

**MARINA DE GUERRA DEL PERÚ  
DIRECCIÓN DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN  
ESCUELA DE HIDROGRAFÍA**



**Ensayo presentado para obtener el grado del Programa de Segunda  
Especialización Profesional de Hidrografía**

**“Metodología para estimar la ondulación geoidal usando datos  
mareográficos respecto al modelo EGM96 en la zona litoral sur de  
Ecuador.”**

**Presentado por:**

**ALFG-SU Mildred Gabriela BARZOLA Reyes**

**Magister Yessica Beatriz DEBO Montero**

**Asesora Metodológica**

**Magister Hugo MONTORO Cáceres**

**Asesor Técnico-Especialista**

**La Punta 2019**

## **DEDICATORIA**

*A DIOS Y A MI FAMILIA DEDICO TODO MI  
ESFUERZO REALIZADO PARA LA ELABORACIÓN  
DE ESTE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, mi familia, padres y hermanos, señores oficiales, señores servidores públicos, señores docentes e instructores técnicos de la Armada del Ecuador y de la Marina de Guerra del Perú, señor tutor y señora cotutora que con sus constantes correcciones y recomendaciones pude elaborar el siguiente trabajo de investigación con el fin de contribuir al Instituto Oceanográfico de la Armada del Ecuador.

# ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE .....	iv
LISTA DE ANEXOS .....	v
LISTA DE TABLAS .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	vii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	3
A. Zona de aplicación del ensayo .....	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO .....	7
B. Definiciones .....	7
1.1. Nivel de marea .....	7
1.2. Geoide .....	8
1.3. Ondulación geoidal .....	9
A. Modelamiento geoidal y nivel de marea .....	10
B. Utilidad del uso de ondulación geoidal – nivel del mar .....	12
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN .....	15
A. Metodología .....	15
B. Resultados y discusiones .....	21
CONCLUSIONES .....	31
RECOMENDACIONES .....	32
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	1

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1. Script de Matlab usando la función T_tide. ....</b>	<b>5</b>
<b>Anexo 2. Determinación de los niveles de referencia. ....</b>	<b>7</b>
<b>Anexo 3. Software utilizado para el modelo geoidal. ....</b>	<b>8</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1. Coordenadas de las estaciones mareográficas .....</b>	<b>4</b>
<b>Tabla 2 Componentes de armónicos.....</b>	<b>6</b>
<b>Tabla 3 Formato utilizado para la revisión de la data. ....</b>	<b>16</b>
<b>Tabla 4 Promedios Patrones Mensuales.....</b>	<b>17</b>
<b>Tabla 5 Puntos considerados. ....</b>	<b>21</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1. Zona de aplicación del ensayo.....</b>	<b>4</b>
<b>Figura 2. Niveles de referencia mareográficos.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 3. Superficies de referencia de la Tierra.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 4. Relación del NMM y la gravedad.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 5. Nivel medio del mar.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 6 Datos de la estación Puerto Nuevo. ....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 7 Superficie terrestre-elipsoide y geoide. ....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 8 Niveles de referencia.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 9 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en Puerto Nuevo desde el 1984-1992. ....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 10 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en Puerto Nuevo desde el 1984-1992. ....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 11 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en Posorja desde el 2000-2016.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 12 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en Posorja desde el 2000-2016.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 13 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en La Libertad desde el 2000-2016. ....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 14 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en La Libertad desde el 2000-2016.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 15 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en Talara desde el 2000-2016. ....</b>	<b>25</b>

<b>Figura 16 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en Talara desde el 2000-2016.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 17 Tabla de los coeficientes armónicos.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 18 Gráfica del nivel del mar de la Estación de Posorja del 2008.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 19 Gráfica del nivel del mar de la Estación de La Libertad del 2013. .</b>	<b>27</b>
<b>Figura 20 Gráfica del nivel del mar de la Estación de Puerto Nuevo del 1988. .....</b>	<b>27</b>

## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo de investigación tiene como objetivo estimar la ondulacion geoidal usando datos mareográficos del 2013 de la estación Libertad y su diferencia entre el modelo global EGM-96 para contribuir a las futuras investigaciones relacionadas al geoide local para Ecuador.

El cálculo del Geoide durante los últimos años ha sido una tarea fundamental de muchos investigadores, existen diferentes modelos de Geoide desarrollados por países como Canadá, EE. UU., México entre otros; cuyo objetivo ha sido el de representar de mejor manera la superficie de la Tierra. Según el ISG (International Service for the Geoid) 5 países de Sudamérica cuentan con un modelo regional como Colombia, Argentina, Brasil, Bolivia y Uruguay. (International Service for the Geoid, 2019).

Actualmente el Ecuador no cuenta con un modelo de geoide local oficial y se utiliza para diferentes trabajos e investigaciones modelos globales como el EGM-96 definido por la NASA en enero del 1996 o el EGM-08 un nuevo modelo geopotencial publicado por el National Geospatial Intelligence Agency (NGA) ambos utilizados por varios países del mundo. (Instituto Geográfico Nacional -España, 2015).

Considerando lo anterior, se ha recurrido al uso de la información del geoide y la información in situ recabada por las estaciones de La Libertad considerada actualmente como datum vertical, para estimar el nivel del mar; como análisis adicional se consideraron las estaciones de Puerto Nuevo y Posorja debido a que actualmente se encuentra en proyecto el puerto de altura, DPWorld Posorja el cual permitirá el desarrollo marítimo integral del Golfo de Guayaquil dado que este puerto será el puerto con mayor calado del país permitiendo el arribo de buques de hasta 16,5 metros como los Panamax o Post-Panamax, sin duda alguna este proyecto es de gran importancia para el ámbito marítimo y el empleo de un modelo geoidal local sería de mucha utilidad para los trabajos realizados por INOCAR.

Los datos mareográficos serán considerados debido a que existen diferentes niveles de referencia mareográficos entre los cuales se encuentra el nivel medio del mar definido por la Organización Hidrográfica Internacional como

el promedio de la altura de la superficie del mar en una estación de mareas para todas las etapas de la marea durante un período de 19 años. (IHO, 1996, pág. 160).

Según el geodesta alemán Listing en 1873, divisa a las superficies equipotenciales del campo de gravedad del planeta que ha sido relacionada con el nivel medio del mar. A esta superficie materializada, se la extiende bajo las masas continentales siendo considerada como la forma real del planeta. (Ruiz, 2011).

Este documento estará dividido en 4 partes, la primera parte consiste en el planteamiento del problema donde se explica detalladamente las razones que iniciaron esta investigación. La segunda parte consiste en explicar las diferentes teorías y trabajos realizados relacionados al presente ensayo, así como explicar al lector las definiciones más importantes que permitan tener un mayor conocimiento del contenido de este documento. La tercera parte es emplear los datos mareográficos y las diferentes metodologías revisadas en el desarrollo de la investigación de tal manera que se obtengan resultados que contribuyan al desarrollo de posteriores investigaciones relacionadas con el tema tratado para finalmente como cuarta parte obtener conclusiones de la investigación.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

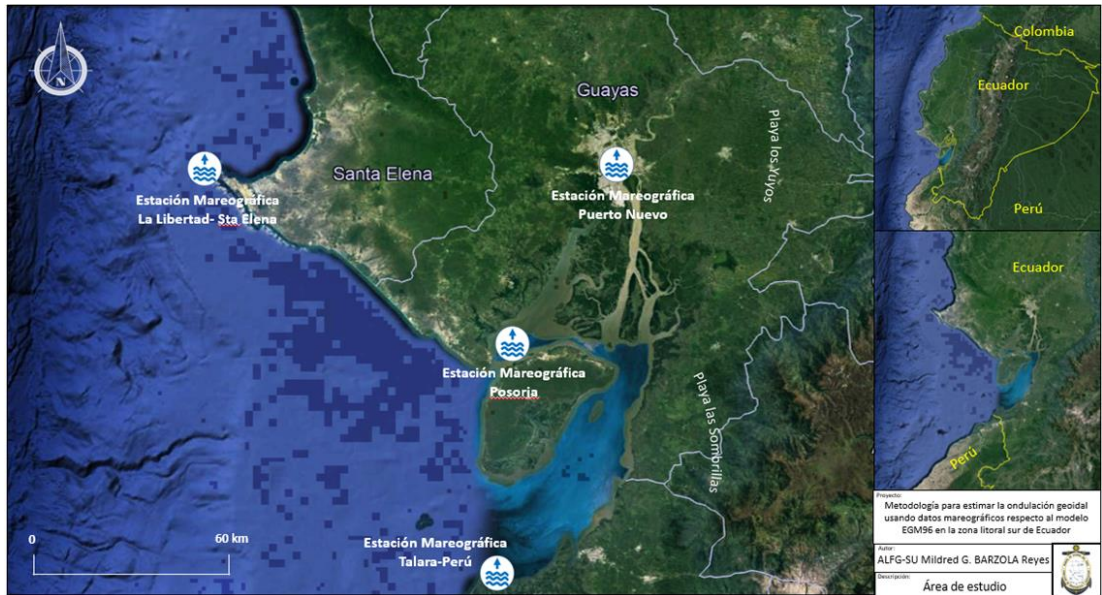
El conocimiento del nivel del mar es un dato de gran importancia para establecer un nivel de referencia vertical que me permite realizar diferentes trabajos hidrográficos y topográficos, Ecuador tiene una red de 9 estaciones mareográficas y con una REGME (Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador) de 30 estaciones, sin embargo, actualmente el INOCAR desde el 1998 ha utilizado modelos globales como EGM-96 y EGM-08 que pueden llegar a tener errores en la ondulación geoidal de hasta 3 m, y por ende en la altura. (Geoportal-IGM, 2013).

En este caso, el enfoque radica en la estación de la Libertad como datum de los puntos a considerarse para estimar la ondulación geoidal en la zona litoral sur del Ecuador los datos mareográficos de las estaciones de Posorja, Puerto Nuevo y Talara fueron considerados como análisis adicional de la investigación.

### **A. Zona de aplicación del ensayo**

En Posorja se encuentra en construcción el primer puerto de aguas profundas del Ecuador el cual permitirá el desarrollo marítimo integral del Golfo de Guayaquil.

El tráfico marítimo que se desarrollará en un futuro debido al proyecto DP World Posorja convertirá a este puerto en unos de los más importantes de América del Sur permitiendo al Ecuador tener un mayor crecimiento portuario y por ende mejor economía. El siguiente trabajo de investigación estará limitado entre las estaciones de Puerto Nuevo-Libertad y Posorja (Figura 1).



