



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

**COMPARACIONES DE LOS DATOS BATIMÉTRICOS OBTENIDOS
POR EL SATÉLITE TOPEX/POSEIDÓN Y LOS RECABADOS POR
LOS BARCOS QUE NAVEGAN EN EL GOLFO DE MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

MAESTRO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

JESÚS MANUEL TAPIA LÓPEZ

ASESOR: DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ



**FACULTAD DE FILOSOFÍA
Y LETRAS**

MEXICO, D. F. NOVIEMBRE 2007



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.

A mí amado hijo: Jesús Tapia Rivera

A mis queridos hermanos: Fernando † y Carlitos †

Primeramente mi agradecimiento a la Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM (DGEP), por otorgarme una beca para el estudio en el programa de Maestría en Geografía con orientación ambiental en la UNAM.

A todos los sinodales que enriquecieron esta tesis: al Dr David Salas, al Dr, Román Álvarez, Dr. Mario Arturo. A la Mtra Olivia y de manera muy particular agradezco al Dr. Raúl Aguirre sus atenciones y paciencia.

A compañeros del Laboratorio de Percepción Remota del Instituto de Geografía y a todos los que de alguna me prestaron ayuda para la elaboración de la tesis. Gracias.

A la familia Rivera Díaz, por todo el apoyo en todos los aspectos, por sus atenciones, por su cariño hacia chuchito, por su tolerancia hacia mí; a ellos les debo en gran parte la culminación de esta tesis y les estoy profundamente agradecido. Asimismo de manera muy particular agradezco a mi esposa Raquel Rivera Díaz, por lo que hemos construido juntos.

A mi querida familia, que aunque físicamente no están conmigo, sé que en la distancias estamos juntos. Mis padres Santiago y Joaquina; mis hermanos: Quito, Mena, Chava, Pepe, Lety, Arturo y Guaño.

CONTENIDO

RESUMEN.....	4
INTRODUCCION.....	6
CAPITULO I. MARCO GEOGRÁFICO DEL AREA DE ESTUDIO	
1.1 Descripción de la zona de estudio.....	9
CAPITULO II. RESEÑA HISTÓRICA DEL SATÉLITE TOPEX/POSEIDÓN	
2.1 Características del satélite Topex/Poseidón.....	14
CAPITULO III. PRINCIPIOS QUE RIGEN A LOS INSTRUMENTOS	
3.1 Principios de altimetría por satélite.....	19
3.2 Principios que rigen al ecosonda de los barcos.....	24
CAPITULO IV TEORIAS DEL ERROR	
4.1 Errores sistemáticos del Topex/Poseidón.....	27
4.2 Errores sistemáticos de los barcos.....	29
CAPITULO V METODOLOGÍA	
5.1 Análisis y manejo de base de la datos.....	31
5.2 Interpolación.....	32
5.3 Cálculos estadísticos.....	36

CAPITULO VI. RESULTADOS

6.1 Análisis Gráficas.....	38
6.2 Histograma de profundidad.....	39
6.3 Análisis de profundidad.....	42
6.4 Estadística.....	50

CAPITULO VII

CONCLUSIONES.....	54
-------------------	----

<i>LITERATURA CITADA</i>	57
--------------------------------	----

ANEXO

Programa de comparaciones batimétricas entre B y T en Matlab.....	61
---	----

GLOSARIO.....	63
---------------	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Golfo de México.....	10
Figura 2 Perfil del Golfo de México.....	10
Figura 3 Topex/Poseidón.....	18
Figura 4 Inferencia de batimetría por satélite.....	22
Figura 5 Obtención de batimetría por satélite.....	23
Figura 6 Viaje de pulsos sonoros.....	25
Figura 7 Puntos de batimetría de B.....	38
Figura 8 Puntos de batimetría de T.....	38
Figura 9 Malla de batimetría coincidentes de B y T.....	39
Figura 10 (a), (b) y (c). Relación de coordenadas geográficas Y profundidades entre B y T.....	41
Figura 11 Zona de la depresión de Campeche.....	45
Figura 12 (a), (b) y (c) Muestra un mapa de diferencia de profundidades entre el satélite Topex /Poseidón y los buques.....	47

INDICE DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1 Comparaciones entre un variograma experimental y un variograma modelado.....	33
Gráfica 2 Histograma de profundidad y latitud de B	39
Gráfica 3 Histograma de profundidad y latitud de T	39
Gráfica 4 Histograma de profundidad y longitud de B	40
Gráfica 5 Histograma de profundidad y longitud de T	40
Gráfica 6 Relación de profundidades de B y T	40
Gráfica 7 Estimación de mínimos cuadrados de las profundidades de B y T	52

INDICE DE TABLAS

Tabla I Valores mínimos de profundidades de B y T	42 y 43
Tabla II Valores de profundidades medias de B y T	44
Tabla III y IV Valores de profundidades de B y T en la zona de la depresión de Campeche.....	41 y 42
Tabla V Valores máximos de profundidades entre B y T	46

RESUMEN

Conocer la topografía marina es importante, dada las aplicaciones que tiene la batimetría para colocar tuberías, exploración de recursos, etc., para ello se cuenta con ecosondas de muy buena resolución, a pesar de que se tiene la topografía de todos los océanos del mundo, ya cartografiada, si se quisiera realizar una con mas detalle nos tomaría en promedio unos 200 años en navegar y tener la topografía ya detallada de los océanos,(Tomado de www.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop) además costaría mucho dinero. Afortunadamente, con los modernos satélites es posible conocer toda la topografía marina en tan solo 5 años y su costo por debajo de 100 millones de dólares. (www.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop)

De esta manera, se puede señalar que los datos batimétricos que el satélite recaba en forma indirecta son confiables, puesto que la diferencia de estas con los datos batimétricos de los buques es mínimo, para este caso la ventaja del satélite sobre los datos del buque oceanográfico “Justo Sierra” de la UNAM, datos batimétricos del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y los datos digitalizados de la Secretaria de marina, es que realiza los cálculos en un periodo de tiempo muy corto, (10 días) para cubrir todo el globo terrestre, entonces si el satélite únicamente cubriera el Golfo de México lo haría en un tiempo mucho menor, en cambio los barcos realizan los sondeos por varios meses en la misma región del Golfo de México.

La ventaja de los barcos sobre el Topex/Poseidón es que las mediciones las realizan sobre la superficie del mar, entonces podríamos pensar que los sondeos son más exactos, sin embargo ello depende de varios factores como las distancias a la que se están realizando los barridos los buques.

Finalmente ambos se complementan mutuamente. En los buques podemos tener batimetría muy fina en las partes someras y con el satélite podemos tener una alta confiabilidad de datos batimétricos en poco tiempo a profundidades mayores a 200 metros.

La estructura de la tesis quedó conformada de la siguiente manera: en el capítulo I se presenta el marco geográfico de la región del Golfo de México, y se efectúa la descripción geográfica de las interacciones de éste con el continente. En el capítulo II se hace una reseña histórica del Satélite Topex/Poseidón con la finalidad de conocer con más detalle como trabaja dicho satélite para obtener información de los océanos. El capítulo III señala los principios que rigen a los instrumentos de medición y el como se obtienen los datos batimétricos, tanto del satélite Topex/Poseidón como la de los buques. El capítulo IV trata sobre la teoría del error tanto sistemático como estocástico principalmente del satélite Topex/Poseidón, ello permite analizar los posibles errores en los instrumentos de medición y realizar correcciones.

En el capítulo V se presenta el análisis de los resultados obtenidos de las comparaciones batimétricas del satélite Topex/Poseidón, del Buque “Justo Sierra” y de los datos náuticos obtenidos de la digitalización de las cartas SM 721, SM 722, SM 800, SM 810, SM 822 y SM 840, de la Secretaria de Marina (SM), así como los datos batimétricos proporcionados por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), todo ello a través de varias graficas y cálculos estadísticos. Por último, en el capítulo VI se presentan las conclusiones de la comparación batimétrica entre el Buque “Justo Sierra, los datos batimétricos del IMP y las cartas náuticas de la Secretaria de Marina y el satélite Topex/Poseidón.

Se incluye la bibliografía consultada, los cuadros de anexos que complementan a los diferentes capítulos de esta tesis, así como un glosario de algunos de los términos empleados.

INTRODUCCIÓN

La gran cantidad de recursos naturales aún inexplorados que se localizan en los océanos, así como los procesos que tienen lugar en el entorno marino, hacen de éste que le prestemos atención. Ello es de suma importancia para comprender los cambios globales que están afectando los procesos físicos, químicos y biológicos en el planeta.

Por lo anterior, es indispensable conocer, organizar, compartir y sistematizar los datos que, en forma aislada, se recopilan a través de múltiples investigaciones en los océanos.

En las últimas décadas se ha venido experimentando un desarrollo considerable en el campo de las ciencias y tecnologías del mar, por ello el objetivo de esta tesis es contribuir a un mayor conocimiento del territorio nacional en general y en particular, en comparar los datos batimétricos recabados por el satélite Topex/Poseidón, a quien se le ha denominado **T** y el buque Justo Sierra de la Universidad Nacional Autónoma de México, datos náuticos tomados de las cartas de navegación de la Secretaría de Marina y datos batimétricos proporcionados por el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), en el Golfo de México y a todo este otro conjunto se le denominó **B**.

La batimetría es fundamental, pues tiene diversas aplicaciones tales como la necesidad de conocer la topografía marina para predecir el alcance que puede tener un tsunami, plantación de cableados marinos, exploración de recursos naturales, tales como gas, aceite, minerales, etc. y para reclamos territoriales de la Zona Económica Exclusiva (ZEE), pues para atender a esta demanda se requieren de mapas batimétricos y desde luego para la investigación científica entre otros, sin embargo, obtener estos datos por buques es económicamente cara, es por ello que una de las opciones menos costosa es obtener la batimetría vía satelital.

Pero ¿Qué tanto difieren los datos batimétricos de los buques y los satélites?, ¿Cuál es la resolución de los datos batimétricos del satélite

Topex/Poseidón?, ¿Cuál es el alcance real de los satélites comparado con la de los buques? La confiabilidad de los datos ¿son mejores en buques o en satélite a estas interrogantes y otras se dará respuesta en esta tesis.

Obviamente la confiabilidad de esta tesis depende en gran parte de la calidad de los datos que se ha considerado para su elaboración.

La **hipótesis** es que los datos son semejantes en cuanto a su profundidad en zonas donde no se presenten muchas anomalías, es decir, donde la depresión no tenga una profundidad muy variable. Asimismo se supone que puede existir una diferencia en profundidad visible en zonas costera, debido a que las ondas del satélite se refleja con mayor fuerza que en zonas profundas.

Así, **el objetivo general** es obtener la batimetría de los buques y el satélite Topex/Poseidón, conociendo desde luego la forma en que estos operan y obtienen dicha batimetría para así analizar la confiabilidad de los mismos para las diferentes zonas del Golfo de México, de manera **particular**, realizar un mapa de diferencias de profundidades entre la batimetría del satélite Topex/Poseidón y la batimetría de los buques que han navegado el Golfo de México.

En México, las Instituciones que se han encargado de realizar los mapas batimétricos de todo el país y en particular en el Golfo de México son principalmente la Secretaria de Marina, Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), Petróleos Mexicanos (PEMEX), la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (a través de la Dirección de Obras Marítimas y la Dirección General de Dragado), la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (a través del Consejo de Recursos Minerales) y el Instituto de Investigaciones Eléctrica) y mas recientemente el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) en un proyecto de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI), perteneciente a la UNESCO, que tuvo lugar en marzo de 1985 en París, surge el Proyecto Regional de Cartografía Oceánica para elaborar la Carta Batimétrica Internacional del Mar Caribe y Golfo de México; (IBCCA, por sus

siglas en inglés). Por parte de la UNAM, tenemos que el Instituto de Geografía en 1993, publicó el Atlas Nacional de México incluyendo algunos mapas oceanográficos escala 1:4,000,000, así como el Instituto de ciencias del mar, se realizo una carta batimétrica del Golfo de México, escala 1:5 000, en octubre de 2003. (Tapia, L. J 2003. *Mapa Batimétrico Digital de la porción meridional del Golfo de México*. Tesis de Licenciatura. UNAM. México).

A nivel internacional, se tiene las contribuciones de muchos científicos (Sandwell, y Smith, [Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry](#), Walter H.F. Smith and David T. Sandwell, abstract, agosto, 1996, San Francisco, CA. USA) realizaron la batimetría general de la todos los océanos del mundo auxiliándose de los altímetros de microondas como el satélite Topex/Poseidón y los articulos de Sarah Gille, Ellen Kappel y de Johanna Adams de Geosciences. (Gille S.T., 1994: Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: Method and application. J. Geophys, 273 pp), entre otros. Estas son las publicaciones mas recientes que se tienen a nivel nacional e internacional sobre la batimetría.

Asimismo se dispone de una gama de datos batimétricos proporcionados por barcos de muchos países del mundo y del satélite Topex /Poseidón, mismos que se pueden adquirir en la página: <http://topex.ucsd.edu/>

Particularmente para el Golfo de México, las cotas de profundidad varían de 0 a 3700 metros de profundidad. Las costas son una zona relativamente llana, en la cual el relieve topográfico no es muy notorio, a partir de 100 metros hasta los 3,600 metros las isolíneas muestran un terreno muy accidentado pues existen grandes depresiones (escarpes) y, por lo tanto, las pendientes tienden a incrementarse, lo que hace que las isolíneas en el mapa batimétrico aparezcan muy juntas.

