

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS
GRAVIMÉTRICOS DE LA REGIÓN DE PARGUAZA
ESTADO BOLÍVAR**

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Toledo Ávila Jefferson A.

Caracas, 15 de noviembre de 2018

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS
GRAVIMÉTRICOS DE LA REGIÓN DE PARGUAZA
ESTADO BOLÍVAR**

TUTOR ACADÉMICO: Dra. Nuris Orihuela

COTUTOR ACADÉMICO: Dr. Mariano Arnaiz

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Toledo Ávila Jefferson A.

Caracas, 15 de noviembre de 2018

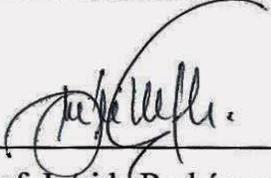
Caracas 15 de noviembre de 2018.

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el **Br. Toledo Ávila Jefferson Andrew**, titulado:

“PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS DE LA REGIÓN DE PARGUAZA, ESTADO BOLÍVAR”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Geofísico y, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas del autor, lo declaran **APROBADO**.


Prof. Inirida Rodríguez
Jurado


Prof. Sebastián Grande
Jurado


Prof. Nuris Orihuela
Tutor Académico

DEDICATORIA

Has sido mi apoyo, mi guía, mi soporte y mi amiga. Me has dado más de lo que algún día podría devolvarte. Siempre has estado para mí y sé que siempre estarás. No es más que un reconocimiento al mérito que hoy y siempre te dedique lo que tú has hecho de mí. Gracias por tu amor, tu paciencia, tu confianza y tu presencia, que suerte tengo de ser tu hijo.

¡Te amo, Mamá!

A mi Papá, Andru Toledo, quien siempre ha sabido estar presente a pesar de la distancia y de las circunstancias de la vida. Gracias por siempre apoyarme y respetar mis decisiones. Siempre has querido lo mejor para mí y sé que te has imaginado este momento por mucho tiempo. Este logro también es tuyo.

¡Te amo, Papá!

A mi hermanito Gerardo, a mis hermanas Valeria y Andrea. A mi segunda figura paterna, Alirio Mejías. A mis amigos. A mi futura familia. A mi abuela Reina y mi abuelo Victor. A Venezuela, la Venezuela que fue y que volverá a ser.

A la memoria de Raúl Rondón.

AGRADECIMIENTOS

De nuevo a Iraida Ávila, mi madre quien junto a Andru Toledo, mi padre, han logrado llevarme hasta donde estoy, sé lo difícil que ha sido el camino y me han demostrado que siempre vale la pena luchar, los amo. A Alirio Mejías quien sin ser mi padre me ha querido como a un hijo y ha estado siempre, en todo momento. A mi hermano Gerardo Mejías por entender todo el tiempo que no le he podido dedicar, te amo y siempre estaré para ti. A la Universidad Central de Venezuela y los profesores de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica por formarme y hacer que ame la Geofísica, gracias por su profesionalismo y por seguir creyendo en la academia. A mis tutores Nuris Orihuela y Mariano Arnaiz por hacerme entender de mejor forma la gravimetría y por su gran ayuda durante la realización de este trabajo. A mi hermano del alma Willfel Galíndez por su amistad ya hace más de 10 años. A quien tiene 8 años presente de alguna forma u otra y que este último año ha sido de gran importancia, Alejandra Rodríguez gracias por tu forma de quererme. A mis amigos Henger Maizo, Rolando Rebozo, Jesús Martínez, Mariafernanda Ortiz, Erimar Aranguren, Harold Pita, Javier Rivas, gracias. A mis amigos de Geofísica en orden de aparición: Manuel Alonso, Brayner García, Geraldine Torres y Carlos Flores. A mi querido Profesor Elio Figueroa por por ser mi amigo desde 9no grado y por siempre estar para mí. A mis tías Ali, Yari y Hegleydy. A mi tío Jaime por rescatarnos en Tinaco cuando nos fuimos de campo. Es imposible nombrar a todos los que deberían estar aquí, pero quiero que sepan que les agradezco infinitamente lo que han hecho por mí y lo que me han enseñado. Gracias a la vida por tanto.

Toledo Á., Jefferson A.

PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS DE LA REGIÓN DE PARGUAZA ESTADO BOLÍVAR

Tutor académico: Dra. Nuris Orihuela. Cotutor académico: Dr. Mariano Arnaiz. Trabajo Especial de Grado. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica (Departamento de Geofísica). Año 2018, 83 p.

RESUMEN

Palabras clave: Gravimetría, prospección minera, Granito Rapakivi de El Pargüaza, pegmatitas, coltán.

Se realizó un procesamiento e interpretación de datos gravimétricos provenientes de dos adquisiciones realizadas en una región de Pargüaza, estado Bolívar, con fines mineros. La zona de estudio se encuentra al Oeste del estado Bolívar cercano a los límites con Amazonas y Apure entre las coordenadas UTM 686000E a 696000E y 687000N a 681000N para la zona 19N. Se trabajó con un total de 123 estaciones espaciadas cada 500 m y 254 estaciones cada 100 m aproximadamente. Las anomalías de Bouguer se calcularon por medio de reducciones de segundo orden. Durante el procesamiento de los datos se realizó una separación regional-residual por medio de un filtrado Gaussiano, luego se calculó la derivada horizontal total para resaltar zonas de altos contrastes, posteriormente se calculó la deconvolución de Euler y se realizó un análisis espectral para la estimación de la profundidad de las fuentes gravimétricas y finalmente se generó un modelo sobre un perfil N30W utilizando el mapa residual de la adquisición de mayor escala. Los resultados permitieron interpretar regiones de interés prospectivo delimitadas por zonas de altos gradientes en contactos entre anomalías de valores máximos y anomalías de valores mínimos las cuales fueron interpretadas como posibles cuerpos pegmatíticos intrusivos en el Granito Rapakivi del Pargüaza, posibles fuentes de las mineralizaciones de interés de la zona.

ÍNDICE

	Página
Capítulo I	14
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo general	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
1.3 UBICACIÓN	16
Capítulo II	19
2 MARCO GEOLÓGICO	19
2.1 ESCUDO DE GUAYANA	19
2.2 PROVINCIA GEOLÓGICA DE CUCHIVERO	21
2.3 ASOCIACIÓN SUAPURE	22
2.4 GRANITO RPAKIVI DE EL PARGÜAZA (GRP)	22
2.5 ROCAS ASOCIADAS A LOS GRANITOS RPAKIVI	23
2.6 GEOLOGÍA LOCAL	24
Capítulo III	27
3 MARCO TEÓRICO	27
3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO GRAVIMÉTRICO	27
3.2 LEY DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL	27
3.3 ACELERACIÓN GRAVITACIONAL	28
3.4 GEOIDE Y ELIPSOIDE	28

	Página	
3.5	CORRECCIONES GRAVIMÉTRICAS	30
3.5.1	Corrección por mareas	30
3.5.2	Corrección por deriva instrumental	30
3.5.3	Corrección por latitud	31
3.5.4	Corrección atmosférica	32
3.5.5	Corrección de aire libre	33
3.5.6	Corrección de Bouguer	33
3.5.7	Corrección topográfica	34
3.6	ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS	37
3.6.1	Anomalías gravitatorias	37
3.6.2	Anomalías de aire libre	37
3.6.3	Anomalías de Bouguer	38
3.7	SEPARACIÓN REGIONAL-RESIDUAL	38
3.7.1	Filtro pasabanda	39
3.7.2	Filtro Butterworth	39
3.7.3	Continuación hacia arriba	40
3.7.4	Filtro Gaussiano regional/residual	41
3.8	ANÁLISIS ESPECTRAL	42
3.9	DERIVADA HORIZONTAL TOTAL	43
3.10	DECONVOLUCIÓN DE EULER	43
	Capítulo IV	45
4	MARCO METODOLÓGICO	45
4.1	CÁLCULO DE GRAVEDAD OBSERVADA	46

	Página	
4.2	CORRECCIONES DE SEGUNDO ORDEN	46
4.3	CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA	46
4.3.1	Corrección topográfica local	47
4.3.2	Corrección topográfica regional	47
4.4	ANOMALÍAS DE BOUGUER	48
4.4.1	Cálculo de anomalías de Bouguer	48
4.4.2	Generación de mapas de anomalías de Bouguer	48
4.4.3	Estadísticas	49
4.5	SEPARACIÓN REGIONAL-RESIDUAL	49
4.6	DERIVADA HORIZONTAL TOTAL	50
4.7	ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDAD CON ESPECTRO DE POTENCIA	51
4.8	DECONVOLUCIÓN DE EULER	52
4.9	MODELADO	53
	Capítulo V	54
5	RESULTADOS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN	54
5.1	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	54
5.1.1	Adquisición A	54
5.1.2	Adquisición B	56
5.2	MAPAS DE ANOMALÍAS DE BOUGUER TOTAL, REGIONAL Y RESIDUAL.	58
5.2.1	Adquisición A	58
5.2.2	Adquisición B	62
5.3	DERIVADA HORIZONTAL TOTAL	66

	Página
5.3.1 DHT Adquisición A	66
5.3.2 DHT Adquisición B	67
5.4 ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDADES POR MEDIO DE ESPECTROS DE POTENCIAS	68
5.5 DECONVOLUCIÓN DE EULER	68
5.5.1 Deconvolución de Euler Adquisición A	68
5.5.2 Deconvolución de Euler Adquisición B	70
5.6 MODELO	71
5.7 DISCUSIÓN	75
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	80

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1 Mapas de ubicación de la zona de estudio.....	17
Figura 1.2 Mapas de ubicación de las estaciones gravimétricas de la Adquisición A	17
Figura 1.3 Mapas de ubicación de las estaciones gravimétricas de la Adquisición B.	18
Figura 2.1 Mapa geológico generalizado del Escudo de Guayana en Venezuela.....	19
Figura 2.2 Unidades litodémicas de la Provincia Cuchivero	22
Figura 2.3 Representación esquemática de relaciones granito-pegmatitas.....	24
Figura 3.1 Representación del geoide, elipsoide, topografía y superficie del océano	29
Figura 3.2 Elevación sobre el geoide, sobre el elipsoide y la ondulación del geoide.	29
Figura 3.3 Variación de la velocidad angular y abultamiento ecuatorial de la Tierra	32
Figura 3.4 La corrección topográfica	34
Figura 3.5 Corrección de aire libre, corrección de Bouguer y corrección topográfica	36
Figura 3.6 División de zonas en zona cercana, zona intermedia y zona lejana	36
Figura 3.7 Filtro pasabanda.....	39
Figura 3.8 Filtro Butterworth	40
Figura 3.9 Continuación hacia arriba	41
Figura 3.10 Filtro Gaussiano.....	41
Figura 3.11 Espectro de potencia para datos magnéticos.	42
Figura 4.1 Diagrama de las fases del procesamiento	45
Figura 4.2 Los puntos rojos representan los valores del modelo de elevaciones.....	47
Figura 4.3 Espectro de potencia correspondiente a la adquisición A.	51
Figura 4.4 Espectro de potencia correspondiente a la adquisición B.....	52
Figura 5.1 Histograma de frecuencias para la adquisición A.....	55
Figura 5.2 Diagrama de caja y bigotes para la adquisición A.....	56
Figura 5.3 Histograma de frecuencias para la adquisición B.....	57
Figura 5.4 Diagrama de caja y bigotes para la adquisición B.....	58
Figura 5.5 Mapa de anomalía de Bouguer completa para la adquisición A.	59
Figura 5.6 Componente regional de anomalía de Bouguer, Adquisición A.	60

	Página
Figura 5.7 Componente residual de anomalía de Bouguer, Adquisición A.....	61
Figura 5.8 Mapa de anomalía de Bouguer completa para la adquisición B.....	63
Figura 5.9 Componente regional de anomalía de Bouguer, Adquisición B.....	64
Figura 5.10 Componente residual de anomalía de Bouguer, Adquisición B.....	65
Figura 5.11 Derivada horizontal total, adquisición A.....	66
Figura 5.12 Derivada horizontal total, adquisición B.....	67
Figura 5.13 Deconvoluciones de Euler, adquisición A.....	69
Figura 5.14 Deconvoluciones de Euler, adquisición B.....	70
Figura 5.15 Perfil A-A' N30W sobre el mapa residual de la adquisición A.....	72
Figura 5.16 Modelo geológico para datos gravimétricos en perfil A-A'.....	73
Figura 5.17 Modelo geológico para datos gravimétricos con soluciones de Euler.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 3.1 Índices estructurales para fuentes gravimétricas acorde a su geometría.....	44
Tabla 4.1 Encabezado para datos gravimétricos	46
Tabla 4.2 Valores de gravedad absoluta	46
Tabla 4.3 Parámetros de variogramas	48
Tabla 4.4 Parámetros usados en el <i>Interactive filtering</i>	49
Tabla 4.5 Parámetros de filtros para separación regional-residual	50
Tabla 4.6 Parámetros de CAHA para suavizado de anomalías de Bouguer	50
Tabla 4.7 Parámetros de deconvolución de Euler	53
Tabla 5.1 Resumen estadístico, Adquisición A.	55
Tabla 5.2 Resumen estadístico, Adquisición B.....	57
Tabla 5.3 Profundidades estimadas de las fuentes gravimétricas	68

Capítulo I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Geofísica es una ciencia que estudia la Tierra mediante la toma de mediciones de ciertas propiedades. Estas pueden variar por cambios tanto laterales como verticales en la composición de los materiales, por alteraciones en los campos naturales de la Tierra y por otros procesos que tienen su origen en la dinámica planetaria. Esta realidad permite la aplicación de los métodos geofísicos en la exploración de recursos naturales para propósitos principalmente económicos (Kearey, Brooks, y Hill, 2002). El paso inicial en la aplicación de la Geofísica para la búsqueda de minerales ocurrió a mitad del siglo XIX, con el uso del magnetismo en el descubrimiento de cuerpos minerales magnéticos (Telford, Geldart, y Sheriff, 1990). A inicios del siglo XX se empleó la gravimetría por primera vez para la prospección de recursos asociados a la industria petrolera. Este estudio consistió en el levantamiento de alrededor de 100 estaciones utilizando una balanza de Eötvös en un campo petrolero en Checoslovaquia (Eckhardt, 1940). Luego de esto y posterior a la segunda Guerra Mundial, el desarrollo de la Geofísica experimentó una expansión enfocada en perfeccionar las técnicas y la tecnología, para garantizar el suministro de petróleo y minerales. Una de las técnicas que fue mejorada considerablemente y empleada en la exploración petrolera, es la gravimétrica. Debido a su menor costo, respecto a otros métodos, se presentó como un método de avanzada en la fase prospectiva. En torno a ello, en Venezuela se han realizado gran cantidad de trabajos con la intención de caracterizar las grandes cuencas petrolíferas del país integrando datos de diferente índole como lo son los datos de adquisiciones sísmicas y magnéticas e incluso datos satelitales. Por ejemplo, se realizó una interpretación estructural de la Cuenca

Oriental de Venezuela, utilizando datos sísmicos, gravimétricos y magnéticos (Romero, 2002), también se generó un modelo estructural del subsuelo a partir de la integración de datos geofísicos en el Campo Costanero Bolívar, en la costa oriental del Lago de Maracaibo (Colmenares, 2011).

Queda claro que la mayoría de trabajos gravimétricos en el país han tenido una orientación hacia el entendimiento de los rasgos de las cuencas petroleras; no obstante, el país ha volteado su mirada a una conocida pero poco explorada riqueza, la de los minerales. El gobierno nacional mediante el decreto 2.248, en la Gaceta Oficial N° 40.855, el 24 de febrero de 2016, creó una *Zona de Desarrollo Estratégico Nacional* enmarcada en el plan de nombre *Arco Minero del Orinoco*, con la finalidad de proteger los recursos relacionados a minerales como el oro, el coltán, diamantes, entre otros. Esta zona está ubicada en el estado Bolívar, al Sur del río Orinoco. Esta región de Venezuela es una de las zonas menos estudiadas con información geofísica. Se tienen referencias de estudios magnéticos aerotransportados en el Escudo de Guayana, realizados en 1950 por la empresa *Air Service Corporation of Pennsylvania* con objetivos geológicos y mineros, así como otro estudio de la misma índole en 1961 junto a la compañía *Hunting Survey Corporation* (Ladera, 2015). Recientemente se generó una interpretación de datos aeromagnéticos con fines de exploración minera en la zona San Rafael-El Callao (Escorihuela, 2004). Ese mismo año se realizó un estudio geofísico integrado del Sur-Oriente del país (Díaz, 2004). Orihuela *et al.* (2011a), generaron un mapa magnético del territorio venezolano mediante datos satelitales. Ladera (2015) realizó un modelado gravimétrico y magnético del Escudo Guayanés mediante el uso de datos satelitales. Sin embargo, para las zonas de interés del proyecto *Arco Minero del Orinoco*, sigue habiendo una falta de información detallada acerca de las estructuras geológicas presentes, asociadas a las mineralizaciones buscadas. Con base a lo anterior y a partir del procesamiento e interpretación de datos gravimétricos de un sector de la región de Pargüaza estado Bolívar, esta investigación pretende proporcionar nueva información respecto a la zona de estudio. Esta información sería un aporte de gran magnitud para

la exploración geológica del área, en miras a una futura explotación sustentable de estos recursos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Interpretar datos gravimétricos de un sector ubicado en la región de Pargüaza, Edo. Bolívar.

1.2.2 Objetivos específicos

- Calcular la anomalía de Bouguer
- Analizar las anomalías gravimétricas del mapa de anomalía de Bouguer de la zona de estudio.
- Estimar la profundidad y forma de las fuentes de anomalía mediante el análisis espectral.
- Correlacionar las anomalías de Bouguer con la geología del área de estudio.
- Modelar las estructuras del subsuelo mediante perfiles seleccionados.

1.3 UBICACIÓN

Los datos gravimétricos corresponden a un sector ubicado al Oeste del estado Bolívar cercano a los límites con Amazonas y Apure entre las coordenadas UTM 686000E a 696000E y 687000N a 681000N para la zona 19N como se observa en la Figura 1.1. La Figura 1.2 y la Figura 1.3 muestran la distribución de las estaciones gravimétricas dentro de la concesión de la compañía. Esta adquisición se realizó en dos etapas, una adquisición regional (Adquisición A) que constó de 123 estaciones con un espaciamiento de aproximadamente 500 m y otra local (Adquisición B) con el levantamiento de 254 estaciones cada 100 m aproximadamente.

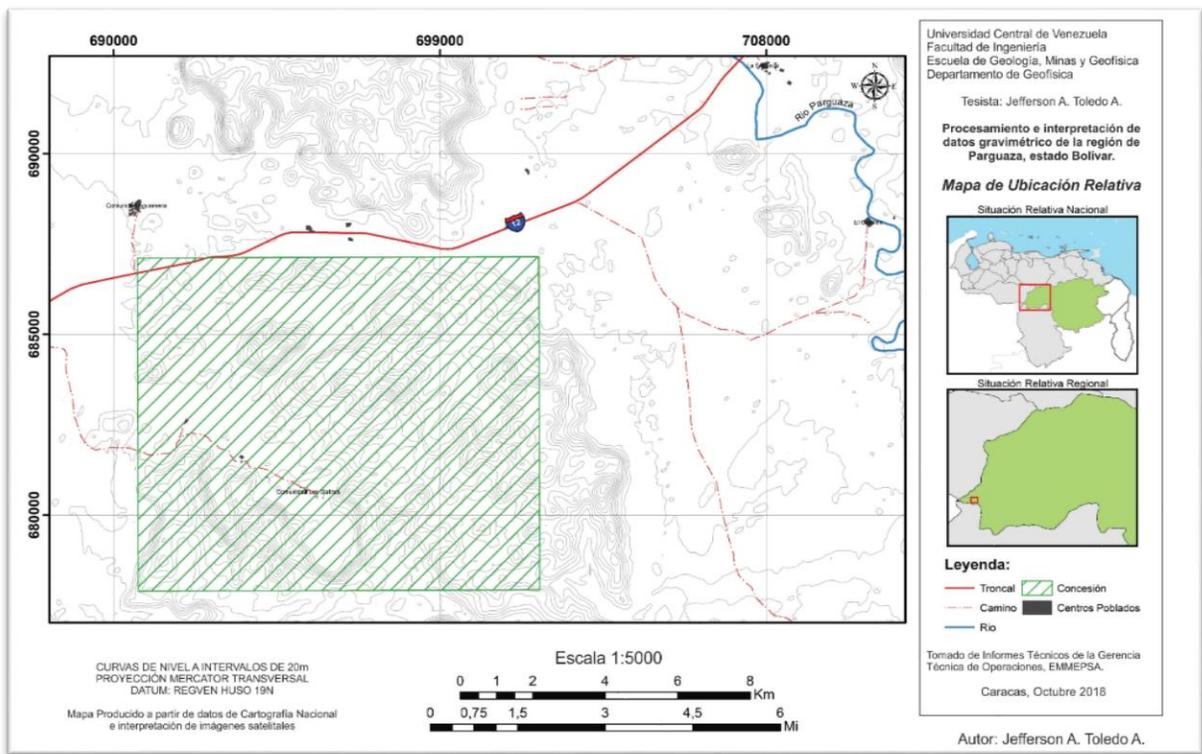


Figura 1.1 Mapas de ubicación de la zona de estudio, el recuadro de la derecha indica el área donde fueron adquiridos los datos.

