



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**MODELADO GRAVIMETRICO BIDIMENSIONAL
PARA RELIEVES TOPOGRAFICOS ABRUPTOS**

T E S I S

QUE PARA OBIENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOFISICO

P R E S E N T A

JOSE GUTIERREZ Y ACOSTA

México. D. F.

1979

24
7



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	pag.
RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
CAPITULO I	
TEORIA DE LA ANOMALIA DE BOUGUER	3
CAPITULO II	
ANALISIS DE CORRECCIONES GRAVIMETRICAS	14
Correccion de Aire Libre	
Correccion de Bouguer	
Correccion Topografica	
CAPITULO III	
DESARROLLO DEL METODO PARA TOPOGRAFIA ABRUPTA	21
CAPITULO IV	
MODELOS Y APLICACION	30
CAPITULO V	
RESULTADOS Y CONCLUSIONES	49
BIBLIOGRAFIA	51

R E S U M E N

En los trabajos de prospección gravimétrica se aplica una serie de correcciones a los datos de gravedad recopilados en el campo. En el presente trabajo se hará un análisis de algunas de las correcciones más importantes, como son la corrección de aire libre, la corrección de Bouguer y la corrección topográfica. Tales correcciones se efectúan con la finalidad de reducir los datos de gravedad observados a un valor de gravedad llamado Anomalia de Bouguer, que es de gran importancia pues a partir de este valor es que se hacen las interpretaciones gravimétrica, y por lo tanto, dichas correcciones - deben hacerse entendiendo realmente su significado.

En los lugares en donde se tiene un relieve topográfico demasiado abrupto se complican los trabajos gravimétricos desde su recopilación hasta sus correcciones e interpretación por medio de modelos bidimensionales. Nuestro caso es llegar a proponer un método por medio del cual se resuelva el problema de la topografía en el modelado de estructuras bidimensionales para la interpretación. La solución propuesta debe ser flexible pues ha de utilizarse en perfiles suaves, abruptos, o en superficies que se encuentren en cualquier elevación sobre el nivel de referencia.

I N T R O D U C C I O N

En la interpretación gravimétrica por medio de modelado normalmente se hacen los cálculos del efecto gravitacional de los cuerpos del modelo sobre un nivel horizontal como nivel de referencia, este tipo de cálculo es aceptable para lugares planos o con relieve topográfico suave, los cuales no siempre es posible encontrarlos pues hay lugares en donde el relieve topográfico es de variación considerable en toda el área del levantamiento gravimétrico, o se encuentran combinadas la topografía abrupta con la topografía plana dentro de la misma área. En las condiciones anteriormente mencionadas es erróneo proponer un modelo geológico y calcular su efecto gravimétrico sobre una superficie plana, pues esto traería como consecuencia errores considerables en la interpretación, pues no sería correcto hacer una comparación de la curva calculada del modelo con la curva observada en el campo ya que ambos resultados son obtenidos en diferentes condiciones.

Por tal motivo proponemos una solución a este problema, por medio de la cual podemos llevar a cabo la comparación de la curva gravimétrica calculada con la curva gravimétrica observada. Esta solución nos permite obtener el efecto gravimétrico calculado del modelo sobre el relieve topográfico, por lo tanto, nos proporciona resultados más reales para nuestros modelos.

1.- TEORIA DE LA ANOMALIA DE BOUGUER

Dentro del campo de la Gravimetría, el valor más utilizado para la investigación de problemas geológicos sobre la tierra es el valor de la Anomalia de Bouguer; debido a esto se hará un análisis del verdadero significado de esta anomalía, así también como de las correcciones de Aire Libre, Bouguer y topográfica que frecuentemente son mal interpretadas. Estas correcciones serán analizadas en el capítulo siguiente, por el momento sólo nos ocuparemos de la Anomalia de Bouguer.

La confusión surge de la regla establecida de describir la Anomalia de Bouguer teniendo que ser reducida a un plano de referencia, suponiendo que los valores de gravedad son aquéllos que podrían observarse si las mediciones se hubieran hecho sobre el plano de referencia.

La mala concepción es causada aparentemente por la práctica común de aplicar las correcciones a los datos observados en vez que a los valores teóricos, aunque las diferentes correcciones son también en naturaleza teóricas. Por lo tanto, las correcciones de Aire Libre y Bouguer son cantidades -- idealizadas cuyo propósito es ajustar el valor calculado de gravedad en el nivel del mar para determinar el valor teórico en el punto de observación. En consecuencia, los valores de la Anomalia de Bouguer no están colocados sobre un plano común, sino que están localizados en las diferentes elevaciones de sus respectivos puntos de medición.

Estrictamente hablando, la Anomalia de Bouguer es la diferencia entre la gravedad observada en algún punto y la gravedad esperada en el mismo punto para una tierra normal correspondiendo al mismo nivel.

La fórmula calculada para la Anomalia de Bouguer, agrupando los términos de una manera que la notación de un modelo teórico de la tierra aparezca agrupado:

$$\Delta g = g - (\gamma_0 - \gamma_z h + 2\pi G \rho_c h - C_r) \quad (1.1)$$

donde: g representa la gravedad medida en una estación localizada a la elevación h sobre la topografía de la tierra.

γ_0 la atracción ejercida en la superficie del elipsoide de referencia por las masas consideradas homogéneas dentro de ella (el campo normal).

γ_z el gradiente vertical del campo normal.

$\gamma_h = \gamma_0 - \gamma_z h$ el campo normal a la altura h .

$2\pi G \rho_c h - C_r$ el efecto gravimétrico a la altura h de las masas comprendidas entre la superficie topográfica terrestre y la superficie del elipsoide de referencia, masas a las cuales atribuimos una densidad constante (ρ_c).

El término $(\gamma_h + 2\pi G \rho_c h - C_r)$ representa precisamente la atracción ejercida en el punto de elevación h por una tierra teórica teniendo la forma de la real, homogénea desde el punto de vista de la densidad.

La diferencia entre la atracción medida y la calculada para el modelo teórico se llama Anomalia de Bouguer, que representa exactamente el efecto gravimétrico de todas las inhomogeneidades del interior de la tierra. El pug

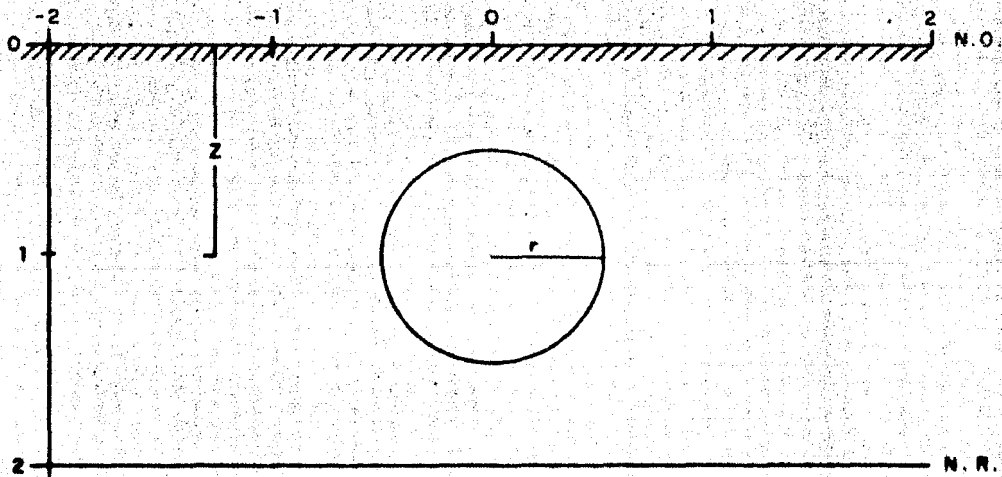
to de aplicación de esta magnitud es la estación donde la medición fue hecha y no su proyección sobre la superficie de referencia.

Esta nueva concepción de la Anomalia de Bouguer es un poco difícil lograr entenderla, pues generalmente la gente relacionada con la Geofísica tiene el concepto equivocado, por lo tanto, se presentarán dos ejemplos con los cuales quedará más claro el concepto de la Anomalia de Bouguer.

Los dos ejemplos que presentaremos son casos ideales, pues nuestros modelos no tienen problemas de topografía, lo cual quiere decir que las mediciones fueron hechas sobre una superficie plana y paralela a la superficie de referencia, otra de las consideraciones hechas fue que la densidad del cuerpo anómalo y la del cuerpo encajonante son constantes en todas las direcciones, esto nos llevó a simplificar bastante los cálculos y poder tener así un resultado más simple que es nuestro principal objetivo para poder comprender el significado de la Anomalia de Bouguer.

En este primer ejemplo se hará el análisis de un cuerpo anómalo de forma esférica comprendido entre el nivel de observación y el nivel de referencia como se indica en la Figura 1, la densidad propuesta para la placa comprendida entre los dos niveles será ρ_1 y la densidad del cuerpo anómalo será una densidad ρ_2 .

Primamente obtendremos la Anomalia de Bouguer con el concepto erróneo que se tendría aplicando a la gravedad observada la corrección de Aire Libre y la corrección de Bouguer ($g + \gamma_{zh} - 2\pi G\rho_1 h$). Lo que nos haría



$Z = 1 \text{ Km.}$

$\rho = 0.30 \text{ gr/cm}^3$

$r = 0.50 \text{ Km.}$

N. O. = NIVEL DE OBSERVACION

N. R. = NIVEL DE REFERENCIA

PERFIL EN EL QUE SE MUESTRA UN CUERPO ANOMALO ENTRE EL NIVEL DE REFERENCIA Y EL NIVEL DE OBSERVACION.

FIG. 1

suponer que al corregir la gravedad observada bajaríamos al nivel de referencia nuestras observaciones para obtener finalmente la Anomalia de Bouguer ($\Delta g_{BOU} = g_{CORREGIDA} - \gamma_0$), cosa que no sucede así, porque tendríamos una anomalía negativa que nos indicaría una deficiencia de masa (aparente) con profundidad negativa a partir del nivel de referencia. La anomalía resultante en esta posición sería como se muestra en la Figura 2.b.

Ahora si consideramos la Anomalia de Bouguer con las correcciones debidamente aplicadas.

Partiendo de la gravedad observada

$$g = \gamma_0 + 2\pi G\rho_1 h + \frac{4\pi G\rho_2 r^3}{3z^2} - \gamma_z h \quad (1.2)$$

y agrupando el primero y cuarto términos del lado izquierdo, tenemos

$$\gamma_h = \gamma_0 - \gamma_z h \quad (1.3)$$

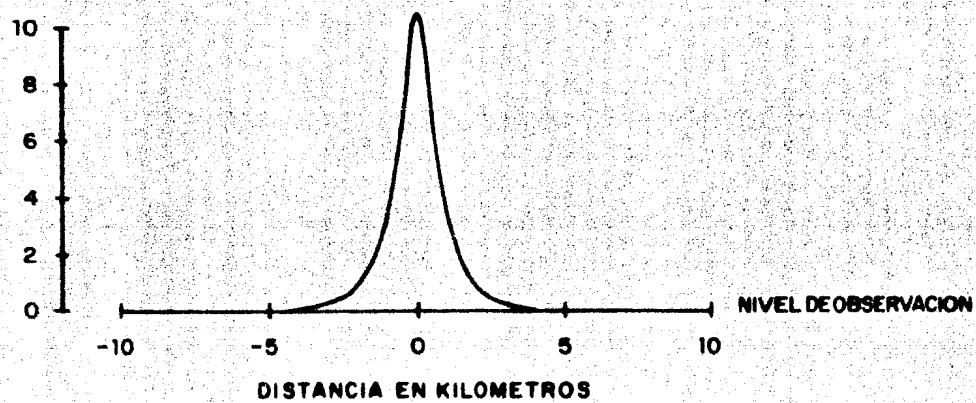
que es la gravedad normal a una altura h.

Por lo tanto, la gravedad observada sobre el centro del cuerpo anómalo quedaría

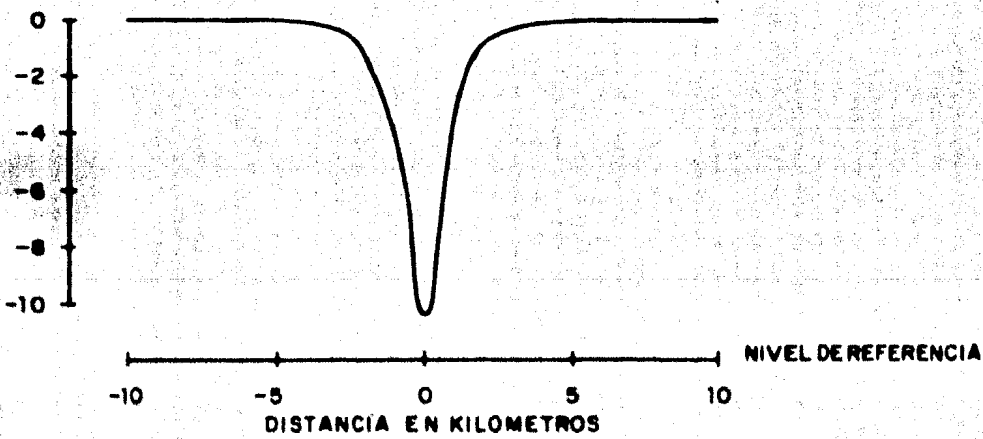
$$g = \gamma_h + 2\pi G\rho_1 h + \frac{4\pi G\rho_2 r^3}{3z^2} \quad (1.4)$$

Si aplicamos las correcciones a la gravedad teórica como debe de ser tenemos que,

$$\gamma_0 - \gamma_z h + 2\pi G\rho_1 h = g_{TEORICA CORREGIDA} \quad (1.5)$$



(a)



(b)

ANOMALIAS GRAVIMETRICAS CALCULADAS SOBRE DIFERENTES NIVELES.

(a) ANOMALIA CALCULADA SOBRE EL NIVEL DE OBSERVACION

(b) ANOMALIA CALCULADA SOBRE EL NIVEL DE REFERENCIA.

