



INFORME

DENSIFICACIÓN GRAVIMÉTRICA – Año 2024/2025

Ana Cristina O. Cancoro de Matos
Douglas Rodrigues Soares
Centro de Estudios de Geodesia – CENEGEO

Modesto Martínez Robles
Servicio Geológico Nacional

Luis Torres Manzueta
Gabriel Vázquez De León
Ministerio de Energía e Minas

Pablo Díaz Torres
Dirección General de Minería

Denizar Blitzkow
Escola Politécnica da USP – EPUSP



Índice

1 – Introducción	3
2 - Descripción	3
3 - Sistema altimétrico	7
3.1- La integral de Hotine y la modificación.....	8
3.2 Término de grado cero	10
4 - Modelo geoidal y cuasi-geoidal.....	13
5 - Conclusiones y recomendaciones	13
6 - Justificación y Conclusión Final	14
8 - Bibliografía	16
9 - Anexo.....	17



1 – Introducción

A partir de la **Referencia Gravimétrica Local** (RGL) cuyas mediciones se realizaron con un gravímetro absoluto, el A-10/032, se ha realizado un nuevo esfuerzo desde diciembre de 2024 y en los primeros tres meses de 2025, para mejorar la densificación gravimétrica de República Dominicana. Se establecieron un total de 611 estaciones utilizando el gravímetro CG-5/808 de Scintrex. Las 11 medidas absolutas se utilizaron como referencia para los valores densificados. El esfuerzo permitió presentar un mapa de las anomalías de Bouguer para el territorio del país. El posicionamiento se obtuvo a través de un receptor GNSS, con un período de observación de 20 minutos. Para el procesamiento se utilizó la instalación PPP (Posicionamiento Preciso Puntual), disponible en el IBGE (Instituto Brasileño de Geografía y Estadística), que utiliza como referencia el SIRGAS2000.4 (Sistema de Referencia Geodésico para las Américas).

2 - Descripción

Las mediciones de densificación se realizaron con el gravímetro Scintrex CG-5/808, propiedad de CENEGEO, cuya precisión es de 0.05 mGal. El dispositivo se configuró para realizar 2 ciclos de observaciones, con 60 segundos cada ciclo, en las estaciones y nuevos puntos establecidos. Se realizaron 5 (cinco) campañas en un periodo de 4 meses (diciembre 2024 – marzo 2025), con un total de 611 nuevas mediciones de aceleración de gravedad relativa con su respectiva observación de GPS distribuidos a cada 3km lineales a lo largo de las principales carreteras del territorio conforme a la planificación, en cada campaña se realizaron en promedio 10 circuitos. En general, las mediciones se realizaron abriendo en un RGL y cerrando en otro RGL, algunos circuitos se cerraron en la misma RGL como se verá en la descripción.

Campaña 1: Se realizaron 10 circuitos, de los cuales 8 se iniciaron y finalizaron en la misma RGL, en total se materializaron 95 puntos.



Campaña 2: Se realizaron 10 circuitos, de los cuales 8 se iniciaron y finalizaron en la misma RGL, en total se materializaron 129 puntos.

Campaña 3: Se realizaron 10 circuitos, de los cuales 8 se iniciaron y finalizaron en la misma RGL, en total se materializaron 141 puntos.

Campaña 4: Se realizaron 9 circuitos, de los cuales 7 se iniciaron y finalizaron en la misma RGL, en total se materializaron 120 puntos.

Campaña 5: Se realizaron 11 circuitos, de los cuales 8 se iniciaron y finalizaron en la misma RGL, en total se materializaron 127 puntos.

A lo largo de las campañas se volvieron a medir 31 referencias relativas para la verificación y control de calidad de sus valores que ya se tienen.

Adicionalmente, se efectuaron mediciones de la aceleración de gravedad en tres nuevas estaciones de referencia relativa:

EG-51: Estación Gravimétrica Relativa localizada en Río Limpio, Provincia Elías Piña

EG-52: Estación Gravimétrica Relativa localizada en Punta Cana, Provincia La Altagracia

EG-53: Estación Gravimétrica Relativa localizada en Enriquillo, Provincias Barahona

La Figura 1 presenta la distribución espacial de las estaciones monumentadas, diferenciadas en absolutas y relativas, así como las ubicaciones donde se realizaron observaciones gravimétricas adicionales destinadas a la densificación de la red. Las observaciones de densificación permiten incrementar la resolución espacial del modelo gravimétrico del país.