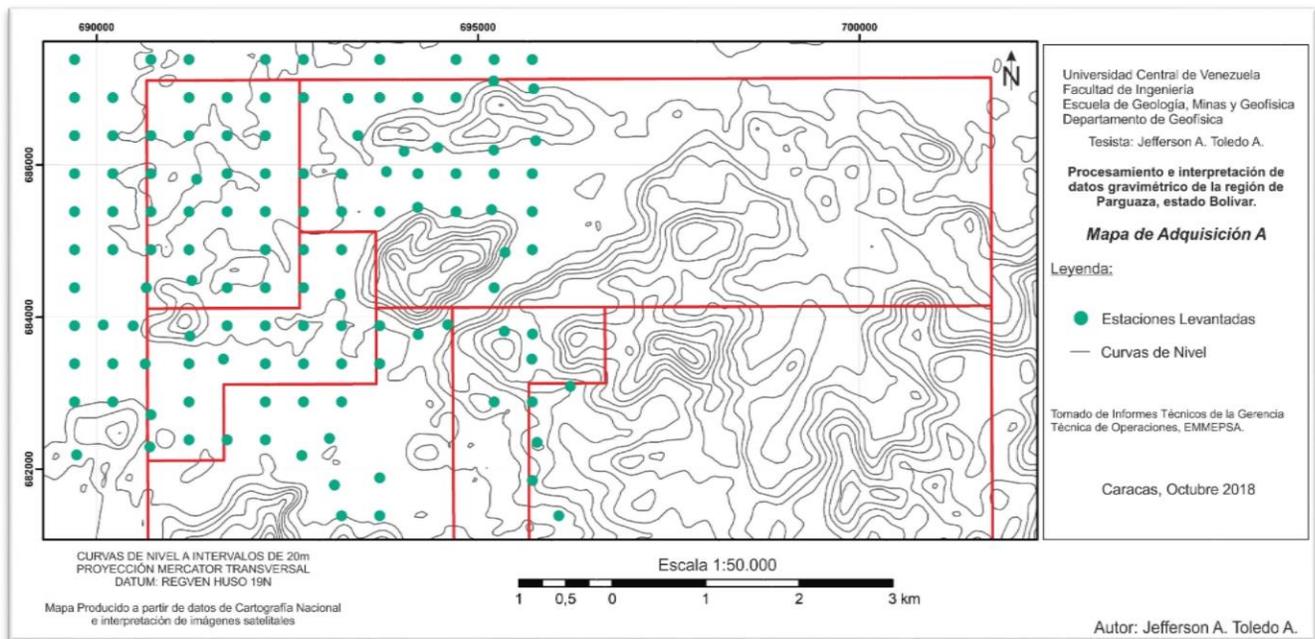


Figura 1.2 Mapas de ubicación de las estaciones gravimétricas de la Adquisición A.

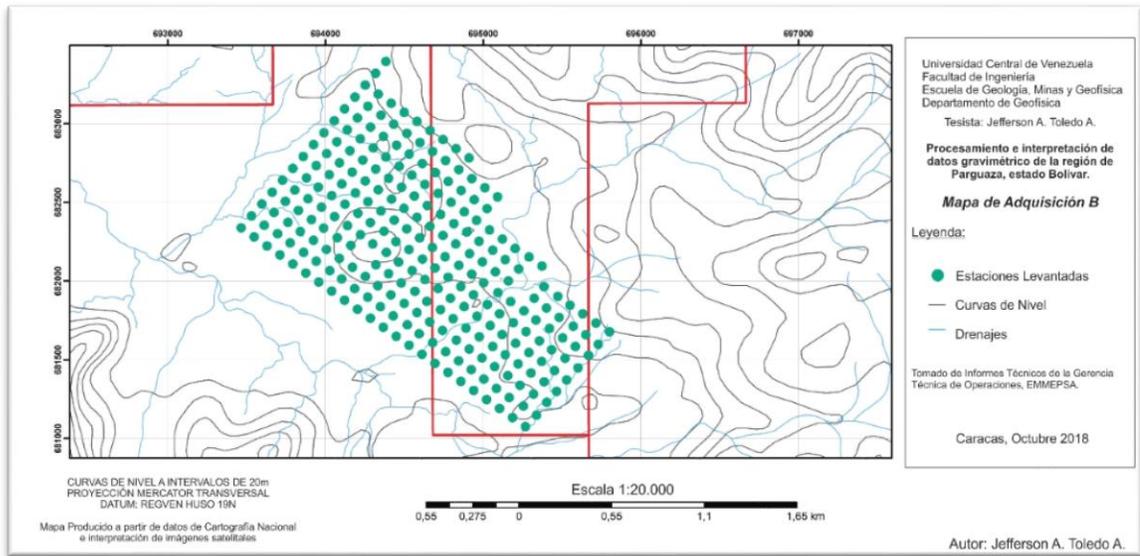


Figura 1.3 Mapas de ubicación de las estaciones gravimétricas de la Adquisición B.

Capítulo II

2 MARCO GEOLÓGICO

2.1 ESCUDO DE GUAYANA

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro del Escudo de Guayana el cual a su vez forma parte del Cratón Amazónico del Precámbrico de Sur América. Se extiende por el norte de Brasil, las Guayanas, Colombia y Bolivia y estaba unido al occidente de África hasta hace unos 200 Ma con la ruptura de Pangea. El Escudo de Guayana ocupa aproximadamente el 50% de la superficie de Venezuela con rocas tan antiguas como 3,41 Ga en las granilutas y charnockitas del Complejo de Imataca, como con rocas de unos 0,71 Ga siendo un ejemplo de esto las kimberlitas eclogíticas de Guanamito. Se divide en cuatro provincias geológicas las cuales son: Imataca, Pastora, Roraima y Cuchivero (Figura 2.1).

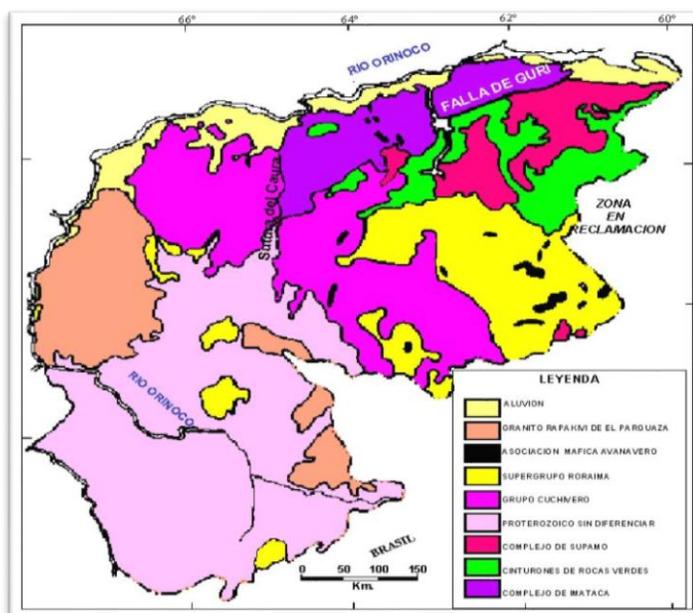


Figura 2.1 Mapa geológico generalizado del Escudo de Guayana en Venezuela (Tomado de Mendoza, 2005).

A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra un resumen de los eventos litotectónicos del Escudo de Guayana. Se tomaron en cuenta los eventos principales tanto mundiales como locales, su edad y las rocas asociadas a estos eventos.

Tabla 2.1 Resumen de eventos litotectónicos del Escudo de Guayana. (Modificado de Sidder y Mendoza, 1995)

Edad (Ma)	Eventos en el Escudo de Guayana	Eventos mundiales
Cenozoico	Levantamiento/Erosión/Planación	Planación
150-30	Carbonatitas y kimberlitas de Escudo Sudamericano	
210-200	Apertura Océano Atlántico	Nuevo Océano
500-265	Supercontinente Gondwana-Laurentia (Pangea)	“Collage”
850-545	Orogénesis Brasiliana-Pan Africana	Kimberlitas
850-750	Rifting supercontinente Rodinia: lamprofiros-kimberlitas Guianiano	
1200-1000	Colisión del Norte de Sur America con Norte América-Europa. Final orogenesis Nickeriana/Grenvilliana	“Collage”
1200-1100	Colisión Rio Negro-Juruena; Jari-Falsino (Brasil)-Mitu-Garzon (Colombia)-NW de Guayana	
1550-1350	Parguazensis: Rifting continental. Emplazamiento Granitos Rapakivis	Granitos rapakivis
1860-1730	Final orogénesis Transamazónica	Rift continental
2150-1960	Orogenesis Transamazonica: Colisión Continental, Cierre oceánico. Colisión arcos de islas Pastora vs Botanamo y vs Imataca	“Collage” Cambio atmósfera
2960-2850	Orogénesis Pre-Transamazónica o Aroensis	Granulitas antiguas
3700-3400	Orogénesis Guriense	
4500-4000	Bombardeo de meteoritos sobre la Tierra: 40% - 60% fusión del manto/Núcleo. Formación y evolución de rocas komatíticas y relacionadas	
4550±20	Primitivo Planeta Tierra	

Durante el Proterozoico, el Escudo de Guayana registró el máximo crecimiento de la corteza continental, evento de escala global que se generó a través de tres procesos llamados “collage” definidos como el desarrollo de orógenos o bloques continentales en diferentes partes y momentos en todo el Planeta Tierra que eventualmente colisionaron y se aglomeraron formando todos un supercontinente. Los supercontinentes mejor reconocidos son los de Atlántica a 2,2-1,9 Ga, finalizando la orogénesis Transamazónica, el Rodinia, al final y luego de la Orogénesis de Greenville a 1-0,9 Ga y Gondwana, después de la orogénesis Brasiliano-Pan Africano entre 1 y 0,6 Ga. Finalmente en el Paleozoico tardío y el Triásico, se origina el *rifting* del supercontinente Gondwana-Laurentia (Pangea), con el inicio de la formación de nuevos océanos como el Atlántico (Mendoza, 2005).

2.2 PROVINCIA GEOLÓGICA DE CUCHIVERO

La zona de estudio se encuentra dentro del Proterozoico, más específicamente en la Provincia geológica Cuchivero. Esta provincia incluye rocas volcánicas riolíticas y asociadas, comagmáticas con granitos calcoalcalinos de la Asociación Cuchivero; sills, diques, rocas de la Asociación Avanavero; areniscas, conglomerados, limolitas, tobas y lutitas del Grupo Roraima, complejos alcalinos como el de La Churuata, intrusiones de Carbonatita de Cerro Impacto, kimberlitas eclogíticas de Guaniamo y el Granito Rapakivi de El Pargüaza. Esta provincia parece extenderse hacia el Sur en el estado Amazonas y continuar en Brasil como parte de la Provincia Ventuari-Tapajós. La sección más completa de esta provincia fue descrita con el nombre de Superasociación Cedeño formado por la asociación Cuchivero, la asociación Suapure y sobre este de forma discordante yacen rocas sedimentarias del Grupo Roraima (Figura 2.2).

o post-tectónicos y pueden ser correlacionados con los rapakivis del Escudo Báltico-Laurentia. La edad del GRP es de 1545 ± 20 Ma U-Pb en circones a 1531 ± 39 Ma en el área del Suapure-Pijiguaos. Está emplazado en un *rift* continental, acompañado con un alto gradiente geotérmico inducido por magmas basálticos del manto superior. Muestran además un zonamiento inverso (mayor contenido félsico hacia el núcleo del plutón y más máficas hacia los bordes) con forma de elipsoide de 250 km NS por 120 km EW (Mendoza, 2005).

2.5 ROCAS ASOCIADAS A LOS GRANITOS RAPAKIVI

Los batolitos de granitos rapakivi en el mundo presentan ciertas rocas asociadas. Por ejemplo, el granito rapakivi Finés consiste de varios tipos de granitos con cuerpos más pequeños anortosíticos, gabroides y fayalíticos. Estas anortositas son cortadas por cuerpos pegmatíticos aparentemente más jóvenes y con contactos abruptos. En el granito rapakivi del plutón de Kiorosten en Ucrania se presentan cámaras pegmatíticas con más de 100 minerales relacionados y ocurre en un cinturón de 22 km de longitud en grupos bajo la superficie extendiéndose hasta un poco más de 150 m de profundidad (Lyckberg, 2006). Otros ejemplos de estas asociaciones con granitos anorogénicos son el batolito de Pikes Peak, el plutón de Wausau y los sistemas Grenvillianos en Ontario y Quebec (Cerny, 1991). En Finlandia la mayoría de las pegmatitas de la clase de tierras raras son de edad Mesoproterozoica y se asocian a granitos rapakivi anorogénicos como el GRP (Alviola, Mänttari, Mäkitie y Vaasjoki, 2001). Esta clase de pegmatitas está generalmente intrusionada en el mismo ambiente estructural que su granito asociado o en niveles inferiores de estructuras espacial y genéticamente relacionados. En algunos casos la estructura que aloja a las pegmatitas puede ser desbloqueada por la intrusión precedente del granito asociado. Sin embargo, el emplazamiento es diferente debido a su tamaño considerablemente inferior. Las pegmatitas forman bulbos lenticulares (Figura 2.3) con intensa mineralización de elementos raros que incrementan hacia su tope (Cerny, 1991). Este tipo de pegmatitas contiene altas concentraciones de Rb, Cs, Be, Ta, Nb y Sn (Linnen, Van Lichtenvelde, Cerny, 2012).

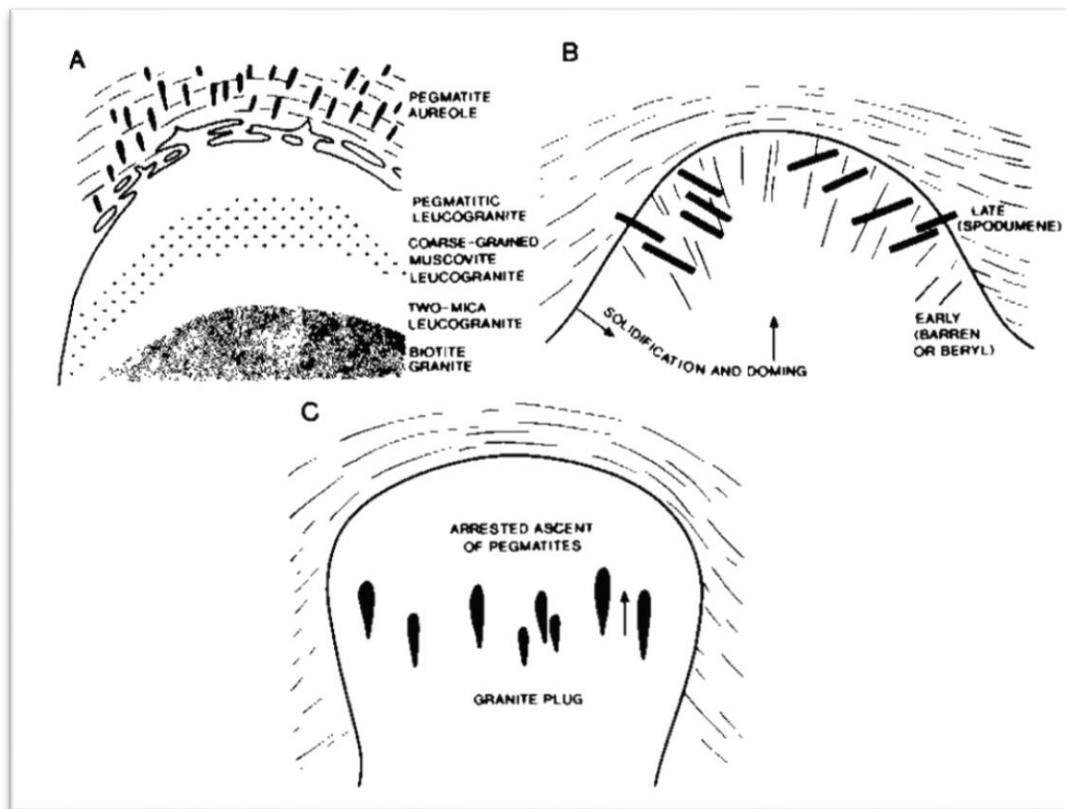


Figura 2.3 Representación esquemática de relaciones granito-pegmatitas (Modificado de Cerny, 2001).

2.6 GEOLOGÍA LOCAL

Parte del GRP aflora en Colombia en el departamento del Vichada hacia el margen del río Orinoco y sus características pueden ser extrapoladas a la masa del GRP en territorio venezolano. Este cuerpo forma domos tipo “inselberg” y afloramiento que sobresalen entre las sabanas de depósitos cuaternarios.

El GRP parece parcialmente cuerpo homogéneo, pero en un estudio realizado por Bonilla-Pérez et al. (2013) se pudo separar el GRP en grupos principales con las siguientes características:

- Granitos Biotíticos-Horbléndicos: más resistentes a la erosión formando estructuras más abruptas.
- Granitos de Anfíbol Sódico: exhiben superficies extensas de mayor grado de erosión.

- Diques Aplíticos: se encuentran como cuerpos métricos o diques de textura aplítica.
- Diques Pegmatíticos: se encuentran como diques tabulares o irregulares que siguen tendencias similares a las diaclasas y núcleos esferoidales. Son consideradas la fuente principal de minerales de tantalio y niobio aunque en el estudio de Bonilla-Pérez et al. (2013) no se encontraron estos minerales metálicos.
- Venas de Cuarzo: son inyecciones a través de fracturas o con patrones irregulares.

En Venezuela se ha descrito la presencia de domos de bauchita –charnockita monzonítica con fayalita- en la cuenca del río Ore, 40 km al SW de Los Pijigüaos, estado Bolívar. Es una roca intrusiva que presenta retrogresión metamórfica a la facies de anfibolita que evidencia que fue emplazada en forma de domos en un posible basamento que aún no ha sido hallado y que proviene probablemente de los eventos orogénicos del Neoarquano o el Paleoproterozoico y que sufrió un metamorfismo retrógrado al final de esta última orogénesis (Grande y Mariño, 2012). En el área metalogénica El Burro-Agua Mena, al Suroeste del municipio Cedeño en el estado Bolívar (Bolívar et al. 2012), se realizó un estudio para establecer los modelos de ocurrencia de los minerales columbita, tantalita y casiterita. En estos se generaron dos modelos donde:

- El primero es de origen secundario siendo generados por transporte por el agua o la gravedad desde su depósito primario. Se acumuló en una sucesión de lateritas producto de la alta meteorización del Granito Rapakivi del Pargüaza.
- El segundo es de origen primario y sus yacimientos se encuentran en las intrusiones formadas por diques de pegmatita compleja o granítica.

Por último, se tiene referencia de un trabajo realizado en el caño Aguamena en la región de Boquerón, estado Bolívar (Pacheco, 1982), donde se describen zonas de interés prospectivo relacionados a diferenciaciones dentro del GRP en cuerpos de:

- Sienita Alcalina

- Pegmatitas: observadas en diques localizadas en las fracturas de enfriamiento del granito, y en cuerpos lenticulares. Se describen como fases tardías de diferenciación magmática y post magmáticas.
- Sectores de fragmentos de Cuarzo: generados por la intensa meteorización de la región.
- Cuaternario Aluvial-Eluvial: constituido por materiales detríticos formado por arenas finas y suelos residuales lateríticos con pequeños afloramientos de granito a modo de “islas”.

Capítulo III

3 MARCO TEÓRICO

3.1 INTRODUCCIÓN AL MÉTODO GRAVIMÉTRICO

La geofísica basa su estudio de los rasgos y procesos de la Tierra en la medición de propiedades físicas. Estas mediciones pueden ser realizadas desde superficie generando perturbaciones en el medio o midiendo campos naturales del planeta. La prospección gravimétrica entra en este último grupo y forma parte de los métodos potenciales. Se basa en la toma de mediciones de la variación del campo gravitacional de la Tierra con la finalidad de encontrar masas locales de mayor o menor densidad respecto a las formaciones de su entorno. Este método es considerablemente más económico que por ejemplo los métodos sísmicos lo que conlleva a su uso en la exploración petrolera. En el caso de la exploración de minerales, se considera como un método secundario y su uso se fundamenta en la caracterización de estructuras asociadas a las mineralizaciones de interés (Telford et al., 1990). A continuación, se explica la ley de gravitación universal en la cual se basa este método.

3.2 LEY DE GRAVITACIÓN UNIVERSAL

El campo gravitacional de la Tierra responde a la ley de gravitación universal. Dicha ley postula que la fuerza entre dos partículas de masas m_1 y m_2 es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa:

$$F = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} ; \text{ (Ecuación 3.1)}$$

Dónde: γ es la constante de gravitación universal.

La gravimetría no mide la fuerza sino la aceleración gravitacional. A continuación se explicará como se obtiene esta aceleración partiendo de la ecuación 3.1.

3.3 ACELERACIÓN GRAVITACIONAL

Si la ecuación 3.1 la dividimos a ambos lados por m_2 tendremos la aceleración que siente esta masa por la presencia de la masa m_1 . Esta aceleración se convierte en la de la gravedad cuando esta masa m_1 es la masa de la Tierra y la distancia r de la ecuación 1 es la distancia desde la masa m_2 hasta el centro del planeta. Debido a que la Tierra no es una esfera perfecta y homogénea, la aceleración gravitacional no es constante sobre la superficie terrestre. La aceleración promedio en la superficie de la Tierra es cercana a 980 cm/s^2 o 980 Gal. Las variaciones de estos valores son relativamente pequeñas por lo cual en la geofísica se utiliza el mGal (10^{-3} Gal) para las mediciones gravimétricas.

La magnitud de la gravedad depende de 5 factores: latitud, elevación, topografía, mareas y las variaciones de densidad de los materiales del subsuelo (Telford et al., 1990). Algunos de estos factores están directamente relacionados con la forma del planeta, por lo tanto es necesario considerar los distintos modelos teóricos que lo definen como el geoide y el elipsoide explicados a continuación.

3.4 GEOIDE Y ELIPSOIDE

Más allá del problema geodésico asociado a la descripción de la forma del planeta, la geofísica en particular necesita poder ubicar con cierta precisión los elementos estudiados y las mediciones realizadas. Esta ubicación está referida principalmente a dos superficies. La primera es el geoide el cual es una superficie equipotencial que incluye los efectos de la gravedad y la fuerza centrífuga de rotación de la Tierra. La segunda es el elipsoide que es un modelo matemático que representa la forma que adquiere la Tierra debido a su rotación y aunque no es exactamente un elipsoide, este modelo simplifica eficientemente la forma del planeta para fines de geolocalización.

Debido a que el geoide es una superficie equipotencial de gravedad, se ve afectado por las variaciones laterales en la densidad. Esto no afecta al elipsoide ya que matemáticamente no se pueden modelar estas variaciones. Por lo cual existen diferencias en ambos modelos estando el geoide por encima del elipsoide en los casos

donde la densidad aumenta o existe una mayor cantidad de masa como en el caso de una montaña y por debajo donde hay un déficit de masas. Esta diferencia entre ambos modelos se llama ondulación del geode y esta oscilación se puede apreciar en la Figura 3.1 y en la Figura 3.2.