FIG. 2

$$\gamma h + 2\pi G\rho_1 h = g_{T.C.} \quad (\text{a la altura } h) \quad (1.6)$$

Así, finalmente obtenemos la Anomalia de Bouguer como:

$$\Delta g_{BOU} = g - g_{T.C.} \quad (1.7)$$

$$\Delta g_{BOU} = \gamma h + 2\pi G\rho_1 h + \frac{4\pi G\rho_2 r^3}{3 z^2} - (\gamma h + 2\pi G\rho_1 h)$$

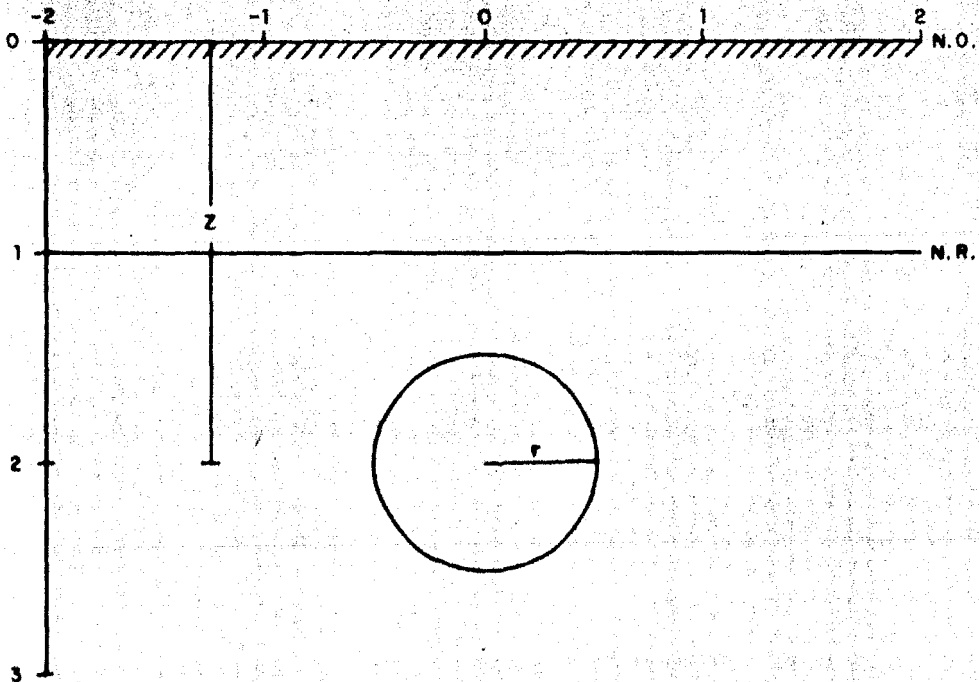
$$\Delta g_{BOU} = \frac{4\pi G\rho_2 r^3}{3 z^2} \quad (1.8)$$

que es la anomalía provocada por la esfera sobre el plano de observación.

En esta forma se pudo observar más claro que los valores teóricos - son llevados a los niveles de observación para ser restados a la gravedad - observada, dando como resultado la Anomalia de Bouguer como se muestra en - la figura 2.a. Quedando estos valores en los puntos de observación y no sobre el plano de referencia.

En este segundo ejemplo se hará el análisis de un cuerpo anómalo de forma esférica situado por debajo del nivel de referencia como se indica en la Figura 3, la densidad propuesta para el cuerpo encajonante será ρ_1 y la densidad del cuerpo anómalo será una densidad ρ_2 .

Efectuando las mismas operaciones que en el ejemplo anterior, y corrigiendo la g por Aire Libre y Bouguer, podemos pensar que los valores de



$Z = 2 \text{ Km.}$

$\rho = 0.30 \text{ gr/cm}^3$

$r = 0.50 \text{ Km.}$

N.O. = NIVEL DE OBSERVACION

N.R. = NIVEL DE REFERENCIA

PERFIL EN EL QUE SE MUESTRA UN CUERPO ANOMALO DE-
BAJO DEL NIVEL DE REFERENCIA

FIG. 3

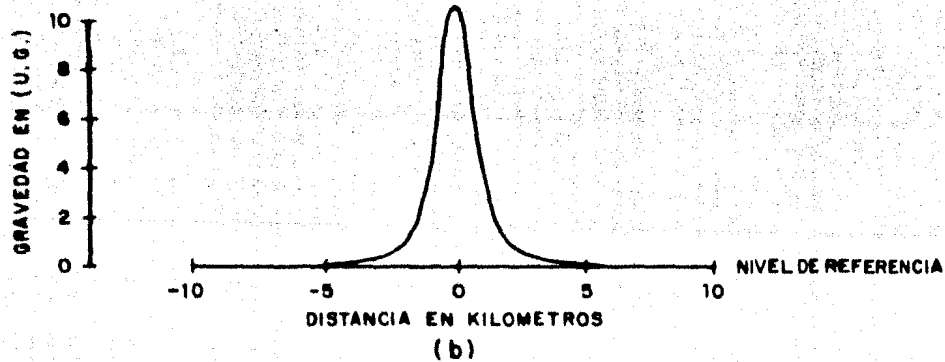
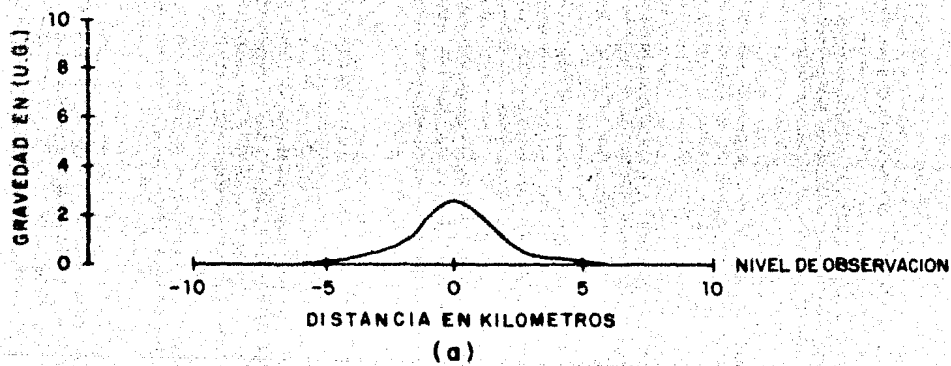
gravidad observada los estaríamos reduciendo al nivel de referencia para poder restar la gravedad teórica y así obtener la Anomalía de Bouguer que serían todos aquellos cambios de densidad lateral que se encuentran por debajo del nivel de referencia, como si hubieran sido hechas las observaciones sobre el plano de referencia, siendo esto falso pues todas las anomalías se enfatizarían, lo cual equivaldría que al hacer las correcciones gravimétricas se haría una continuación de campo hacia abajo. La anomalía gravimétrica sobre el nivel de referencia sería como se muestra en la Figura 4.b.

Ahora trataremos el problema debidamente, haciendo las correcciones teóricas a la gravedad teórica.

Nuevamente partiendo de la ecuación (1.2) que es la gravedad observada, y aplicando las correcciones teóricas a la gravedad teórica obtenemos la ecuación (1.5), que es la gravedad teórica sobre el punto de observación que en este caso está sobre el centro de la esfera.

Al obtener la Anomalía de Bouguer que es la ecuación (1.7), y haciendo las sustituciones de la gravedad teórica corregida y la gravedad observada, vemos nuevamente que el valor de la Anomalía de Bouguer es el efecto gravimétrico de la esfera sobre el plano de observación, dicha anomalía tiene la forma como se muestra en la Figura 4.a.

En los dos ejemplos anteriores podemos ver que la Anomalía de Bouguer es igual al efecto gravimétrico de la esfera tal y como intervino en el efecto gravimétrico observado, sin alterarse este valor en ningún momento del cál



ANOMALIAS GRAVIMETRICAS CALCULADAS SOBRE DIFERENTES NIVELES

(a) ANOMALIA CALCULADA SOBRE EL NIVEL DE OBSERVACION

(b) ANOMALIA CALCULADA SOBRE EL NIVEL DE REFERENCIA

FIG. 4

culo o sea que la curva no se invirtió y tampoco se enfatizó sino que conservó sus valores y su forma sobre el plano de observación, lo cual nos indica que en ningún momento nos hemos movido de los puntos de observación.

Por lo tanto, es falso que los valores de la Anomalia de Bouguer se reducen al plano de referencia como se indica en gran parte de la literatura geofísica.

II .- ANALISIS DE CORRECCIONES GRAVIMETRICAS

En el presente capítulo se hará un análisis de las correcciones de Aire Libre, Bouguer y por Topografía, que son empleadas en la prospección gravimétrica.

En cada una de las correcciones se analizará su significado y la forma de emplearse en la información gravimétrica recopilada.

a) CORRECCION DE AIRE LIBRE.

Las lecturas de gravedad hechas sobre los continentes raramente son hechas al nivel del mar, por lo tanto, dichas lecturas requieren que se les aplique una cierta corrección por la elevación de la estación, pues la gravedad observada al nivel de mar es diferente a la gravedad observada a una cierta elevación. La proporción de esta variación vertical, o el gradiente vertical de gravedad, puede ser calculada con bastante aproximación de la fórmula de la atracción gravimétrica.

Si asumimos que la tierra es esférica de masa M y radio R . La gravedad en un punto sobre la superficie de la tierra esférica es

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (11.1)$$

El gradiente vertical es

$$\frac{dg}{dz} = \frac{dg}{dR} = - \frac{2G}{R^3} = - \frac{2g}{R} \quad (11.2)$$

Si tomamos como radio medio de la tierra a $R = 6,367 \times 10^6$ m., y para el valor teórico de gravedad en el nivel del mar a 45° de latitud $g = 980629$ mgals, sustituyendo estos valores en la ecuación (11,2) tenemos:

$$\frac{dg}{dR} = - \frac{2(980629)}{6,367 \times 10^6} = -0.3086 \text{ mgals/m.} \quad (11.3)$$

Esta ecuación da la proporción en la cual g decrece cuando se incrementa la distancia del centro de la tierra, esta corrección es llamada corrección de Aire Libre por que es calculada como si el punto elevado de medición estuviera suspendido libremente en el aire sin considerar los efectos de atracción de la masa de la materia entre la elevación del punto de observación y la elevación de referencia.

Esta corrección se hace multiplicando la ecuación (11,3) por la elevación en metros del punto observado, considerando las elevaciones positivas sobre el nivel de referencia y las negativas en el caso contrario, por lo tanto, esta corrección de tipo teórico es añadida con su respectivo signo a la gravedad ejercida sobre el elipsoide de referencia.

El significado de esta corrección es la translación de la gravedad normal a la altura del punto de observación.

b) CORRECCION DE BOUGUER.

En la corrección de Aire Libre no se tomó en cuenta el material que se encuentra entre los niveles de observación y de referencia.

En esta corrección se toma en cuenta el material que fue omitido en la corrección de Aire Libre. La corrección de Bouguer se basa en que el material que se encuentra entre el nivel de observación y el de la superficie de referencia, como se muestra en la Figura 5, ejerce una atracción gravimétrica adicional sobre las observaciones hechas por encima de la superficie de referencia. Esta corrección considera al material colocado entre los niveles de referencia y de observación como una loza de gran extensión lateral y de espesor h igual a la diferencia de cotas, siendo la atracción gravimétrica de la loza igual a

$$\Delta g_{BOU} = 2\pi G \rho h \quad (11.4)$$

$$\Delta g_{BOU} = 0.04193 \rho h \quad \text{mgals/m.}$$

donde ρ es la densidad del material.

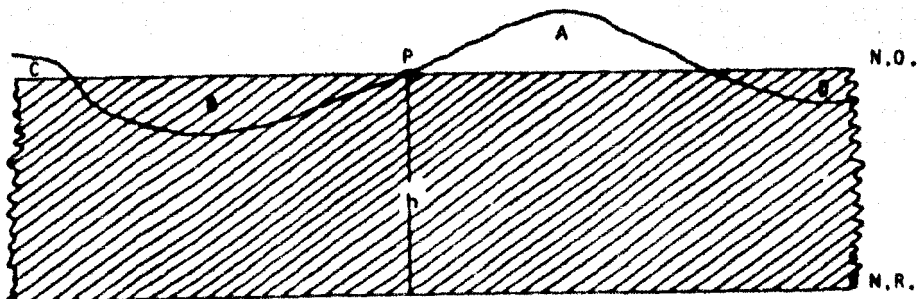


FIGURA. 5

Las montañas que sobresalen (A y C) a esta superficie horizontal -- imaginaria, y los valles (B y D) que quedan por debajo falsean esta hipótesis; este error se compensará con la corrección topográfica.

Como podemos observar, el valor de la ecuación (11.4) es positivo y sólo dependerá del valor que tome h , ya sea positivo o negativo. Al decir -- que h adquiere valores negativos nos referimos a que los puntos de observación se encuentren por debajo del nivel de referencia, y como hacia abajo -- consideramos las cotas negativas, h estará afectada por un signo (-).

El significado de esta corrección es que toma en cuenta la atracción gravimétrica de la placa teórica que hay entre la observación y la superficie de referencia. Esta corrección es también de tipo teórico por lo tanto se adjuntará con su respectivo signo a la gravedad normal que tenemos en el punto de observación, teniendo en esta forma la gravedad normal sobre los puntos de observación con errores de tipo topográfico que se corregirán más adelante.

c) CORRECCION POR TOPOGRAFIA.

La corrección topográfica también puede considerarse como una corrección de tipo teórico, pues es una corrección a la corrección de Bouguer, el error cometido en la corrección de Bouguer al no considerar las masas que se encuentran sobre la placa o rellenando las depresiones, son tomadas en cuenta en la corrección topográfica.

Refiriéndonos a la Figura 5, la cual representa una estación situada por encima del nivel de referencia, se deduce de ella que al aplicar la co--

corrección de Bouguer por la loza infinita situada entre el nivel de observación y el nivel de referencia, las depresiones tales como (B y D) fueron rellenas por roca. Al mismo tiempo suponemos que las partes altas como (A y C) no producen efecto gravitatorio.

El objeto de las correcciones topográficas, como ya se mencionó, es el de compensar ambas suposiciones. Hemos de hacer notar que resulta evidente que una estructura por encima del nivel del punto de observación, como -- las parte (A y C) de la Figura 5, no ha sido tomada en cuenta en el valor de la gravedad normal en P, por lo tanto, estas partes altas ejercerán una fuerza de atracción hacia arriba sobre la estación, y tenderán a reducir la gravedad normal en el punto P, de modo que la corrección que representa la atracción de los cerros debe restarse a la gravedad normal en P.

En lo que respecta a las depresiones como las partes (B y D) de la Figura 5, hay que recordar que al aplicar la corrección de Bouguer que representa el efecto de la loza, hemos incluido el material rocoso que contendrán las depresiones, por lo tanto, el valor de la gravedad normal en P es mayor debido a este exceso de masa, por lo tanto, para obtener el valor correcto de la gravedad normal en P, hay que restar esta atracción a la gravedad normal.