**Figura 1. Zona de aplicación del ensayo.**

**Fuente: Realizado por el autor con información de Google Earth Pro.**

**Tabla 1.**

**Coordenadas de las estaciones mareográficas**

ESTACIÓN MAREOGRÁFICA LA LIBERTAD-SANTA ELENA	
<b>Latitud</b> 02° 13' 3.79366" S	<b>Longitud</b> 80° 54' 22.80083" W
<b>Norte UTM</b> Y= 9'754870.537 N	<b>Este UTM</b> X= 510418.143 E
ESTACIÓN MAREOGRÁFICA POSORJA-PROVINCIA DEL GUAYAS	
<b>Latitud</b> 2° 42' 05.13953"S	<b>Longitud</b> 80° 14' 52.48559"W
<b>Norte UTM</b> Y= 9'701549.500 N	<b>Este UTM</b> X= 583942.531 E
ESTACIÓN MAREOGRÁFICA PUERTO NUEVO-PROVINCIA DEL GUAYAS	
<b>Latitud</b> 02° 16' 42.51393" S	<b>Longitud</b> 79° 54' 43.67656" W
<b>Norte UTM</b> Y= 9'748112.940N	<b>Este UTM</b> X= 620964.660 E

**Fuente: Realizado por el autor.**

En el diseño de una metodología para estimar la ondulación geoidal mediante datos mareográficos se ha considerado datos desde el 2000-2016 de las estación de la Libertad con el fin de seleccionar el año con la mejor data recaudada para obtener los niveles del mar que sirvan de referencia a las mediciones que se realizan en trabajos hidrográficos y topográficos, el siguiente trabajo de investigación será viable mediante un análisis de los

modelos globales que existen como el EGM96 y EGM08 para determinar la diferencia en el cálculo de las ondulaciones geoidales; con los datos mareográficos realizar un análisis de armónicos un proceso matemático de obtener la amplitud y la fase de una componente a la vez a partir de una serie de tiempo observada (IHO-C-13,cap5, 2015, pág. 276). Se basa en el conocimiento de que la marea observada está formada por un número de componentes armónicas cuyos periodos han sido perfectamente establecidos y que coinciden con los períodos de algunos de los movimientos astronómicos relativos entre tierra-sol-luna en donde la marea astronómica se aproxima a la fórmula.

$$\varepsilon MA(t) = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \alpha_i), \text{ donde:}$$

*a<sub>0</sub> es el nivel medio.*

*a<sub>i</sub> es la amplitud de la onda del componente i.*

*ω<sub>i</sub> es la frecuencia de la onda componente i.*

*t es el instante en que se calcula la marea.*

*N es el número de componentes consideradas.*

(Jalón Isabel, 2013).

De esta manera obtener el nivel medio del mar, la base del Datum vertical, con el Software de MatLab y la función T\_tide que consiste en descomponer la variación del nivel del mar en la componente astronómica y la componente meteorológica y la descomposición de la marea astronómica en sus componentes armónicos principales (Tabla 2), se utilizarán como referencia distintas metodologías existentes en el Ecuador y en otros países para posteriormente diseñar la metodología a emplearse definida por la cantidad de datos, tipo de datos y el rango de datos para que este valor sea válido en la zona del Puerto de Aguas Profundas Posorja.

**Tabla 2**

**Componentes de armónicos.**

<b>Símbolo</b>	<b>Periodo (horas)</b>	<b>Descripción</b>
<b>M<sub>2</sub></b>	12.42	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido a la Luna
<b>S<sub>2</sub></b>	12.00	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido al Sol
<b>N<sub>2</sub></b>	12.66	Debido a la variación de la distancia entre la Tierra y la Luna
<b>K<sub>2</sub></b>	11.97	Debido a los cambios de declinación del Sol y la Luna
<b>K<sub>1</sub></b>	23.93	Solar lunar
<b>O<sub>1</sub></b>	25.82	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna
<b>P<sub>1</sub></b>	24.07	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna

**Fuente: ( Franco García, 2016).**

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### B. Definiciones

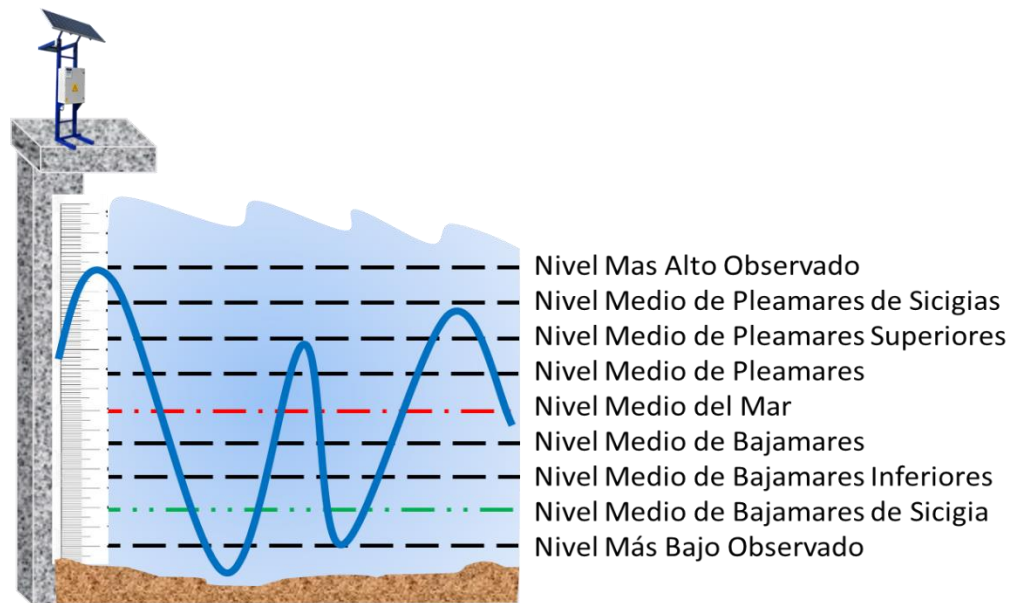
#### 1.1. Nivel de marea

En una estación mareográfica se puede obtener como datos el nivel de mar en un tiempo determinado, la temperatura del agua, la presión, etc. Dentro de las estaciones mareográficas encontramos mareógrafos que es el instrumento para registrar y medir las oscilaciones de las mareas. (HIDRONAV5172, 2013). Las mareas se definen como el movimiento periódico y alternativo de ascenso y descenso de las aguas del mar, producido por la atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol. (Sailandtrip, 2016).

En la Norma Técnica Hidrográfica N°43, para el estudio de mareas (HIDRONAV5172, 2013), indica que los planos de referencias mareográficos que existen (Figura 2):

- El Nivel de más Alta Marea (LAM), se emplea en la determinación de terrenos ribereños para el establecimiento de linderos.
- El Nivel Medio de Pleamares de Sicigias Ordinarias (NMPS), aquellas que se presentan un día o dos, después de la luna nueva o llena, observadas durante un ciclo nodal lunar.
- El Nivel Medio de Pleamares Superiores (NMPS), es la altura promedio de las pleamares utilizado en los cálculos de alturas para los diseños de muelles, obras de protección portuarias.
- El Nivel Medio de Pleamares Superiores (NMP), es la altura media de las pleamares durante un ciclo nodal lunar.
- El Nivel Medio del Mar (NMM), este plano es utilizado en la red de nivelación en todo el país considerado como el nivel "0" de referencia topográfico.
- El Nivel Medio de Bajamares (NMB), es la altura promedio de las bajamares inferiores durante un ciclo nodal lunar.
- El Nivel Medio de Bajamares Inferiores (NMBI), es la altura promedio de las bajamares inferiores durante un ciclo nodal lunar.

- El Nivel Medio de Sicigias Ordinarias (NMBSO), es el nivel de reducción de sondajes, considerado como el nivel "0" de referencia hidrográfico.
- El Nivel de Más Baja Marea (NMBM), este nivel corresponde al valor mínimo registrado durante un ciclo nodal lunar. Nivel empleado como Línea Base Normal, desde el cual se determina el ancho del mar territorial.



**Figura 2. Niveles de referencia mareográficos.**

**Fuente: Modificado de Norma Técnica N°43, 2013.**

### 1.2. Geoide

Según la OHI el geoide es superficie equipotencial del campo de fuerza de gravedad, es utilizado como una superficie de referencia para las alturas; el Nivel Medio del Mar (NMM) es la mejor aproximación para esta superficie. (OHI-C13, 2011, pág. 40).

El Geoide es una superficie equipotencial que define mejor el promedio global del nivel del mar, el cual corresponde a la superficie cero verdadero para medir elevaciones. (QPS, 2009).

### 1.3. Ondulación geoidal

La ondulación geoidal se determina mediante la diferencia entre las dos superficies (elipsoide – geoida). (OHI-C13, 2011, pág. 46).

Para el desarrollo del siguiente trabajo de investigación es primordial conocer las superficies de referencias que existen (Figura 3) las cuales son:

**La Superficie Geoidal:** es aquella superficie conocida como la superficie potencial, establecida por el nivel medio del mar y a la cual están referidas las mediciones hechas sobre la superficie terrestre.

**La Superficie Elipsoidal:** es aquella superficie matemática que se origina a partir de un elipsoide de revolución, que representa el tamaño y forma de la tierra y que es la que se ha adoptado como la más conveniente para los diferentes cálculos matemáticos.

**La Superficie Topográfica:** es aquella conocida como la superficie real de la tierra, con las montañas, valles y fondos de los océanos.

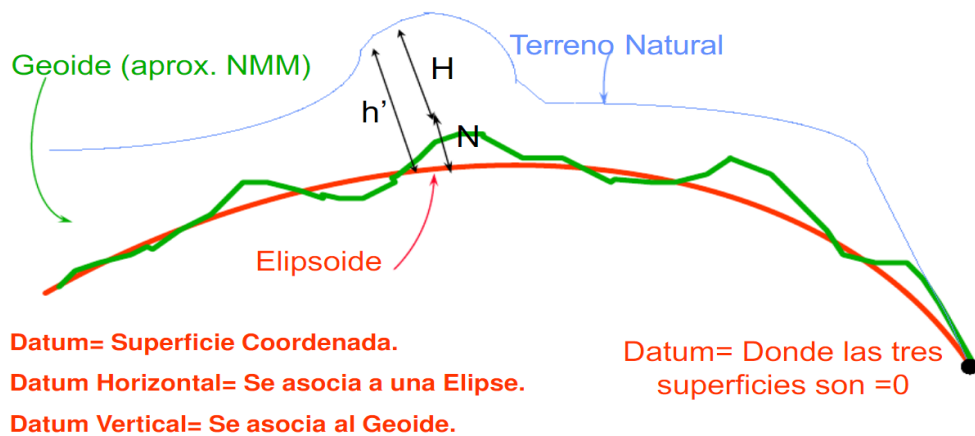


Figura 3. Superficies de referencia de la Tierra.

Fuente: SCRIBD, Edgar Martínez, 2012.

## **A. Modelamiento geoidal y nivel de marea**

Un Modelo Geoidal es la representación fisicomatemática para un área determinada o el planeta en general, para lo cual existen dos tipos de Modelos Geoidales que se utilizan para la representación de la Tierra; como son:

El Modelo Geoidal Gravimétrico que trata de modelar el Geoide de la mejor forma posible sin la necesidad de unirlo a un datum vertical oficial, teniendo presente que un datum vertical es la superficie de referencia para un sistema de altura, es decir es la elevación cero el cual no es necesariamente una superficie equipotencial (QPS, 2009) y el Modelo Geoidal Híbrido que de igual manera trata de modelar el Geoide pero con la diferencia que este debe ser unido a un datum vertical oficial.

Un modelo gravitacional es una superficie de nivel que representa al nivel medio del mar, la cual se prolonga por debajo de los continentes y cubre a la Tierra en su totalidad. El Geoide es un modelo físico que busca representar la verdadera forma de la Tierra calculándola como una superficie del campo de gravedad con potencial constante y es utilizada como referencia para determinar la elevación del terreno. (INEGI, 2019).

Un ejemplo de modelo gravimétrico es el EGM-96 (Earth Gravitational Model 1996), EGM08 cuyo datum horizontal debe ser el WGS 1984 puesto que este elipsoide representa un modelo mundial para el globo terrestre.

Los modelos geoidales han sido desarrollado para ser utilizado, principalmente como referencia geodésica, determinación de órbitas de satélites más precisas, con fines oceanográficos y para estudios geofísicos. (Peláez, 1997).