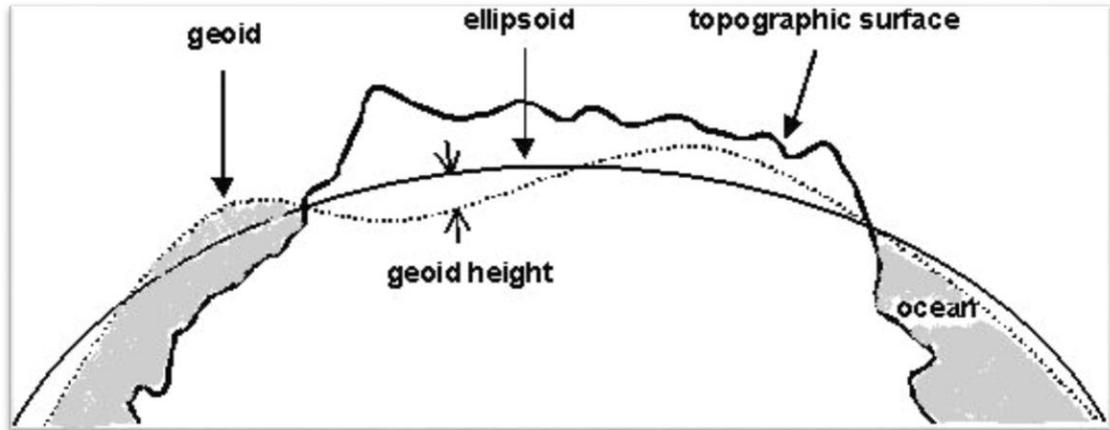


Figura 3.1 Representación del geode, elipsoide, topografía y superficie del océano (Tomado de Li y Götze, 2001).

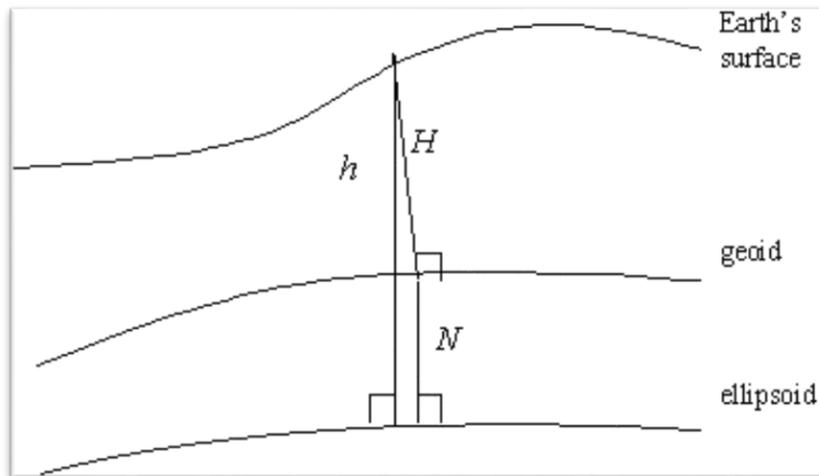


Figura 3.2 Elevación H sobre el geode, h sobre el elipsoide y N la ondulación del geode sobre el elipsoide (Tomado de Li y Götze, 2001).

3.5 CORRECCIONES GRAVIMÉTRICAS

Las mediciones de gravedad se realizan con el objetivo principal de analizar las variaciones en las densidades del subsuelo. Pero estas mediciones están altamente influenciadas por la ubicación en la que se realizan debido a la forma irregular del planeta, los efectos de mareas causados por los cuerpos celestes entre otros elementos. Para poder comparar mediciones realizadas en ubicaciones diferentes es necesario eliminar o corregir el efecto causado por estos agentes externos que en mayor o menor medida distorsionan los valores de aceleración. Estas correcciones o reducciones se realizan, según los nuevos estándares, respecto al elipsoide del Sistema de Referencia Geodésico de 1980 (GRS80). Cabe destacar que para los cálculos de las reducciones es válido el uso del elipsoide WGS84 como reemplazo del GRS80 (Li y Götze, 2001).

3.5.1 Corrección por mareas

Los instrumentos para la medición de la gravedad son lo suficientemente sensibles para registrar los cambios causados por el Sol y la Luna, los cuales dependen de la latitud y el tiempo. La corrección por mareas se puede calcular conociendo la posición del Sol y la Luna, para esto se pueden utilizar algoritmos computacionales pero los instrumentos actuales la realizan automáticamente. (Telford et al., 1990).

3.5.2 Corrección por deriva instrumental

Si se realiza una medición en un sitio y al cabo de un corto tiempo esta se repite, los valores de aceleración serán distintos. Esto se debe principalmente a fatiga en el sistema de muelles dentro del gravímetro por lo que es una variación mecánica y debe ser corregida. La adquisición se realiza en circuitos que consisten en un grupo de mediciones donde dos de estas, una de apertura y otra de cierre, se realizan en el mismo punto y son las que permiten reducir este error mecánico para las otras mediciones por medio de la siguiente fórmula:

$$Deriva = \frac{t_x (Lectura_f - Lectura_i)}{t_{total}}; \text{ (Ecuación 3.2)}$$

Donde:

Deriva: Deriva instrumental del gravímetro. Este valor debe ser restado al valor de cada medición para así simular que todas las mediciones fueron realizadas al mismo momento.

t_x : diferencia de tiempo en minutos para cada estación con respecto a la medición de apertura

$Lectura_f$: valor de la lectura de cierre del circuito

$Lectura_i$: valor de la lectura de apertura del circuito

t_{total} : diferencia de tiempo en minutos entre la medición de cierre y la de apertura

3.5.3 Corrección por latitud

La gravedad varía con la latitud debido a dos motivos, uno es la forma no esférica de la Tierra y el otro es el cambio en la velocidad angular debido a la rotación del planeta que va de cero en los polos a valores máximos en el ecuador. Los puntos cercanos al ecuador están más alejados del centro de masa de la Tierra que aquellos cerca de los polos (Figura 3.2), y como consecuencia la gravedad aumenta desde el ecuador hacia los polos. La fórmula de la corrección por latitud según Hinze et. al. (2005) es :

$$g_T = \frac{g_e(1+k\text{sen}^2\varphi)}{(1-e^2\text{sen}^2\varphi)^{1/2}} ; \text{ (Ecuación 3.3)}$$

Donde:

g_e (gravedad en el ecuador)= 978032.67715 mGal

$k=0.001931851353$

$e^2=0.0066943800229$

φ : latitud

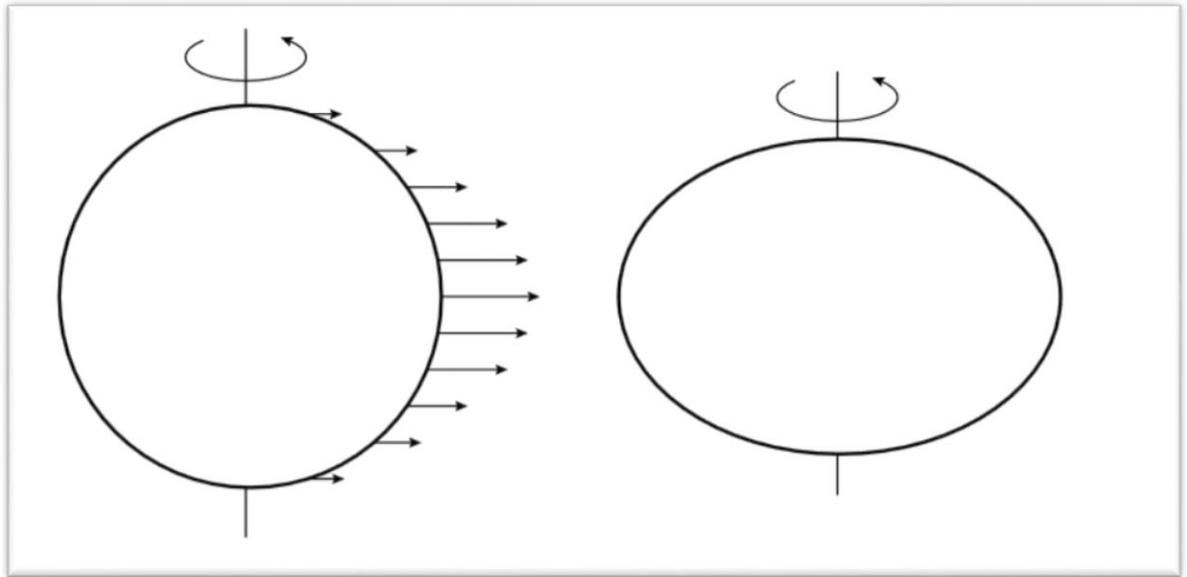


Figura 3.3 La Figura de la izquierda muestra la variación de la velocidad angular con la latitud siendo esta representada por vectores que tienen mayor magnitud cerca del ecuador. La Figura de la derecha es una representación exagerada del abultamiento ecuatorial de la Tierra, de donde surge su modelado elipsoidal. (Kearey et al., 2002)

3.5.4 Corrección atmosférica

En la determinación de la gravedad teórica (corrección por latitud) se incluye la masa de la atmósfera terrestre con la masa de la tierra sólida. Sin embargo, la masa de la atmósfera sobre la estación gravimétrica no afecta el valor de gravedad medido suponiendo que la atmósfera consiste en capas esféricas homogéneas. Esta corrección es necesaria para una mejor precisión en bases de datos que cubren un amplio rango de cotas y debe ser restada al valor de gravedad teórica (Hinze et al., 2005). La fórmula para esta corrección en miligales es:

$$\delta g_{atm} = 0.874 - 9.9 \times 10^{-5}h + 3.56 \times 10^{-9}h^2; \text{ (Ecuación 3.4)}$$

Donde:

h : es la altura en metros respecto al nivel de referencia

3.5.5 Corrección de aire libre

Debido a que la gravedad es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, es necesario corregir los cambios en las elevaciones de las estaciones con respecto a la superficie de referencia. Esta corrección no toma en cuenta el material entre la estación y el *datum* (Figura 3.4). El signo de esta corrección es positivo cuando la estación está por encima del *datum* y negativo en el caso contrario. El valor de la reducción de aire libre de segundo orden (Hinze et al., 2005) en mGal viene dado por:

$$\delta g_h = -(0.3087691 - 0.0004398 \sin^2 \theta)h + 7.2125 \times 10^{-8} h^2 ; \text{ (Ecuación 3.5)}$$

Donde:

θ : es latitud de la estación

h : es la altura en metros respecto al nivel de referencia

3.5.6 Corrección de Bouguer

La reducción de Bouguer toma en cuenta la atracción del material entre la estación y el nivel de referencia que fue obviada por la corrección de aire libre. Elimina el efecto gravitacional de una placa de espesor igual a la altura respecto al nivel de referencia (Figura 3.4) y de densidad igual a la estimada para las formaciones del entorno. La reducción de Bouguer de segundo orden en mGal fue planteada por LaFehr (1991) y corresponde a la siguiente fórmula:

$$\delta g_B = 2\pi G\rho[(1 + \mu) \times h - \lambda R] ; \text{ (Ecuación 3.6)}$$

Donde:

G : es la constante de gravitación universal

ρ : densidad del material

μ y λ : coeficientes adimensionales definidos por LaFehr (1991)

R: distancia relativa al radio promedio de la Tierra explicada también por LaFehr (1991)

h : es la altura en metros respecto al nivel de referencia

3.5.7 Corrección topográfica

Las montañas sobre la estación y los valles debajo de la misma tienen un efecto sobre la gravedad medidas. Estas irregularidades en la topografía se modelan dividiéndola en una cantidad de prismas verticales cuyas contribuciones a la aceleración de un punto de observación se calculan suponiendo una simetría cilíndrica alrededor de la estación. La altura de este prisma es h , su radio interno es r_1 y el externo es r_2 y ϕ_0 el ángulo respecto a la estación (Figura 3.3).

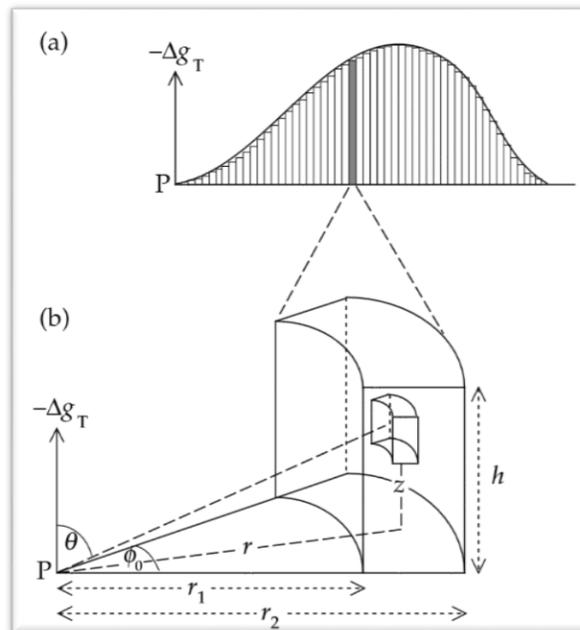


Figura 3.4 La corrección topográfica se realiza a) dividiendo la topografía en prismas verticales, b) añadiendo la influencia de cada prisma que depende de su posición y altura con respecto al nivel de referencia (Lowrie, 2007).

En la práctica esta corrección puede ser realizada por medio de una retícula que consiste en círculos concéntricos alrededor de la estación y su correspondiente valor

debe ser sumado a la gravedad medida. La fórmula para la corrección viene dada por (Lowrie, 2007):

$$\Delta g_T = G\rho\phi_o((\sqrt{r^2 + h^2} - r_1) - (\sqrt{r^2 + h^2} - r_2))$$

Para la corrección topográfica regional se hace uso de medios computacionales que agilizan el trabajo. A través del programa *Oasis Montaj* se implementan los métodos desarrollados por Nagy (1966) y Kane (1962) (*Geosoft*, 2006) para realizar las correcciones. Estos métodos dividen las contribuciones de la topografía en tres zonas, una cercana, una intermedia y otra lejana de la siguiente forma:

- Zona cercana: toma en cuenta entre la celda 0 y 1 y suma los efectos de 4 secciones triangulares mostradas en la Figura 3.5 mediante la fórmula:

$$\Delta g_T = GD\phi \left(R - \sqrt{R^2 + H^2} + \frac{H^2}{\sqrt{R^2 + H^2}} \right)$$

- Zona intermedia: toma los efectos entre las celdas 1 y 8 utilizando prismas cuadrado truncados mostrados en la Figura 3.5, mediante la fórmula:

$$\Delta g_T = -GD \int_{Z_1}^{Z_2} \int_{Y_1}^{Y_2} \int_{X_1}^{X_2} x * \ln(y + R) + y * \ln(x + R) + Z \arctan\left(\frac{Z * R}{x * y}\right)$$

- Zona lejana: para las celdas mayores a 8 se corrige el efecto de topografía basándose en una aproximación del segmento anular del anillo a un prisma cuadrado mostrado en la Figura 3.5. La fórmula para esta corrección es:

$$\Delta g_T = 2GDA^2 \frac{\left(R_2 - R_1 \sqrt{R_1^2 + H^2} - \sqrt{R_2^2 + H^2} \right)}{(R_2^2 - R_1^2)}$$

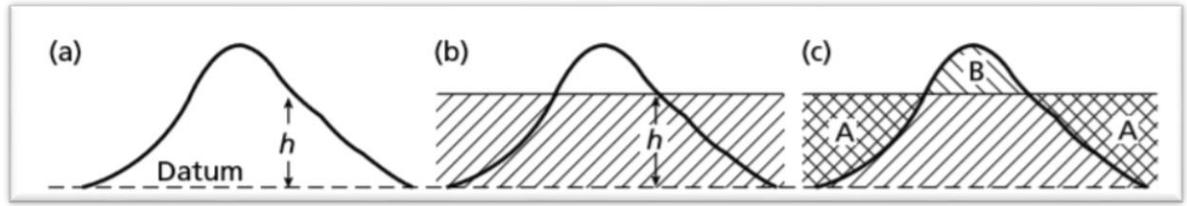


Figura 3.5 a) Corrección de aire libre, b) corrección de Bouguer y c) corrección topográfica (Kearey et al., 2002)

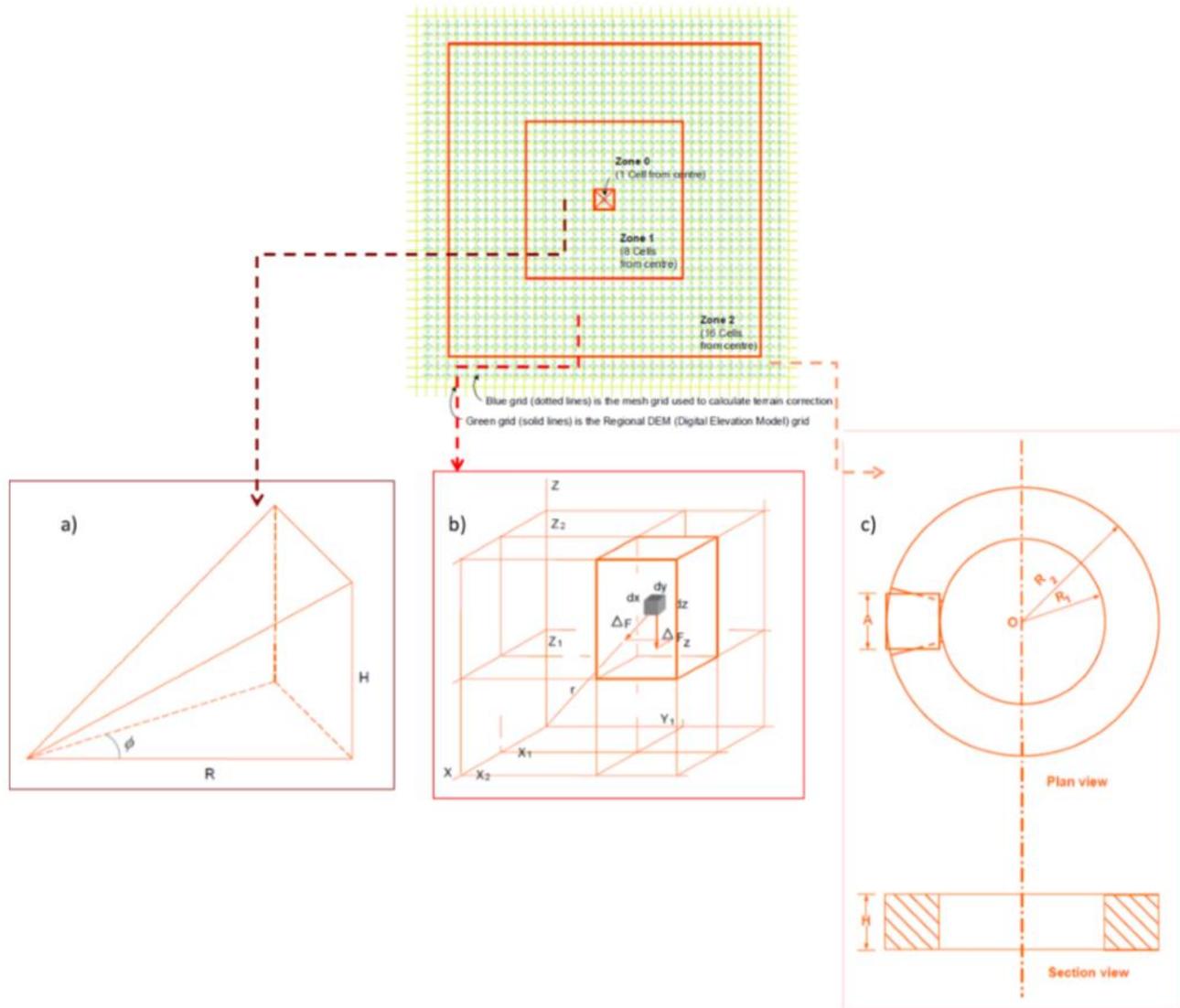


Figura 3.6 División de zonas en a) zona cercana, b) zona intermedia y c) zona lejana (Geosoft, 2006).

Donde:

G: constante de gravitación universal

D: densidad de reducción

A: longitud del lado del prisma

R₁: radio interno de la sección prismática anular

R₂: radio externo de la sección prismática anular

H: altura de la sección prismática anular

3.6 ANOMALÍAS GRAVIMÉTRICAS

3.6.1 Anomalías gravitatorias

Las anomalías gravitatorias son la diferencia entre los valores de gravedad observada (corregidos por deriva y mareas) y los valores de gravedad teórica, es decir:

$$A_G = g_{OBS}|_M^D - g_T$$

Donde:

$g_{OBS}|_M^D$: gravedad observada corregida por deriva instrumental y mareas

g_T : corrección por latitud

3.6.2 Anomalías de aire libre

Las anomalías de aire libre incluyen las anomalías gravitatorias y se le añaden las correcciones de aire libre y atmosférica siguiendo la siguiente ecuación:

$$A_{AL} = g_{OBS}|_M^D - g_T + \delta g_h - \delta g_{atm}; \text{ (Ecuación 3.7)}$$

Donde:

$g_{OBS}|_M^D$: gravedad observada corregida por deriva instrumental y mareas

g_T : corrección por latitud

δg_h : corrección de aire libre

δg_{atm} : corrección atmosférica

3.6.3 Anomalías de Bouguer

Las anomalías de Bouguer incluyen la anomalía de aire libre y se agrega la corrección de Bouguer y la topográfica. Está representada por la ecuación 3.8:

$$A_{BC} = g_{OBS}|_M^D - g_T + \delta g_h - \delta g_{atm} + \Delta g_T - \delta g_B; \text{ (Ecuación 3.8)}$$

Donde:

$g_{OBS}|_M^D$: gravedad observada corregida por deriva instrumental y mareas

g_T : corrección por latitud

δg_h : corrección de aire libre

δg_{atm} : corrección atmosférica

Δg_T : corrección topográfica

δg_B : corrección de Bouguer

3.7 SEPARACIÓN REGIONAL-RESIDUAL

Según Telford et al. (1990), la exploración gravimétrica se enfoca en las anomalías que resultan del cambio en la densidad de los cuerpos del subsuelo a diferentes profundidades. Algunas de estas anomalías provienen de masas cercanas a las zonas de interés, pero otras provienen de profundidades inferiores o superiores. A medida que las fuentes de anomalías se profundizan, la anomalía se amplía y se suaviza. Dependiendo de la profundidad del objetivo se utilizan anomalías de distintos rangos. Por ejemplo, los objetivos para la industria minera son mucho más superficiales que los objetivos petroleros por lo cual se utilizan anomalías residuales (superficiales y longitud de onda corta) en el primer caso y regionales (profundas y longitud de onda larga) en el segundo. A continuación, se explicarán algunos de los métodos utilizados para realizar esta separación de anomalías:

3.7.1 Filtro pasabanda

Es un filtro usado para rechazar o dejar pasar un rango de números de ondas de una serie de datos (Geosoft, 2007). El diseño del filtro es el siguiente y se muestra gráficamente en la Figura 3.6:

$$\begin{cases} L(k) = 0 \text{ para } K < k_0 \\ L(k) = 1 \text{ para } k_0 \leq K \leq k_1 \\ L(k) = 0 \text{ para } K > k_1 \end{cases}$$

Donde:

k_0 : número de onda corta bajo en [ciclos/ unidades terrestres]

k_1 : número de onda corta alto en [ciclos/ unidades terrestres]

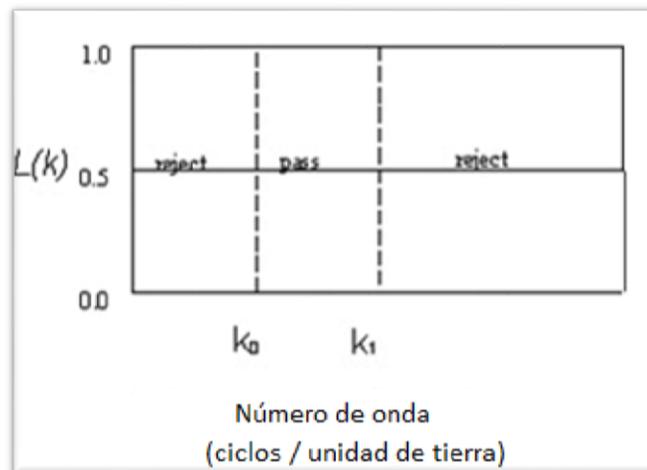


Figura 3.7 Filtro pasabanda (Tomado de Geosoft, 2007).

