

Modelación del geoide en presas de colas de la región minera de Moa

Yordany Esteban Batista-Legrá
Santiago Bernal-Hernández
Orlando Belete-Fuentes

Resumen

El presente trabajo tuvo el propósito de determinar el modelo del geoide en las presas de colas de la región minera de Moa, con el fin de obtener las alturas de puntos sobre la superficie del terreno con la exactitud que requiere el movimiento de tierras, para lo cual fueron empleados los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS). Se aplicaron métodos de Topografía Minera, Geodesia Física, Hidrografía, Oceanografía, Cartografía Digital y Modelación y se integraron diferentes softwares para procesar la información obtenida en los experimentos. Como resultado se ofrece un nuevo método para determinar el modelo del geoide, la implementación de un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la modelación y un estudio del nivel medio del mar en la costa de Moa.

Palabras clave: geoide; modelación; levantamiento gravimétrico; presas de cola; sistemas de posicionamiento global.

Geoide modeling for the tailings pond located in the mining region of Moa

Abstract

The objective of this investigation was to determine the geoide model for the tailings pond located in the mining region of Moa in order to calculate the heights of the locations above ground level with the accuracy required for earthworks using the Global Positioning Systems (GPS, acronym in English). Various methods were implemented such as; Mine Topography, Physical Geodesy, Hydrography, Oceanography, Digital Mapping and Modeling with the integration of different software for processing the information obtained from the experiments. As a result, a new method was provided to determine the Geoide model, the implementation of the Geographic Information System (GIS, acronym in Spanish) for modeling and an assessment of the average sea level in the coast of Moa.

Keywords: Geoide; modeling; gravity survey; tailings pond; global positioning system.

1. INTRODUCCIÓN

La palabra geoide significa "forma de la Tierra" y se define como la superficie equipotencial más aproximada al nivel de los océanos en estado de reposo y prolongada por debajo de los continentes, debido a la distribución no uniforme de las masas en el cuerpo de la tierra el geoide adopta una forma compleja y ondulada (Desdin 2009). Con el desarrollo científico técnico y el avance de nuevas tecnologías el hombre ha logrado discernir con mayor exactitud la figura real de la tierra, aplicando tecnologías satelitales como el sistema de posicionamiento global o GPS, por sus siglas en inglés (Acosta-Gutiérrez 2005).

En la industria cubana del níquel, durante varios años, en los procesos de exploración geológica y explotación minera en los yacimientos lateríticos se realizan las mediciones topográficas con los sistemas de posicionamiento global, donde se han obtenido avances significativos en la determinación de la posición planimétrica de puntos sobre la superficie terrestre, no siendo así en la obtención altimétrica (Belete-Fuentes 2008); lo cual está influenciado por las irregularidades que presenta la figura física de referencia, denominada geoide, en el territorio nacional.

En las presas de colas pertenecientes a la industria cubana del níquel, que se encuentran actualmente en operaciones, se realizan trabajos de movimientos de tierras con el objetivo de subir el nivel de los diques y, a su vez, realizar los estudios correspondientes para aumentar la capacidad de almacenamiento. En trabajos topográficos realizados anteriormente por la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel (Ceproniquel) en las presas de colas se incorporó la tecnología de los sistemas de posicionamiento global, con el objetivo de controlar el volumen de tierra para la construcción de los diques, pero la exactitud en la determinación de las alturas excedió las tolerancias establecidas por las normas cubanas.

El presente trabajo representa una investigación que satisface necesidades concretas relacionadas con la actividad de la topografía minera, su propósito es mejorar la utilización de la tecnología de los sistemas de posicionamiento global en las presas de colas, a partir de un procedimiento que posibilite la modelación del geoide para obtener valores de coordenadas altimétricas que garanticen las exigencias establecidas por las normas cubanas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de la investigación se seleccionó la presa de colas de la fábrica Comandante Ernesto Che Guevara, ubicada en el extremo

oriental de la provincia de Holguín, municipio de Moa. Geográficamente limita al norte con el océano Atlántico, al sur y este con el río Moa y por el oeste con la dársena de Yaguasey, donde está enclavado el puerto de Moa, precisamente bajo el criterio de su ubicación geográfica fue escogida para los experimentos ya que el geoide tiene mayor deformación en la orilla de los mares y océanos (Rodríguez-Roche 1995). Para darle cumplimiento al objetivo propuesto se realizaron varios trabajos preparatorios en campo y gabinete, se identificó la precisión necesaria para obtener los datos del modelo, las necesidades actuales y futuras de la minería, así como el equipamiento, los métodos y los resultados de los proyectos anteriormente ejecutados.