CAPITULO 1

MARCO GEOGRÁFICO DEL AREA DE ESTUDIO

1.1 Descripción de la Zona de estudio

La extensión territorial de México es de 1'964,375 km², de los cuales 1'959,248 Km² son superficie continental y 5,127 km² corresponden a superficie insular. A esto hay que añadir la franja oceánica que pertenece al país, la cual consiste de una frontera marina del mar territorial de 12 millas náuticas y de una distancia adicional de 188 millas comprendida por la denominada Zona Económica Exclusiva (ZEE, que anteriormente era conocida como Mar Patrimonial), haciendo un total 200 millas náuticas, equivalentes a 3'149,920 km²; que al añadir esta superficie, la extensión territorial de México suma en total 5'114,295 km². (Tapia, L. J 2003. *Mapa Batimétrico Digital de la porción meridional del Golfo de México*)

La región del Golfo de México se ubica de los 18° a 30° latitud norte y de los 89°30' a 98°10" de longitud oeste. Aún cuando el satélite Topex/Poseidón cubre más allá de los 30° de latitud norte, en esta tesis sólo se trabajó la franja comprendida entre las coordenadas de latitud norte de 18° a 24°, la cual corresponde a la zona cubierta por el Buque Oceanográfico "Justo Sierra" con el fin de tener datos coincidentes

El litoral del Golfo de México es de 2,059 km, y le corresponde una gran llanura costera con una pendiente ligera y muchas barras de arena, con frecuentes islotes y arrecifes e involucra a los estados ribereños de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán (Velasco. H.1994). El Golfo de México es una cuenca de forma elíptica-semicerrada que se conecta con el Océano Atlántico y el Mar Caribe por el estrecho de Florida y el canal de Yucatán, respectivamente. La figura 1 muestra al Golfo de México y la figura 2 su perfil.



Figura 1. Golfo de México. Tomado de: Wikipedia, la enciclopedia libre.mht

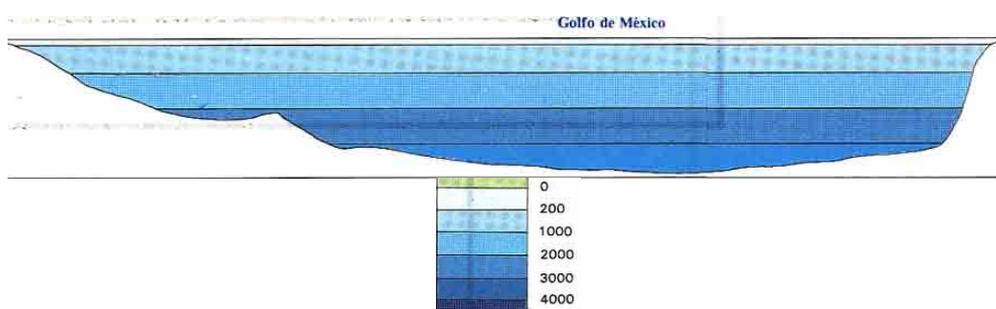


Figura 2. Perfil del Golfo de México. Tomado de

<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/atlas/hipsibat.jpg>

La plataforma del Golfo de México está caracterizada por una anchura de aproximadamente 216 km en la parte este y una estrecha de 30 a 55 km hacia el oeste. En el Golfo de México, los ríos como el Grijalva, el Usumacinta, el Papaloapan y el Coatzacoalcos, originan un complejo sistema de estuarios, deltas y lagunas costeras, entre las cuales destaca la Laguna de Términos. Esta laguna ocupa una extensión cercana a los 4 000 kilómetros cuadrados y es parte de una de las regiones hidrológicas más importantes del país debido a los ríos que allí desembocan. Sus aguas están pobladas de conjuntos de manglares, principalmente en su sector sureste, donde anidan diversas especies de aves marinas, como las garzas, la cigüeña jabirú y ocasionalmente pelícanos y gaviotas, que conviven con algunos lagartos que han logrado sobrevivir al deterioro ambiental. La laguna se encuentra dentro del programa de Áreas de Protección de Flora y Fauna. Los ríos que llegan a depositar sus aguas son maduros dado que son caudalosos durante todo el año. Estos ríos en su desembocadura cuentan con depósitos aluviales y algunos de ellos son navegables como el Pánuco.

La circulación de las corrientes oceánicas en el Golfo de México está dominada por una fuerte corriente anticiclónica que se extiende desde el Canal de Yucatán hasta el Estrecho de Florida conocida como corriente del Lazo. Esta corriente transporta aguas superficiales y se mantiene relativamente angosta (30 km.) formando un delta hacia el interior del Golfo de México antes de salir por el estrecho de Florida. En su transcurso en el canal de Yucatán, esta corriente, tiende a estar adyacente a la península de Yucatán. Los grandes remolinos en el Golfo de México están generados por el crecimiento del mencionado meandro al punto que la corriente se encierra en si misma, separándose de la corriente de Lazo que mantiene su continuidad.

Asimismo, el Golfo de México está influenciado por el intercambio de masas de aire frío y seco, provenientes del interior del continente (Estados Unidos y Canadá), y de masas propias del Golfo, de origen marino y tropical, las condiciones atmosféricas del Golfo de México se presentan de manera tal que las masas de aire frío y seco que llegan del norte y las masas de aire del Golfo de origen marino y tropical provocan frentes fríos conocidos como "Nortes" entre los meses de octubre a abril. (Otoño-invierno). Estos vientos fríos de origen continental influyen en la circulación atmosférica del Golfo de México ocasionando enfriamiento y mezcla de la capa superficial, con un impacto considerable en la zona de la costa. (Velasco H. 1994.)

En general, el Golfo de México es dominado por vientos del norte (alisios) en épocas de invierno y durante el verano por tormentas tropicales.

En cuanto al aspecto geológico es variado, la llanura de la zona costera es bastante amplia si se le compara con el del Pacífico, siendo esta última más estrecha y pronunciada. En el Golfo de México el litoral se angosta en algunas regiones, ya sea por la proximidad de la Sierra Madre Oriental hacia la porción Sur del Estado de Tamaulipas, por la presencia de rocas ígneas extrusivas del Cinturón Volcánico TransMexicano y de LosTuxtlas, o bien por el litoral rocoso carbonatado en algunas porciones del Estado de Campeche. De acuerdo con Carranza Edwards et al. (1995) en el Golfo de México (incluido el Caribe)

existen cuatro grandes unidades morfotectónicas, las cuales pertenecen a costas de mares marginales que están protegidas de la influencia del Océano Atlántico por la presencia del Arco de las Antillas. Los sedimentos litorales del Golfo de México presentan una distribución en la concentración de carbonatos (Carranza Edwards et al., 1996). Estos pueden ser biogénicos (restos de conchas de moluscos, pellets, algas calcáreas, etc.) o asociados con precipitados químicos (como es el caso de la roca de playa). Se ha observado que las arenas de playas presentan una tendencia a ser más finas y mejor clasificadas cuando hay influencia terrígena y llanuras costeras amplias, en tanto que para los sedimentos biogénicos la clasificación del sedimento es mala y los tamaños pueden ser muy gruesos, excepto cuando hay arenas oolíticas o limos calcáreos (Carranza Edwards, 2001).

CAPITULO II

RESEÑA HISTÓRICA DEL SATÉLITE TOPEX/POSEIDÓN

A mediados de los años setentas, los Estados Unidos se dieron los primeros pasos para observar los océanos desde el espacio. Los primeros indicios de que la percepción remota tenía algo que ofrecer a la oceanografía vino probablemente de los vuelos de avión, los cuales transportaban sensores como equipamientos fotográficos, blanco y negro, color o IR, scanner o barredores multiespectrales, radares, entre otros y de las fotografías tomadas desde los satélites Mercury, Gemini y Apollo. Un segundo paso importante ocurrió en 1969 durante la "Williamtown Conference, celebrada en la ciudad de Newcastle (Inglaterra), en el reporte final se establecían las posibilidades para lanzar una misión espacial enfocada a la geodesia cuyo objetivo era determinar el geoide de la tierra usando una combinación de seguimiento preciso de satélites y de medidas de la elevación comparadas sobre la superficie marina mediante altímetros. Durante esta conferencia se señaló que el satélite debía tener un margen de error hasta 10 cm para extraer la información, así la NASA inició un programa llamado Earth and Ocean Physics Application Program y la resolución especificada de 10 cm se logró en 1994 después de un período de 25 años de incremento gradual de la resolución a través de 5 satélites: Skylab, GEOS-3, SeaSat, GeoSat y Topex/Poseidón y antes de este último satélite aparecieron dos satélites de observación del océano de primera generación, Skylab (en 1973) y GEOS-3 (en 1975.) los cuales fueron un laboratorio que transportaban astronautas y sensores para mejorar los conocimientos del geoide de la tierra.

Durante 1978 los Estados Unidos en un intervalo de 4 meses lanzó una tríada de satélites (TIROS-N, Seasat y Nimbus-7) que cambió de manera radical la forma en que los científicos verían el océano en el futuro. En Junio de ese año (1978) fue lanzado el SeaSat (el cual solo tuvo 3 meses o mejor dicho 99 días de vida útil), auspiciado por la fuerzas aéreas norteamericanas y la agencia espacial civil NASA. A pesar de su corta vida demostró la utilidad de un altímetro para medir el geoide marino dentro de unos pocos metros para

inferir la variabilidad a gran escala de las corrientes oceánicas y para determinar las alturas de las olas. El radar de apertura sintética (SAR) del SeaSat produjo imágenes libres de nubes mostrando características de la superficie del mar.

En Octubre del mismo año (1978) el Television and Infrared Observational Satellite (TIROS-N por sus siglas en inglés) fue lanzado inmediatamente después de la catastrófica falla en el SeaSat y el Nimbus. Esta segunda generación de satélites fue extraordinariamente exitosa dado que produjo datos que validaron a los satélites como herramientas útiles a la oceanografía.

En 1979, el laboratorio de la propulsión en chorro de la NASA (JPL, por sus siglas en inglés) inició la operación TOPEX (acrónimo de “Experimento Topográfico sobre la circulación Oceánica”) un experimento sobre la topografía del océano en la que se utilizaría un altímetro montado en los satélites para medir la superficie de los océanos del mundo con un costo de unos 270 millones de dólares. En el mismo tiempo el Centre National d’ Etudes Spatiales (CNES) de Francia diseñaba una misión oceanográfica llamada Poseidón. Debido a las dificultades de financiación del TOPEX, en 1985 se planteó la fusión con la misión francesa de análogos objetivos llamada POSEIDON. Las dos agencias reunieron sus recursos para formar una sola misión y en 1987 firmaron el acuerdo. La compañía Fairchild de los Estados Unidos se encargó del proyecto. El Jet Propulsion Laboratory de la NASA (JPL) se encargó del diseño y la construcción del altímetro americano y la Empresa Alcatel Espace haría lo propio con su homólogo francés. Después de 12 años de trabajo el satélite Topex/Poseidón fue lanzado el 10 de Agosto de 1992.

2.2 Características del Satélite Topex/ Poseidón

Es un satélite activo con sensor que trabaja en el espectro de microondas y por lo tanto es capaz de penetrar las nubes y la bruma y obtener imágenes de noche. La carga útil del Topex/Poseidón principalmente está constituida por dos altímetros que actúan por separado. El altímetro-radar (dual-frequency) americano utiliza un canal principal en banda Ku (13.6GHz) y el otro en 5.6

GHz; por otro lado el altímetro-radar (single-frequency) Poseidón actúa en la frecuencia de 10.00 GHz, y su funcionamiento se lleva a cabo a través de la misma antena utilizada por el sistema americano de modo que solo se emplearía cuando este estuviese inactivo. Por último, actuando como elemento auxiliar se emplea un radiómetro de microondas, el cual corrige la información altimétrica en función de los efectos producidos por vapor de agua de la atmósfera y una antena parabólica de 1.5 metros de diámetro.

El paquete americano en su conjunto pesa unos 206 kg y el francés unos 25 kg. El satélite completo Topex/Poseidón, de aspecto rectangular mide 5.5 metros de ancho, 11.5 de largo y (con el panel solar desplegado) y 6.6m de altura

Para que las medidas sean válidas, el satélite debe conocer en todo momento la determinación de su órbita y es por ello que lleva dos altímetros para determinar su órbita y se basa en el sistema Laser Ranging (SLR) y el sistema Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS). Estos sistemas en conjunto proporcionan un seguimiento global del satélite en todo tiempo.

El sistema de seguimiento láser consiste en una parrilla de retroreflectores montados alrededor de la antena parabólica orientada en forma constante hacia la tierra. También se tienen doce estaciones terrestres de control, cuyas posiciones están bien definidas sobre la tierra y éstas se encargan de enviar emisiones láser hacia el satélite, esto permite calcular la velocidad, situación orbital y altitud de la nave con una exactitud media de 2 cm.

El segundo sistema de seguimiento desarrollado por la compañía Dassault Electronique de Francia se llama DORIS. Este sistema se compone de una red de seguimiento de 51 estaciones terrenas, distribuidas en más de 30 países, las cuales emiten señal hacia el satélite, permitiendo así el cálculo de distancias y velocidades. La distribución homogénea de las estaciones

alrededor del mundo permite una adecuada cobertura de la órbita de Topex/Poseidón, superior al 80%.

En cuanto a la precisión de la posición del satélite, el vehículo transporta un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) diseñado por la compañía Motorola. Este sistema extrae información de posicionamiento global procedentes de las señales enviadas constantemente por la red de satélites de navegación Navstar GPS. La posición puede determinarse de este modo con una precisión de hasta 10 cm.; pero usando esta información con la suministrada al mismo tiempo por las estaciones terrestres ya mencionadas, la precisión mejora hasta los 5 cm, aunque cabe señalar que la precisión media en un mes es de 2 cm.

Topex/Poseidón siempre está orientado hacia un punto determinado de la superficie terrestre y puede sobrevolar esa misma posición cada diez días (127 revoluciones u orbitas o un ciclo), lo que permite una repetición periódica y sistemática de las mediciones sobre más del 90% de los océanos libres de hielo del mundo.

La órbita del Topex/Poseidón es de tipo Polar que, como su nombre lo indica, orbita la tierra de polo a polo y es la más adecuada para la observación de zonas en forma longitudinal. La órbita final tiene una inclinación de 66 grados respecto al plano del ecuador y esta situada a una altura de 1,336 kilómetros con respecto a la superficie media del mar.

La resolución espacial, la cual designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen, se mide en unidades de longitud sobre el terreno (que en este caso es el mar) es de dos segundos lo cual se traduce en 60 metros en el terreno, comprendiendo en las latitudes 72° norte y 72° sur. En resumen se puede señalar que 2" corresponde al tamaño de la unidad mínima de información incluida en la imagen, denominada píxel.

El elipsoide de referencia que utiliza el Topex/Poseidón es el WGRS80, con un semieje de 6378137 m y aplanamiento de 1/2982572236. y el satélite viaja con una rapidez de 8 kilómetros por segundo.