La corrección topográfica, como ya vimos, es siempre negativa independientemente de que el accidente topográfico próximo a la estación sea un montículo o una depresión.

Estas correcciones que hemos analizado son de tipo teórico, y la finalidad de aplicarlas es trasladar la gravedad normal de su posición original a una posición de altura h en que fueron hechas las observaciones.

Decimos que estas correcciones son de carácter teórico porque nosotros podemos suponer valores de gravedad en cualquier punto sólo suponiendo elevaciones y densidades arbitrarias logrando con esto crear un modelo teórico de una tierra que ejercería esos valores de gravedad sobre su superficie siendo una tierra normal y homogénea.

d) ANOMALIA DE BOUGUER.

La finalidad de los trabajos gravimétricos es llegar a obtener un cierto valor de gravedad que represente las variaciones del campo gravitatorio sobre la superficie del terreno en que fueron hechas las observaciones, a este valor de gravedad se le conoce con el nombre de Anomalia de Bouguer; a los valores de esta anomalía se les correlaciona en la interpretación gravimétrica con los cambios de densidad lateral, representándolos por medio de estructuras geológicas.

La Anomalia de Bouguer se obtiene haciendo la diferencia de la gravedad observada con la gravedad normal corregida, como se indica:

$$\Delta g = g - g_{T.C.} \quad (11.5)$$

En el caso de que el término de la corrección de Bouguer y la corrección topográfica representen adecuadamente la atracción de la parte de terr

no que se encuentra entre la estación y el nivel de referencia, las variaciones de la Anomalia de Bouguer sobre una región reflejarán los cambios de densidad que existen por debajo del nivel de referencia. Si éste no es el caso, al menos algunas de las variaciones pueden deberse a masas anómalas, las cuales pueden corresponder incluso a cuerpos anómalos situados -- por encima del nivel de referencia. Por lo tanto, las variaciones de Δg no deben atribuirse estrictamente a masas anómalas ubicadas debajo del nivel de referencia.

III.- DESARROLLO DEL METODO

En la interpretación gravimétrica ha sido necesario trabajar con cuerpos geométricos cuyas fórmulas de la atracción gravitacional sean conocidas, como por ejemplo una esfera, cilindro vertical, cilindro horizontal, placa finita, semi-infinita e infinita.

Al conocer las fórmulas de cada uno de estos cuerpos, podemos -- calcular sus diferentes anomalías gravitacionales variando sus parámetros, como la densidad, dimensiones del cuerpo y la profundidad, así en esta forma conociendo las anomalías gravitacionales de los diferentes cuerpos geométricos, podemos comparar cualquiera de las anomalías de estos cuerpos -- con las anomalías observadas en el campo, y en esta forma tener una idea -- del tipo de estructura que se encuentra en el subsuelo.

Como en la naturaleza no existen estructuras geológicas que se -- asemejen a los cuerpos geométricos, fue necesario hallar la forma de calcular los efectos gravitacionales de cuerpos de forma irregular, y así, en -- esta forma conoceremos la anomalía gravitacional de cualquier cuerpo por -- complicado que éste sea.

Este método de cálculo de la atracción gravitacional de cuerpos irregulares ha sido estudiado por M. King Hubbert, M. Talwani, Morgan y F. S. Grant y otros.

El método que desarrollaremos en el presente capítulo es el estudiado por Morgan y F.S. Grant, en el que obtienen la fórmula de la atracción gravitacional vertical de un cuerpo bidimensional de forma irregular aproximado por un polígono cerrado de K lados.

DESARROLLO.

El potencial gravitacional U es una función escalar que se define operacionalmente como

$$U(r) = -G \frac{m}{r} \quad (III.1)$$

que tiene un valor definido en cada punto P del espacio.

Puesto que los potenciales en el espacio libre son aditivos, el potencial gravitacional debido a una distribución continua de materia puede ser calculado por medio de una integración.

Si tenemos una masa distribuida continuamente con una densidad $\rho(r_0)$ a través del volumen V , como se indica en la Figura 6, el potencial gravitacional en un punto exterior P es

$$U_P(r) = - \int_V G \frac{dm}{|r-r_0|} = -G \int_V \frac{\rho(r_0)}{|r-r_0|} d^3r_0 \quad (III.2)$$

donde $|r-r_0| = \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \theta}$

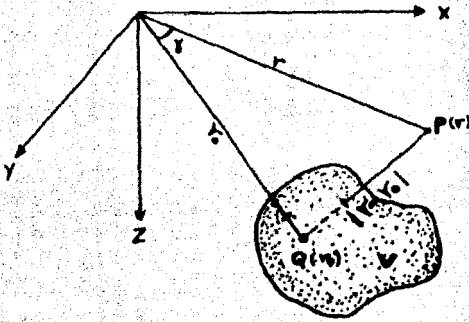


FIGURA 6

Si asumimos que la densidad ρ es independiente de la coordenada Y , además que el cuerpo es infinitamente alargado en la misma dirección -- sin cambios en su sección transversal, entonces tenemos que

$$U_p(x, z) = -G \int_V \rho(x_0, z_0) dx_0 dz_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \right]^{-1/2} dy_0$$

Simplificando aún más el problema consideremos que el punto -- $P(0, 0, 0)$ se encuentre en el origen del sistema, quedando la ecuación

$$U_p(0) = -G \int_V \rho(x_0, z_0) dx_0 dz_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left[x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \right]^{-1/2} dy_0 \quad (111.3)$$

$$U_p(0) = -G \int_V \rho(x_0, z_0) dx_0 dz_0 \left(2 \int_0^{\infty} \left[x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 \right]^{-1/2} dy_0 \right) \quad (111.4)$$

tomando por separado el factor que se va a integrar, tenemos

$$\begin{aligned}
 2 \int_0^a (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)^{-1/2} dy_0 &= 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \int_0^a (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)^{-1/2} dy_0 \\
 &= 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \int_0^a \frac{dy_0}{\sqrt{y_0^2 + x_0^2 + z_0^2}} = 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \left(\log(y_0 + \sqrt{y_0^2 + x_0^2 + z_0^2}) \right) \Big|_0^a \\
 &= 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \left[\log(a + \sqrt{a^2 + x_0^2 + z_0^2}) - \log(\sqrt{x_0^2 + z_0^2}) \right] \\
 &= 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \log(a + \sqrt{a^2 + x_0^2 + z_0^2}) - 2 \log \sqrt{x_0^2 + z_0^2}
 \end{aligned}$$

derivando el primer término, para obtener el límite

$$= 2 \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{a}{\sqrt{a^2 + x_0^2 + z_0^2}}}{a + \sqrt{a^2 + x_0^2 + z_0^2}} - 2 \log \sqrt{x_0^2 + z_0^2}$$

obteniendo el límite nos queda

$$= 0 - 2 \log \sqrt{x_0^2 + z_0^2} = -2 \log \sqrt{x_0^2 + z_0^2}$$

el resultado de la integración lo sustituiremos en la ecuación (III.4), quedando en la siguiente forma

$$U_p(0) = 2G \int_0^a \rho(x_0, z_0) \log R dx_0 dy_0 \quad (III.5)$$

$$\text{donde } R = \sqrt{x_0^2 + z_0^2}$$

que es el potencial logarítmico en el punto P, quedando pendiente la integración sobre la sección transversal S del cuerpo.

Además, como sabemos que la atracción gravitacional es igual al gradiente de U

$$F(r) = \nabla U(r)$$

Calcularemos la fuerza de atracción gravitacional en el origen - del sistema suponiendo que la densidad ρ del cuerpo es constante en cualquier dirección de la superficie S.

Derivando la ecuación (III.5) con respecto a Z, tenemos

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = 2G \Delta \rho \int_S (x_0^2 + z_0^2)^{-1/2} \log e \left(\frac{1}{2} (x_0^2 + z_0^2)^{-1/2} 2z_0 \right) dx_0 dz_0$$

$$\frac{\partial U}{\partial Z} = \Delta g_z(0) = 2G \Delta \rho \int_S \frac{z_0}{x_0^2 + z_0^2} dx_0 dz_0 \quad (\text{III.6})$$

que es la atracción gravitacional vertical calculada en el origen del sistema.

Como el método está basado en la obtención de la fórmula de atracción gravitacional para cuerpos de forma irregular que se aproximan por -

medio de polígonos compuestos por rectas como se muestra en la Figura 7, cuya ecuación general será

$$F = a_K F + b_K \quad (111.7)$$

donde

$$a_K = \frac{x_{K+1} - x_K}{z_{K+1} - z_K} \quad \text{y} \quad b_K = \frac{x_K z_{K+1} - x_{K+1} z_K}{z_{K+1} - z_K}$$

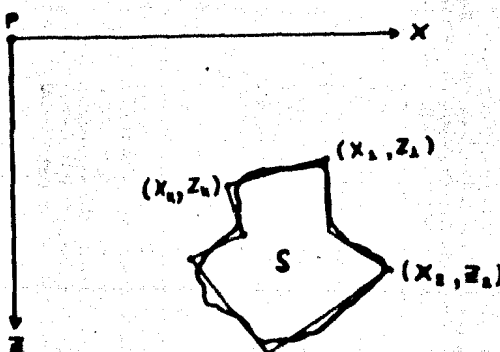


FIGURA 7

Como tenemos la sección transversal del cuerpo aproximada por medio de un polígono cuyos vértices son conocidos, conocemos la curva que encierra

dicha región por consiguiente, podemos calcular su área haciendo uso del --
teorema de Green.

$$\int_a (P_x + Q_y) dA = \oint_c P dY - Q dX$$

En la ecuación (III.6) cambiamos a las variables mudas ξ y ζ ,
quedando

$$g(0) = 2G \Delta P \int_0 \frac{\zeta}{\xi^2 + \zeta^2} d\xi d\zeta$$

$$2G \Delta P \int_0 \frac{\zeta}{\xi^2 + \zeta^2} d\xi d\zeta = \int_a (P_x + Q_y) dA$$

tenemos que

$$P_x = \frac{\zeta}{\xi^2 + \zeta^2}$$

Integrando con respecto a ξ para obtener la función P

$$P = \int \frac{\zeta}{\xi^2 + \zeta^2} d\xi = \zeta \int \frac{d\xi}{\xi^2 + \zeta^2}$$

$$P = \zeta \left[\frac{1}{\zeta} \tan^{-1} \frac{\xi}{\zeta} \right] = \tan^{-1} \frac{\xi}{\zeta}$$

Por lo tanto, la función P es igual a $P = \tan^{-1} \frac{\xi}{\zeta}$

Regresando nuevamente a la ecuación (III.6) y haciendo uso del teorema de Green, tenemos

$$\Delta g(0) = 2G \Delta \rho \int_S \frac{z_0}{x_0^2 + z_0^2} dx_0 dz_0 = 2G \Delta \rho \oint_C \tan^{-1} \frac{z}{x} d\zeta$$

Sustituyendo en el miembro del lado derecho a $\frac{z}{x}$ por el valor de la ecuación (III.7)

$$\Delta g(0) = 2G \Delta \rho \oint_C \tan^{-1} \left(a_K + \frac{b_K}{\zeta} \right) d\zeta$$

Haciendo la integración de línea por el contorno cerrado, tenemos

$$\Delta g(0) = 2G \Delta \rho \sum_{K=1}^n \int_{z_K}^{z_{K+1}} \tan^{-1} \left(a_K + \frac{b_K}{\zeta} \right) d\zeta$$

Resolviendo la integral y sustituyendo los límites

$$\Delta g(0) = 2G \Delta \rho \sum_{K=1}^n \frac{b_K}{1+a_K^2} \left[\frac{1}{2} L_n \left(\frac{x_{K+1}^2 + z_{K+1}^2}{x_K^2 + z_K^2} \right) + a_K \left(\tan^{-1} \frac{x_{K+1}}{z_{K+1}} - \tan^{-1} \frac{x_K}{z_K} \right) \right] \quad (III.8)$$

Esta fórmula es la que empleamos en el cálculo del efecto gravitacional de cuerpos de forma irregular aproximados por polígonos en donde:

G es la constante de gravitación universal.

$\Delta \rho$ es el contraste de densidad.

b_K es la constante de cada una de las rectas del polígono.

a_k es la pendiente de cada una de las rectas del polígono.

(X_k, Z_k) son las coordenadas de cada uno de los vértices del polígono.

El polígono debe ser recorrido en el sentido de las manecillas del reloj.

Como el propósito de este estudio es obtener el efecto gravitacional de cuerpos irregulares a diferentes niveles de posición, pues las observaciones gravimétricas que se realizan en el campo no son hechas a un mismo nivel, porque las posiciones de observación son de acuerdo al relieve topográfico. Por consiguiente se propone un método de cálculo en el que se obtenga el efecto gravitacional sobre el cual se trazó la sección gravimétrica.

Como en el desarrollo de las fórmulas se partió de la obtención del potencial gravitacional en el origen del sistema de coordenadas, el punto de observación siempre será el origen del sistema, por lo tanto, para cada cálculo se hará una translación de ejes en el que el punto de observación siempre conserve su posición en el origen del sistema, de esta forma podemos ir siguiendo perfectamente el relieve topográfico por complicado que éste sea tal y como fueron hechas las observaciones de campo.

IV.- MODELOS Y APLICACION

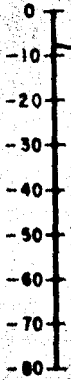
Antes de utilizar el programa con la fórmula (III,8) en datos -- reales, haremos una serie de pruebas con algunos cuerpos geométricos suponiendo situaciones ideales, únicamente con la finalidad de comprobar que la fórmula con el algoritmo que se elaboró funcione como se desea.

Como una primera prueba calcularemos el efecto gravimétrico de un prisma que se encuentra colocado en el cuarto cuadrante como se muestra en la Figura 8, por consiguiente todas las ordenadas de los vértices serán del mismo signo que es en la posición en que normalmente se hacen los cálculos, a este resultado lo compararemos con el efecto gravimétrico calculado de un prisma de las mismas dimensiones y con el mismo contraste de densidad y a la misma profundidad, sólo que este prisma se encuentra colocado entre el primero y el cuarto cuadrante, como se muestra en la Figura 9, teniendo sus vértices positivos y negativos en la dirección Z, siendo el nivel de cálculo horizontal en ambos casos, los puntos que aparecen en las gráficas son los lugares en donde se calculó el efecto gravimétrico.

