



Título del artículo.

Comparaciones batimétricas entre buques oceanográficos y el Satélite TOPEX/Poseidón en el Golfo de México (con base de datos del 2007)

Título del artículo en idioma Inglés.

Bathymetric comparisons between oceanographic vessels and Topex/Poseidon satellite in the Gulf of Mexico (based on 2007 data)

Autor.

Jesús Tapia López

Referencia bibliográfica:

MLA

Jesús Tapia López. "Comparaciones batimétricas entre buques oceanográficos y el Satélite TOPEX/Poseidón en el Golfo de México (con base de datos del 2007)". *Tlamati* 6.3 (2015): 55-65. Print.

APA

Tapia López, J. (2015). Comparaciones batimétricas entre buques oceanográficos y el Satélite TOPEX/Poseidón en el Golfo de México (con base de datos del 2007). *Tlamati*, 6(3), 55-65.

ISSN: 2007-2066.

Publicado el 30 de Septiembre del 2015

© 2015 Universidad Autónoma de Guerrero

Dirección General de Posgrado e Investigación

Dirección de Investigación

TLAMATI, es una publicación trimestral de la Dirección de Investigación de la Universidad Autónoma de Guerrero. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Dirección de Investigación de la UAGro. Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos previa cita de nuestra publicación.



Comparaciones batimétricas entre buques oceanográficos y el Satélite TOPEX/Poseidón en el Golfo de México (con base de datos del 2007)

Jesús Tapia López^{1*}

¹Universidad Autónoma de Guerrero. Unidad Ciencias de la Tierra. Ex-hacienda San Juan Bautista, AP. 197. Taxco el Viejo, Guerrero, México. C. P. 40323. Tel: +52 5540978454

*Autor de correspondencia
 jesusmtl@comunidad.unam.mx

Resumen

La topografía marina es importante, dada las aplicaciones que ésta tiene para colocar tuberías, exploración de recursos, etc., pero si se quisiera realizar mapas batimétricos a detalle nos tomaría en promedio unos 200 años en navegar los océanos del mundo, además sería costoso. Afortunadamente, con los satélites activos es posible conocer toda la topografía marina en tan solo 5 años y su costo por debajo de 100 millones de dólares. El presente trabajo muestra que los datos batimétricos que el satélite TOPEX/Poseidón son confiables en su generalidad, puesto que la diferencia con los datos batimétricos de los buques es mínima, exceptuando la batimetría en zonas muy escarpadas. En este estudio se vislumbra la ventaja de que tiene el uso de los datos batimétricos del satélite sobre los datos batimétricos del buque "Justo Sierra" de la Universidad Autónoma de México, del Instituto Mexicano del Petróleo y los obtenidos de los buques de la Secretaría de Marina. Encontramos que el satélite realiza los cálculos en un periodo de tiempo muy corto, (10 días) para cubrir todo el globo terrestre, en cambio, los barcos realizan los sondeos por varios meses. Sin embargo, satélites y buques se complementan mutuamente porque con los buques podemos tener batimetría muy fina en las partes someras y en lugares de depresiones y con el satélite podemos tener una alta confiabilidad en zonas de relieve marina no accidentadas y con profundidades mayores a 200 metros en poco tiempo. La estructura quedó conformada por un marco geográfico, la metodología para la obtención de los datos batimétrico, el análisis de los resultados obtenidos de las comparaciones batimétricas del Satélite y la de los buques oceanográficos, donde se incluyeron gráficas y cálculos estadísticos y finalmente se presentan las conclusiones de éstas comparaciones batimétricas entre satélites y buques oceanográficos.