El equipo de datos científicos (o STD por sus siglas en inglés), es responsable de producir y distribuir los archivos digitales que contienen información de la nave espacial, sus sensores y sus productos finales. Después de recibir los datos del sensor Topex/Poseidón, los miembros SDT los envían al Jet Propulsión Laboratory (JPL), donde se les aplica una serie de programas para organizar y refinar los datos; y es ahí donde se agregan archivos adicionales a los datos procesados para producir el registro de datos altimétricos y el registro de los datos Geofísicos Merged Geophysical Records (MGR). Estos archivos se envían al Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODACC,) que es lugar donde se concentra toda la información satelital y desde donde son distribuidos a la comunidad científica.

<http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap10-altimetria.PDF>

http://www.jason.oceanobs.com/html/missions/welcome_es.html

Desde el 15 de septiembre de 2002, el Topex/Poseidón está sobre una nueva órbita y está siendo sustituido paulatinamente por JASON-I, el cual fue lanzado en diciembre del 2001 para continuar la misión. La figura 3 muestra un dibujo del satélite Topex/Poseidón.

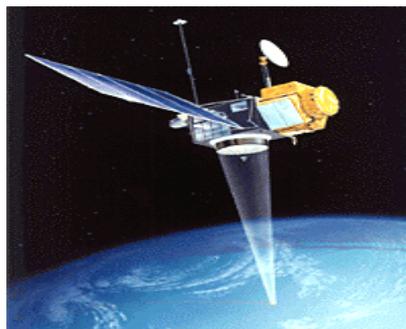


Figura 3. Topex/Poseidon. Tomado de http://www.aviso.cls.fr/html/alti/fiche/futur_es.html

CAPITULO III

PRINCIPIOS QUE RIGEN A LOS INSTRUMENTOS

3.1 Principios de altimetría por satélite.

Muchos satélites oceanográficos poseen un instrumento conocido como altímetro el cual es un radar que apunta al nadir y mide la altura sobre la superficie del mar mediante pulsos emitidos y recibidos. En particular, el Topex/Poseidón emplea dos radares, uno sintonizado a una frecuencia de 10 GHz (longitud de onda de 3 cm) y el otro a una frecuencia de 13,65 GHz (longitud de onda de 2,3 cm). Los radares transmiten pulsos a esta frecuencia hacia la superficie del mar y miden los ecos que regresan al sensor. Cada pulso tiene una duración de aproximadamente 3 nanosegundos. En cada segundo se transmiten 1700 pulsos lo cual se conoce como 'la frecuencia de repetición de pulsos'.

Cabe señalar que durante el lanzamiento del satélite Topex/Poseidón aun no se tenía como referencia al elipsoide WGS84 así que el primer paso fue determinar la altura del océano con respecto a un elipsoide de referencia WGRS80. La determinación de la posición y altura exacta del satélite en el momento en que se realiza una medición de altura se conoce como efemérides de la órbita.

Dado que las longitudes de onda del Topex Poseidón son de 2,3 cm y de 3 cm para cada uno de los radares usados, se impone un límite inferior absoluto en el rango de resolución en el terreno, porque la información recibida no puede discriminar distancias más cortas que la de la propia longitud de onda emitida. En otras palabras, la máxima resolución teóricamente posible es de +/- 3cm.

Por otra parte sabemos que los fenómenos meteorológicos que existen en las diferentes capas de la atmósfera, influyen en la información que se recaba en el satélite Topex/Poseidon y también se deben contemplar la fuerza de atracción gravitacional entre los cuerpos celestes, de esta manera, tenemos

que las principales fuerzas que causan desviación de la órbita nominal del satélite son: variaciones en la atracción de gravedad entre tierra - luna - sol, la fricción con la atmósfera (por ejemplo, variabilidad de la velocidad en la ionosfera), presión de la radiación solar directa y la degradación del pulso al reflejarse en una superficie rugosa, entre otros. Estos efectos modifican el tiempo de recorrido de las ondas, provocando un cálculo incorrecto de las distancias. Estas variaciones señaladas se corrigen a través de instrumentos anexos. (:http://www-aviso.cls.fr/html/alti/welcome_es.html.)

Para calibrar los radares de los altímetros del Topex/Poseidón, el equipo de determinación de la Órbita de Precisión y el Equipo de Comprobación tienen una segunda manera, basada en tierra, de obtener la distancia del altímetro al océano. Esta medida se obtiene a partir de mediciones del nivel del mar las cuales son supervisadas mediante instrumentos puestos en las Plataformas petrolíferas de Texaco, localizada fuera de la costa de California. El sitio fue escogido para que la interferencia de la tierra no adulterara la señal de retorno de altímetro. Las medidas de los instrumentos de la Plataforma se comparan con aquellos tomados por Topex/Poseidón, para asegurar que el altímetro de la nave espacial está funcionando apropiadamente

Las mediciones obtenidas por el satélite Topex/Poseidón no serían útiles si la posición del satélite en el espacio no fuera bien conocida; para ello se utilizan sistemas que miden con exactitud la posición del Topex/Poseidon, las cuales son:

A) Sistema de rastreo por radio, desarrollado por la agencia espacial francesa.

B) Se localiza la nave espacial usando la información de GPS de la serie de satélites NAVSTAR

(<http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap10-altimetria.PDF>)

Por otra parte, la superficie del océano se mueve con movimientos tanto verticales como horizontales dando a conocer la topografía del suelo marino, que a simple vista no podemos percibir, pero a través del radar satelital son

perceptibles las pequeñas variaciones en la superficie del océano. Las inmersiones en la superficie del océano son causadas por las variaciones del campo gravitacional de la tierra, así por ejemplo, la atracción gravitacional de una montaña marina se refleja en la superficie del océano, pues la montaña atrae al agua con una gran fuerza que se refleja en la superficie del océano y de esta manera se puede conocer la topografía marina.

La figura 4 muestra como se infiere la batimetría por satélite.

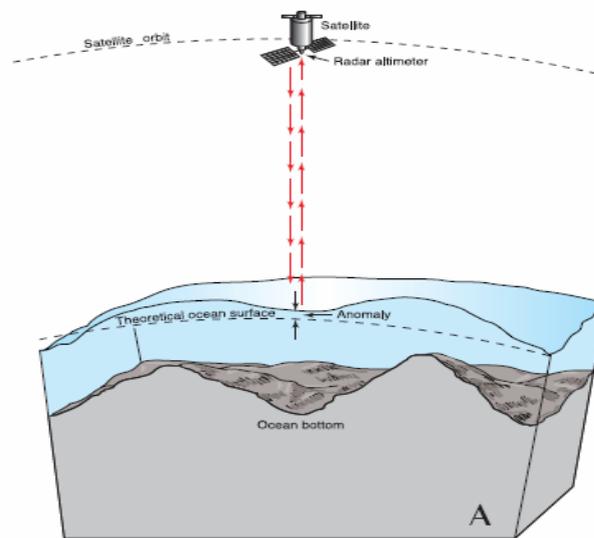


Figura 4. Inferencia de la batimetría por satélite Tomado de www.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop

En esta figura tenemos que un radar no puede ver el fondo oceánico, sino mide las variaciones superficiales de la altura del océano induciendo la topografía del fondo marino, así una montaña en el fondo marino produce una pequeña variación, misma que se refleja en la superficie del mar. Por ejemplo, una montaña marina de 2000 m de altura refleja una anomalía positiva en la superficie del mar de tan solo 20 centímetros de alto. Aunque es pequeño, el satélite lo detecta. (Tomado de www.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop)

La resolución de este método está limitado por la profundidad de las regiones del océano. La inclinación en la dirección de la gravedad, llamada “detección de la vertical” es igual a la variación de la superficie del mar y se

mide en micro radianes. Así un micro radian aparece como un cambio de 1 milímetro en altura de la superficie del mar por 1 kilómetro de la distancia horizontal.

De acuerdo a lo anterior, tenemos que para establecer la topografía del océano, se debe considerar lo siguiente:

Primero.- Se debe conocer la altura del satélite (h^*) en forma constante, basada en un elipsoide de referencia. La altura y la trayectoria del satélite son calculadas con precisión.

Segundo.- Se conoce la altura del satélite sobre la superficie del océano, pues el radar de microondas ilumina un punto con precisión.

Por último, se realizan las correcciones por mareas, por vientos, etc y se obtiene la diferencia entre la altura h^* y la altura h y por lo tanto, la topografía marina. La siguiente figura, muestra lo anterior

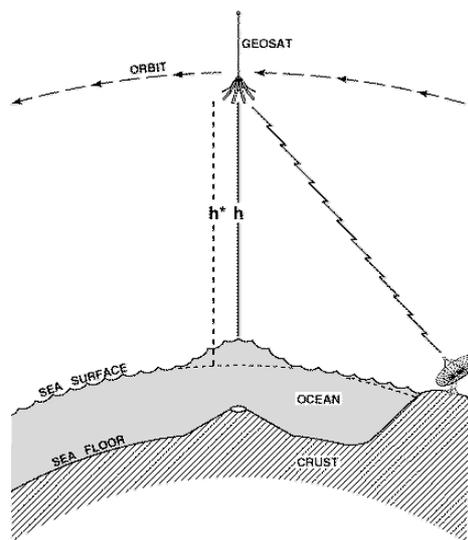


Figura 5. Obtención de batimetría por satélite. Tomado de <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/predicted/explore.HTML>

h* Altura geodésica (de acuerdo a INEGI) Es la distancia que existe entre el GPS del satélite al elipsoide de referencia (WGS80)

h Distancia que existe entre el satélite y la superficie del mar.

La distancia **h*** geodésica es conocida ya que en forma constante conocemos la posición del satélite y por tanto la altura geodésica , es decir que se conoce la altura del geoide con respecto a la posición del satélite en forma constante.

La distancia **h** también es conocida, puesto que el satélite la calcula de manera constante en su recorrido, así tenemos que:

H*-h = Altura del relieve marino.

3.2 Principios que rigen al ecosonda de los barcos

Los equipos de ecosondas y sonares de los barcos tienen incorporado un receptor GPS y software para el análisis de la batimetría. La información proveniente de ecosondas con sistemas de posicionamiento global GPS ofrece garantías de ubicación de la embarcación.

Las ecosondas hoy en día pueden trabajar en dos frecuencias simultáneamente, desde 12, hasta 200 Khz. Tienen una potencia que va desde 50 hasta 5000 W; Asimismo, detectan profundidades desde 0.3 hasta 3000 metros; y los ecogramas pueden ser grabados en discos ópticos e impresos en una gama de hasta 256 niveles de la escala de grises, o incluso a color. (http://wave.prohosting.com/geodatos/html/cap_07-5.htm)

El principio de funcionamiento de la ecosonda es básicamente el mismo principio del sonar, transmitir fuertes impulsos sonoros para luego captar y clasificar los ecos que servirán para ubicar el punto que los produce, es decir, transmite una señal acústica que rebota en el lecho marino y regresa en un tiempo determinado al instrumento, así el tiempo transcurrido entre el envío y el regreso de la señal se puede traducir en distancia, lo que nos da la profundidad dado que se conoce la velocidad con que viajan las ondas.

La forma en como distorsiona el ecosonda el patrón del es que la ondas emitidas al vibrar induce a las partículas del medio a desplazarse, de modo que la señal acústica se transmite en forma de ondas. Por las características del agua del mar la velocidad de propagación del sonido cambia de acuerdo a la variación de temperatura, salinidad y presión. Cuanto mas altas sean estas características del agua, mayos será la velocidad. En las zonas donde la temperatura se mantiene constante con la profundidad, las ondas sonoras no sufren refracción; cuando decrece, se refracta hacia el fondo.

En la figuras 6 se muestra el viaje de impulsos sonoros y el regreso de la señal.”

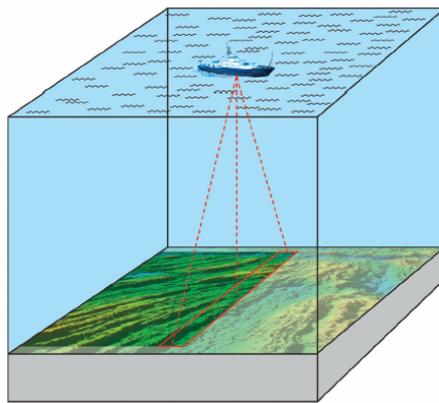


Figura 6. Viaje de impulsos sonoros. Tomado de www.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop

Los equipos de ecosonda que hasta ahora ha usado el Buque “Justo Sierra” de la UNAM, son los siguientes:

Kongsberg Multi Beam EM300 (Deep Water),

Kongsberg Multi Beam EM3000 2 (Shallow Water),

KDA Topas Sub Bottom Profiler

Skipper 38 and 70 kHz digital

Simrad EA 600 18-32 kHz digital.

Simrad ES 60 split beam , 38kHz and 200kHz digital.

Simrad EA 400 38kHz digital.

Simrad EK 60, 38kHz and 70kHz digital

Sin embargo, los datos batimétricos del que disponemos provienen de los últimos tres ecosondas. El Simrad EK60 puede funcionar siete frecuencias de eco que se extienden simultáneamente a partir del 18 a 710 kilociclos. El Simrad BI60 es una alternativa para el análisis rápido.

El Simrad EA 400 Con esta opción el eco se extiende para examinar la navegación misma, el almacenaje de datos, y trazar de resultados., no se requiere ninguna computadora externa

CAPITULO IV

TEORÍA DEL ERROR

Toda medición realizada con instrumentos son un conjunto de datos o valores, que pueden estar afectados por imprecisiones en las lecturas y son llamados *errores sistemáticos* y los errores realizados por el usuario son llamados *accidentales o estocásticos*, ambos son inevitables e inherentes a los procesos mismos del proceso de medición.

Los *errores de medición* se clasifican en sistemáticos y accidentales o estocásticos. Los primeros son aquellos de valor constante o que responde a una ley conocida y por lo tanto corregible y a esta pertenecen la calibración de los instrumentos del Topex/Poseidon y las ecosondas de los barcos. Los segundos corresponden a las fallas humanas. Para el trabajo de esta tesis nos interesan los primeros, es decir, los sistemáticos, dado a que suponemos que los errores estocásticos han sido controlados por los técnicos que calibran los instrumentos y equipos que integran los dispositivos del satélite Topex/Poseidón y los buques oceanográficos.