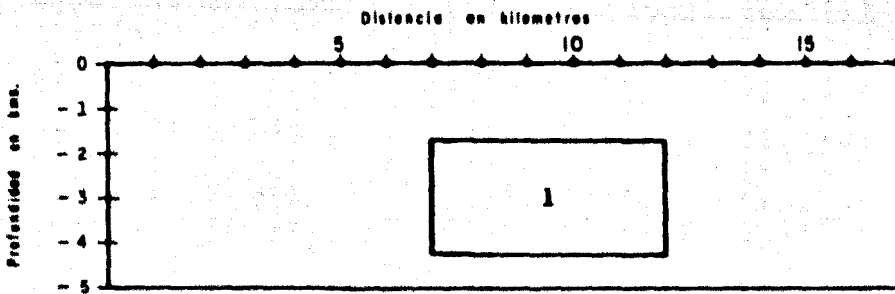
Como podemos apreciar ambas anomalías son idénticas, lo que significa que no importa el cuadrante en donde se esté trabajando siempre y cuando respetemos el signo convencional de las ordenadas, hacia abajo la Z es positiva y hacia arriba es negativa.

ANOMALIA GRAVIMETRICA CALCULADA

GRAVEDAD RELATIVA (U. G.)



MODELO

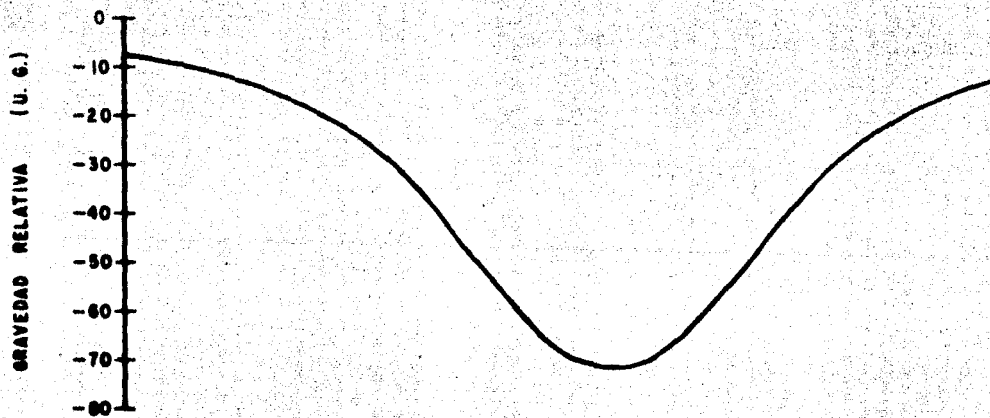


DATOS

CUERPO	DENSIDAD
Basa	2.30
1	2.15

Fig. 8

ANOMALIA GRAVIMETRICA CALCULADA



MODELO

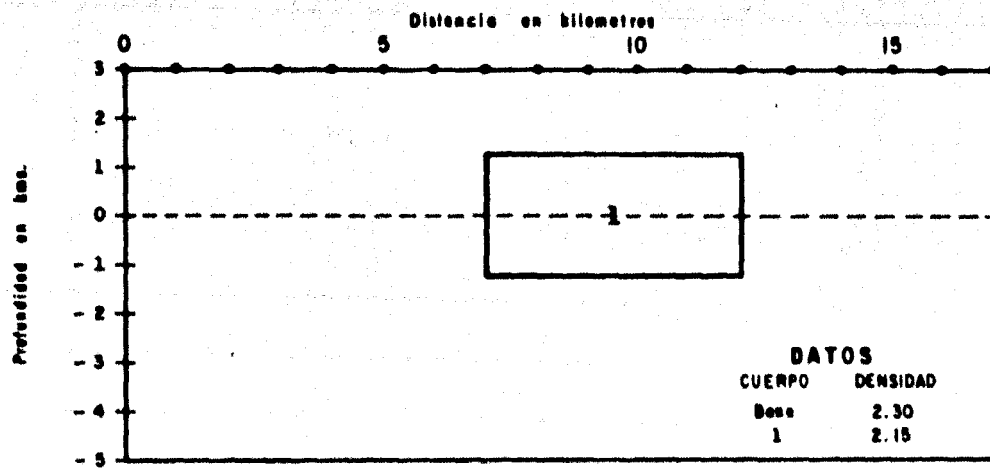


Fig. 9

Esta primera prueba que resultó satisfactoria fue hecha con la finalidad de verificar que el algoritmo funcione para modelos que sean referidos a un nivel en especial, como el nivel del mar o cualquier otro punto de referencia que no sea precisamente el nivel de cálculo.

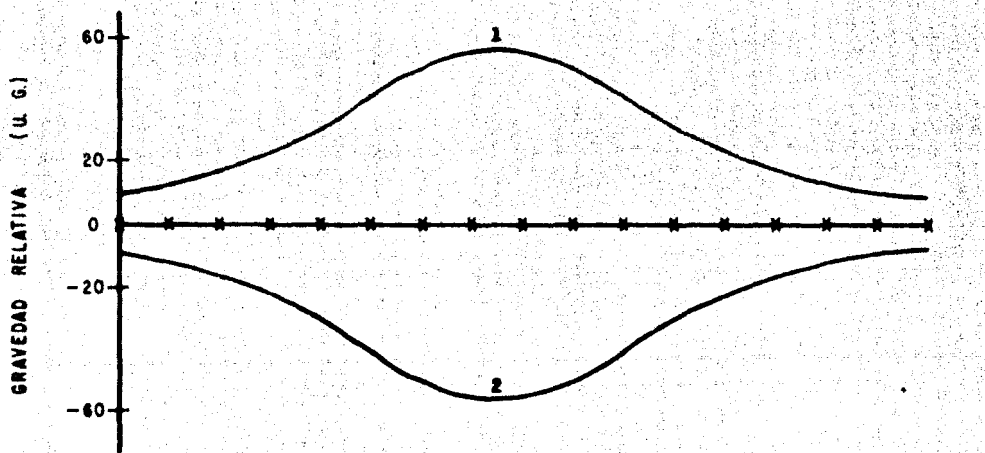
Como una segunda prueba calcularemos el efecto gravimétrico de dos prismas cuyas posiciones se encuentran a igual distancia del nivel de cálculo como se presenta en la Figura 10, siendo sus dimensiones y los contrastes de densidad iguales.

El nivel de cálculo nuevamente es horizontal en $Z=0$, sobre los puntos se calcula el efecto gravimétrico de los prismas, graficando los efectos parciales podemos apreciar que dichos efectos son simétricos respecto del valor cero, ambas curvas tienen sus valores iguales pero de signo contrario, que al sumarse nos dan un efecto total igual a cero, que es realmente lo que esperábamos.

Esta segunda prueba se realizó con la finalidad de comprobar que efectivamente se obtiene el efecto gravimétrico vertical de cuerpos que se encuentran a mayor altura que los puntos de observación, pues en este caso la componente vertical del cuerpo (1) será hacia arriba y como es obvio, la componente vertical del cuerpo (2) será hacia abajo, por consiguiente, al sumarse los efectos gravimétricos se anulan quedando un efecto total cero.

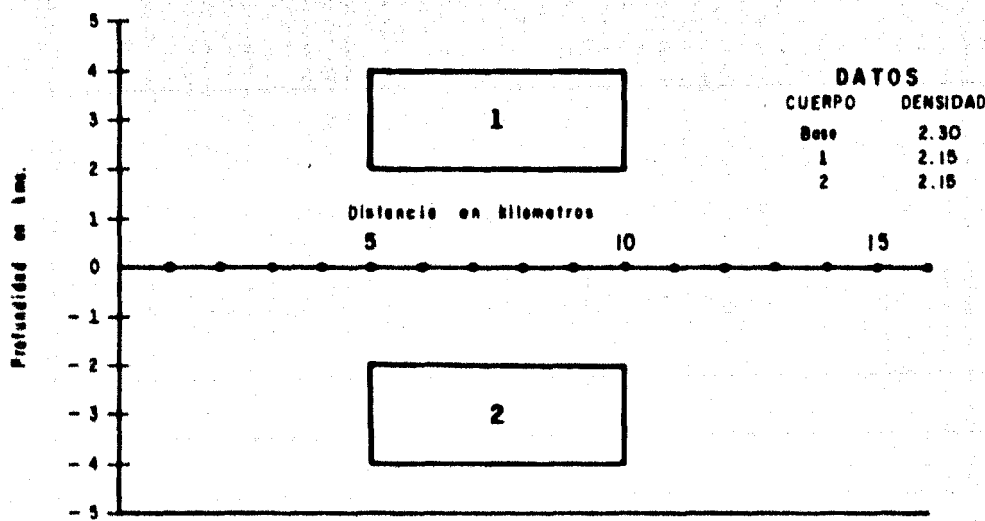
El resultado de esta segunda prueba nos da la seguridad de que cuando se tengan uno o varios cuerpos a mayor altura que los puntos de

ANOMALIA GRAVIMETRICA CALCULADA



EFFECTO CUERPO 1	<u>1</u>
EFFECTO CUERPO 2	<u>2</u>
EFFECTO TOTAL	x x x x x

MODELO



DATOS	
CUERPO	DENSIDAD
Base	2.30
1	2.15
2	2.15

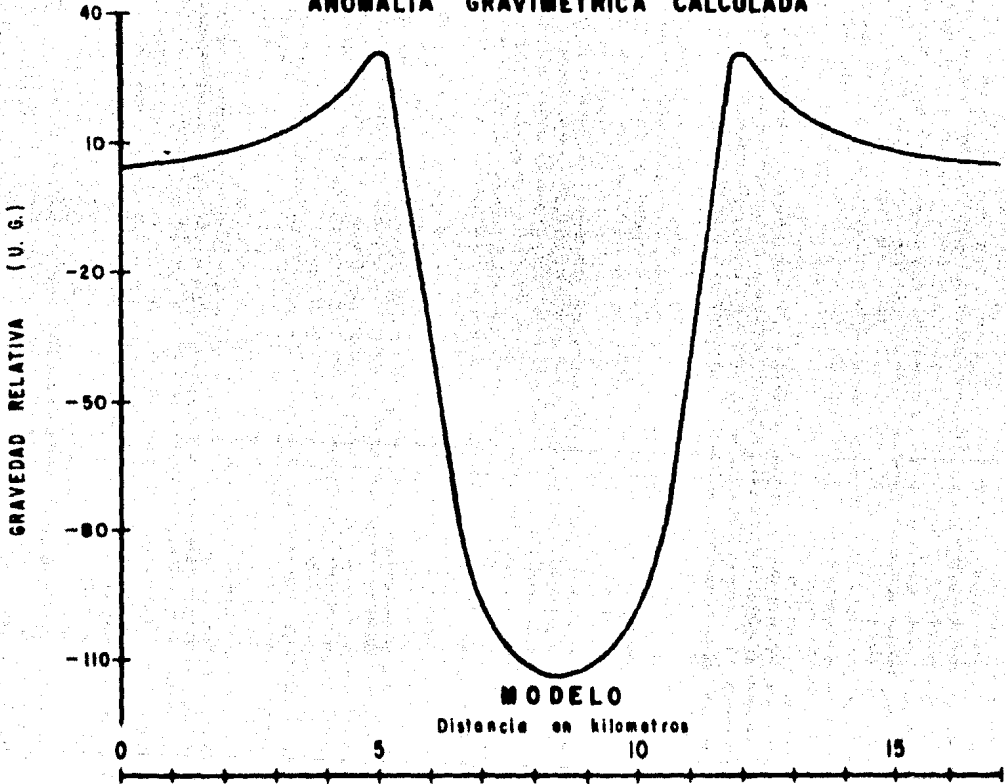
Fig. 10

cálculo efectivamente se tenga su componente vertical en la dirección correcta, como un ejemplo de este caso tendríamos la lectura de un gravímetro hecha en la falda de un cerro o una montaña cuya componente vertical será hacia arriba.

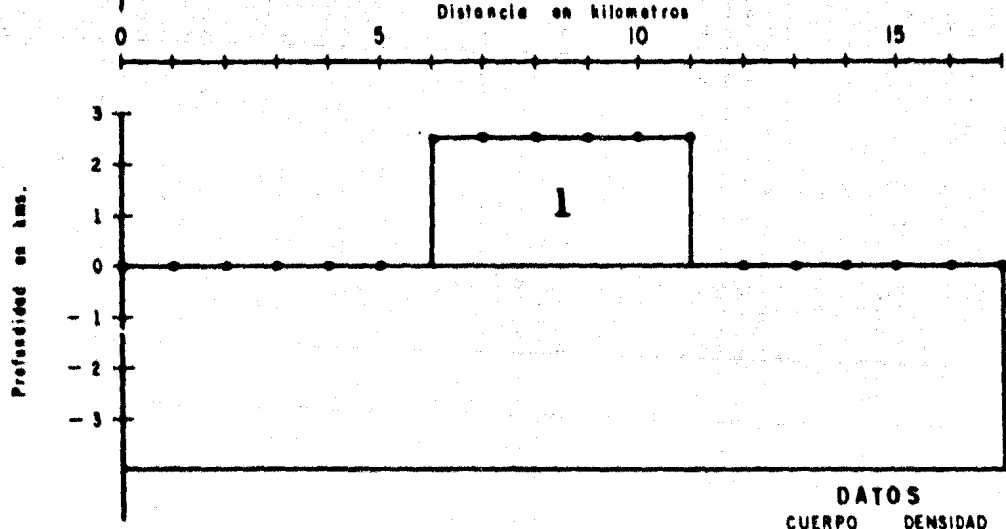
Como una tercera prueba se propone un modelo que se puede considerar como una mezcla de las dos pruebas anteriores, pues en este caso primeramente calcularemos el efecto de un prisma que se encuentra colocado en el cuarto cuadrante y el nivel de cálculo será en $Z=0$ como se muestra en la Figura 12, y en seguida calcularemos el efecto del mismo prisma pero en esta ocasión el prisma se encuentra colocado sobre el nivel $Z=0$, en el primer cuadrante como se muestra en la Figura 11, en este caso los puntos de cálculo serán en tres diferentes niveles; los primeros seis puntos de cálculo serán en $Z=0$, los siguientes seis puntos serán sobre el prisma en $Z=2.5$, y los últimos seis puntos nuevamente serán en el nivel $Z=0$.

