

# Geofísica de exploración, análisis de datos gravimétricos para diversos casos de estudio.

Mariana Carolina Villamil Sastre - Universidad de los Andes

**Abstract**—La gravimetría consiste en la medición de la aceleración de gravitacional sobre un terreno con el objetivo principal de detectar las variaciones de densidades en las unidades geológicas presentes en el subsuelo.

**Keywords**—Gravimetría, densidad, subsuelo, aceleración gravitacional

## I. TALLER 1.1-MODELAMIENTO DE ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS PARA SISTEMAS SENCILLOS

1.a) Inicialmente, en gravimetría se utilizan las variaciones gravitacionales sobre un terreno dado. Para este caso, en una esfera enterrada en el subsuelo, encontramos que dichas variaciones dependen de la diferencia de densidades, el volumen, el radio de la esfera y la separación que hay entre la esfera y la superficie. Teniendo en cuenta el ángulo que se forma entre ellos, es posible proceder a la siguiente demostración:

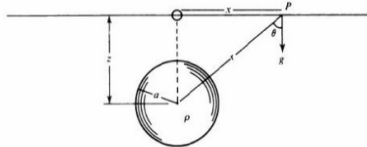


Figure 2.23. Gravity effect of a sphere.

$$g(p) = G \int \frac{dm}{r^2}$$

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$vd\rho = dm$$

$$g(p) = G \frac{4}{3} \pi r^3 \int \frac{d\rho}{r^2} \cos \theta$$

Por trigonometría, es posible afirmar que:

$$\cos \theta = \frac{z}{r}$$

$$r = \sqrt{x^2 + z^2}$$

$$g(p) = G \frac{4}{3} \pi r^3$$

$$g(p) = G \frac{4}{3} \pi r^3 \int \frac{z d\rho}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + z^2}} \cos \theta$$

$$\begin{aligned} &= G \frac{4}{3} \pi r^3 \int_{\rho_s}^{\rho_e} \frac{z d\rho}{(x^2 + z^2) \sqrt{x^2 + z^2}} \\ &= G \frac{4}{3} \pi r^3 \int_{\rho_s}^{\rho_e} \frac{z d\rho}{(x^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \\ &= \frac{4}{3} \pi G r^3 (\rho_e - \rho_s) \frac{z}{(x^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \end{aligned}$$

El máximo de la anomalía se obtiene en el centro de la esfera, es decir cuando  $x = 0$ , de tal forma que la ecuación toma la forma de:

$$g(p) = \frac{4}{3} \pi G r^3 (\rho_e - \rho_s) z^{\frac{1}{4}}$$

Al realizar la gráfica de aceleración gravitacional Vs Profundidad (Fig.1) de la función encontrada anteriormente, se evidencia que tiene la forma de una gaussiana, la cual tiene su máximo en el mayor valor que toma la gravedad. Ahora, para densidades del subsuelo más grandes que las densidades de la esfera, la gaussiana toma valores negativos que este sería el caso de un diapiro (curva verde) y a medida que se aumenta el  $z$  (profundidad de enterramiento), la gráfica se va atenuando, su máximo es menor y el ancho es cada vez mayor como se puede apreciar a continuación:

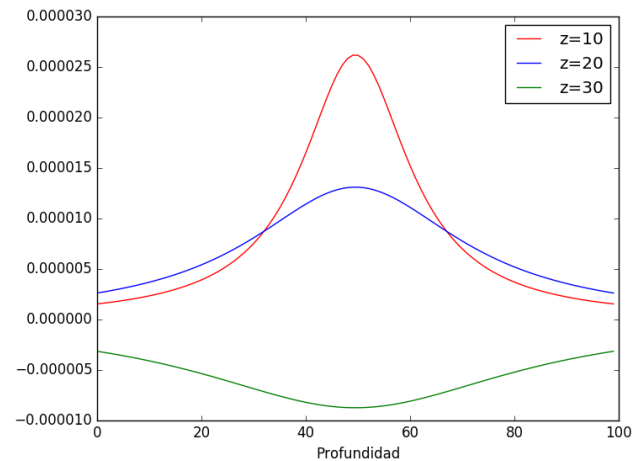


Fig. 1. Curvas de anomalía con variaciones en la profundidad para una esfera

Ahora, tomando el máximo de cada curva y su valor medio, es posible encontrar el denominado "Half-width" (distancia en el eje  $x$  desde la mitad normalizada de la gaussiana a la

función en un valor medio de la gravedad máxima). Para el caso de la esfera se obtuvieron los siguientes resultados: Para una profundidad de  $z = 10$