El modelo geoidal geopotencial EGM96 fue constituido gracias a la colaboración de distintos centros de investigación, fundamentalmente la NASA, (acrónimo de National Aeronautics and Space Administration) a través del Centro de vuelo espacial Goddard (GSFC), sumando esfuerzos con la Agencia Nacional de Mapeo e Imágenes (NIMA por sus siglas en inglés hoy

llamado NGA National Geospatial Intelligence Agency), la Universidad del Estado de Ohio en Estados Unidos (OSU), y la Universidad de Texas at Austin, de las cuales se obtuvieron datos de gravedad de diferentes partes del mundo continental y oceánica. (Tierra, 2009).

El Modelo Geoidal EGM08 debe ser asignado a cada Sistema de Coordenadas o modelo local basado en el elipsoide WGS84 con el propósito de calcular las separaciones geoidales de cada punto registrado en un determinado proyecto. (EGM08, 2009)

Según Israel Espinoza es su análisis de los modelos EGM08, KM02 y DTMECU para el cálculo del geoide gravimétrico local de la zona comprendida entre las latitudes 1°s y 2°s y entre las longitudes 81°w y 78°w indica que la actualización constante de tecnologías y herramientas tanto instrumentales como geomáticas, permiten la creación y mejora de modelos geopotenciales y es debido a estos avances que se presentan el modelo geopotencial EGM2008, que a diferencia de su homólogo EGM96, posee cada grilla de 1.8 km x 1.8 km.

Es posible utilizar las ventajas de los modelos globales mencionados, combinándolos permitirá obtener un nuevo modelo que aumenta las posibilidades de utilización para un usuario del geoide. (Oreiro & Arecco, 2010).

### **La gravedad y las mareas.**

Los datos obtenidos de una estación mareográfica son empleados en diferentes análisis como el estudio de armónicos y no armónicos, predicciones de mareas en la zona, cambios climatológicos, etc.

La relación de la gravedad y las mareas, cuando una de las caras de la Tierra está frente a la Luna, la atracción es mucho mayor y provoca mareas altas. El Sol, aunque tiene un mayor tamaño que el de la Luna, provoca menor efecto, porque se encuentra a mayor distancia de la Tierra. (Astronomía, 2019). La atracción gravitatoria que ejercen la Luna y el Sol sobre la Tierra es un ejemplo de la fuerza de gravedad entre los cuerpos celestes, que se manifiesta a través del fenómeno de las mareas. (Mareas, 2019).

Existen dos tipos de mareas la conocida marea viva que se produce cuando hay la máxima atracción y ocurre en el momento en que la Luna, el Sol y la Tierra se encuentran alineados, durante las fases de Luna llena o Luna nueva, por lo que se produce dos veces por mes.

Las mareas muertas que son lo contrario a las vivas, es decir son poco intensas y ocurren cuando la Luna y el Sol forman un ángulo de  $90^\circ$  con la Tierra. En lugar de que las fuerzas se sumen, estas se contrarrestan al encontrarse en direcciones opuestas.

### B. Utilidad del uso de ondulación geoidal – nivel del mar

En una tesis realizada por Leyva Soto para la obtención de una maestría en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California el 05 de junio del 2017 se encuentra una gráfica (Figura 4) que relaciona los conceptos tratados en esta investigación. (Soto, 2017).

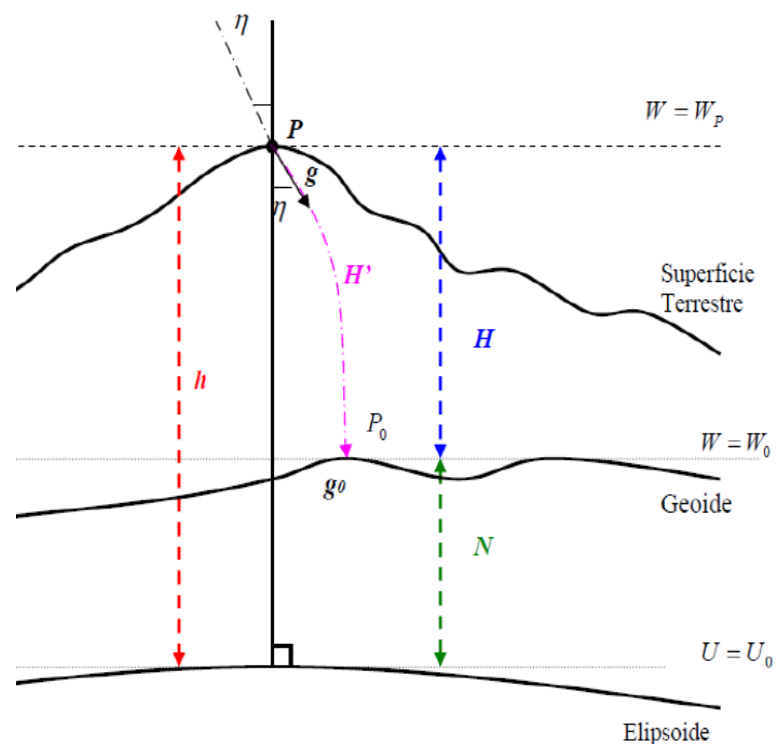


Figura 4. Relación del NMM y la gravedad.

Fuente: Leyva Soto 2007

Relación entre los sistemas de referencia vertical físico (Geoide) y geométrico (Elipsoide):

**PPo** línea de la plomada;  $\eta$  desviación de la vertical.

**h** altura elipsoidal.

**H'** altura ortométrica.

**H** altura ortométrica despreciando el valor local que toma la desviación de la vertical y la curvatura de la línea de la plomada.

**N** ondulación o altura geoidal (separación geoide-elipsoide).

**g** aceleración de la gravedad en el punto de nivelación P.

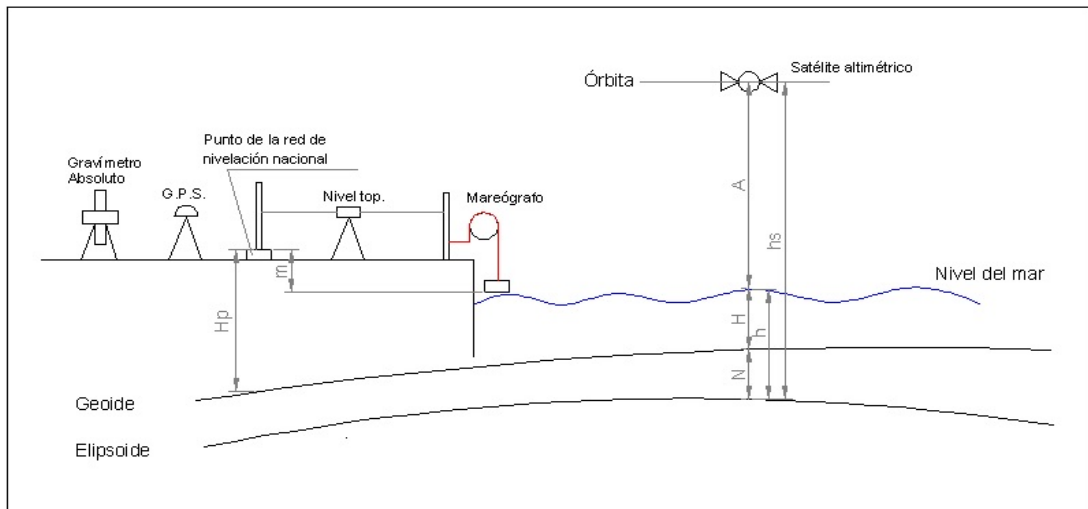
**g<sub>o</sub>** aceleración de la gravedad en el Geoide.

**W, U**, potencial gravimétrico del elipsoide de referencia y del geoide, respectivamente

**WP**, potencial gravimétrico en el punto de nivelación P.

La importancia de un modelo geoidal actualizado a nivel nacional se puede observar tanto en los procesos de producción de información geodésica; otorgando facilidades a los ámbitos de nivelación, gravedad y posicionamiento satelital, como también para realizar avances en proyectos nacionales como la definición de un nuevo sistema de referencia vertical nacional como la posibilidad de participar en la definición del Sistema y Marco de Referencia Internacional de Alturas. (IGAC, 2019).

La superficie equipotencial o de nivel materializado por los océanos cuando se prescinde del efecto perturbador de las mareas (casi la superficie del nivel medio de los mares) se denomina Geoide como se muestra en la (Figura 5) y es, como todos sabemos, la superficie de referencia para la altitud. (Curso avanzado de posicionamiento por satélite, 2009).



**Figura 5. Nivel medio del mar.**

**Fuente: (Topograf.cat, 2015).**

Actualmente se ha estado sustituyendo la nivelación geométrica por nivelaciones espaciales utilizando el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), la razón se debe a que la nivelación espacial resulta más práctica y el tiempo de ejecución es más corto que el requerido. (Morales, 2010).

El cálculo del nivel del mar y de los diferentes niveles de referencia permiten la elaboración del estudio de armónicos y no armónicos, predicciones de mareas en la zona, cambios climatológicos, etc.

## **CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **A. Metodología**

En el Instituto Politécnico Nacional de la ciudad de México en el año 2017 se realizó un estudio de la metodología para el establecimiento de un sistema de control altimétrico utilizando mediciones geodésicas satelitales, nivelación de alta precisión y mediciones de gravedad realizada por Jacqueline Hernández Martínez y Rafael de Jesús Lazcano Sánchez. En el cual se indica que el método para definir esta superficie de manera regional es usar mareógrafos en las mediciones del nivel del agua (durante el periodo recomendado), registrar los datos correspondientes y finalmente calcular el promedio del total de mediciones. (Hernández Martínez & Lazcano Sánchez, 2017).

Por lo antes mencionado se consideró en el siguiente trabajo de investigación el análisis de armónicos de una serie de tiempo de datos mareográficos del año 2013 para obtener el nivel medio del mar de la estación de la Libertad y tener el Datum vertical. Los datos mareográficos utilizados fueron enviados y facilitados por el Servidor Público de la División de Oceanografía del Instituto Oceanográfico de la Armada, el señor MG. Jorge Nath el martes 7 de mayo del 2019.

Los datos mareográficos de las estaciones de Posorja, Puerto Nuevo se utilizaron como análisis adicional para conocer la diferencia de variación del nivel medio del mar en una estación ubicada en mar abierto (Libertad), estuario (Posorja), estero (Puerto Nuevo), la estación de Talara se utilizó para corroborar la data de las otras tres estaciones debido a que esta data ya se encontraba procesada y fue facilitada por medio de la Escuela de Hidrografía.

### **Formato de la data**

La data fue enviada en Excel con los siguientes datos y formato:

- Año de la marea.
- Mes de la marea.
- Día de la marea.

- Hora de la marea.
- Minuto de la marea.
- Segundo de la marea.
- Altura de la marea con referencia al NMM (metros).
- Altura de la marea con referencia al cero instrumental (metros).

Para un análisis de armónicos es necesario como dato de entrada la variación del nivel del mar de la zona de estudio por tal razón fue indispensable la revisión de la data in situ para evitar usar mediciones del nivel del mar incorrectas que pudieron haberse generado por diferentes factores. Se procedió a revisar toda la data enviada de las tres estaciones para lo cual se utilizó un formato (Tabla 3).