Al observar cada una de las anomalías de estos dos modelos vemos que sus partes que se encuentran exactamente sobre el prisma y que corresponden a las estaciones de la 6 a la 11 tienen la misma forma; esto es evidente, pues los puntos en donde fueron hechos los cálculos de ambos modelos corresponden a las mismas posiciones. Si observamos las colas de ambas anomalías vemos que las colas de la Figura 12 continúan la misma tendencia de la anomalía, sin embargo, las colas de la anomalía de la Figura 11 invierten su tendencia con respecto a la parte central de la anomalía. Observando los valores de las colas de ambas anomalías vemos que los resultados en las estaciones laterales a los prismas tienen exactamente los mismos va

ANOMALIA GRAVIMETRICA CALCULADA



MODELO

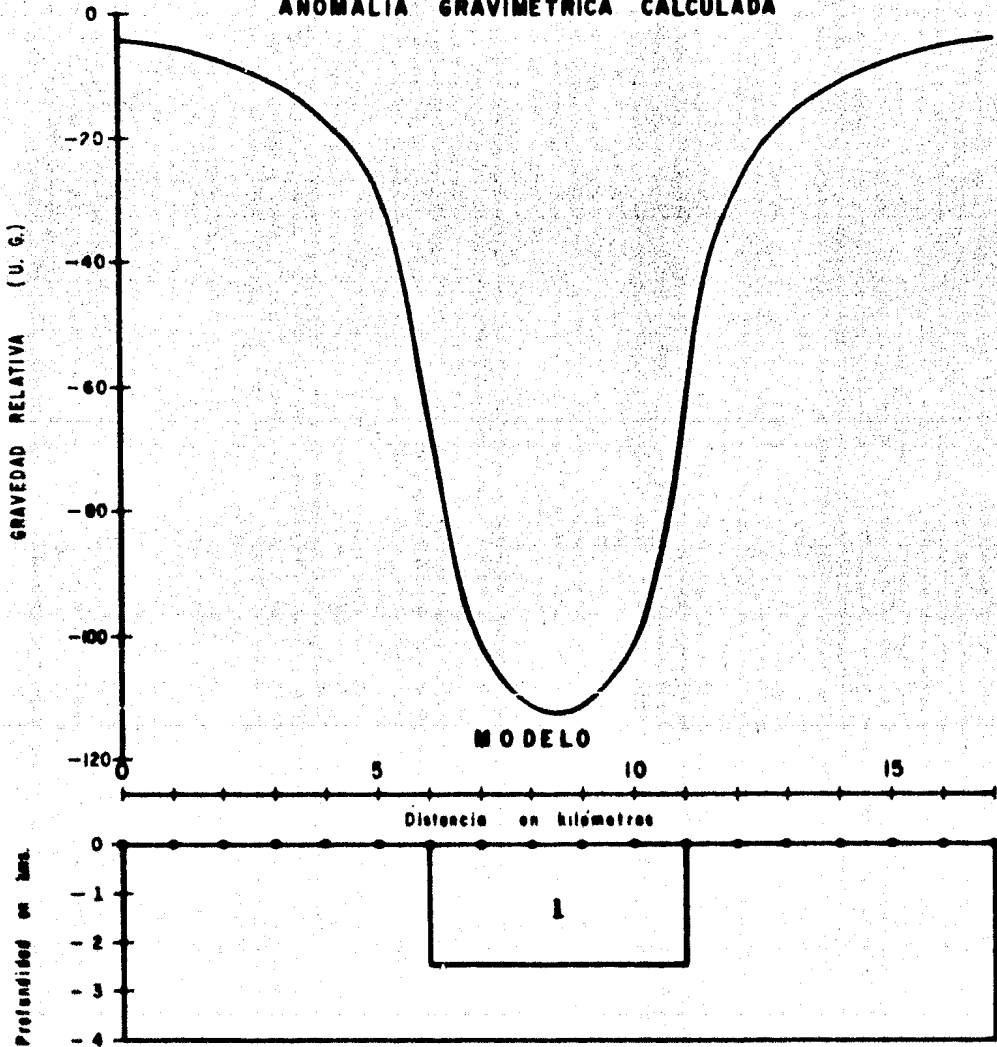


DATOS

CUERPO	DENSIDAD
Base	2.30
1	2.19

Fig. 11

ANOMALIA GRAVIMETRICA CALCULADA



DATOS	
CUERPO	DENSIDAD
Base	2.30
1	2.15

Fig. 12

Valores pero de signo contrario, pues mientras los valores de las colas de la Figura 12 son negativos, los valores de las colas de la Figura 11 son positivos, esto es correcto pues en las estaciones de la Figura 12 la componente vertical del efecto gravimétrico es hacia abajo, mientras que en las estaciones laterales al prisma de la Figura 11 la componente vertical será hacia arriba, y en ambos casos los puntos de cálculo se encuentran a las mismas distancias del prisma.

Esta tercera prueba fue con el objetivo de verificar que el algoritmo funcione en los casos en que hayan cambios en el nivel de cálculo y resultó satisfactoria en el análisis anteriormente hecho.

Finalmente haremos una cuarta prueba en la que calcularemos el efecto gravitacional ocasionado por un cilindro horizontal cuyo eje es perpendicular al rumbo de la sección como se muestra en la Figura 13, los diferentes puntos en que se calculará el efecto gravimétrico estarán en función del relieve topográfico. En este modelo proponemos un relieve topográfico demasiado quebrado, por lo tanto cada estación de cálculo estará sujeta constantemente a cambios de nivel de acuerdo a la topografía, ya sea positivo o negativo el incremento.

A continuación presentaremos dos listas de valores calculados, la primera fue calculada con el método presentado en este trabajo y la segunda lista fue calculada con la fórmula exacta del cilindro horizontal.

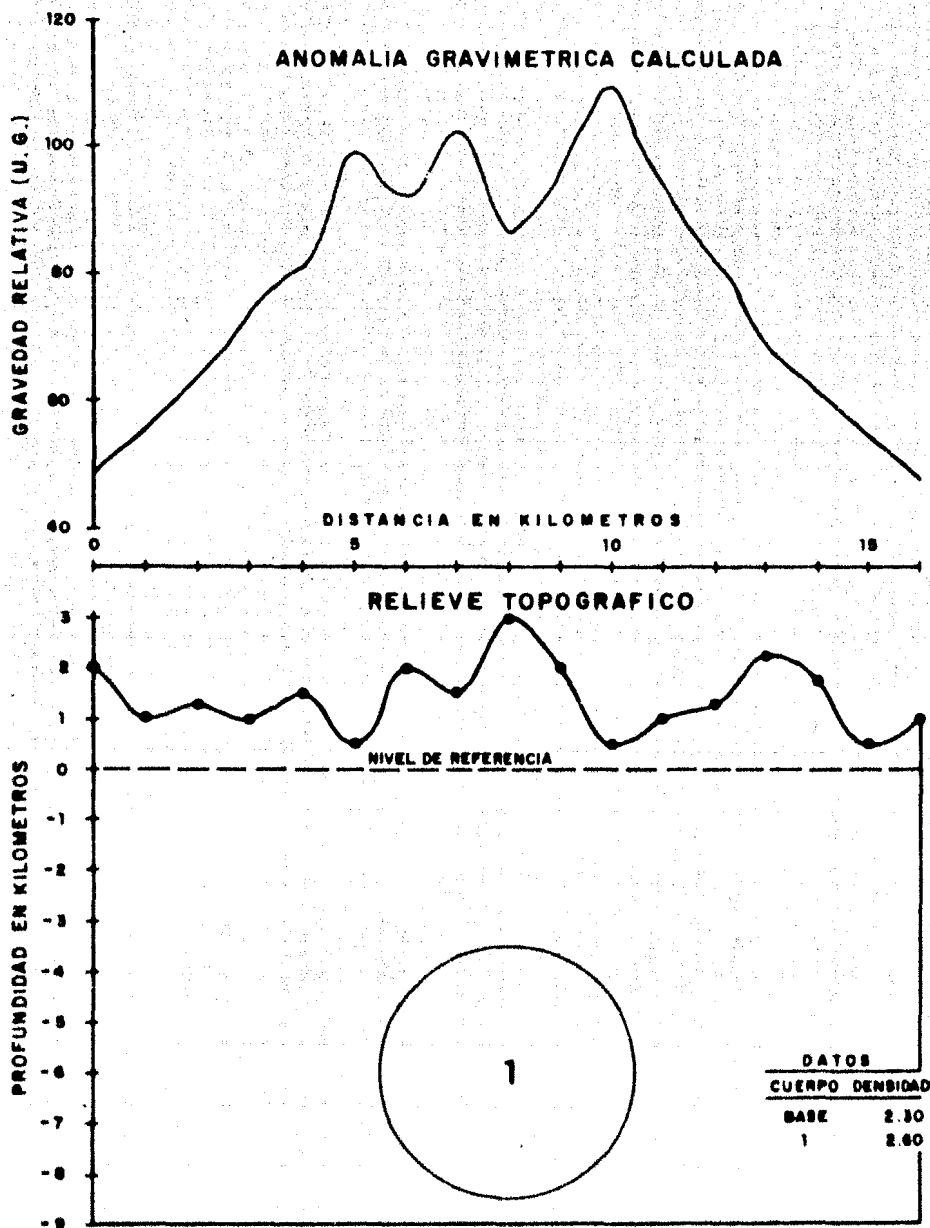


Fig. 13

ESTACION	VALORES OBTENIDOS CON EL METODO	VALORES OBTENIDOS CON LA FORMULA EXACTA
	(U.G.)	(U.G.)
1	38.8	39.0
2	43.2	43.5
3	48.7	49.1
4	55.7	56.1
5	63.9	64.3
6	73.8	74.3
7	81.1	81.6
8	99.0	99.7
9	91.9	92.4
10	102.1	102.9
11	86.6	87.3
12	95.7	96.6
13	109.3	110.4
14	93.9	94.8
15	82.2	83.1
16	68.9	69.6
17	62.7	63.4
18	55.3	56.0
19	48.1	48.7
20	42.6	43.1
21	36.5	36.9

Como podemos observar, ambas columnas de valores son bastante semejantes lo que significa nuevamente que el algoritmo de cálculo de los efectos

tos gravimétricos sobre los relieves topográficos quebrados funciona tal y como se desea.

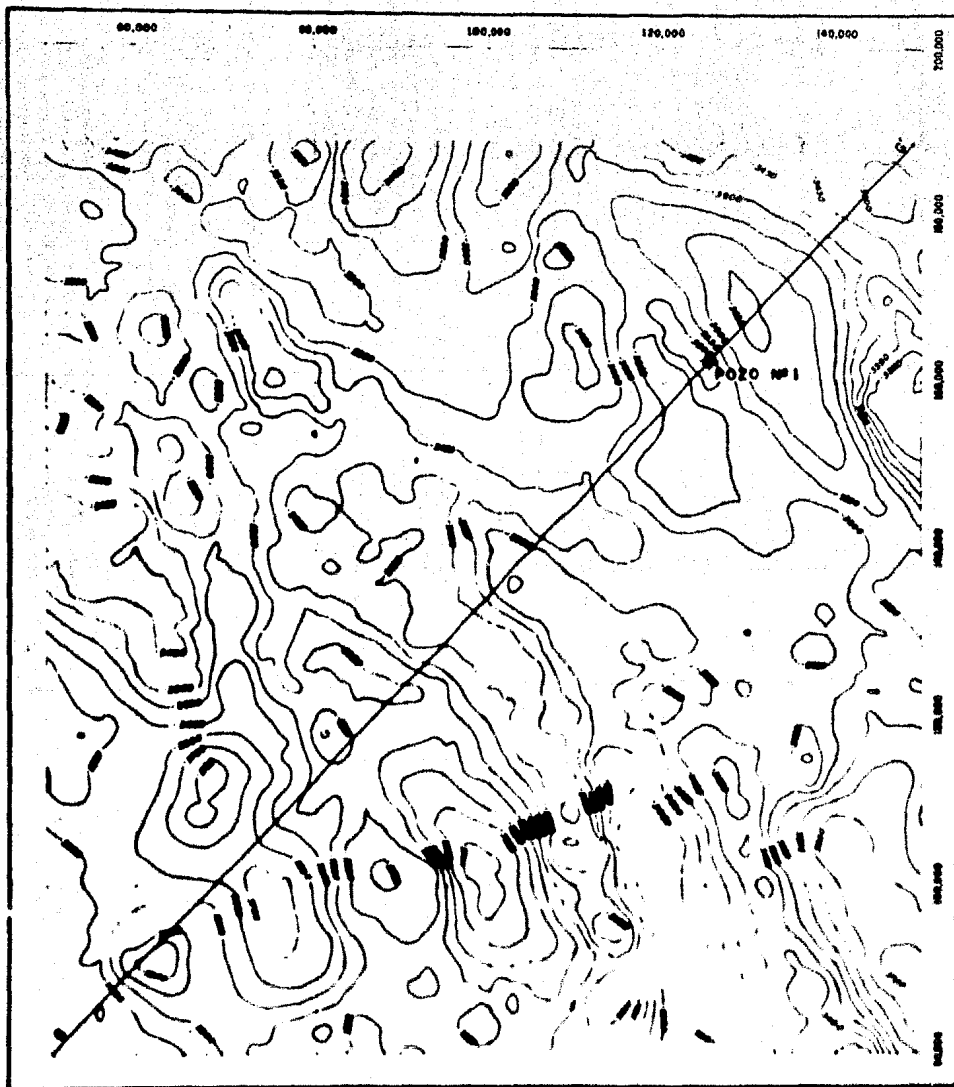
Como se puede apreciar, la anomalía gravimétrica del cilindro horizontal de la Figura 13 se encuentra totalmente distorsionada en comparación con la anomalía que estamos acostumbrados a ver en la literatura geofísica, esta deformación se debe principalmente al relieve topográfico sobre el cual se hicieron los cálculos. Esto nos hace ver la importancia de considerar el relieve topográfico en los cálculos y no considerarlo como una superficie plana.

Con los análisis hechos en las pruebas que anteriormente se presentaron tenemos la seguridad de que el algoritmo funciona correctamente, por lo tanto, a continuación aplicaremos el método a datos reales.

Para la aplicación del método se eligió una área en la que se cuenta con la siguiente información:

- a) Plano de Anomalías de Bouguer,
- b) Plano Topográfico.
- c) Plano de Geología Superficial.
- d) Columna geológica y registro de densidad del pozo No. 1.