Palabras clave: TOPEX, batimetría, oceanografía

Abstract

Marine topography is important, given the applications that it has to lay pipes, resource exploration, and others, but if you want to develop detailed bathymetric maps, it would take an average of 200 years to sail the oceans of the world and it would be costly. Fortunately, with the active satellite, it is possible to know the marine topography in a complete way, in just five years, and it had a cost under \$ 100 million. This study shows that bathymetric data obtained from TOPEX/Poseidon satellite are reliable in their generality, since the difference with bathymetric data from ships is minimal, except in very steep bathymetry areas. This study analyzes the advantage of using satellite bathymetric data instead of bathymetric data obtained from the ship "Justo Sierra" of the Autonomous University of Mexico, and bathymetric data obtained from the Mexican Petroleum Institute and bathymetric data obtained from the Secretary of Marine. We found that the satellite performs calculations on a very short period of time (10 days) in order to cover the

Como citar el artículo:

Tapia López, J. (2015). Comparaciones batimétricas entre buques oceanográficos y el Satélite TOPEX/Poseidón en el Golfo de México (con base de datos del 2007). *Tlamati*, 6(3), 55-65.

entire globe, however, the boats made calculations for months. In the same way, satellites and ships complement each other because ships can have very fine bathymetry in shallow areas and in places of depressions, and the satellite can have a high reliability in marine areas with no rugged surface and depths greater than 200 meters. Structure of this study was composed of a geographic framework, the methodology for obtaining the bathymetric data, comparison analysis of satellite bathymetric and oceanographic ships, which included graphic and statistical calculations, and following them, bathymetric comparisons between satellites and research vessels.

Keywords: TOPEX, bathymetry, oceanography

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 que conocerlos y explorarlos sea fundamental para el desarrollo de la humanidad. Es por ello que es de suma importancia comprender que los cambios globales en los océanos están afectando los procesos físicos, químicos y biológicos del planeta.

Particularmente, en el ámbito marino es importante conocer la batimetría, dadas las diversas aplicaciones que tiene para colocar tuberías y cableados, para la exploración de recursos marinos, para predecir el alcance del Tsunami, para conocer la profundidad de los yacimientos de aceite, gas, entre otras, así como para reclamos territoriales de la Zona Económica Exclusiva [ZEE] y desde luego, para la investigación científica. Sin embargo, obtener estos datos mediante el uso de buques es costosa; es por ello que una de las opciones es obtener la batimetría vía satelital.

Pero, ¿Que tan confiables son los datos batimétricos de satélites comparados con los que se toman de barco? ¿Cuál es el rango de error que existe entre ellos? Estas son algunas de las preguntas que nos haríamos al respecto y para responder a estas preguntas, deberemos realizar un ejercicio. En este ejercicio tomaremos datos batimétricos de los buques oceanográficos “Justo Sierra” de la UNAM, datos batimétricos del Instituto Mexicano del Petróleo [IMP] y los datos digitalizados de la Secretaría de Marina; a todo este conjunto de datos se le denominará **B** y cubren la topografía marina del Golfo de México. Por otra parte, realizaremos la comparación de estos datos **B** con los datos batimétricos con los datos de satélite TOPEX/Poseidón, a quien se le ha denominado **T**, mismo que también cubre todo el Golfo de México. Obviamente la confiabilidad de este trabajo depende en gran parte de la calidad de la base de datos que se han considerado para su elaboración y de las cuales existe la confiabilidad.

La región de estudio 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 este trabajo sólo se realizó 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.

Del satélite TOPEX/Poseidon

En 1979, el laboratorio de propulsión a chorro de la NASA (*Jet Propulsion Laboratory* [JPL]), inició la operación TOPEX (*Ocean Topography Experiment*) como 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 (JPL, 1979). Al 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 JPL de la NASA se encargó del diseño y la construcción del altímetro americano y la Empresa Alcatel Space 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 (UCSD, 2015).

Este era 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 estaba constituida principalmente por dos altímetros que actúan por separado. El altímetro-radar (*dual-frequency*) americano utiliza un canal principal en banda Ku (13.6GHz) y el segundo altímetro-radar (*singles-frequency*) utiliza una banda en 5.6 GHz. Por otro lado, el 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 con el panel solar desplegado y tiene 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. Se basa en el *Satellite 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