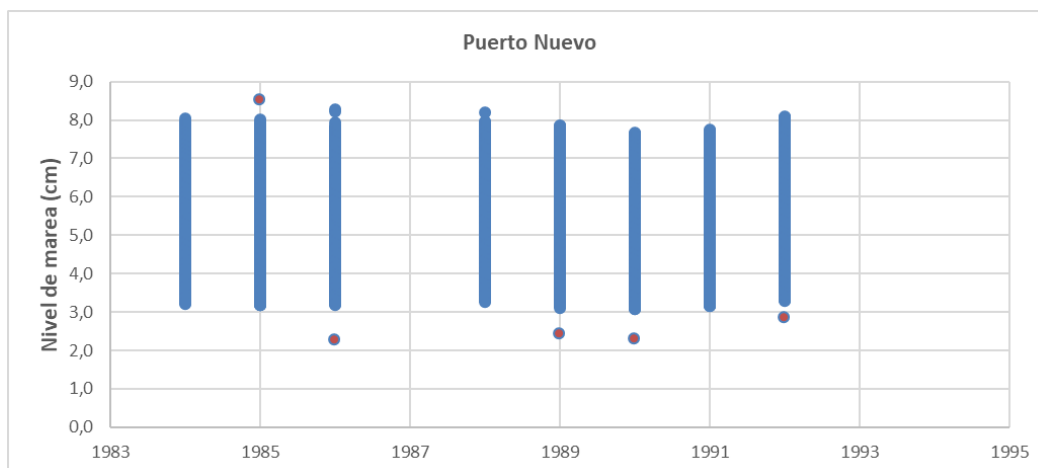
**Tabla 3**  
**Formato utilizado para la revisión de la data.**

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Pto Nuevo</b>	<b>Patr Mens</b>	<b>Anom</b>	<b>Pr Anual</b>
<b>1984</b>	Ene	5,72	5,71	0,00	
	Feb	5,71	5,73	-0,02	
	Mar	5,80	5,73	0,07	
	Abr	5,78	5,75	0,03	
	May	5,79	5,74	0,05	
	Jun	5,66	5,73	-0,07	
	Jul	5,81	5,72	0,09	
	Ago	5,81	5,69	0,12	
	Set	5,79	5,70	0,08	
	Oct	5,76	5,71	0,05	
	Nov	5,72	5,68	0,04	
	Dic	5,72	5,68	0,04	5,754

**Fuente: Realizado por el autor.**

Por medio de esta estructura se podrá observar las anomalías mediante la obtención de patrones mensuales y anuales de la data de cada puerto, previo a la obtención de estos patrones fue necesario la revisión del in situ por cada año y cada mes de manera tal que se pueda utilizar una data correctamente filtrada.

**Filtrado de data:** Mediante los gráficos en Excel de dispersión se visualizaron (Figura 6) mediciones erróneas (puntos rojos) por lo cual la data tuvo un proceso de filtración.



**Figura 6 Datos de la estación Puerto Nuevo.**

**Fuente Realizado por el autor.**

**Obtención de patrones mensuales:**

Luego de haber realizado el proceso de filtrado, se separó la data por años y meses. El cálculo del patrón mensual se obtuvo mediante un promedio de la altura del mismo mes durante los 16 años

**Obtención de patrones anuales:**

Los patrones anuales se obtuvieron una vez que se hayan obtenido los patrones mensuales mediante el promedio de la altura de la marea durante los 12 meses del año.

**Tabla 4**

**Promedios Patrones Mensuales.**

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
<b>2000</b>	2,82	2,92	2,96			3,37	3,05	2,97	3,02	2,99	2,83	3,01
<b>2001</b>	2,95				3,11	2,98	2,98	2,90	2,89	2,99	2,99	3,03
<b>2002</b>	3,00	3,06	3,08	3,05	3,02	3,03	3,03	3,00	3,01	3,06	3,10	3,08
<b>2003</b>	3,03	2,99	3,04	3,03	3,08	3,00	3,06	3,20	3,10	3,01	3,04	3,17
<b>2004</b>	2,82	2,89	2,95	2,98	3,09	3,05	3,00	2,92	2,93	3,01	2,98	3,02
<b>2005</b>	3,06		3,04	3,23	3,29	2,96	3,06	2,97	2,95	2,89	2,96	2,89
<b>2006</b>	2,95	3,00	3,00	3,04	3,13	3,06	2,94	2,94	2,98	3,01	2,97	2,99
<b>2007</b>	2,98	2,92	2,91	2,92	2,96	2,95	2,94	2,90	2,88	2,88	2,94	2,93

<b>2008</b>	2,98	2,99	3,03	3,08	3,15	3,14	3,13	3,04	2,94	2,88	2,91	2,93
<b>2009</b>	2,94	2,97	2,98	3,13	3,27	3,23	3,27	3,29	3,16	2,97	3,01	3,13
<b>2010</b>	3,06	3,04	3,10	3,10	3,05	3,01	3,00	2,99	2,96	2,97	2,99	3,03
<b>2011</b>	3,06	3,09	3,13	3,23	3,20	3,16	3,12	2,88	2,91	2,90	2,88	2,88
<b>2012</b>		3,03	3,05	3,12	3,12	3,07	3,02	2,94	2,93	2,90	2,88	2,91
<b>2013</b>	2,91	2,88	2,97	2,97	2,93	2,93	2,89	2,89	3,01	3,05	3,07	2,98
<b>2014</b>	3,17	3,04	3,04	3,53	3,13	3,08	2,99	3,01	3,15	3,04	2,95	3,00
<b>2015</b>			2,96				3,09	3,12			2,80	2,70
<b>2016</b>	3,02	2,95	3,04	3,00								
<b>Prom</b>	<b>2,98</b>	<b>2,98</b>	<b>3,02</b>	<b>3,10</b>	<b>3,11</b>	<b>3,07</b>	<b>3,04</b>	<b>3,00</b>	<b>2,99</b>	<b>2,97</b>	<b>2,96</b>	<b>2,98</b>

**Fuente: Realizado por el autor.**

Luego de haber revisado toda la data desde el 2000 hasta el 2016 se seleccionó el año con la mejor data para poder utilizar en el programa Matlab la función **T\_tide** para la obtención de los coeficientes armónicos cumpliendo con el siguiente proceso.

Se debe llamar la función de la siguiente manera.

**[NAME,FREQ,TIDECON,XOUT]=T\_TIDE(XIN)**

o de la siguiente forma para que lo almacene en un archivo:

**[NAME,FREQ,TIDECON,XOUT]=T\_TIDE(XIN,'output','nombrefichero.txt')**

**NAME** es nombre del armónico

**FREQ** es la frecuencia

**TIDECON** la amplitud y fase con sus respectivos errores

**XOUT** la serie temporal de marea astronómica

**XIN** la serie temporal de variación de nivel del mar (los datos de entrada del mareógrafo). (Jalón Isabel, 2013).

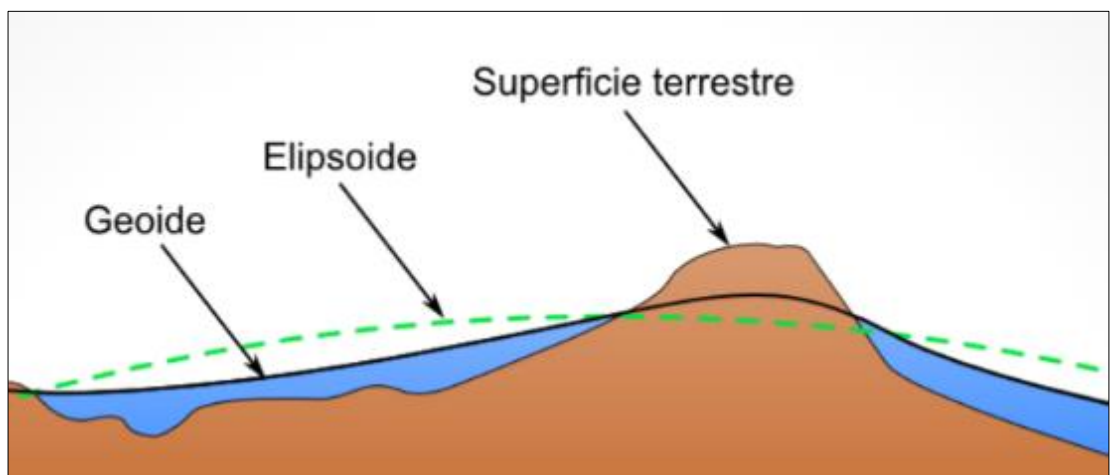
Una vez que se obtuvieron los armónicos mediante el manual de Australia Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping (ICSM, 2018, pág. 18) obtener los niveles del mar Anexo 2.

Actualmente como lo indica Elvia Ramón Morales en la investigación realizada para la determinación directa del geoide en el sector norte de la red geodésica de la ciudad de Ensenad-México (Baja California) se busca

sustituir la nivelación clásica por la nivelación espacial la cual utiliza solo un Sistema de Posicionamiento Global, para tal efecto es necesario dos superficies de nivel generadas con base en la forma geométrica y la forma física de la Tierra, siendo la primera un elipsoide de revolución y la segunda un geoide gravimétrico.

Mediante el Geoide se puede obtener la distancia que lo separa con respecto al Elipsoide, la cual es conocida como Ondulación Geoidal (N). De manera que la relación entre la altura geodésica y la ondulación del geoide proporciona como resultado la Altura Ortométrica (H). (Hernández Martínez & Lazcano Sánchez, 2017, pág. 42).

El concepto y análisis antes mencionado surge de la fórmula detallada mediante la siguiente gráfica (Figura 7):



**Figura 7 Superficie terrestre-elipsoide y geoide.**

**Fuente: (Bryan, Román , Santacruz, & Tierra, 2015).**

$$h = H + N$$

$$N \cong h - H$$

N: Ondulación Geoidal.

H: Altura Ortométrica.

h: Altura Elipsoidal.

(Bryan, Román , Santacruz, & Tierra, 2015).

Conociendo el NMM de la Libertad tendremos el Datum Vertical o cero al que estarán referenciados las alturas ortométrica de los puntos que se considerarán en nuestro modelo geoidal, la altura elipsoidal de los cinco puntos utilizados está referenciada al elipsoide GRS80.

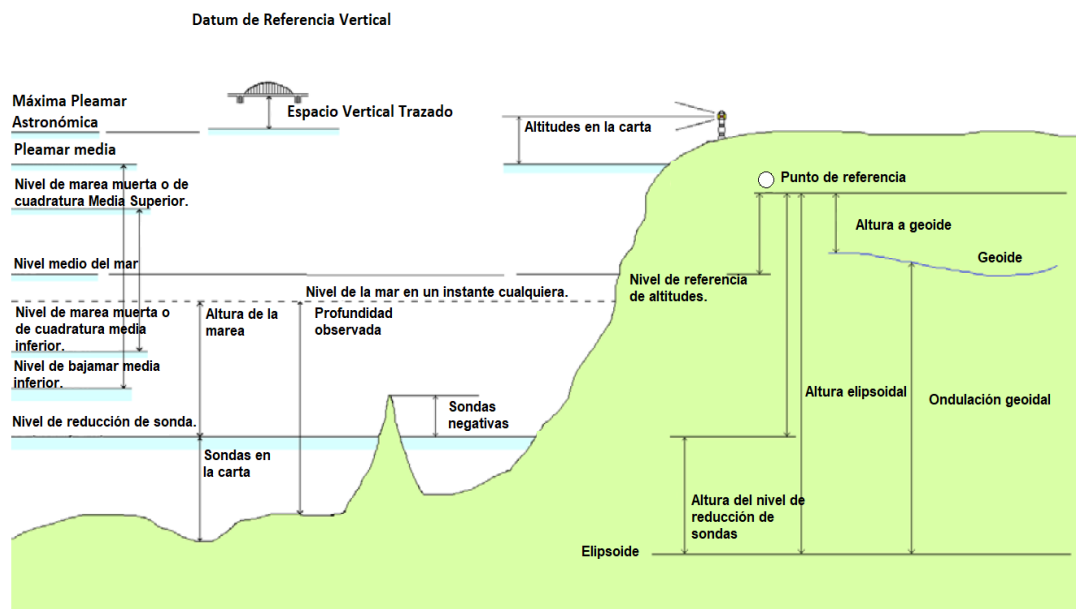
Como se muestra en la (Figura 8) un datum vertical se define como la relación de alturas relacionadas con la gravedad o profundidades a la Tierra. (ISO19111, 2007, pág. 6).

