

MODELO LOCAL DE ANOMALÍAS DE LAS ALTURAS PARA LA ZONA ESPECIAL DE DESARROLLO MARIEL (ZEDM).

THE ANOMALIES OF THE HEIGHTS LOCAL MODEL FOR THE MARIEL SPECIAL DEVELOPMENT ZONE (ZEDM)

Yoenis Rodríguez Barrientos¹

1 Academia Naval “Granma”, Cuba, yoenisrodriguezbarrientos@gmail.com

RESUMEN: El modelo de anomalías de las alturas para la Zona Especial de Desarrollo Mariel, es una rejilla de los valores correspondientes, espaciados uniformemente en latitud y longitud, creado en formatos adecuados para la interpolación y el empleo de programas comerciales de la tecnología GNSS. Se desarrolló usando los valores de la separación lineal entre las superficies de los Datum Vertical local y mundial de las altitudes y las anomalías de las alturas interpoladas del modelo Cuba2017. Se creó un modelo que sustituye y representa el Datum Vertical local de las alturas y que permite determinar alturas normales con exactitudes comparables a las de cuarto orden de nivelación geométrica, proporcionando el ahorro de recursos humanos, financieros, logísticos y de tiempo.

Palabras Clave: alturas normales; modelos de referencia y separación lineal entre los Datum Vertical local y mundial de las altitudes; modelo local de las anomalías de las alturas.

ABSTRACT: *The anomalies of the heights local model for the Mariel Special Development Zone is a grill of the spaced corresponding values evenly in latitude and longitude, created in appropriate formats to use it for interpolation and employment of the commercial Software of the GNSS technology. It was developed using values of the lineal separation between the surfaces of the local and world Vertical Datum of the altitudes and anomalies of the heights interpolated of the Cuba2017. It was created for substituting and representing the local Vertical Datum of the heights and it is applied to determine normal heights with comparable accuracies to those of the*

“Revista Cubana de Geomática”

fourth order of geometric leveling, providing savings of human, financial, logistical and time resources.

KeyWords: *normal height; reference models and lineal separation between the local and world Vertical Datum of the altitudes; the anomalies of the height local model*

Recibido: 09/08/2022

Aprobado: 10/10/2022

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de un sistema de referencia para las alturas, ha sido siempre un tema de gran interés. En este contexto, se han desarrollado múltiples técnicas y metodologías para establecer una superficie de referencia sobre la cual sea posible basar las mediciones de altura a nivel local y global. El geoide, como superficie de nivel convencional de referencia, ha sido el foco principal de muchas investigaciones en las que se han desarrollado varios métodos para determinar su figura, dentro de ellos, el método tradicional o conservador de la integral de *Stokes*. La solución de *Stokes* se basa en dos premisas importantes: que no existan masas atrayentes fuera del geoide y que la gravedad debe ser medida en esta superficie; por lo tanto, para el desarrollo de este método, se deben conocer o estimar de alguna manera, la densidad de las masas entre el geoide y la superficie terrestre, lo cual resulta prácticamente imposible, siendo necesario plantear diferentes hipótesis al respecto. En el año 1945, el geodesta ruso *Mikhail Sergeevich Molodensky* propone un método alternativo al de *Stokes*, donde menciona que la tarea fundamental de la Geodesia es determinar el campo gravitacional externo y la superficie terrestre, donde se incluyen las alturas normales. Con la teoría de *Molodensky* se alcanza una nueva etapa en la modelación de la figura terrestre, ya que determinar el geoide únicamente por métodos geodésicos y sin usar hipótesis sobre la estructura terrestre, es completamente imposible, es por ello, que en Cuba las alturas están referidas al sistema de alturas normales, que emplea como superficie de referencia al cuasigeoide, utilizándose como Datum altimétrico el Sistema de Alturas Siboney.