La corrección de los errores sistemáticos se realizan de esta manera; al repetir la medición de una misma magnitud o cantidad en condiciones iguales no se obtiene generalmente el mismo valor, sino una distribución estadísticas de valores alrededor de un valor medio. Esto mismo sucede con los valores registrados por el satélite Topex/Poseidón y los Buques, así no tiene sentido hablar de valor absoluto o verdadero de una determinada magnitud física, sino de una distribución estadística de valores (o un valor estadístico promedio), el cual nos permite calcular mejor la estimación de la cantidad medida.

Precisión.-Es un valor que indica la capacidad de un instrumento de repetir una misma lectura sucesivamente, cuando la cantidad que detecta se mantiene constante. Así por ejemplo al medir sucesivamente la magnitud de

una barra con un vernier se encuentran las lecturas 12.3 mm, 12.4 mm, 12.3 mm, 12.4 mm, se puede creer que la precisión del vernier es buena, pero desde luego, considerando otros métodos la medición podría resultar no tan buena.

De esta manera, el error de precisión se presenta cuando se llevan a cabo medidas sucesivas de una misma cantidad física que permanece invariable, dando diferentes valores numéricos.

Exactitud.-Es la característica de un instrumento de medición que permite obtener una lectura, de cierta cantidad física, lo mas cercana al valor real o patrón. El error de exactitud se presenta cuando el valor promedio de lecturas sucesivas de una misma cantidad o variable, se desvía de la lectura considerada como correcta y esa desviación se mantiene sin importar el número de lecturas sucesivas que se hagan.

4.1 Errores sistemáticos del Topex/Poseidón

Algunos errores de precisión del satélite Topex/Poseidón son los siguientes:

1) Altitud del Satélite

Primero, para medir la distancia de un blanco como la superficie del mar, desde una plataforma satelital, es esencial conocer la altura a la que está en órbita el satélite mismo. El satélite Topex/Poseidón viaja con una rapidez de 6 kilómetros por segundo, de manera que rastrear su posición, altura y curso es crítico para que el retorno de los ecos pueda ser medido con precisión. El resultado es que la posición del satélite Topex/Poseidon se estima con una precisión de +/- 3 cm.

2) Tamaño de la Huella

Un pulso de radar no es fino ni parecido a un lápiz, como es el láser, sino que abandona al radar en un haz que se va expandiendo cada vez más mientras viaja por el espacio. En sus 1336 kilómetros hasta la superficie del

mar, el haz del radar "ilumina" un círculo del océano de 3 a 5 km. de diámetro en promedio, dependiendo del estado del mar y de la altura de las olas. Los valores extremos se alcanzan con un mar en calma el cual permite una huella más estrecha (típicamente 2 km) que un mar "bravo" (típicamente 10km). Esto es el límite de resolución de radar. Los ecos son una mezcla de miles de pequeños ecos que provienen de la huella, algunos provenientes del fondo de las olas, otros de la parte superior de ellas.

Esto trae a colación el problema de que el reflejo de las ondas de un barco provoque un eco mucho más potente que las ondas reflejadas del mar mismo y tiene el potencial de distorsionar el patrón general de ecos de la huella, razón por la cual el Topex/Poseidón no procesa estos ecos

3) Estado del Mar

En pleno océano, un mar suave es raro. La norma es que las olas, sean grandes. Aún cuando no haya viento y la superficie del mar sea plana como un vidrio, siempre habrá una "hinchazón" o dilatación que hace que la superficie suba y baje suavemente. El problema del estado del mar es que, tanto la cresta como el fondo de las olas están regresando ecos al satélite. El sistema Topex/Poseidón tiene que resolver, de alguna manera, el bagaje de miles de ecos que vienen de dentro de la huella y convertirlo en un promedio que tenga algún sentido estadístico.

4) Errores Atmosféricos

La velocidad de la luz es una constante universal excepto cuando pasa a través de un medio más denso como la atmósfera. Hay dos errores con los que tiene que luchar el sistema Topex/Poseidón a saber: La ionosfera (una capa altamente ionizada de la atmósfera) y la húmeda troposfera (la que se encuentra desde la superficie hasta unos 15 km de altura). Ambas capas frenan ligeramente la velocidad de los pulsos y los ecos que tienen que ser corregidos. Topex/Poseidón usa un segundo radar de una diferente longitud de onda para determinar la ionización de la ionosfera, y emplea una unidad pasiva de sondeo de microondas para determinar la cantidad de vapor de agua en la troposfera

(que puede causar variación en la velocidad de los pulsos y los ecos). Estos dos instrumentos subsidiarios se usan para suministrar el factor de corrección que ajuste los datos de los ecos, para estos dos efectos atmosféricos.

5) Longitud de Onda de los Pulsos

Los pulsos del Topex/Poseidón son "microondas" que tienen una longitud de onda, pico a pico, de 2,3 cm y de 3 cm para los dos radares usados. Entonces +/- 3 cm es la máxima resolución teóricamente posible y no hay otras posibilidades.

6) Área de Cobertura Oceánica

Topex/Poseidón no puede medir el nivel del mar cuando existe tierra dentro de su huella porque no puede distinguir los ecos de la tierra de los ecos del agua y proporciona resultados falsos. Ello significa que todas las áreas marinas dentro de 3 a 5 km de las costas, islas y aún atolones, no son cubiertas. Tampoco está cubierta toda la región oceánica al norte de 72° N o al sur de 72° S, debido al ángulo de rastreo del satélite. Esto excluye al Océano Ártico y la parte de alta latitud del Atlántico Norte. También está excluida una pequeña área oceánica rodeando a la Antártica. En áreas con una gran densidad de islas tal como el archipiélago de Indonesia o las Indias Occidentales, ello da por resultado la exclusión de una substancial parte del océano.

4.2 Errores sistemáticos de los barcos

El ecosonda, al igual que todos los sistemas de sensores remotos sólo ofrece un cierto grado de confiabilidad

El sonido atraviesa el agua a una velocidad casi constante. Pero esta velocidad (aproximadamente 1440 m/s) varía con la temperatura, la salinidad y profundidad (la presión del agua), de ahí las correcciones que tendrán que realizarse para obtener los datos más confiables

Los instrumentos de sondeo acústico operan para cierta velocidad del sonido, que se llama "velocidad de calibración", y todos los sondeos están afectados por un error cuya magnitud es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad de calibración y la real de transmisión en el agua al hacer el sondeo.

Existen tablas que dan la corrección que hay que aplicar para los distintos valores de la temperatura, salinidad y profundidad.

Una de las principales fuentes de error es debida a las variaciones de marea y oleaje durante la realización de la batimetría. El error debido a la variación de la marea, se corrige mediante el registro de estas variaciones, después de realizar unas medidas periódicas a lo largo del día del trabajo.

En cuanto al error debido al oleaje, los equipos de ecosonda ya traen consigo programas que compensan el oleaje.

CAPITULO V

METODOLOGÍA

5.1 Análisis y manejo de bases de datos

La base de datos de batimetría del buque “Justo Sierra” de la *Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)* fue recabada en cinco cruceros oceanográficos realizadas por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de dicha universidad. Los datos están georreferenciados con el elipsoide de Clark 1866 y del datum NAD 27. En total fueron 818 puntos del crucero y se recabaron durante el periodo de 1990 al 2002, las coordenadas en las que realizaron las mediciones fueron de 18° a 24° latitud norte y de 89° 30` a 98° 10 longitud oeste. Estos datos fueron analizados uno a uno y los que no se ajustaban a la lógica de profundidad se eliminaron, todos los datos proyectaron en coordenadas geográficas.

Los datos proporcionados por el *Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)* en el año del 2000, originalmente tienen la proyección UTM y están georreferenciados con el elipsoide de Clark 1866 y datum NAD 27 sumando un total de 10,993 cuyas coordenadas son: de 18 a 20° latitud norte y de 91 a 94° longitud oeste. Estos datos que estaban originalmente en coordenadas métricas de UTM, fueron re proyectados a coordenadas geográficas para tener todos los datos en las mismas coordenadas.

Los datos de la *Secretaría de Marina* fueron adquiridos a través de la digitalización en tableta con el programa DIGI, realizados estos en el Instituto de Ciencias del Mar. Las cartas náuticas de la Secretaría de Marina digitalizadas fueron:

Secretaría de Marina 1997. *Carta Tampico a Punta del Morro. SM810*. Escala 1:250,000 en latitud 21° 41'N. Dirección General de Oceanografía Naval. Costa Este. México.

Secretaría de Marina 1997. *Carta La Pesca a Punta Jerez. SM 721.* Escala 1:100 000 en latitud 23° 20' N. Dirección de Hidrología de la Dirección General de Oceanografía. México.

Secretaría de Marina 2000. *Carta Bahía de Campeche. SM 840.* Escala 1:250 000 19° 20' en latitud N. Dirección General de Investigación y Desarrollo. Costa Este. México.

Secretaría de Marina 2000. *Carta Veracruz a Puerto de Alvarado. SM 822.* Escala 1:60 000 en latitud 19° 00' N. Dirección General Adjunta de Hidrografía y Cartografía. México.

Secretaría de Marina 2000. *Carta Tampico a Progreso. SM 800.* Escala.1:1,023,400 en latitud 21° 00' N. Dirección General de Investigación y Desarrollo. Costa Este. México..

Secretaría de Marina 2001. *Carta Punta Jerez a Tampico. SM 722.* Escala 1:100 000 en latitud 22° 32' N. Dirección General de Oceanografía Naval. Costa Este. México.

Todas estas cartas náuticas están georreferenciados por el elipsoide de Clark 1866 y datum NAD 27, con proyección normal de Mercator y comprenden los periodos de 1967 a 1977. De estas cartas náuticas digitalizadas se obtuvieron 16,823 datos puntuales de longitud, latitud y profundidad y las coordenadas geográficas extremas de estas cartas digitalizadas son latitud 18° a 24° norte y longitud de 89° 30`a 98° 10`oeste.

Cabe señalar que por comodidad al buque oceanográfico “Justo Sierra” de la UNAM, datos del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y los datos digitalizados de la Secretaria de marina se denominarán con la letra **B**.

Por último, de un total de 119,197 datos que se obtuvieron del Satélite Topex/Poseidón en el Golfo de México, solo se usaron 40,375 porque son los que se ajustan a las coordenadas geográficas de **B**.

El equipo de datos científicos (o STD por sus siglas en inglés), es responsable de producir y distribuir los archivos digitales que contienen información de la nave espacial, sus sensores y sus productos finales, después

de recibir los datos del sensor Topex/Poseidón, los miembros SDT los envían al Jet Propulsión Laboratory (JPL), donde se les aplica una serie de programas para corregir la velocidad de la señal, pues esta varía en toda la atmósfera, dependiendo de las capas que atraviese. (mismas que se han señalado en los errores atmosféricos) para organizar y refinar los datos; y es ahí donde se agregan archivos adicionales a los datos procesados para producir el registro de datos altimétricos y el registro de los datos Geofísicos Merged Geophysical Records (MGR). Estos archivos se envían al Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODACC,) que es lugar donde se concentra toda la información satelital y desde donde son distribuidos a la comunidad científica y finalmente los datos se pueden obtener de la página <http://topex.ucsd.edu>. Cabe señalar por simplicidad que de ahora en adelante se le llamará **T** a los datos del satélite Topex/Poseidon

Así, la georreferencia de **B**, que originalmente estaba en el datum NAD27 fue convertida al datum WGRS80, (utilizando el paquete *ENVI*) para hacerla coincidente con la georreferencia de **T**, los datos del topex/Poseidon.

Una vez que se modificaron en un mismo sistema de georreferencia (WGS80), se realizaron las comparaciones de los datos de **B** con los de **T** utilizando un programa creado en lenguaje de *Matlab* (ver anexo). Este programa realiza la comparación punto a punto los datos de **B** con los de **T**, tomando aquellos que entre si estuvieran más cerca de uno con respecto a otro, es decir, por cada punto del buque, el programa busco el mas cercano del satélite Topex/Poseidón. Obteniendo como resultado 24,377 datos puntuales próximos entre sí.

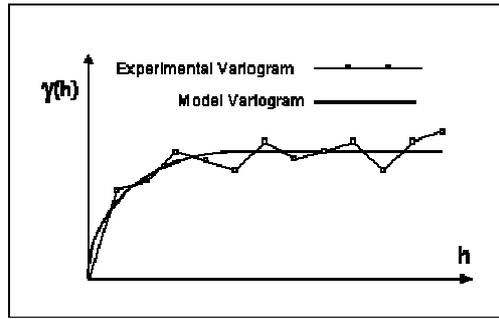
5.2 Interpolación

Después se realizaron las gráficas con el programa Surfer Versión 8. Estas gráficas fueron de profundidad, de intersección de puntos y la grafica de dispersión, entre otros de **B** con respecto a los de **T**

El programa *Surfer* interpola los datos y los representa con una malla regular de filas y columnas. La adopción de la cantidad de filas y columnas es realizada por el operador y el resultado obtenido dependerá de la elección del método, siendo la densidad de los puntos la condicionante del espaciamiento. El programa *Surfer* Versión 8 tiene diferentes métodos de interpolación (Inverso de la distancia, Kriging, Regresión polinomial, y curvatura mínima) cada uno de los cuales puede arrojar diferentes resultados. Para este trabajo se eligió el Kriging por ser uno de los más flexibles y eficaces para cualquier serie de datos. Kriging es una herramienta geostatística cada vez más empleada en la modelación de los yacimientos petroleros debido a que la disponibilidad de los programas comerciales de una manera u otra manera basados en esta técnica. Las propiedades que hacen noble a Kriging son: es un interpolador exacto, toma en cuenta la correlación espacial y produce un mapa de varianza de error.

Kriging es un método de interpolación que predice a través de un variograma. El variograma (o también llamado semivariograma) es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una variable sobre un área definida. Obteniendo como resultado la influencia de los datos a diferentes; es decir se basa en la suposición de que el parámetro que es interpolado puede tratarse como una variable regionalizada. Una variable regionalizada es intermedia entre una variable al azar y una variable totalmente determinista. La variable determinista varía de una manera continua a partir de una localización a otra y, por lo tanto, los puntos que están cerca de la continua tienen cierto grado de correlación espacial; sin embargo, los puntos más alejados son estadísticamente independientes. Kriging utiliza el variograma para expresar la variación espacial y reduce al mínimo el error de los valores predefinidos.

