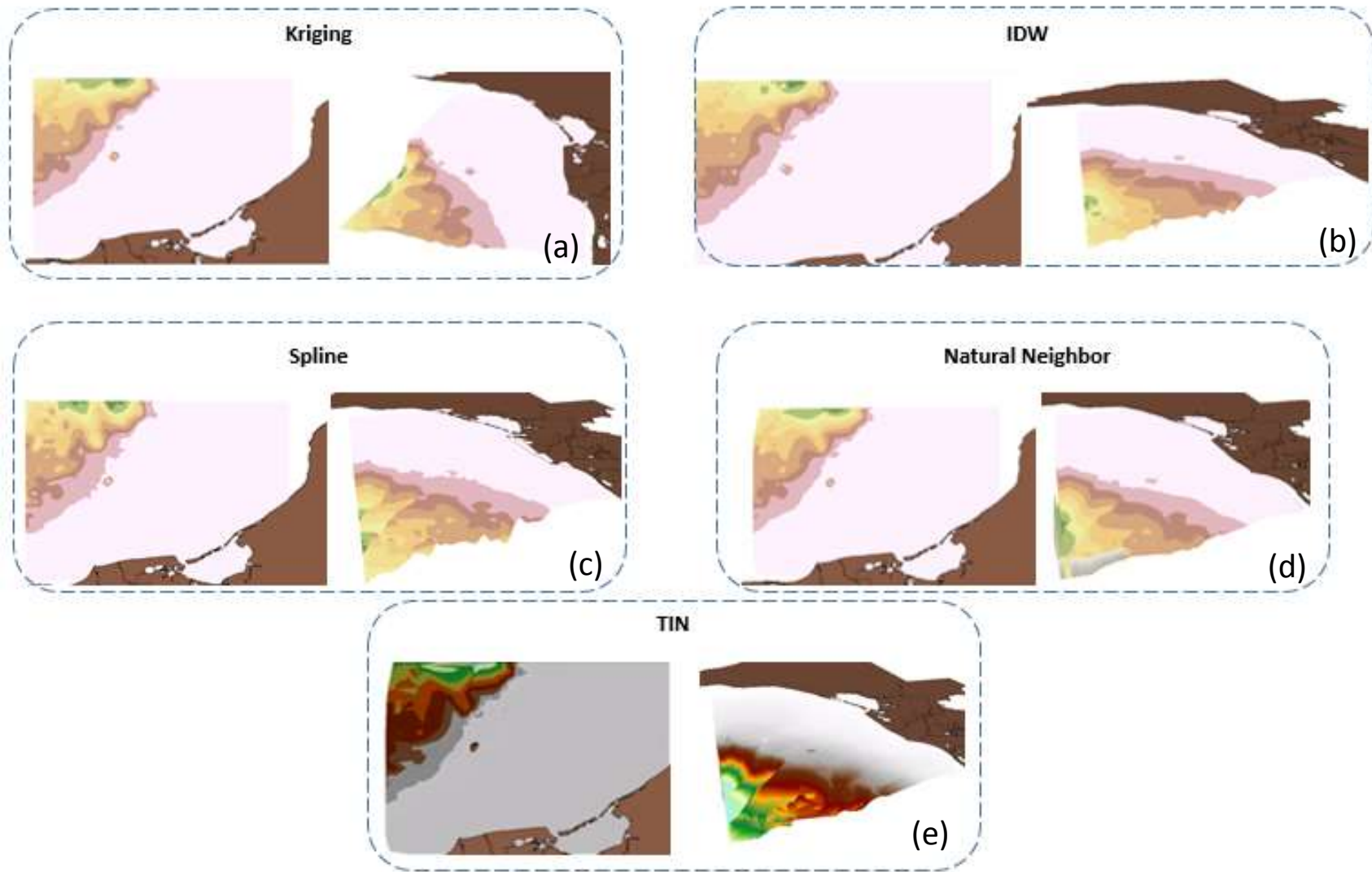
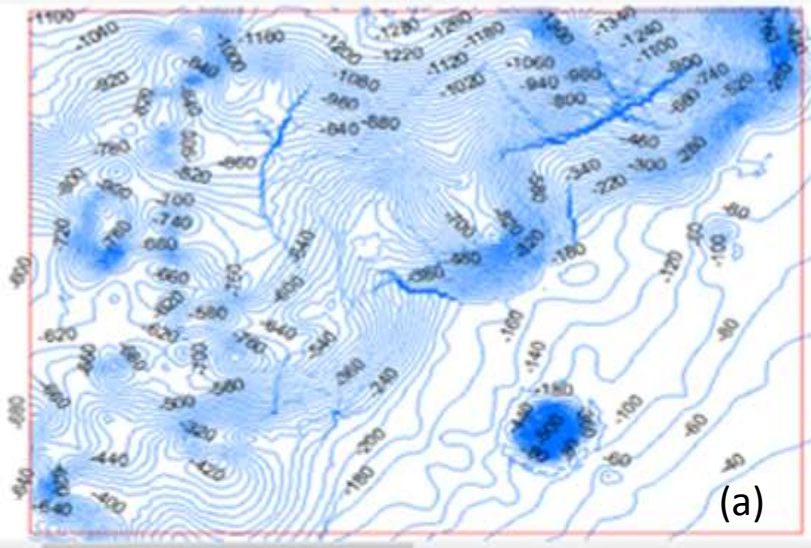
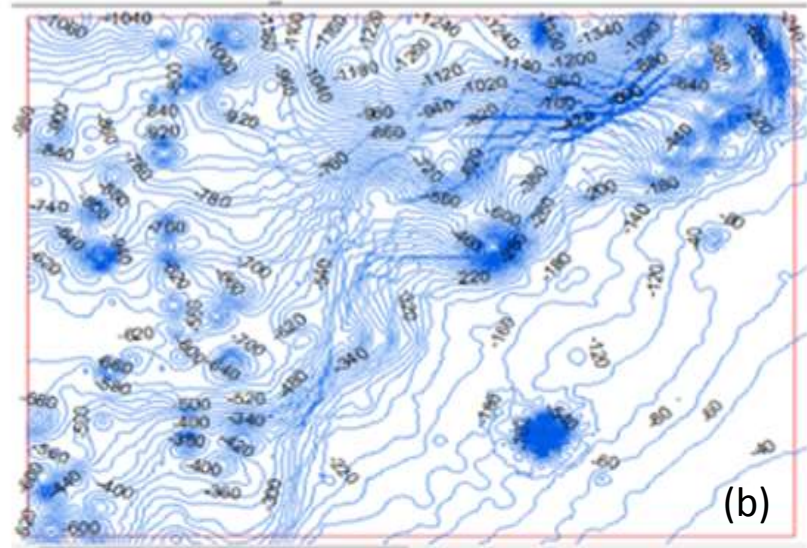