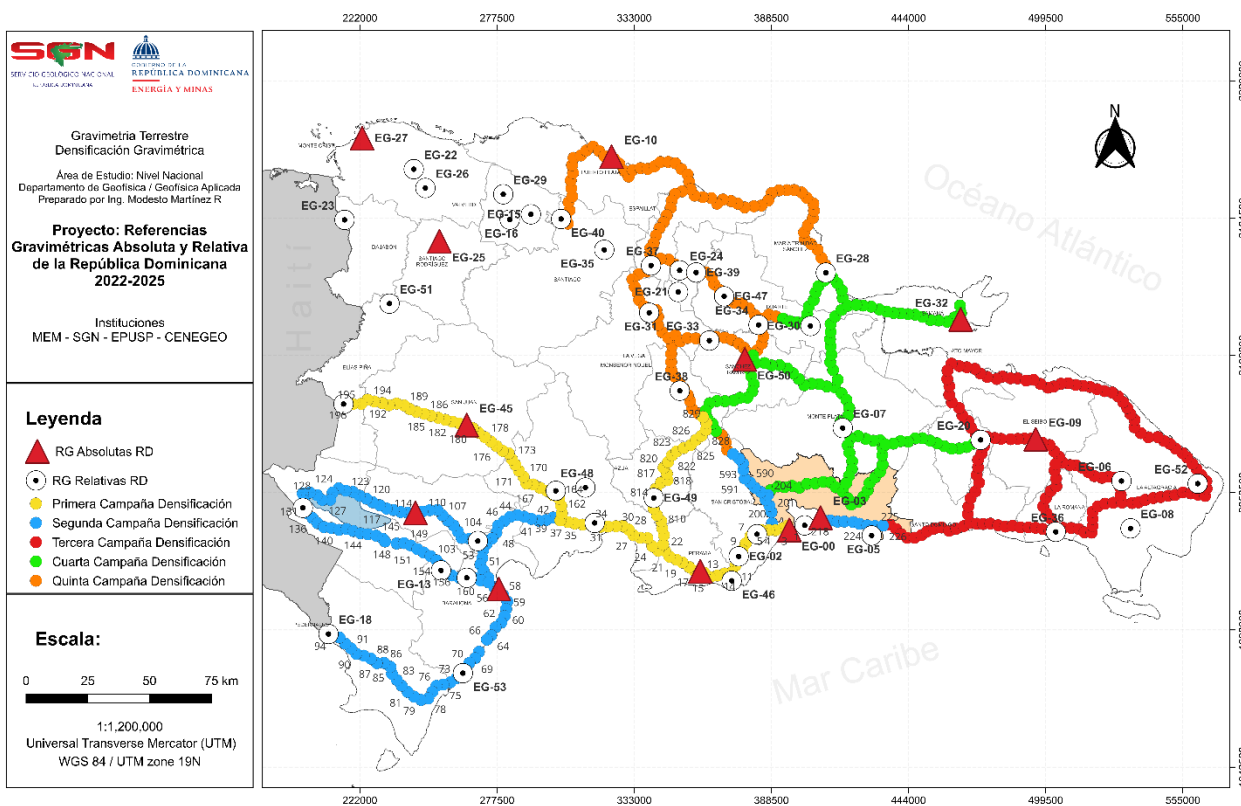


Figura 1 - Representación de las líneas gravimétricas y RGL.

El procesamiento se realizó con el software GRAVS2. El cálculo dio como resultado la obtención de los valores de la aceleración de la gravedad, ligados a la RGL, en las anomalías de gravedad al aire libre y de Bouguer simple. Esta última anomalía se muestra en la Figura 2, referida a República Dominicana. Se generó a partir de 655 estaciones observadas, que incluyen puntos de densificación y los de observaciones absolutas.