El primer paso del Kriging ordinario o puntual es construir un variograma del sistema del punto de la dispersión que se va a interpolar. Para ello, utiliza puntos ya conocidos llamados variograma experimental y a partir de estos calcula el variograma modelo. Este se encontrara trazando las variaciones, por lo que tendremos la gráfica 1.



Gráfica 1. Comparación entre un variograma experimental y uno modelado. Tomado de:
http://www.cee.vt.edu/program_areas/environmental/teach/smprimer/kriging/kriging.html&prev=/search%3Fq%3Dkriging%26hl%3Des%26lr%3D%26ie%3DUTF-8%26sa%3DG

Donde: h es la distancia y $\gamma(h)$ es la variación de cada punto con respecto a cada uno de los otros puntos.

Una vez calculado el variograma experimental el siguiente paso es definir la variable modelo, es decir, es encontrar una función matemática que modele la tendencia del variograma experimental, la cual puede ser por cualquier método de tendencia central como por ejemplo mínimos al cuadrado.

Como se puede ver en la gráfica 1, la forma del variograma indica que las distancias de separación entre el variograma modelo y el experimental es pequeña, es decir, que los puntos cercanos tienen valores similares entre si. Después de cierto nivel de la separación, la variación en los valores llega a ser un poco aleatorio y el variograma modelo aplana hacia fuera a un valor que corresponde a la variación media.

De lo anterior podemos deducir que la ecuación:

$$Y_{E,P} = \sum_{i=1}^n w_i y$$

Donde:

n es el número o cantidad de la dispersión en el sistema
 y son los valores de los puntos de la dispersión

w son los pesos asignados a cada punto de la dispersión

Permite calcular una serie de puntos desconocidos en un punto P ($Y_{E,P}$) y se aplica como un promedio calculado de los puntos conocidos para después interpolar.

El cálculo del error de valoración en el punto ($Y_{E,P}, Y_{A,P}$) está como:

$$\varepsilon_P = (Y_{E,P} - Y_{A,P})$$

Donde ε_P es el error de la valoración.

En las medidas de distancias de dispersión (que tan alejados están los valores) con respecto a un valor central, se consideran la totalidad de las observaciones. De esta manera, el cálculo de la dispersión está dada por:

$$S_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{E,P} - Y_{A,P})_i^2}{n}$$

Donde: ($Y_{A,P}$) Es la variable de cada punto

($Y_{E,P}$) Es la medida de tendencia central

n Es el número total de observaciones.

Es llamado también varianza. (Que es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones de cada uno de los valores respecto a la media) o bien, como su raíz cuadrada, conocida como el error o desviación estándar

$$S_r = \sqrt{S_r^2}$$

La estimación y el error de la valoración dependen de los pesos elegidos. Kriging intenta elegir los pesos óptimos que producen el error mínimo de la valoración. Los pesos óptimos que producen estimaciones imparciales y una variación mínima de la valoración se obtienen resolviendo un sistema de ecuaciones simultáneas.

5.3 Cálculos estadísticos

Media

La media aritmética o promedio, de una cantidad finita de números, es igual a la suma de todos ellos dividida entre el número de sumandos. Expresada de forma más intuitiva, podemos decir que la media (aritmética) es la cantidad total de la variable distribuida a partes iguales entre cada observación.

Así, dados los números a_1, a_2, \dots, a_n , la media aritmética será igual a:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

Desviación estándar

La desviación estándar (o desviación típica) es una medida del grado de dispersión de los datos del valor promedio. Es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

Expresión de la desviación estándar muestral, esta dada por:

$$\sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Coefficiente de correlación lineal

La correlación es una técnica estadística para determinar la relación entre dos o más variables, para nuestro caso es de dos. La profundidad de **B** a la hemos considerado la variable independiente y la profundidad de **T** considerada en este caso como variable dependiente.

De esta manera, el coeficiente de correlación es el valor cuantitativo de la relación entre dos variables ya señaladas, es decir, la cuantificación de la dependencia cercana entre sí de estas dos variables

Coefficiente de determinación

Una vez ajustada la recta de regresión es importante disponer de una medida que mida la bondad del ajuste realizado y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente o se deben buscar modelos alternativos. Como medida de bondad del ajuste se utiliza el coeficiente de determinación y esta dada por: **r^2**

El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación, y siempre toma valores de 0 a 1. Como el valor es cercano a 1, el ajuste lineal es bueno.

Ecuación de Regresión

Lo que en verdad tenemos en las comparaciones de profundidades de **B** y **T** es una relación de variables y no una función, dado que para cada valor de la variable independiente, que en este caso es la de B, tenemos dos o mas valores para T., luego entonces se tiene que recurrir a la regresión para obtener una nueva relación pero que ahora nos forme una función, en el cual la variable independiente **B** se asocie con un indicador de tendencia central de la variable dependiente y que tenga una función $Y=MX+b$

Donde b es la ordenada al origen o el valor donde la línea de regresión se intercepta con el eje Y.

M es la pendiente de la recta.

La estimación de la ecuación de regresión la realizaremos con la estimación de mínimos cuadrados.

CAPITULO VI

Resultados

6.1 Análisis Gráficos

En esta sección las Figura 7 y 8 muestran los puntos de la batimetría de **B** y las mallas de **T** ambas en WGS80.

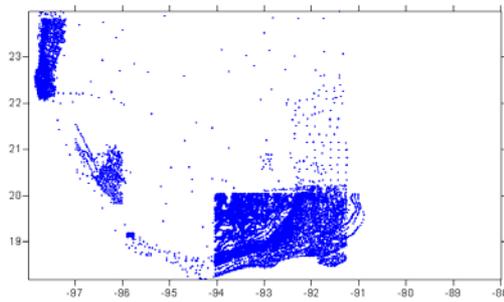


Figura 7 puntos de **B** en WGS80

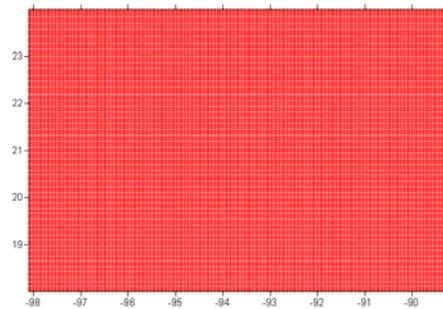


Figura 8. Mallas de **T** en WGS80

En la gráfica para **B** se observan principalmente dos zonas con una alta densidad de puntos concentrándose estas en las zonas de interés económico a causa del petróleo es decir, la sonda de Campeche y la parte del este de Tamaulipas. En la correspondiente a **T** se observa que el barrido está regularmente espaciado formando una malla constante

En la figura 9 se observan los puntos coincidentes entre **B** y **T**

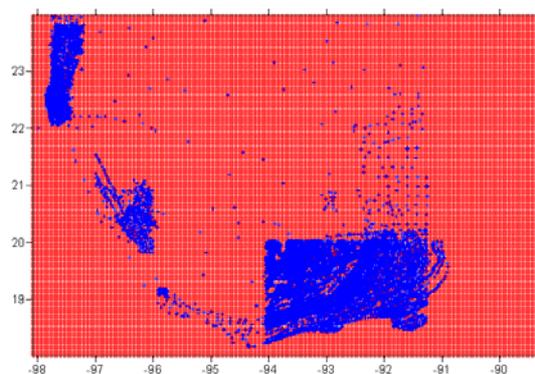


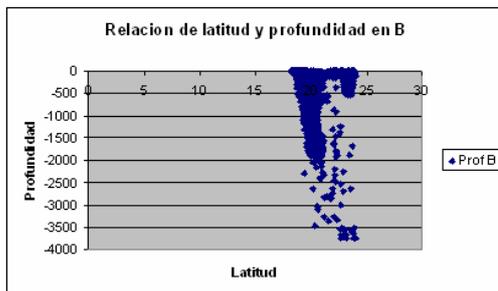
Figura 9. Puntos de coincidencias entre de **B** y **T**

En la figura anterior, se observa que tienen coincidencias en casi todos los puntos, esto sucede porque el **T** realiza un barrido homogéneo y por lo tanto la malla que forma de puntos necesariamente en alguno de ellos coincide o se acerca mucho a los puntos que tiene **B**.

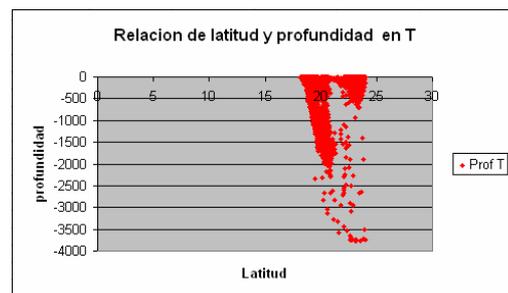
A partir de las comparaciones de los datos batimétricos de **B** y **T** y utilizando el programa elaborado en Matlab se obtuvieron las siguientes histogramas de profundidad, estos análisis nos muestran la relación que existe entre las profundidades de **B** y **T**

6.2 Histogramas de profundidad

a) *Relación de profundidad --latitud para **B** y **T***, se muestran en las gráficas 2 y 3



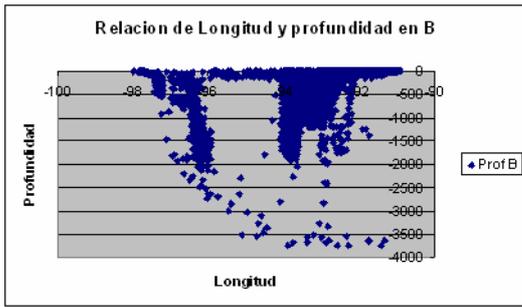
Gráfica 2



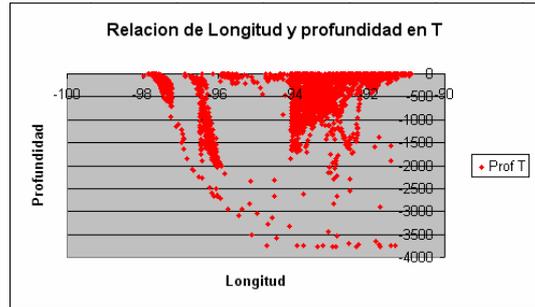
Gráfica 3

Como se observa en los histogramas la distribución de profundidades en **B** y **T** son similares, visualmente no es perceptible diferencia alguna.

b) *Relación de profundidad y longitud para **B** y **T*** se muestran las gráficas 4 y 5



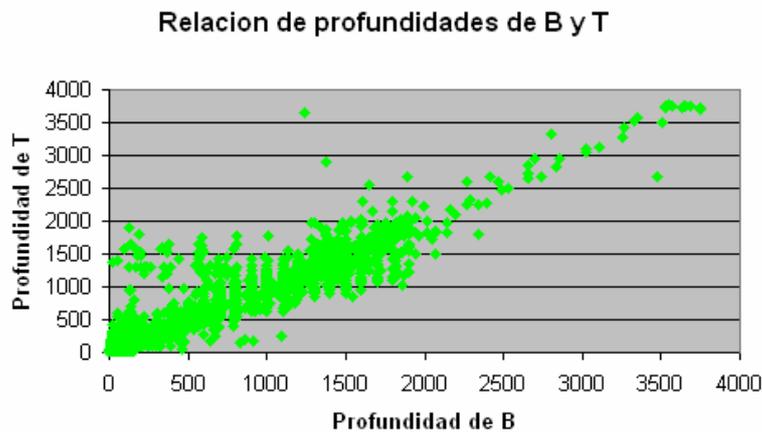
Gráfica 4



Gráfica 5

Al igual que en el caso anterior, no es perceptible gráficamente la variación de **B** y **T**, pues dicha relación es muy parecida.

c) *Relación de profundidades entre **B** y **T*** se muestran en las gráficas 6



Gráfica 6. Relación de profundidades entre **B** y **T**

En esta gráfica aparece únicamente la relación de **B** y **T** y observamos comportamiento homogéneo, donde bien se puede trazar una línea recta que pase por el origen, ello servirá como base para el análisis estadístico que más adelante se describirá.

d) En la figura 10 (a). (b) tenemos *la relación de coordenadas geográficas y profundidad de **B** y **T*** y en la figura (c) tenemos las *coincidencias de las anteriores*.