$g_{max}$	2,61E-05	$x_{max}$	49,5968
$g_{medio}$	1,31E-05	$x_{medio}$	62,0968

Encontrando que para este caso el Half-width es de 12,5 m. Con este valor se halla el coeficiente entre la profundidad de enterramiento y el Half-width obteniendo una valor correspondiente a 0,8.

Para  $z = 20$

$g_{max}$	1,30E-05	$x_{max}$	50,2016
$g_{medio}$	6,51E-06	$x_{medio}$	73,5887

Se repite el mismo procedimiento con  $z = 20$ , obteniendo un Half-width de 23,3871m y un coeficiente correspondiente de 0,855172296.

Para  $z = 30$

$g_{max}$	-8,96E-06	$x_{max}$	49,7984
$g_{medio}$	-4,48E-06	$x_{medio}$	88,5081

Para este caso se obtuve un Half-width de 38,7097m y un coeficiente de 0,774999548

Teóricamente se tiene que para una esfera, se cumple que:

$$z = 1.306x_{1/2}$$

Siendo 1.306 el coeficiente entre la profundidad y el Half-width, de tal forma que los datos aquí procesados tienen un error con respecto al valor teórico de aproximadamente 38 por ciento, esto puede darse como consecuencia de la diferencia de densidades que se escogieron para modelar cada una de las curvas, dado que es un factor determinante en el pico máximo de la anomalía, todos los modelos difieren en esto.

## II. CASO 2: CILINDRO HORIZONTALMENTE ENTERRADO

Para un cilindro, se evidencia una relación similar al de la esfera a partir de la integral triple y haciendo la sustitución con respecto al ángulo, se obtiene que:

$$g(x) = 2\pi G r^2 (\rho_c - \rho_s) \frac{z}{x^2 + z^2}$$

Se realiza el mismo procedimiento, de tal forma que para un enterramiento de  $z = 10$  se tiene que:

$g_{max}$	4,63E-02	$x_{max}$	49,4964
$g_{medio}$	2,31E-02	$x_{medio}$	50,5004

Obteniendo un Half-width de 1,004 m con un valor correspondiente del coeficiente de 9,960159363.

Para  $z = 50$ :

$g_{max}$	2,57E-02	$x_{max}$	49,4419
$g_{medio}$	1,29E-02	$x_{medio}$	50,5313

Con un Half-width resultante de 1,0894m y un coeficiente de 45,89682394

Finalmente, para una distancia de enterramiento de  $z = 90$ , se tiene que:

$g_{max}$	5,14E-03	$x_{max}$	49,4691
$g_{medio}$	2,57E-03	$x_{medio}$	50,4768

Donde se tiene que el coeficiente es de 89,31229533 con un Half-width de 1,0077m.

El anterior procesamiento de datos, fue calculado a partir de la siguiente gráfica:

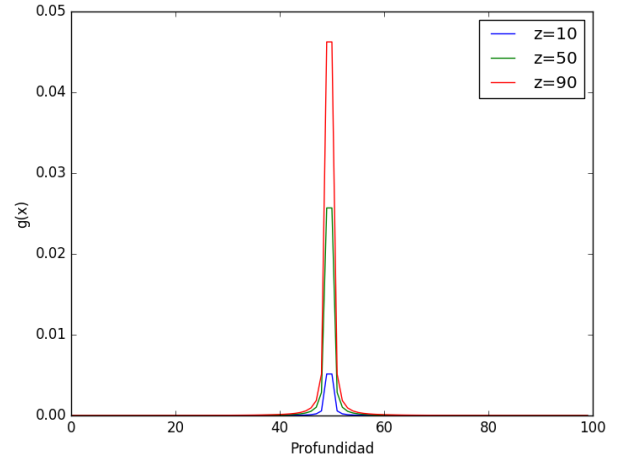


Fig. 2. Curvas de anomalía con variaciones en la profundidad para un cilindro

De la misma forma, es posible concluir que la relación entre la distancia de enterramiento y la distancia media de la gaussiana es mayor a la que se esperaría teóricamente, dado que para este caso se dispuso de las densidades aleatoriamente. Este tipo de anomalías es posible observarlas en el estudio de estructuras de deformación tales como los pliegues sinclinales y anticlinales, donde la mayor densidad de material se encuentra en el eje del pliegue. Dado que el "cilindro" está dispuesto horizontalmente, dicho máximo de densidad concuerda con el máximo de la gaussiana precisamente donde el radio del cilindro es igual a 0.

## III. CASO 3: LOSA HORIZONTAL-SEMI INFINITA

Es posible modelar una losa dispuesta horizontalmente y de longitud semi-infinita con el tratamiento de la siguiente ecuación:

$$g(x) = 2G(\rho_p - \rho_s)h\left[\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{x}{z_0}\right)\right]$$

Ahora, al graficar datos aleatorios no se obtendrá una función gaussiana, puesto que la geometría y modelamiento es diferente a los casos anteriores, pues en este se observará la ubicación de fallas en bloques de sedimentos.

En este perfil, se observan 3 curvas diferentes relacionadas a la placa horizontal a una distancia subterránea de 10,20,30m.

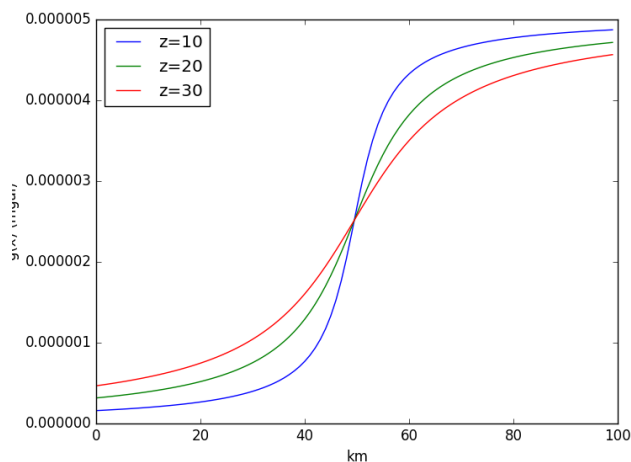


Fig. 3. Curvas de anomalía con variaciones en la profundidad para una placa

Es posible observar la variación gravitacional, donde la estructura muestra en la parte derecha la presencia de alguna unidad litológica con una densidad mayor a la unidad litológica encontrada a la izquierda, de lo cual podemos inferir que estamos bajo un contacto geológico posiblemente de arenisca (densidad baja) con el basamento (densidad alta), lo cual contrasta en la gráfica.

Consecuentemente, el cambio abrupto en el signo de las pendientes correspondiente a cada perfil se puede estudiar más detalladamente con las derivadas de las funciones, de tal forma que se obtiene para las primeras derivadas:

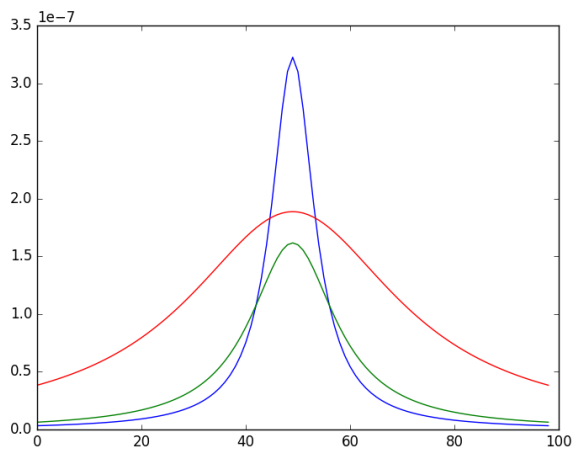


Fig. 4. Primeras derivadas de las curvas de anomalía respectiva a la placa

Ahora, para las segundas derivadas, encontramos unas gráficas "pulso" de las cuales es posible concluir que en el comportamiento gráfica inicial (Fig 3) el contacto geológico se debía a la presencia de una falla normal, en la cual el bloque colgante pertenecía a la arenisca y el bloque yacente al basa-