Actualmente, las autoridades cubanas prestan cada vez mayor atención al desarrollo económico del país como elemento indispensable para mantener las conquistas sociales alcanzadas, teniendo en cuenta las difíciles condiciones que para nuestra economía ha creado el bloqueo norteamericano. La creación de la Zona Especial de Desarrollo Mariel (ZEDM), constituye un eslabón importante dentro de esa estrategia, donde los trabajos para su creación y desarrollo han generado un gran volumen de trabajos topo-geodésicos, asociados a la construcción de diferentes obras ingenieras que allí se emplazan, para ello, la obtención de alturas normales resulta un aspecto de gran relevancia, tema sobre el cual se fundamenta la presente investigación con los siguientes objetivos:

- a. Recopilar, revisar y evaluar los materiales disponibles dentro de los límites de la ZEDM.
- b. Crear un modelo local de anomalías de las alturas para realizar densificaciones altimétricas, con el empleo de la tecnología *GNSS* adecuada para proyectos de ingeniería.

c. Validar el modelo local de anomalías de las alturas creado en los límites de la ZEDM.

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales y métodos

Los principales materiales iniciales recopilados, revisados y evaluados para obtener los resultados previstos fueron:

- ✦ Las coordenadas geodésicas elipsoidales (latitud, longitud y altura elipsoidal) de las estaciones resultantes del procesamiento y ajuste final del proyecto: *Creación de una red geodésica de alta precisión por técnicas GNSS que sirva de apoyo a los trabajos de posicionamiento geodésicos con la instalación de una estación permanente y la creación de un geoide local destinado a garantizar la obtención de alturas ortométricas de IV orden por la denominada Nivelación GNSS.*
- ✦ Las alturas normales (H_D) de las estaciones de la Red GNSS referidas al Datum Vertical, obtenidas como resultado de un conjunto de líneas de nivelación de segundo y tercer orden.
- ✦ Para la obtención de los datos del campo gravitatorio de la Tierra, los modelos de referencia el Modelo Gravitacional de la Tierra *EGM2008* dado en Acosta Gutiérrez, Rueda, Rodríguez Roche y García, (2013) y el modelo Cuba2017 en Acosta Gutiérrez,(2017).
- ✦ La aplicación *ClenqtM_2190.exe* modernizada en Acosta Gutiérrez, (2012a) y en Acosta Gutiérrez, (2012b) para obtener los valores de las características gravitacionales de la zona de estudio.
- ✦ La aplicación *GEOID.exe* para calcular los valores las anomalías de las alturas del modelo regional Cuba2017.geodados en *Dru Smith and Denis Milbert*, (1997)

En correspondencia con la disponibilidad de los datos astrogeodésicos, gravimétricos y altimétricos o con la existencia de algún modelo local o mundial moderno y preciso; la determinación de las anomalías de las alturas se ha realizado empleando los siguientes procedimientos: (Rodríguez Barrientos, 2019)

- a. Empleo de los métodos astrogeodésicos, gravimétricos y astrogravimétricos.
- b. Utilización de modelos locales y globales desarrollados a partir de datos heterogéneos (astrogeodésicos, gravimétricos, altimétricos, etc.).
- c. Métodos combinados (usando los métodos dados en los incisos a y b).
- d. Mediciones *GNSS* en estaciones con alturas normales conocidas.
- e. Aplicación de los resultados de las mediciones *GNSS* en estaciones con alturas normales conocidas y un modelo de referencia local o global moderno y preciso.

Para obtener los diferentes resultados en el proceso de desarrollo del modelo de las anomalías de las alturas para las condiciones de la ZEDM, se utilizó como método general, la aplicación de los resultados de las determinaciones GNSS en estaciones con alturas normales conocidas y un modelo de referencia global moderno y preciso y como métodos parciales:

- Cálculo de las anomalías geométricas de las alturas.
- Cálculo de las anomalías de las alturas del modelo de referencia regional o mundial, moderno y preciso, adecuadamente seleccionado.
- Determinación y evaluación estadística de los valores de la separación lineal entre los Datum Vertical local y Mundial de las altitudes en el territorio de la ZEDM.
- Obtención de un modelo de la distribución y de la variación espacial de los valores de la separación lineal entre los Datum Vertical local y Mundial de las altitudes en el territorio de la ZEDM.
- Creación del modelo de las anomalías de las alturas para las condiciones de la ZEDM.
- Evaluación de la exactitud y de la aplicabilidad del modelo ZEDM.geo para determinar alturas normales mediante nivelación GNSS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para desarrollar el modelo de anomalías de las alturas, mediante la aplicación de los resultados de las determinaciones GNSS en estaciones con las H_D conocidas y un modelo de referencia global moderno y preciso, se desarrolló aplicando los métodos parciales anteriormente mencionados.