Primeramente trazamos el perfil GG^1 sobre el plano de Bouguer -- aproximadamente paralelo al gradiente de la anomalía regional, haciéndolo pasar por el pozo No. 1, como se muestra en el Plano 1. Posteriormente, el



PLANO 1

GRAVIMETRICO
ANOMALIAS DE BOUGUER
Intervalo de Configuración 50 UG

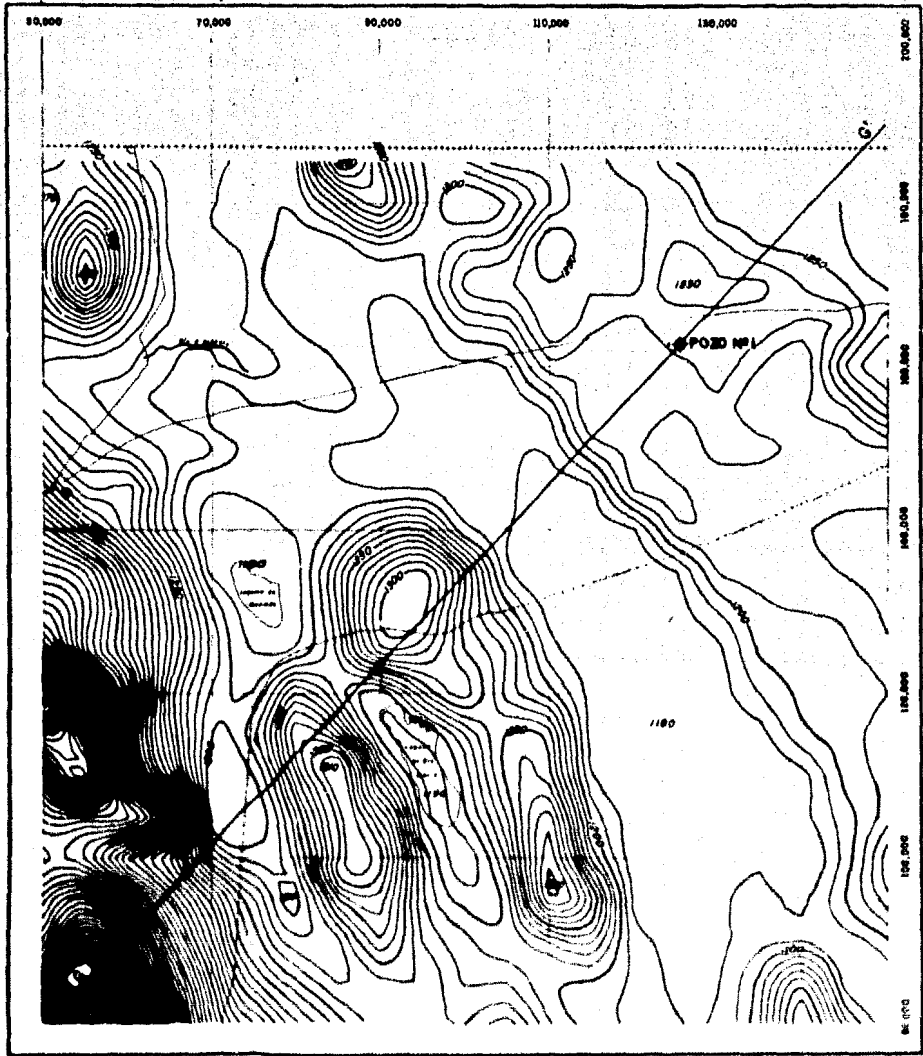


mismo perfil lo trazamos sobre el plano topográfico, como se muestra en el Plano 2, con la finalidad de tener control sobre el relieve topográfico -- que se hará intervenir en el cálculo, esta sección cruza del SW al NE la Sierra del Capulín, la Sierra de Los Borregos y la Sierra Malpais de la Laguna.

Topográficamente hay un desnivel de la parte más alta a la parte más baja de 500 m. a lo largo de la sección. Se hará una descripción del relieve topográfico del SW al NE de la sección; comienza con la Sierra del Capulín, que tiene una elevación de 1700 m. sobre el nivel del mar, continuando con una depresión que tiene una elevación de 1200 m. sobre el nivel del mar, apareciendo a continuación dos sierras que no son muy elevadas, - la Sierra Borregos y la Sierra Malpais de la Laguna que solamente alcanzan elevaciones de 1300 m. sobre el nivel del mar continuando con una planicie de 1200 m. sobre el nivel del mar que hacia el final de la sección aumenta su elevación hasta 1260 m. sobre el nivel del mar.

Como se pudo observar, el relieve topográfico es en general de tendencia suave, lo cual tiene como consecuencia que la recopilación de datos para el cálculo no se complique.

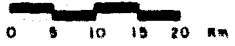
Con la finalidad de apoyar el modelo que proponemos en la interpretación del perfil gravimétrico, trazamos la misma sección sobre el plano de geología superficial como se muestra en el Plano 3 para controlar -- los contactos de los afloramientos que se encuentran en las sierras.

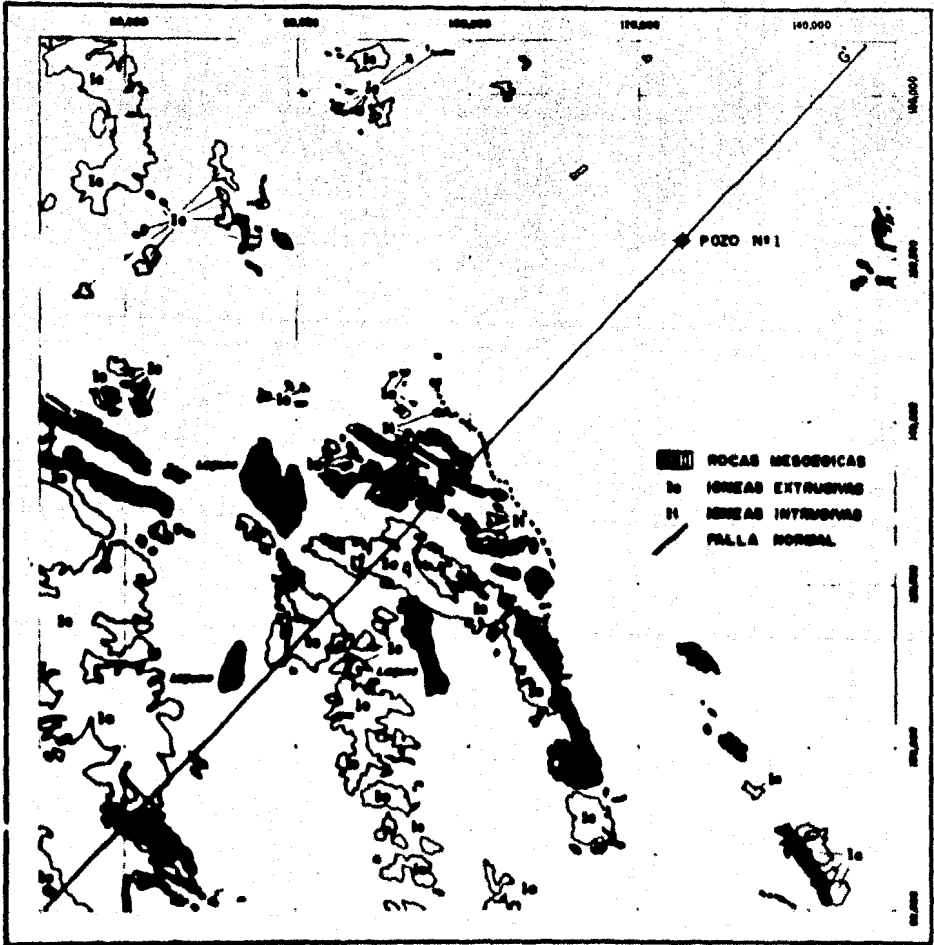


PLANO 2

TOPOGRAFICO

Intervalo de Configuración 10m





PLANO 3

GEOLOGICO

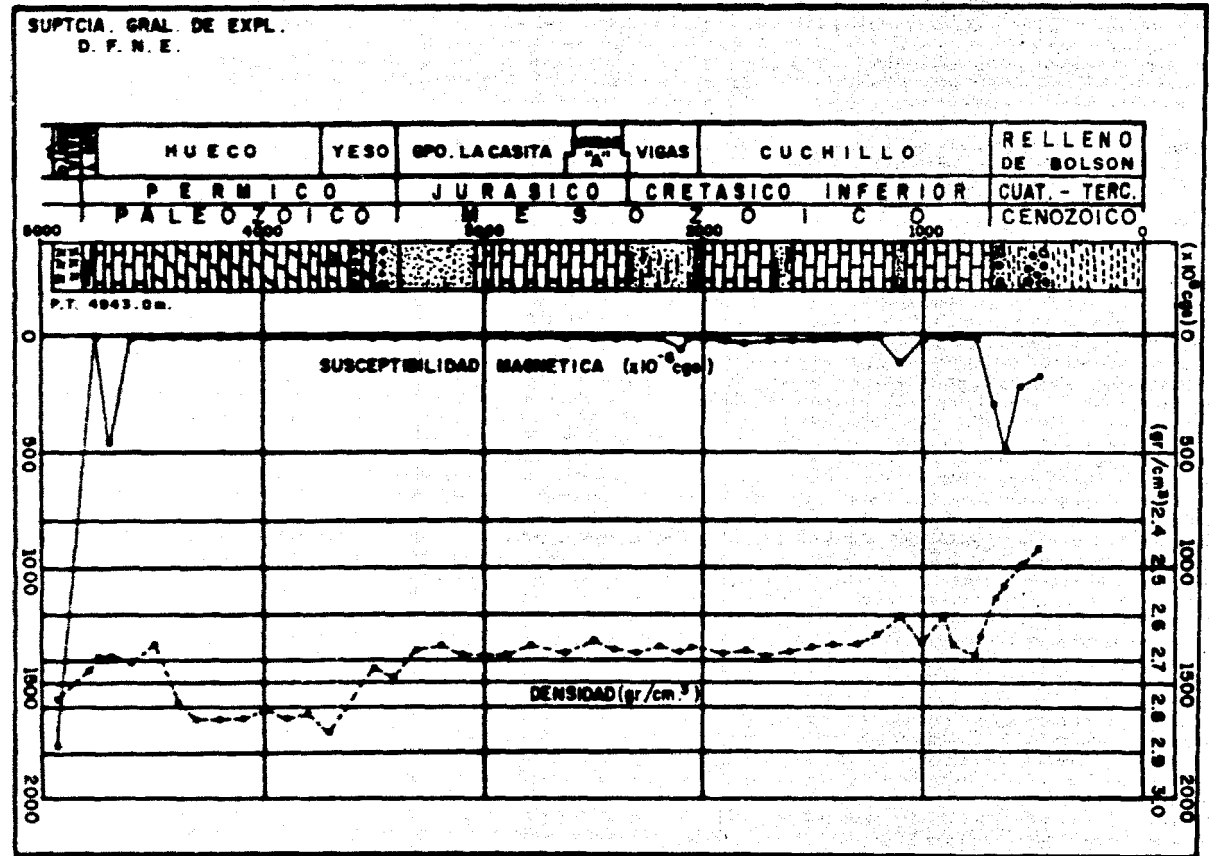


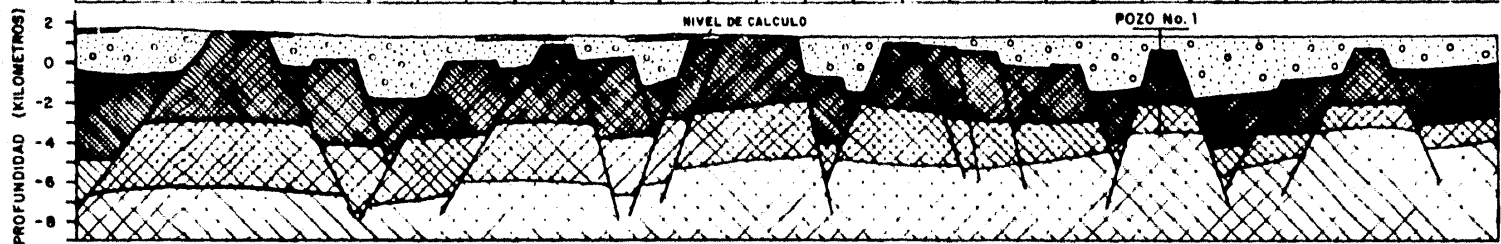
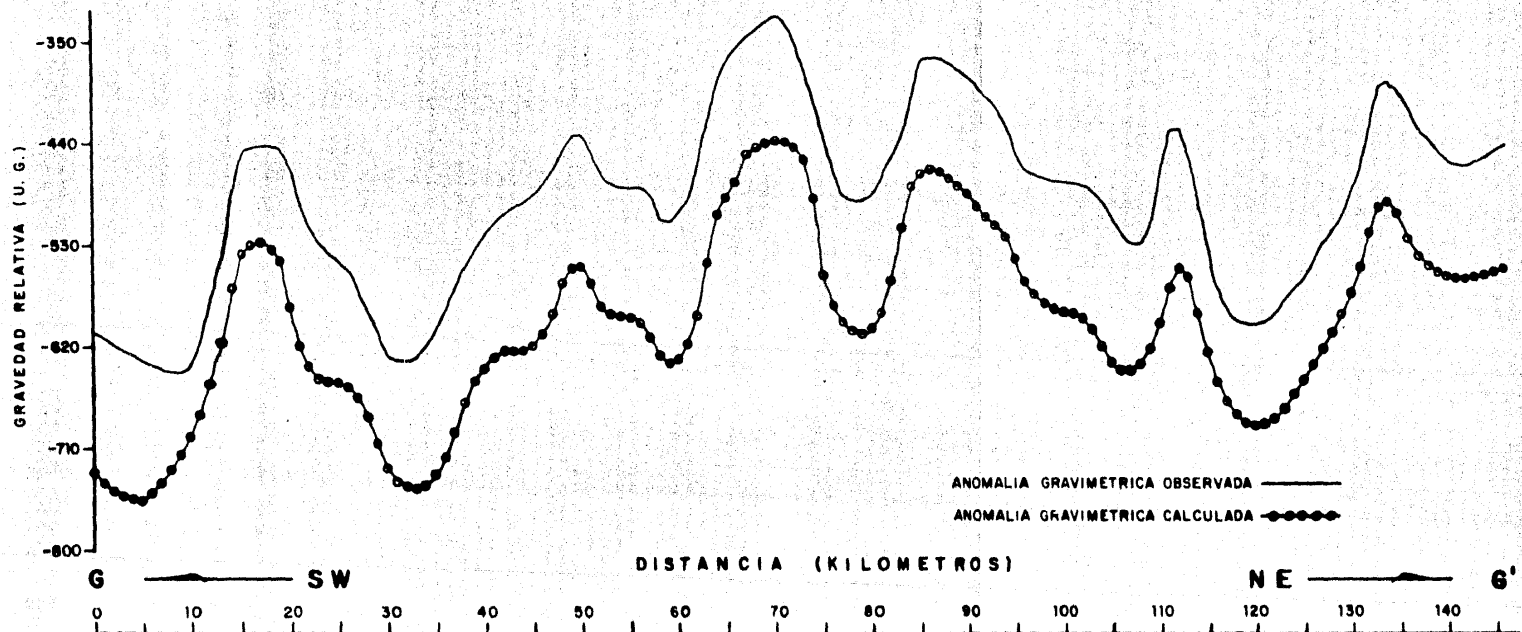
Otra información que es de gran importancia es la información de pozo; que en este caso conocemos la columna geológica del pozo No. 1, perforado hasta una profundidad de 4943.0 m. atravesando rocas cenozoicas cuyo espesor es de 700.0 m., rocas mesozoicas cuyo espesor es de 2720.0 m. y rocas paleozoicas de 1440.0 m. de espesor, como se presenta en la Figura - 14; dicho pozo alcanzó a tocar rocas del Basamento a la profundidad de --- 4860.0 m. continuando hasta su profundidad total, adicionalmente a esta información se posee del mismo pozo sus registros de densidad y susceptibilidad. Las densidades propuestas para las rocas cenozoicas, mesozoicas, paleozoicas y basamentales son 2.46, 2.68, 2.84 y 2.90 (grs./cm³) respectivamente. Una vez ya recopilada toda esta información procedemos a integrarla para proponer un modelo cuya anomalía gravimétrica tenga la misma variación que la anomalía gravimétrica observada.