Figura 30. Visualización de los métodos de interpolación a) Kriging b) IDW c) Spline d) Natural Neighbor e) TIN

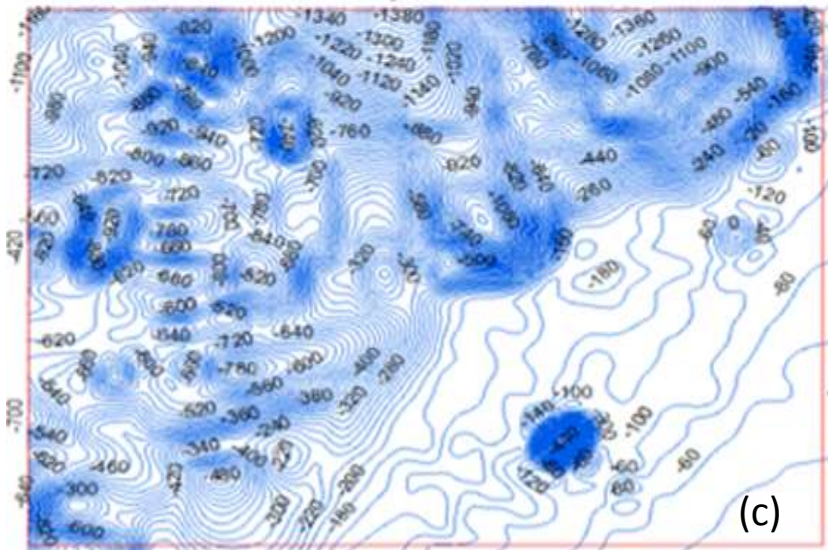
Kriging



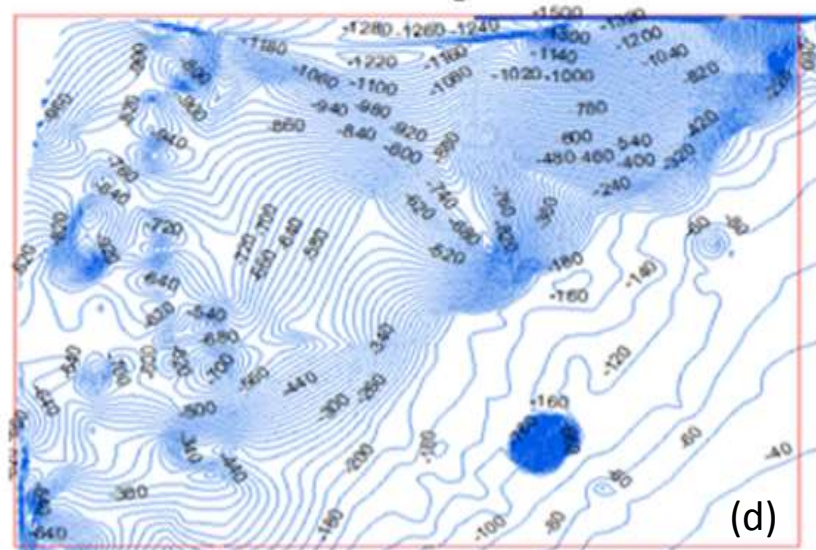
IDW



Spline



Natural Neighbor



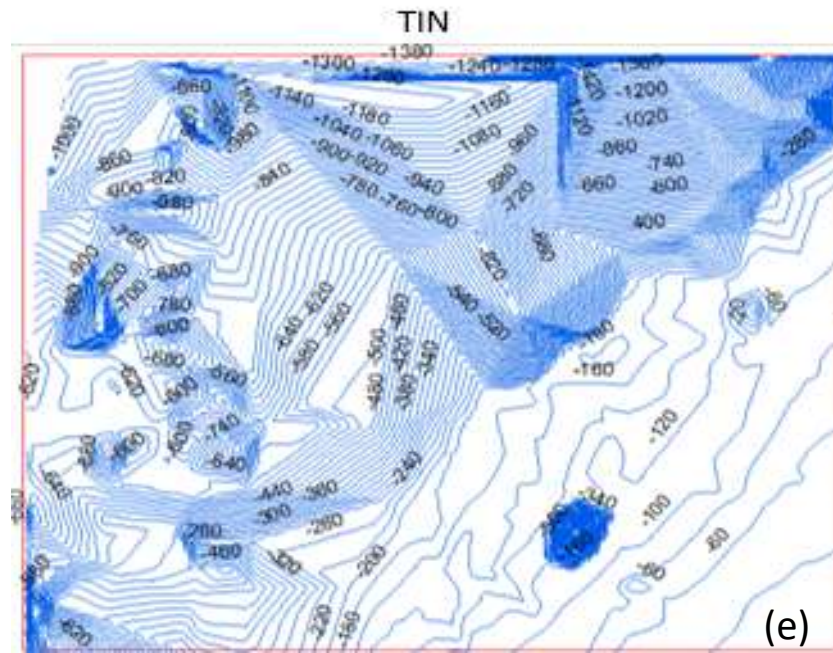