3.1 Cálculo de las anomalías geométricas de las alturas

Los valores de las anomalías geométricas de las alturas se determinaron usando las alturas elipsoidales (h) referidas al Datum mundial establecido en el Marco Terrestre Internacional de Referencia del 2014 (*ITRF2014*, por sus siglas en inglés) y las alturas normales (H^N) referidas al Datum local para las estaciones recopiladas y evaluadas de los procesos anteriores, según la teoría de *Molodensky* que responde a la expresión: (Rodríguez Barrientos, 2019).

$$\zeta_{geom} = h - H^N \quad (1)$$

Los resultados estadísticos de los valores de las anomalías geométricas, de las alturas calculadas para las estaciones *GNSS* coincidentes con estaciones de nivelación geométrica de I, II y III orden, dieron los valores: mínimo igual a -21,532 m en la estación 3685-319, máximo de -19,418 m para la estación 34, promedio igual a -20,645 m y una desviación estándar media igual a 0,514 m.

3.2 Cálculo de las anomalías de las alturas del modelo de referencia regional o mundial, moderno y preciso, adecuadamente seleccionado

Como referencia para desarrollar este proceso en Acosta Gutiérrez, (2012) se determinó que: el Modelo Gravitacional de la Tierra *EGM2008* es el más conveniente por aportar los resultados

estadísticos más ventajosos considerando como premisa la creación de una red espacial en un Sistema de Referencia Geocéntrico compatible con el *ITRF* más actualizado, y en Acosta Gutiérrez (2017) se presentó el modelo de anomalías de las alturas Cuba2017, para determinar alturas normales con exactitudes de segundo orden e inferiores en el territorio nacional. Es por ello que, se recomienda utilizar dichos modelos como referencias para calcular las anomalías de las alturas para las condiciones del territorio de la ZEDM. Se realizó el cálculo de las anomalías de las alturas para las 238 estaciones donde las características gravitacionales usando el modelo *EGM2008* se calcularon mediante la aplicación *Clenq2160.exe* y mediante el programa *GEOID.exe*, con el fichero Cuba2017.geo del modelo de las anomalías de las alturas y el fichero de configuración *.par, se interpolaron las anomalías de las alturas de este modelo.

3.3 Determinación y evaluación estadística de los valores de la separación lineal entre los Datum Vertical local y Mundial de las altitudes en el territorio de la ZEDM

La evaluación estadística de los valores de la separación lineal ($\Delta\zeta$) entre los Datum Vertical local y Mundial de las altitudes se efectuó utilizando los datos de las estaciones disponibles, para ello se manejaron las altitudes elipsoidales referidas al *ITRF2014* y las anomalías de las alturas interpoladas de los modelos de referencias *EGM2008* y Cuba2017 mediante la expresión: (Rodríguez Barrientos, 2019)

$$\Delta\zeta = (h_{ITRF2014} - H_D) - \zeta_{\text{modelo de referencia}} \quad (2)$$

En la expresión (2), la diferencia entre la altura elipsoidal referida al *ITRF2014* ($h_{ITRF2014}$) y las alturas normales H_D referidas al Datum Vertical local arrojan como resultado la anomalía geométrica de las alturas (ζ_{geom}). Por tanto, al sustituir las correspondientes anomalías geométricas en la expresión (2), ella se transforma en la siguiente expresión:

$$\Delta\zeta = \zeta_{geom} - \zeta_{mundial} \quad (3)$$

En la expresión (3), la anomalía de la altura mundial ($\zeta_{mundial}$) es el valor interpolado usando los modelos de referencias *EGM2008* y Cuba2017.