3.7.2 Filtro Butterworth

Este es un filtro usado como filtro pasa alto o pasa bajo, es decir, permite el paso de frecuencias mayores o menores a cierto valor. Esto se logra controlando el grado del filtro (Figura 3.7) mientras se deja el número de ondas central fijo. El diseño del filtro según Geosoft, (2007) es:

$$L(k) = \frac{1}{1 + \left(\frac{k}{k_0}\right)^n}$$

Donde:

k_o : número de onda central del filtro

n: el grado de la función del filtro

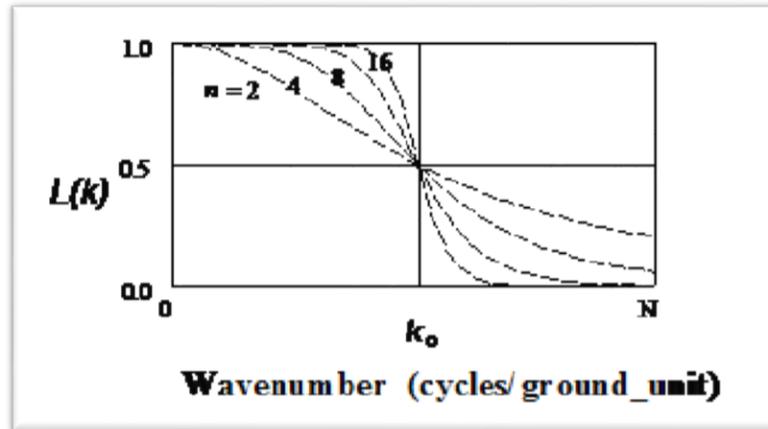


Figura 3.8 Filtro Butterworth (Tomado de Geosoft, 2007).

3.7.3 Continuación hacia arriba

Este análisis es utilizado para mejorar las respuestas de fuentes regionales o remover ruido llevando el plano de mediciones o de referencia a un nivel más elevado. Se considera un filtro que no produce efectos adversos considerables y no requiere de otros filtros o procesos para corregirlo (Geosoft, 2007). A continuación, se muestra el diseño gráficamente (Figura 3.8) y su fórmula es:

$$L(k) = e^{-hr}$$

Donde:

h: la distancia del plano de observación a la que se realizará la continuación

r: número de ondas

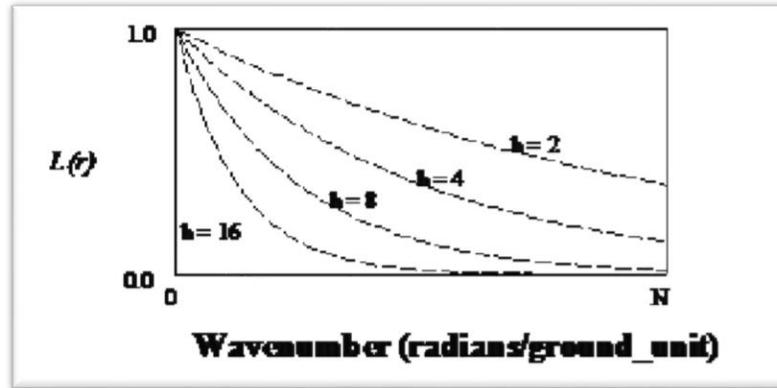


Figura 3.9 Continuación hacia arriba (Tomado de Geosoft, 2007).

3.7.4 Filtro Gaussiano regional/residual

Es un filtro suave que se utiliza frecuentemente como un filtro pasa bajo o pasa alto (Geosoft, 2007). A continuación, podemos observarlo gráficamente (Figura 3.9) y su fórmula es:

$$L(k) = 1 - e^{\frac{-k^2}{2k_0^2}}$$

Donde:

k_0 : desviación estándar de la función Gaussiana

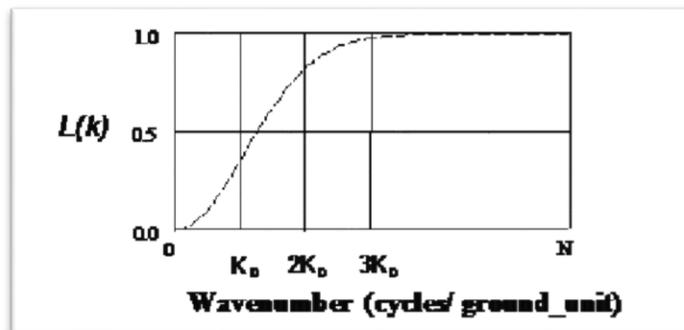


Figura 3.10 Filtro Gaussiano (Tomado de Geosoft, 2007).

3.8 ANÁLISIS ESPECTRAL

El análisis espectral es un método en el cual se transforman los datos del dominio espacial al dominio de frecuencias. Esta transformación se realiza mediante una transformada bidimensional de Fourier de la cual se obtiene posteriormente un espectro radial. Este espectro radial es por utilidad representado gráficamente en logaritmo neperiano y de donde se seleccionan bandas de frecuencias que conserven una relación lineal para todos sus datos. Spector y Grant (1970) indican que las pendientes de estas relaciones lineales son proporcionales a la profundidad del tope de la estructura asociada a este rango de frecuencias. La fórmula para estimar la profundidad es:

$$Z = \frac{m}{4\pi}; \text{ (Ecuación 3.9)}$$

Donde:

Z: profundidad del tope de la fuente

m: pendiente de la relación lineal

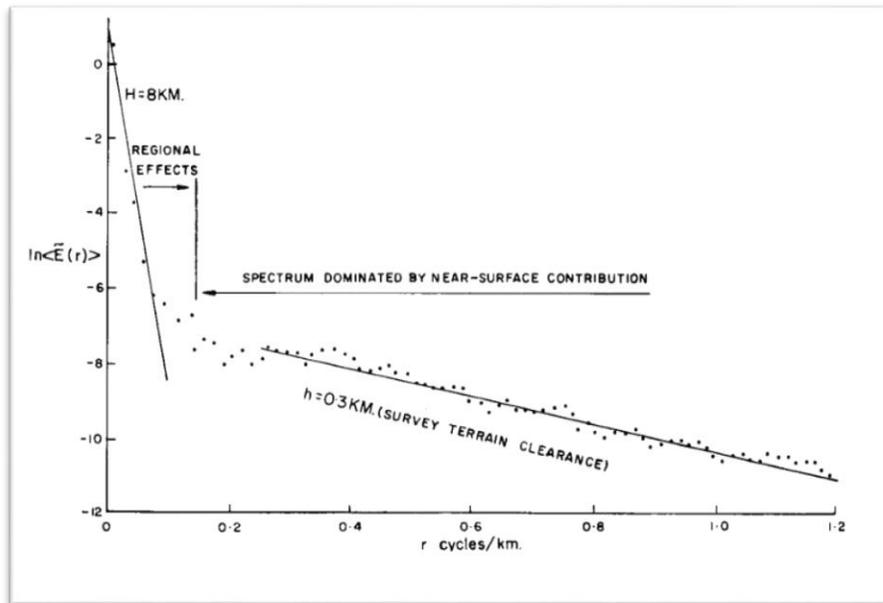


Figura 3.11 Espectro de potencia para datos magnéticos. (Tomado de Spector y Grant, 1970)

3.9 DERIVADA HORIZONTAL TOTAL

Cooper y Cowan (2008) explican que los filtros como la continuación hacia abajo, las derivadas horizontales y verticales y otros filtros pasa-altos ayudan a resaltar detalles sutiles en los datos de los campos potenciales. La derivada horizontal total se utiliza como un filtro para detección de bordes o límites de cuerpos y está definida por la siguiente ecuación:

$$DHT = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2}; \text{ (Ecuación 3.10)}$$

Donde f es el campo gravimétrico.

3.10 DECONVOLUCIÓN DE EULER

Es una herramienta matemática usada para la estimación de profundidades de elementos de interés. Se basa en la ecuación de homogeneidad de Euler (ecuación 3.20) que según Reid et al. (1992) se describe como:

$$(x - x_o) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_o) \frac{\partial f}{\partial y} + (z - z_o) \frac{\partial f}{\partial z} = N(B - F)$$

Donde:

x_o, y_o, z_o : posición de la fuente anómala.

x, y, z : ubicación del campo total f .

B : regional del campo total f .

N : grado de homogeneidad o índice estructural.

Los resultados generados por este método ubican un conjunto de soluciones que dependen de los parámetros utilizados para su ajuste según el objetivo geológico estudiado. Reid et al., explican que las variaciones de este método requieren del trabajo de los datos en pequeños grupos variables llamados ventanas dentro de la cual se resuelven un conjunto de ecuaciones lineales para ubicar tanto en planta como en

profundidad las diversas fuentes. Además, se requiere la implementación de un índice estructural asociado a la fuente geológica de interés. En la Tabla 3.1 se muestran algunos de los índices estructurales utilizados.

Tabla 3.1 Índices estructurales para fuentes gravimétricas acorde a su geometría. (Modificado de Reid et al., 2013).

Fuente	Índice
Esfera	2
Cilindro vertical u horizontal	1
Dique, sill	0

Capítulo IV

4 MARCO METODOLÓGICO

En la Figura 4.1, podemos observar un diagrama donde se representan los pasos seguidos durante el procesamiento de los datos. La información disponible consta de las planillas de campo, datos GPS y los datos descargados del gravímetro por lo que la primera etapa previa al procesamiento, fue la verificación y validación de esta información.

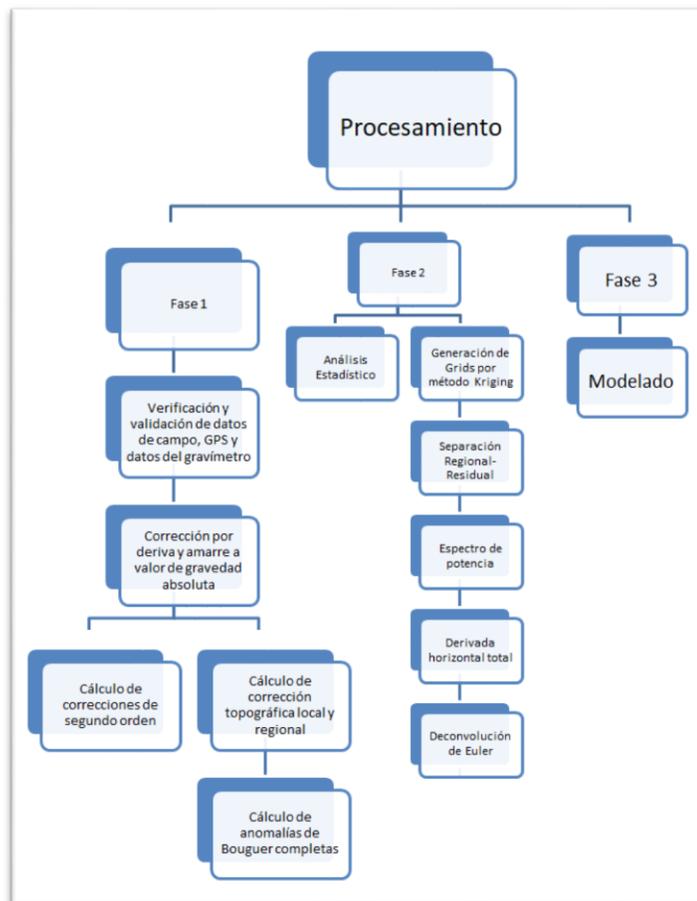


Figura 4.1 Diagrama de las fases del procesamiento utilizado para los datos gravimétricos

4.1 CÁLCULO DE GRAVEDAD OBSERVADA

Los datos verificados fueron importados en el programa Excel en un formato mostrado en la Tabla 4.1. Luego se promediaron las horas de cada estación, así como los valores de gravedad observada y cada circuito fue corregido por deriva instrumental por medio de la ecuación 3.2. Posterior a esto, los circuitos fueron llevados a sus valores de gravedad absoluta amarrando el valor de gravedad relativa corregida por deriva al valor de gravedad absoluta de la base (Tabla 4.2) el cual fue obtenido por amarre a la estación absoluta de Puerto Ayacucho (Tabla 4.2).

Tabla 4.1 Encabezado para datos gravimétricos

Estación	Hora de medición	Valor de medición
----------	------------------	-------------------

Tabla 4.2 Valores de gravedad absoluta

Estación	Gravedad absoluta (mGal)
Puerto Ayacucho	978043,821
Base Pargüaza	978067,269

4.2 CORRECCIONES DE SEGUNDO ORDEN

Posterior a tener los valores de gravedad observada se procedió a realizar las reducciones de segundo orden por medio de las ecuaciones 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6. El nivel de referencia utilizado para estas correcciones fue la menor cota general de la adquisición la cual fue 41,522 m. La densidad usada para las reducciones fue de 2.65 g/cm³ reportada por Yegorova et al. (2004) como la densidad para los granitos tipo Rapakivi.

4.3 CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA

La corrección topográfica se realiza en dos etapas, una local por medio del método de Hammer y otra regional empleando el programa *Oasis Montaj*. Ambas se suman posteriormente para dar la corrección topográfica total.

4.3.1 Corrección topográfica local

Por medio del programa *Excel* se realizó la corrección debido a la influencia de la topografía hasta 50 m alrededor de la estación. En esta corrección se asignan los valores promedio de cotas para cada anillo circundante a la estación y se calcula su aporte el cual es sumado con el resto de los anillos resultando en la corrección local.

4.3.2 Corrección topográfica regional

Para la corrección regional se utilizó el programa *Oasis montaj*. Este programa requiere un modelo de elevaciones digital para realizar la corrección para lo cual se hizo uso de los datos del *STRMI*, con una resolución de 1 arcosegundo, descargados desde la página oficial de la *NASA*. Cabe destacar que la resolución se disminuyó para hacer el volumen de datos más manejables para el programa, promediando los valores en una ventana de cuatro datos en horizontal y cuatro en vertical para ser asignados al punto medio de cada ventana (Figura 4.2)

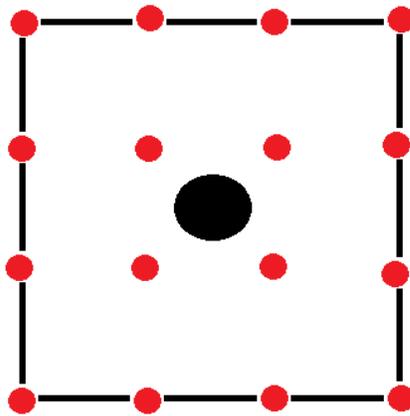


Figura 4.2 Los puntos rojos representan los valores del modelo de elevaciones digitales para los cuales se promedió su valor de cota y el resultado se aplicó al punto negro para disminuir el volumen de datos.

4.4 ANOMALÍAS DE BOUGUER

4.4.1 Cálculo de anomalías de Bouguer

Luego de tener todas las reducciones de segundo orden se procedió a calcular las anomalías de Bouguer completas por medio de la ecuación 3.7 en el programa Excel. Luego se generó una base de datos en formato .txt para cada adquisición con la información de las coordenadas de las estaciones y el valor de anomalías de Bouguer.

4.4.2 Generación de mapas de anomalías de Bouguer

Se cargaron las bases de datos y se generaron coordenadas UTM a partir de las geográficas proporcionadas. La interpolación utilizada para la generación de los mapas fue *kriging*, para lo cual se necesitó ingresar un variograma que se ajustara a cada grupo de datos.

4.4.2.1 Generación de variogramas

Se generaron dos variogramas en el programa *Surfer 13*, uno para cada adquisición. Los parámetros utilizados para cada uno los podemos observar en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros de variogramas

Adquisición	Modelo	Efecto Nugget	Escala	Longitud	Pendiente
A	Lineal	0,015	-	-	0,00046
B	Esférico	0,0530	0,144	260	-

4.4.2.2 Generación de *grids* por el método de *kriging*

Luego para la generación de los *grids* se cargaron los variogramas y se modificó la distancia de extrapolación a 60 m para evitar información fuera de los puntos adquiridos. El formato de los *grids* fue *GRD Geosoft Binary Grid* en extensión .grd para cargarlos posteriormente en el programa *Oasis montaj*.

4.4.3 Estadísticas

Luego de la generación de los mapas, se realizó una revisión de algunas estaciones que presentaban rasgos característicos de estaciones con errores en los valores de gravedad, cotas o coordenadas. Luego se eliminaron las estaciones con mayores problemas como cierres en los contornos causados por una sola estación sin sustento de estaciones aledañas (3 estaciones de la adquisición A y ninguna para la Adquisición B) y con los datos de las estaciones finales se realizó un estudio estadístico. Este estudio se realizó con el programa *Statistical Package for Science (SPSS)* versión 25. Se generó un histograma de frecuencias, un diagrama de caja y bigotes además de los parámetros estadísticos calculados (Tablas 5.1 y 5.2 y Figuras 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4).

4.5 SEPARACIÓN REGIONAL-RESIDUAL

En el proceso de separación regional-residual se utilizó el módulo *MAGMAP* del programa *Oasis montaj* en la opción *Interactive filtering*. El primer paso fue *Prepare Grid* donde se colocó la información mostrada en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4 Parámetros usados en el *Interactive filtering*

<i>Name of input (Original) Grid File</i>	Se coloca el <i>Grid</i> a filtrar
<i>Name of output (Pre-processed) Grid File</i>	Se coloca el nombre del archivo de salida
<i>Type of trend Surface to remove</i>	<i>First order</i>
<i>Trend based on</i>	<i>All points</i>
<i>% expansion</i>	<i>10</i>
<i>Square or rectangular expansion</i>	<i>Square</i>
<i>Grid fill method</i>	<i>Maximum entropy</i>

El segundo paso fue *Forward FFT (Transformada rápida de Fourier)* donde se colocó como archivo de entrada el generado en el paso anterior. El tercer paso fue *Radial Average Spectrum* el cual solicitó de entrada el archivo generado en el segundo paso y el nombre del archivo de salida (espectro de potencia). El cuarto paso

fue *Interactive Spectrum Filters* donde se utilizó un filtro *Gaussiano* para cada adquisición y sus parámetros los podemos observar en la Tabla 4.5. El quinto paso fue aplicar el filtro establecido en el paso anterior, con este paso se obtuvo el mapa de la componente regional de la anomalía de Bouguer. Para obtener el residual se utilizó el menú *Grid – Expressions - Subtract Grids* y se colocó en la primera opción el *grid* de anomalías de Bouguer completa, en la segunda opción se colocó el *grid* regional obtenido anteriormente y se le dio un nombre al residual resultante en la tercera opción.

Tabla 4.5 Parámetros de filtros para separación regional-residual

Adquisición	Filtro	Desviación estándar
A	Gaussiano	0,2063
B	Gaussiano	1,063

4.6 DERIVADA HORIZONTAL TOTAL

Para realizar la derivada horizontal total se suavizó el *grid* de anomalías de Bouguer para cada adquisición utilizando una Continuación Analítica Hacia Arriba (CAHA) con valores mostrados en la Tabla 4.6. Se empleó el módulo *MAGMAP* en la opción *Step-By-Step Filtering* y se realizaron los primeros dos pasos del mismo modo que para la separación regional-residual. En el tercer paso se cargó como primer filtro la CAHA con los valores de la Tabla 4.6 y como segundo filtro la derivada en X. El cuarto paso fue aplicar el filtro establecido anteriormente. El mismo proceso se realizó para la deriva en Y.

Tabla 4.6 Parámetros de CAHA para suavizado de anomalías de Bouguer

Adquisición	Continuación Analítica Hacia Arriba (m)
A	75
B	25

Posteriormente se muestró cada *grid* obtenido para las derivadas X e Y utilizando el menú *Grid – Utilities – Sample a Grid* donde se seleccionó los canales de

coordenadas X e Y, así como el nombre del canal con los resultados del muestreo y el *Grid* muestreado. Estos resultados se extrajeron en formato .xyz y se cargaron en el programa *MATLAB* donde se realizaron los cálculos por medio de la ecuación 3.10 para obtener la derivada horizontal total. Estos datos resultantes fueron importados nuevamente en el programa *Oasis montaj* para la generación de los mapas correspondientes.

4.7 ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDAD CON EL ESPECTRO DE POTENCIA

El espectro de potencia obtenido en la separación regional-residual se importó en el programa *Excel* para la estimación de las profundidades de las fuentes gravimétricas. Se graficó y se separó manualmente en sus tendencias cada grupo de datos obteniendo dos pendientes para cada adquisición. Estas pendientes se muestran en las Figuras 4.3 y 4.4 y fueron utilizadas en la ecuación 3.9.