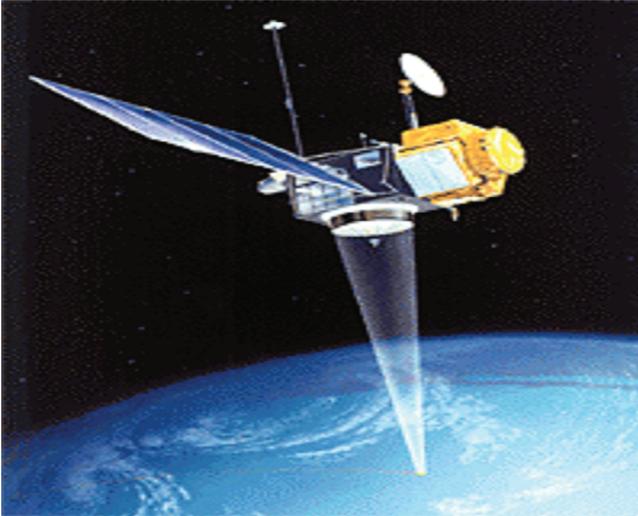


Figura 1. TOPEX/Poseidon. Tomado de CNES (<http://www.aviso.altimetry.fr/?id=639&L=0>)

compañía Dassault Electronique de Francia se denomina DORIS. Este sistema se compone de una red de seguimiento de 51 estaciones terrenas, distribuidas en más de 30 países, las cuales emiten señales 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] diseñado por la compañía Motorola. Este sistema extrae información del posicionamiento global, procedente 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, encontramos que 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

órbitas 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 mas 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, que 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 segundos (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; el satélite viaja con una rapidez de 8 kilómetros por segundo.

El equipo de datos científicos [STD], 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 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 el lugar donde se concentra toda la información satelital y desde donde son distribuidos a la comunidad científica.

Desde el 15 de septiembre de 2002, el TOPEX/Poseidón está sobre una nueva órbita y está siendo sustituido paulatinamente por JASON-1, el cual fue lanzado en diciembre del 2001 para continuar la misión. La figura 1 muestra un dibujo del satélite TOPEX/Poseidón.

Análisis y manejo de bases de datos

La base de datos de batimetría del buque "Justo Sierra"

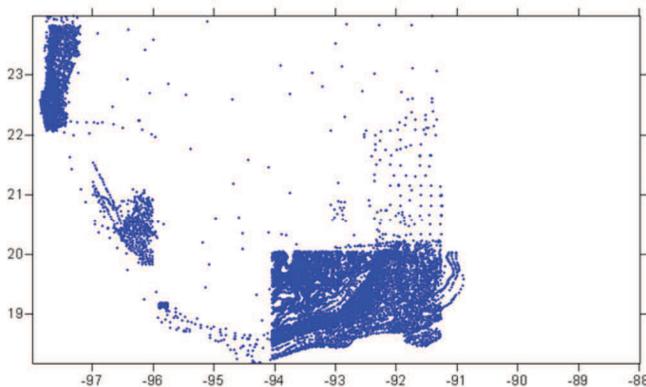


Figura 2. Puntos de **B** en WGS80

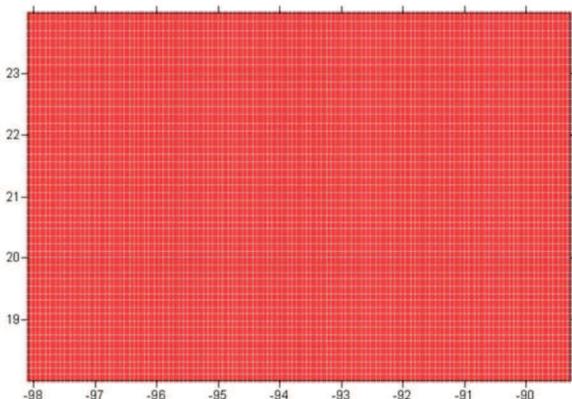
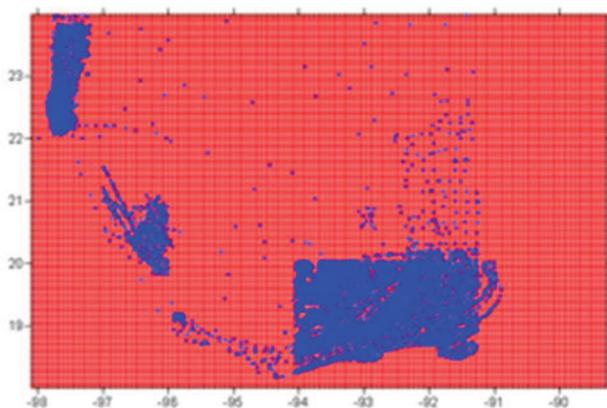