2.1. Trabajos preparatorios

El análisis bibliográfico posibilitó el análisis y la síntesis de los elementos fundamentales para la investigación. Durante la revisión se identificaron las tendencias actuales siguientes:

1. En Cuba, generalmente, las empresas que cuentan con la tecnología GPS la explotan para crear redes de apoyo solo para la posición planimétrica, aunque se han ejecutado trabajos de levantamientos, pero con la finalidad de actualizar los planos a escala 1:25000, 1:10000 y el control fotográfico, determinando las alturas (GPS), con el modelo del Geoide Global EGUM 96.
2. Se determinó un modelo del geoide para el país llamado modelo Cuba 2000 (Acosta-Gutiérrez 2001). En la investigación se aplicó como recurso la nivelación astrogravimétrica, que más tarde Desdin la utilizó con el objetivo de tener información vertical, alcanzando precisiones por encima de los 20 cm.
3. A nivel internacional existen modelos de geoides locales, obteniéndose por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos las máximas precisiones menores a un centímetro, a través de técnicas satelitales de alta resolución.

2.1.1. Recopilación de la información

Primeramente se localizó la información sobre la exactitud que se necesita para el modelo. Se realizó una revisión de la norma cubana RC 3011 (Relleno General 1987), verificando su aplicación en la presa de colas donde, al consultar, se pudo identificar las tolerancias admisibles siguientes:

- | | |
|-----------------------------|-----------|
| a) Niveles de la superficie | +/- 10 cm |
| b) Alineación | +/- 20 cm |

c) Pie de talud + 50 cm

Teniendo en cuenta la tolerancia altimétrica por norma de +/- 10 cm y los criterios de Desdin (2009) sobre las precisiones obtenidas con los modelos existentes (mayores de 20 cm) se justifica la investigación del modelo del geoide con precisiones menores a la establecida por la norma cubana RC 3011.

Se recopilaron datos de 4 puntos de I orden, pertenecientes a la línea geodinámica Los Indios a Santa María, con coordenadas altimétricas y valores de aceleración de la gravedad (Tabla 1); los mismos se encuentran en los límites de la zona a estudiar con el objetivo de validar el modelo creado.

Tabla 1. Puntos de I orden de la línea geodinámica

Punto	Altura (m)	Aceleración de la gravedad (miligal)
PR-1	4,076	976366,457
PR-2	3,451	976566,388
PR-3	3,628	970168,574
5277-55-A	11,604	982071,3002

Se cuenta con la red geodésica de apoyo para la presa de colas, un total de 46 puntos creados por el método de levantamiento directo con estaciones totales por la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel en el año 2009.

2.1.2. Selección del método para la determinación del modelo del geoide

Los métodos que existen para la modelación del geoide son los siguientes:

- Método gravimétrico
- Método de diferencia de alturas ortométricas y elipsoidales en puntos coincidentes
- Método astrogravimétrico
- Método satelital gravimétrico de alta resolución.

Conociendo las particularidades de los métodos existentes para determinar el modelo del geoide se decidió realizar una fusión de los métodos de diferencias de alturas ortométricas y elipsoidales en puntos coincidentes, con el gravimétrico, ya que el primero se ajusta al equipamiento con que se cuenta para la investigación y para darle mayor

precisión se adapta al modelo de correcciones por gravedad. El resultado de esta combinación es denominado por los autores método combinado.

2.1.2.1 Método de diferencia de alturas ortométricas y elipsoidales en puntos coincidentes

Si en la zona de trabajo existe suficiente cantidad de puntos fijos altimétricos de la red geodésica nacional o creados por trabajos de densificación, empleando la nivelación geométrica y trigonométrica, de los cuales se conocen los valores de las cotas, se pueden determinar las alturas elipsoidales, según la expresión 1, empleando el posicionamiento diferencial GPS; las diferencias entre ambos valores representarán las ondulaciones del geoide dentro de la zona de estudio (Rodríguez-Roche 1995).

$$N = h - H \quad (1)$$

Donde:

N: Ondulaciones del geoide;

h: Altura elipsoidal obtenida con GPS;

H: Altura ortométrica obtenida por nivelación geométrica o trigonométrica.