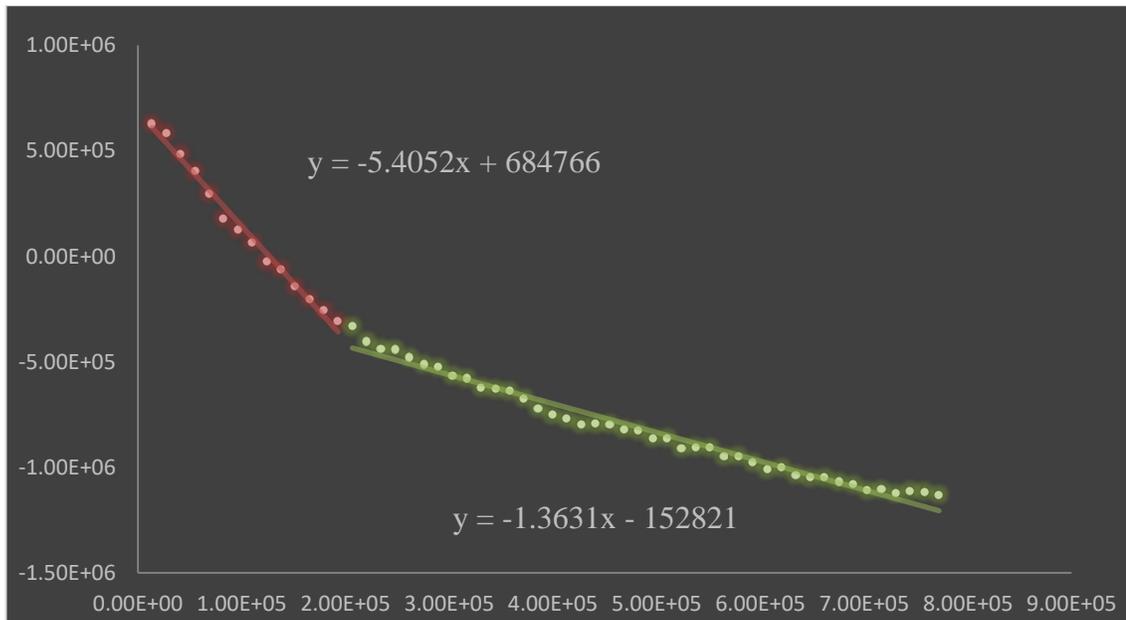


Figura 4.3 Espectro de potencia correspondiente a la adquisición A.

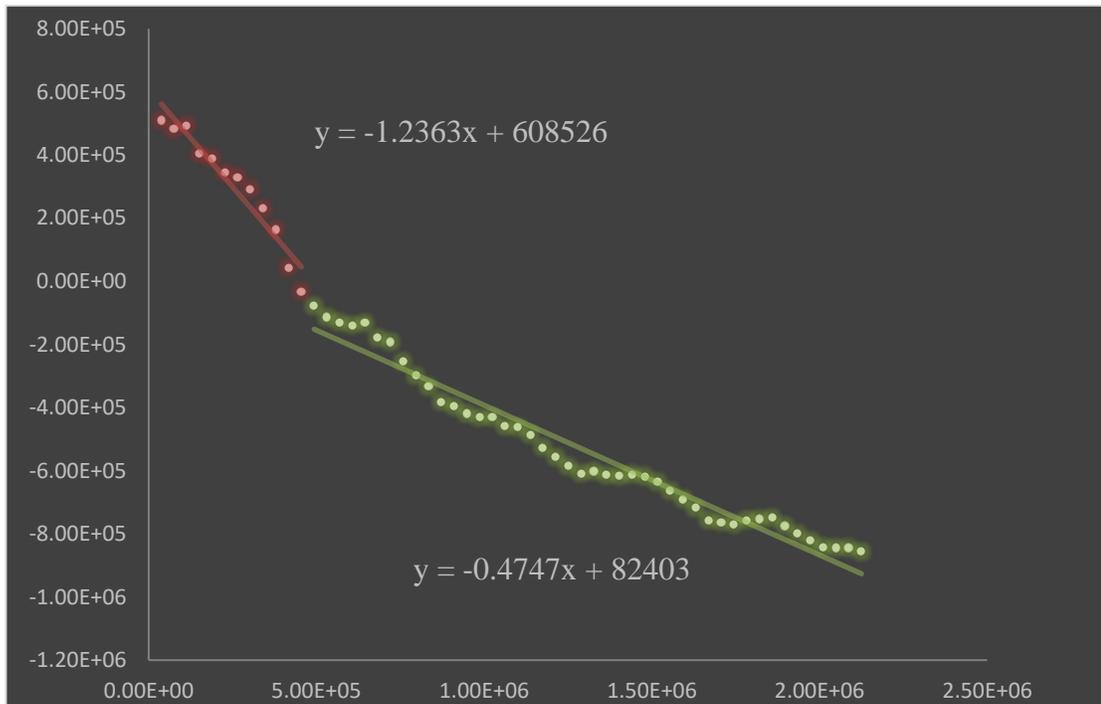


Figura 4.4 Espectro de potencia correspondiente a la adquisición B.

4.8 DECONVOLUCIÓN DE EULER

La deconvolución de Euler se realizó con el módulo *Euler3D* de *Oasis montaj* en la opción *Standard Euler Deconvolution*. En este se cargó el *grid* de anomalías de Bouguer completas, así como los *grids* de las derivadas X, Y y Z, esta última se generó de la misma forma que las X e Y explicado en el procesamiento de la derivada horizontal total. El resultado de este proceso fue una base de datos con las soluciones de Euler para cada adquisición y los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 4.7. Estos parámetros fueron seleccionados siguiendo el criterio explicado en el tutorial del programa *regder2_0v5.m* para evitar: una distribución aleatoria de las soluciones o “*defocused*” causado por la selección de una ventana muy pequeña; “*swirls*” y “*tails*” causados por la selección de una ventana muy grande.

Tabla 4.7 Parámetros de deconvolución de Euler

Adquisición	Índice estructural	Tolerancia	Tamaño de ventana
A	1	15 %	3
B	1	5 %	3

4.9 MODELADO

Para el modelado se utilizó el módulo *GM-SYS* del programa *Oasis montaj*. Se trazó un perfil lo más perpendicular posible a las estructuras regionales de la adquisición A mostrado en la Figura 5.11. La motivación de la ubicación y orientación de este perfil fue cubrir la mayor cantidad de superficie del mapa y atravesar anomalías de interés de valores tanto mínimos como máximos, así como información sustentada por datos medidos y no solo generados por interpolación. El modelado se realizó sobre el mapa residual para poder ajustar las anomalías de mayor frecuencia asociadas a fuentes cercanas a la superficie. Para tener información que sirviera de control al momento del modelado se cargaron las soluciones de Euler por medio del módulo *Pdepth* de *Oasis montaj*.

Capítulo V

5 RESULTADOS, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

A continuación, se presenta la interpretación gravimétrica por medio de análisis de estadísticas, mapas, cálculos, perfiles, estimación de profundidades y modelado de las fuentes de anomalías. Los puntos amarillos en los mapas representan las estaciones levantadas.

5.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

5.1.1 Adquisición A

En la Tabla 5.1 podemos encontrar los parámetros estadísticos calculados para un total de 120 datos correspondientes a las anomalías de Bouguer de la adquisición A las cuales van desde -29,181 mGal a -23,403 mGal. La media de este grupo de datos es de -25,917 mGal con asimetría a la izquierda de valor -0,351 presentando una curtosis de -0,624 y una forma mesocúrtica con tendencia unimodal (Figura 5.1). El diagrama de cajas y bigotes de la Figura 5.2 no muestra valores anómalos y describe la asimetría negativa de los datos con un valor de media menor a la mediana.

Tabla 5.1 Resumen estadístico, Adquisición A.

N	Válido	120
	Perdidos	0
Media		-25,917
Mediana		-25,746
Desv. Desviación		1,321
Varianza		1,744
Asimetría		-0,351
Error estándar de		0,221
Curtosis		-0,624
Error estándar de		0,438
Rango		5,777
Mínimo		-29,181
Máximo		-23,403
Percentiles	25	-26,867
	50	-25,746
	75	-24,879

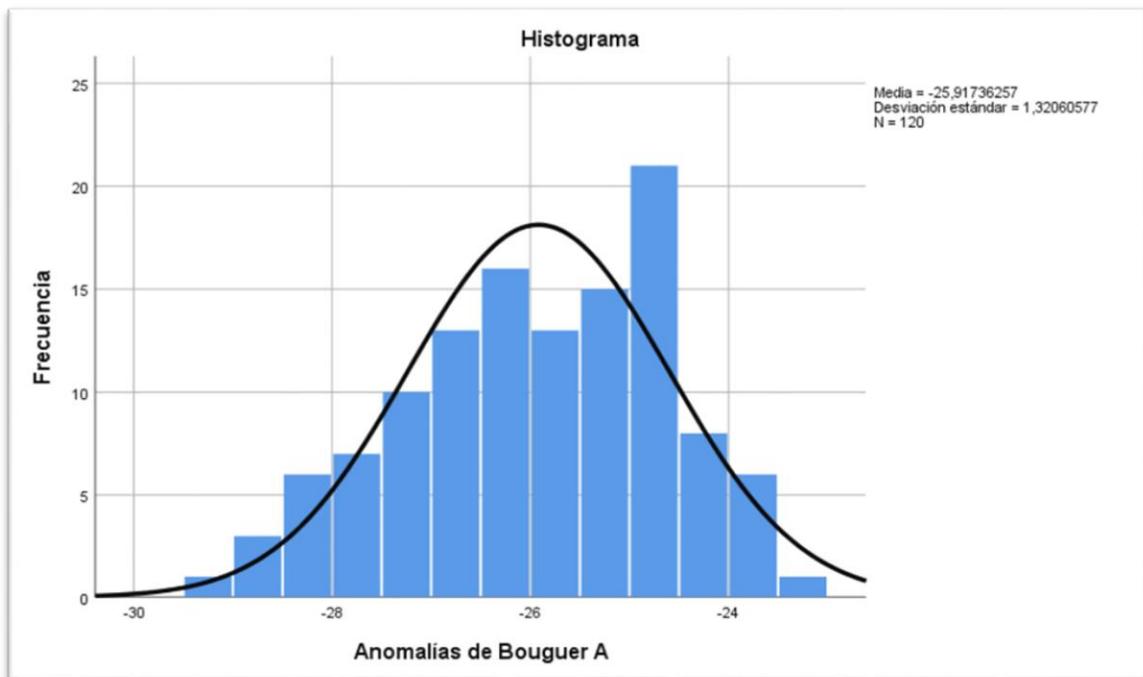


Figura 5.1 Histograma de frecuencias para la adquisición A.

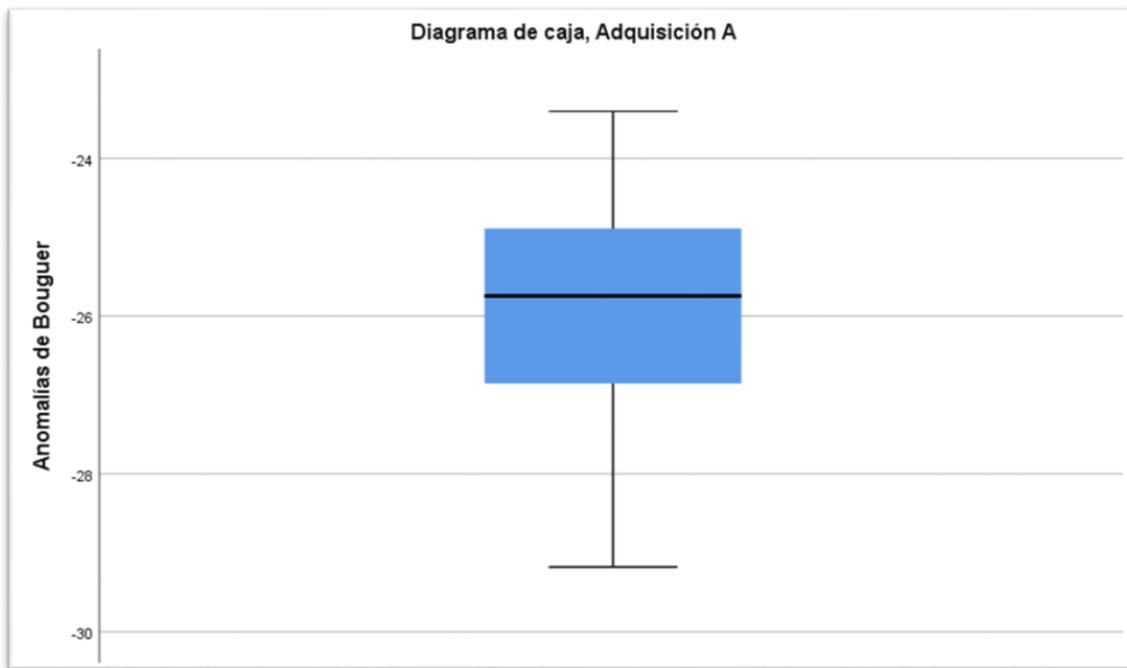


Figura 5.2 Diagrama de caja y bigotes para la adquisición A.

5.1.2 Adquisición B

En la Tabla 5.2 podemos observar el resumen estadístico para las anomalías de Bouguer de la adquisición B. Estas anomalías van desde -30,222 mGal a -27,483 mGal con una media de -28,603 mGal. El valor de la mediana es de -28,617 mGal siendo menor que la media. El histograma se presenta en la Figura 5.3 con una tendencia unimodal y asimetría a la izquierda de -0,091. La forma de la curva normal es mesocúrtica con valor de curtosis de -0,201. El diagrama de caja de la Figura 5.4 no muestra valores anómalos y describe la asimetría mostrando mayor cantidad de datos por debajo de la mediana.

Tabla 5.2 Resumen estadístico, Adquisición B.

N	Válido	254
	Perdidos	0
Media		-28,603
Mediana		-28,617
Desv. Desviación		0,529
Varianza		0,280
Asimetría		-0,091
Error estándar de		0,153
Curtosis		-0,201
Error estándar de		0,304
Rango		2,739
Mínimo		-30,222
Máximo		-27,483
Percentiles	25	-28,987
	50	-28,617
	75	-28,210

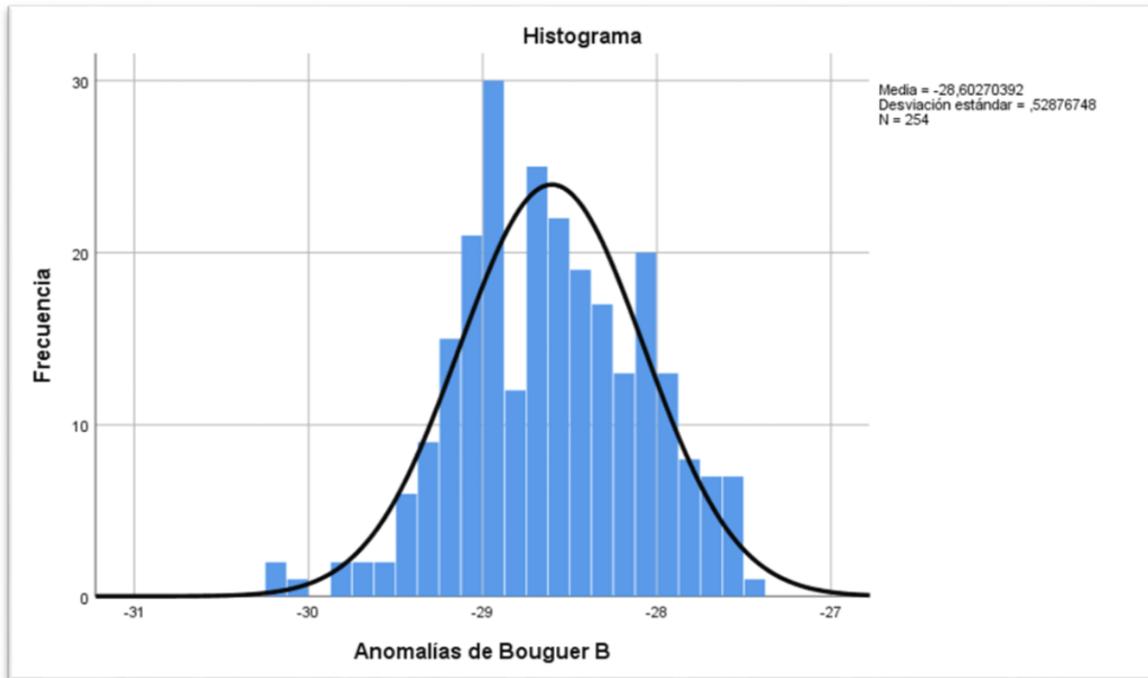


Figura 5.3 Histograma de frecuencias para la adquisición B.

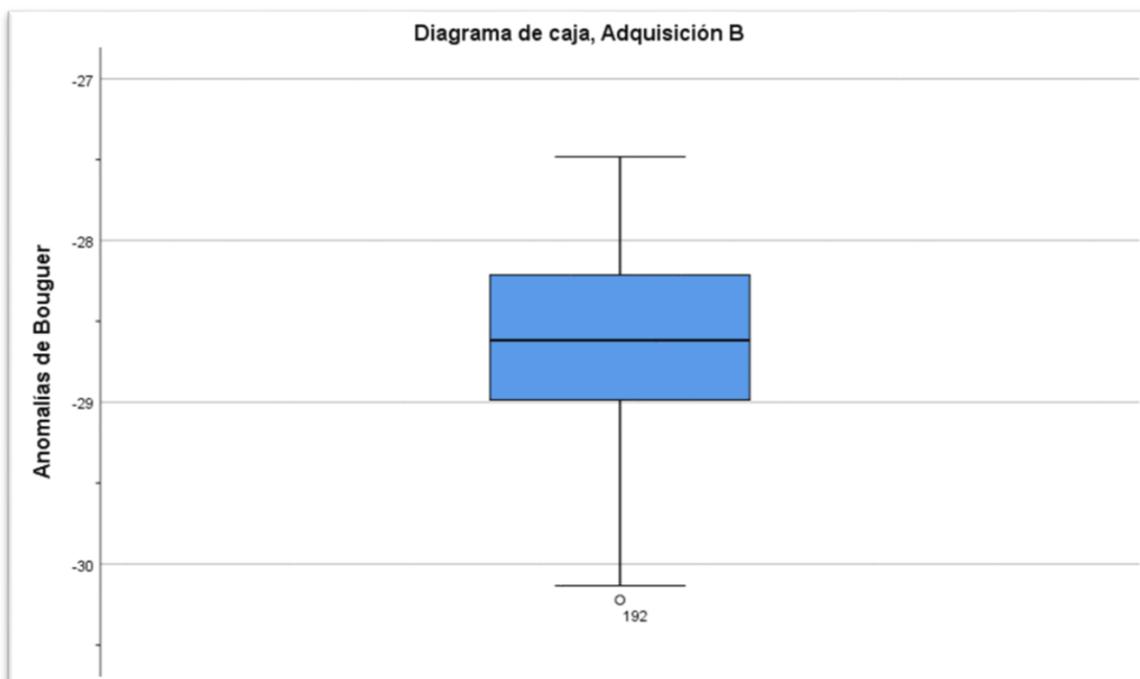


Figura 5.4 Diagrama de caja y bigotes para la adquisición B.

5.2 MAPAS DE ANOMALÍAS DE BOUGUER TOTAL, REGIONAL Y RESIDUAL.

5.2.1 Adquisición A

Las anomalías de Bouguer completas provenientes de la adquisición de mayor extensión (Figura 5.5) presentan un rango cercano a los 5,7 mGal con su mínimo absoluto en el Sur hacia la zona central del mapa con un valor de -29,181 mGal. El máximo se registró al Noroeste alcanzando un valor de -23,403 mGal. Los contornos presentan múltiples direcciones como respuesta a diferentes fuentes. Las anomalías de valores intermedios presentan una dirección N45E que pasa a ser EW en la región noreste. Al este, en la zona central, podemos apreciar anomalías que describen una dirección cercana a la línea NS de mismo modo que la zona de valores mínimos al Sureste. Al Noroeste se presenta una zona de valores máximos con orientación EW. Los mayores gradientes los podemos observar al este cerca de la latitud 686000 con

un valor cercano a los 0,6 mGal cada 100 m. Estos se hacen más suaves al Oeste cerca de la latitud 683000 con un valor de 0,04 mGal cada 100 m.