**Tabla 5**

**Característica de los elipsoides GRS80-WGS-84.**

Elipsoide	GRS-80	WGS-84
Datum	Geocéntrico	Geocéntrico
Semi Eje Mayor	6 378 137 metros	6 378 137 metros
Semi Eje Menor	6 356 752,31414 metros	6 356 752,31414 metros
Achatamiento	1/298,257222101	1/298,257223563

Fuente: (Instituto Geográfico Nacional, 2015, pág. 27).



**Figura 8 Niveles de referencia.**

Fuente: (Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping, 2014).

## Procesamiento de la Ondulación Geoidal.

Se usaron tres softwares el Trimble Business Center versión 2.70, ArcGis y el Global Mapper con el fin de poder obtener un valor de corrección estimado para mejorar el modelo geopotencial global que mejor se ajusta en la zona litoral sur del Ecuador comparando las alturas obtenidas con cada modelo e incluyendo el Geoportal del IGM.

Se utilizó el Software ArcGis para la exportación de los puntos en shape posteriormente se realizó la interpolación mediante el Toolbox utilizando el modelo kringing y Global Mapper para recortar el área de estudio y obtener la estimación de una ondulación geoidal considerando el modelo global que más se ajusta a la zona litoral sur del Ecuador siendo este el EGM-2008 por medio de un valor promedio de las diferencias de la altura ortométrica del modelo menos la altura ortométrica medida como se muestra en la Tabla 8 con la opción de Global Mapper (Alter Elevation Values) ingresando el valor promedio de -0,154 alterando los valores del modelo EGM-96 en nuestra área de estudio obteniendo nuevas diferencias como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 6**

### Puntos geodésicos.

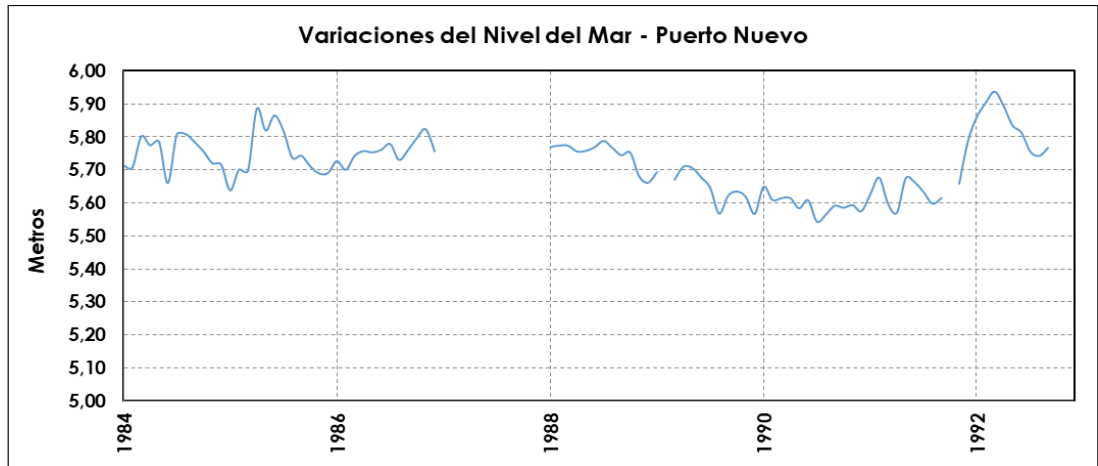
PUNTO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA ELIPSOIDAL(m)	ALTURA ORTOMÉTRICA (nmm)(m)	N(m)
BM-2 Posorja	02°42'05.13953"S	80°14'52.48559"W	11,971	2,349	9,622
BM-1 DATA (PLAYAS)	02°42'53.09910"S	80°18'48.51827"W	13,196	3,666	9,53
Salica1	02°42'00.35031"S	80°15'12.6211"W	15,624	5,9678	9,6562
La Libertad	02° 13' 3.79366" S	80° 54' 22.80083" W	15,556	3,76	11,796
Isla Puná	2° 44' 4.66376" S	79° 54' 43.41344" W	13,845	3,3175	10,5275
<b>Datum Vertical La Libertad</b>					
<b>Elipsoide de Referencia GRS80/WGS84</b>					

**Fuente: Realizado por el autor.**

## B. Resultados y discusiones

Como primeros resultados se muestran las variaciones del nivel de marea por cada estación analizada. El caso de Posorja presenta momentos en que no se adquirió la data anual completa, como es el caso del 2015, la data analizada es de un periodo de 16 años, sin embargo, al analizar toda la data

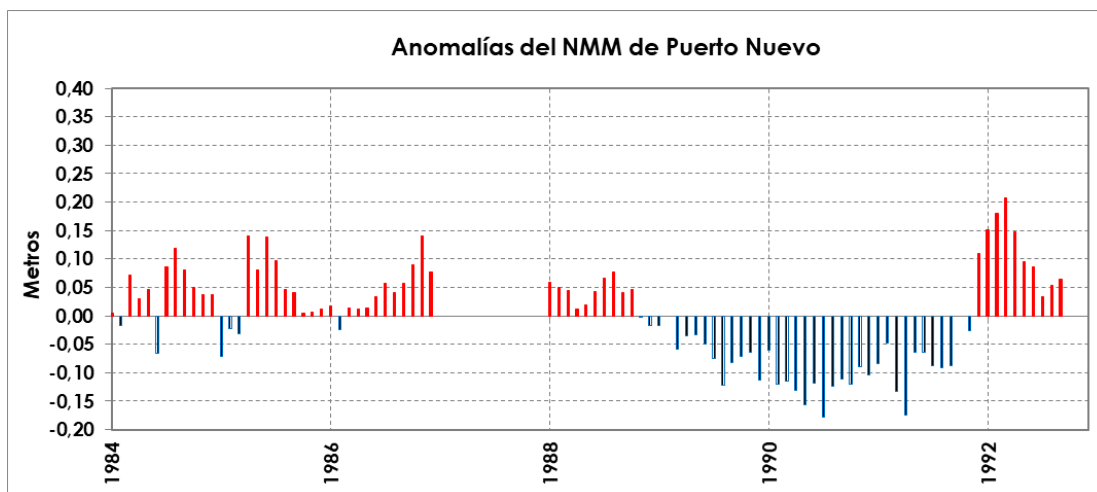
se aprecia que las mayores variaciones en el nivel del mar son después de 2008, cuando la presencia de picos se muestra más desfasada y con mayores rangos, alcanzando un máximo de 3.50 metros en el mes de abril de 2014 y los valores más bajos en 2004 y 2016, sin embargo, este último valor no se considera debido a la falta de datos de un año anterior.



**Figura 9 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en Puerto Nuevo desde el 1984-1992.**

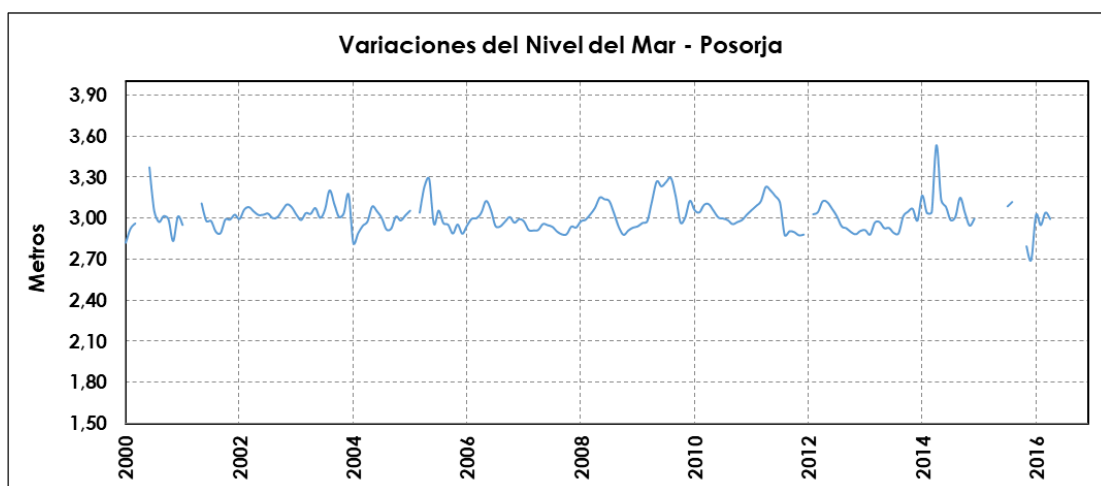
**Fuente: Realizado por el autor.**

En Puerto Nuevo se observaron anomalías negativas en casi tres años (1999-1992) con valores que alcanzaron los -0.17 metros durante el mes de abril, mientras que los valores más altos se presentaron inmediatamente después de esta anomalía (en 1992), alcanzando 0.21 metros durante el mes de marzo.



**Figura 10 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en Puerto Nuevo desde el 1984-1992.**

**Fuente: Realizado por el autor.**

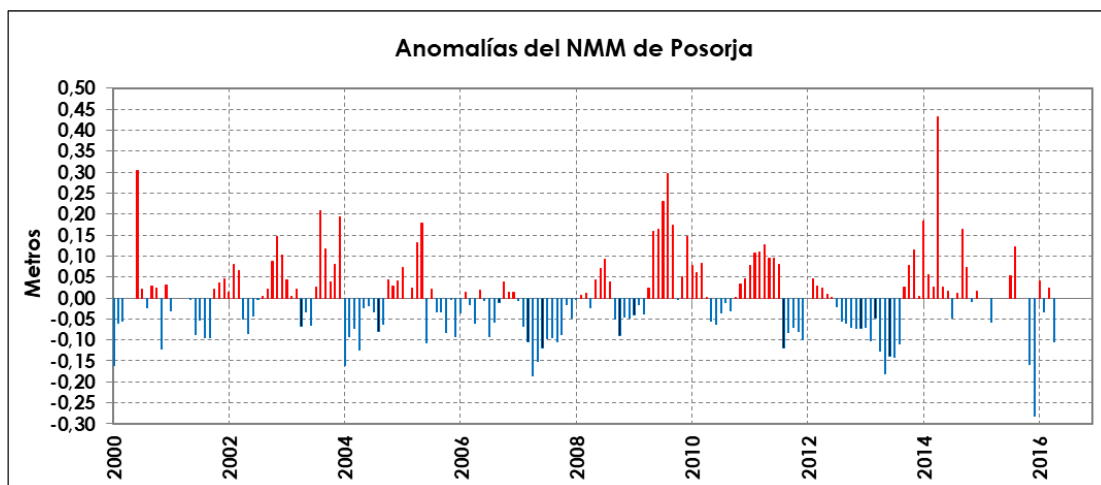


**Figura 11 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en Posorja desde el 2000-2016.**

**Fuente: Realizado por el autor.**

Respecto a las anomalías de esta misma estación, se observan dos picos más notorios, uno en el mes de junio del 2000 (0.30 metros) y el otro en el mes de

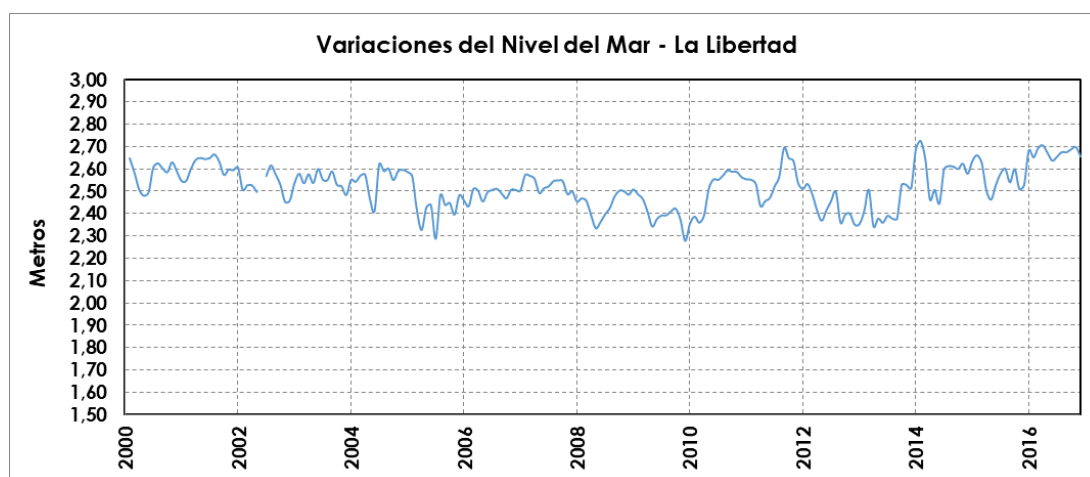
abril del 2014 (0.44 metros). Las anomalías negativas se presentaron en 2015 con valores de - 0.28 metros en el mes de diciembre.