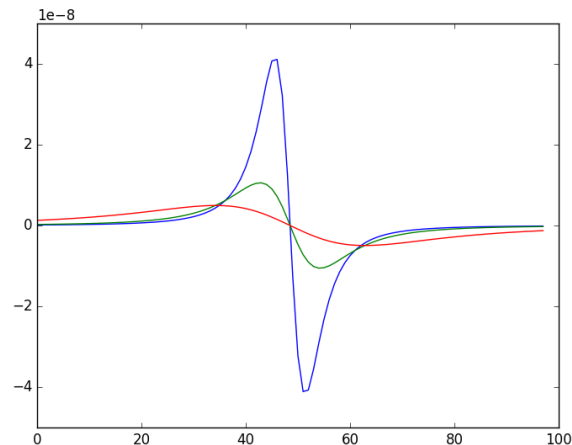


Fig. 5. Segundas derivadas de las curvas de anomalía respectiva a la placa

mento, el plano de falla está definido por estos "pulsos" a una distancia aproximadamente de 50m e incluso son observables en las gráficas de primeras derivadas, justo en el máximo de las funciones.

#### IV. TALLER 1.2- ANOMALÍAS DEL VOLCÁN AZUFRAL

Con los datos obtenidos del Volcán Azuftral (Nariño), se realizaron una serie de estudios y correcciones gravitacionales necesarias para quitar los efectos locales tales como: irregularidades del terreno, cambio de altura y latitud, ésto, dado que geoformas pueden afectar las mediciones en la aceleración por el deficit o extra de material(Corrección del Teerreno). A continuación se muestra la gráfica del Perfil topográfico de un costado del volcán, donde el eje y describe la elevación de dicha topografía y el eje x describe la distancia que se tuvo en cuenta entre mediciones.

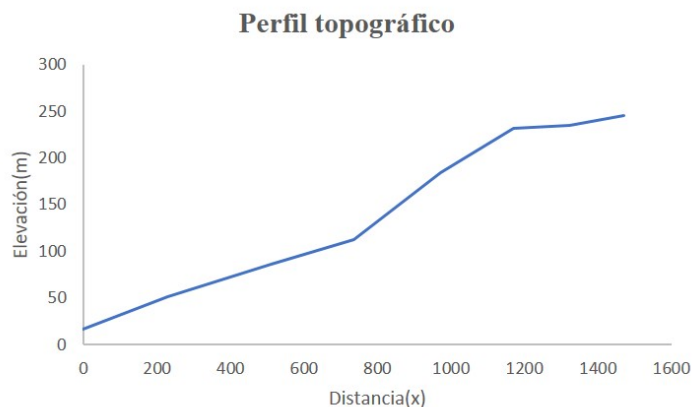


Fig. 6. Perfil topográfico del volcán Azuftral (Nariño-Colombia)

Para encontrar el mejor perfil de la Anomalía de Bouguer fue necesario tomar varios valores de densidad (entre 2000 y

3000), posteriormente, se aplicó el método de Nettleton para calcular densidades, el cual consiste en graficar  $\Delta g_B$  contra la distancia y manejar la curva con menor correlación del perfil topográfico, obteniendo:

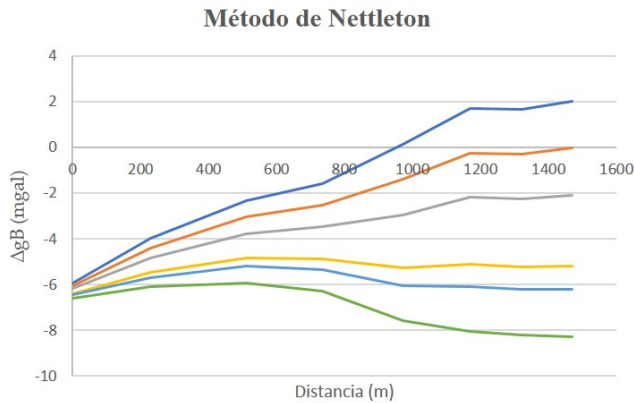


Fig. 7. Determinación de la densidad del suelo por medio del método de Nettleton

De tal forma, la curva que menor relación tuvo con el perfil topográfico fue cuya densidad corresponde a  $\rho = 2700$ , de ahí, se realizó el tratamiento de datos para obtener las anomalías de Bouguer, Aire libre y sus respectivas correcciones mostradas a continuación:

x (m)	Elevación (m)	Grav medida (mgals)	Corrección aire libre (mgals)	Anomalia aire libre (mgals)	Corrección de Bouguer (mgals)	Anomalia de Bouguer (mgals)
0	23	-4,3	7,084	2,784	-2,604023278	0,179976722
623	101	-19,3	31,108	11,808	-11,43505874	0,372941257
1246	225	-41,4	69,3	27,9	-25,47414077	2,425859235
1869	314	-56,2	96,712	40,512	-35,55057867	4,961421332
2492	459	-80,7	141,372	60,672	-51,96724716	8,704752839
3115	610	-106,2	187,88	81,68	-69,06322607	12,61677393
3738	730	-127,8	224,84	97,04	-82,64943448	14,39056552
4361	811	-142,9	249,788	106,888	-91,82012516	15,06787484
4984	577	-99,3	177,716	78,416	-65,32701876	13,08898124
5607	397	-66,4	122,276	55,876	-44,94770615	10,92829385
6230	297	-48,6	91,476	42,876	-33,62586581	9,25013419
6853	243	-40,2	74,844	34,644	-27,51207203	7,131927974
7476	181	-30,4	55,748	25,348	-20,49253102	4,85468985
8100	113	-18,9	34,804	15,904	-12,79367958	3,110320416
8722	94	-15,9	28,952	13,052	-10,64252992	2,40947008
9345	66	-11,2	20,328	9,128	-7,472414624	1,655585376
9968	43	-7,4	13,244	5,844	-4,868391346	0,975608654
10591	25	-4	7,7	3,7	-2,830460085	0,869539915
11214	8	-1,4	2,464	1,064	-0,905747227	0,158252773

Fig. 8. Procesamiento de datos para la Anomalia de Bouguer

Graficando la Anomalia de Bouguer con esta densidad escogida, se tiene que:

$g_{max}$	15,06787484	$x_{max}$	4361
$g_{medio}$	7,533937421	$x_{medio}$	6853

De tal forma que la anomalía se aproxima a una gaussiana, teniendo que el Half-width que se obtiene para la gráfica (Fig 9) es de 2492m, ahora para obtener el enterramiento se usa la fórmula para la distancia en una esfera, obteniendo que el cuerpo se encuentra enterrado a una distancia de 3254,55m con un radio de 141km. Estas distancias están en el orden de magnitud de estratovolcanes de dimensiones como el Azufzal y el Nevado del Ruiz.

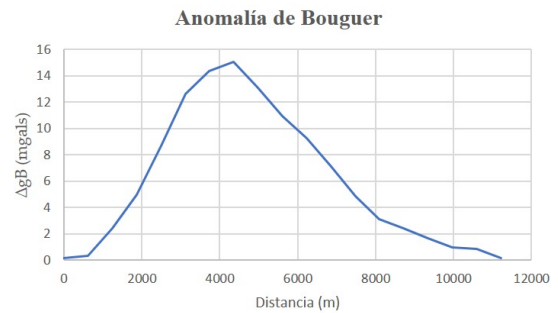


Fig. 9. Anomalia de Bouguer del volcán

Dicha anomalía que se aproxima al comportamiento de un cuerpo esférico, podría encontrarse en el volcán como consecuencia de la asimilación cortical, donde rocas pertenecientes a las paredes internas del volcán se desprenden y se funden, diferenciándose del resto del magma, al ser un magma distinto envuelto en un magma más caliente y menos denso, pudo formarse una esfera térmicamente aislada y de gran densidad que sería lo que se evidencia en la anomalía. La asimilación cortical es posible evidenciarla regularmente en las rocas félsicas con intrusiones máficas o al contrario.