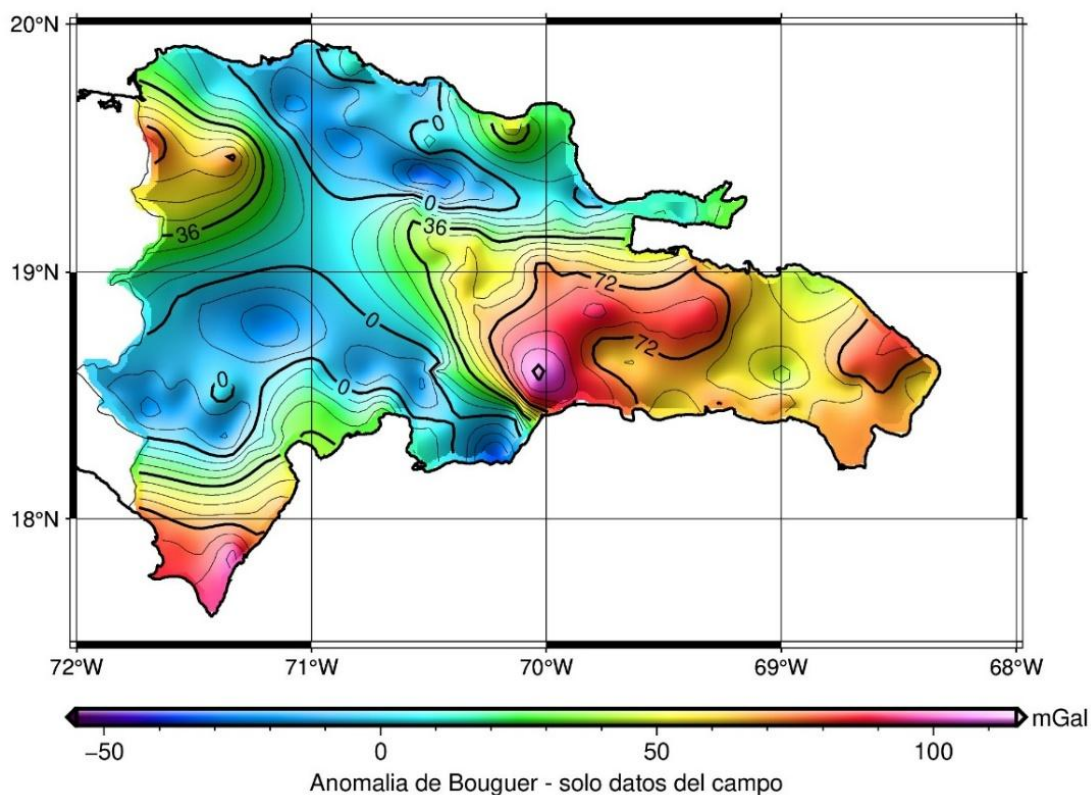


Figura 2 – Mapa de anomalías de Bouguer.

El número de puntos utilizados en la generación del mapa aún no cubre el país de manera homogénea, pero representa un aporte importante al conocimiento geológico, geofísico y geodésico. Con el objetivo de una alternativa, para una comparación simple, también se generó un mapa de los datos de Figura 2 adicionados del modelo geopotencial global (MGG) XGM2019e (grado y orden 300), presentado en la Figura 3. En este caso, el modelo trae una resolución más alta, sin embargo, sujeta a una menor confiabilidad en las anomalías. Es posible comparar los colores de las anomalías observadas en relación con los del MGG. En la comparación entre las Figuras 2 y 3, también es posible verificar la necesidad de un mayor número de observaciones gravimétricas para obtener un mapa más confiable de la anomalía.

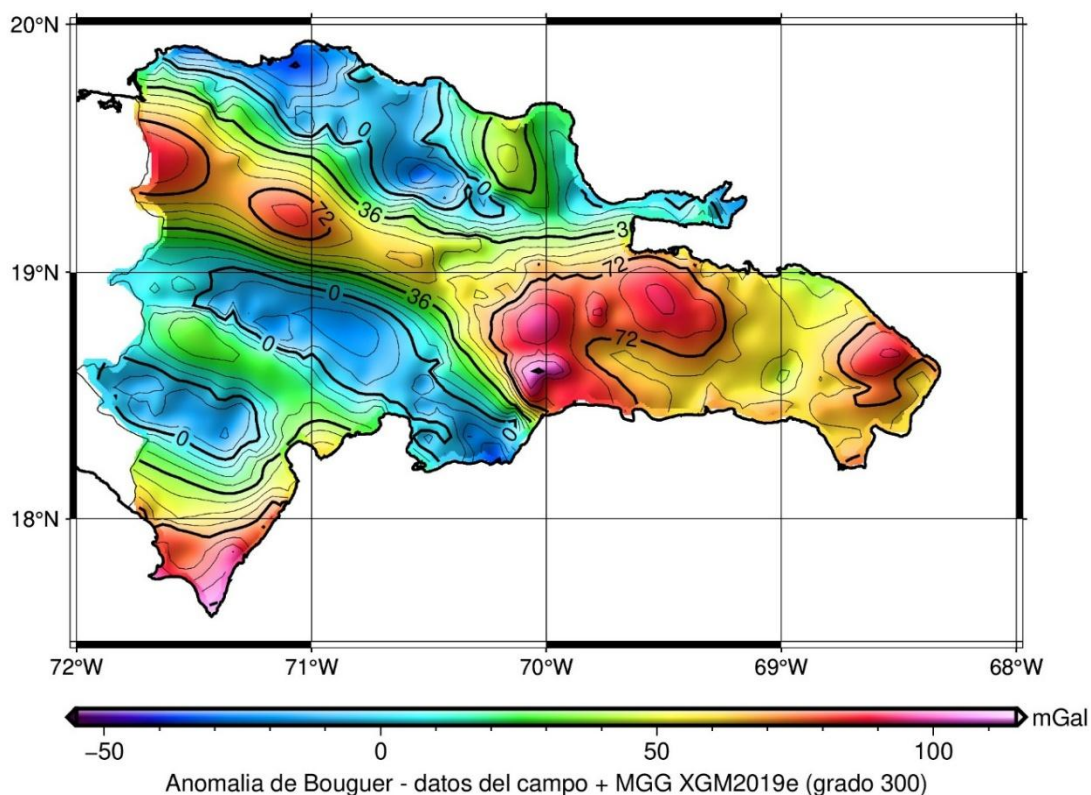


Figura 3 – Mapa de anomalías de Bouguer con datos del campo y XGM2019e.