Figura 3. Mallas de **T** en WGS80

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

| 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 |

Figura 4. Puntos de coincidencias entre de **B** y **T**

de la Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM] fue recabada en cinco cruceros oceanográficos y realizados por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de dicha universidad. Los datos están georreferenciados con el elipsoide de Clarke 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 (proyección normal de Mercator)

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 Clarke 1866 (INEGI, 2006) 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 reproyectados a coordenadas geográficas para tener todos los datos en las mismas coordenadas.

Los datos de la Secretaría de Marina [SEMAR] 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 SEMAR 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 Pun-*

ta 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 georreferenciadas por el elipsoide de Clarke 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 a los datos del buque oceanográfico "Justo Sierra" de la UNAM, los datos del IMP y los datos digitalizados de la SEMAR se denominarán con la letra **B** y al satélite TOPEX/Poseidon **T**, del cual se obtuvieron 40,375 puntos batimétricos que fueron georreferenciados al elipsoide de Clarke 1866 y datum NAD27.

El STD 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/Poseidon, los miembros SDT los envían al 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 MGR. Estos archivos se envían al 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 la Universidad de California en San Diego (2015).

Tabla 2. Valores mínimos cercanos a la costa de **B** y **T**

| 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 |

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 el programa *Matlab*. Este programa realizó 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.

En cuanto a la interpolación de los datos, se realizaron con el programa Surfer Versión 8. 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, 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.

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

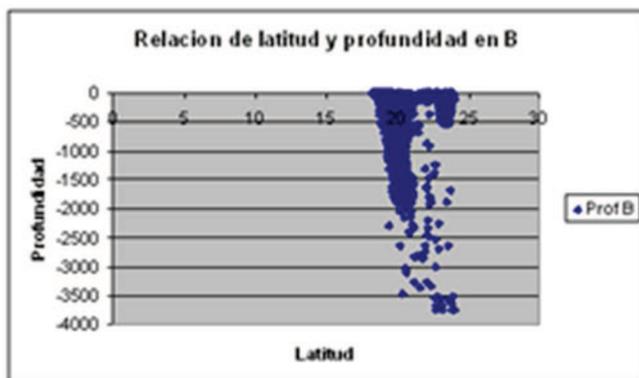
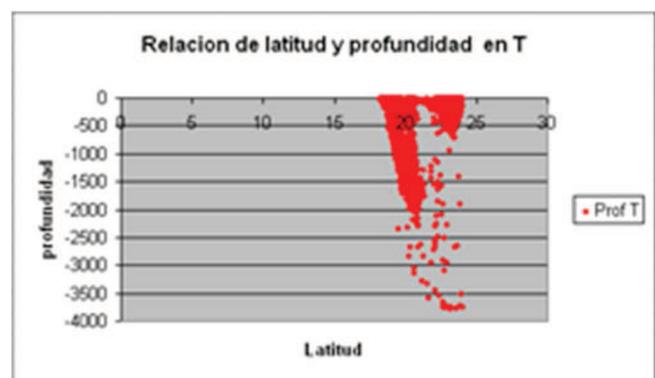
Gráfica 1. Relación de latitud y profundidad en **B**Gráfica 2. Relación de latitud y profundidad en **T**

Tabla 3. Valores de profundidad media 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 |

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.