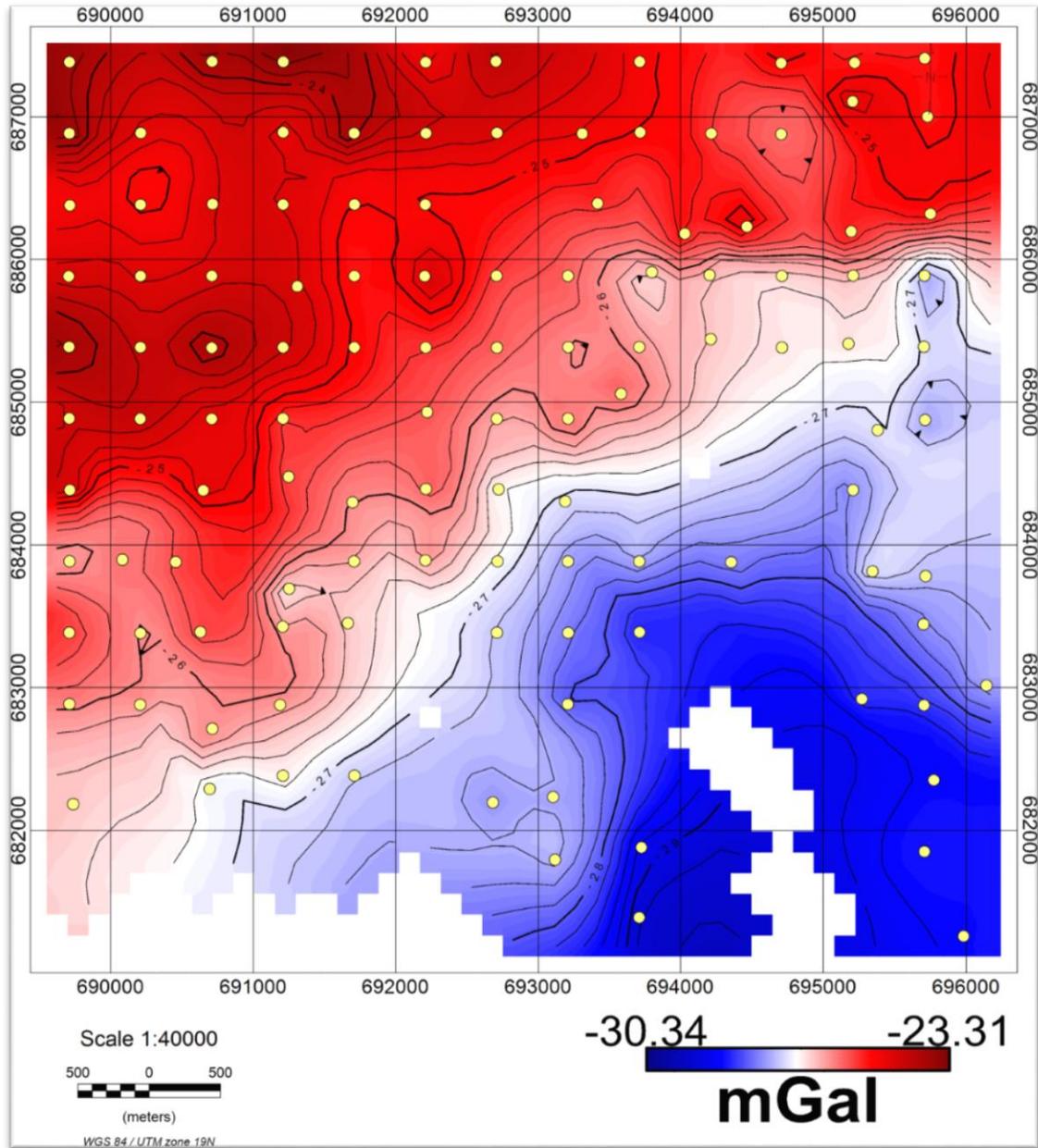


Figura 5.5 Mapa de anomalía de Bouguer completa para la adquisición A.

La tendencia de la componente regional la podemos observar en la Figura 5.6 con una orientación N45E en la gran mayoría del mapa. Esta varía hasta cerca de N30E en la

región noroeste y se hace EW al Sureste. Esto muestra una profundización de la fuente de mayor carácter regional hacia el Sureste.

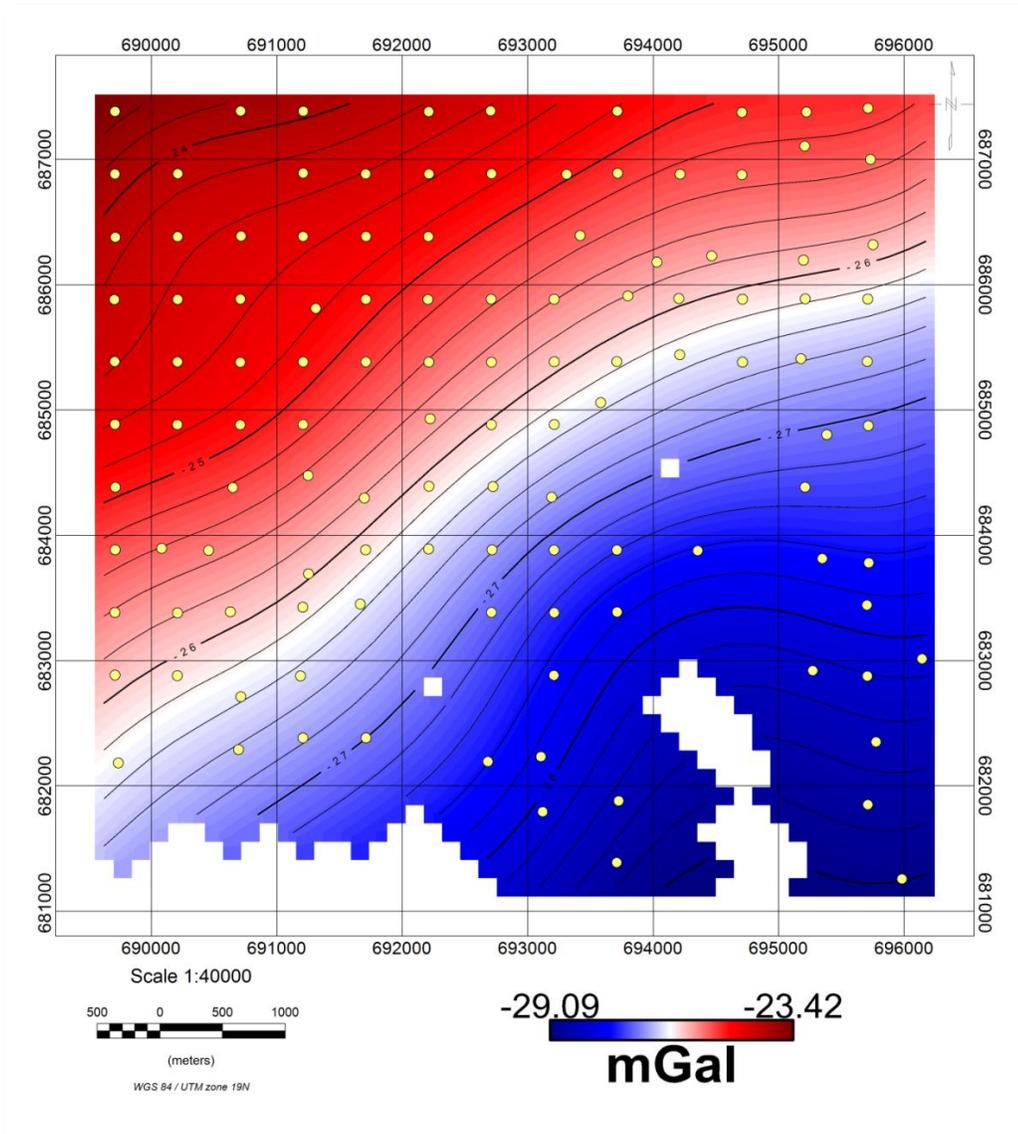


Figura 5.6 Componente regional de anomalía de Bouguer, Adquisición A.

En la Figura 5.7 podemos apreciar las fuentes residuales de la adquisición A con un rango de anomalías de 2,07 mGal. En el sector norte las anomalías se alinean dirección prácticamente EW con los mayores gradientes cercanos a la latitud 686000 al este y al Oeste con un valor que ronda los 0,23 mGal cada 100 m. Las anomalías de valores máximos al Oeste alrededor de la latitud 684000 presentan orientación NS al

igual que la anomalía de mismo carácter al Sur en la región central. Los cuerpos de valores mínimos tanto al Noroeste como al Sureste y al Noreste se muestran como anomalías de interés por sus contactos de altos gradientes con respecto a las anomalías de valores máximos.

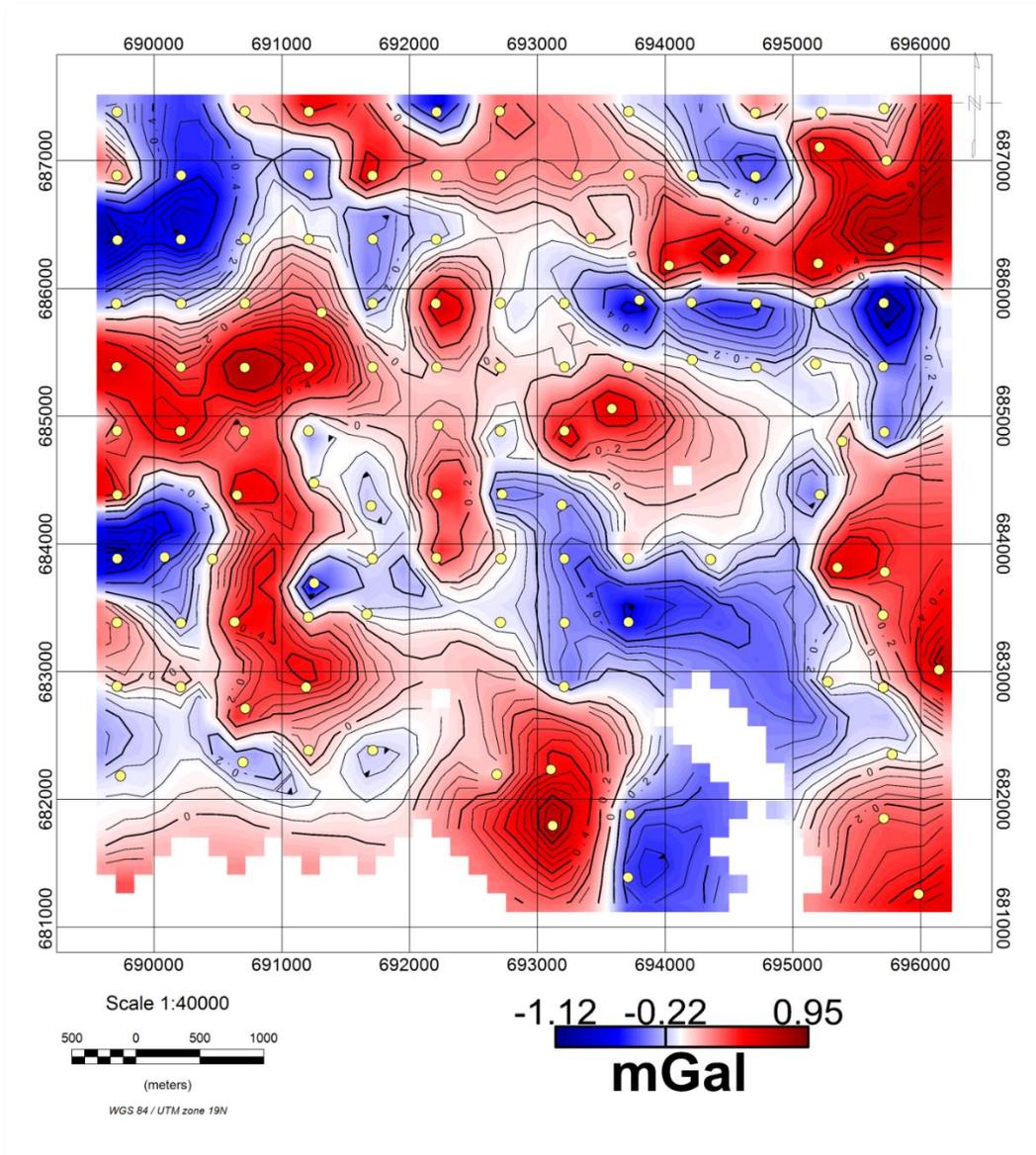


Figura 5.7 Componente residual de anomalía de Bouguer, Adquisición A.

5.2.2 Adquisición B

El rango de anomalías de Bouguer completas para la adquisición B (Figura 5.8) es menor que para la adquisición A debido a su menor longitud teniendo un valor de 2,7 mGal. El valor máximo se localiza cerca de la latitud 682000 y la longitud 694500 con un valor de -27,483 mGal. El mínimo se localiza entre las longitudes 694500 y 695000 y al sur de la latitud 681500 con un valor de -30,222 mGal. En la región central del mapa los contornos tienen una dirección preferencial cercana a la línea EW de mismo modo que en la esquina este mientras que la esquina oeste presenta una orientación cercana a N45E. Al Norte las anomalías presentan una orientación N60W. En la esquina este el gradiente alcanza los 0,9 mGal cada 100 metros siendo uno de los más altos para esta adquisición.

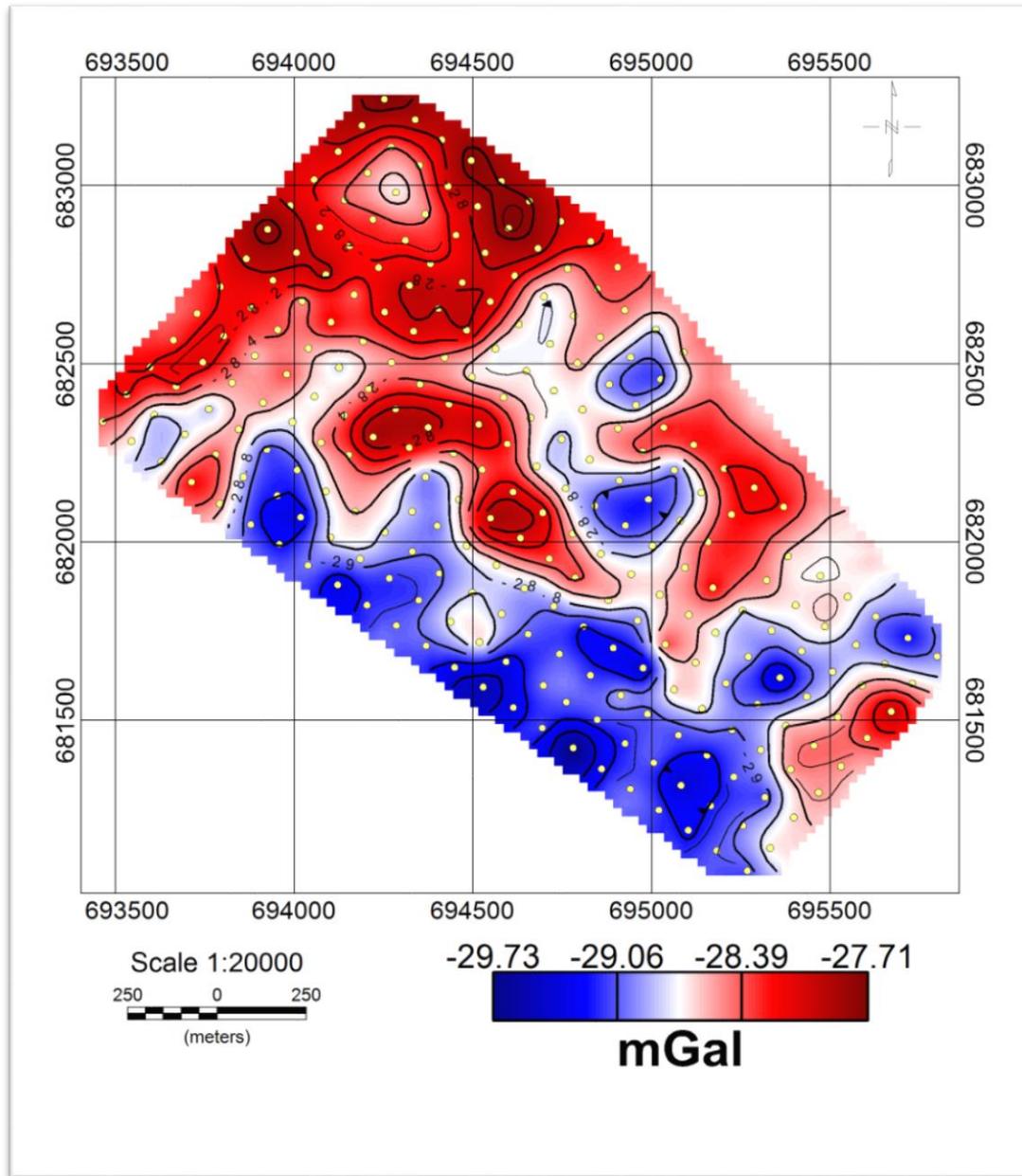


Figura 5.8 Mapa de anomalía de Bouguer completa para la adquisición B.

La Figura 5.9 muestra la componente regional de la anomalía de Bouguer para la adquisición B. Sus contornos en la región sur, asociados a valores mínimos cercanos a -29.2 mGal, tienen una orientación N60W haciéndose EW en la esquina oeste del mapa. En la región norte y central podemos encontrar anomalías orientadas en

dirección NS con los valores máximos ubicados en el extremo norte de la adquisición con valores de $-27,9$ mGal. Los gradientes en la región al Sur cercana a los mínimos tienen un valor de $0,08$ mGal cada 100 metros mientras que en la anomalía central con dirección NS se hacen más suaves con un valor de $0,01$ mGal cada 100 metros.

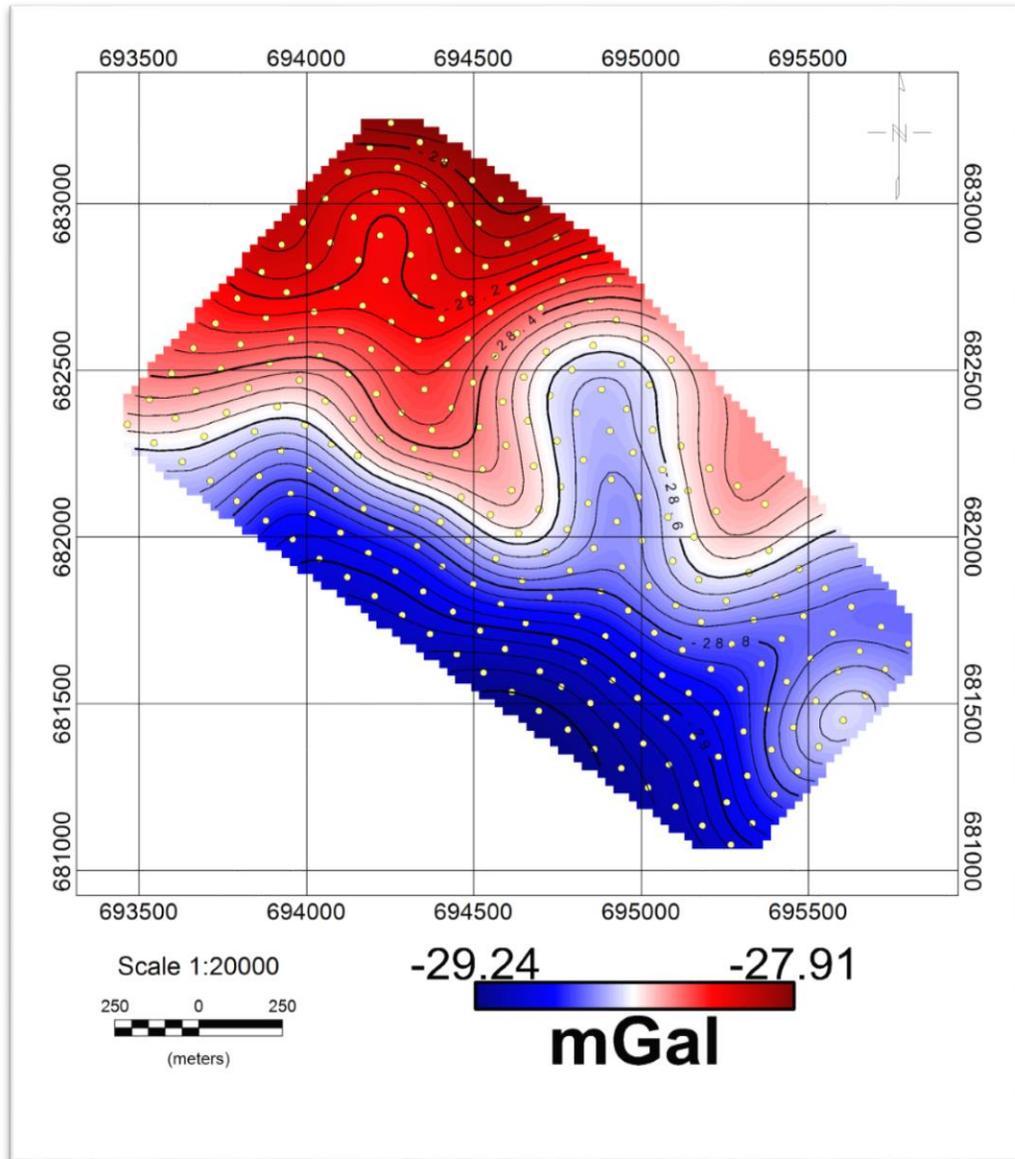


Figura 5.9 Componente regional de anomalía de Bouguer, Adquisición B.

El rango de anomalías residuales (Figura 5.10) es de alrededor de 1,32 mGal siendo una de las anomalías principales las de carácter máximo en la zona central cuya orientación es EW pasando a ser N45W en la parte sur de la misma. Las anomalías de la esquina oeste se alinean N45E. El mínimo absoluto cercano a -0,6 mGal se ubica al Sur entre las latitudes 681500 y 682000 y cercana a la longitud 695000. El máximo tiene un valor de alrededor de 0,7 mGal y se localiza en la latitud 682000 y la longitud 694500.