Las alturas ortométricas (H) de los puntos de campo se obtuvieron restando a las alturas geodésicas (h) la altura del geoide. Este último se estimó mediante el modelo geopotencial XGM2019, con grado y orden 2159.

3 - Sistema altimétrico

La Asociación Internacional de Geodesia (IAG – *International Association of Geodesy*) recomendó en 2015 la adopción de un sistema global de altitud. Así, se estableció el denominado IHRF/F (*International Height Reference System/Frame*) para ser adoptado a nivel mundial. En el caso se adoptó como referencia la altura normal. El cálculo de la altura normal se obtiene utilizando la integral de Hotine. A partir de valores puntuales de la perturbación gravitatoria, reducidos a una



referencia gravitacional a través de un MGG, el potencial de perturbación residual (longitud de onda corta - CCO) se calcula a través de esta integral, pero con la modificación necesaria (§3.1). Para realizar la integral es necesario proceder a una modificación del núcleo, ya que las perturbaciones gravitatorias se reducen a partir de longitudes de onda largas (LCO) a través del GGM. En el CENEGEO se desarrollaron dos programas informáticos, primero realizando la modificación del núcleo y, posteriormente, la integración numérica. Se seleccionó la alternativa de cálculo, con grado y orden 100 del modelo geopotencial XGM2019e (Zingerle et al., 2020), el cual es completo hasta grado y orden 5.540. El intervalo de integración se selecciona de forma coherente con el grado y el orden elegidos para el LCO en el modelo. En el caso del grado 100, el intervalo es de $1,8^\circ$, aproximadamente 200 km.

3.1- La integral de Hotine y la modificación

La integral de Hotine se expresa de la siguiente manera:

$$T(P) = \frac{R}{4\pi} \iint \delta g H(\psi) d\sigma \quad (1)$$

En el caso de altura normal, se comienza con la determinación de la componente CCO del potencial perturbador, utilizando la integral de Hotine modificada, también llamada Neumann-Koch (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006):

$$T_l(\theta, \lambda) = \frac{R}{4\pi} \left[\int_{\psi=0}^{\psi_o} \int_{\alpha=0}^{360} \delta g(\alpha, \psi) \delta H_l^m \sin(\psi) d\psi d\alpha \right] \quad (2)$$

Siendo el kernel dado por:

$$H(\psi) = \csc(\psi/2) - \ln(1 + \csc(\frac{\psi}{2})) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2n+1}{n+1} P_n(\cos(\psi)) \quad (3)$$

y siendo δH_l^m el núcleo Hotine modificado obtenido a través de una conveniente reformulación y δg el disturbio de la gravedad en el punto $P(\theta, \lambda)$, reducida de la componente LCO.



La deducción de las expresiones para la modificación del kernel se puede encontrar en Vanicek et al. (1987) y Blitzkow et al. (1993) Sin embargo, las fórmulas son las siguientes:

$$\delta H_l^m(\Psi) = \delta H_l(\Psi) - \overline{\delta H_l}(\Psi) \quad (4)$$

siendo

$$\delta H_l(\Psi) = H(\Psi) - H_l(\Psi) \quad (5)$$

$$H_l(\Psi) = \sum_{n=2}^l \frac{2n+1}{n+1} P_n(\Psi) \quad (6)$$

$$\overline{\delta H_l}(\Psi) = \sum_{i=0}^l \frac{2i+1}{2} t_i P_i(\cos \Psi) \quad (7)$$

La modificación depende de la determinación de los coeficientes t_i , presentes en la Ec. (7). Se determinan mediante la aplicación del Método de Mínimos Cuadrados (MMQ), una metodología desarrollada originalmente en la Universidad de New Brunswick, Canadá (Vanicek et al., 1987). CENEGEO ha desarrollado un software (hotinemod.f) para determinar estos coeficientes y luego aplicarlos para obtener el núcleo modificado. La figura 4 muestra el núcleo normal $H(\Psi)$ (1), las modificaciones de Wong-Gore (2) y del CENEGEO (3), para el caso de grado y orden 30, con los datos obtenidos en el citado software. La última curva mencionada demuestra la convergencia a cero en las proximidades de la 6° (eje X), que constituye el intervalo de integración para el caso de grado 30 en los coeficientes de las funciones armónicas esféricas (distancia de integración = $180^\circ/30^\circ = 6^\circ$). Por lo tanto, la curva indica la consistencia del núcleo modificado con el intervalo de integración.