Al aplicar la expresión anterior, utilizando el modelo Gravitacional de la Tierra *EGM2008* y el modelo de las anomalías de las alturas Cuba2017 como modelos de referencias, se obtienen como resultado la separación lineal entre el Datum Vertical local y mundial de las altitudes, mostradas en los gráficos que se observan en las (Figs.1 y 2), donde la línea de tendencia de la serie de datos es representada mediante un polinomio de sexto grado de color rojo, confeccionado en una hoja de Microsoft Excel; los puntos de datos se representan mediante círculos de un mayor diámetro rellenos. Del total de las estaciones consideradas, fueron eliminadas aquellas cuya separación lineal fue superior a los 21.0 centímetros.

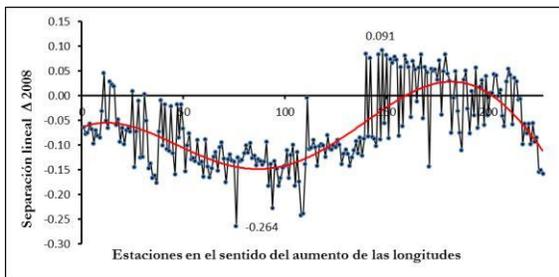


Figura.1: Separación lineal $\Delta\zeta$ EGM2008.

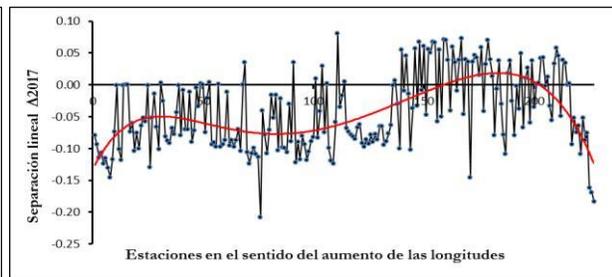


Figura.2: Separación lineal $\Delta\zeta$ Cuba2017.

La evaluación estadística de dichas desviaciones, utilizando ambos modelos EGM2008 y Cuba2017 como modelos de referencias, se puede observar en la (tabla 1):

Tabla 1: Valores estadísticos de las desviaciones utilizando ambos modelos EGM2008 y Cuba2017 como modelos de referencias.

Características estadísticas	$\Delta\zeta$ EGM2008 (m)	$\Delta\zeta$ Cuba2017 (m)
Valor máximo	0.091	0.081
Valor mínimo	-0.264	-0.208
Valor promedio	-0.068	-0.044
Desviación estándar media	0.077	0.060
Error medio cuadrático M	0.005	0.004
Cantidad de datos	227	227

3.4 Obtención de un modelo de la distribución y de la variación espacial de los valores de la separación lineal entre los Datum Vertical local y Mundial de las altitudes en el territorio de la ZEDM

Para el área del proyecto se obtuvo, mediante el uso del método validación cruzada con mínima curvatura de creación de rejillas de datos espaciados 30 x 30 segundos y de mapeo del *Surfer Golden Software*, el mapa esquema del modelo inicial de la distribución y variación espacial de los valores de la $\Delta\zeta$ obtenidas con el modelo Cuba2017, con isóneas trazadas a intervalos de 0.5m. El mapa esquema, dado en la (Fig. 3), para la fase de preparación y diseño puede ser considerado como el modelo de la distribución y variación espacial de las diferencias iniciales definitivas entre los Datum Vertical local y mundial de las altitudes. En dicho modelo, las $\Delta\zeta$ se representan con una marcada dependencia de la posición espacial de las estaciones *GNSS* coincidentes con estaciones de nivelación geométrica y del desconocimiento de la superficie topográfica de la dinámica del océano en el espacio de la costa norte de la zona y los límites de la rejilla que cubre el área del proyecto.