2.1.2.2 Método gravimétrico

Las anomalías de la fuerza de la gravedad dependen de las masas topográficas exteriores, ubicadas por encima del nivel de los océanos, y de la acción de las masas anómalas que se encuentran dentro de la tierra (Zakatov 1981). Para disponer de un modelo del geoide se precisa conocer el potencial de suficientes puntos, que luego permita generar un modelo de curvas isoanómalas a partir de un levantamiento gravimétrico (Lemoine 1996).

2.1.3. Diseño de los experimentos

En el desarrollo del método combinado fue necesario realizar investigaciones en campo para determinar las alturas elipsoidales, realizar mediciones de aceleración de la gravedad y obtener la elevación del punto inicial del modelo, utilizando los equipos de medición que se muestran en la Figura 1.



Figura 1. Instrumentos de medición empleados en los experimentos.

a) Receptor GPS b) Nivel Sprinter 200 c) Péndulo simple.

En los experimentos desarrollados para las mediciones de las alturas elipsoidales, con el empleo de los receptores GPS Leica 1200, se tuvo en cuenta lo establecido en la instrucción ITT-008 de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel, avalada por la Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia (ONHG). En el caso de la determinación de la elevación del punto inicial del modelo, con el empleo del nivel Sprinter 200, se respetó lo establecido en las instrucciones técnicas para la nivelación del año 1987.

En las mediciones para determinar la aceleración de la gravedad, como el instrumento de medición fue construido para la investigación, se diseñaron experimentos, utilizando el método plan factorial, (Hernández-Sapine; Fernández-Collado & Pilar-Baptista 2007), fundamentado en la expresión siguiente:

$$2^n \quad (2)$$

Donde:

n: Cantidad de variables que intervienen en el experimento.

En nuestro caso intervienen tres variables no controladas, es decir, no reguladas en condiciones de laboratorio:

- Temperatura
- Presión atmosférica
- Velocidad del viento.

Desarrollando la expresión anterior se obtuvo que deben realizarse ocho mediciones para cada punto.

2.2. Trabajos de campo

Para darle cumplimiento a esta etapa se planificó el área que debe ocupar el modelo del geoide en el terreno; se definió como punto de origen el

monumento llamado Blet, que se encuentra en la parte norte de la presa de colas, próximo a la costa. Construimos una red de cuadrículas con un espaciamiento, tanto vertical como horizontal, de 200 m, donde se encuentran distribuidos de forma homogénea un total de 31 puntos experimentales seleccionados de la red existente, ocupando un área total de 444,7 ha del terreno.

2.2.1. Mediciones con los receptores GPS Leica 1200

El método de posicionamiento GPS utilizado en los trabajos de campo fue el estático diferencial (Acosta-Gutiérrez 2002), empleando los dos receptores, uno en el punto de referencia (Blet) y el móvil en las estaciones de referencia determinadas para la experimentación.

2.2.2. Mediciones de aceleración de la gravedad en los puntos a investigar con el péndulo simple

El experimento consiste en determinar la gravedad, a partir del estudio de un péndulo simple de hilo. Para ello medimos los períodos de una plomada física de dimensiones conocidas a cinco longitudes del hilo distintas (Muffatti & Cian 2007).

Armamos el sistema atando el hilo al soporte o riostra seleccionado, donde también se ubica el transportador, para determinar el ángulo de oscilación del hilo.

Son realizadas las mediciones para un metro de longitud en el hilo, se traslada la plomada de manera tal que forme un ángulo de 10° con el eje del soporte, es soltado libremente el péndulo desde esa posición realizando simultáneamente un control del tiempo de oscilación. El cronómetro es detenido cuando el instrumento registra 10 oscilaciones. El mismo procedimiento se aplicó para las restantes longitudes. Se ejecutaron ocho repeticiones para cada punto involucrado en la investigación, cumpliendo con el diseño de experimentos y calculado por la expresión siguiente:

$$g = 4f^2 \frac{L}{T^2} \quad (3)$$

Donde:

g: Aceleración de la gravedad local;

L: Longitud del hilo;

T: Período;

f : Constante matemática.