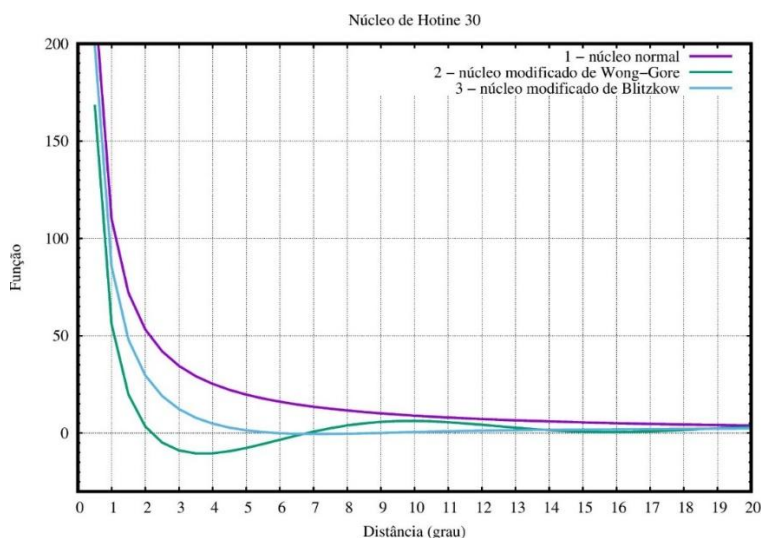


Figura 4 – Núcleo de Hotine hasta el grado 30.

Resumiendo, la modificación del núcleo tiene la función de actuar como filtro sobre los datos de la anomalía, además de ψ_0 , y para que sirva de peso a las observaciones. No se pretende minimizar el error de truncamiento, como se menciona en la literatura general (Featherstone, 2013; Sakil et al., 2021). Por otro lado, el valor final obtenido en la integral necesita ser reescalado dependiendo del kernel. Sin embargo, la ventaja radica en que el resultado no es muy sensible a la escala.

También se desarrolló un software para realizar la integración numérica de la fórmula de Hotine (Hotine-ptg-up.f). Realiza el cálculo punto a punto utilizando como referencia el modelo geopotencial antes mencionado, hasta un grado y orden definidos. El programa utiliza los coeficientes t_i , Obtenido de la hotinmod.f.

3.2 Término de grado cero

El término de orden cero en la anomalía de altura debe introducirse en función de dos variables utilizadas. El modelo geopotencial se calcula sobre la base del valor GM , producto de la constante universal de gravitación por la masa de la Tierra. Debido a la adopción del valor



intrínseco de los modelos geopotencial o GRS80 (*Geodetic Reference System* 1980) puede haber una diferencia a considerar, de acuerdo con el numerador del primer término de la Ec. (8). Además, el potencial de referencia W_o también genera una pequeña diferencia si el valor de U_o en el elipsoide de referencia, no es igual a la W_o . La Ec. (8) señala las expresiones de los dos posibles términos de grado cero, y los valores se muestran en Ec. (9) y Ec. (10). Dependiendo de la referencia adoptada en el cálculo, es necesario considerar sistemáticamente lo término de grado cero.

$$N_0 = \frac{(GM_{GGM} - GM_{GRS80})}{r_{P_0} \cdot \gamma_{Q_0}} - \frac{\Delta W_0}{\gamma_{Q_0}} \quad (8)$$

En relación con el potencial perturbador, el término de grado cero con los valores numéricos correspondientes toma la forma:

$$T_o = 1/r_p (GM_{GGM} - GM_{GRS80}) = 1/r_p (3,986004415 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} - 3,98600 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}) \quad (9)$$

en este caso, para la diferencia de la constante GM .