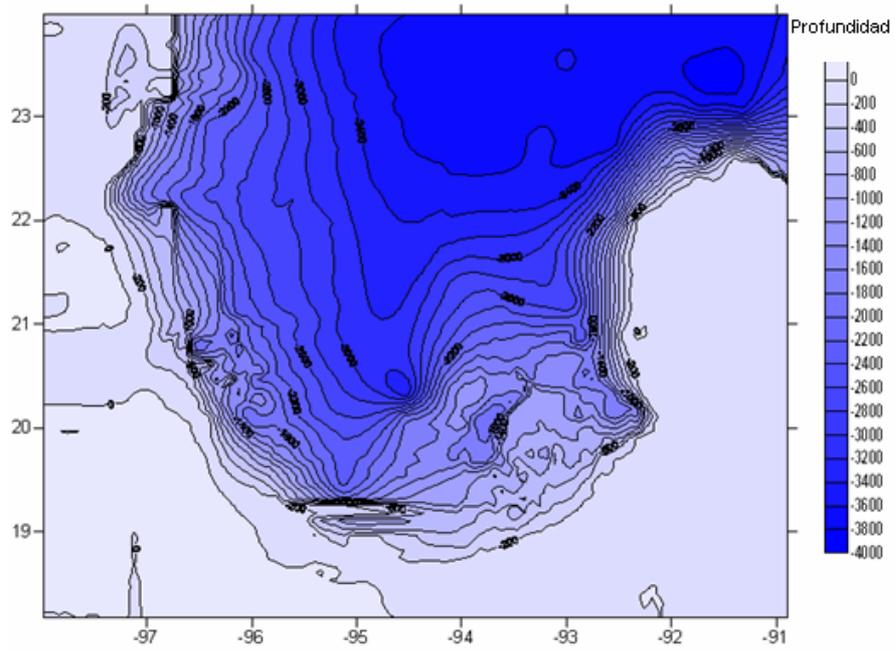


Figura 10(a) Relación de coordenadas geográficas y profundidad de **B**

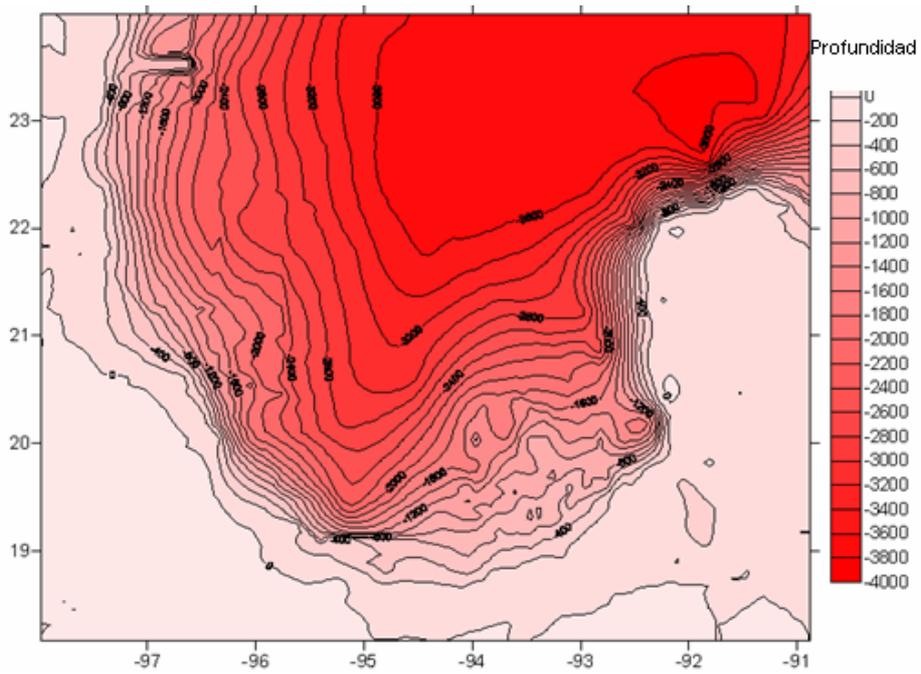


Figura 10(b) relación de coordenadas geográficas y profundidad de **T**

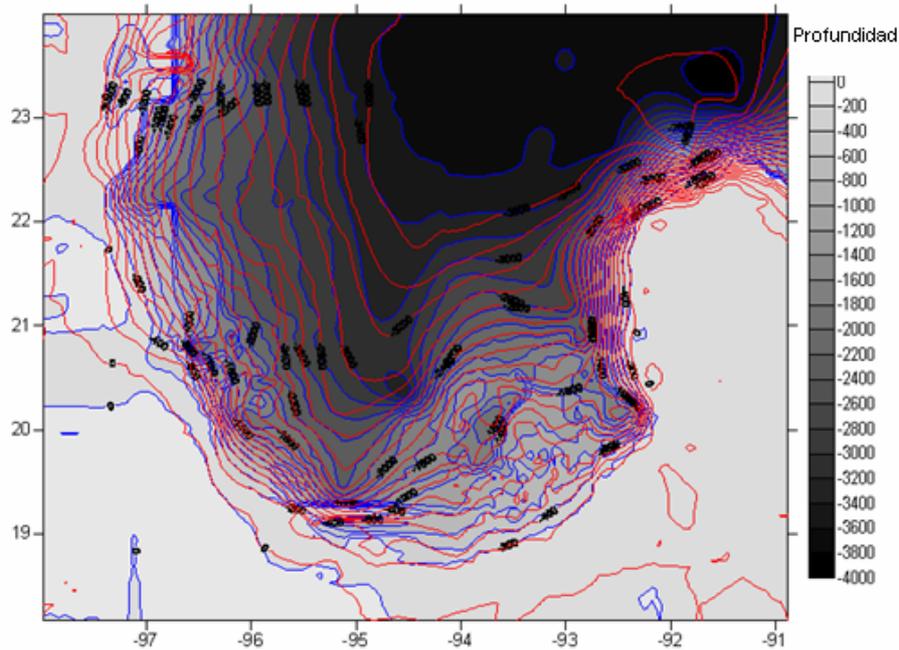


Figura10 (c) coincidencias de latitud, longitud y profundidad de las isolíneas de **B** y **T**

Los rangos de profundidad pudieron ser cualesquiera, lo importante en este caso es mostrar las similitudes entre las isolíneas de **B** y **T** por lo tanto se optó por isolíneas fueran las mas representativas de las diferentes profundidades que en este caso fueron las de 10, 20 y 100 mismas que se ilustran en las figuras anteriores.

De esta manera se pueden visualizar las coincidencias entre los puntos de **B** y **T** en cuanto a sus coordenadas geográficas por lo tanto gráficamente podríamos decir que tanto los datos de **B** como de **T** son visualmente iguales, esto lo comprobamos cuando vemos mas adelante la estadística de esta información.

6.3 Análisis de profundidades

Los valores arbitrarios que se tomaron como mínimos en cuanto a profundidad pertenecen solo a una parte de la zona costera y para este caso, se obtuvo para **B** 0.9 metros, mientras que para **T**, la profundidad mínima fue de 1 metro, con una diferencia en valor absoluto de 0.1 metros y respecto a las coordenadas geográficas estas fueron similares en ambos casos. La tabla 1 ilustra los valores mínimos.

Lat B	Long B	Prof B	Lat T	Long T	Prof T	Prof abs
18.616	-91.776	1.3	18.614	-91.783	2	0.7
18.69	-92.019	1.3	18.708	-92.017	1	0.3
18.692	-92.021	1.3	18.708	-92.017	1	0.3
18.693	-91.989	1.3	18.708	-91.983	1	0.3
18.694	-91.524	1.3	18.708	-91.517	1	0.3
18.695	-91.962	0.9	18.708	-91.95	1	0.1
18.762	-91.488	1.3	18.772	-91.483	1	0.3
18.805	-91.452	1.3	18.803	-91.45	1	0.3

Tabla 1. Valores mínimos de profundidad de **B** y **T**

Para otros valores arbitrarios de mínima profundidad un poco mas alejadas de las costas se muestra la siguiente tabla

Lat B	Long B	Prof B	Lat T	Long T	Prof T	Prof abs
18.183	-94.346	-5.49	18.171	-94.35	-1	4.49
18.183	-94.337	-5.49	18.171	-94.35	-1	4.49
18.185	-94.252	-5.49	18.171	-94.25	-1	4.49
18.185	-94.243	-5.49	18.171	-94.25	-1	4.49
18.191	-94.358	-5.49	18.203	-94.35	-14	8.51
18.194	-94.252	-5.49	18.203	-94.25	-1	4.49
18.216	-94.366	-21.96	18.203	-94.35	-14	7.96
18.224	-94.366	-21.96	18.234	-94.35	-10	11.96
18.242	-94.077	-5.49	18.234	-94.083	-1	4.49
18.247	-94.62	-9.15	18.234	-94.617	-1	8.15
18.256	-94.007	-7.32	18.266	-94.017	-1	6.32
18.257	-94.01	-10	18.266	-94.017	-1	9
18.259	-94.037	-15	18.266	-94.05	-8	7
18.267	-94.012	-15	18.266	-94.017	-1	14
18.269	-93.97	-10	18.266	-93.983	-1	9
18.272	-94.034	-20	18.266	-94.05	-8	12
18.275	-93.986	-15	18.266	-93.983	-1	14
18.279	-93.942	-10	18.266	-93.95	-1	9
18.284	-93.962	-15	18.297	-93.95	-6	9
18.286	-93.985	-20	18.297	-93.983	-10	10

Tabla 1. Valores mínimos cercanos a la costa de **B** y **T**

En este caso, podemos apreciar que el valor máximo de diferencia de profundidades de **B** y **T** es de 11.96 metros, asimismo las coordenadas geográficas en la que se tomaron los datos batimétricos son semejantes.

De la misma manera en la siguiente tabla ilustra una muestra de los valores de la profundidad media (también arbitraria) para **B** y **T**

Lat B	Long B	Prof B	Lat T	Long T	Prof T	Prof abs
19.041	-95.786	-38	19.055	-95.783	-26	12
19.085	-95.886	-34	19.087	-95.883	-3	31
19.085	-95.885	-34	19.087	-95.883	-3	31
19.115	-95.901	-41	19.118	-95.917	-3	38
19.115	-95.901	-41	19.118	-95.917	-3	38
19.121	-95.839	-33	19.118	-95.85	-31	2
19.121	-95.838	-33	19.118	-95.85	-31	2
19.122	-95.811	-36	19.118	-95.817	-39	3
19.122	-95.81	-36	19.118	-95.817	-39	3
19.141	-95.848	-39	19.15	-95.85	-41	2
19.146	-95.831	-34	19.15	-95.817	-3	31
19.146	-95.823	-12	19.15	-95.817	-3	9
19.146	-95.778	-12	19.15	-95.783	-3	9
19.146	-95.772	-38	19.15	-95.783	-3	35
19.171	-95.842	-22	19.181	-95.85	-3	19
19.171	-95.827	-51	19.181	-95.817	-3	48
19.172	-95.866	-33	19.181	-95.85	-3	30
19.172	-95.766	-53	19.181	-95.75	-3	50
19.174	-95.867	-33	19.181	-95.883	-3	30
19.174	-95.865	-33	19.181	-95.85	-3	30
19.174	-95.839	-38	19.181	-95.85	-3	35
19.174	-95.839	-38	19.181	-95.85	-3	35
19.174	-95.839	-38	19.181	-95.85	-3	35
19.176	-95.878	-44	19.181	-95.883	-3	41
19.176	-95.804	-52	19.181	-95.817	-3	49

Tabla 2. Valores de profundidad media para **B** y **T**

Para este caso la variación de las profundidades va de 2 a 49 metros y la variación en las coordenadas solo es de 1 centésima en latitud y de 2 centésimas en longitud.

Un caso particular es la zona de depresión de Campeche (conocido como el *cañón de Campeche*, por su estructura geomorfológica), para lo cual tenemos la siguiente tabla de profundidades

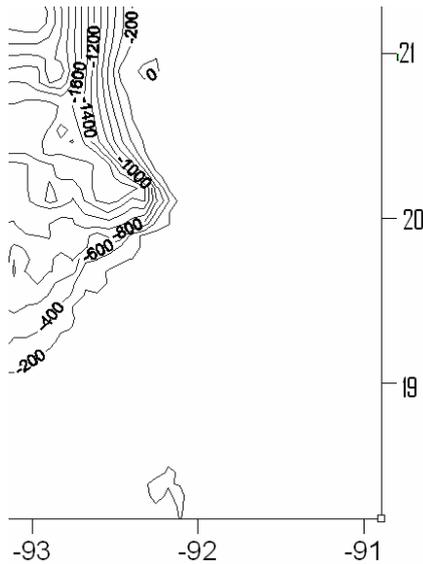


Figura 11. Zona de depresión de Campeche

Lat B	Long B	Prof B	Lat T	Long T	Prof T	Prof abs
20.001	-92.232	-600	20.029	-92.217	-286	314
20.001	-91.519	-34	20.029	-91.517	-4	30
20.001	-91.416	-33	20.029	-91.417	-4	29
20.002	-92.167	-145	20.029	-92.183	-168	23
20.002	-92.155	-120	20.029	-92.15	-137	17
20.002	-92.144	-105	20.029	-92.15	-137	32
20.003	-92.933	-1200	20.029	-92.917	-1223	23
20.003	-92.336	-1000	20.029	-92.35	-1108	108
20.003	-92.212	-400	20.029	-92.217	-286	114
20.003	-92.156	-125	20.029	-92.15	-137	12
20.003	-92.152	-120	20.029	-92.15	-137	17
20.003	-91.994	-65	20.029	-91.983	-122	57
20.003	-91.885	-47	20.029	-91.883	-4	43
20.004	-92.965	-1100	20.029	-92.95	-1065	35
20.004	-92.604	-1196.8	20.029	-92.617	-1500	303.18
20.004	-92.502	-1200	20.029	-92.517	-1377	177
20.004	-92.272	-800	20.029	-92.283	-724	76
20.004	-92.051	-80	20.029	-92.05	-118	38
20.004	-92.016	-70	20.029	-92.017	-110	40
20.004	-91.583	-38	20.029	-91.583	-4	34
20.004	-91.416	-33	20.029	-91.417	-4	29

Tabla III. Valores para la zona de depresión de Campeche de **B** y **T**

Como se observa en la tabla, para esta zona si tenemos una diferencia más sustancial que abarca el rango de 12 a 314 metros de diferencia de profundidad, esto debido a que tenemos una gran depresión.

Debido a que el gradiente es muy fuerte en esta región los datos del satélite y la de los buques la profundidad es muy variable, pero en cuanto a las

coordenadas geográficas la variación es en centésimas.

Del mismo modo, la profundidad máxima para **B** fue de 3,751.5 metros y para **T** de 3,737 metros, teniendo una diferencia en valor absoluto de 18.5 metros. La tabla V ilustra los valores máximos obtenidos su coincidencia geográfica.