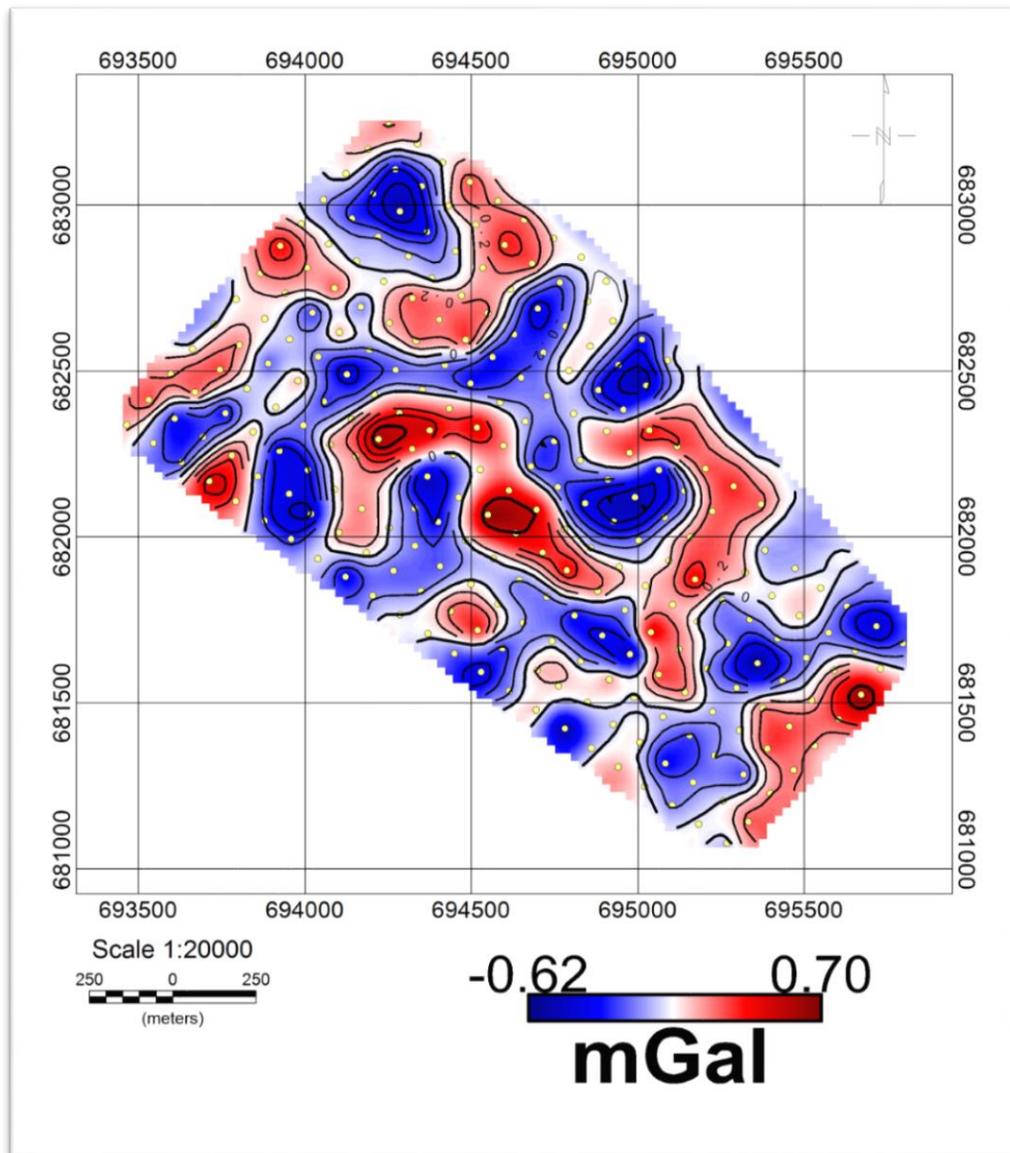


Figura 5.10 Componente residual de anomalía de Bouguer, Adquisición B.

5.3 DERIVADA HORIZONTAL TOTAL

5.3.1 DHT Adquisición A

La Figura 5.11 muestra el mapa de derivada horizontal total para la adquisición A donde se pueden resaltar 3 zonas de importancia mostrada como valores máximos. Estos máximos ubicados al Noreste, Noroeste y Sureste describen zonas de altas variaciones laterales del campo gravimétrico que podrían corresponder a zonas de contactos entre estructuras locales.

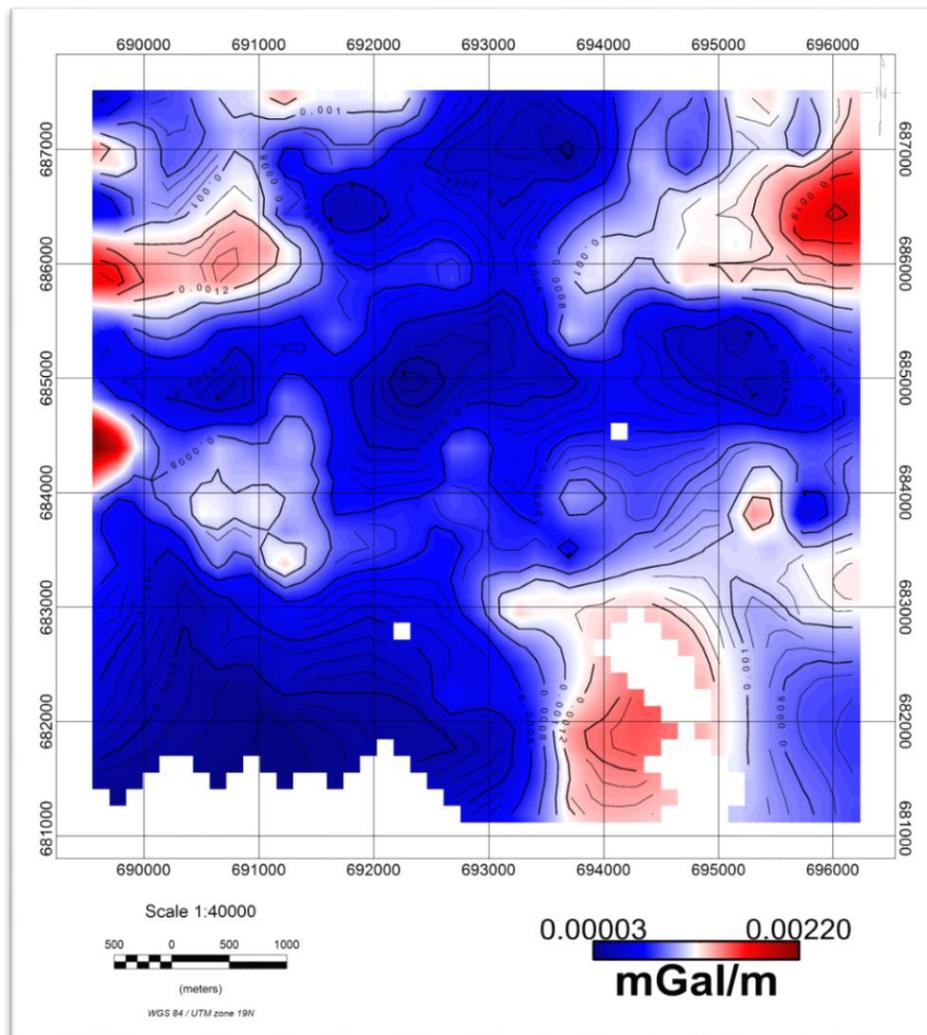


Figura 5.11 Derivada horizontal total, adquisición A.

5.3.2 DHT Adquisición B

Para la adquisición B, se puede destacar en la Figura 5.12 una zona de altos gradientes entre las longitudes 694000 y 695000 y las latitudes 682000 y 682500 cónsona con lo observado en la componente regional como una zona donde se ubica un mínimo que rompe la tendencia del resto de los contornos. Esta zona de altos gradientes en el campo gravimétrico puede interpretarse como el contacto entre la roca caja (GRP) y un cuerpo intrusivo a esta.

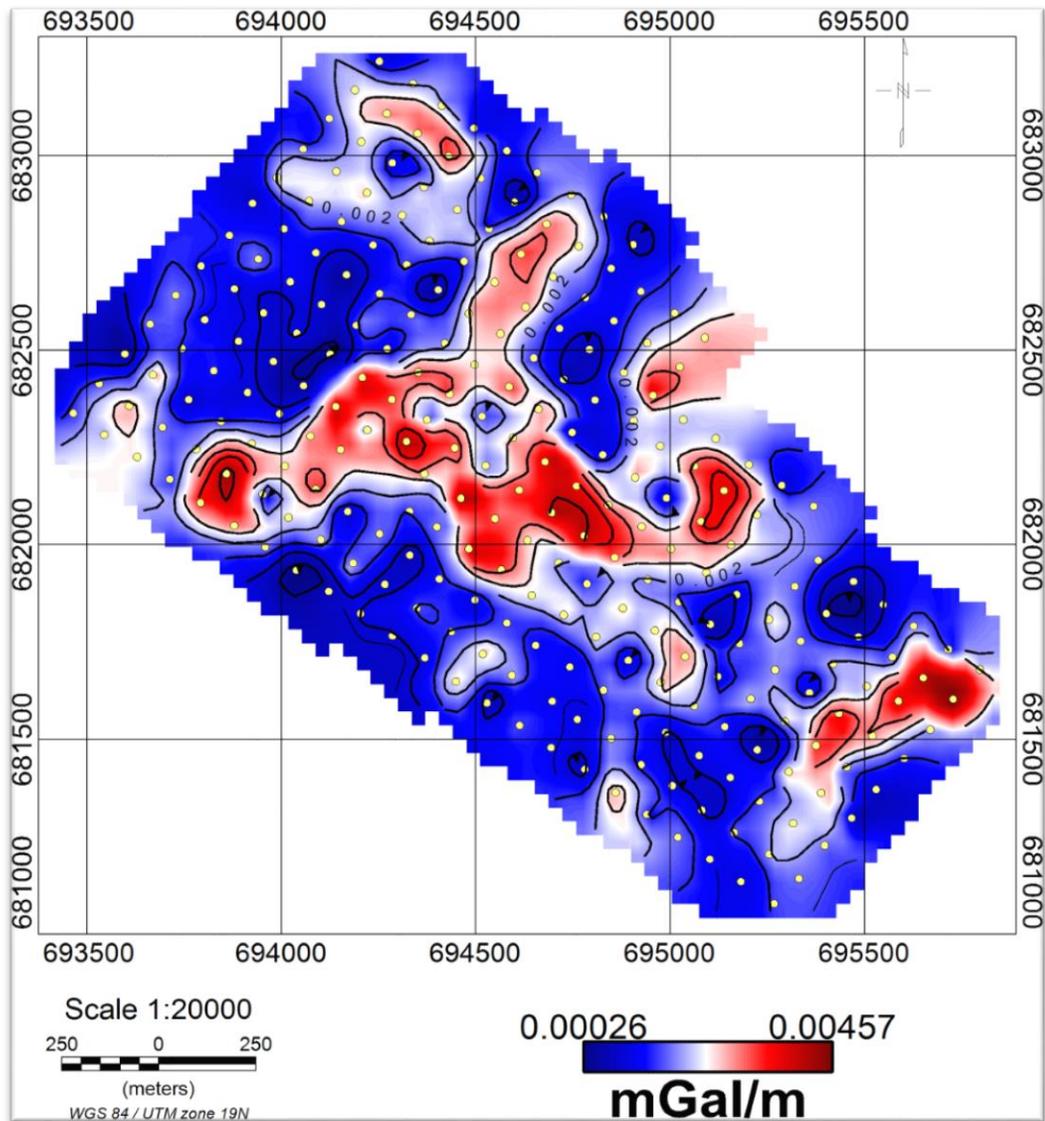


Figura 5.12 Derivada horizontal total, adquisición B.

5.4 ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDADES POR MEDIO DE ESPECTROS DE POTENCIAS

A continuación, se muestra la Tabla 5.3 con los valores correspondientes a las profundidades estimadas para las fuentes gravimétricas tanto en la adquisición A como en la B. Las profundidades van de 430 m para el tope de la fuente más profunda en la adquisición A a 38 m para el tope de la fuente más somera en la adquisición B.

Tabla 5.3 Profundidades estimadas de las fuentes gravimétricas

	Adquisición	
	A	B
Fuente 1	430	98
Fuente 2	108	38

5.5 DECONVOLUCIÓN DE EULER

5.5.1 Deconvolución de Euler Adquisición A

Las soluciones de Euler para la adquisición A (Figura 5.13) presentaron un rango entre 138 m y 2259 m de profundidad siendo la media de las soluciones 514 m. Las soluciones de mayor profundidad se presentaron hacia el Sureste correspondiendo esto a la zona de mínimos en la anomalía de Bouguer. En el noreste en la latitud 686000 las soluciones se alinean con la región de altos gradientes en dirección EW remarcando la posibilidad de un contacto o cuerpo en la zona que represente una superficie de altos gradientes.

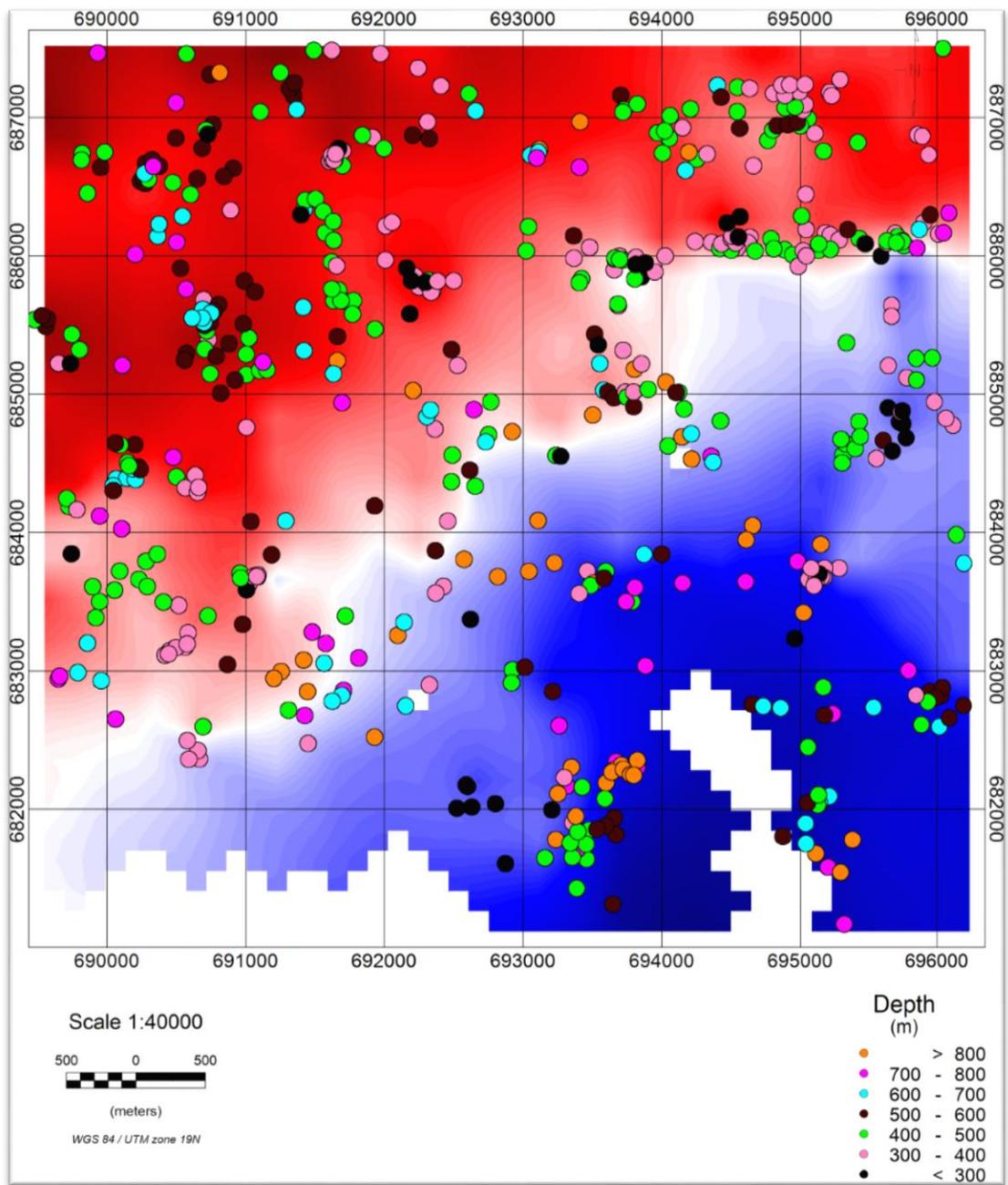


Figura 5.13 Deconvoluciones de Euler, adquisición A.

5.5.2 Deconvolución de Euler Adquisición B

Las soluciones para la adquisición B (Figura 5.14) por su parte tuvieron una media de 148 m de profundidad siendo 253 m el valor máximo ubicado en la longitud 694443 y la latitud 681966. El valor mínimo fue de 62 m y se ubicó en la longitud 695579 y la latitud 681909. Las soluciones se alinean entorno a ciertos contactos entre valores mínimos y valores máximos locales. Esto se puede ver tanto en la zona sureste del mapa como en la región central del mismo.

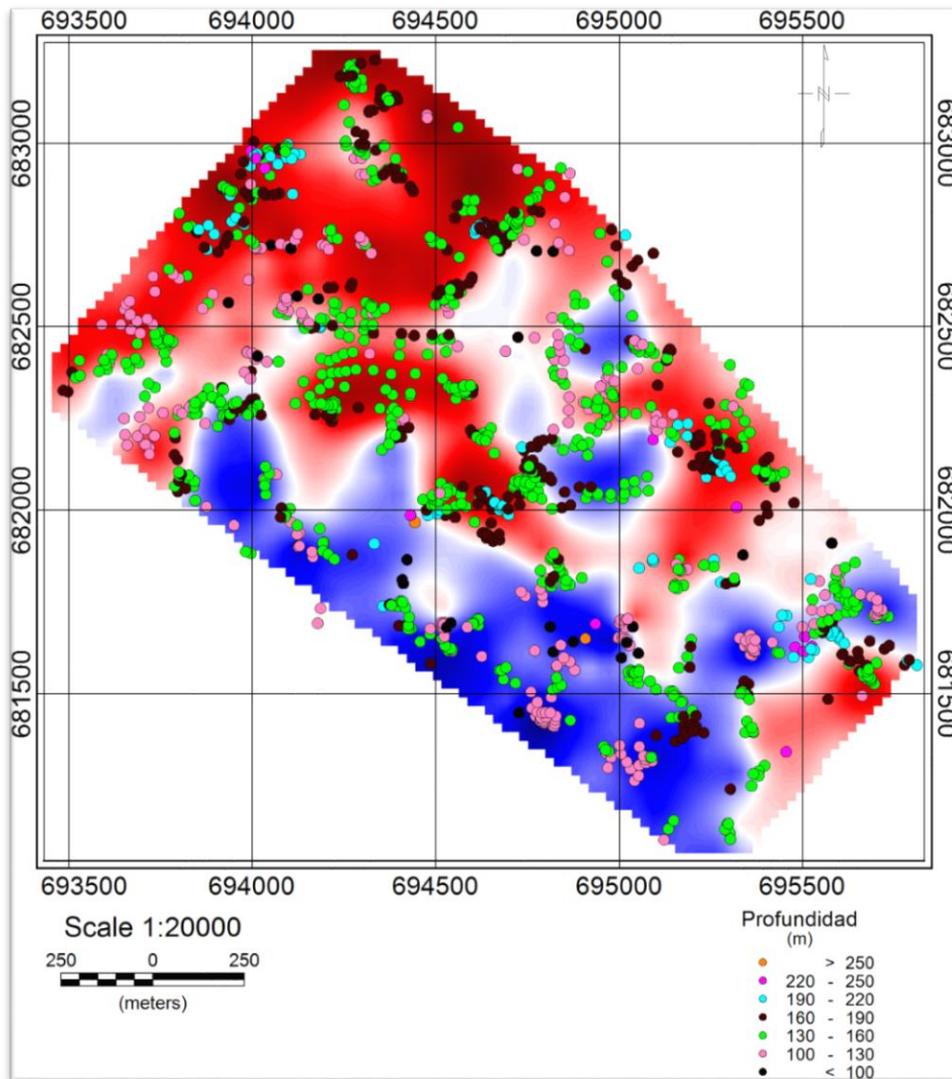


Figura 5.14 Deconvoluciones de Euler, adquisición B.

5.6 MODELO

El modelo fue realizado con orientación N30W atravesando de Norte a Sur la Adquisición A. Este perfil denominado A-A' fue realizado sobre la componente residual de la anomalía de Bouguer completa de la Adquisición A y se observa en la Figura 5.15. Las anomalías descritas por el mismo tienen un rango que va desde -0,95 mGal a 0,52 mGal por lo que el error cuantificado en 0,024 mGal (Figura 5.16) representa un 1,63% en error porcentual. El ajuste se logró modelando una serie de cuerpos con densidades de $2,62 \text{ g/cm}^3$ menores a la densidad del Granito Rapakivi de Pargüaza ($2,65 \text{ g/cm}^3$). Los contactos abruptos de estos cuerpos con el GRP pueden ser correlacionados con las superficies de altos gradientes descritas anteriormente. La profundidad del centro de masa de estos cuerpos se ajustó utilizando la información de las soluciones de Euler (Figura 5.17), cabe destacar que todas las soluciones se utilizaron siendo proyectadas sobre el plano del perfil. La base de estas masas se dejó como una incógnita por la ambigüedad de su interpretación. Por información recabada en campañas geológicas exploratorias se conoce que la región está altamente meteorizada sin afloramientos frescos identificados por lo cual se añadió una capa de sedimentos en la parte superior con una densidad de $2,3 \text{ g/cm}^3$. La base del GRP sobrepasa la escala de este trabajo ya que el espesor de este granito puede estar entre 4 y 10 km de profundidad (Mendoza, 2005), por lo que todas las variaciones en la gravedad son respuestas dentro del cuerpo del granito.

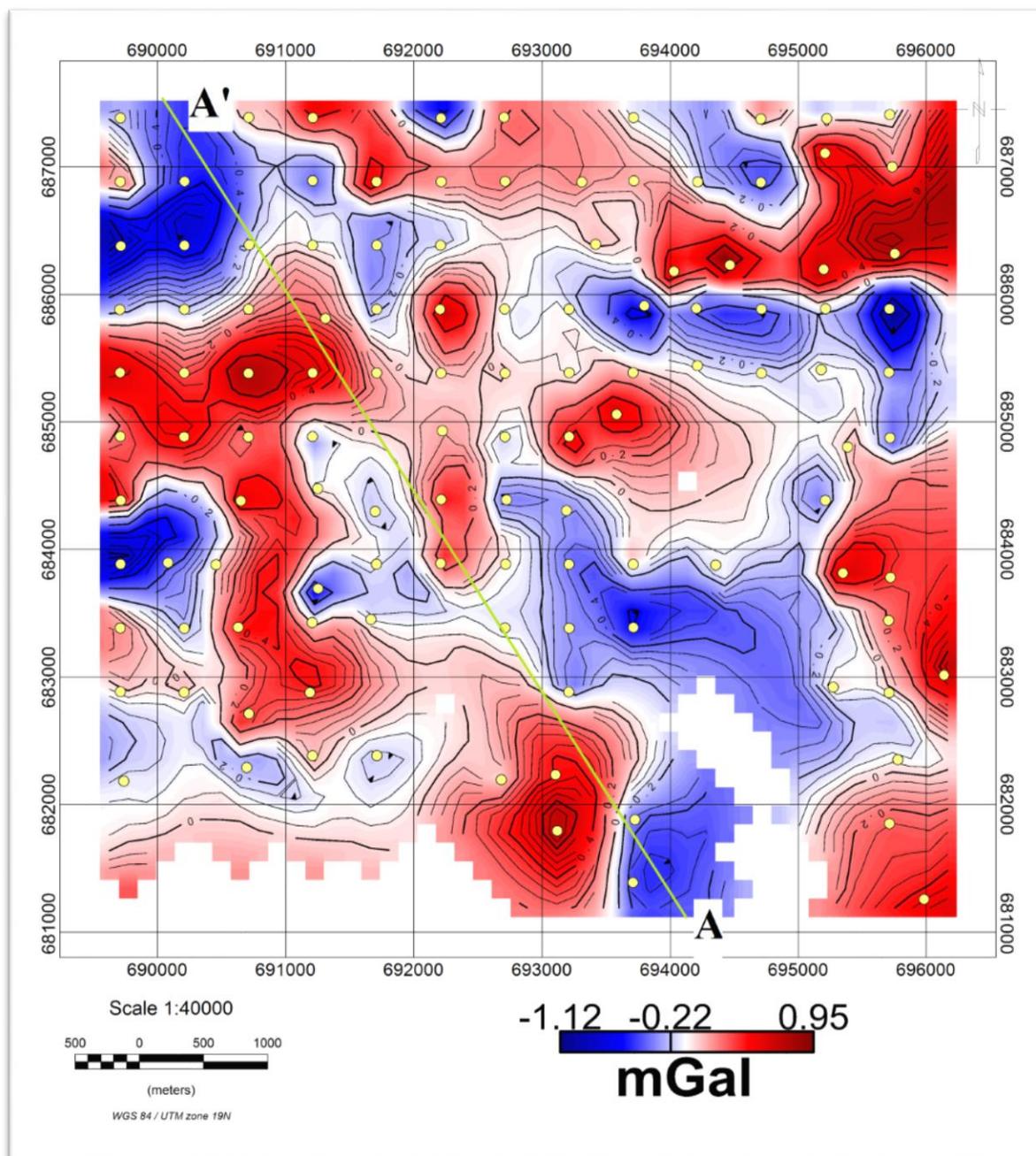


Figura 5.15 Perfil A-A' dirección N30W sobre el mapa residual de la adquisición A.