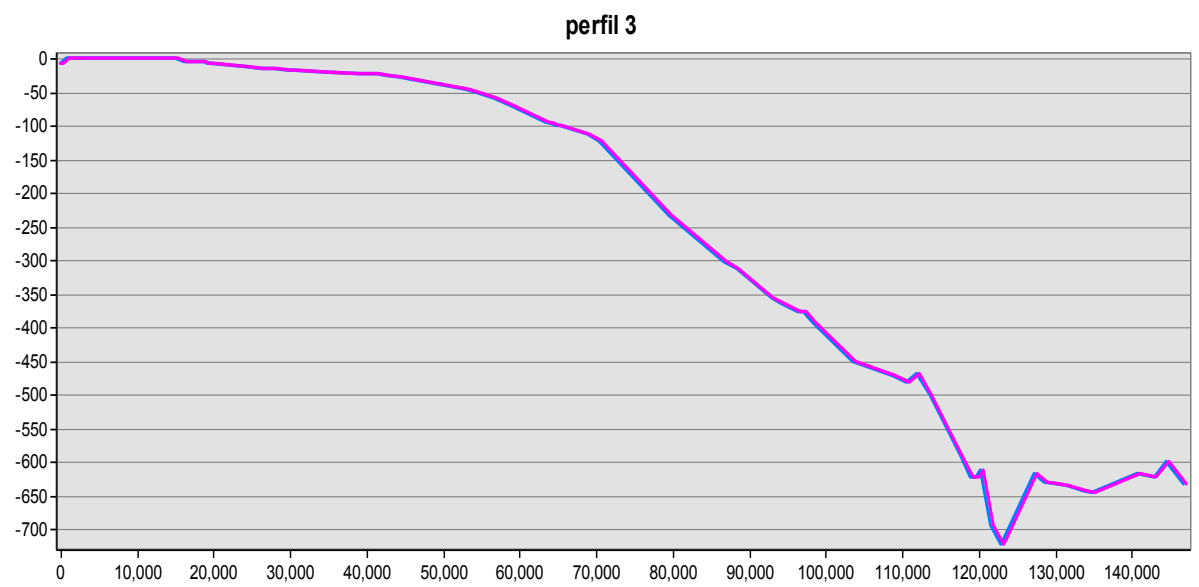
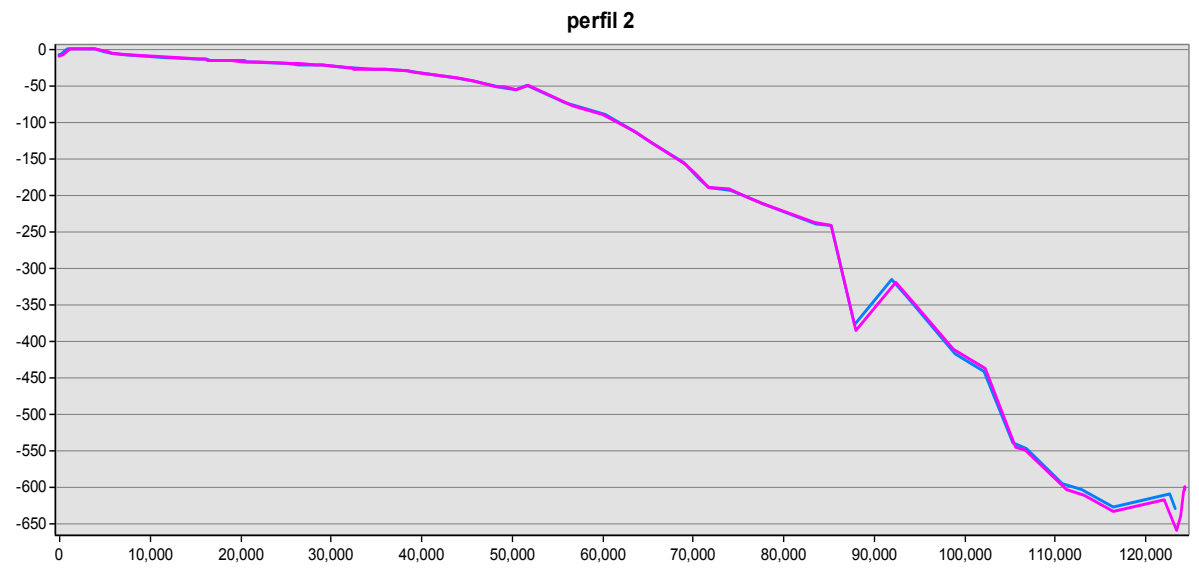
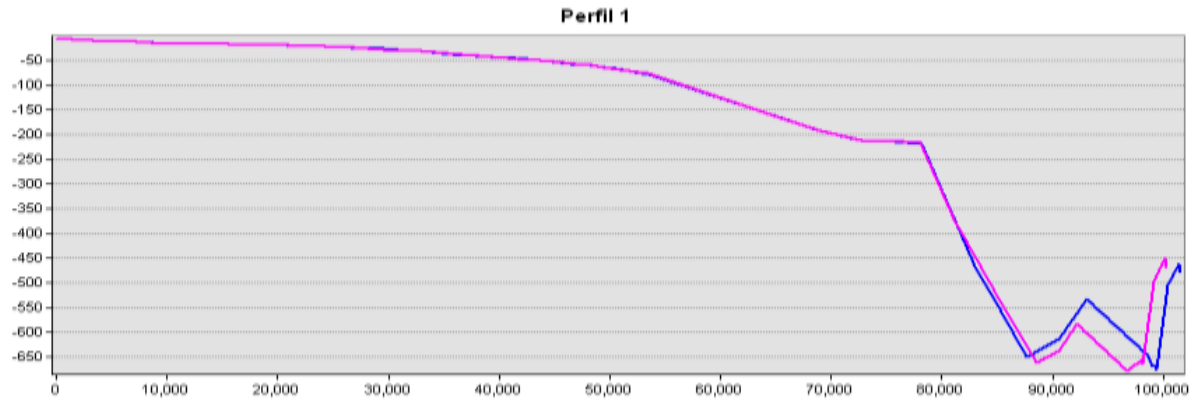