En cuanto a la diferencia entre el potencial de referencia para la Tierra normal y la real, tenemos:

$$\Delta W_o = W_o - U_o = (62.636.853,4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2} - 62.636.860,85 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}) \quad (10)$$

Además, el cálculo del potencial perturbador y luego la obtención del número geopotencial en relación con W_o , se lleva a cabo en el concepto de marea cero, en general. Si el cálculo se concibe en el concepto de marea media, la función dejará de ser armónica, porque habrá masa fuera del



contorno. Por lo tanto, el procedimiento sugerido es realizar la transformación al concepto estandarizado por el GT del IHRF al final del cálculo. La expresión es la siguiente:

$$WZT2MT=0,9722 - 2.8841 \times (\text{sen}(\varphi))^2 - 0.0195 \times (\text{sen}(\varphi))^4 \quad \text{m}^2\text{s}^{-2} \quad (11)$$

La realización de la integral de Hotine utiliza, como mejor sugerencia, el grado y orden 100 del modelo geopotencial XGM2019 como referencia, con la superficie física como posición del punto de cálculo. Por lo tanto, los trastornos de gravedad obtenidos en la superficie tenían el LCO reducido a ese grado. Para ello, se utilizó como referencia el GRS80. Los resultados integrales en el componente CCO del potencial perturbador T_{cco} , utilizando el kernel modificado. El potencial gravitatorio de la Tierra normal U_p se obtiene a través de la formulación pertinente (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006). A continuación, se obtiene el potencial gravitatorio de la Tierra real a través de la expresión:

$$W_p = U_p + T \quad (12)$$

siendo

$$T = T_{cc} + T_{lco} \quad (13)$$

El número geopotencial resulta de la expresión:

$$C = W_o - W_p \quad (14)$$

luego permitiendo que la altura normal se determine dividiendo por el valor promedio de la aceleración normal de la gravedad. El valor actual adoptado es: $W_o = 62.636.853,4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$. En el caso del programa desarrollado en CENEGEO, el W_p se calculó en el GRS80, con el valor inherente de U_o . Para la coherencia utilizamos el $W_o = U_o$ de GRS80 en Ec. (14). A continuación, se aplicó el término de grado cero de acuerdo con la expresión (10).



4 - Modelo geoidal y cuasi-geoidal

La altura ortométrica está relacionada con el modelo geoide y la altura normal con el modelo cuasi-geoidal. CENEGEO ha estado trabajando en el establecimiento del modelo geoidal a través del conjunto computacional de programas denominado SHGeo (*Stokes-Helmert Geoid software*), Universidad de New Brunswick (UNB), Canadá (Tenzer et al., 2003). Es un paquete científico para determinar el modelo geoidal basado en el enfoque de Stokes-Helmert. El procedimiento consiste en reducir las anomalías gravitatorias de la superficie física a la superficie del geoide y luego realizar el procedimiento de Stokes para obtener las alturas del geoide. Para ello, se establece una cuadrícula de 5' de anomalías medias. La integración se lleva a cabo en el espacio de frecuencias, a través de la Transformada Rápida de Fourier (TRF). Las alturas de los geoides, se transforman en anomalías de altura utilizando la relación entre las dos cantidades a través de la anomalía de Bouguer. El objetivo es llegar a una distribución homogénea de los datos gravimétricos en el país y utilizar las anomalías gravitatorias derivadas de la altimetría radar en la región marina, para obtener el modelo cuasi-geoidal de la República Dominicana.

5 - Conclusiones y recomendaciones

La iniciativa de la República Dominicana de realizar un esfuerzo concertado para el establecimiento del RGL y el levantamiento de puntos de densificación es muy acertada y prometedora. Representa el inicio de un esfuerzo capaz de llevar al país a un nivel internacional de infraestructura gravimétrica, así como de satisfacer la necesidad de prospección minera y hacer realidad el establecimiento del tan ansiado IHRF (Sánchez et al., 2021).

1. Se recomienda continuar con los trabajos de densificación dentro de la expectativa de llegar a un punto cada 3 km, con el objetivo de elaborar un mapa regional, para mejorar la resolución del mapa de la Anomalía de Bouguer. Se sugiere comenzar por las carreteras principales, seguidas de las secundarias y caminos rurales. Permitirá realizar estudios geológicos, geofísicos y de prospección minera, en particular el análisis preliminar de hidrocarburos.



2. Se recomienda evaluar regiones de interés para hidrocarburos y otros minerales que requieran densificación con mejor resolución, como 500 m a 1 km.
3. Implementar esquemas de prospección multitécnica integrados para optimizar la interpretación de los datos gravimétricos y reducir ambigüedades inherentes al método, se recomienda: Diseñar campañas geofísicas que integren de manera simultánea gravimetría con sísmica, magnetometría y métodos eléctricos.
4. Establecer un modelo geofísico preliminar con gravimetría regional.
5. Refinar el modelo con sísmica de alta resolución en zonas de interés.
6. Complementar con magnetometría aérea o terrestre para identificar cuerpos ferromagnéticos.
7. Aplicar sondeos eléctricos verticales (SEV) o tomografía de resistividad eléctrica (ERT) para caracterizar zonas conductoras o saturadas.
8. Recopilar toda información de pozos para mejorar la interpretación.
9. Se recomienda establecer una estación IHRF (*International Height Reference Frame*) con el objetivo de ser un referente altimétrico internacional para la República Dominicana.
10. Se recomienda poner los datos RGL a disposición de la base de datos internacional AGRV (hartmut.wziontek@bkg.bund.de) con el fin de insertar a la República Dominicana en el esfuerzo internacional, dentro de los objetivos del GGOS.
11. Se recomienda realizar aerogravimetría en las regiones montañosas y en la región costera en una franja alrededor del país.