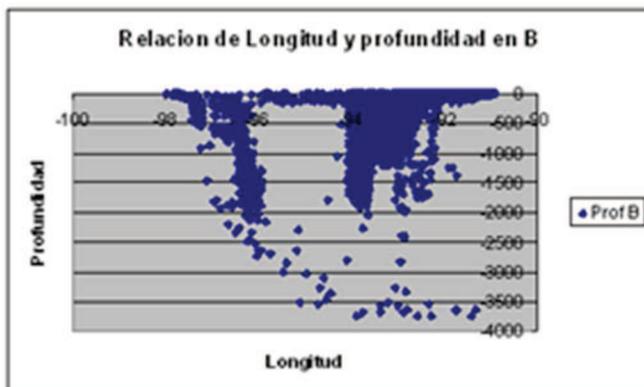
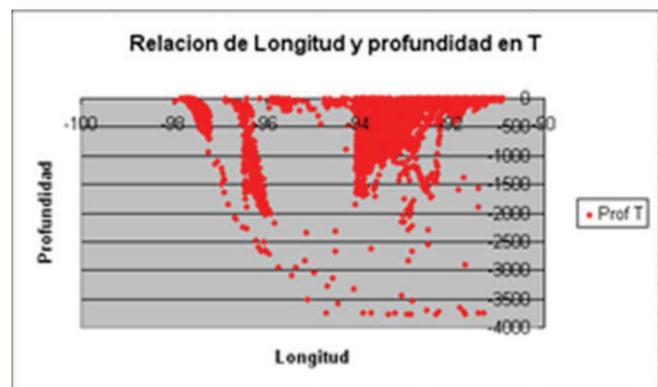
Resultados

Análisis Gráficos

En esta sección las figura 2 y 3 muestran los puntos de la batimetría de **B** y las mallas de **T** ambas con elipsoide de referencia 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 4 se observan los puntos coincidentes entre **B** y **T**, también 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

Gráfica 3. Relación de longitud y profundidad en **B**Gráfica 4. Relación de longitud y profundidad en **T**

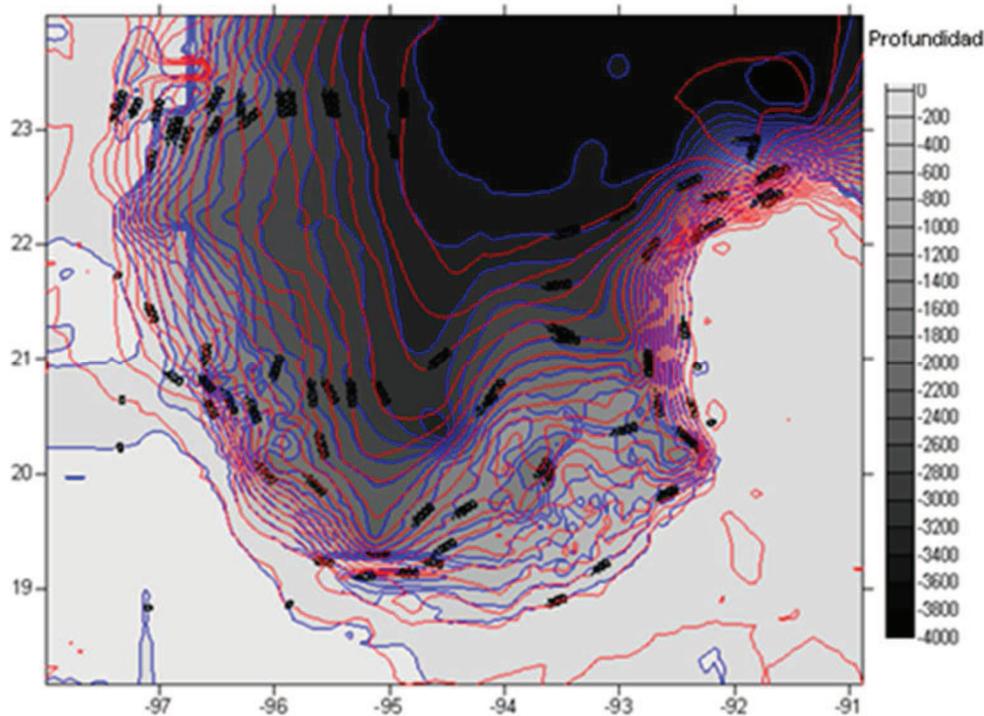


Figura 5. Coincidencias de latitud, longitud y profundidad de las isocintas de B y T

profundidades de B y T

Histogramas de profundidad

Relación de profundidad --latitud para B y T.