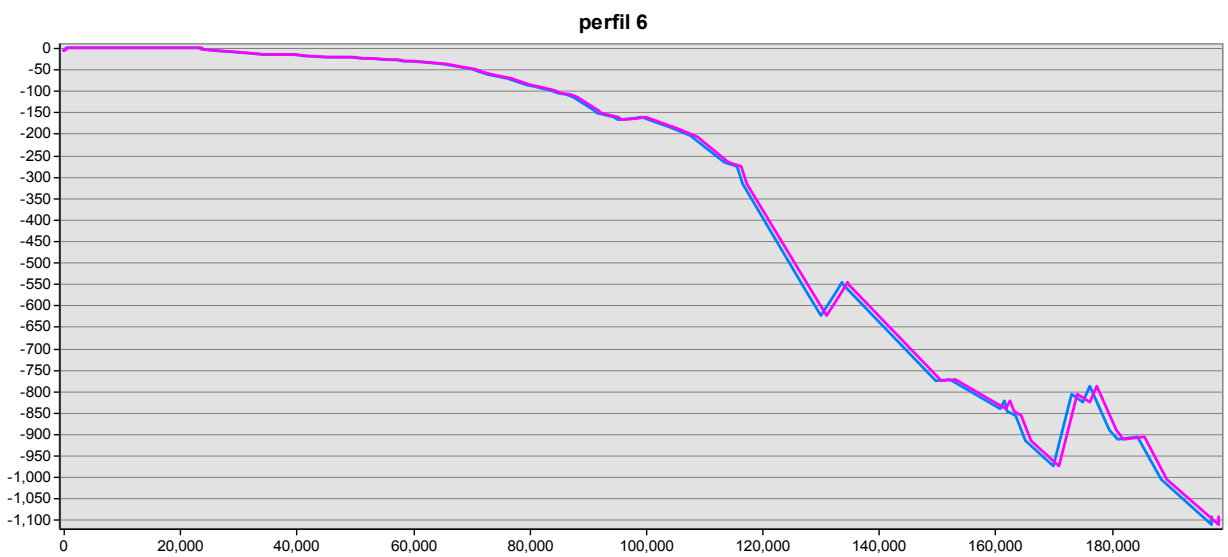
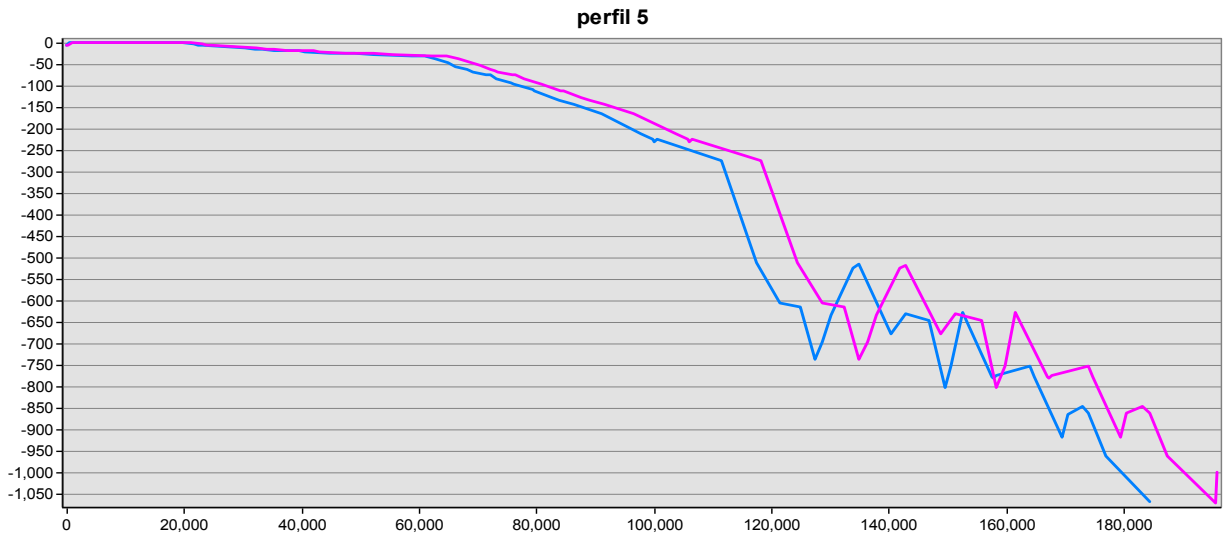
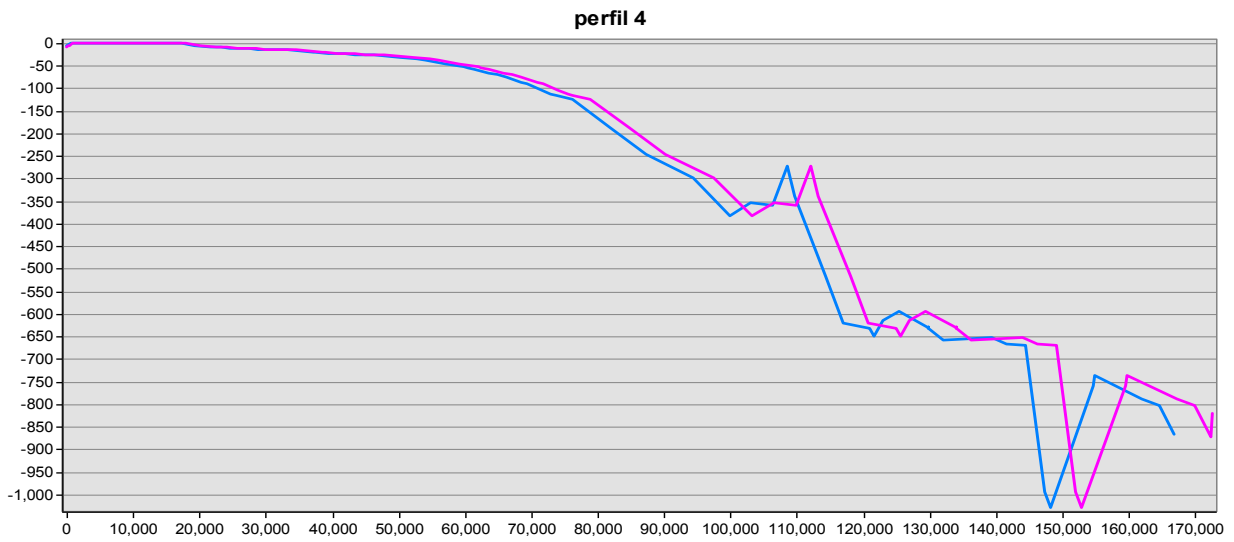