2.2.3. Mediciones para la determinación de la altura del punto de origen del modelo a partir del estudio del nivel del mar en la costa de Moa

En la investigación se empleó el método de regla visual de marea (Vallejo-Castro 2003), construyendo una estación mareográfica temporal, conformada por una regla especial de fibra graduada cada un centímetro, colocada sobre una cabilla hincada al fondo del mar y atada a una estaca de madera (Figura 2).



Figura 2. Estación mareográfica temporal.

2.2.3.1. Procedimiento empleado en campo para la obtención del nivel del mar

En la realización de estos trabajos se tuvieron en cuenta dos parámetros fundamentales: la hora y la altura de la marea.

1. Fue obligatorio emplear un reloj sincronizado con la emisora nacional Radio Reloj.
2. Se realizaron lecturas en la regla visual de marea cada una hora exacta, completando un ciclo de mediciones desde las 6:30 horas, hasta las 17:30 horas, por un período de tres días, estas lecturas fueron anotadas en el registro de campo.
3. Para mitigar los errores de observaciones se efectuaron tres lecturas de los valores más altos de la marea y tres de los más bajos; la lectura definitiva resultó el promedio de estas seis mediciones.

2.2.4. Determinación de la altura del punto inicial del modelo del geoide

Conociendo la lectura en la regla, coincidente con el nivel medio del mar en la zona de estudio, se pudo determinar la altura del punto de origen del modelo del geoide conocido por Blet. Para darle cumplimiento a esta tarea se empleó el método de densificación altimétrica llamado nivelación geométrica (Belete-Fuentes 2008). Se proyectó un circuito de nivelación

cerrada partiendo de la estación mareográfica temporal, tocando el monumento Blet y cerrando en el punto de partida (Figura 3).

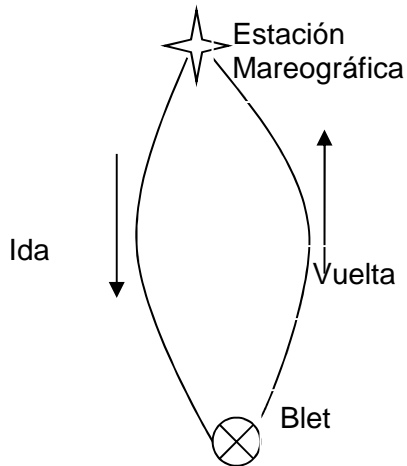


Figura 3. Circuito de nivelación cerrada.

2.2.5. Análisis comparativo de las coordenadas altimétricas del punto Blet

La estación Blet contaba con valores de altura referidos al nivel medio del mar (NMM) en el sistema de alturas nacionales llamado Siboney, obtenidos con trabajos de densificación anteriormente realizados; este valor se comparó con el de la altura determinada en este trabajo y en la Tabla 2 se puede observar la diferencia significativa entre ambas alturas.

Tabla 2. Análisis comparativo entre las alturas del punto Blet

Punto	Altura nacional (m)	Altura NMM Moa (m)	Diferencia (cm)
Blet	2,454	2,367	8,7

Como se mencionó anteriormente se dispone del levantamiento topográfico a escala 1:500 y los puntos de apoyo de la presa de colas, donde las alturas están referidas al sistema nacional, para la obtención del modelo se decidió hacer dos variantes, una con las alturas en ese sistema y otra con el resultado del estudio de la marea de Moa, con el fin de establecer un análisis comparativo de las precisiones del modelo, para transformar los demás puntos de apoyo y el levantamiento topográfico al sistema de alturas obtenido durante la investigación.

2.3. Trabajos de gabinete

El procesamiento de la información se realizó teniendo en cuenta las tareas siguientes:

1. Generación de modelos digitales del terreno

2. Generación de modelo digital gravimétrico
3. Generación de modelo digital de alturas elipsoidales.

Empleando el software AutoCAD Civil 3D se consideró realizar dos modelos digitales del terreno que representarán el levantamiento topográfico a escala 1:500, uno con las alturas referidas al sistema nacional, y otro, referidas al sistema obtenido en la investigación; el modelo digital gravimétrico y el de altura elipsoidales son construidos con los datos obtenidos en los 31 puntos experimentales.

Para modelar el geoide se implementó un sistema de información geográfico (SIG), en plataforma ArcGIS, donde se integraron los resultados de los análisis realizados en el software AutoCAD Civil 3D.

2.3.1. Procedimiento para obtener el modelo del geoide a partir del análisis geoespacial de mapas aplicando herramientas de SIG

La expresión (1) define la determinación del modelo del geoide por las diferencias de alturas elipsoidales y ortométricas. El método combinado desarrollado durante la investigación se fundamenta en esta ecuación. Se aplican correcciones por la influencia de las perturbaciones de la gravedad. La expresión (4) se desarrolla en este trabajo para determinar el modelo del geoide local.

$$MG = (MDAE + MDCG) - MDT \quad (4)$$

Donde:

MG: Modelo del geoide;

MDAE: Modelo digital de alturas elipsoidales;

MDCG: Modelo digital de correcciones gravimétricas;

MDT: Modelo digital del terreno.

2.3.2. Obtención de la corrección por el efecto de las perturbaciones de la gravedad

Como puede observarse en la expresión (4) interviene un modelo digital de correcciones gravimétricas. Para calcular este modelo realizamos un análisis profundo de los valores obtenidos de alturas ortométricas por los métodos de densificación altimétrica, es considerado el efecto que causan las perturbaciones de las anomalías de la gravedad en los modelos digitales y, a su vez, en la figura física del geoide. Para darle cumplimiento a esta tarea fue necesario realizar el cálculo de la atracción gravitacional que ejerce el modelo digital del terreno construido en los

puntos experimentales y la sustracción de esta fuerza de la gravedad medida en cada estación. Según Sánchez- Javier (2010), tanto las depresiones (valles) como las elevaciones (cerros) en los alrededores de la estación disminuyen la gravedad medida. Por esto la corrección topográfica siempre es positiva.

Para la realización del cálculo se determinó en cada punto experimental la corrección a la topografía por el efecto de la gravedad, relacionado cada uno de ellos al origen del modelo del geoide (Blet), aplicando la expresión (5), según Lemoine (1996).

$$u_{g_{topo}} = 2f \cdot g_{med} \frac{h^2}{r^3} \quad (5)$$

Donde:

$u_{g_{topo}}$: Corrección a la topografía por la gravedad;

f : Constante gravitacional: $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ S}^{-2}$;

g_{med} : Gravedad medida en la superficie del terreno;

h^2 : Diferencia de altura entre el punto de origen y el punto a determinar;

r^3 : Distancia entre el punto de origen del modelo y el punto a determinar.

Con estos valores se construyó el modelo digital de correcciones gravimétricas.

2.3.3. Cálculo de los modelos del geoide

Aplicando la expresión (4) en el sistema de información geográfica se determinan dos modelos del geoide, en un primer caso utilizando el modelo digital del terreno en los puntos experimentales referidos al nivel medio del mar de la costa de Moa, y en un segundo caso, el MDT referido al sistema nacional (Figuras 4 y 5).

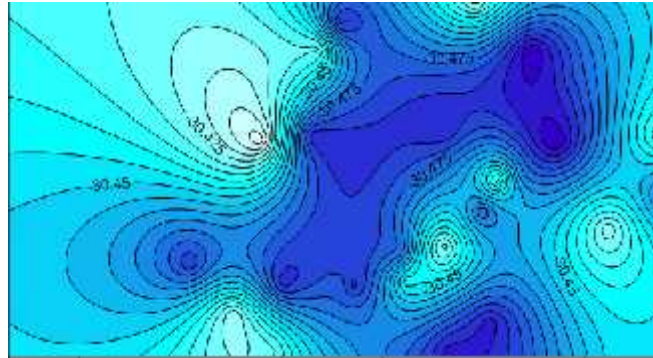


Figura 4. Modelo del geode referido al NMM de la costa de Moa (MG-1).

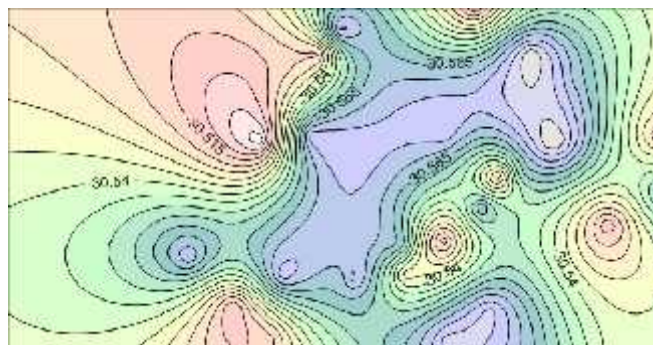


Figura 5. Modelo del geode referido al sistema de alturas nacionales (MG-2).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los modelos calculados se sometieron a un proceso de validación, para determinar la exactitud en la determinación de las coordenadas altimétricas, fue necesario realizar un levantamiento topográfico en diferentes zonas de la presa de colas, utilizando el sistema GPS en su modo diferencial.

Con los resultados de campo se obtuvo un modelo digital de alturas elipsoidales que fue incorporado al SIG. A cada uno de los modelos del geode calculado anteriormente se le aplica el modelo matemático siguiente:

$$MDT = MDAE - MG \quad (6)$$

Y se obtienen dos modelos digitales del terreno con coordenadas altimétricas referidas a diferentes figuras de referencias. En el software ArcGIS se compararon con los MDT correspondientes al sistema de referencia empleado, que pertenecen al levantamiento topográfico a escala 1:500 realizado con estaciones totales; como resultado se generaron dos mapas de incertidumbre (Figuras 6 y 7).

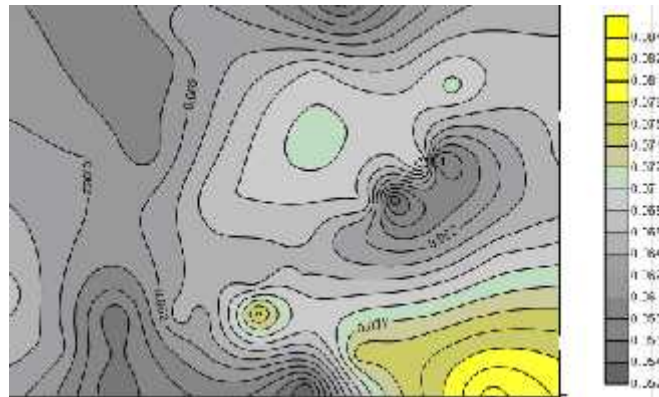


Figura 6. Mapa de incertidumbre en la medición de alturas utilizando el modelo del geode referido al NMM de la costa de Moa (MG-1).

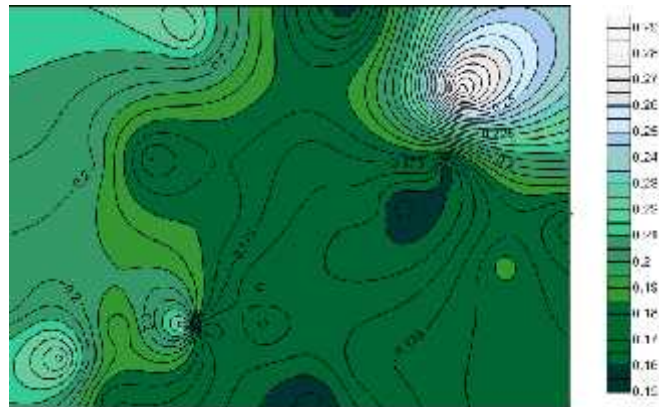


Figura 7. Mapa de incertidumbre en la medición de alturas utilizando el modelo del geode referido al sistema de coordenadas nacionales (MG-2).

En la Tabla 3, teniendo en cuenta los resultados de incertidumbres obtenidos, se realiza un análisis comparativo de la exactitud de los modelos del geode determinados en la investigación.

Tabla 3. Evaluación de la exactitud de los modelos de geoides

Evaluación de la exactitud de los modelos		
Modelos	Valor mínimo alcanzado (cm)	Valor máximo alcanzado (cm)
MG-1	5	8
MG-2	15	29

Como se muestra en la Tabla 3 la exactitud en la determinación de las alturas del modelo del geode (MG-1) se encuentran en el rango de los 5 cm a 8 cm; las tolerancias obtenidas satisfacen las exigencias de las normas de movimiento de tierras aplicadas en la presas de colas, por lo tanto fue seleccionado como modelo a utilizar en los trabajos topográficos de la presa de colas y denominado: Modelo del Geode Presa

de Colas 2012 (MGPC-2012). Las estadísticas más relevantes de dicho modelo se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Estadísticas del modelo del geoide (MGPC-2012)

Parámetros	Ondulaciones	Latitud	Longitud	Total de datos
Valor máximo	-30,500	20 39 08	-74 53 15	...
Valor mínimo	-30,406	20 39 32	-74 53 48	...
Punto de origen	- 30,420	20 39 35	-74 53 25	...
Número de columnas	...	...	...	13
Número de filas	...	...	...	9
Número de puntos	...	...	...	31

El modelo del geoide MGPC-2012 se utilizó en octubre de 2012 en el proyecto 2455: Control topográfico fase 5, presa de colas en explotación, obteniendo resultados por debajo de las tolerancias admisibles establecidas por la norma cubana NC 3011.

4. CONCLUSIONES

Se elaboró un modelo del geoide a partir del procedimiento propuesto que permite determinar la posición altimétrica de los puntos sobre la superficie, cumpliendo con la exactitud que exigen las normas cubanas para el movimiento de tierra.

Se creó un nuevo método para la determinación del modelo del geoide, como resultado de la integración del método por diferencias de altura y el gravimétrico.

Con la determinación del punto de origen del modelo en la zona costera de Moa, a partir del estudio del NMM, se pudo comprobar que difiere significativamente del sistema de altura nacional en nueve centímetros.

Se diseñó un sistema de información geográfica en el software ArcGIS que permitió la modelación y validación del modelo del geoide.

5. REFERENCIAS

- ACOSTA-GUTIÉRREZ, R. 2001: Modelo del Geoide Cuba 2000. En: I Jornada de Ciencia e Innovación Tecnológica de Geocuba y II Seminario de Geomática. La Habana, Cuba, 30 nov-1 dic., 32 p.
- ACOSTA-GUTIÉRREZ, R. 2002: Nivelación GPS en las condiciones de la República de Cuba. En: II Jornada de Ciencia e Innovación Tecnológica de Geocuba y III Seminario de Geomática. La Habana, Cuba, 26 p.

- ACOSTA-GUTIÉRREZ, R. 2005: El materialismo dialéctico e histórico y la figura de la tierra. Trabajo sobre Problemas Sociales de la Ciencia. Instituto Técnico Militar José Martí. La Habana, 22 p.
- BELETE-FUENTES, O. 2008: Topografía General (inédito). 418 p.
- DESDIN, S. R. 2009: Caracterización de los movimientos horizontales recientes de la corteza terrestre en la región de Mayarí, Nicaro y Moa, con el empleo de tecnología de avanzada (GPS). Tesis doctoral. Instituto Técnico Militar José Martí. La Habana. 154 p.
- HERNÁNDEZ-SAPINE, R.; FERNÁNDEZ-COLLADO, C. & PILAR-BAPTISTA, C. 2007: Metodología de la investigación. 4 ed. McGraw-Hill, Nueva York, 109 p.
- LEMOINE, A. 1996: The Development of the NASA GSFC and NINA joint geopotential model. In: Gravity Geoid Mar Geod, Int. Symp. (GraGeoMar 1996), No. 117. Tokyo, Japan, 30 Sept-5 Oct, 76 p.
- MUFFATTI, L. & CIAN, N. 2007: Cálculo de aceleración de la gravedad con péndulo y medición de constante elástica de un resorte. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 21 p.
- RODRÍGUEZ-ROCHE, E. 1995. Cálculo de las ondulaciones del geoide para los puntos de Primer Orden de la Red Geodésica Nacional. En: X Fórum de Ciencia y Técnica. Holguín, 23 p.
- SÁNCHEZ-JAVIER, M. 2010: Métodos topográficos clásicos. Conferencia. Universidad de Cantabria. España. 32 p.
- VALLEJO-CASTRO, C. E. 2003: Medición y procesamiento de la marea. Academia Naval Granma. La Habana. 40 p.
- ZAKATOV, P. S. 1981: Curso de Geodesia Superior. Mir, Moscú, 635 p.

Yordanys Esteban Batista-Legrá. yordanysgeodest@gmail.com
Master en Topografía Minera. Instructor.
Empresa ANTEX Proyectos y Fiscalización. Cuba.

Orlando Belete- Fuentes. obelete@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba.

Santiago Bernal-Hernández. sbernal@ismm.edu.cu
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Cuba.