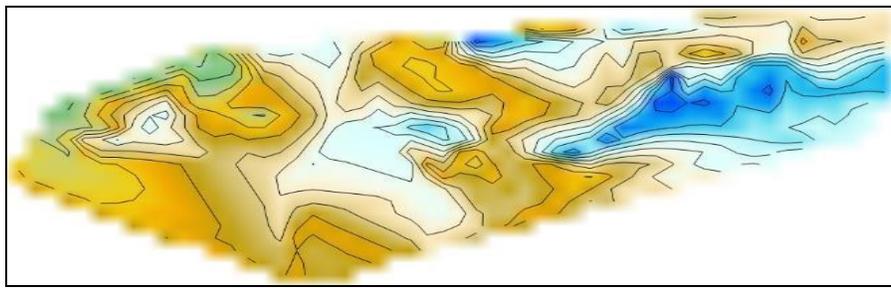


Figura.3: Modelo de las diferencias entre los Datum Vertical local y Mundial de las altitudes.

3.5 Creación del modelo de las anomalías de alturas para las condiciones de la ZEDM

Para el área del proyecto se obtuvo, mediante el uso del método validación cruzada con mínima curvatura de creación de rejillas de datos espaciados 30 x 30 segundos y de mapeo del *Surfer Golden Software*, el mapa esquema del modelo inicial de las anomalías de las alturas para la ZEDM a partir de las anomalías del modelo de referencia Cuba2017, considerándolo en este caso como Datum mundial de las altitudes, corregido con los valores de la distribución y variación espacial de los valores de la $\Delta\zeta$ con isolíneas trazadas a intervalos de 0,5m, teniendo la rejilla resultante: 241 líneas y 241 columnas para un total de 58081 datos, siendo los valores: mínimo 26.007m, máximo -16.368m, promedio -21.170m, la desviación estándar 3.302m y el error estándar igual a 0.014m como las características estadísticas principales.

En esta rejilla ZEDM.grd, mediante líneas de igual anomalía (isoanómalas), como mediante la variación de la tonalidad de colores, se representaron los valores que adquirieron las anomalías de las alturas (Fig. 4)

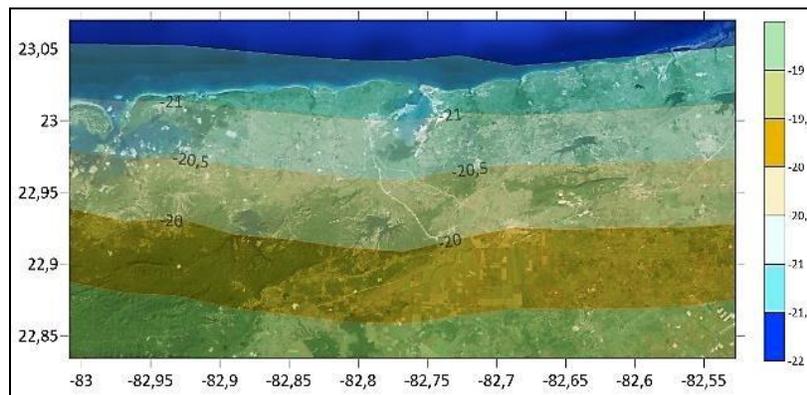


Figura. 4: Modelo local de las anomalías de las alturas para la ZEDM.

Con la utilización de la rejilla de datos del modelo inicial de las anomalías de las alturas ZEDM.grd, empleando la opción de conversión del *Surfer Golden Software*, se generó un fichero de datos ZEDM.dat transformado luego en un fichero de datos ZEDM.asci usando el programa Dat2geo.exe dado en Villafruela R. E, (2000), y a partir del fichero ZEDM.asci, con el apoyo del programa geogrd.exe se generó el fichero ZEDM.geo.

Finalmente, se creó el fichero de anomalías de las alturas en dos variantes de ficheros, en la primera se genera el fichero ZEDM.geo para interpolar los valores usando el programa GEOID.exe del

Servicio Geodésico Norteamericano (*NGA*, por sus siglas en inglés) y en la segunda se crea el fichero *ZEDM.gem* para emplearlo con los *Software* de procesamiento de la Firma Leica Geosystem.

3.6 Evaluación de la exactitud y de la aplicabilidad del modelo *ZEDM.geo* para determinar alturas normales mediante nivelación GNSS

Mediante el programa *GEOID.exe*, con el fichero *ZEDM.geo* del modelo de anomalías de las alturas y el fichero de configuración *.par, se interpolaron las anomalías de las alturas para un total de 73 estaciones, representando un 32.16 %, del total de estaciones iniciales utilizadas para generar el modelo, resultantes del proyecto: desplazamientos horizontales y verticales en los tramos del ferrocarril e inspección visual de la doble vía Habana-Mariel, cuyas alturas tienen exactitudes de II categoría y no fueron empleadas para calcular las diferencias entre los Datum Vertical local y mundial de las altitudes.

Mediante Nivelación *GNSS* se determinaron las alturas normales y luego las desviaciones entre ellas y las alturas normales conocidas (H_D) usando la siguiente expresión:

$$H_n = h_{ITRF} - \zeta_{\text{modelo creado}} \quad (4)$$

A partir de la serie de valores de las desviaciones entre las H_N mediante nivelación *GNSS* y las H_D , ploteadas por el eje vertical para las estaciones a lo largo del eje horizontal en el sentido del aumento de las longitudes del Oeste hacia el Este, se construyó la (Fig. 5).

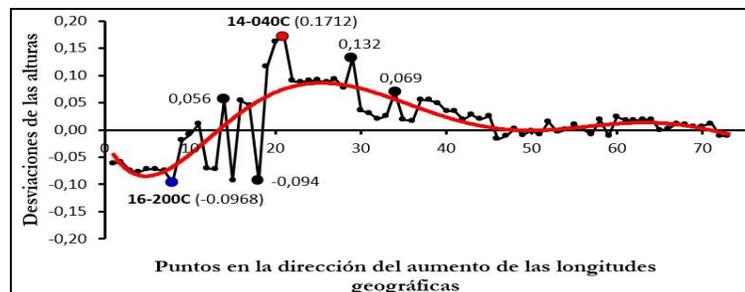


Figura. 5: Desviaciones entre H_N y H_D .

Como se puede apreciar de la (Fig. 5), la línea de tendencia de la serie de datos, representada mediante un polinomio de sexto grado de color rojo, demuestra que los valores de las desviaciones de las alturas tienden a disminuir de la posición del Datum Vertical desde el Oeste hacia el Este, representado ahora por el modelo de las anomalías de las alturas *ZEDM.geo*. En la misma, los puntos de datos se representan mediante círculos rellenos de color negro.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las comparaciones anteriormente realizadas, se aprecia que:

- a. Es conveniente aclarar que en el error de los valores de las anomalías geométricas de las estaciones *GNSS* ($e_{\zeta_{geom}}$), influyen directamente los errores cometidos en la determinación

de las altitudes elipsoidales *GNSS* referidas al Datum mundial ($e_{h_{ITRF2014}}$) y los errores de las alturas normales referidas al Datum Vertical local (e_H).

$$e_{\zeta_{geom}} = e_{h_{ITRF2014}} + e_H \quad (5)$$

- b. Como se puede observar en la Tabla 1, la separación lineal como promedio que se obtiene cuando se emplea el modelo Cuba2017 es inferior a la que se obtiene usando el modelo *EGM2008*, por tanto, el modelo de anomalías de las alturas Cuba2017 es el adecuado a emplear como modelo de referencia.
- c. A partir de los resultados obtenidos en la generación del mapa esquema (Fig.3) de la distribución y variación espacial de las diferencias iniciales definitivas entre los Datum Vertical y Mundial de las altitudes, se observa que la calidad del mismo usando el método validación cruzada con mínima curvatura de creación de la rejilla de datos del *Surfer Golden Software*, depende de la existencia de una densidad uniforme de datos en toda la superficie abarcada. Sin embargo, los datos estadísticos de la rejilla de salida obtenida son muy cercanos a los datos estadísticos de la población de datos iniciales.
- d. Al considerar que, como promedio las desviaciones entre las alturas H_N determinadas mediante nivelación *GNSS* y las alturas conocidas H_D es inferior a los -2,0cm y el error estándar inferior a 1.0cm, dicho modelo puede ser adoptado como Datum Vertical y aplicado para determinar alturas normales de IV orden en la ZEDM, mediante el fichero ZEDM.gem para emplearlo con los *Software* de procesamiento de la Firma Leica Geosystem.
- e. Los valores máximo y mínimo que adquiere la línea de tendencia que se observan en la Fig. 5, iguales a -8.0cm y -9.0cm al Oeste de la estación 12-I respectivamente, indican la necesidad de verificar tanto el tiempo de las mediciones *GNSS* como los resultados del procesamiento. Además, es conveniente estar seguros de que los resultados del procesamiento de las líneas de nivelación geométrica son correctos. Lo anteriormente planteado permitiría mejorar los resultados de la validación.

4. CONCLUSIONES

- a. Para la creación del modelo local de anomalías de las alturas se utilizaron estaciones *GNSS* coincidentes con estaciones de nivelación geométrica de primero, segundo y tercer orden de precisión.
- b. El modelo de las anomalías de las alturas Cuba2017 fue el adecuado para emplearlo como modelo de referencia.
- c. Se creó un modelo local de anomalías de las alturas mediante la aplicación de los resultados de las mediciones *GNSS* en estaciones con las alturas normales conocidas y un modelo de referencia local o mundial, moderno y preciso.

- d. Se validó el modelo local de anomalías de las alturas, donde los resultados obtenidos demuestran que dicho modelo puede ser adoptado como Datum Vertical y aplicado para determinar alturas normales de IV orden en las condiciones de la ZEDM.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta Gutiérrez, R. P., José S. Rueda. P., Ernesto Rodríguez R., y Jorge García D. (2013). Empleo del Modelo Gravitacional EGM2008 en Cuba. AG 28 en Memorias VI Congreso Agrimensura. Hotel Habana Libre. La Habana, Cuba, 24/27/09/2013. Editorial Obras, ISBN: 978- 13p.
2. Acosta Gutiérrez, R. P. (2002a). Modelo del Geoide Cuba 2000. Informática 2002 (SimpLac 2002 ISBN: 959-237-079-6). Ciudad de la Habana. Cuba. 11p.
3. Acosta Gutiérrez, R. P.(2012). Evaluación de la calidad de las características del campo gravitacional existente para modernizar la Red Geodésica Estatal de la República de Cuba. Proyecto de Investigación y Desarrollo. GEOCUBA UCT Investigación y Consultoría. La Habana Cuba.
4. Acosta Gutiérrez, R. P.(2017). Modelo de las anomalías de las alturas para las condiciones de Cuba. Informe Técnico No. 5 / 2017. Tercera Etapa de la FOR. PDT “Modelo de las anomalías de las alturas para las condiciones de Cuba. ONHG - GEOCUBA Investigación y Consultoría. La Habana. Cuba. 26p.
5. Acosta Gutiérrez, R. P. (2012b). Definición, determinación y evaluación de la calidad de las características gravitacionales necesarias y de la información existente. Informe de Resultados, UCT GEOCUBA Investigación y Consultoría. La Habana. Cuba. 27p.
6. *Dru Smith and Denis Milbert.(1997). National Geodetic Survey Computation Program (Version 3.10). Systems development Division.*
<http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/geoid.html>.
7. Rodríguez Barrientos, Y.(2019). Modelo local de las anomalías de las alturas en la Zona Especial de Desarrollo “Mariel”. Tesis de Maestría. GEOCUBA UCT Investigación y Consultoría. La Habana. Cuba.
8. Villafruela R. E. (2000). Programa Dat2geo.exe para transformar ficheros *.dat a ficheros *.asc. Holguín, Cuba.