Ya teniendo el modelo ajustado como lo presentamos en la Sección I podemos observar la estructura del modelo gravimétrico que en general -- presenta una serie de fallas normales que contruyen un sistema de estructuras en Gravens y Horst que corresponden a la Neotectónica Terciaria de México, iniciada en el Mioceno (según M. Tardy) y finalizada en el Pleistoceno.

El resultado, como se puede ver, es bastante aceptable pues se -- trató de representar las condiciones en que fueron hechas las observaciones de campo, tales condiciones corresponden al relieve topográfico y a -- los afloramientos que cruza la sección, complementándose con la información de pozo.

FIG. 14 COLUMNA GEOLOGICA Y REGISTROS DE SUSCEPTIBILIDAD Y DENSIDAD DEL POZO N° 1





SECCION 1

	DENSIDADES
ROCA IGNEA EXTRUSIVAS	2.95
ROCAS CENOZOICAS	2.46
ROCAS MESOZOICAS	2.68
ROCAS PALEOZOICAS	2.84
ROCAS BASAMENTO	2.90

V.- RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el modelo presentado, el relieve topográfico no es muy accidentado relativamente en comparación con las dimensiones del estudio que es de carácter regional, por lo tanto, si hiciéramos el cálculo del efecto gravimétrico del modelo sobre una superficie horizontal, el error que se cometería en la profundidad de cada uno de los cuerpos sería en forma aproximada directamente proporcional a la diferencia de elevaciones de la topografía real con el plano de cálculo, debido a esto entre más grande sea la variación topográfica mayor será el error cometido sobre una superficie de cálculo horizontal.

Como en el cálculo se trata de obtener resultados más exactos -- hasta donde sea posible, siempre utilizaremos la información topográfica -- por menos accidentada que ésta sea, pues en el algoritmo empleado se da como dato la posición de cada uno de los puntos de cálculo tardando el mismo tiempo en el cálculo ya sea sobre una topografía constante o variable.

Es recomendable tomar en cuenta el relieve topográfico para trabajos de gran detalle sobre todo para el caso de la exploración minera que se lleva a cabo en zonas montañosas.

Otra recomendación que se sugiere es desarrollar un método para los casos en que cuando se haga un levantamiento gravimétrico a diferentes

niveles podemos referir todas las observaciones a un mismo nivel pues en esta forma las anomalías no se deformarían debido a la topografía como sucedió en la Figura 13, con esto se quiere decir que el máximo de la anomalía se pueda situar exactamente sobre el cuerpo anómalo y poder fácilmente identificar qué clase de cuerpo produce esa anomalía, este sería un proceso equivalente a la reducción al polo que se usa en magnetometría.

```

0230 CALL SYMBOLE(2.7,-0.77,0.07,3*0.0,11
0231 CALL PLOT(0.0,-0.02,3)
0232 CALL PLOT(0.0,-0.02,2)
0233 CALL PLOT(3.0,-0.32,2)
0234 CALL SYMBOLE(0.0,-1.12,-1.1*BASE,0.0,4)
0235 CALL NUMERA(2.2,-1.12,-1.1*BASE,0.2)
0236 DYS=-1.32
0237 DE=351.2*1.4C
0238 DCS=351
0239 DES=DE(1,51)
0240 CALL NUMERA(2.7,DY,0.1,DCS,0.0,-1)
0241 CALL NUMERA(2.2,DYS,0.1,DES,0.0,2)
0242 341 DYS=DYS-DE
0243 CALL PLOT(0.0,-1.4-3.2*NC,3)
0244 CALL PLOT(3.0,-1.4-3.2*NC,2)
0245 CALL PLOT(0.0,-1.4-3.2*NC,1)
0246 CALL SYMBOLE(0.0,-1.7-3.2*NC,1.1,EFFECTO GRAVITACIONAL TOTAL,0.2)
0247 CALL SYMBOLE(2.0,-1.7-3.2*NC,1.0,0.0,0,-1)
0248 CALL PLOT(0.0,-2.4-3.2*NC,3)
0249 CALL CUMULO (SEG,AREA,CM,NI,CMO,PECHA)
0250 CALL SYMBOLE(1.05,-1.15,-1.1*PENFIL GRAVIMETRIC CALCULADO,0.2)
0251 DE=232.14*1.4C
0252 DE=232.14*1.4C
0253 VELL(1,1)=VELL(1,1)*(2/2.0)
0254 %C=CUMULO
0255 DE=232.14*1.4C
0256 IP=VELL(1,1)*VELL(1,1)*DE*100
0257 CUMULO(1,1)=VELL(1,1)*DE
0258 242 CONTINUE
0259 453 CONTINUE
0260
0261
0262
0263
0264
0265
0266
0267
0268
0269
0270
0271
0272
0273
0274
0275
0276
0277
0278
0279
0280
0281
0282
0283
0284
0285
0286
0287
0288
0289
0290
0291
0292
0293
0294
0295
0296
0297
0298
0299
0300
0301
0302
0303
0304
0305
0306
0307
0308
0309
0310
0311
0312
0313
0314
0315
0316
0317
0318
0319
0320
0321
0322
0323
0324
0325
0326
0327
0328
0329
0330
0331
0332
0333
0334
0335
0336
0337
0338
0339
0340
0341
0342
0343
0344
0345
0346
0347
0348
0349
0350
0351
0352
0353
0354
0355
0356
0357
0358
0359
0360
0361
0362
0363
0364
0365
0366
0367
0368
0369
0370
0371
0372
0373
0374
0375
0376
0377
0378
0379
0380
0381
0382
0383
0384
0385
0386
0387
0388
0389
0390
0391
0392
0393
0394
0395
0396
0397
0398
0399
0400
0401
0402
0403
0404
0405
0406
0407
0408
0409
0410
0411
0412
0413
0414
0415
0416
0417
0418
0419
0420
0421
0422
0423
0424
0425
0426
0427
0428
0429
0430
0431
0432
0433
0434
0435
0436
0437
0438
0439
0440
0441
0442
0443
0444
0445
0446
0447
0448
0449
0450
0451
0452
0453
0454
0455
0456
0457
0458
0459
0460
0461
0462
0463
0464
0465
0466
0467
0468
0469
0470
0471
0472
0473
0474
0475
0476
0477
0478
0479
0480
0481
0482
0483
0484
0485
0486
0487
0488
0489
0490
0491
0492
0493
0494
0495
0496
0497
0498
0499
0500

```

```

017- IF(EGT(J31).LT.VMIN) VMIN=EGT(J31)
017- 331 IF(EGT(J31).GT.VMAX) VMAX=EGT(J31)
017- IF(VMAX.LT.0.0) IEMA=0
017- IF(VMAX.GT.0.0) IEMA=100
017- IMA=VMAX/100.0
017- MAXI=MAX(I0)
017- IF(VMAX.LT.VMAX) MAXI=MAX(I0)
017- IF(VMIN.LT.0.0) IEMI=100
017- IF(VMIN.GT.0.0) IEMI=0
017- IPI=(VMIN/100.0)
017- IPI=IPI+100
017- IF(IPI.LT.VMIN) MIN=MIN+IEMI
017- IPI=(MAX-IPI)/10
017- 332 333
017- 334 335
017- 336 337
017- 338 339
017- 340 341
017- 342 343
017- 344 345
017- 346 347
017- 348 349
017- 350 351
017- 352 353
017- 354 355
017- 356 357
017- 358 359
017- 360 361
017- 362 363
017- 364 365
017- 366 367
017- 368 369
017- 370 371
017- 372 373
017- 374 375
017- 376 377
017- 378 379
017- 380 381
017- 382 383
017- 384 385
017- 386 387
017- 388 389
017- 390 391
017- 392 393
017- 394 395
017- 396 397
017- 398 399
017- 400 401
017- 402 403
017- 404 405
017- 406 407
017- 408 409
017- 410 411
017- 412 413
017- 414 415
017- 416 417
017- 418 419
017- 420 421
017- 422 423
017- 424 425
017- 426 427
017- 428 429
017- 430 431
017- 432 433
017- 434 435
017- 436 437
017- 438 439
017- 440 441
017- 442 443
017- 444 445
017- 446 447
017- 448 449
017- 450 451
017- 452 453
017- 454 455
017- 456 457
017- 458 459
017- 460 461
017- 462 463
017- 464 465
017- 466 467
017- 468 469
017- 470 471
017- 472 473
017- 474 475
017- 476 477
017- 478 479
017- 480 481
017- 482 483
017- 484 485
017- 486 487
017- 488 489
017- 490 491
017- 492 493
017- 494 495
017- 496 497
017- 498 499
017- 500 501
017- 502 503
017- 504 505
017- 506 507
017- 508 509
017- 510 511
017- 512 513
017- 514 515
017- 516 517
017- 518 519
017- 520 521
017- 522 523
017- 524 525
017- 526 527
017- 528 529
017- 530 531
017- 532 533
017- 534 535
017- 536 537
017- 538 539
017- 540 541
017- 542 543
017- 544 545
017- 546 547
017- 548 549
017- 550 551
017- 552 553
017- 554 555
017- 556 557
017- 558 559
017- 560 561
017- 562 563
017- 564 565
017- 566 567
017- 568 569
017- 570 571
017- 572 573
017- 574 575
017- 576 577
017- 578 579
017- 580 581
017- 582 583
017- 584 585
017- 586 587
017- 588 589
017- 590 591
017- 592 593
017- 594 595
017- 596 597
017- 598 599
017- 600 601
017- 602 603
017- 604 605
017- 606 607
017- 608 609
017- 610 611
017- 612 613
017- 614 615
017- 616 617
017- 618 619
017- 620 621
017- 622 623
017- 624 625
017- 626 627
017- 628 629
017- 630 631
017- 632 633
017- 634 635
017- 636 637
017- 638 639
017- 640 641
017- 642 643
017- 644 645
017- 646 647
017- 648 649
017- 650 651
017- 652 653
017- 654 655
017- 656 657
017- 658 659
017- 660 661
017- 662 663
017- 664 665
017- 666 667
017- 668 669
017- 670 671
017- 672 673
017- 674 675
017- 676 677
017- 678 679
017- 680 681
017- 682 683
017- 684 685
017- 686 687
017- 688 689
017- 690 691
017- 692 693
017- 694 695
017- 696 697
017- 698 699
017- 700 701
017- 702 703
017- 704 705
017- 706 707
017- 708 709
017- 710 711
017- 712 713
017- 714 715
017- 716 717
017- 718 719
017- 720 721
017- 722 723
017- 724 725
017- 726 727
017- 728 729
017- 730 731
017- 732 733
017- 734 735
017- 736 737
017- 738 739
017- 740 741
017- 742 743
017- 744 745
017- 746 747
017- 748 749
017- 750 751
017- 752 753
017- 754 755
017- 756 757
017- 758 759
017- 760 761
017- 762 763
017- 764 765
017- 766 767
017- 768 769
017- 770 771
017- 772 773
017- 774 775
017- 776 777
017- 778 779
017- 780 781
017- 782 783
017- 784 785
017- 786 787
017- 788 789
017- 790 791
017- 792 793
017- 794 795
017- 796 797
017- 798 799
017- 800 801
017- 802 803
017- 804 805
017- 806 807
017- 808 809
017- 810 811
017- 812 813
017- 814 815
017- 816 817
017- 818 819
017- 820 821
017- 822 823
017- 824 825
017- 826 827
017- 828 829
017- 830 831
017- 832 833
017- 834 835
017- 836 837
017- 838 839
017- 840 841
017- 842 843
017- 844 845
017- 846 847
017- 848 849
017- 850 851
017- 852 853
017- 854 855
017- 856 857
017- 858 859
017- 860 861
017- 862 863
017- 864 865
017- 866 867
017- 868 869
017- 870 871
017- 872 873
017- 874 875
017- 876 877
017- 878 879
017- 880 881
017- 882 883
017- 884 885
017- 886 887
017- 888 889
017- 890 891
017- 892 893
017- 894 895
017- 896 897
017- 898 899
017- 900 901
017- 902 903
017- 904 905
017- 906 907
017- 908 909
017- 910 911
017- 912 913
017- 914 915
017- 916 917
017- 918 919
017- 920 921
017- 922 923
017- 924 925
017- 926 927
017- 928 929
017- 930 931
017- 932 933
017- 934 935
017- 936 937
017- 938 939
017- 940 941
017- 942 943
017- 944 945
017- 946 947
017- 948 949
017- 950 951
017- 952 953
017- 954 955
017- 956 957
017- 958 959
017- 960 961
017- 962 963
017- 964 965
017- 966 967
017- 968 969
017- 970 971
017- 972 973
017- 974 975
017- 976 977
017- 978 979
017- 980 981
017- 982 983
017- 984 985
017- 986 987
017- 988 989
017- 990 991
017- 992 993
017- 994 995
017- 996 997
017- 998 999
017- 999 1000