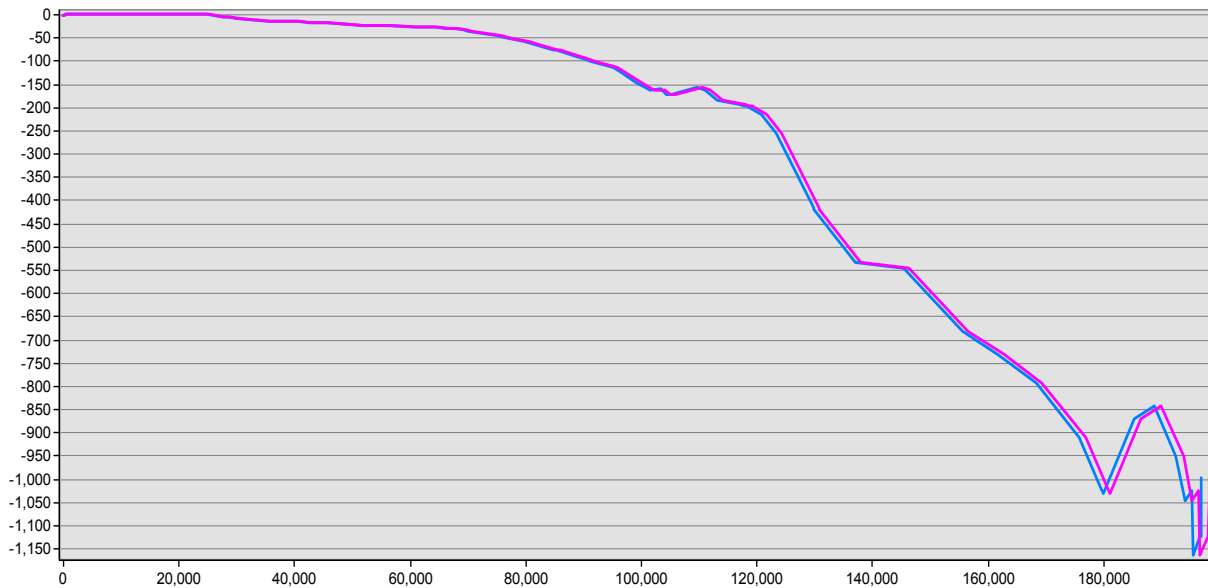
Figura 31. Isóbatas de los distintos métodos de interpolación