6 - Justificación y Conclusión Final

Reducir las ambigüedades de interpretación. La gravimetría por sí sola no distingue entre cuerpos con igual densidad, pero diferente composición. La información sísmica puede confirmar contrastes litológicos o estructurales coincidentes.



Poder hacer una correlación entre propiedades físicas. Los contrastes de densidad (gravimetría), velocidad sísmica (sísmica), susceptibilidad magnética (magnetometría) y resistividad (métodos eléctricos) pueden correlacionarse para delimitar con mayor precisión cuerpos geológicos.

La presencia de una anomalía gravimétrica puede ser validada por una anomalía sísmica o magnética, aumentando la confiabilidad del modelo interpretativo, a esto se le conoce como validación cruzada de anomalías.

Una mejor caracterización del subsuelo reduce la incertidumbre durante la exploración de recursos, lo que puede traducirse en perforaciones más eficientes y seguras.

La integración de múltiples métodos geofísicos no solo eleva la precisión del modelo geológico, sino que también maximiza la eficiencia operativa en exploración. Esta estrategia debe ser considerada una práctica estándar en estudios gravimétricos avanzados.

7 - Agradecimientos

Noel Rafael Báez Paredes – Viceministro de Hidrocarburos por su continuo apoyo a los proyectos de investigación en hidrocarburos.

Profa. Nuris Orihuela – Profesora de la Universidad Central de Venezuela por la sugerencia de iniciar un esfuerzo en el campo de la gravimetría en la República Dominicana

Edwin García Cocco - Director ejecutivo de SGN por su valioso apoyo para las actividades a realizar.

Nisael Dionisio Dirocie Matos – Director de Exploración y Producción de Hidrocarburos – Ministerio de Energía y Minas por el estímulo, disponibilidad de personal y recursos económicos para llevar a cabo la ejecución de este importante proyecto.