Se muestran en las gráficas 1 y 2, se observa que son similares, visualmente no es perceptible diferencia alguna, como se observa en los histogramas la distribución de profundidades en B y T

Relación de profundidad y longitud para B y T.

Se muestran en las gráficas 3 y 4, al igual que en el caso anterior, no es perceptible gráficamente la variación de B y T, pues dicha relación es muy parecida.

En la figura 5, podemos observar *la intersección de coordenadas geográficas y profundidad de B (en líneas azul) y T (líneas rojas)*

De esta manera se pueden visualizar las coincidencias entre los puntos de B y T en cuanto a sus coordenadas geográficas y profundidad, por lo tanto gráficamente podríamos decir que tanto los datos de B como de T son visualmente iguales.

Análisis de profundidades

Se tomaron valores arbitrarios como los mínimos y pertenecen solo a una parte de la zona costera y 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 fueron similares en ambos casos. La tabla 1 ilustra los valores mínimos. Para otros valores también arbitrarios de mínima profundidad y un poco más alejadas de las costas, podemos apreciar que el valor máximo de diferencia de

profundidades de B y T es de 11.96 metros y las coordenadas geográficas de los datos batimétricos son semejantes (véase la tabla 2).

De la misma manera, en la tabla 3 se ilustra una muestra de los valores de la profundidad media (también arbitraria) 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 esta zona si tenemos una diferencia más sustancial que abarca el rango de 12 a 314 metros de diferencia de profundidad, esto es debido a que tenemos una gran depresión, que es el cañón de Campeche; es decir, tenemos datos comparativos muy diferenciados entre sí (véase la tabla 4).

Debido a que el gradiente es muy fuerte en esta región, indicando que la profundidad es muy variable, observamos que en cuanto a las coordenadas geográficas, los datos del satélite y la de los buques tienen una variación de estas en centésimas.

Finalmente para valores de profundidad máxima, tenemos que 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 5 ilustra los valores máximos obtenidos su coincidencia geográfica.

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 isocintas de 100 metros. El espacio en blanco nos indica que no tenemos valores de diferencia en dicha zona y en este caso, la línea de costa la tenemos en color azul.