## V. TALLER 3- VISUALIZACIÓN DE DATOS

Con ayuda del software Surfer, se realizó el mapa de elevación del terreno con sus respectivas estaciones, esta corrección como anteriormente se mencionaba busca modificar el mapeo del terreno con el fin de que valles y montañas cercanas no afecten las mediciones por déficit o exceso de masa.

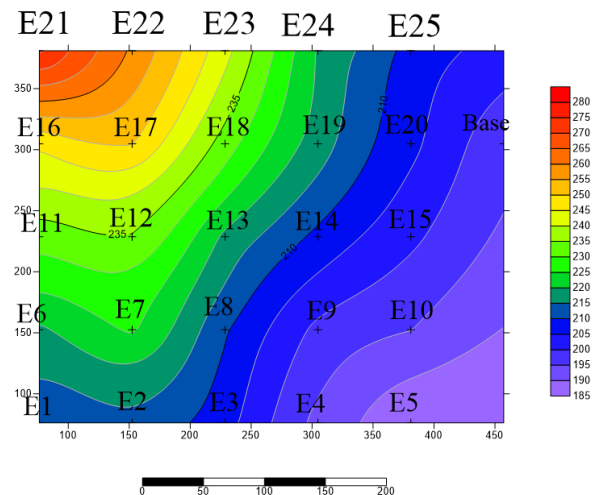


Fig. 10. Corrección por elevación

Posteriormente, se genera un mapa con la corrección de aire libre (Fig 11), la cual consiste en estudiar las variaciones gravitacionales con la altura, dicha corrección se toma con

punto de referencia el elipsoide, de tal forma que para alturas por encima del elipsoide la corrección es positiva y de manera proporcional, para alturas por debajo del elipsoide, la corrección es negativa.

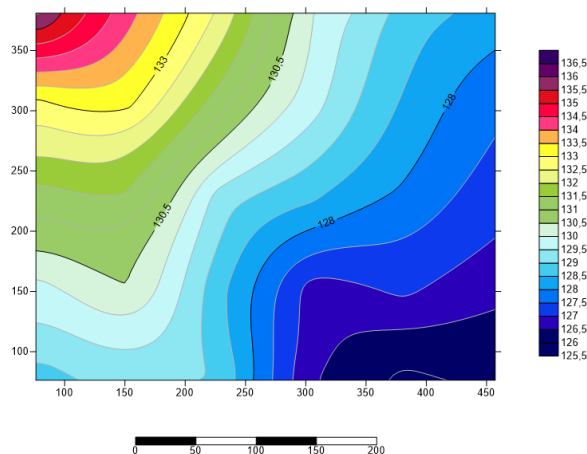


Fig. 11. Corrección de Aire Libre

Seguidamente, al generar un mapa de contornos de la anomalía de Bouguer (Fig 12), es posible observar que las diferencias entre las curvas de nivel son pequeñas, es decir, al hacer un corte transversal se observan que las alturas varían aproximadamente 40 cm y la presencia de poca densidad interpretada por el software por la tonalidad de azules, describiría un terreno de 400m aproximadamente y comparando con la morfología aledaña se puede afirmar que se trata de un valle posiblemente una laguna, lo cual permite ver esa variación entre un cuerpo de agua probablemente y tierra como tal.