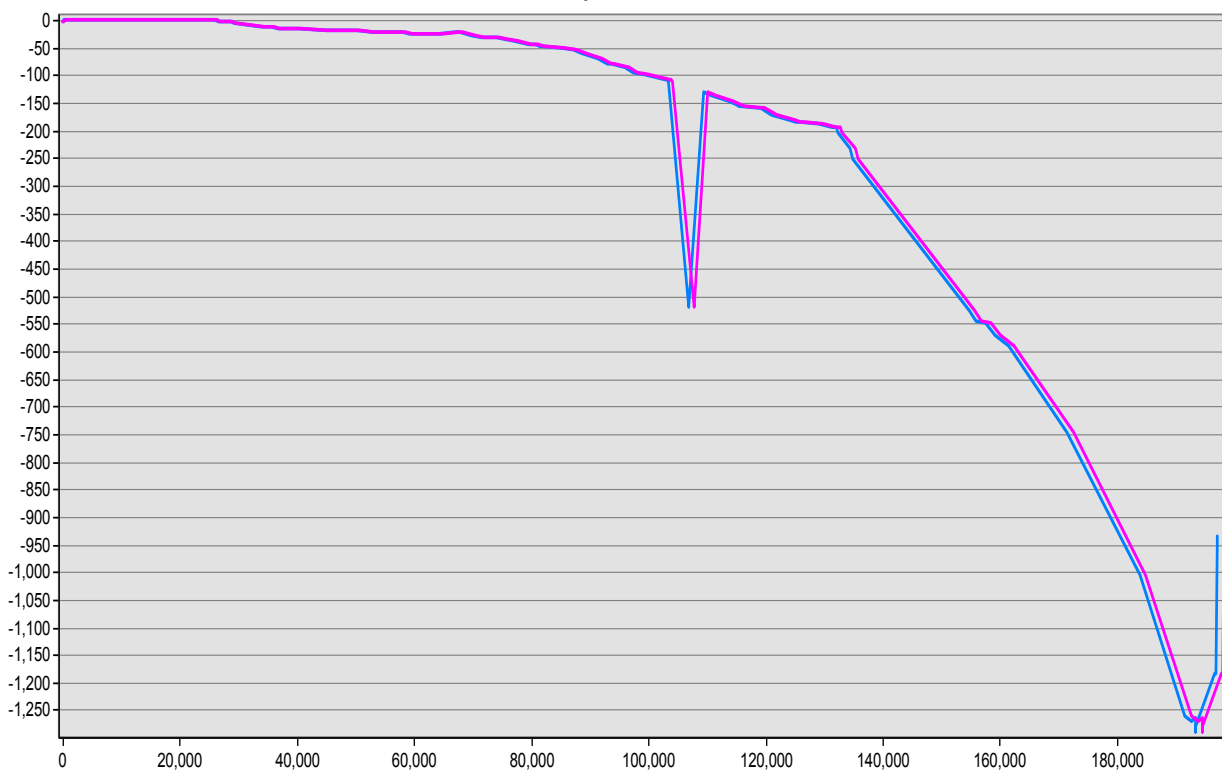


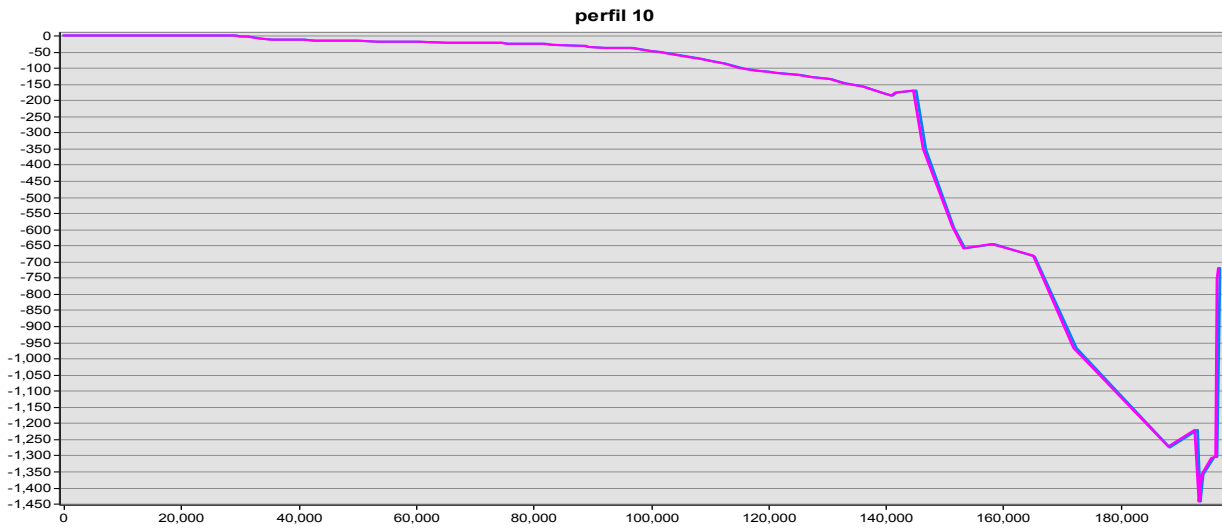
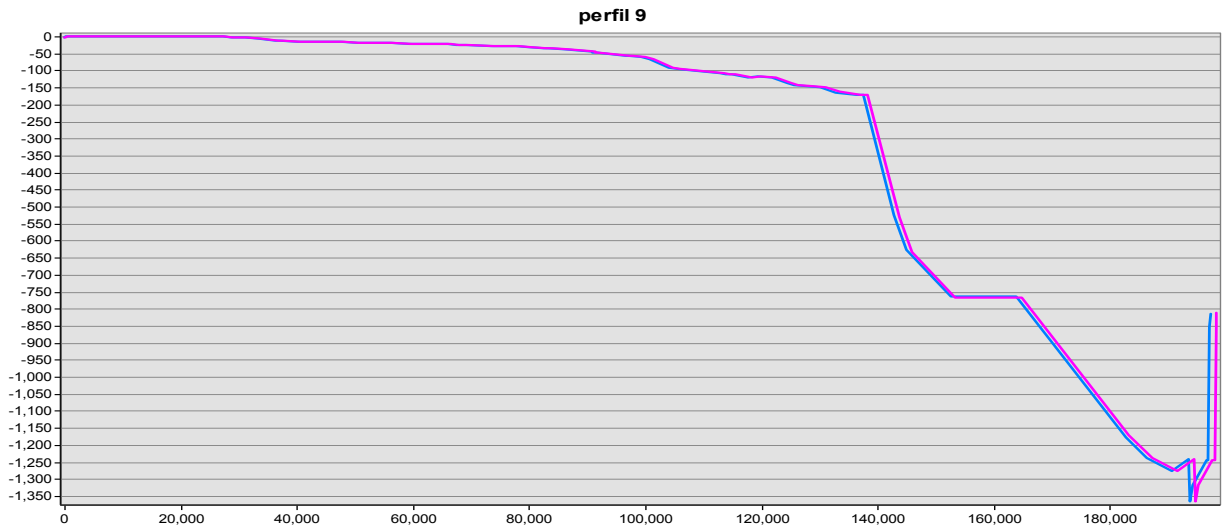


perfil 7



perfil 8





**Figura 29. Comparativo de perfiles de las interpolaciones Kriging y Natural Neighbor**

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

## 6. Conclusiones

Se considera que los datos de topex son los que muestran una mejor distribución horizontal, sin embargo la diferencia de profundidades entre estos valores y los de la carta náutica son considerables.

La carta náutica carece de información de los métodos de obtención y corrección de datos.

La información que proporciona el satélite Topex no es recomendable para zonas costeras.

Respecto a los métodos de interpolación, 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 IDW se observa la generación formas circulares en la superficie marina en lugares de baja densidad de puntos, siendo esta una de las dos interpolaciones que muestran estos resultados se considera que no es viable.

Spline genera formas circulares en lugares de baja densidad, y sabiendo que este método no se ajusta a los valores de entrada se considera que no es confiable.

De la comparación de los perfiles obtenidos de las diferentes interpolaciones, se observó que Kriging 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 y Natural Neighbor.

## 7. Recomendaciones

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.

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 procesos 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, compararlos y eliminar los que presenten mayores diferencias.

## Bibliografía

ArcGIS Resouces (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>