Lat B	Long B	Prof B	Lat T	Long T	Prof T	prof abs
22.721	-92.561	3751.5	22.729	-92.55	3703	48.5
23.152	-93.904	3751.5	23.159	-93.917	3736	15.5
23.827	-92.287	3751.5	23.831	-92.283	3710	41.5
23.976	-91.417	3751.5	23.984	-91.417	3733	18.5

Tabla V de valores máximos de profundidad de **B** y **T**

En resumen, en la figura 12 (a), (b) y (c) se muestran los mapas de diferencias de profundidades entre **T** y **B**

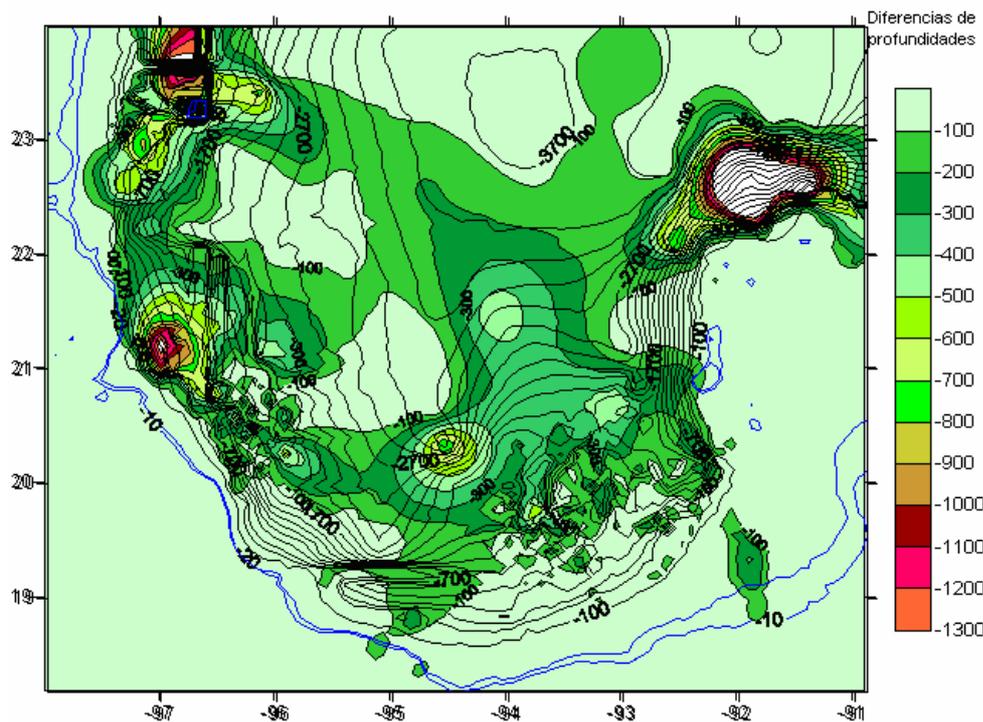


Figura 12(a) Mapa de diferencia de profundidades entre **B** y **T**

(Las isobatas solo son referencias de las profundidades y nos sirven para ver a que profundidad existen esas diferencias)

En este mapa de diferencia de profundidad se observa que dichas diferencias van desde un valor mínimo de 0 a un valor máximo de 1300 metros

con intervalos de isolíneas de 100 metros. El espacio en blanco nos indica que no tenemos valores de diferencia en dicha zona y la línea de costa la tenemos en color azul.

En este mapa se observa que los valores máximos de diferencia de profundidades están entre los valores de 1000 y 1300 metros de profundidad y los tenemos cerca de las costas y en proporción comparados con los demás datos es muy pequeño y están básicamente cercanas a las líneas de costa.

Los valores intermedios que van de 500 a 1000 metros resultan bastante pequeños comparados estos con todos los demás valores y también están cercanas a las costas.

Finalmente los valores que están en el rango de 100 a 400 metros son los que predominan en todo el mapa, de ahí la alta confiabilidad del satélite en su forma más general.

De lo anterior podemos deducir que el satélite tiene una mejor resolución para datos batimétricos de profundidades medias y profundas que en profundidades someras y escarpadas, ello se debe a que la señal tiene reflejos más intensos en dichas zonas.

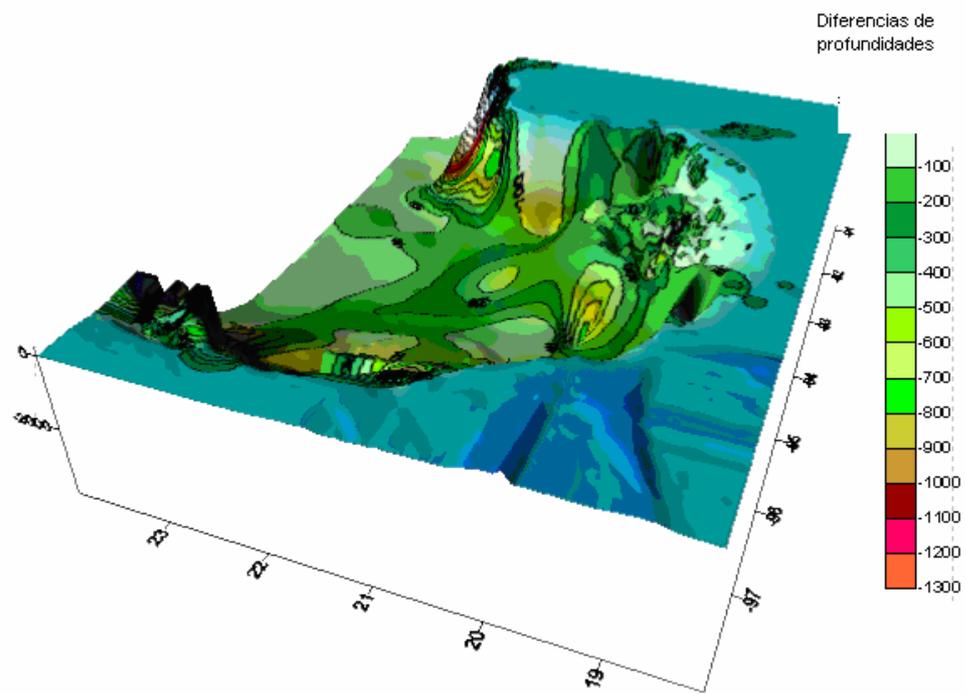


Figura 12(b) Mapa tridimensional de diferencia de profundidades entre **B** y **T**

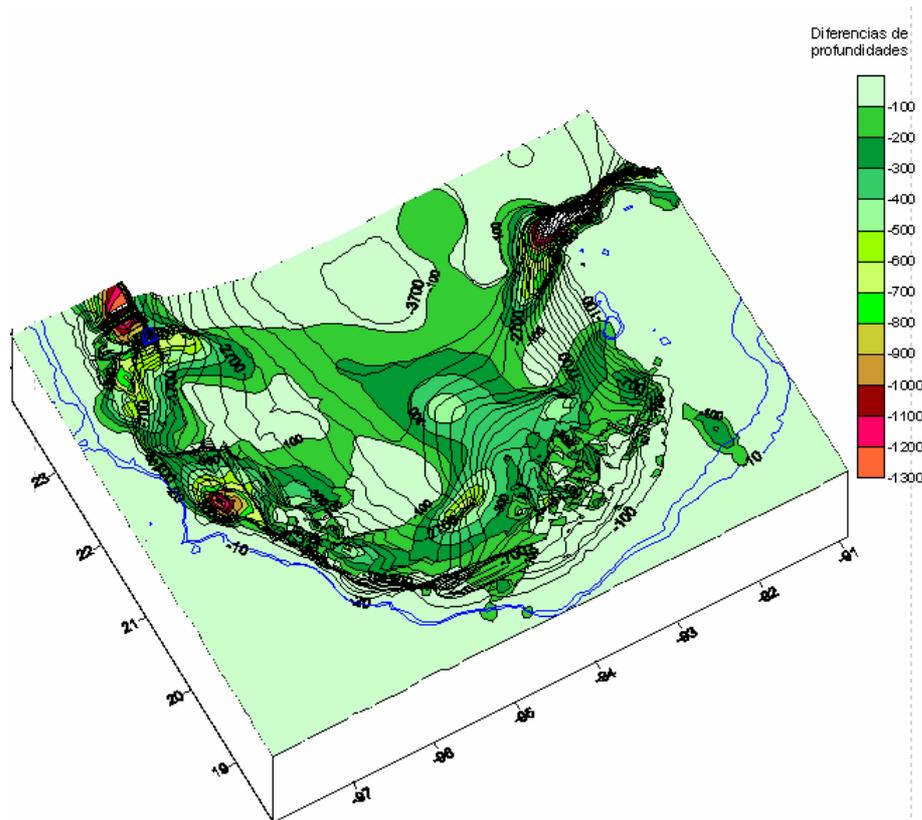


Figura 12(c) Mapa tridimensional de diferencia de profundidades **B** y **T**

En estos mapas tridimensionales tenemos sobrepuestos en mapa de la figura 12(a) en el relieve y observamos lo que ya se ha señalado, que los valores máximos (en la zona de color rojo) se encuentran cerca de las costas y los valores menores los encontramos en profundidades medias.

De igual manera, puesto que estos mapas tridimensionales son las mismas que las anteriores 12 (b) y 12 (c), solo que ahora visto de manera oblicuo y se observan mejor los detalles.

6.4 Estadística

La tabla VI muestran las estadísticas obtenidas de las comparaciones batimétricas de **B** y **T**

	Profundidad de B	Profundidad de T
No de datos	24,373	24,373
Valor Máximo	3751.5	3763

Valor Mínimo	0.9	1
media	312.242	342.93
Desviación estándar	483.189	480.73

Tabla VI. Datos estadísticos de profundidades de **B** y **T**

Como se observa, la media en cuanto a profundidad de **B** y **T** son similares, pues solo varían en 31.31 metros en promedio general; por lo tanto, podemos señalar que son confiables ambos datos de profundidad

En cuanto a la desviación estándar (también llamada desviación típica) también es semejante, pues para **B** es de 483.677 y **T** para 480.73

Coefficiente de correlación lineal

La correlación lineal r entre la profundidad de **B** (variable independiente) y la profundidad de **T** (variable dependiente) está dada por:

$$r=0.95022703$$

Como el valor r está próximo a 1 entonces la dependencia lineal entre las dos variables es alta.

Coefficiente de determinación

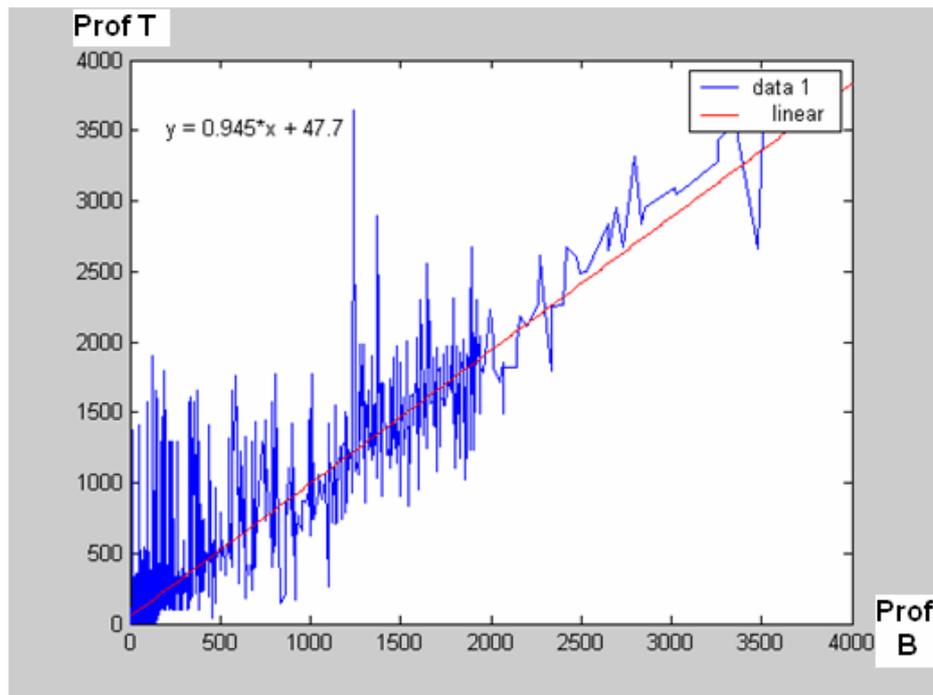
Es el porcentaje de la variación total en Y (que en este caso es **T**) se debe a la variación en X (para nuestro caso es **B**); en otras palabras, es la proporción de la variación total en **T** que puede ser “explicada” por la variación en **B**. Esta proporción se mide en porcentajes.

Así el coeficiente de determinación se define como el cuadrado del coeficiente de correlación la cual es igual a:

$$r^2 = 0.9029314085426209 \text{ o bien: } 90.30\%$$

Ecuación de Regresión

La ecuación de regresión se calculó mediante el ajuste de mínimos cuadrados, la cual podemos visualizar en la gráfica 7



Gráfica 7. Estimación de mínimos cuadrados de profundidades entre **B** y **T**

De esta manera, la ecuación de regresión queda expresada mediante la relación

$$Y = 0.94507805X + 47.7$$

Donde la variable **Y** representa a **T**

y la variable **X** a **B**

Así, la pendiente **M** (0.94) indica que en promedio, por cada 0.945 metros de incremento de la profundidad de **T**, hay un incremento proporcionalmente en **B**.

Para ejemplificar la bondad de la ecuación, tenemos el siguiente tres problemas con valores de profundidad somera, media y profundidad.

¿Cuánto se espera en promedio que sea la profundidad de **T** si para una profundidad de **B** se tiene de: 20, 1200 y 3751.5 metros?

Solución:

Para 20 metros

$$T=0.94507805 (20)+ 47.7$$

$$T = \mathbf{66.601561}$$

En la tabla, aparece un valor de 8 metros, luego entonces la diferencia es de **58.601561**, donde se puede apreciar que son distantes los valores de la tabla y el obtenido de la ecuación.

Para 1200 metros

$$T=0.94507805 (1200)+ 47.7$$

$$T=\mathbf{1181.79366}$$

En la tabla, aparece como un valor de 1377 para T pero como se puede apreciar el valor es más cercano para esta profundidad pues la diferencia es de: **195.21** metros.

Para la profundidad de 3751.5 metros, se tiene:

$$T=0.94507805 (3751.5)+ 47.7$$

$$T= \mathbf{3593.160304575}$$

Y según los datos obtenidos que se muestra en la tabla anterior es de **3763**, donde se observa una diferencia de **169.84**, ello se debe a que el modelo matemático es solo una aproximación del valor real, pero como observa, también es muy cercano.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES

Primero, confiando en la precisión de los aparatos que han recabado los datos batimétricos tanto del satélite Topex/Poseidón (**T**) como la del grupo del buque oceanográfico “Justo Sierra” de la UNAM, datos del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y los datos digitalizados de la Secretaria de marina (**B**), tenemos entonces una alta confiabilidad en la toma de los datos batimétricos y por tanto ambos datos batimétricos en su generalidad son muy semejantes.

De esta forma se puede señalar que los datos batimétricos que el **T** recaba en forma indirecta son confiables, puesto que la diferencia con respecto a los datos batimétricos de **B** es mínima y ello se refleja en los resultados obtenidos anteriormente.