**Figura 12 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en Posorja desde el 2000-2016.**

**Fuente: Realizado por el autor.**

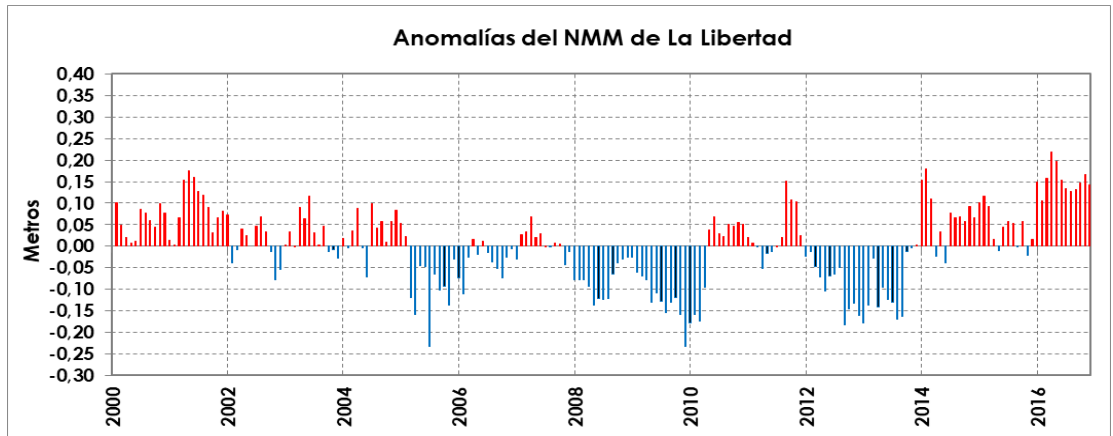
La estación de La Libertad presentó la mejor cantidad y calidad de data adquirida, con data histórica desde 2000 hasta 2016 (16 años), se presentó valores máximos de 2.7 metros en 2011 durante el mes de septiembre y en 2014 durante el mes de febrero. La menor variación se presentó durante 2005 (mes de julio) y enero de 2010.



**Figura 13 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en La Libertad desde el 2000-2016.**

**Fuente: Realizado por el autor.**

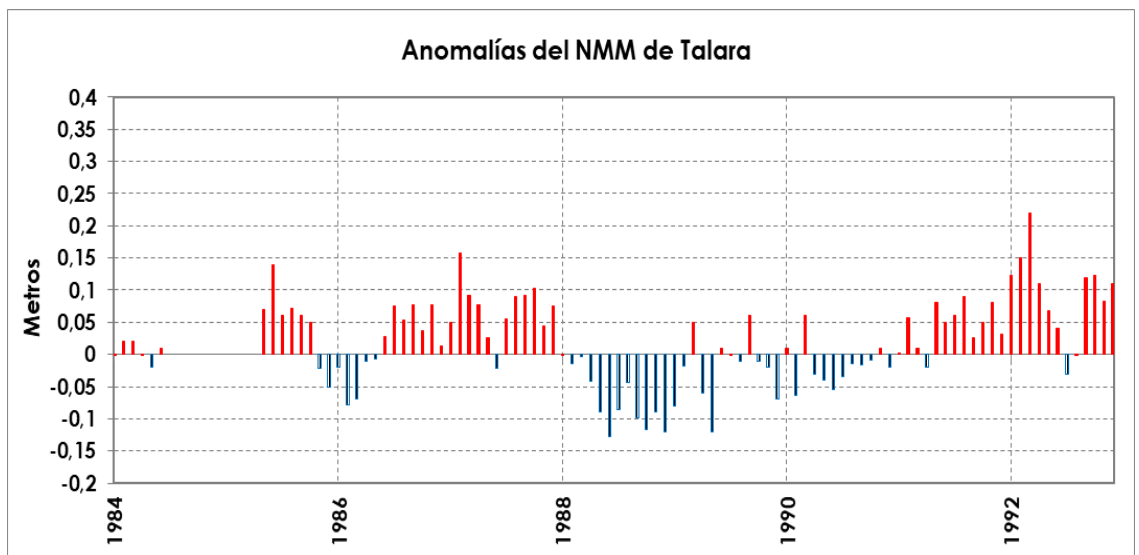
En la estación de La Libertad se observaron anomalías negativas en el año (2005) con valores que alcanzaron los -0.23 metros durante el mes de julio, mientras que los valores más altos se presentaron inmediatamente después de esta anomalía (en 2016), alcanzando 0.22 metros durante el mes de abril.



**Figura 14 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en La Libertad desde el 2000-2016.**

**Fuente:** Realizado por el autor.

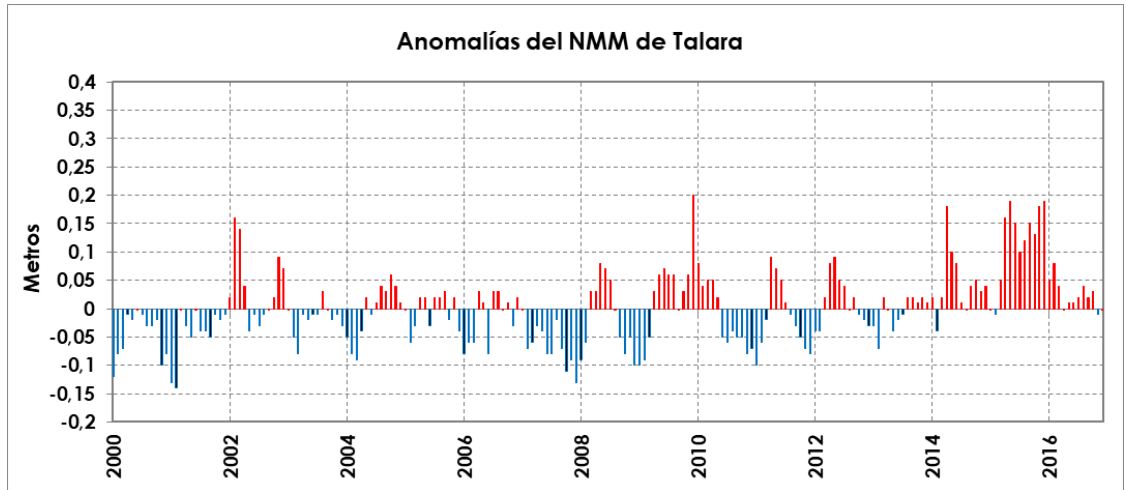
Para cotejar la información de las estaciones de Ecuador, se consideró los datos de la estación de Talara perteneciente a Perú, por ser la estación con más información y más cercana al área de estudio ubicada al sur de Ecuador.



**Figura 15 Gráfica de Anomalías del nivel de mar en Talara desde el 2000-2016.**

**Fuente:** Realizado por el autor en Excel.

Se puede observar que esta gráfica se asemeja más a la gráfica de Puerto Nuevo, se hizo la separación de la data en la gráfica debido a que se consideró los mismos años que se utilizaron para Puerto Nuevo.



**Figura 16 Gráfica de Variaciones del nivel de mar en Talara desde el 2000-2016.**

**Fuente: Realizado por el autor.**

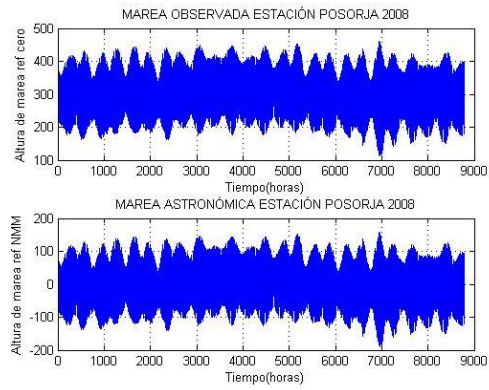
Se puede observar que esta gráfica (Figura15) de anomalías se asemeja más a la Libertad.

Una vez que la data fue revisada se procedió a realizar utilizar dos softwares MatLab con la función de T\_tide y el NMPR2 (Hawái-NOAA) para corroborar las amplitudes y fases del análisis (Anexo 1).

ESTACIÓN	E	N	O1	M2	S2	N2	K2(1)	ZO	K1
POSORJA	-80.25	-2.70	4	88	22	17	10	302	13
PTO NUEVO	-79.92	-2.27	4	157	44	28	14	577	17
LIBERTAD	-80.92	-2.22	3	80	23	18	5	241	11

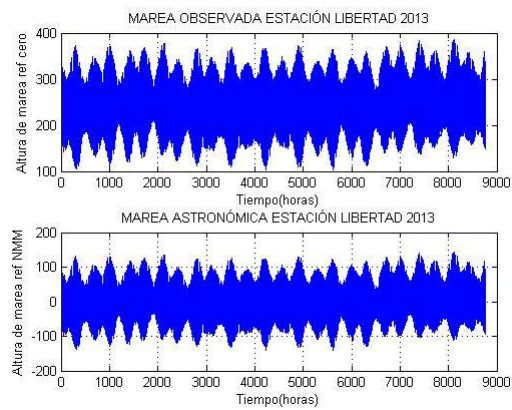
**Figura 17 Tabla de los coeficientes armónicos.**

**Fuente: Realizado por el autor en Excel.**



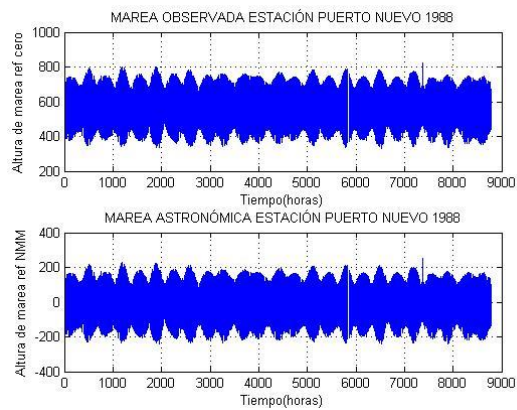
**Figura 18 Gráfica del nivel del mar de la Estación de Posorja del 2008.**

**Fuente: MatLab.**



**Figura 19 Gráfica del nivel del mar de la Estación de La Libertad del 2013.**

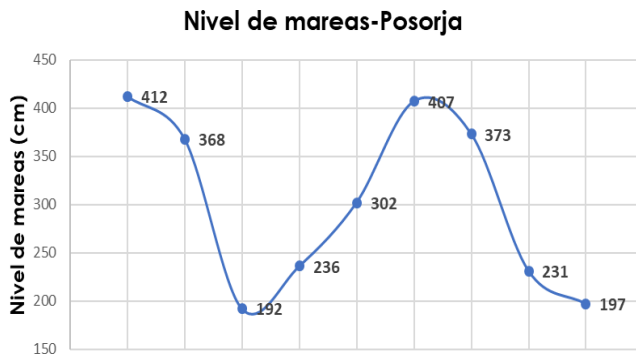
**Fuente: MatLab.**



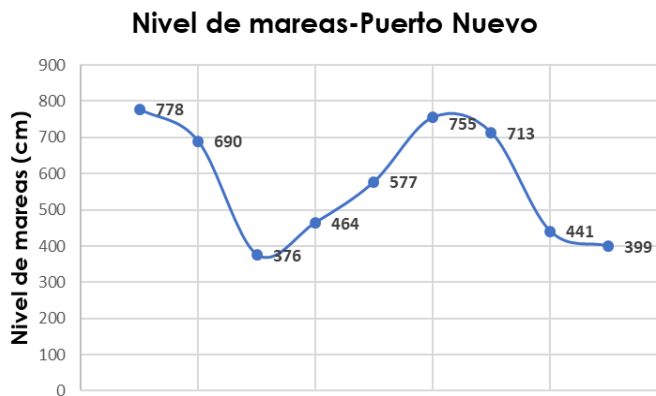
**Figura 20 Gráfica del nivel del mar de la Estación de Puerto Nuevo del 1988.**

**Fuente: MatLab.**

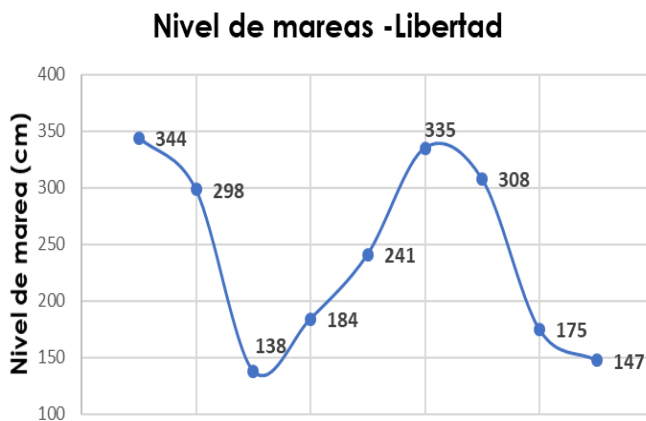
Posteriormente utilizando los armónicos y el manual de Australia (Anexo 2) se obtuvo los niveles del mar haciendo uso de las fórmulas y gráficas de Excel.



MHWS	412
MHWN	368
MLWS	192
MLWN	236
Z0	302
MHHW	407
MLHW	373
MHLW	231
MLLW	197



MHWS	778
MHWN	690
MLWS	376
MLWN	464
Z0	577
MHHW	755
MLHW	713
MHLW	441
MLLW	399



MHWS	344
MHWN	298
MLWS	138
MLWN	184
Z0	241
MHHW	335
MLHW	308
MHLW	175
MLLW	147

El Datum vertical considerado para los puntos fue el de la Libertad y haciendo uso del software Trimble Business Center V.2.70 mencionados se obtuvo la siguiente tabla.

**Tabla 7**

**Comparación de la Ondulación Geoidal.**

PUNTO	HAE(m)	H(NMM)	N(m)	EGM96	EGM08	Geoportal IGN
<b>BM-1 DATA (PLAYAS)</b>	13,196	3,666	9,53	9,519	9,345	9,609
<b>BM-2 Posorja</b>	11,971	2,349	9,622	9,793	9,506	9,465
<b>Isla Puná</b>	13,845	3,3175	10,528	11,549	10,768	10,427
<b>Libertad</b>	15,556	3,76	11,796	11,019	11,234	11,823
<b>Salica1</b>	15,624	5,9678	9,6562	9,786	9,509	9,487

**Fuente: Realizada por el autor.**

Dando como resultado las siguientes diferencias con respecto a la altura ortométrica obtenida mediante nivelación geométrica de cada punto.

**Tabla 8**

**Error absoluto de las alturas ortométricas obtenida de la diferencia de la Nivelación Geométrica de cada punto con respecto a las alturas ortométricas obtenidas por el modelo global y el Geoportal.**

Punto	EGM96	EGM2008	Geoportal
<b>BM-1 DATA (PLAYAS)</b>	0,01	0,18	0,08
<b>BM-2 Posorja</b>	0,17	0,12	0,16
<b>Isla Puná</b>	1,02	0,24	0,10
<b>La Libertad</b>	0,78	0,56	0,03
<b>Salica1</b>	0,13	0,15	0,17
<b>Promedio</b>	0,42	0,25	0,11
<b>ECM</b>	0,58	0,30	0,12

**Fuente: Realizada por el autor.**

**Tabla 9**

**Error absoluto de la nueva altura ortométrica obtenida de la combinación de la ondulación geoidal de los puntos por medio de nivelación geométrica y el EGM-2008.**

Punto	H-Nueva	Error
<b>BM-1 DATA (PLAYAS)</b>	3,697	0,03
<b>BM-2 Posorja</b>	2,311	0,04

Isla Puná	2,923	0,39
La Libertad	4,168	0,41
Salica1	5,961	0,01
Promedio		0,18
ECM		0,25

Fuente: Realizada por el autor.

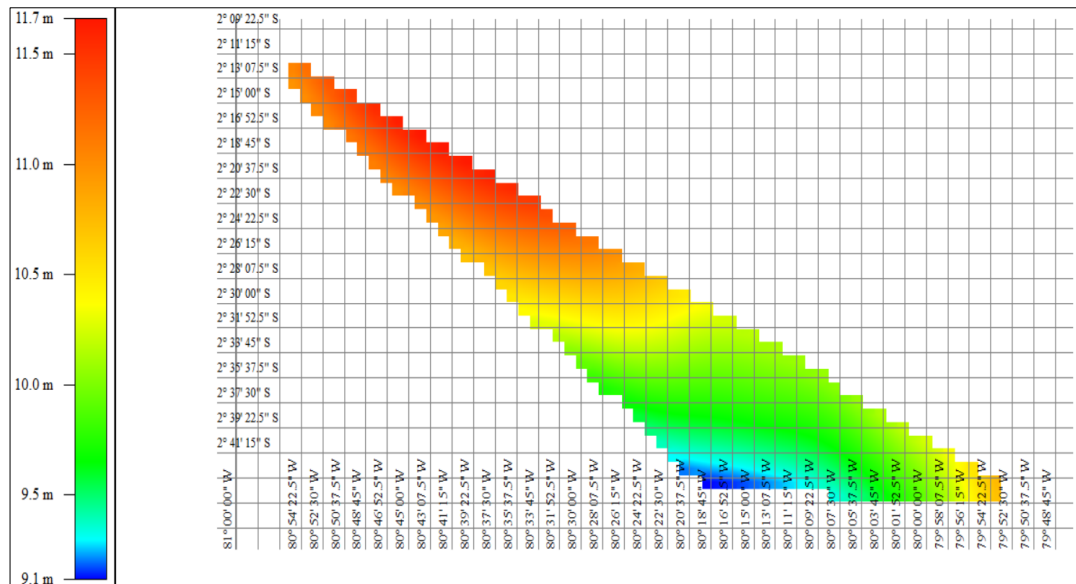


Figura 21 Gráfica de la ondulación geoidal resultante de la combinación del EGM-2008 y la ondulación geoidal obtenida por nivelación geométrica.

Fuente: Global Mapper.

## CONCLUSIONES

- La variación del nivel medio del mar entre las estaciones de Puerto Nuevo (estero), Posorja (estuario) y Libertad (mar abierto) fueron de 5,77 m, 3,02 m y 2,41 m respectivamente por tal razón el Datum óptimo de considerar para referencias en las mediciones de alturas es el de la Libertad.
- El modelo global que más se ajusta a la zona litoral sur del Ecuador es el EGM-08 con un promedio de error absoluto de 0,25 m.
- Los resultados obtenidos del modelo geoidal geométrico del Geoportal del IGM en los 5 puntos tuvieron un error absoluto promedio de 0,11 m mientras que el modelo combinado tuvo un error absoluto promedio de 0,18 m.
- Los modelos globales proporcionan ventajas que deben ser aprovechadas de tal manera que al combinarlos con modelos geométricos de geoide se pueda obtener un nuevo modelo local que aumente la exactitud en las alturas.

## RECOMENDACIONES

- La importancia de redundancia de equipos en las estaciones mareográficas con el fin de poder obtener mediciones durante todo el año permitiendo así un análisis posterior con una mejor data y considerando el manual de la IHO C-13 Cap5 de 19 años.
- Incluir mediciones gravimétricas en las nivelaciones geométrica de tal manera que se agregue este valor de gravedad para obtener una medición más precisa.
- Usar el Geoportal del Ecuador IGM para corroborar las mediciones obtenidas.
- Aprovechar las ventajas de los modelos mencionados, combinándolos para obtener un nuevo modelo local.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Franco García, A. (2016). Obtenido de [http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/mareas/mareas\\_1.html](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/datos/mareas/mareas_1.html)
- Astronomía. (2019). Obtenido de <https://www.astromia.com/solar/lunamareas.htm>
- Bryan, A., Román, A., Santacruz, A., & Tierra, A. (2015). *VALIDACIÓN DEL FUNCIONAL ONDULACIÓN GEOIDAL MEDIANTE MODELOS GLOBALES DEL GEOPOTENCIAL Y OBSERVACIONES TERRESTRES EN EL ECUADOR*. Obtenido de [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/40\\_Andrade\\_et\\_al\\_2015\\_Validacion\\_funcional\\_geoide.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol20/40_Andrade_et_al_2015_Validacion_funcional_geoide.pdf)
- Curso avanzado de posicionamiento por satélite*. (Noviembre de 2009). Obtenido de <http://files.especializacion-tig.webnode.com/200000045-37f1938ef5/TEMA1-Geodesia.pdf>
- EGM08, M. (2009). Obtenido de Leica Geosystems Inc.com
- GeoportalGM-ModeloGeoidal*. (2013). Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/calculo-de-altura-geoidal/>
- Geoportal-IGM*. (julio de 2013). Obtenido de <http://www.geoportaligm.gob.ec/ModeloGeoidal-war/>
- GUTIÉRREZ, I. P. (mayo de 2009). *ANÁLISIS DE LOS MODELOS EGM08, KMS02*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/871>
- Hernández Martínez, J., & Lazcano Sánchez, R. (2017). *Propuesta metodológica para el establecimiento de un sistema de control altimétrico utilizando mediciones geodésicas satelitales, nivelación y gravedad*. México.

- HIDRONAV5172. (2013). *DHN*. Obtenido de <https://www.dhn.mil.pe/Archivos/Oceanografia/normastecnicas/NormasTecnicasHidrograficasN%C2%B043.pdf>
- ICSM. (2018). *Comité Permanente de Mareas y Nivel Medio del Mar*. Australia.
- IGAC. (03 de mayo de 2019). *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*. Obtenido de <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/modelo-geoidal-de-colombia>
- IHO. (1996). *ORGANIZACION HIDROGRAFICA INTERNACIONAL*. Obtenido de *DICCIONARIO HIDROGRAFICO*: [https://www.iho.int/iho\\_pubs/standard/S-32/S-32-SPA.pdf](https://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-32/S-32-SPA.pdf)
- IHO-C-13,cap5*. (2015). Obtenido de [https://www.iho.int/iho\\_pubs/CB/C-13/spanish/C-13\\_Capitulo\\_5.pdf](https://www.iho.int/iho_pubs/CB/C-13/spanish/C-13_Capitulo_5.pdf)
- INEGI. (2019). Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/temas/mapas/geoide/#>
- Instituto Geográfico Nacional -España*. (2 de junio de 2015). Obtenido de <file:///C:/Users/mildred/Downloads/EL%20NUEVO%20MODELO%20DE%20GEODE%20PARA%20ESPA%C3%91A%20EGM08-REDNAP.pdf>
- Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping*. (2014). Obtenido de [https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/2017-09/gda-v\\_2.4\\_0.pdf](https://www.icsm.gov.au/sites/default/files/2017-09/gda-v_2.4_0.pdf)
- International Centre for Global Earth Models*. (2018). Obtenido de <http://icgem.gfz-potsdam.de/home>
- International Service for the Geoid*. (2019). Obtenido de [http://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/America/america\\_sud.html](http://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/America/america_sud.html)
- ISO19111. (05 de mayo de 2007). Obtenido de [file:///C:/Users/mildred/Downloads/Definiciones\\_ISO19111.pdf](file:///C:/Users/mildred/Downloads/Definiciones_ISO19111.pdf)
- Jalón Isabel. (2013). Obtenido de [https://isabeljalonrojas.com/analisis-de-armonicos-de-marea-astronomica-con-t\\_tide/](https://isabeljalonrojas.com/analisis-de-armonicos-de-marea-astronomica-con-t_tide/)

Martinez, E. (10 de noviembre de 2012). SCRIBD. Obtenido de <https://es.scribd.com/presentation/112761815/07-Geodesia-Basica>

Morales, E. R. (2010). *DETERMINACIÓN DIRECTA DEL GEOIDE EN EL SECTOR NORTE DE LA RED*. Obtenido de <file:///C:/Users/mildred/Documents/Hidrograf%C3%ADa%20Per%C3%BA/SEGUNDO%20BIMESTRE/Metodolog%C3%ADa%20de%20la%20investigaci%C3%B3n/GD%20doc-filtrados/184571ramon%20morales.pdf>

OHI. (2008). *Normas de la OHI para los Levantamientos Hidrograficos*.

OHI\_S-44. (2008). *Normas de la OHI para los levantamientos hidrográficos*.

OHI-C13. (2011). *Posicionamiento*.

Oreiro, F., & Arecco, M. (Junio de 2010). Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/327423393\\_MODELO\\_DE\\_GEOIDE\\_LOCAL\\_PARA\\_LA\\_APLICACION\\_DEL\\_SISTEMA\\_RTK\\_EN\\_LEVANTAMIENTOS\\_HIDROGRAFICOS](https://www.researchgate.net/publication/327423393_MODELO_DE_GEOIDE_LOCAL_PARA_LA_APLICACION_DEL_SISTEMA_RTK_EN_LEVANTAMIENTOS_HIDROGRAFICOS)

Peláez, J. (1997). *EGM96. Un Nuevo Modelo de Geoide de Precisión*.

Próspero Díaz. (01 de Febrero de 2013). Obtenido de [http://dicyg.fi-c.unam.mx/~inggeomatica/documentos/Tesis\\_Mariela.pdf](http://dicyg.fi-c.unam.mx/~inggeomatica/documentos/Tesis_Mariela.pdf)

QPS. (2009). *GLOSARIO DE MODELO GEOIDAL*. Recuperado el 16 de abril de 2019, de <https://confluence.qps.nl/qinsy/es/glosario-de-modelo-geoidal-10748619.html#GeoidModelGlossary-ModeloGeoidalparaLevantamientos>

Sailandtrip. (4 de noviembre de 2016). Obtenido de <https://sailandtrip.com/la-marea/>

Soto, L. J. (2017). Obtenido de [https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1591/1/tesis\\_Leyva\\_Soto\\_Leydi\\_Jhissel\\_05\\_junio\\_2017-IMPRESA.pdf](https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1591/1/tesis_Leyva_Soto_Leydi_Jhissel_05_junio_2017-IMPRESA.pdf)

Tierra, A. R. (octubre de 2009). Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/277332100\\_EVALUACION\\_DEL\\_E](https://www.researchgate.net/publication/277332100_EVALUACION_DEL_E)

GM08\_Y\_EGM96\_EN\_EL\_ECUADOR\_A\_PARTIR\_DE\_DATOS\_DE\_GPS\_Y\_NIVELACION\_GEOMETRICA

*Topograf.cat.* (9 de abril de 2015). Obtenido de <http://www.topograf.cat/blog/lamediccionnivelmediomar.html>

## Anexo 1. Script de Matlab usando la función T\_tide.

```
clear all % cierra las ventanas
close all % borra las variables
clc% borra las variables
```

Programa en MatLab que genere gráficos de mareas en referencia del cero instrumental y nivel medio del mar.

ESCUELA DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN  
SCRIPT DE MATLAB PROPORCIONADO POR EL SP. OCEAN JORGE NATH MBA  
EDITADO POR LA ALUMNA: ALFG-SU BARZOLA REYES MILDRED  
INSTRUCTORES: MG. GERARDO RAMÍREZ-MBA. JORGE NATH  
FECHA: 10/05/2019

### Entrada de datos.

```
libertad =
'C:\Users\mildred\Downloads\matlab\DEMG_CADD\DEMG_ttidearmónicos\DEMGliberc.txt';
% ruta del archivo que contiene los datos entre ''
delimiter = ' ';
% delimitado por espacios
```

### Formato y estructura de los datos:

```
column1: double (%f)
column2: double (%f)
column3: double (%f)
column4: double (%f)
column5: double (%f)
```

```
% For more information, see the TEXTSCAN documentation.
formatSpec = '%f%f%f%f%f%[\n\r]';
% especificaciones de formato
%la función lee datos de un archivo de texto abierto en el vector de
%columna A e interpreta los valores en el archivo de acuerdo con el
%formato especificado por formatSpec.
```

### Abrir archivo de texto

```
fileID = fopen(libertad,'r');
%la función establece el indicador de posición del archivo al comienzo de un archivo.
```

### Leer columnas de datos de acuerdo con el formato.

```
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter, 'MultipleDelimsAsOne',
true, 'EmptyValue', NaN, 'ReturnOnError', false);
%la función crea parámetros especificado por la codificación
```

### Cierre el archivo de texto.

```
fclose(fileID);  
%cerrar uno o todos los archivos abiertos
```

## Definición de variables

```
anio = dataArray{:, 1};  
mes = dataArray{:, 2};  
dia = dataArray{:, 3};  
hora = dataArray{:, 4};  
refcero = dataArray{:, 5};
```

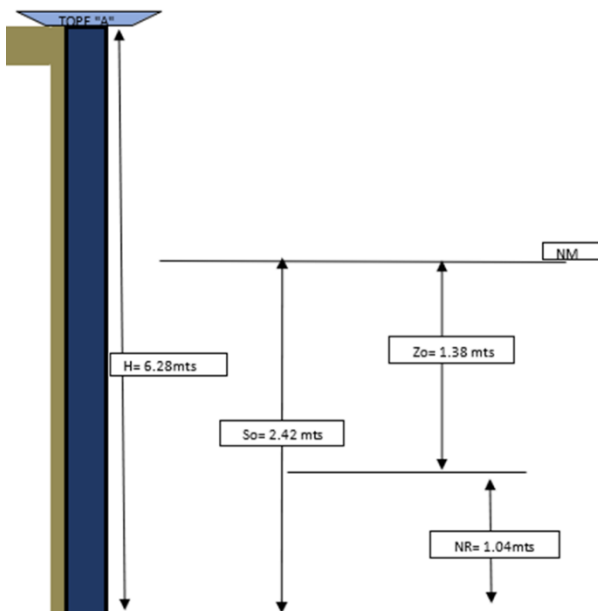
## Borrar variables temporales

```
clearvars libertad delimiter formatSpec fileID dataArray ans;  
%Borrar variables de la memoria  
  
datos_marea = refcero*100;%directo desde el directorio donde esta instalado T_tide  
MEDIO = nanmean(datos_marea)  
  
llong=length(datos_marea);  
estadistica =[length(datos_marea), mean(datos_marea)/100, max(datos_marea)/100,  
min(datos_marea)/100, (max(datos_marea)- min(datos_marea))/100 ]';  
save('estadistica','estadistica')  
  
(datos_marea);  
%[NAME,FREQ,TIDECON,XOUT]=T_TIDE(dados_marea, 'interval',1, 'start  
time',[year,month,day,hour,min,sec],'latitude',-44.6 );  
[NAME,FREQ,TIDECON,XOUT]=t_tide(datos_marea, 'interval',1, 'start  
time',[2013,01,01,00],'latitude',-9754870.5,'output',' analisis_armonicalibertad.xls' );  
  
residual = datos_marea - nanmean(datos_marea);  
  
figure(1)  
subplot(2,1,1)  
plot(datos_marea,'b'),ylabel('Altura de marea ref cero');xlabel('Tiempo(horas)');  
title('MAREA OBSERVADA ESTACION LIBERTAD 2013'),grid  
  
subplot(2,1,2)  
plot(residual,'-b'),ylabel('Altura de marea ref NMM');xlabel('Tiempo(horas)'); title('MAREA  
METEOROLOGICA ESTACION LIBERTAD 2013'),grid
```

## Anexo 2. Determinación de los niveles de referencia.

Se utilizaron los siguientes niveles de referencia de mareas semidiurnas y de mareas diurnas para este estudio.

<b>Mareas semidiurnas</b>		
Mean High Water Springs	Nivel de Marea Viva o de sicigia Media Superior.	$MHWS = Z_0 + (M_2 + S_2)$
Mean High Water Neaps	Nivel de Marea Muerta o de cuadratura Media Superior.	$MHWN = Z_0 +  M_2 - S_2 $
Mean Low Water Springs	Nivel medio de las bajamares en sicigia.	$MLWS = Z_0 - (M_2 + S_2)$
Mean Low Water Neaps	Nivel de Marea Muerta o de cuadratura Media Inferior.	$MLWN = Z_0 -  M_2 - S_2 $
<b>Mareas diurnas</b>		
Mean Higher High Water	Nivel de pleamar Media superior.	$MHHW = Z_0 + (M_2 + K_1 + O_1)$
Mean Lower High Water	Nivel de Pleamar Media Inferior.	$MLHW = Z_0 +  M_2 - (K_1 + O_1) $
Mean Higher Low Water	Nivel de Bajamar Media Superior.	$MHLW = Z_0 -  M_2 - (K_1 + O_1) $
Mean Lower Low Water	Nivel de bajamar media inferior.	$MLLW = Z_0 - (M_2 + K_1 + O_1)$



H	Altura de la regla.
So	Amplitud del nivel medio del.
NM	Nivel medio del mar.
NR	Nivel de referencia (INOCAR)
Zo	Diferencia entre el So y el NR.

La Libertad-2013

### **Anexo 3. Softwares utilizados para el modelo geoidal.**

Para la obtención y estimación de la Ondulación Geoidal realizada en este trabajo, se utilizaron:

Trimble Business Center V2.70



ArcGis V10.5.



Global Mapper V21.0



Geoportal IGM-2013.