Se observa también que los valores máximos de dife-

Tabla 4. Valores para la zona de depresión de Campeche de **B** y **T**

| 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 |

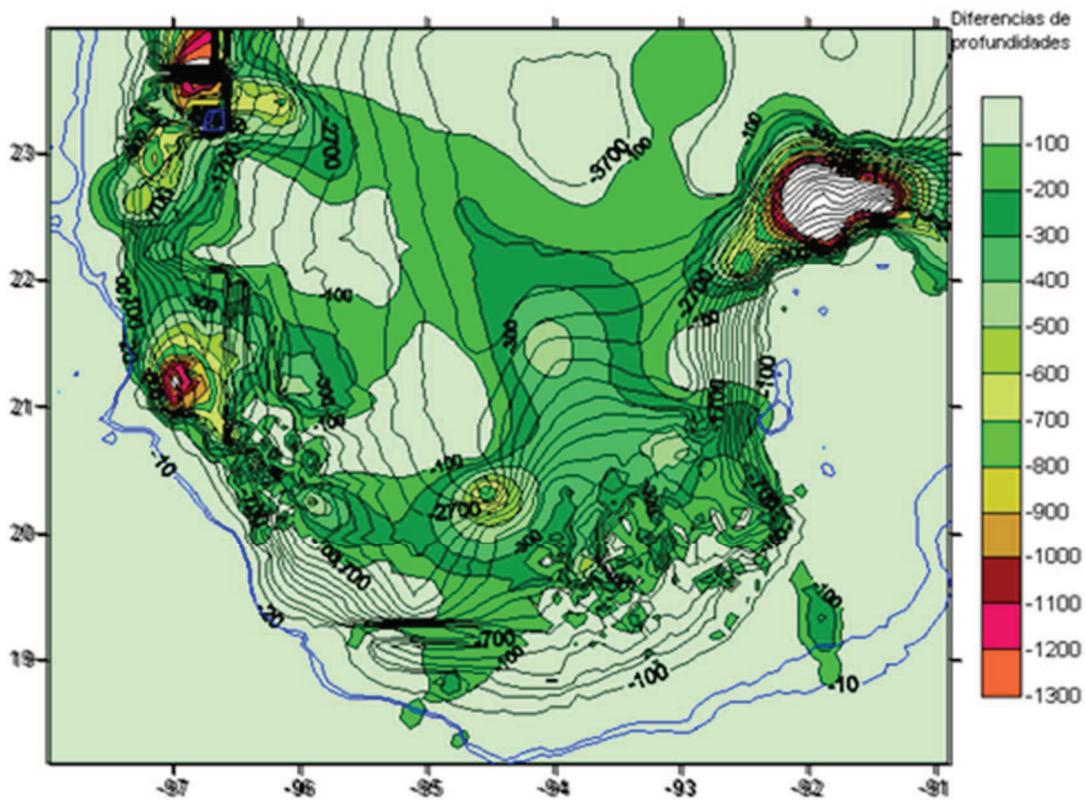


Figura 6(a). Mapa de diferencia de profundidades entre **B** y **T**. (Las isocintas solo son referencias de las profundidades y nos sirven para ver a que profundidad existen esas diferencias)

Tabla 5. Valores máximos de profundidad de **B** y **T**

| 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 |

rencia de profundidades están entre los valores de 1000 y 1300 metros de profundidad.

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.

En estos mapas tridimensionales tenemos sobrepuestos en el mapa mostrado en la figura 6(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 las encontramos en profundidades medias.

En resumen, en las figuras 6 (a) y (b) se muestran los mapas de diferencias de profundidades entre **T** y **B**

Análisis estadístico

La tabla 6 muestran los rangos obtenidos de las comparaciones batimétricas de **B** y **T** así como la medida de tendencia central la media y la medida de dispersión la desviación estándar.

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 y la desviación estándar también son semejantes 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:

$$r=0.95022703$$

Tabla 6. Datos estadísticos de profundidades 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 |

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:}

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

Ecuación de Regresión

La ecuación de regresión se calculó mediante el ajuste de mínimos cuadrados, la cual podemos visualizar en la gráfica 5

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

$$Y = 0.94507805X + 47.7 \text{ o bien} \\ T = 0.94507805B + 47.7$$

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**. desde luego, ello es válido siempre y cuando sean proporcionales, pero en este caso no lo son.

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 IMP y los datos digitalizados de la SEMAR (**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 y 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 y confiables 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 proba-

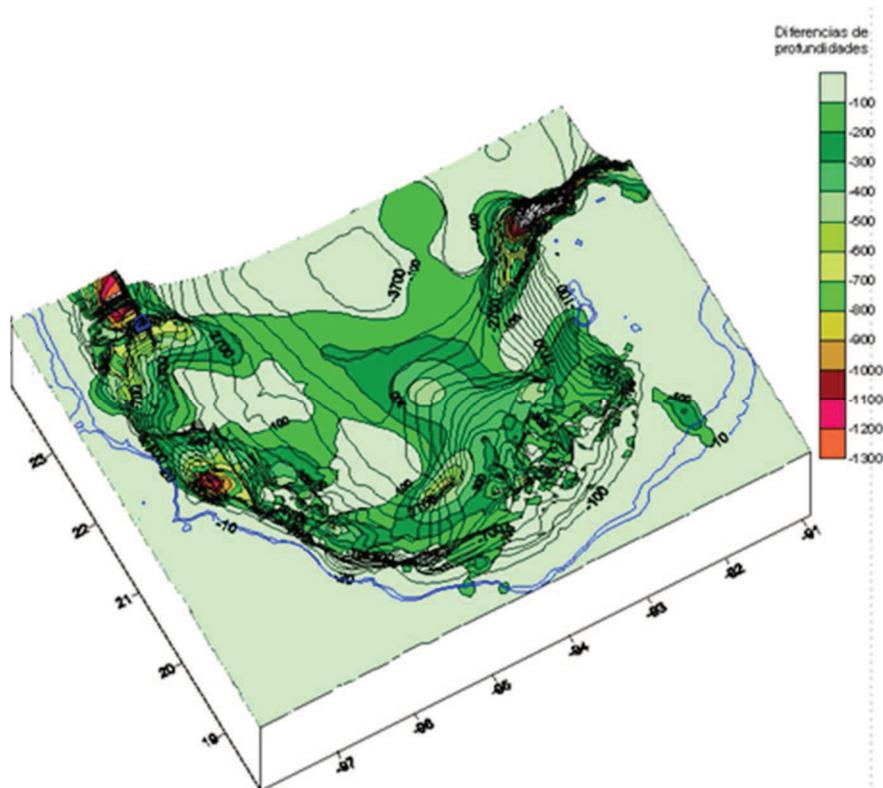
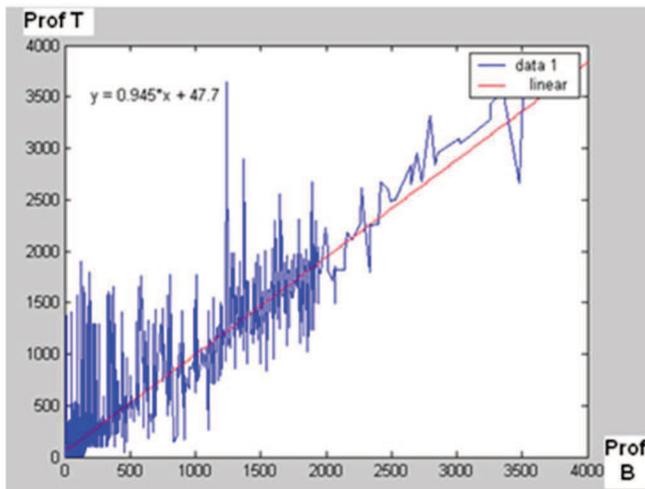


Figura 6(b). Mapa tridimensional de diferencia de profundidades **B** y **T**



Gráfica 5. Estimación de mínimos cuadrados de profundidades entre **B** y **T**

blemente a que las ondas reflejadas de **T** llegan con mucha intensidad al receptor satelital.

También, 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**, 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, aunque las coordenadas sean casi iguales.

En las zonas profundas donde no existen escarpes,

cañones o cualquier tipo de depresión, tenemos que los datos son muy similares de **B** y **T**, de la misma forma esto se observa en zonas planas. Entonces, 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.

Los datos estadísticos como la media y la desviación estándar, el Coeficiente de correlación lineal el valor **r** y el coeficiente de determinación de 90.30% permiten confirmar la semejanza entre **B** y **T**. Finalmente ambos son complementarios

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 topografía de nuestros mares y de esta manera poder realizar mejores investigaciones científicas y se espera que sirvan de apoyo para cualquier actividad relacionada con la batimetría.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente los datos batimétricos aportados por el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de Universidad Nacional Autónoma de México, del Instituto Mexicano del Petróleo, así como a podaac.jpl.nasa.gov por la información batimétrica del satélite TOPEX/Poseidon.

Referencias

- Jet Propulsion Laboratory. (1979). TOPEX/Poseidon Project. Obtenido de: <http://www.jpl.nasa.gov/>
- Instituto Nacional de Geografía e Informática (2006). *Sistema de coordenadas*. Obtenido de: http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/Sistema_de_Coordenadas.pdf
- Instituto Mexicano del Petróleo. (2000). Base de datos de batimétricos proporcionados. IMP
- Instituto de Geografía UNAM. (1993). *Atlas Nacional de México escala 1:4,000,000*. UNAM
- 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.
- University of California San Diego (2015). *Marine gravity from satellite altimetry*. Obtenido de: <http://TOPEX.ucsd.edu>.