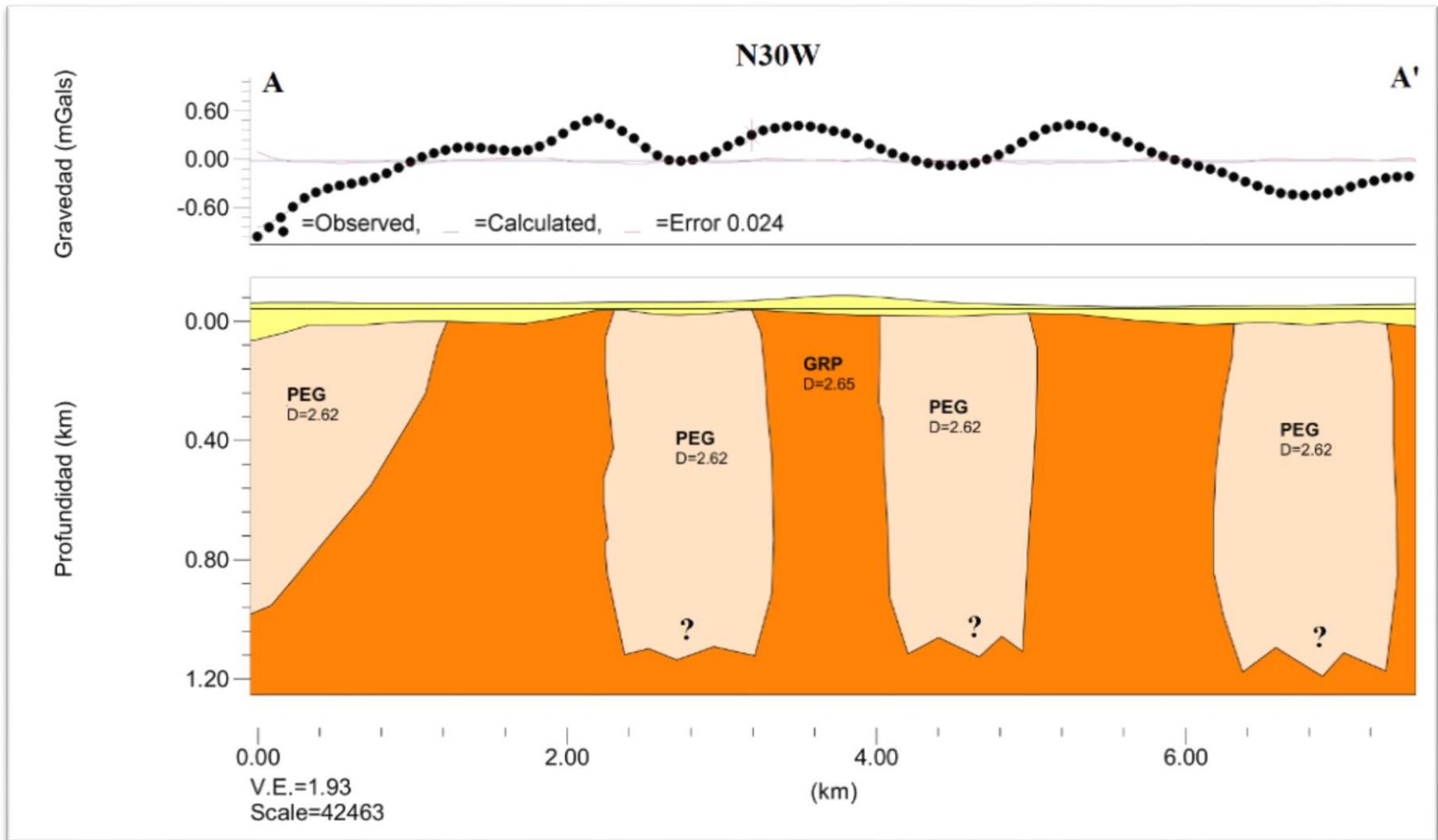


Figura 5.16 Modelo geológico para datos gravimétricos en perfil A-A'.

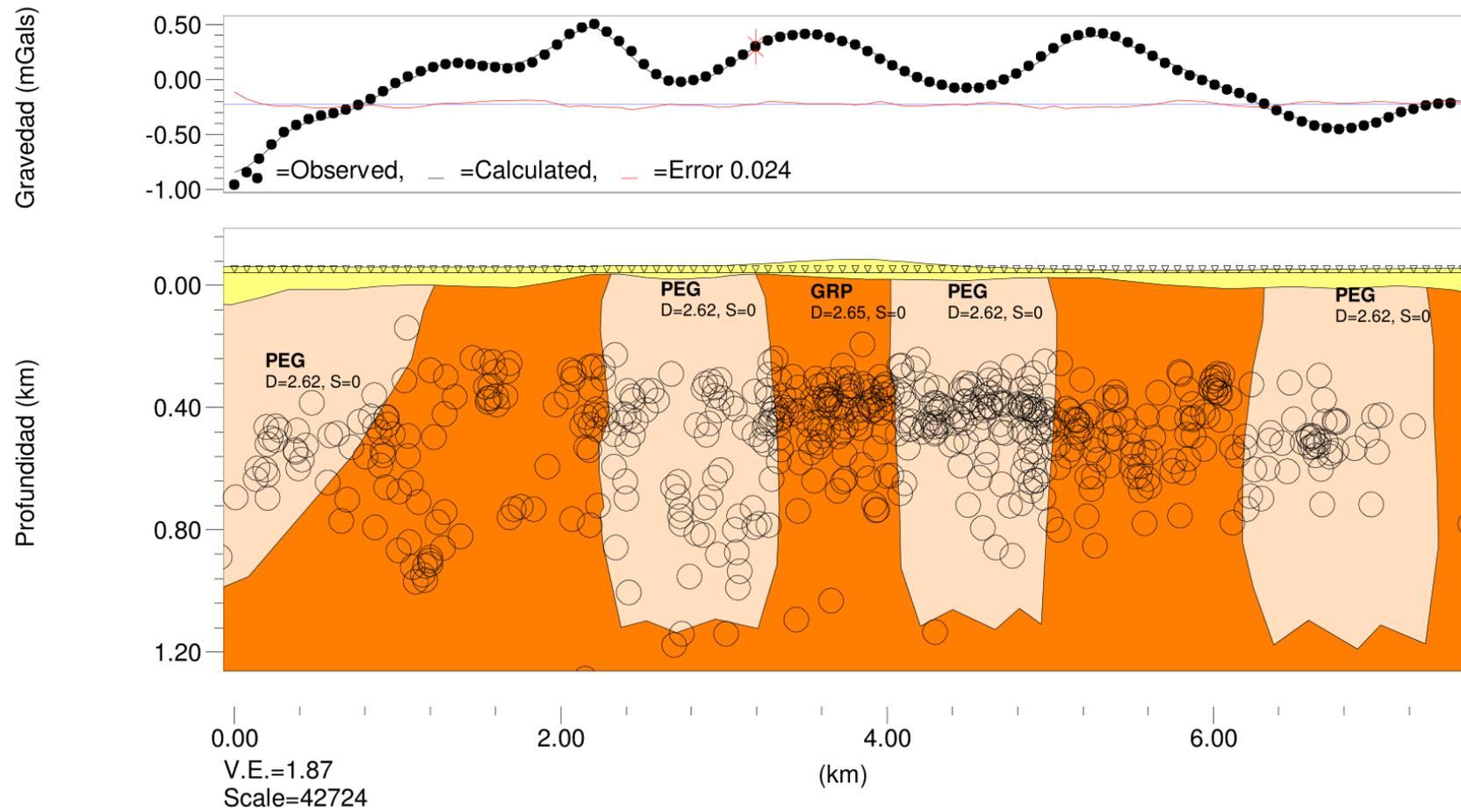


Figura 5.17 Modelo geológico para datos gravimétricos en perfil A-A' con soluciones de Euler representadas por las circunferencias negras.

5.7 DISCUSIÓN

Realizando una integración de los resultados presentados, podemos resaltar ciertas características y rasgos de particular importancia. Las anomalías de Bouguer para la Adquisición A describen una tendencia de aumento hacia el NW, esta tendencia se refleja también de forma general en la componente regional de la Adquisición B. Esta tendencia responde posiblemente a la forma y buzamiento del GRP. El rango de anomalías de Bouguer completas para la Adquisición B se registró entre los -30,222 mGal y los -27,487 con una media de -28,603 mGal acorde a los valores registrados para el área en el mapa de anomalías de Bouguer completa para la Adquisición A.

Cabe destacar que, durante el procesamiento, tres estaciones gravimétricas correspondientes a la Adquisición A fueron removidas de los datos ya que se presentaban como valores de calidad dudosa creando anomalías causadas solamente por una estación sin respaldo de estaciones vecinas y distorsionando la tendencia regional de los contornos. Estas estaciones representan menos del 1% de las estaciones totales levantadas y difieren de su entorno por cerca de ± 1 mGal que para la escala de este trabajo representa una anomalía significativa, por lo cual se tomó la decisión de eliminarlas. El estudio estadístico de las anomalías correspondientes a las estaciones definitivas resultó en ningún valor anómalo reflejado en los diagramas de caja y bigotes teniendo un rango de anomalías cercano a los 6 mGal siendo un valor dentro de lo esperado en estudios de carácter minero en los que se considera un buen rango de anomalías entre 1-10 mGal.

La derivada horizontal total calculada para ambas adquisiciones es cónsona con lo descrito en los mapas de Bouguer. Específicamente podemos resaltar tres zonas de altos gradientes en el mapa de Bouguer de la Adquisición A que se corresponden en el mapa de derivada horizontal total como valores máximos y con tendencias exactamente iguales en ambos mapas. Para la Adquisición B se resalta la zona de altos gradientes del campo gravitatorio ubicada sobre el

contacto de la anomalía de valor máximo entre las longitudes 694000 y 695000 y las latitudes 682000 y 682500. Este podría ser el contacto del cuerpo meridional, mostrado en la Figura 5.16, con la roca caja.

Las profundidades estimadas por medio de los espectros de potencia nos indicaron fuentes entre 430 m la más profunda para la Adquisición A y 38 m la más somera para la Adquisición B. Es importante entender que este análisis en frecuencia es una estimación de la profundidad a la que se encuentra el cuerpo causante de la anomalía y que el error es bastante alto rondando un $\pm 50\%$ de los resultados calculados. Por su parte, las soluciones de Euler proporcionaron información de la profundidad de los centros de masas de cuerpos para una media de 514 m en la Adquisición A y 148 m en la Adquisición B.

El perfil gravimétrico modelado describe la presencia de masas de menor densidad definidas como cuerpos de forma irregular intrusivos al Granito Rapakivi de El Pargüaza. Estos cuerpos se emplazan hasta el contacto con el espesor sedimentario y se ubican en zonas donde la capa aluvional se engrosa como consecuencia de la menor resistencia ofrecida por estos cuerpos a la erosión.

Las anomalías gravimétricas describen superficies de altos contrastes en ambas adquisiciones. Estas superficies pueden ser la respuesta a los contactos entre cuerpos de densidades diferentes. Los estudios geológicos de superficie realizados en la zona evidencian la presencia de elementos mineralógicamente asociados a cuerpos pegmatíticos por lo que las respuestas evidenciadas podrían corresponder a grandes zonas pegmatíticas con un ancho de alrededor de 800 m con su centro de masa posicionado a unos 500 m de profundidad para el perfil modelado. Estos cuerpos pegmatíticos se forman en la última etapa de fraccionamiento del magma conteniendo los elementos más líquidos y fluidos del mismo por lo cual su inyección por grietas y fracturas es bastante efectiva y su edad es levemente menor que los granitos de los que se derivan pudiendo generar zonas altamente intruidas por estas masas pegmatíticas (London, 2005). Estas zonas podrían ser un conjunto de vetas interconectadas de un espesor de

unas decenas de centímetros pero que ocupan toda la extensión modelada como un solo cuerpo.

Es evidente en estudios como los realizados por Grande y Mariño (2012), Bolívar et al. (2012), Bonilla-Perez et al. (2013) y Pacheco (1982), que el cuerpo del Granito Rapakivi del Pargüaza no es necesariamente una masa completamente homogénea, sino que dentro de la inmensidad de uno de los granitos anorogénicos más grandes de todo el mundo existan facies distintas aún no identificadas debido a la poca exploración y a la alta meteorización de la región, entre otros factores. Estos cuerpos definitivamente poseen respuesta geofísica y lo analizado en este trabajo es muestra de ello.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente podemos recalcar que el rango de anomalías de Bouguer para la zona de estudio reflejó un buen valor para trabajos de índole minera. Las estadísticas descriptivas calculadas para los datos de ambas adquisiciones mostraron valores entre -30,222 mGal en la Adquisición B y -23,403 mGal en la Adquisición A.

A pesar de tener dos adquisiciones de escalas distintas con espaciamientos diferentes, podemos afirmar que las zonas donde ambas se solapan corresponden tanto en tendencias regionales como en rangos de anomalías de Bouguer validándose mutuamente. Ambas presentan una tendencia de aumento al NW y los valores promedio para la Adquisición B se ajustan a los valores de la zona para la Adquisición A.

Por su parte, las derivadas horizontales totales calculadas resaltan zonas de contactos entre anomalías de valores máximos y anomalías mínimas locales siendo coherentes con lo observado en los mapas de Bouguer. Así mismo, las profundidades de las fuentes estimadas por espectros de potencias y calculadas por Deconvolución de Euler se ajustan a la escala del trabajo presentando sus soluciones dentro del cuerpo del GRP y delimitando posibles estructuras internas en el granito.

Las anomalías gravimétricas de la región describen zonas de interés para la prospección minera en un rango de profundidades entre 100 m y 500 m. Estas zonas se presentan como mínimos gravimétricos y máximos valores de gradientes del campo gravimétrico y se asociaron a posibles cuerpos o zonas diferentes al Granito Rapakivi del Pargüaza y de posible carácter pegmatítico siendo una asociación granítica común y la posible fuente principal de mineralizaciones como niobio y tantalio presentes en sedimentos lateríticos en toda la región en depósitos secundarios. Se modelaron cuatro cuerpos o zonas de baja densidad con respecto al entorno que se corresponden con las anomalías de valores mínimos encontradas tanto en la Adquisición A como en la

Adquisición B. Es posible que la fuente primaria de estos minerales esté cubierta por los sedimentos generados por la alta meteorización que ha sufrido el GRP o que no haya sido encontrada o descrita aún y se relacionen con estos cuerpos que han sido modelados en este trabajo.

Es claro que existen variaciones laterales dentro del GRP y que definitivamente no es un cuerpo completamente homogéneo por lo que se recomienda prospección geofísica minera basada en métodos magnéticos que podrían integrarse con los resultados generados por la gravimetría, así como métodos eléctricos o electromagnéticos siendo estos últimos los ideales para la caracterización de minerales metálicos.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Alviola, R., Mänttari, I., Mäkitie, H. y Vaasjoki, M. (2001). Svecofennian rare-element granitic pegmatites of the Ostrobothnia region western Finland : their metamorphic environment and time of intrusion. In: Mäkitie, H. (ed.) Svecofennian granitic pegmatites (1.86-1.79 Ga) and quartz monzonite (1.87 Ga), and their metamorphic environment in the Seinäjoki region, western Finland. Geological Survey of Finland. Special Paper 30, 9–29.
- Bolívar, A., Manrique, A., Salazar, E., Grande, S., Guzmán, L., Mariño, N. (2012) Estudio preliminar de los depósitos de tantalita, columbita y casiterita en el Fundo La Fortuna, al SW del Cerro Boquerones, en el área metalogénica El Burro – Agua Mena, al Suroeste del municipio Cedeño, estado Bolívar, Venezuela. *GEOS*,42, 41-44.
- Bonilla-Pérez, A., Frantz, J., Charao-Marques, J., Cramer, T., Franco-Victoria, J., Mulocher, E., Amaya-Perea, Z. (2013). Petrografía, geoquímica y geocronología del Granito de Pargüaza en Colombia. *Boletín de Geología*, 35(2), 83-104.
- Cerny, P. (1991) Rare-Element Granitic Pegmatites Part II: regional to global environments and petrogenesis. *Geoscience Canada*, 18(2), 68-81.
- Colmenares, A. (2011). Modelo estructural del subsuelo generado a partir de la integración de datos geofísicos en el Campo Costanero Bolívar, costa oriental del Lago de Maracaibo. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Cooper, G.R.J. y D.R. Cowan. (2008). Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. *Geophysics* 73(3):H1-H4.
- Dall' Agnol, R., Costi, H., da S.Leite, A., de Magalhaes, M., y Texeira, N. (1999). Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research* 95, 9-19.

- Díaz, A. (2004). Estudio geofísico integrado del Sur-Oriente del país, San Rafael de Imataca estado Bolívar. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Eckhardt, E. A. (1940). A brief history of the gravity method of prospecting for oil. *Geophysics*, 5(3), 231-242.
- Escorihuela, N. (2004). Interpretación de datos aeromagnéticos con fines de exploración minera en la zona San Rafael-El Callao. Escudo de Guayana, Estado Bolívar. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Geosoft (2006). *Montaj Gravity & Terrain Correction*. Toronto: Geosoft Inc.
- Geosoft (2007). *Montaj MAGMAP Filtering: 2D frequency domain processing of potential field data extension for Oasis montaj v.4*. Tutorial. Canada: 82 p.
- Grande, S. y Mariño, N. (2012). Charnockita con fayalita (bauchita) y su relación con el Granito del Pargüaza. *GEOS*, 42, 64-67.
- Hinze, W., C. Aiken, J. Brozena, B. Coakley, D. Dater, G. Flanagan, R. Forsberg, T. Hildenbrand, G. Randy Keller, J. Kellogg, R. Kucks, X. Li, A. Mainville, R. Morin, M. Pilkington, D. Plouff, D. Ravat, D. Roman, J. Urrutia-Fucugauchi, M. Véronneau, M. Webring y D. Winester. (2005). New standards for reducing gravity data: The North American gravity database. *Geophysics* 70(4): J25-J32.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Oxford: Blackwell Science.
- Ladera, A. (2015). Modelado gravimétrico y magnético de Escudo Guayanés a través del uso de datos satelitales en la región suroeste del estado Bolívar. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- LaFehr, T. R. (1991). Standardization in gravity reduction. *Geophysics*, 56(8), 1170-1178.
- Li, X.; Götze, H. (2001). Tutorial Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics. *Geophysics*, 66(6), 1660–1668.

- Linnen, R.; Van Lichtenvelde, M.; Cerny, P. (2012) Granitic Pegmatites as Sources of Strategic Metals. *Elements*, 8(4), 275-280.
- London, D. (2012) Granitic Pegmatites: an assessment of current concepts and directions for the future. *Lithos*, 80, 281-303.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Lyckberg, P. (2006). Mirolitic pegmatites of the Viborg rapakivi granite massif, SE Finland with special attention to the green gem beryl producing Karelia Beryl Mine pegmatite at Luumäki, Karelia. *Norsk Bergverksmuseum Skrift* 33, 87-107.
- Mendoza, V. (2005). *Escudo de Guayana, Andes venezolanos y Sistema Montañoso del Caribe*. Ciudad Bolívar, Venezuela: Universidad de Oriente.
- Orihuela, N., García, A., Garzón, Y., González, J., y Tabare, T. (2011a). Mapa de anomalías magnéticas de Venezuela derivado de datos satelitales. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 26 (1), 43-49.
- Pacheco, E. (1982). Obtención de concentrados de columbita-tantalita, zircon e ilmenita a partir de aluviones del caño Aguamena en la región de Boqueron, estado Bolívar. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Romero, L. (2002). Interpretación estructural del Alto Pirital, norte de Monagas, Cuenca Oriental de Venezuela, utilizando datos sísmicos , gravimétricos y magnéticos. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Sidder, G. B., y Mendoza, S. (1995). *Geology of the Venezuelan Guyana Shield and its relation to the geology of the entire Guyana Shield*. U.S. Geological Survey, Bulletin 2124:B1-B41.
- Spector, A., y Grant, F. S. (1970). Statistical models for interpreting Aeromagnetic data. *Geophysics*, 35 (2), 293-302.

Telford, W. M., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (1990). Applied Geophysics.
Cambridge: Cambridge University.

Yegorova, T. P., Starostenko, V. I., Kozlenko, V. G., & Yliniemi, J. (2004).
Lithosphere structure of the Ukrainian Shield and Pripyat Trough in the
region of EUROBRIDGE-97 (Ukraine and Belarus) from gravity modelling.
Tectonophysics, 381, 29–59.