Sin embargo, existen zonas donde la diferencia batimétrica entre **B** y **T** son notorias. En **B** tenemos datos más exactos de batimetría en zonas cercanas a las costas, en cambio sucede lo contrario con el satélite cuyos errores son grandes en las costas, lo anterior se debe probablemente a que las ondas reflejadas de **T** llegan con mucha intensidad al receptor satelital.

Asimismo, en zonas de grandes depresiones como la de Campeche, la batimetría entre **B** y **T** son muy distantes y en este sentido son más confiables las de **B**, aunque cabe señalar que las coordenadas geográficas son muy semejantes. Por ejemplo en la depresión de Campeche (cañón de Campeche) la diferencia batimétrica de la profundidad está entre 12 y 314 metros y las coordenadas solo varían en décimas.

En las zonas profundas donde no existen escarpes, cañones o cualquier tipo de depresión, tenemos que los datos son muy similares entre **B** y **T**, de la misma forma esto se observa en zonas planas y no muy. En conclusión

exceptuando los datos batimétricos que **T** realiza en zonas someras cercanas a las costas y en las depresiones, la confiabilidad de **T** es de buena calidad.

Lo anterior se observa en el mapa de diferencia de profundidad en donde se tienen diferencias que van desde un valor mínimo de 0 a un valor máximo de 1300 metros y se señala que el predominio de las mayores diferencias de profundidades entre **B** y **T** están casi junto a la línea de costa con valores que varían entre 1000 y 1300 metros. Todo lo anterior también se verifica con gráficas y estadística.

Estadísticamente se confirma con la desviación estándar en la cual los datos son semejantes; para **B** se tiene que es de 483.677 y **T** para 480.73; en el Coeficiente de correlación lineal el valor r tiende a la unidad, luego entonces la dependencia lineal entre las dos variables (**B** y **T**) es muy fuerte, en cuanto al coeficiente de determinación el porcentaje de 90.30% ello permite señalar que el ajuste lineal también es fuerte y por último la ecuación de regresión indica que por cada 0.945 metros de incremento de la profundidad de **T**, se incrementa proporcionalmente **B** y este valor es cercano a la unidad.

La ventaja del satélite **T** sobre **B** es que realiza los cálculos en un periodo de 10 días cubriendo casi todo el globo terrestre, en cambio los barcos realizarían los sondeos por varios meses y años en cubrir el globo terrestre. (Tomado de www.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop)

Por otra parte se tiene que la ventaja de **B** sobre **T** es que las mediciones las realizan sobre la superficie del mar, entonces los sondeos son más exactos, además de que se tiene un mayor control de la calibración de los instrumentos de medición lo que lo hace más preciso que la del satélite en su generalidad.

Esta comparación de datos batimétricos entre los buques que navegan en el Golfo de México (**B**) y el satélite Topex/Poseidón (**T**) fue realizada con el propósito de tener un mejor conocimiento de la batimetría de nuestros mares y de esta manera poder realizar mejores investigaciones de carácter científico

como los que lleva a cabo la UNAM, y otras dependencias; asimismo se espera que sirvan de apoyo para otras actividades diferentes a la investigación científica.

BIBLIOGRAFIA

Carranza-Edwards, A. and L. Rosales-Hoz, 1995. Grain-size trends and provenance of southwestern Gulf of Mexico beach sands. Can. J. Earth

Carranza-Edwards, A., G. Bocanegra-García, L. Rosales-Hoz and L. De Pablo Galán, (1996). Beach sands from Baja California Peninsula, Mexico. Sedimentary Geology.

Carranza-Edwards, A., 2001. Grain size and sorting in modern beach sands. Journal of Coastal Research.

<http://topex.ucsd.edu> Datos del satélite Topex /Poseidón

http://64.233.179.104/translate_c?hl=es&u=http://www.heavens-above.com/orbitdisplay.asp%3Flat%3D34.148%26lng%3D-118.144%26alt%3D0%26loc%3DPasadena%26TZ%3DPST%26satid%3D22076&prev=/search%3Fq%3D%2Bjason%2B1%26hl%3Des%26rls%3DGGLJ,GGLJ:2006-31,GGLJ:es%26sa%3DG pagina relacionada con datos de la orbita del Topex/Poseidón

<http://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&u=http://sealevel.jpl.nasa.gov/mision/jason-.html&sa=X&oi=translate&resnum=1&ct=result&prev=/search%3Fq%3D%2Bjason%2B1%26hl%3Des%26rls%3DGGLJ,GGLJ:2006-31,GGLJ:es%26sa%3DG>. Pagina sobre Historia del Topex/Poseidón

(http://www.jason.oceanobs.com/html/missions/welcome_es.html) página sobre la historia del Topex/Poseidon.

<http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap10-altimetria.PDF>

Página sobre la historia del Topex/Poseidon.

http://64.233.179.104/translate_c?hl=es&u=http://www.eeb.ucla.edu/test/faculty/nezlin/Altimetry.htm%23Section1&prev=/search%3Fq%3Dmicrodeg%2Bnasa%26hl%3Des%26hs%3DT9F%26lr%3D%26client%3Dfirefox%26rls%3Dorg.mozilla:en-US:unofficial%26sa%3DG pagina relacionada con datos del Topex/ Poseidón

http://www.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/radar_in.htm) Relacionada con datos de Microondas

http://www.aviso.cls.fr./html/alti/fiche/futur_es.html sobre Topex/Poseidon

<http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/atlas/hipsybat.jpg>.- pagina del Instituto de Geografía

www.dpi.inpe.br/spring/usuario_spa/radar_in.htm pagina de radar y microondas

<http://www.inegi.gob.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/contenidos/articulos/geografica/geoide03.pdf>. Página sobre el Tratado sobre geoide y elipsoide

http://wave.prohosting.com/geodatos/html/cap_07-5.htm. Sobre ecosondas

<http://www.canal37.net/Html/gps.html>. Página web de sistema de posicionamiento global (GPS).

<http://www.cee.vt.edu/program.areas/environmental/teach/smprimer/kriging/kriging.html&prev=/search%3Fq%3Dkriging%26hl%3Des%26lr%3D%26ie%3DUTF-8%26sa%3DG>. Comparación entre un variograma experimental y uno modelado de kriging

[http://www.documentos/resumen de 20 batimetria.htm](http://www.documentos/resumen_de_20_batimetria.htm) Página sobre Boulder-international Bathymetric Chart of the Caribbean Sea and Gulf of Mexico.

<http://www.inegi.gob.mx/territorio/español/proyserv/oceanografia/oceano23.html>
página web de las delimitaciones del territorio Nacional editadas por INEGI.

<http://webs.sinectis.com.ar/meagliani/ecosonda.htm>. Página web sobre ecosonda.

<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/predicted/explore.HTML>.- exploración batimétrica

<http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/curso/cap01-historia.PDF>.Página web de percepción remota del océano

www.igpp.ucsd.edu/bathymetry_workshop.- pagina sobre batimetría mundial

Instituto Mexicano del Petróleo. IMP. Base de datos de batimétricos proporcionados.

Instituto de Geografía. UNAM. 1993. Atlas Nacional de México escala 1:4,000,000.

Gille S.T., 1994: Mean sea surface height of the Antarctic Circumpolar Current from Geosat data: Method and application. J. Geophys; journal of geophysical research, vol. 99, no. c9, pages 18,255–18,274, 1994

[Global Seafloor Topography from Satellite Altimetry](#), Walter H.F. Smith and David T. Sandwell, 1997, Science Magazine, vol. 277, issue 5334 , San Francisco, CA.

Secretaría de Marina 1997. *Carta Tampico a Punta del Morro. SM810*. Escala 1:250,000 en latitud 21° 41'N. Dirección General de Oceanografía Naval. Costa Este. México.

Secretaría de Marina 1997. *Carta La Pesca a Punta Jerez. SM 721.* Escala 1:100 000 en latitud 23° 20' N. Dirección de Hidrología de la Dirección General de Oceanografía. México.

Secretaría de Marina 2000. *Carta Bahía de Campeche. SM 840.* Escala 1:250 000 19° 20' en latitud N. Dirección General de Investigación y Desarrollo. Costa Este. México.

Secretaría de Marina 2000. *Veracruz a Puerto de Alvarado. SM 822.* Escala 1:60 000 en latitud 19° 00' N. Dirección General Adjunta de Hidrografía y Cartografía. México.

Secretaría de Marina 2000. *Carta Tampico a Progreso. SM 800.* Escala.1:1,023,400 en latitud 21° 00' N. Dirección General de Investigación y Desarrollo. Costa Este. México.

Secretaría de Marina 2001. *Carta Punta Jerez a Tampico. SM 722.* Escala 1:100 000 en latitud 22° 32' N. Dirección General de Oceanografía Naval. Costa Este. México.

Tapia, L. J 2003. *Mapa Batimétrico Digital de la porción meridional del Golfo de México.* Tesis de Licenciatura en Geografía. Facultad de Filosofía y letras. UNAM. México

Velasco H., 1994. *Modelo numérico de circulación para la Bahía de Campeche.* Tesis de Maestría en Ciencias. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. México. pp: 6-14.total 168 p.

ANEXO I

Programa de *comparación* en Matlab

```
% Reasignando los puntos del barco en su coordenada X
bx=B(:,1);
% Reasignando los puntos del barco en su coordenada Y
by=B(:,2);
% Reasignando los puntos del barco en su coordenada Z
bz=B(:,3);
% Reasignando los puntos del Topex en su coordenada Z
tz=T(:,3);
% Reasignando los puntos del Topex en su coordenada Y
ty=T(:,2);
% Reasignando los puntos del Topex en su coordenada X
tx=T(:,1);
% Variable temporal utilizada para cálculo de los puntos mínimos
t=10000000;
% Inicialización de índice en el que se encuentra el
% punto más cercano del Topex al punto actual del barco
% punto más cercano
índice=1;
for i=1:26317 % puntos sobre el barco
    t=10000000;
    for j=1:40374 %puntos sobre el Topex
        % Cálculo del punto más cercano al barco
        % esta distancia se guarda en t
        if t > distance(bx(i),by(i),tx(j),ty(j))
            t=distance(bx(i),by(i),tx(j),ty(j));
            índice=j;
        end
    end
end
Barco(i,:)=[bx(i) by(i) bz(i)]
Topex(i,:)=[tx(índice) ty(índice) tz(índice)]
```

```
DiferenciadeProfundidad1(i,:)=abs(bz(i)-tz(indice))
```

```
DiferenciadeProfundidad2(i,:)=(bz(i)-tz(indice))
```

```
end
```

```
%Barco
```

```
%Topex
```

```
%Diferencia de Profundidad
```

GLOSARIO

Altimetría.- Medida de altitud o elevación. La altitud se mide en relación al nivel medio del mar (es un promedio).

Base de datos.-Conjunto de datos estructurados para permitir su almacenamiento, consulta y actualización en un sistema informático.

Batimetría.- Escala utilizada en representaciones cartográficas para mostrar diferencias de profundidad en el relieve submarino.

Cartografía.- Es el arte, ciencia y técnica encargada de estudiar los diferentes métodos o sistemas que permiten representar en un plano una parte o la totalidad de la superficie terrestre, con el fin de elaborar mapas, planos y otros modos de expresión, así como su utilización.

Coordenadas geográficas.- Cada uno de los tres elementos que sirven para determinar la posición sobre la superficie de la Tierra: latitud, longitud y altitud, las dos primeras tienen su punto de origen y referencia en el Ecuador y en el meridiano de Greenwich y en el nivel medio del mar, respectivamente.

Datum.- Sistema geométrico de referencia empleado para expresar numéricamente la posición geodésica de un punto sobre el terreno. Cada datum se define en función de un elipsoide y por un punto en que el elipsoide y la Tierra son tangentes.

Elipsoide.- Figura matemática que se genera a partir de la rotación de una elipse en torno a su eje, su utilización en cartografía se debe a que dicha figura se asemeja a la forma achatada de la Tierra; los cálculos son mucho más complejos, pero son aún más precisos que los realizados a partir de la esfera. Se definen en función de un radio ecuatorial y un radio polar.

Latitud.- Es la distancia angular en grados medida a partir del Ecuador, considerando que a partir del centro de la Tierra va creciendo la abertura del ángulo hasta alcanzar los 90° hacia el norte o sur geográficos.

Longitud.- Es la distancia angular medida en grados a partir del observatorio de Greenwich, como meridiano principal hacia el este u oeste, partiendo también del centro de la tierra. La longitud oscila entre 0° y 180° este y de 0° a 180° oeste.

Píxel.-Término derivado de "Picture Element" es una representación digital para indicar la posición espacial de una muestra en un archivo de imagen el cual consiste en un arreglo espacial de números digitales y corresponde a la unidad fundamental de representación raster.

Satélite.- Es un cuerpo artificial lanzado desde la superficie terrestre que circula en torno a la tierra y esta provisto de sensores remotos. Tienen orbitas que se puede clasificar en: satélites de orbitas geoestacionaria y satélites de orbitas polares.

Satélites de orbitas geosincrònica.-Tienen altura hasta de 3,600 km. Los satélites se mueven en la misma dirección que la tierra y su velocidad esta ajustada para mantener su posición sobre un punto determinado de la superficie terrestre. Cuando un satélite geosincrònico se coloca en el plano ecuatorial (inclinación igual a cero) entonces decimos que el satélite tiene una orbita geoestacionaria. Estos no pueden observar a la tierra a latitudes mayores a 80° y son capaces de observar toda su área de cobertura cada 30 minutos. Son muy útiles en estudios metereològicos y oceanográficos. Ejemplo de estos sensores son GOES Y METEOSAT.

Satélites de orbitas polares.-Su altura oscila entre 700 y 900 km y su inclinación es cercano a los 90°. Estos satélites pasan sobre el ecuador al mismo tiempo solar cada día. Esto significa que un punto particular de la tierra es visto a la misma hora. Ejemplo de estos sensores son LANDSAT, NOAA, SPOT y SEASTAR.

Sistema de Posicionamiento Global.(GPS).- Acrónimo de Global Positioning System, o sistema de posicionamiento global por satélite; hace referencia a un sistema mediante el cual es posible estimar las coordenadas actuales de la estación en tierra mediante la recepción simultanea de señales emitida por varios satélites (llamados en conjunto *constelación* GPS).