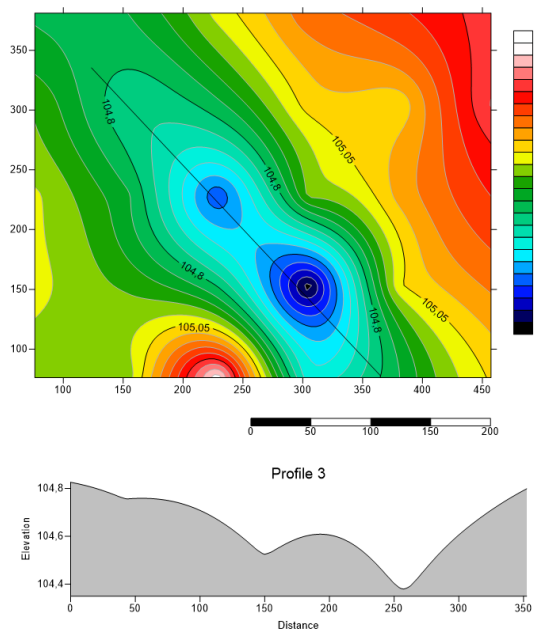


Fig. 12. Corrección de Bouguer

En los siguientes mapas (Fig 13-14) se observa la corrección de elevación del terreno para Colombia, donde se evidencia la elevación de la Cordillera de los Andes y las distintas cuencas sedimentarias como la del Magdalena Medio.

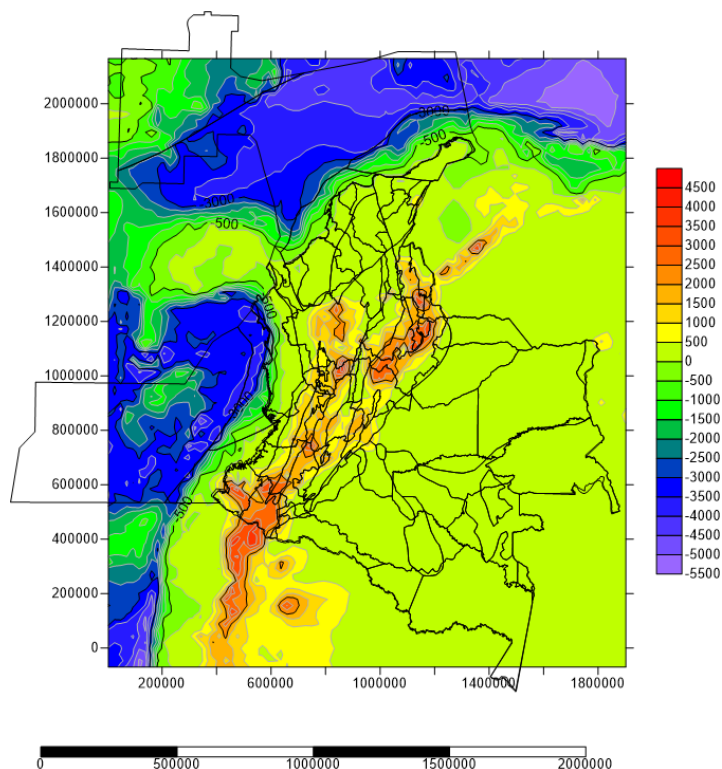


Fig. 13. Mapa de elevación del Terreno en Colombia

Esas elevaciones son debidas al levantamiento producido por el sistema de fallas de Romeral, el cual ha puesto ese fallamiento en un sistema compresivo con estructuras tales como cabalgamientos, pliegues y demás estructuras de deformación, debido a la subducción de la placa de Nazca en Suramérica. Permitiendo la acumulación de material en ciertos lugares como se expone en el mapa de la Anomalía de Bouguer total con columnas de material extra con respecto al mar, dado que se extiende hasta Ecuador, se expone la cordillera central en la cual se encuentran varios volcanes que forman parte del círculo de fuego del pacífico cuyo material saliente es menos denso que el manto y se refleja en el sondeo de Bouguer.

Finalmente, el mapa de derivadas direccionales de la Anomalía de Bouguer total (Fig 15) se genera a partir del vector perpendicular a la vergencia del sistema de fallas anteriormente mencionado, dicha dirección es SW-NE aproximadamente de tal forma que el mapa de primeras derivadas se realizó con una vergencia SE-NW (125 grados aproximadamente). Al realizar un corte transversal en la dirección de la derivada se encuentra un perfil topográfico que concuerda con las formaciones levantadas por la cordillera en esfuerzos de compresión.



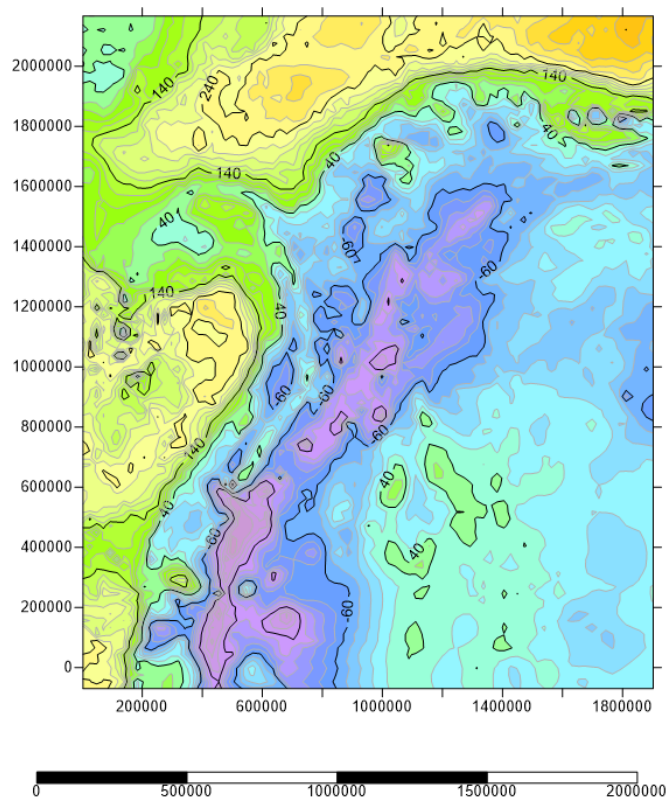


Fig. 14. Mapa de Anomalía de Bouguer total en Colombia

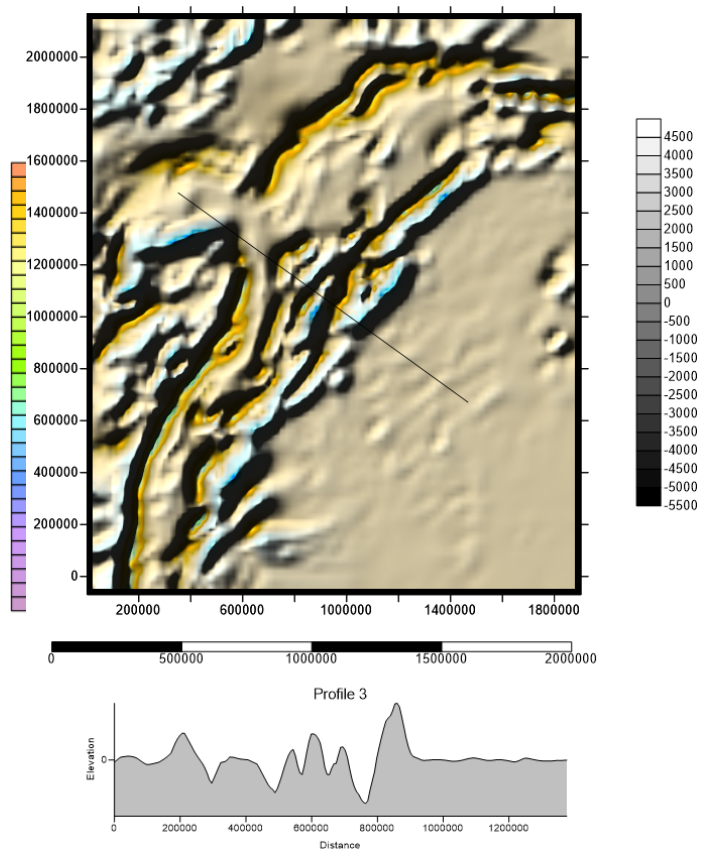


Fig. 15. Mapa de primera derivada de la Anomalía de Bouguer total