```

```

0114 CALL SYMBOL DL*3.30,3.0,28,AREA,0.0,241
0115 CALL SYMBOL DL*1.90,3.0,28,*SECCION *,0.0,01
0116 CALL SYMBOL DL*4.23,3.0,28,SEC,0.0,241
0117 CALL ESCALA (IX*AX,FEM,IEV,DL)
0118 CALL PLOT (0.0,0.0,3)
0119 DL=0.0
0120 N=NN=3
0121 DC 30= J=1,NM=
0122 DL=DL-FEV
0123 CALL PLOT (0.0,0.0,2)
0124 CALL PLOT (0.0,1.0,DL,2)
0125 30= CALL PLOT (0.0,0.0,DL,2)
0126 DF=NN*FEV*(NM*FEV-6.72)/2.0-3.0*FEV
0127 CALL SYM=GL(-2.0,0P,-28,*PACFUNDIDAD (KILOMETROS)*,90.0,24)
0128 DAV=0.0
0129 N=MY*1
0130 DC 30= J=1,NA,IEV
0131 VEV=(J=1)*(-1.0)
0132 CALL NUMBER (-1.0,DMV,3),10,VEV,0.0,-11
0133 30= DMV=DMV-FEV*IEV
0134 VT=3.0*FEV
0135 CALL PLOT (0.0,-VT,-31)
0136 DC 321 J21=1,NC
0137 NVC=VVIJ21
0138 DT 321 J22=1,NVC
0139 321 CF(321,322)=C(321,322)
0140 DC 327 JF=1,NC
0141 SN=JF
0142 IF (C(327,31).LT.0.0) CR(37,31)=0.0
0143 IF (C(327,31).GT.XMAX) CR(37,31)=XMAX
0144 CALL PLOT (CR(37,31)*FM,CZ(37,31)*(-FEV),31)
0145 NVC=VVI(37)
0146 DC 323 J=2,NVC
0147 IF (C(323,J).LT.0.0) C(37,J)=0.0
0148 IF (C(323,J).GT.XMAX) C(37,J)=XMAX
0149 30= CALL PLOT (C(37,J)*FM,CZ(37,J)*(-FEV),21)
0150 CALL PLOT (C(37,31)*FM,CZ(37,31)*(-FEV),2)
0151 DC 327 J1=1,3
0152 307 CALL NUMBER(CR(37,31)*FM,(VVI(37,J1)*(-FEV))-117,-07,50,0,-11)
0153 FL=20000.0*FEV
0154 CALL PLOT (0.0,FL,-33)
0155 CALL ESCALA (IX*AX,FEM,IEV,DL)
0156 CALL PLOT (0.0,0.0,33)
0157 DAV=0.0
0158 DL 313 313=1.10
0159 DL=DLV-1.0
0160 CALL PLOT (0.0,0.0,2)
0161 CALL PLOT (0.0,1.0,DL,2)
0162 210 CALL PLOT (0.0,0.0,DL,2)
0163 CALL SYMBOL(-2.0,0.0,28,*GRANDES RELATIVA (U.0.1)*,90.0,24)
0164 N=AN=50000.0
0165 VVI=50000.0
0166 DC 312 J12=1,NC
0167 NVC=VVI(312)
0168 DT 312 J13=1,NC
0169 IF (C(312,313).GT.VMAX) VMAX=C(312,313)
0170 312 IF (C(312,313).LT.VMI) VMI=C(312,313)
0171 DT 311 311=1,NC

```



```

0056 CD=DE(J1)-DB
0057 NVC=NV(J)
0058 DC 204 R=1,NVC
0059 ZC(J,K)=CZ(J,K)-ZOB(IJ)
0060 200 CR(J,K)=CCR(J,K)
0061 1000 DC 203 L=1,NE
0062 1001 CR(J,NV(J)+1)=CR(J,1)
0063 1002 ZC(J,NV(J)+1)=ZC(J,1)
0064 1003 SU=3.0
0065 1004 DC 206 M=1,NVC
0066 1005 AN=CR(J,M)+ZC(J,M+1)-CR(J,M+1)+ZC(J,M)
0067 IF(AN.EQ.0.) DC TC 206
0068 1007 AN=/(ZC(J,M+1)-ZC(J,M))**2+(CR(J,M+1)-CR(J,M))**2)
0069 F=ATANZ(CR(J,M),ZC(J,M))
0070 1009 E=ATANZ(CR(J,M+1),ZC(J,M+1))
0071 D=CR(J,M+1)-CR(J,M)
0072 1011 C=(M+1)*CR(J,M+1)**2+ZC(J,M+1)**2/(CR(J,M)**2+ZC(J,M)**2)
0073 1012 H=(ZC(J,M+1)-ZC(J,M))/Z.D
0074 1013 S=M*SU**A*(B+C)*E-F))
0075
0076 206 CONTINUE
0077 F=H(J,1)-133.4*CD*SU*H
0078 DC 205 M=1,NVC
0079 IF(L.EQ.1) GO TO 205
0080 ZC(J,M)=ZC(J,M)-ZC(J,L)*H
0081 205 CR(J,M)=CR(J,M)-D*H
0082 DC 208 L=1,NE
0083 IFST=J+3
0084 DC 208 L=1,NE
0085 CF=SU*CF+SU*(H(J,1))
0086 205 LGT(I)=SU*ST
0087 NCF=Z
0088 NCF=Z
0089 J=Z+J*3*NCI,5
0090 IF(NCF.EQ.0) NCF=NC
0091 I=1
0092 I=2*50
0093 D=Z+D*10*1,5
0094 IF(I*2.EQ.1) IP2=NC
0095 PRINT 50,(APEX(I),I=1,5),(SECT(J),J=1,5),NI,FACMA,(H,J),L,NCF)
0096 DC 214 IP=IP+IP2
0097 214 PRINT 60,IP,SECT(I),M,N,NCF,NCF,EGT(IP)
0098 IF(IP.EQ.1) GO TO 215
0099 IF(IP.EQ.5)
0100 213 IP=IP*5
0101 IF(NCF.EQ.0) DC TC 215
0102 NCF=NC+1
0103 NCF=NC+1
0104 IF(NCF.EQ.0) NCF=NC
0105 216 *****
0106 *****
0107 *****
0108 *****
0109 *****
0110 *****
0111 *****
0112 *****
0113 *****
0114 *****
0115 *****
0116 *****
0117 *****
0118 *****
0119 *****
0120 *****
0121 *****
0122 *****
0123 *****
0124 *****
0125 *****
0126 *****
0127 *****
0128 *****
0129 *****
0130 *****
0131 *****
0132 *****
0133 *****
0134 *****
0135 *****
0136 *****
0137 *****
0138 *****
0139 *****
0140 *****
0141 *****
0142 *****
0143 *****
0144 *****
0145 *****
0146 *****
0147 *****
0148 *****
0149 *****
0150 *****
0151 *****
0152 *****
0153 *****
0154 *****
0155 *****
0156 *****
0157 *****
0158 *****
0159 *****
0160 *****
0161 *****
0162 *****
0163 *****
0164 *****
0165 *****
0166 *****
0167 *****
0168 *****
0169 *****
0170 *****
0171 *****
0172 *****
0173 *****
0174 *****
0175 *****
0176 *****
0177 *****
0178 *****
0179 *****
0180 *****
0181 *****
0182 *****
0183 *****
0184 *****
0185 *****
0186 *****
0187 *****
0188 *****
0189 *****
0190 *****
0191 *****
0192 *****
0193 *****
0194 *****
0195 *****
0196 *****
0197 *****
0198 *****
0199 *****
0200 *****
0201 *****
0202 *****
0203 *****
0204 *****
0205 *****
0206 *****
0207 *****
0208 *****
0209 *****
0210 *****
0211 *****
0212 *****
0213 *****
0214 *****
0215 *****
0216 *****
0217 *****
0218 *****
0219 *****
0220 *****
0221 *****
0222 *****
0223 *****
0224 *****
0225 *****
0226 *****
0227 *****
0228 *****
0229 *****
0230 *****
0231 *****
0232 *****
0233 *****
0234 *****
0235 *****
0236 *****
0237 *****
0238 *****
0239 *****
0240 *****
0241 *****
0242 *****
0243 *****
0244 *****
0245 *****
0246 *****
0247 *****
0248 *****
0249 *****
0250 *****
0251 *****
0252 *****
0253 *****
0254 *****
0255 *****
0256 *****
0257 *****
0258 *****
0259 *****
0260 *****
0261 *****
0262 *****
0263 *****
0264 *****
0265 *****
0266 *****
0267 *****
0268 *****
0269 *****
0270 *****
0271 *****
0272 *****
0273 *****
0274 *****
0275 *****
0276 *****
0277 *****
0278 *****
0279 *****
0280 *****
0281 *****
0282 *****
0283 *****
0284 *****
0285 *****
0286 *****
0287 *****
0288 *****
0289 *****
0290 *****
0291 *****
0292 *****
0293 *****
0294 *****
0295 *****
0296 *****
0297 *****
0298 *****
0299 *****
0300 *****

```

```

0001      REAL*4 FCMA
0002      DIMENSION I(20),I(196),NV(50),DE(50),CON(50,200),C2(50,200),CX(50,20
101      EG(150,200),EGT(200),AREA(6),SEC(6),A(50,3),V(50,3),ORD(6),EGU(
200),ZG(200),ZC(50,200)
0003      CALL PLOT5 (I(20),I(196),5)
0004      READ 100,NMC
0005      100 FORMAT (I1)
0006      DO 400 J=1,NMC
0007          N=AJ(1,100)NC
0008          S=AJ(1,199)KMAX,YMAX,YFAC,YFAC,CDNST
0009      135 FORMAT (5F10.0)
0010          FACC=KMAX/YFAC
0011          FACV=YMAX/YFAC
0012          READ 101,(AREA(I),I=1,6),(SEC(J),J=1,6),(ORD(L),L=1,6)
0013          F=AJ(1,6)A(6,6)A(6,6)
0014          READ 102,N1,N2,N3,NC,N4,NE,IE,N1EV,DX,DZ,DB,EM,EV
0015          S=AJ(1,60)(ZG(J),J=1,NE)
0016      60 FORMAT (6I7A,F6.3)
0017          DO 300 JA=1,NE
0018      6000 ZG(J)=FACV*(ZG(J))
0019          132 FORMAT (8I3,5F10.0)
0020          READ 103,(NV(I),DE(I),I=1,NC)
0021      101 FORMAT (10I3,5F10.0)
0022          CALL PLOT (FCMA)
0023          PRINT 'I,IA,AI(I),I=1,6),(SEC(J),J=1,6),N1,(ORD(L),L=1,6),FCMA,NC
1,NA,NA,NE,IE,N1EV,DX,DZ,DB,EM,EV
0024          NCI=1
0025          NCF=10
0026          I=FC(FC,NCI) NCF=NC
0027          DO 200 JJ=1,5
0028              PRINT '2,1 I (NV(I),DE(I),I=NCI,NCF)
0029              I=FC(FC,NCI) GO TO 17
0030              NCF=NCI+1
0031              NCF=NCI+10
0032          200 I=FC(FC,NCI) NCF=NC
0033              IF C(I) .NE.
0034                  DO 30 I=1,NC
0035                      NVCF=V(I)
0036                      READ 104,(AI(I),N1,V(I),N1,N1,3)
0037                      READ 105,(AI(I),J),C2(I,J),J=1,NVC)
0038      104 FORMAT (I12,2F6.3),2A1
0039                      N1=N1+3
0040                      AI(I)=FACV*(AI(I))
0041                      N1=N1/FACV*(1.4)
0042          1 CONTINUE
0043          DO 200 J=1,NVC
0044              READ 106,(AI(J),N1,V(J),N1,N1,3)
0045              READ 107,(AI(J),J),C2(J,J),J=1,NVC)
0046          2 CONTINUE
0047          PRINT '3,I,AI(I),N1,V(I),N1,N1,3),I,(CX(I),J),C2(I,J),J=1,NVC)
0048              I=AI(I),C2(I),C2(I),L=1,NVC)
0049              IF C(L) .NE. 0 GO TO 11 5000
0050              DO 300 I=1,NC
0051                  NVCF(I)=C2(I)-C(5)
0052          300 CONTINUE
0053          5000 PRINT '5,0)
0054          DO 400 I=1,NMC
0055              S=AJ(1,20)I(196)

```

BIBLIOGRAFIA

- C. PATRICK ERVIN
THEORY OF THE BOUGUER ANOMALY
Geophysics Vol.42 No.7 1977 pag.1468
- D.S.PARASNIS
GEOFISICA MINERA,
- F. S. GRANT AND G. F. WEST
INTERPRETATION THEORY IN APPLIED --
GEOPHYSICS.
- G. D. GARLAND
THE EARTH'S SHAPE AND GRAVITY.
- L. L. NETTLETON
GRAVITY AND MAGNETICS IN OIL PROS--
PECTING.
- MANIK TALWANI, J. LAMAR WORZEL
AND MARK LANDISMAN
RAPID GRAVITY COMPUTATIONS FOR TWO-
DIMENSIONAL BODIES WITH APPLICATION
TO THE MENDOCINO SUBMARINE FRACTURE
ZONE,
Journal Geophysical Research Vol.64
No.1 January 1959.
- M. B. DOBRIN
INTRODUCCION A LA PROSPECCION GEOFI--
SICA.
- M. KING HUBBERT
A LINE-INTEGRAL METHOD OF COMPUTING
THE GRAVIMETRIC EFFECTS OF TWO-DI--
MENSIONAL MASSES,
Geophysics Vol.12 No.2 1948 p.215-
225.

A. MORGAN AND F. S. GRANT

**HIGH SPEED CALCULATION OF GRAVITY AND
MAGNETICS PROFILES ACROSS TWO-DIMEN -
SIONAL BODIES HAVING AN ARBITRARY --
CROSS SECTION.**

Geophysical Prospecting Vol.9 No.1

pag. 10-15.