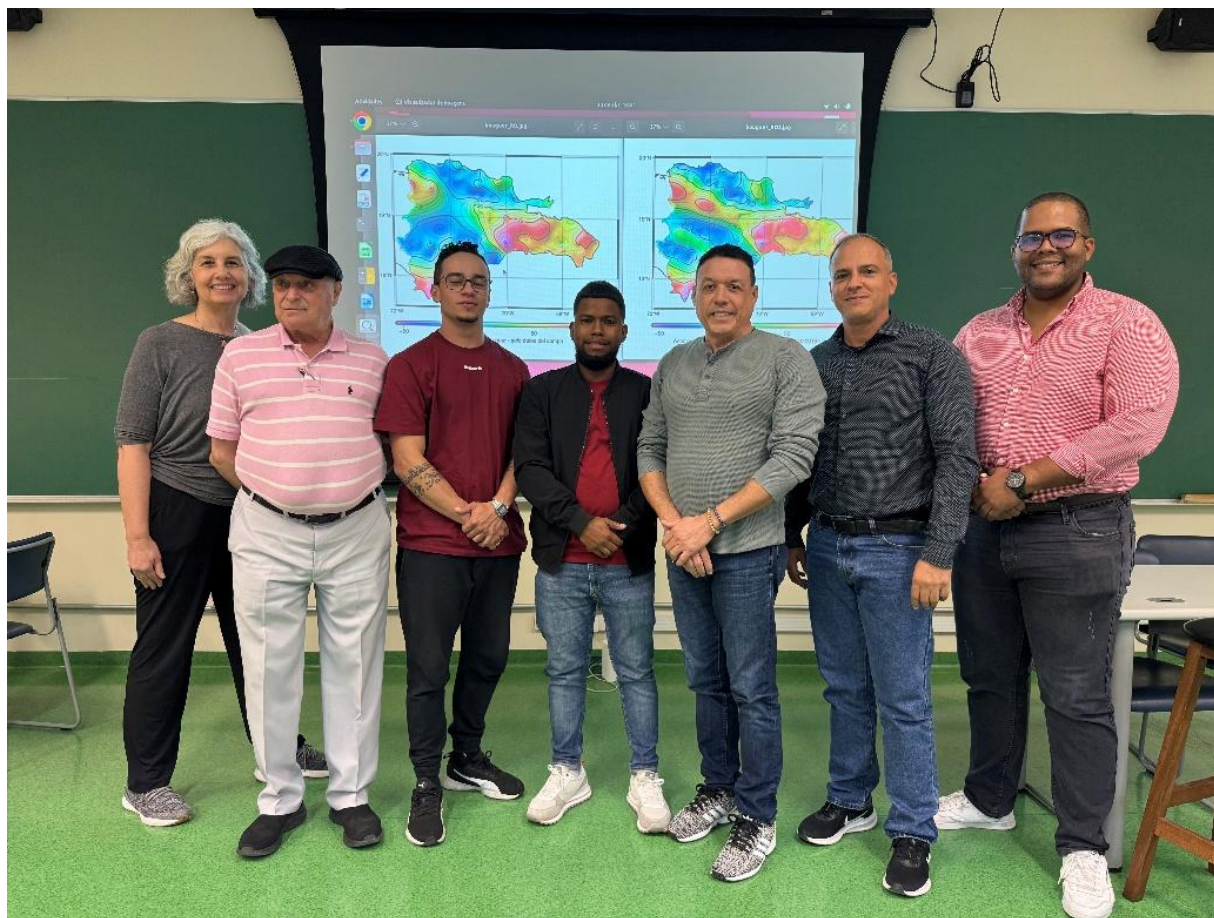


8 - Bibliografía

- Blitzkow, D., Cintra, J. P., & Fortes, L. P. S. (1993). *A Contribution to the Geoid Determination* (pp. 65–81). https://doi.org/10.1007/978-3-642-88055-1_8
- Featherstone, W. E. (2013). Deterministic, stochastic, hybrid and band-limited modifications of Hotine's integral. *Journal of Geodesy*, 87(5), 487–500. <https://doi.org/10.1007/s00190-013-0612-9>
- Hofmann-Wellenhof, B., & Moritz, H. (2006). *Physical Geodesy*. Springer Vienna. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-33545-1>
- Sakil, F. F., Erol, S., Ellmann, A., & Erol, B. (2021). Geoid modeling by the least squares modification of Hotine's and Stokes' formulae using non-gridded gravity data. *Computers & Geosciences*, 156, 104909. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.104909>
- Sánchez, L., Ågren, J., Huang, J., Wang, Y. M., Mäkinen, J., Pail, R., Barzaghi, R., Vergos, G. S., Ahlgren, K., & Liu, Q. (2021). Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRs). *Journal of Geodesy*, 95(3). <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>
- Tenzer, R., Novák, P., Janák, J., Huang, J., Najafi, M., Vajda, P., & Santos, M. (2003). A review of the UNB approach for precise geoid determination based on the Stokes–Helmert method. *Honouring the Academic Life of Petr Vanicek. Rep*, 218, 132–178.
- Vanicek, P., Kleusberg, A., Chang, R. G., Fashir, H., Christou, N., Hofman, M., Kling, T., & Arsenaul, T. (1987). *The Canadian geoid*. <https://gge.ext.unb.ca/Pubs/TR129.pdf>
- Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., & Oikonomidou, X. (2020). The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, 94(7), 66. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>



9 - Anexo



Equipo de trabajo en 2025 en la Escuela Politécnica de la USP.



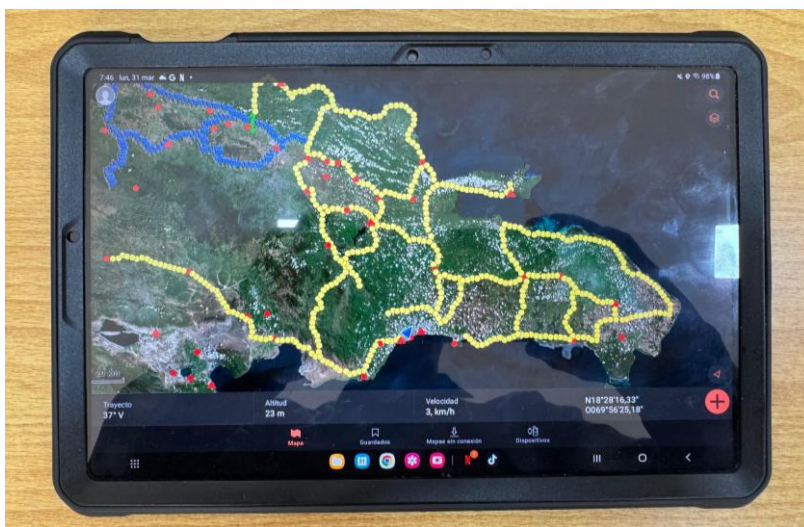
Equipos Usados:



Gravímetro Relativo
CG-5 Autograw Scintrex



GPS Trimble R8



Tablet Samsung S7



Manera correcta de realizar las mediciones gravimétricas y de GNSS



Campañas de Densificación:

