



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS

Levantamiento de datos gravimétricos en las formaciones sedimentarias de la
cuenca Malacatos.

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Elizalde Rodríguez, Stalin Fabián

DIRECTOR: Tamay Granda, José Vidal, MSc.

LOJA – ECUADOR

2015



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Septiembre, 2015

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Master.

José Vidal Tamay Granda

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: "Levantamiento de datos gravimétricos en las formaciones sedimentarias de la cuenca Malacatos" realizado por Elizalde Rodríguez Stalin Fabián ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por lo que se aprueba la presentación del mismo.

Loja, octubre del 2015

f) _____

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y DECLARACIÓN DE DERECHOS

“Yo Elizalde Rodríguez Stalin Fabián declaro ser autor del presente trabajo de titulación: “Levantamiento de datos gravimétricos en las formaciones sedimentarias de la cuenca Malacatos.”, de la Titulación de Ingeniero en Geología y Minas, siendo José Vidal Tamay Granda director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autor: Elizalde Rodríguez Stalin Fabián

Cedula: 1105033573

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación primeramente lo dedico a Dios por ser el motor fundamental en mi vida y quien me dio la capacidad de poder hacer realidad este sueño, a mi querido padre Tulio que es mi ejemplo a seguir quien con su sacrificio y responsabilidad me ha enseñado que lo más importante en la vida son los valores y amor por las cosas que Dios nos da, a mi querida madre Marcia por su apoyo incondicional y por todo el amor que me ha dado a lo largo de mi existir y por sus consejos que día a día me ayudan a ser mejor persona, a mi hermano Jimmy quien fue un ejemplo claro de superación pese a las adversidades que nos da la vida.

Stalin.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Dios por darme las fuerzas y la capacidad para poder culminar con éxito el presente trabajo de investigación.

A mis queridos padres y hermano por ser mi fuerza para culminar con éxito esta etapa de mi vida.

A mi director de tesis MSc. José Vidal Tamay por la confianza brindada y quien ha sido guía para poder culminar con éxito este proyecto de fin de titulación y darle las gracias por todas las enseñanzas impartidas en toda mi etapa universitaria que me han servido y me servirán de mucho para mi futuro profesional, de igual manera al Ms.c Belisario Zarate por la colaboración y paciencia.

A mis compañeros y amigos de tesis Oscar y Ximena por el apoyo brindado en todo el desarrollo del trabajo de investigación y que en conjunto pudimos lograr una de tantas metas que nos hemos propuesto.

Al Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil por todos estos años de enseñanzas que me ayudarán de mucho para poder defenderme en mi vida profesional.

A todos ellos, muchas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARATULA	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE FIN DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y DECLARACIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
RESUMEN EJECUTIVO.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
OBJETIVOS	7
CAPÍTULO I.....	8
GENERALIDADES	8
1.1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	9
1.2. Geología Regional.....	10
1.2.1. Unidad Chiguinda.....	11
1.2.2. Formación Loma Blanca.....	11
1.2.3. Formación San José.....	11
1.2.4. Formación Santo Domingo.....	12
1.2.5. Formación Cerro Mandango.....	13
1.2.6. Pórfido Purunuma.....	14
CAPÍTULO II.....	15
MARCO CONCEPTUAL	15
2.1. Prospección Gravimétrica.....	16
2.2. Principios físicos.....	17
2.2.1. Ley de Newton. Constante de Gravitación Universal.....	17
2.2.2. Gravedad en la Tierra.....	18
2.2.3. Medidas de la Gravedad.....	18
2.3. Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre.....	19
2.3.1. Con la Latitud.....	19
2.3.2. Con la Altitud.....	19
2.3.3. Con el Tiempo.....	19
2.3.3.1. Efecto de las mareas.....	19

2.3.3.2. <i>Deriva Instrumental</i>	20
2.4. Medición de la gravedad.....	20
CAPÍTULO III.....	21
METODOLOGÍA.....	21
3.1. Trabajo de Campo.....	22
3.1.1. Validación de información existente.....	22
3.1.2. Levantamiento de Datos Gravimétricos.....	22
3.1.3. Levantamiento Geológico Estructural de la zona de estudio.....	25
3.2. Trabajo de gabinete.....	26
3.2.1. Procesamiento de datos de campo.....	26
3.2.2. Corrección Topográfica.....	27
3.2.3. Procesamiento de Modelos con GravMag V1.7.....	27
CAPÍTULO IV.....	28
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	28
4.1. Geología Local.....	29
4.1.1. Basamento.....	29
4.1.2. Volcánico.....	30
4.1.3. Secuencia sedimentaria.....	31
4.1.4. Depósitos aluviales.....	32
4.2. Estratigrafía y Estructuras.....	32
4.3. Mapa de anomalía de Bouguer.....	33
4.4. Modelos gravimétricos y correlación Geológica.....	35
4.5. Discusión de resultados.....	41
CONCLUSIONES.....	42
RECOMENDACIONES.....	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA.....	44
ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1	Localización geográfica del polígono de estudio.....	9
Figura 2. 1	La balanza de torsión de Cavendish.....	17
Figura 3.1	Estación Base Malacatos.....	23
Figura 3. 2	Mapa de puntos de Observación gravimétrica.....	24
Figura 3. 3	Equipo utilizado para levantamiento de datos gravímetros.....	25
Figura 3. 4	Toma de datos de campo para el levantamiento geológico – estructural.	26
Figura 4. 1.	Afloramiento de esquistos sericíticos metamórficos (X: 683898 Y: 9535134).	30
Figura 4. 2.	Afloramiento de Tobas volcánicas (formación Loma Blanca).	30
Figura 4. 3.	Afloramiento de areniscas calcáreas de la formación San José, yeso-carbón de la formación Santo Domingo.....	31
Figura 4. 4.	Afloramiento de la formación Cerro Mandango (coordenadas UTM X: 692565; Y: 9533746).....	32
Figura 4. 5.	Terrazas aluviales en los márgenes del río Solanda.....	32
Figura 4. 6.	Mapa de anomalías de Bouguer de la zona Norte de la cuenca Malacatos.....	34
Figura 4. 7.	Modelo gravimétrico del perfil A-A'	35
Figura 4. 8	Perfil geológico A-A'	36
Figura 4. 9	Modelo gravimétrico del perfil B-B'	38
Figura 4. 10	Perfil geológico B-B'	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Coordenadas UTM de la zona de estudio	10
Tabla 3. 1 Base Topográfica Malacatos. Coordenadas planas UTM, referidas al WGS 84 Zona 17 S.....	23

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación hace referencia al estudio de la zona norte de la cuenca sedimentaria de Malacatos a partir del levantamiento Geológico – Estructural y Gravimétrico de campo a través de estaciones de medida relativa colocadas a lo largo de dos perfiles en disposición Noreste-Suroeste. Para tal investigación se dispuso de 68 estaciones de medidas gravimétricas con una separación de 250 metros aproximadamente.

Con la recolección de los datos obtenidos en campo y con el posterior procesamiento de los mismos se pudo determinar la geometría y profundidad del relleno sedimentario sobre el basamento metamórfico, permitiendo obtener valores de anomalías de Bouguer negativas, representados en un mapa de anomalías.

Los modelos gravimétricos se obtuvieron a partir de datos de anomalía residual, calculados con los datos de la anomalía de Bouguer para posteriormente correlacionarlos con datos geológicos y estructurales de la zona obteniendo información de la profundidad del relleno sedimentario así como la gran variedad de estructuras geológicas que caracterizan a esta zona.

PALABRAS CLAVES: cuenca sedimentaria, relleno sedimentario, basamento, anomalías de Bouguer, anomalía residual, modelos gravimétricos.

ABSTRACT

The present work to research make reference the study of the northern part of the sedimentary basin to Malacatos as from a Geological uprising – Structural and Gravimetric of field through stations measure placed along two profiles in disposition Northeast-Southwest. For such research were available 68 stations gravimetric measurements with a separation of approximately 250 meters.

With the collection of data obtained in the field and with the subsequent processing of the same it was determined the geometry and depth of the sedimentary infill over the metamorphic basement, allowing to obtain values of anomalies of negatives Bouguer, represented on a map of anomalies.

Gravimetric models were obtained from residual anomaly data, this was calculated with data Bouguer anomaly to later correlate with data geologic and structural of the area getting information from the depth of the sedimentary fill as the variety of structures geologic that characterize this area.

Keywords: sedimentary basin, sedimentary filling, basement, Bouguer anomalies, Residual anomaly, gravimetric models.

INTRODUCCIÓN

La geología a detalle de la cuenca sedimentaria de Malacatos así como su estructura tectónica aún no ha sido estudiada a profundidad, por lo que es necesario la aplicación de métodos indirectos para determinar la estructura y geometría del relleno sedimentario suprayacente al basamento metamórfico. Para esta investigación se utilizó el método gravimétrico, que es cien por ciento confiable dado que está directamente relacionado a la variación de densidades entre materiales sedimentarios y metamórficos. A través de cambio de densidad se puede modelar geológicamente la litología menos densa y la profundidad del relleno sedimentario. Con la correlación de los datos geológicos-estructurales y modelos gravimétricos obtenidos en campo podemos determinar el modelo geológico de la zona.

El capítulo 1 “Generalidades”, da a conocer la ubicación geográfica y el contexto geológico y estructural a escala regional en la cual se enmarca la zona de estudio.

El capítulo 2 “Marco Conceptual”, hace referencia a los principios físicos y matemáticos del método gravimétrico empleado en el presente trabajo de investigación.

El capítulo 3 “Metodología”, explica de manera detallada las fases que se siguieron para llegar al objetivo planteado, partiendo de la recopilación de información y el levantamiento de datos geológicos-estructurales-gravimétricos en campo y culminando en gabinete con el procesamiento de datos, correcciones y elaboración de mapas de anomalías.

El capítulo 4 “Interpretación de resultados”, correlaciona los modelos gravimétricos obtenidos en gabinete con la geología de campo, dando como resultado las secciones geológicas de cada perfil.

La presente investigación aporta de manera positiva brindando información para la elaboración de mapas tectónico-estructurales, y sirvan de referencia para el ordenamiento territorial, construcción de vías, uso de suelos, etc.

Para la elaboración del tema de investigación se utilizó un gravímetro Autograv Scintrex CG-5 para la toma de medidas de gravedad relativa en las estaciones establecidas y precisados mediante un GPS Diferencial Trimble R6. Equipos facilitados por el Departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil de la Universidad Técnica Particular de Loja.

El trabajo consiste en el levantamiento conjunto de datos de litología, elementos estructurales y la toma de datos gravimétricos a lo largo de dos perfiles con estaciones de medida relativa marcadas con anterioridad. A través del procesamiento de datos se obtuvo

un mapa de anomalías de Bouguer, donde las zonas con mayor valor de anomalía se manifiestan como mayor profundidad a lo largo de la cuenca. Los modelos gravimétricos resultan a partir de los valores de anomalía residual, permitiendo modelar el relleno sedimentario con el software y determinar la geometría y zonas más profundas en base al contraste de densidades. Finalmente se incorpora a los modelos gravimétricos la parte geológica dando como resultado perfiles geológicos detallados. Esta metodología ha dado resultados confiables en trabajos previos, en la cuenca de Loja (Galindo et al., 2010) y otros lugares del mundo.

Los puntos de medida gravimétrica se facilitaron en lugares de acceso libre para transitar en vehículo, sin embargo existió una limitante para el levantamiento geológico debido a la densa vegetación en la zona que impidió la observación de estructuras falladas y plegadas a superficie.

ANTECEDENTES

La cuenca sedimentaria de Malacatos forma parte de las cuencas intramontañas, ha sido estudiada geológicamente por autores como Wolf (1892); Putzer y Schneider- Scherbina (1958); Spinder et al. (1959); Villemur (1967); Naciones Unidas (U.N.D.P., 1969); L. B. Kennerley (1973); Almeida, Bristow y Parodiz (1982); Litherland (1994) y Dominic Hungerbühler (2002).

El primer investigador que dio a conocer que las formaciones terciarias de la cuenca de Malacatos son similares a las formaciones de la cuenca de Loja fue Wolf, quien basándose en las semejanzas litológicas concluyó que las dos cuencas se formaron al mismo tiempo.

Con aportaciones de Hungerbühler et al. (2002), basándose en estudios anteriores realizados por Kennerley (1973) se logró elaborar un mapa geológico del sur del Ecuador, determinando una subdivisión de estratos depositados sobre un basamento metamórfico (de abajo hacia arriba) en el siguiente orden: formación Loma Blanca, formación San José, Santo Domingo y Cerro Mandango y así elaborar un estudio tectónico y estratigráfico sobre las cuencas intramontañas del sur del Ecuador.

Medina (2014) realizó una validación geológica-estructural en la zona norte de la cuenca Malacatos lo cual apporto satisfactoriamente con información para correlacionar con los modelos gravimétricos.

Así mismo, la Universidad Técnica Particular a través de tesis de pregrado realizadas por profesionales en formación de la Titulación de Geología y Minas, se han venido realizando aportaciones en diferentes áreas del polígono de Malacatos con estudios geológicos, estructural e inventarios de deslizamientos de las áreas dos, tres, cuatro y cinco.

En cuanto a estudios gravimétricos Feininger y Seguin (1983) realizaron estudios de gravimetría para la zona de Ecuador; obteniendo como resultado una fuerte anomalía negativa de Bouguer característica para la región Sierra, siendo esta de -250mGal hasta -222mGal.

En la zona sur y específicamente en la cuenca de Malacatos, no han sido abundantes las prospecciones de este tipo; sin embargo con los pocos estudios que se han dado se ha logrado resultados efectivos y confiables. En la cuenca de Loja se realizó estudios gravimétricos, obteniendo anomalías entre -197mGal hasta -213mGal (Galindo et al., 2010).

Para la cuenca de Malacatos, se obtuvo valores de anomalías de -168 mGal y -222 mGal, datos que concuerdan a los obtenidos para la cuenca de Loja. Como conclusión estos valores son típicos para las cuencas intramontañosas del sur del Ecuador.

OBJETIVOS

Objetivo General.

- Determinar mediante modelos gravimétricos, la profundidad del relleno sedimentario en relación con la estructura tectónica de la zona norte de la cuenca de Malacatos.

Objetivos Específicos.

- Realizar el levantamiento geológico de campo de las estructuras tectónicas y las orientaciones de la estratificación en la zona de estudio.
- Definir los perfiles gravimétricos en la zona de estudio para levantamiento de datos.
- Realizar el levantamiento de datos para precisar la geometría y relleno sedimentario de la zona norte de la cuenca de Malacatos a partir de datos gravimétricos.
- Integración de datos gravimétricos con estudios geológicos de campo para establecer la continuidad de estructuras menores observadas en superficie.

CAPÍTULO I
GENERALIDADES

1.1. Ubicación geográfica del área de estudio.

La cuenca sedimentaria de Malacatos forma parte de las cuencas intramontañosas de la zona sur del corredor interandino, entre la cordillera Real y Occidental de los Andes Ecuatorianos. Se encuentra a 35 Km de la ciudad Loja. Su extensión aproximada es de 8266 Has., y la zona de estudio se encuentra limitado por los siguientes ríos y quebradas: Al norte con la quebrada Picota. Al sur por los ríos Solanda y Malacatos. Así mismo, se encuentra limitado al Este por la quebrada San Francisco y al Oeste por la quebrada Limón y Chonta. (Ver figura 1.1)

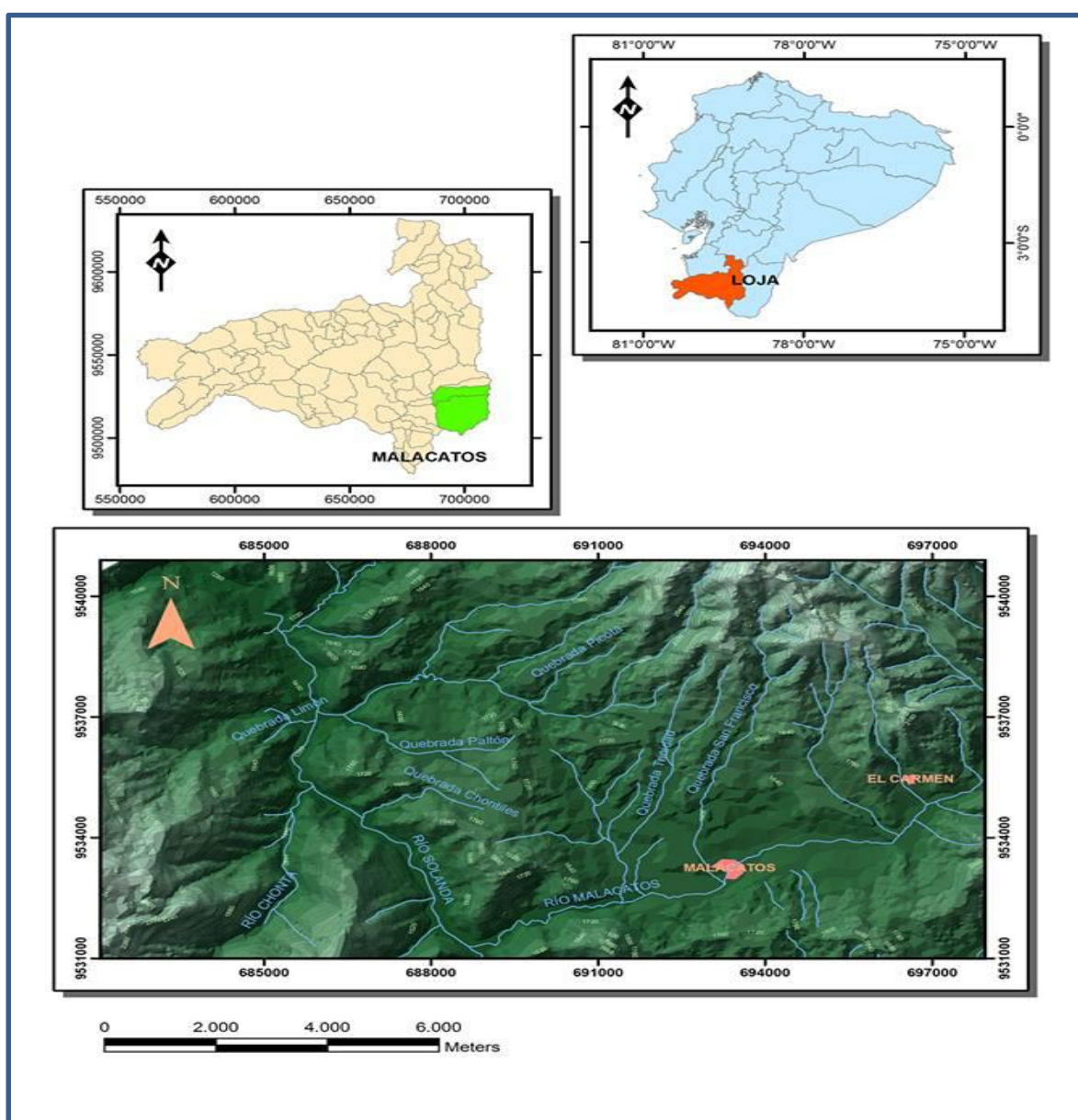


Figura 1. 1 Localización geográfica del polígono de estudio.
Fuente: Elizalde, 2015

En la tabla 1.1 se muestran las coordenadas UTM en las cuales se ha distribuido las estaciones de medida gravimétrica.

Tabla 1. 1. Coordenadas UTM de la zona de estudio.

Puntos	Coordenadas UTM (Datum: WGS84 Zona 17S)
1	691498, 9538708
2	695791, 9537794
3	689598, 9530757
4	682984, 9534760

Fuente: Elizalde, 2015

1.2. Geología regional.

La cuenca de Malacatos, es una de las cuencas intramontañosas del sur del Ecuador, que ha sido estudiada por investigadores como: Wolf (1892); Putzer & Schneider-Scherbina, (1958) Kennerley (1973); Hungerbühler et.al. (2002) quienes consideran a la cuenca como una depresión alargada de 7 Km de ancho y 25 Km de largo, que se extiende en dirección noroeste – sureste desde Catamayo al norte y Yangana al sur.

Las formaciones sedimentarias de edad Mioceno-Plioceno se encuentran sobrepuestas discordantemente a las rocas metasedimentarias del Paleozoico (Unidad Chigüinda; Litherland y otros, 1994) localizadas al este del borde de la cordillera Real, y las rocas volcánicas de la formación Loma Blanca de edad Oligoceno inferior. La serie sedimentaria revela tres unidades tecto-estratigráficas dominantes que se extienden de E a W en la cuenca sedimentaria, separados por una falla normal.

Para Hungerbühler et al. (2002), los estratos están distribuidos (de abajo hacia arriba) de la siguiente manera: formación Loma Blanca constituida de rocas volcánicas, formación San José, Santo Domingo y Cerro Mandango que comprende los depósitos de la secuencia sedimentaria.

1.2.1. Unidad Chiguinda.

Constituye el basamento de la cuenca de Malacatos que bordea la parte sur de la cordillera en un cinturón de hasta 30 Km de ancho. Esta unidad está constituido al oeste por rocas de metamorfismo bajo como filitas, esquistos sericíticos y cuarcitas; y hacia el este el grado de metamorfismo aumenta por rocas como metagranito, gneises, y migmatitas. La potencia del basamento no es conocida pero se considera que es de varios Kilómetros de profundidad.

1.2.2. Formación Loma Blanca.

Yace discordantemente sobre el basamento metamórfico Paleozoico y se encuentra subyacente a las formaciones terciarias sedimentarias de la cuenca Malacatos y de la formación Gonzanamá en el Norte. Esta formación está constituida de rocas volcánicas como: tobas aglomeráticas, tobas y flujos de lava andesítica. Compuesta de rocas volcánicas de acidez intermedia tales como tobas, tobas aglomeráticas, ignimbritas, pómez, brechas volcánicas, flujos; adicional a esto existen diques sills, que revelan la proximidad de centros eruptivos que frecuentemente los intruyen (Hungerbühler et al., 2002). Hacia el Norte ocupan el ancho total de la cuenca, pero en la parte sur, se encuentran recubiertas de sedimentos que no les permiten afloran en su totalidad haciéndolo solamente en una banda estrecha a lo largo del lado oeste de la cuenca. Hungerbüller et al. (2002) describe a estas rocas volcánicas de edad Paleoceno-Eoceno-Oligoceno ($40.6 \pm 5.4 - 26.6 \pm 4.0$ Ma).

Esta formación es confundida con la joven formación Saraguro, por la similitud en sus litología, pero difieren al ser depositadas en diferentes épocas y ser de distintas regiones geográficas (Hungerbühler et al., 2002).

1.2.3. Formación San José.

La formación San José de edad Miocénica media a tardía (13.5 ± 1.2 Ma. y 13.1 ± 1.9 Ma.) Descansa discordantemente sobre la formación Loma Blanca con un espesor de 200 m. Aflora en una franja de aproximadamente 1 Km de ancho, entre Algarrobillo y cerro Loma Blanca, y en un pequeño bloque fallado a 2 Km al oeste del pueblo El Tambo. Está constituida por areniscas calcáreas de tamaño variable y calizas micríticas, también existe la presencia de pizarras bioturbadas, brechas bioturbadas, brechas bioclásticas, capas de guijarros volcánicos.

Esta formación sedimentaria más baja de la cuenca fue establecida por (Hungerbühler, 1997), está ubicada en el pueblo de San José; y en parte sustituye a la formación Algarrobillo de Kennerley (1973).

Las lutitas presentan vetas de yeso con ciertos cristales de selenita y están impregnados con sulfuros. Sobre ésta unidad sedimentaria se halla un filón de carbón en cierto modo bituminoso (Kennerley, J. B., 1973). Se observa una estratificación tabular cruzada de ángulo horizontal y de bajo ángulo, con gran cantidad de superficies y montículos de estratificación cruzada (Hungerbühler et al., 2002).

Existe gran cantidad de fósiles como ostrácodos, bivalvos, gasterópodos, escalopados, foraminíferos, núcleos de charophyte, dientes y huesos de peces que se encuentran en las areniscas calcáreas y calizas. Los foraminíferos marinos de agua dulce y salada, la fauna ostrácodos son producto de un ambiente deposicional costero con aportaciones de agua dulce. La asociación de facies de areniscas se compara con ondas de arena formadas en las corrientes de marea en los canales de estuarios y en parte de la desembocadura de canales de un delta. Las areniscas calcáreas y calizas representan la llanura de inundación y depósitos de laguna. En conclusión, la fauna y la información de las facies apunta que la formación San José se depositó en mareas sometidas por deltas ambientales (Hungerbühler et al., 2002).

1.2.4. Formación Santo Domingo.

Aflora en todo el flanco central. Descrita por Hungerbühler et al. (2002), sustituye la parte superior de la formación Algarrobillo y la formación Calabera indicadas por Kennerley (1973). La potencia de la formación Santo Domingo es variable, alcanzando un máximo de 700 m (Hungerbühler et al., 2002). Está dividida en dos miembros: miembro carbón y miembro yeso.

El **miembro carbón**, compuesto de repetidas secuencias de pozos estratificados bituminosos, pizarras negras y limonitas menores, en parte areniscas canalizadas con intervalos de estratificación cruzada y laminaciones onduladas tipo ripple (Hungerbühler et al., 2002). Las lutitas bituminosas contienen hidrocarburos con un rendimiento del 60-80 Kg/tn³ (Litherland et al., 1994). Los depósitos calcáreos y diques clásticos son omnipresentes y varias capas de carbón continúan lateralmente, las mismas que alcanzan una potencia de 2 metros (Putzer, 1968). Las areniscas presentan una coloración de gris a amarillo, por lo general arcósico, y llegan a ser conglomerados hacia el techo de la

formación. Esta formación sedimentaria descansa armoniosamente sobre la formación San José, entre los sectores Algarrobbillo, Malacatos, San Pedro y Vilcabamba.

El **miembro yeso** constituido de areniscas de grano medio color verdosas, bien clasificado con laminaciones onduladas tipo ripple y láminas de limonita. El yeso primario se origina en las areniscas como agujas prismáticas verticales y recristaliza los planos estratigráficos (Hungerbühler et al., 2002). El yeso secundario cuenta con un espesor de 20 cm de espesor. El yeso también se lo halla en estructuras tipo pliegues, se localiza cerca de la mina La Merced y en la quebrada de Santo Domingo. Se observa ciertos fósiles en mala conservación de tipo gasterópodos que tienen similitud a la especie *Dyris* en la Hoya de Loja), así mismo se ha encontrado ostrácodos y dientes de peces, no se ha datado su edad con exactitud. Se la ha ubicado a esta formación en el Mioceno medio tardío ($14,6 \pm 1,6$ Ma., y $12,0 \pm 1,2$ Ma.) (Hungerbühler et al., 2002).

Existe una interferencia entre las formaciones Santo Domingo y San José de acuerdo a análisis de muestras así como el mapeo geológico de campo. Las facies y la mineralogía de la formación Santo Domingo (Litherland, 1994) involucran ajustes de depósitos deltaicos costeros con predominio de las mareas y entornos pantanosos, tal como ocurre en la formación San José. Esto también es corroborado por la aparición de yeso primario y vetas de carbón con tendencia N-S expuestas en forma paralela a la reconstrucción de la línea de costa (Hungerbühler et al., 2002). El alto contenido de azufre de los carbones (Putzer, 1968) sugiere la formación en un medio costero, tales como marismas salinas (Styan y Bustin, 1984). Además, la alteración con intervalos de yeso y carbón (contienen fósiles, hojas que indican un clima tropical bajo; ej. Berry, 1945), sugiere que la deposición se produjo en diversas condiciones de seco y húmedo a lo largo del borde de la llanura costera (Hungerbühler et al., 2002).

1.2.5. Formación Cerro Mandango.

Los afloramientos están dispuestos con una orientación SSE-NNW, teniendo un espesor máximo de 1000 m aproximadamente, los mismos que ocurrieron dentro de un sinclinal entre Vilcabamba y Malacatos (Kennerley, 1973). Descansa sobre la formación Santo Domingo y antiguas rocas metamórficas con disconformidad angular y en parte recae concordante sobre la formación Quinara. Se observa claramente una tendencia granocreciente de la formación entre las sucesiones del miembro arenisca (inferior) y del miembro conglomerado (superior) (Hungerbühler et al., 2002).

Esta formación ocupa casi todo el ancho de la cuenca de Vilcabamba, al aflorar en gran parte al sur de la cuenca de Malacatos. En la parte sur se encuentra sobre la formación Loma Blanca y de manera majestuosa aflora en el pico Cerro Mandango, donde lleva una estratificación más subhorizontal y forma peñascos sobresalientes alrededor de sus flancos.

El **miembro arenisca** lleva una estratificación ondulada y cruzada, compuesta de areniscas de granulometría media y gruesa, capas y láminas de gravas con cantos metamórficos, en menor cantidad limonitas.

El **miembro conglomerado** tiene una granulometría más gruesa en la parte meridional de la cuenca donde se aprecian con claridad discordancias progresivas. La parte de arenisca calificado en el miembro conglomerado se caracteriza por canales anchos, clastos metamórficos sosteniendo los conglomerados, areniscas gruesas y en poca cantidad limonitas. En ciertos lugares cristales blancos y líticos (clastos metamórficos) tobas, areniscas tobáceas y brechas de pómez; estas son intercaladas con suficientes capas de zircón marcador para análisis ZFT (Zircón Fission Track) (Hungerbühler et al., 2002).

Según los análisis realizados la formación pertenece al Mioceno tardío ($11,4 \pm 1,6$ y $7,7 \pm 0,8$ Ma.). La transición entre el miembro arenisca y el miembro conglomerado se produjo hace 10 Ma., y la progresiva disconformidad es datada de 8 Ma., (Hungerbühler et al., 2002). La sucesión de facies representa la transición de una carga de fondo dominado por un sistema fluvial arenoso y de un sistema abanico aluvial, que avanzó y se propagó de sur a norte. La fuente de material fue revisado exclusivamente situados en rocas metamórficas de la Cordillera Real (Hungerbühler et al., 2002).

1.2.6. Pórfido Purunuma.

El pórfido Purunuma se muestra como una extrusión eocénica y una cuña intercalada de limo y lutita negra que propone una sedimentación intercalada.

El pórfido Purunuma descansa discordantemente sobre la parte inferior de la formación Loma Blanca y sobre el basamento metamórfico perteneciente a la Unidad Chigüinda. (Hungerbühler, 2002).

CAPÍTULO II
MARCO CONCEPTUAL

2.1. Prospección gravimétrica.

La prospección gravimétrica consiste en la medida en superficie de las variaciones de la componente vertical del campo gravitacional terrestre. Con ello se puede determinar lo que ocurre a profundidad con respecto al contraste de densidades que existen entre las litologías presentes, por lo tanto, conociendo estas densidades se puede llegar a conocer la geometría de la litología con menor densidad (relleno sedimentario) y las estructuras tectónicas que no se puedan apreciar en superficie. (Cantos, 1987)

En geofísica aplicada, la gravedad absoluta no es del todo importante a diferencia de las medidas relativas. A estas mediciones se les hace ciertas correcciones con objeto de reducirlas a ciertas condiciones normales y como resultado nos dan anomalías que nos brindan información de los cambios de densidad al estudiar materiales de diferente litología. (Parasnis, Principios de Geofísica Aplicada, 1962)

Los equipos utilizados para el método gravimétrico a lo largo de la historia han sido: la balanza de torsión que mide las derivadas de la gravedad, el péndulo que mide la gravedad absoluta o la relativa y en la actualidad el más utilizado el gravímetro que mide la gravedad relativa.

“La interpretación de la anomalía gravimétrica, permite hacer una evaluación de la probable profundidad y en algunos casos la forma del cuerpo anómalo”. Philip Kearey – 2002.

“Para ingeniería y propósitos geológicos, los cambios en la gravedad deberían ser medidos con una exactitud de 0,1 uGal. (aproximadamente una cien millonésima parte del campo de la Tierra)” (Milson, 2003).

El valor de la gravedad se encuentra limitada por factores que afectan su medida, tales son: la latitud, la elevación, la topografía, las mareas y la densidad de los materiales en el subsuelo, los cuales son corregidos a posteriori, prestando mayor interés en las medidas provocadas por el contraste de densidades.

Con los datos obtenidos en campo y el posterior procesamiento mediante softwares establecidos se obtiene valores de anomalías de Bouguer que interpretan las zonas de mayor y menor profundidad a lo largo de la cuenca sedimentaria. Los perfiles finales resultan de la correlación de los modelos gravimétricos con la geología de la zona de estudio.

2.2. Principios físicos.

2.2.1. Ley de Newton. Constante de Gravitación Universal.

Según (Cantos, 1987), la atracción de dos masas m_1 y m_2 es directamente proporcional a su producto e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia.

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Donde:

F - fuerza de atracción entre las masas m_1 y m_2 .

r - distancia entre los centros de masa de las dos partículas.

G - constante gravitacional universal.

Para la medición de la constante de gravitacional universal G Cavendish en 1797 utilizó una balanza de torsión con dos masas m_1 y m_2 colocadas a una cierta distancia en los extremos de un brazo y suspendida en el centro por un hilo de torsión. El brazo llevaba un espejo en donde se reflejaba un rayo de luz.

El experimento consistió en colocar dos pesas a una cierta distancia de los extremos y por la atracción que existe entre estas masas se midió el ángulo de giro y con ello se calculaba el coeficiente de torsión del hilo.

Utilizando la fórmula anterior cuando $m_1 = m_2 = 1 \text{ gramo}$ y $r = 1 \text{ cm}$, entonces $F=G$. El valor numérico actual es $6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ con dimensiones $M^{-1} L^3 T^{-2}$; en el sistema internacional (S.I.) $6,672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$ y en el sistema Cegesimal (c.g.s) $6,672 \times 10^{-8} \text{ dinas cm}^2 / \text{g}^2$.

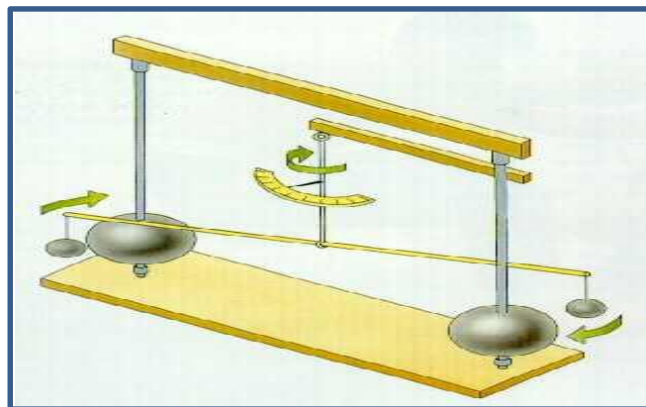


Figura 2. 1. La balanza de torsión de Cavendish.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Experimento_de_Cavendish

2.2.2. Gravedad en la Tierra.

La prospección gravimétrica tuvo su inicio a partir del campo gravitacional, una referencia importante en la Geodesia para determinar la forma de la tierra, debido a que según estudios ésta no es una esfera homogénea y su superficie no es perfectamente lisa y la gravedad real difiere en diferentes puntos sobre la superficie dependiendo de su localización.

La magnitud de la gravedad en la Tierra se ve afectada por cinco limitantes: latitud, elevación, topografía, mareas terrestres y la más importante la variación de densidad por efecto del cambio de densidad de las rocas estudiadas. Debido a estos factores es recomendable hacer las correcciones pertinentes con el equipo de trabajo y con el software para determinar una anomalía.

Una anomalía gravimétrica es generalmente mucho menor que los cambios de gravedad producidos en latitud y elevación, aunque mayor con respecto a las producidas por efectos de las mareas y topográficos.

El valor de la gravedad sobre la superficie terrestre es aproximadamente de $9,80 \text{ m/s}^2$ en el ecuador y en los polos de $9,83 \text{ m/s}^2$, ésta última es mayor debido a que la tierra es achatada hacia los polos, por lo tanto está más próximo al centro de la tierra que los situados en el ecuador, y una masa de gravedad de 1 Kg pesa alrededor de 5 g más en los polos que en el ecuador. (Parasnis, 1971).

La prospección gravimétrica es utilizada para varias investigaciones, por ejemplo una anomalía importante en exploración petrolera esta entre 10 mGal o 0,001, mientras en la exploración minera una anomalía de interés puede ser 1 mGal. Así las variaciones en g que son importantes en prospección, son menores en comparación con la magnitud de g y también con los efectos de la latitud y la elevación.

2.2.3. Medidas de la Gravedad.

Existen dos medidas de gravedad: las absolutas y las relativas.

Las medidas absolutas se consiguen de dos maneras: a) con el péndulo, b) estudiando la caída libre de los cuerpos.

Las medidas relativas se puede realizar a través de métodos dinámicos como el péndulo o métodos estáticos (balanza de torsión y gravimétricos).

En el caso de las prospecciones gravimétricas lo más importante son las medidas de gravedad relativa, debido al problema que poseen las medidas absolutas al estimar la gravedad con la aproximación de una millonésima de g, es decir, con la aproximación de 1 miligal.

2.3. Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre.

2.3.1. Con la Latitud.

En 1962 Ritche anunciaba que la gravedad variaba de un punto a otro y este fenómeno fue aclarado por Newton y Huygens al explicar que el motivo de la variación es debido a que la tierra no era de forma esférica. Siendo de esta manera la gravedad mínima en el Ecuador y en los polos una gravedad máxima al estar más cerca al centro de la tierra. A esto se le suma la del efecto de la rotación de la tierra, la fuerza centrífuga que es máxima en el Ecuador y nula en los polos y siempre opuesta a la fuerza de gravedad. Como resultado de este efecto la gravedad difiere en ambas zonas siendo 978 cm/seg² en el Ecuador y 983 cm/seg² en los polos.

En 1930, se determinó la Formula Internacional de la Gravedad aceptada por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG):

$$g_o = 9,78049(1 + 0,0052884 \text{ sen}^2\phi - 0,0000059\text{sen}^22\phi) \text{ (m/s}^2\text{)}$$

2.3.2. Con la Altitud.

Como las observaciones de gravedad se hacen sobre la superficie terrestre a una altura h sobre el nivel del mar, se debe considerar las variaciones de la gravedad respecto a esta altitud. Con ello tomaremos en cuenta tres tipos de correcciones: Corrección de aire libre o Faye, Corrección de Bouguer, y corrección topográfica, estas correcciones nos permitirán reducir la gravedad observada al nivel del mar. (Cantos, 1987)

2.3.3. Con el Tiempo.

2.3.3.1. Efecto de las mareas.

También llamado efecto luni-solar debido a las atracciones gravíticas del sol y la luna que causan tal efecto que depende de la posición astronómica de ambos y de la altitud, siendo

variables con el tiempo. El efecto que producen estas fuerzas es una pequeña deformación de la superficie marina. Este efecto también afecta a los instrumentos de medición gravimétrica y da lugar al efecto luni-solar o de las mareas.

En prospección este tipo de efectos no es importante ya que se eliminan con la corrección de la deriva, sin embargo para trabajos a mayor detalle, donde se requiere de mayor precisión se calcula la corrección lunisolar mediante tablas que anualmente se calculan con este objeto. (Cantos, 1987)

2.3.3.2. Deriva Instrumental.

El gravímetro considerado como un instrumento de precisión, da lugar a lo que se llama deriva instrumental (o variación con el tiempo de la lectura de una estación), lo que quiere decir, que si tomamos una medida en un mismo punto en el espacio esta variará ligeramente en sus valores. Esta deriva está producida principalmente por la fatiga del sistema de muelles, o por las variaciones de temperatura, aunque también existen razones incontrolables y otras calculables como es el efecto luni-solar o de las mareas. (Cantos, 1987)

La reducción de la gravedad al geoide habrá que compararla con la gravedad teórica, para deducir las anomalías de la gravedad.

Anomalía de Bouguer (Δg) = Gravedad Observada + corrección aire libre – corrección de Bouguer + corrección topográfica – Gravedad Teórica.

2.4. Medición de la gravedad.

La gravedad se mide generalmente en Gal (1 Gal = 1 cm/s²), en Unidades CGS. En prospección gravimétricas se utiliza el miligal (1 mGal = 10⁻³ Gal), o el microgal (1 μ Gal = 10⁻⁶ Gal), debido a que la unidad de Gal es muy grande.

En el sistema SI, se utiliza el μ m/s², denominado unidad gravimétrica, equivalente a 0.1 mGal (1 u.g. = 0.1 mGal). En prospección gravimétrica, esta unidad no se la ha utilizado con frecuencia, se tomado como unidades referentes tanto el mGal, como el μ Gal, las mismas que se han utilizado en este trabajo de investigación y que facilitan la correlación con investigaciones de prospección gravimétricas realizadas con anterioridad en cuencas sedimentarias similares.

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA

La metodología empleada para la presente investigación, se basa en la toma de medidas de gravedad relativa en puntos o estaciones ubicados a lo largo de dos perfiles gravimétricos. Para esto es necesario obtener la gravedad absoluta en un punto base conocido para empezar el ciclo de medida. En gabinete a estos datos se les realiza las correcciones pertinentes y se obtiene valores de anomalías, para finalmente modelar la geometría del relleno sedimentario de la cuenca sedimentaria ajustando la anomalía observada con la calculada.

3.1. Trabajo de Campo.

3.1.1. Validación de información existente.

Esta es la etapa inicial de la presente investigación que conlleva a la recolección previa de información existente tanto geológica como topográfica de investigaciones anteriores pertenecientes a la zona de estudio para facilitar el trabajo posterior de campo y oficina, además de esto la recolección de información pertinente de manuales de operación de los equipos utilizados para la presente investigación tales como Autograv CG-5 de Scintrex y Trimble R6 y los software utilizados para el procesamiento de datos y posterior interpretación de mapas de anomalías y perfiles obtenidos. Toda esta información facilitó el desarrollo del trabajo de investigación para conocer el polígono a detalle tanto geológica como estructuralmente y tener una idea del manejo e interpretación del equipo en uso.

3.1.2. Levantamiento de datos Gravimétricos.

Para las campañas de levantamiento de datos gravimétricos se utilizó como equipo principal un gravímetro digital Autograv modelo CG-5 DE Scintrex que tiene una precisión de 0.001 mGal y un rango de medida de más de 8000 mGal, que nos da medidas de gravedad relativa de tipo lineal automatizado por microprocesadores. (Scintrex Limited, 2009), y un GPS diferencial, modelo Trimble R6 con precisión milimétrica que consta de dos antenas receptoras GPS configurables a través de una controladora manual mediante bluetooth.

Para precisar la toma de medidas (x, y, z) de las estaciones gravimétricas se configuró el equipo en modo fast static que toma medidas con una precisión horizontal de 3 mm \pm 0,5 ppm RMS y en vertical de 5 mm \pm 0,5 ppm RMS, con un mínimo de cuatro satélites y referido al esferoide WGS84. Para la toma de medidas se consideró una máscara de elevación de 10° y un tiempo de lectura de 5 minutos para cada punto de medida.

Para la base topográfica, se tomó como base una estación ubicada en la cuenca de Malacatos que de alcance para los puntos de observación. A partir de esta estación se hizo el amarre del punto de base para la antena del DGPS. (Ver Figura 3.1)



Figura 3.1. Estación Base Malacatos.
Fuente: Elizalde, 2015

En la base tomada con el Trimble R6, se realizó la toma de datos en modo estático, en un tiempo de 60 minutos y posteriormente se realizaron las correcciones obteniendo coordenadas con precisión en milímetros. De esta manera se consiguió las siguientes coordenadas planas UTM.

Tabla 3.1. Base Topográfica Malacatos. Coordenadas planas UTM, referidas al WGS 84, Zona 17 S.

COORDENADAS UTM (m) (Elipsoide WGS 84)	
NORTE	9533530.805
ESTE	693295.463
ALTURA ELIPSOIDAL	1505.277

Fuente: Elizalde, 2015

Estos equipos fueron facilitados por parte del Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil, de la Universidad Técnica Particular de Loja.

La toma de medidas de gravedad absoluta se los realizó en dos perfiles con orientación Noreste – Suroeste, de basamento a basamento (Ver Figura 3.2). La longitud de cada perfil es aproximadamente de 8Km con una separación promedio de 250 m.

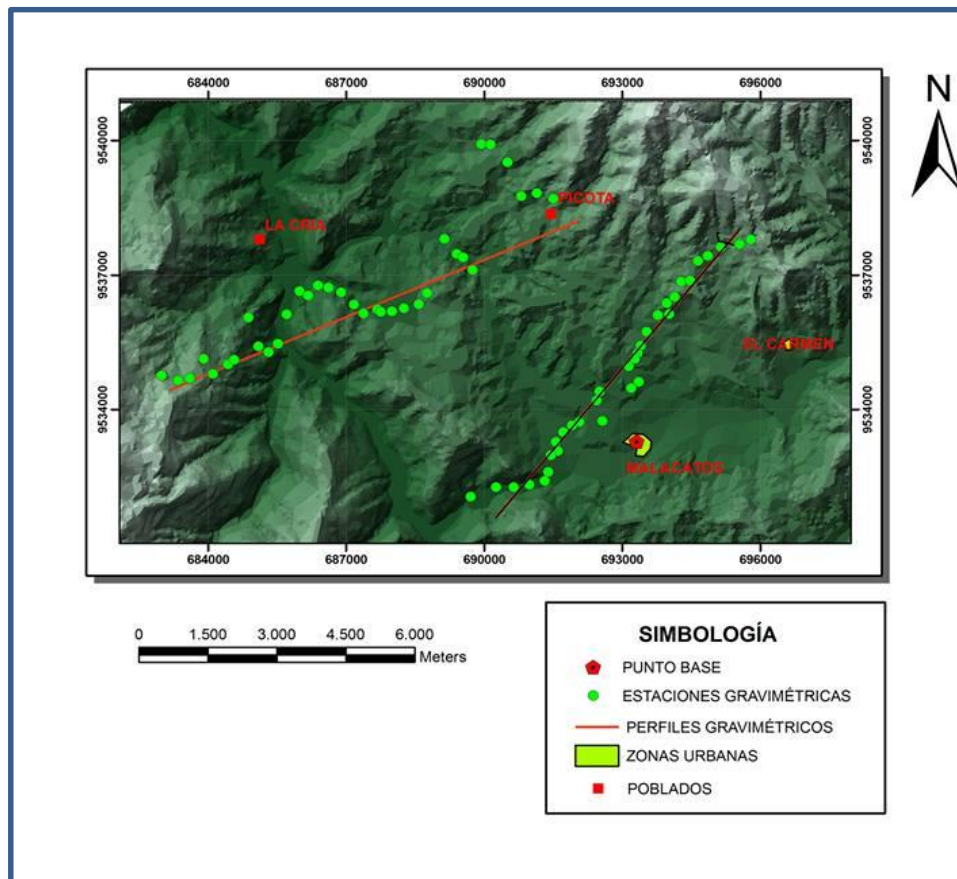


Figura 3. 2. Mapa de puntos de Observación gravimétrica.
Fuente: Elizalde, 2015

Para la toma de datos se utilizó el método de ciclo de medidas que consiste en tomar la primera y última medida de la campaña gravimétrica en un punto conocido de gravedad absoluta, en este caso, se consideró la base gravimétrica de la Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), establecida a partir del año 2010, con un valor de gravedad conocida (977432.01 mGal y su cota de 2110.8m). (Ver Figura 3.3)

La desviación estándar aceptada en los datos gravimétricos estaba en el rango de 0.010 y 0.040 mGal. El rango de error permitido al tomar una medida varía entre 0.001 y 0.005 mGal. Se tomó en consideración todas estas recomendaciones para una buena toma de medidas en campo obteniendo buenos resultados, además de todas las correcciones previas a las salidas de campo como la corrección de mareas.



Figura 3. 3. Equipo utilizado para levantamiento de datos gravímetros.

Fuente: Elizalde, 2015

3.1.3. Levantamiento geológico estructural de la zona de estudio.

Para esta etapa de investigación se utilizó el sistema de coordenadas geográficas UTM, con Datum WGS 1984, haciendo uso de la zona 17S.

Consiste en la recolección de datos geológico-estructural en campo para la posterior correlación con los perfiles gravimétricos. El mapeo geológico se lo realizó a lo largo de las vías de acceso terrestre en taludes artificiales y naturales, facilitando de esta manera el desarrollo del trabajo, siendo la única limitante la falta de afloramientos al estar cubiertos por vegetación no permitiendo el mapeo de estructuras a superficie. Los parámetros tomados en la recolección de información geológica-estructural fueron datos litológicos de las formaciones sedimentarias, ígneas y basamento metamórfico, elementos estructurales de los contactos litológicos, fotografías de respaldo, ubicación geográfica por medio del GPS.

El objetivo del mapeo en superficie es tener una imagen clara de las estructuras para determinar la continuidad en el subsuelo de las mismas a través de los datos de gravedad, obteniendo mapas de carácter geológico-estructural que permitan actualizar y aportar información.



Figura 3. 4. Toma de datos de campo para el levantamiento geológico – estructural.
Fuente: Elizalde, 2015

3.2. Trabajo de gabinete.

Luego de la obtención de datos de campo se pasa a un análisis y procesamiento de datos manipulados mediante software que permiten hacer las correcciones de los datos de gravedad y topografía, conseguir perfiles y mapas de anomalías para posteriores correlaciones.

3.2.1. Procesamiento de datos de campo.

A Los datos obtenidos de campo se les realiza las respectivas correcciones tales como: corrección de aire libre (por efecto de la altitud de las estaciones con respecto al datum), de Bouguer (atracción que ejerce la masa que hay entre la elevación de las estaciones y el datum) y corrección topográfica. Todas las correcciones fueron hechas en base a software actualizado que facilitan su cálculo en tiempo y precisión.

Los programas utilizados fueron CICLOS (versión 11, 1996-2010), ANOMALÍA (versión 11, 1996-2010) Y PERFIL (versión 11, 1996-2010), desarrollados por J. Galindo Zaldívar, Departamento de Geodinámica de la Universidad de Granada. Y la versión demo del programa GravMaster desarrollado por Geotools Corporation utilizado para la corrección topográfica.

El objetivo principal del cálculo de las correcciones es obtener la anomalía de Bouguer, representada por la siguiente fórmula:

Anomalía de Bouguer: g medida + (corrección de aire libre – corrección de Bouguer + corrección topográfica) – g teórica a nivel del mar.

3.2.2. Corrección topográfica.

La corrección topográfica, se la hizo mediante el programa Gravmaster (versión 1.30; 1999-2000), que utiliza el método de los círculos de Hammer (1939, 1982) que ayuda con la corrección hasta 20 Km. Se utiliza como topografía de referencia el modelo digital de terreno SRTM 3 con malla de resolución de 90 m, generado por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, NASA por sus siglas en inglés. La densidad considerada para el terreno en este sistema de corrección es el mismo que se utiliza para la corrección de Bouguer, es decir $2,67 \text{ g/cm}^3$.

Con los datos adquiridos del basamento metamórfico en campo, calculamos la anomalía regional y para poder obtener la anomalía residual es necesario restarle de la anomalía regional a la anomalía de Bouguer.

3.2.3. Procesamiento de Modelos con GravMag V1.7

El programa GRAVMAG V.1.7 del British Geological Survey, Pedley et al. (1993), permite modelar las anomalías residuales generando perfiles bidimensionales. Para el procedimiento, se consideró un valor de densidad $2,3 \text{ g/cm}^3$ para las rocas sedimentarias y $2,67 \text{ g/cm}^3$ para las rocas del basamento metamórfico. Para obtener el modelo de las estructuras se determina la anomalía residual. Se dibuja un modelo con la topografía y polígonos irregulares de geometría definida por vértices, a los que se le asigna una densidad constante que se obtiene en función del conocimiento de la geología de la zona de estudio. Una anomalía residual teórica a lo largo del perfil es generada por este programa y se comprueba la calidad del ajuste al compararla con la curva de anomalía real obtenida a partir de las medidas de campo.

CAPÍTULO IV
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Geología local.

Conjuntamente con el levantamiento de datos gravimétricos se realizó un estudio geológico-estructural para relacionar y confirmar la geología expuesta por otros autores. Para tal estudio se utilizó el mapa geológico de Gonzanamá a escala 1:100.000 realizado por J.B. Kennerley (1975) y un mapa de validación geológica-estructural de la cuenca sedimentaria de Malacatos a escala 1:10.000 realizado por Medina (2014). Además, se ha tomado en cuenta el documento publicado por Hungerbühler et al. (2002) y estudios realizados por Galindo et al., (2010).

De acuerdo al trabajo de campo realizado a lo largo del polígono de estudio se pudo constatar la secuencia litológica que expone autores como Hungerbühler et al. (2002). La densa vegetación existente complicó la evidencia de estructuras mayores como fallas y pliegues, por lo que se vio necesario recurrir a mapas geológicos e información más reciente realizado en esta zona.

El mapa geológico realizado en el presente trabajo de investigación muestra las diferentes formaciones geológicas, contactos litológicos y estructuras a profundidad que se consiguió con el estudio gravimétrico. Con respecto a las formaciones sedimentarias se puede observar la dirección de las capas hacia el este impulsados por fuerzas de compresión desde la parte oeste, por lo cual, los estratos de las formaciones Santo Domingo y San José tienden a formar cuestas monoclinales. (Ver Anexo).

4.1.1. Basamento.

Está constituida por rocas de metamorfismo bajo tales como: esquistos, cuarcitas y filitas. Afloran principalmente en la zona noreste y suroeste del polígono de estudio específicamente a lo largo de toda la parte este del río Solanda. Algunas rocas se encuentran diaclasadas y tiene una esquistosidad con dirección hacia el oeste con un ángulo de 20°- 55° de inclinación.



Figura 4. 1. Afloramiento de esquistos sericíticos metamórficos en el sector San Miguel al sureste del río Solanda (X: 683898 Y: 9535134).
Fuente: Elizalde, 2015

4.1.2. Volcánico.

Yace discordantemente sobre el basamento metamórfico Paleozoico y se encuentra subyacente a las formaciones terciarias sedimentarias de la cuenca de Malacatos. Se trata de rocas volcano-sedimentarias. Está constituido de tobas aglomeráticas, andesitas, pórfido andesítico-riolítico, brechas volcánicas. En coluvios se observa algunos granitos y granodioritas.

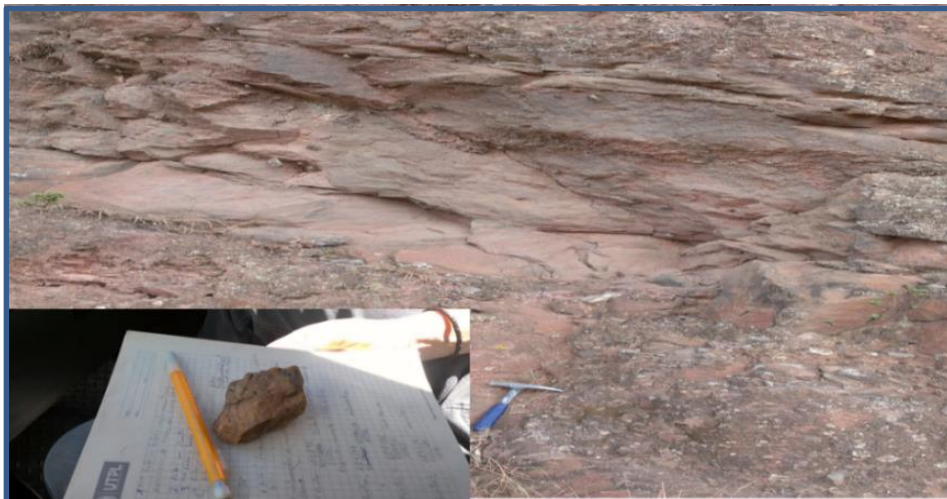


Figura 4. 2. Afloramiento de Tobas volcánicas, formación Loma Blanca
Fuente: Elizalde, 2015

4.1.3. Secuencia sedimentaria.

Corresponde a las siguientes formaciones San José constituida de areniscas calcáreas, lutitas ubicadas al oeste polígono de estudio, la formación Santo Domingo que comprende dos miembros (carbón y yeso) con tendencia N-S que afloran en la zona central y los conglomerados pertenecientes a la formación Cerro Mandango que presentan clastos metamórficos angulosos de 3 a 5 cm de diámetro mayormente cuarcitas, filitas, esquistos que provienen de la Unidad Chigüinda. Presentan una matriz arenosa. La formación Cerro Mandango se relaciona con la formación Quillollaco en la cuenca de Loja similitud en litología y edad geológica.

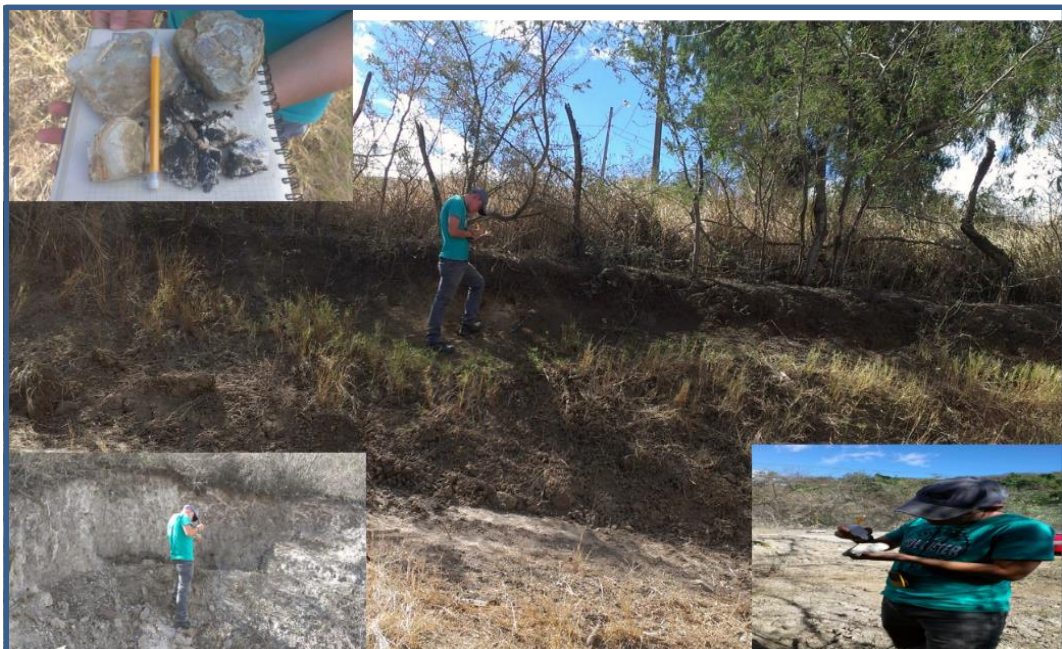


Figura 4. 3. Afloramiento de areniscas calcáreas de la formación San José, yeso-carbón de la formación Santo Domingo.
Fuente: Elizalde, 2015



Figura 4. 4. Afloramiento de la formación Cerro Mandango (coordenadas UTM X: 692565; Y: 9533746).

Fuente: Elizalde (2015)

4.1.4. Depósitos aluviales.

Los depósitos aluviales se encuentran en los márgenes de los ríos Solanda y Malacatos formando terrazas primarias, constituidas principalmente de clastos metamórficos mal clasificados y también compuestas de gran cantidad de arcilla.



Figura 4. 5. Terrazas aluviales en los márgenes del río Solanda.

Fuente: Elizalde, 2015

4.2. Estratigrafía y Estructuras.

La cuenca sedimentaria de Malacatos se encuentra formado por las siguientes formaciones terciarias de arriba hacia abajo: El pórfido de Purunuma, la formación Loma Blanca, formación San José de edad Miocénica media a tardía, formación Santo Domingo del Mioceno medio tardío (Hungerbühler, 2002) y la formación Cerro Mandango la cual

descansa sobre la formación Santo Domingo y antiguas rocas metamórficas con disconformidad angular que consta de dos miembros conglomerado y arenisca.

Los estratos en las formaciones sedimentarias San José y Santo Domingo se encuentran buzando fuertemente hacia el este por fuerzas de compresión que tuvieron mayor fuerza en la zona oeste. Estas formaciones se encuentran ubicados en la parte centro y este del polígono de estudio.

Con respecto a la estructuras la cuenca sedimentaria de Malacatos, consta de fallas de borde que limitan al basamento metamórfico de las secuencia sedimentaria. En la parte sureste del polígono consta de una falla normal que con respecto a la falla de borde de la parte sur corresponde a un semigraben de la misma manera ocurre en la zona noroeste a lo largo del contacto de la formación San José y la formación Loma Blanca; existe una falla normal que forma un semigraben con la falla de borde que se encuentra en la parte noreste.

Por lo tanto, existe una correlación entre ambos perfiles gravimétricos posiblemente exista una continuidad de fallas de borde y la profundidad del relleno sedimentario va aumentando de sur a norte, por lo tanto la mayor profundidad del relleno sedimentario se da específicamente en la parte centro-norte del polígono de estudio.

De acuerdo a la evolución tectónica se deduce que actuaron fuerzas de tensión que dieron apertura a la cuenca y fue relleno de sedimentos de las formaciones sedimentarias San José y Santo Domingo y posteriormente actuaron fuerzas de compresión que fue mayor en la parte oeste plegando las rocas hacia el este formando cuevas monoclinales.

4.3. Mapa de anomalía de Bouguer.

Los valores obtenidos de anomalía de Bouguer para la zona norte de Malacatos están comprendidos entre -168 y -222 mGal. Estos valores son típicos para regiones de corteza continental engrosada.

En la figura 4.6 se analiza el mapa de contornos generados para los valores de anomalía de Bouguer. Obteniendo como resultado valores menores a -212 mGal en la parte oeste de la zona de estudio.

Como resultado de los valores de anomalía residual se pudo determinar a mayor detalle que hay un cambio significativo de este a oeste, siendo en la parte noreste donde alcanza las mayores anomalías ubicados aproximadamente en las coordenadas UTM de norte a sur 9540000 m hasta 9536000 m y de oeste a este 692000 m hasta 696000 m.

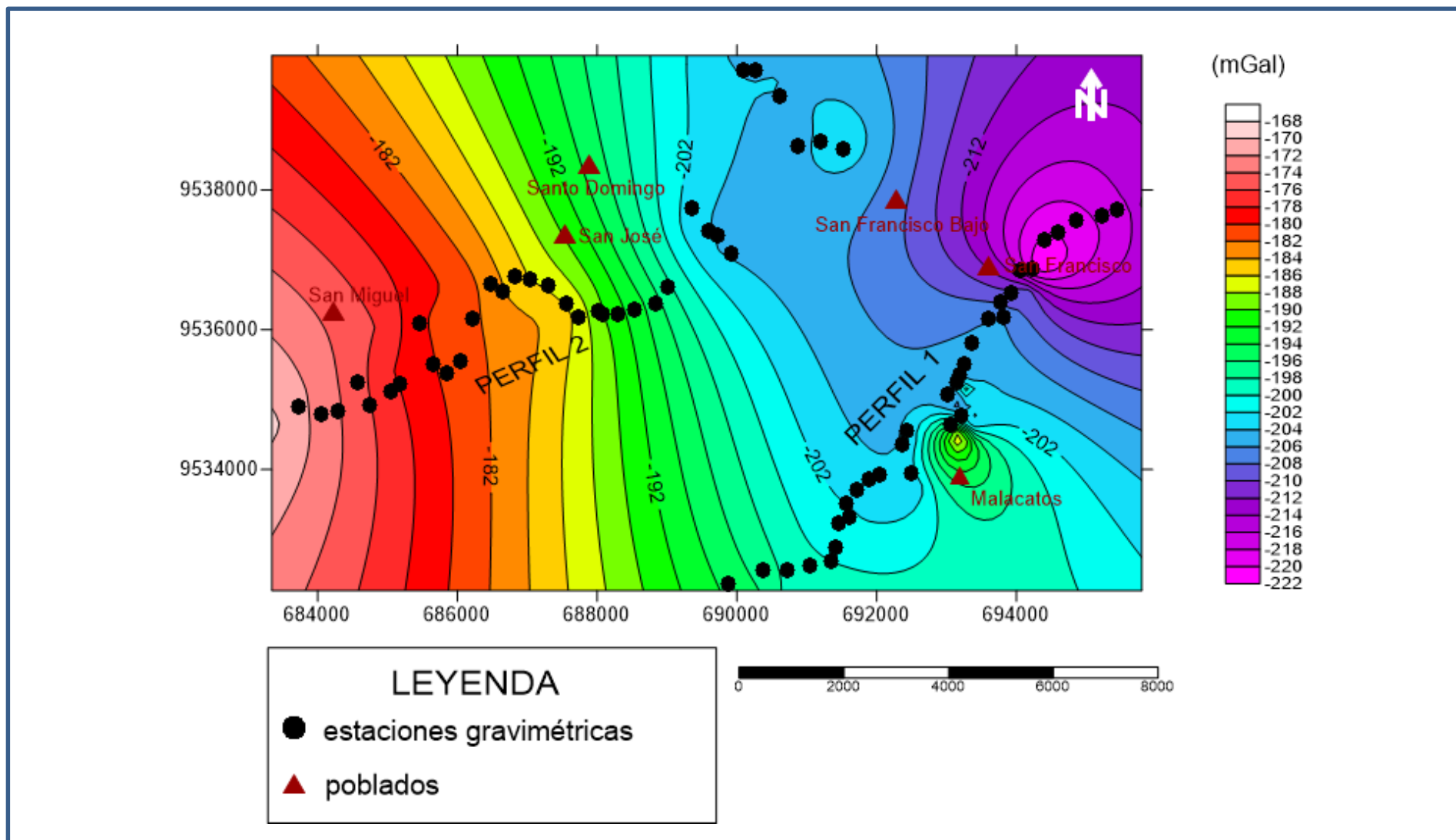


Figura 4. 6. Mapa de anomalías de Bouguer de la zona Norte de la cuenca Malacatos.
Fuente: Elizalde, 2015

4.4. Modelos gravimétricos y correlación Geológica.

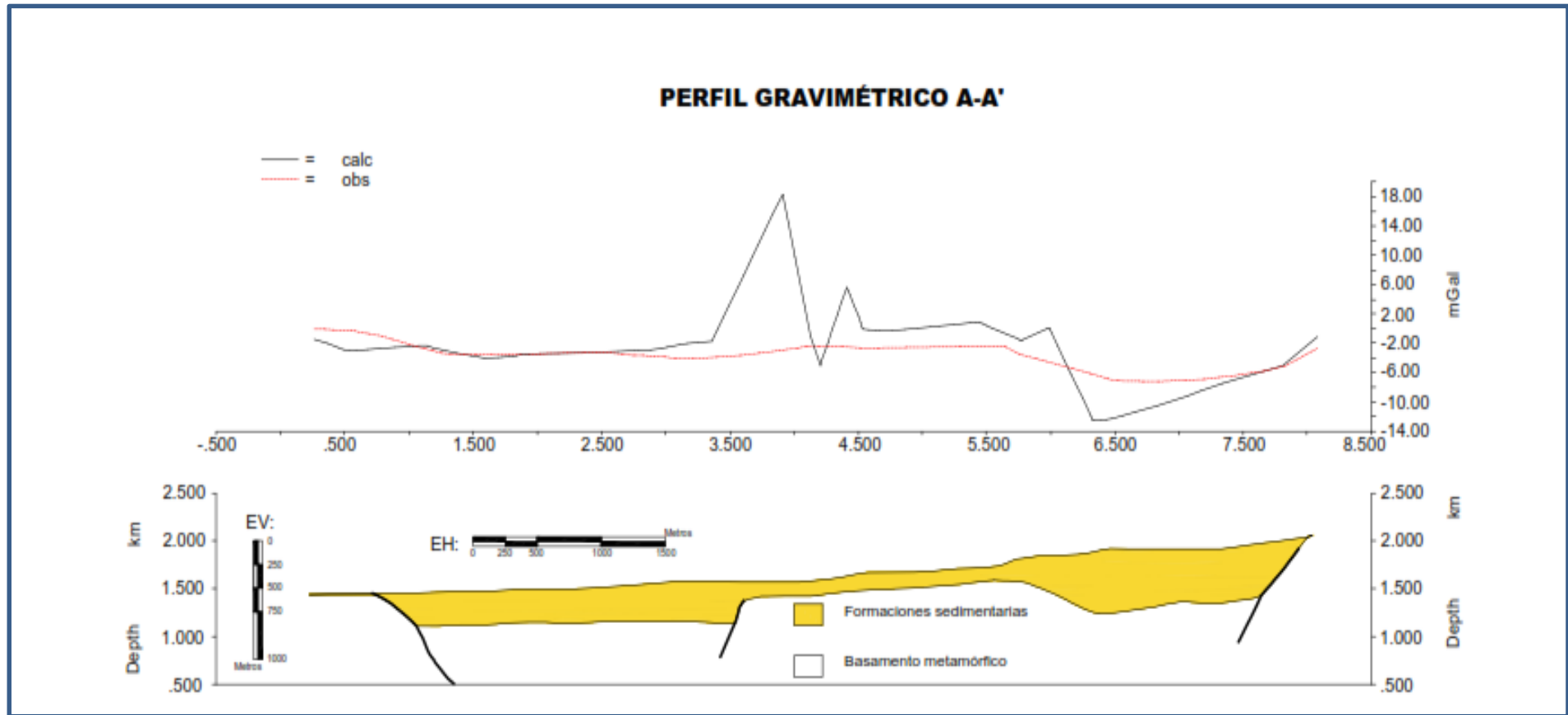


Figura 4. 7. Modelo gravimétrico del perfil A-A'
Fuente: Elizalde, 2015

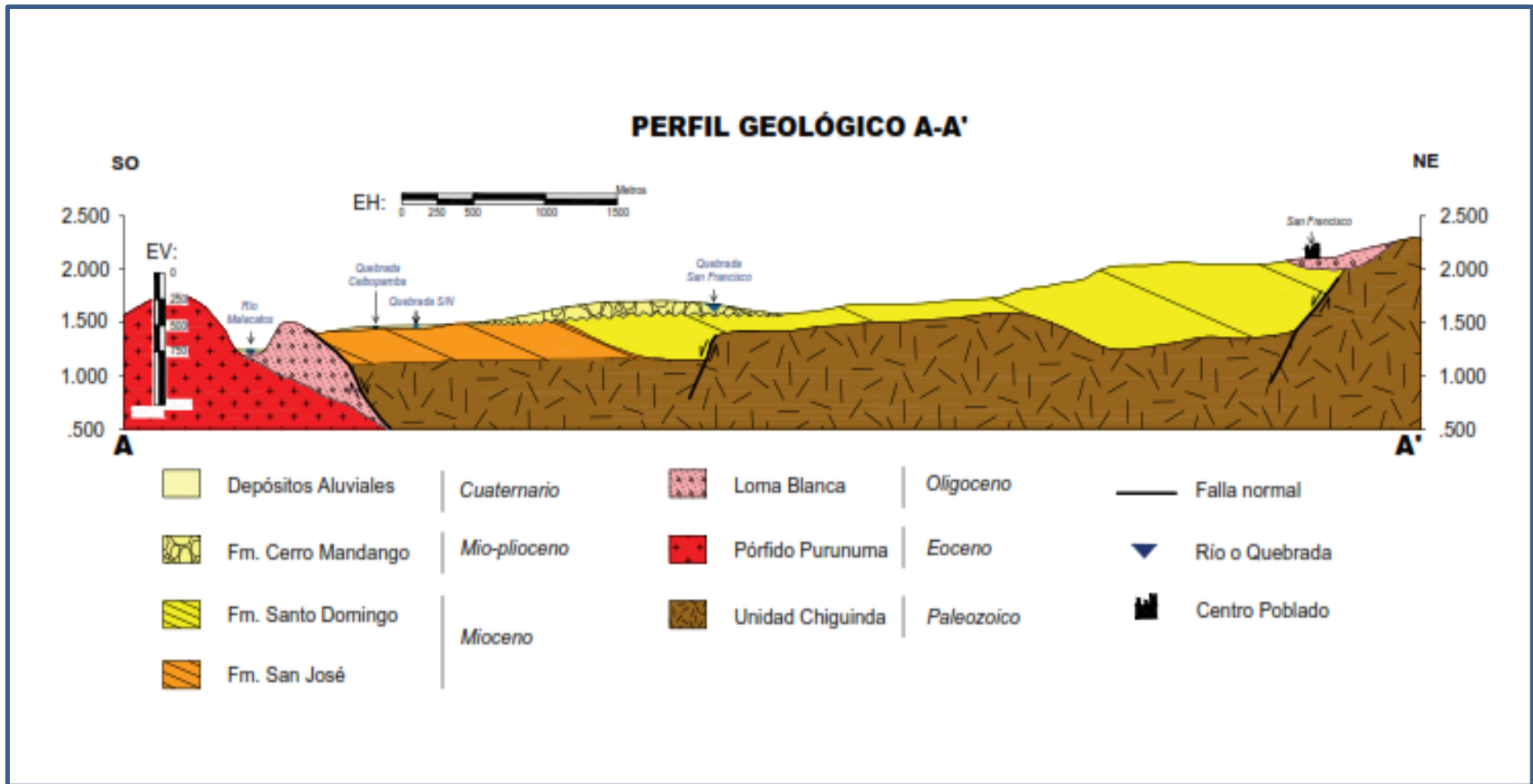


Figura 4. 8 Perfil geológico A-A'
Fuente: Elizalde, 2015

El primer perfil tiene una longitud aproximada de 8 Km con dirección Noreste- Suroeste. Según los resultados obtenidos en base a las medidas gravimétricas en campo y con el posterior modelamiento se pudo determinar que las partes extremas del perfil gravimétrico existe una mayor profundidad del relleno sedimentario notándose considerablemente en la parte este una profundidad aproximada de 600 m, considerándola como la parte más profunda de esa línea gravimétrica. En la parte céntrica se nota una disminución de profundidad que alcanza los 230 m aproximadamente.

La anomalía residual alcanza un máximo de -12 mGal que determina el lugar donde la profundidad del relleno sedimentario es mayor. Con respecto a las estructuras generadas en el modelo se pudo determinar dos fallas de borde de tipo normal buzando al Este y al Oeste que están limitando la secuencias sedimentaria presentes en esa zona, además en la parte central del perfil se halla otra falla de tipo normal que al correlacionarla con la falla de borde oeste, forma un semigraben.

Con respecto al mapeo geológico de campo se pudo determinar rocas de tipo sedimentario que buzando fuertemente hacia el este con una inclinación promedio de 30° pertenecientes a la formación Santo Domingo y San José, esta última que no se la pudo apreciar por estar cubierta de depósitos cuaternarios y suprayacente se encuentran los conglomerados de la formación Cerro Mandango con cantos redondeados de clastos metamórficos. Con respecto a las fallas que forman el semigraben, luego de que el bloque se haya hundido hubo una intrusión de pórfido Purunuma en la falla de borde oeste que aflora a la superficie para posteriormente empezar a depositarse las secuencias sedimentarias de las formaciones Santo Domingo, San José y discordantemente la formación Cerro Mandango.

Fuerzas tensionales dieron lugar a la apertura de la cuenca depositándose el relleno sedimentario y las rocas volcánico sedimentario de acuerdo a la geometría del basamento metamórfico, posteriormente actuaron fuerzas de compresión con mayor intensidad en la parte oeste que plegaron las rocas pertenecientes a las formaciones San José y Santo Domingo con dirección hacia el este formando cuevas monoclinales.

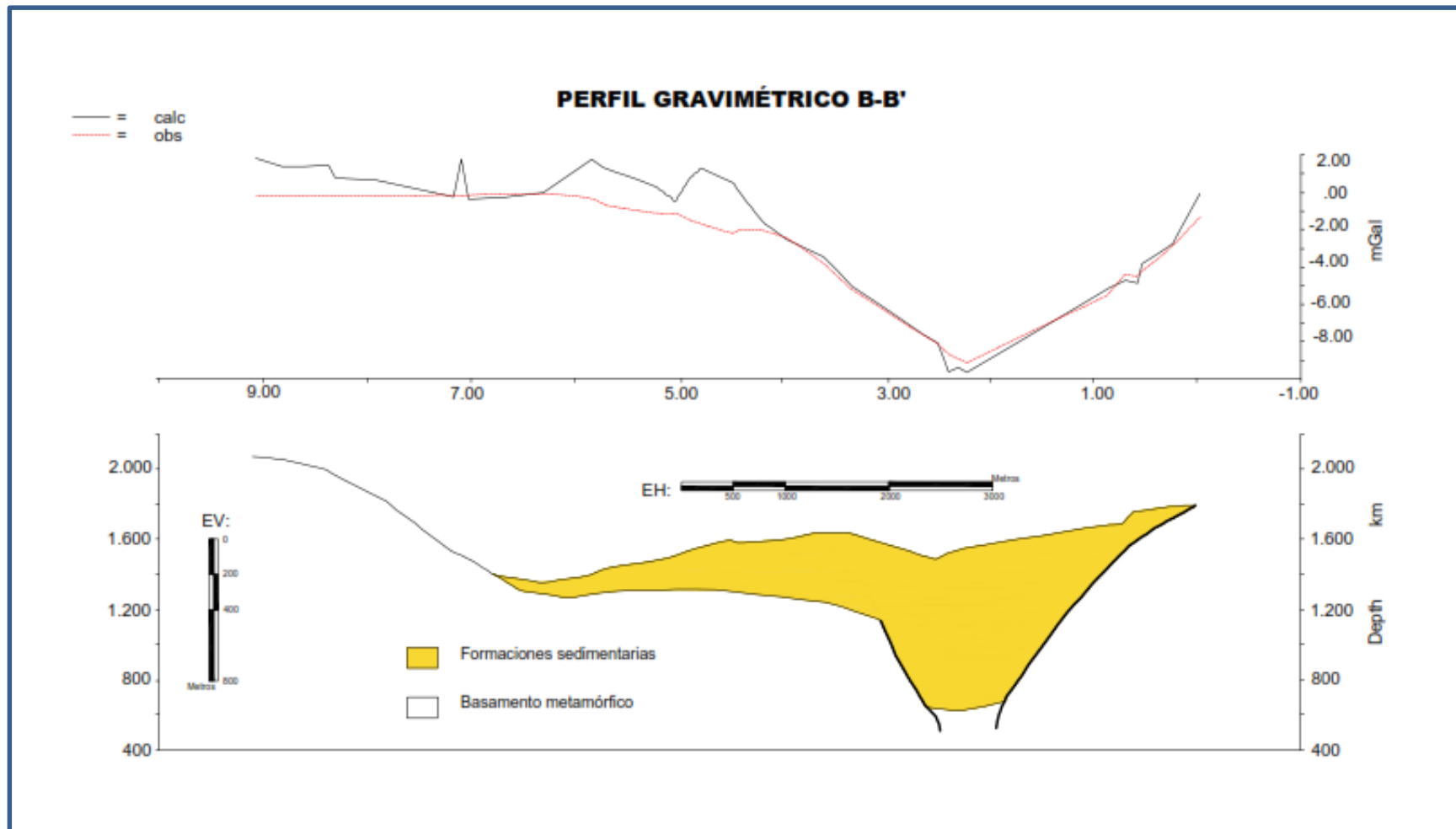


Figura 4. 9 Modelo gravimétrico del perfil B-B'
Fuente: Elizalde, 2015

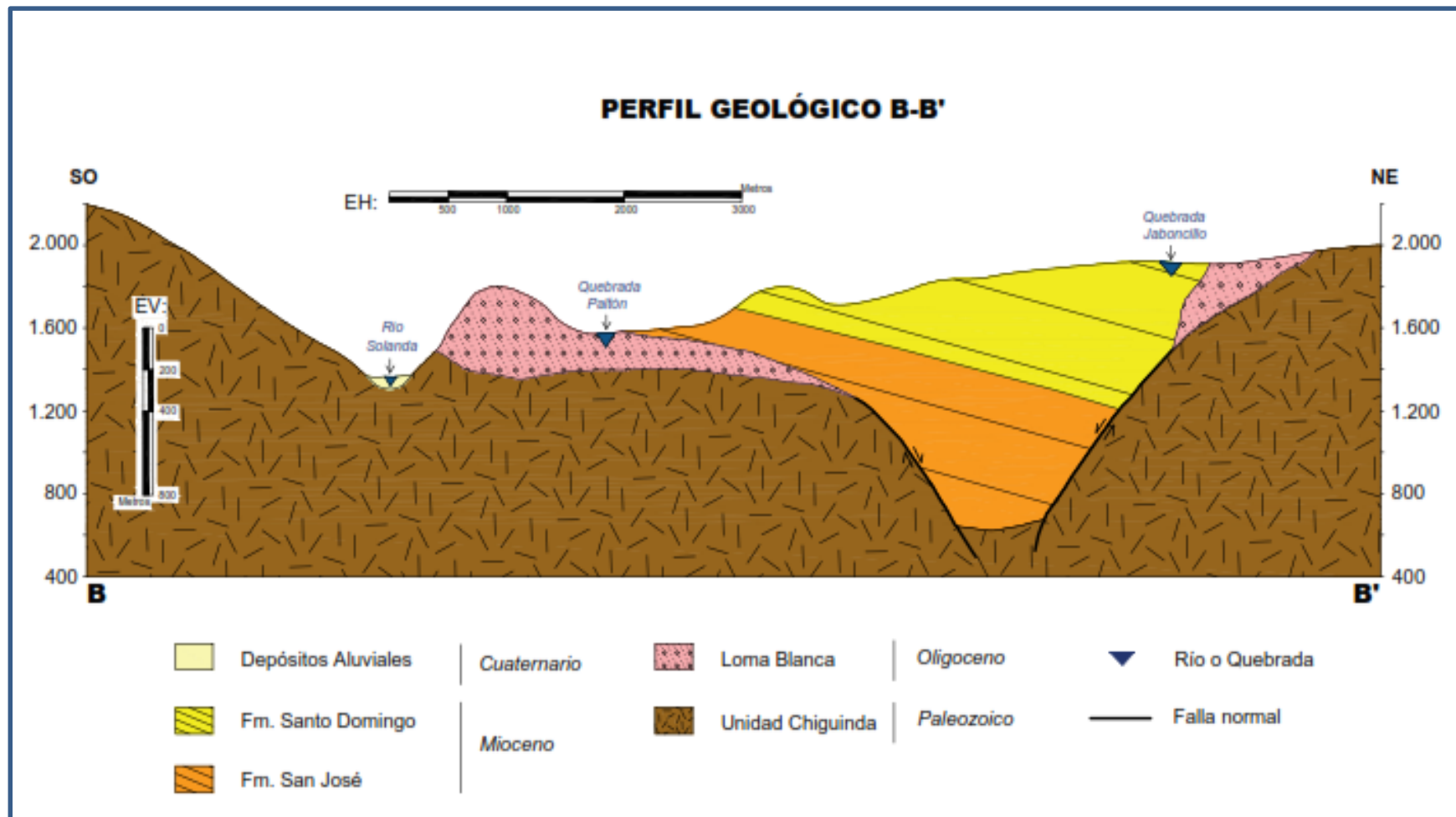


Figura 4. 10 Perfil geológico B-B'
Fuente: Elizalde, 2015

El segundo perfil tiene una longitud aproximada de 9 Km con una tendencia noreste-suroeste. El relleno sedimentario tiene un cambio de este a oeste según el modelo gravimétrico, donde la parte oriental tiene una profundidad de 900 m aproximadamente interpretado como la parte más profunda de la zona.

La anomalía residual en este perfil alcanza un máximo -9,5 mGal, que indica que es el lugar donde la geometría del relleno sedimentario es mayor con respecto al resto del perfil. De la misma forma existen fallas de borde de tipo normal, se encuentra en el límite de las rocas miocénicas de las formaciones Santo Domingo y San José que tienen un buzamiento hacia el este. Al igual que el perfil anterior las fallas normales están formando un semigraben.

De acuerdo a la geología local, se encontraron rocas pertenecientes a la Unidad Chigüinda, formación Loma Blanca y las formaciones sedimentarias Santo Domingo y San José que fueron depositadas posterior al hundimiento del bloque fallado.

De la misma manera en esta zona la cuenca se abrió debido a fuerzas de tensión formando fallas y luego se dio el relleno con los sedimentos por gravedad y las rocas pertenecientes a la formación Loma Blanca, posterior a este evento ocurre compresión en ambos bordes de la cuenca siendo más intenso en parte oeste, por lo tanto, las rocas terciarias se encuentran buzando fuertemente hacia el este.

4.5. Discusión de resultados.

Feininger y Seguin (1983) en base a estudios gravimétricos realizados en la zona de Ecuador han determinado valores regionales de la anomalía simple. Para la zona de Malacatos se puede aproximar los siguientes valores -250 mGal y -222 mGal por estar en la zona sur y los valores obtenidos con la prospección gravimétrica en el presente estudio se determinaron valores en un rango semejante al obtenido por tales autores, los cuales corresponden a corteza continental engrosada.

Con los datos obtenidos a través del proceso e interpretación gravimétrica se determinó que en la zona noreste del perfil uno y dos son las zonas donde el relleno sedimentario es más profundo con 600 m y 900 m respectivamente y con valores de anomalía residual de -12mGal y -9,5mGal.

De acuerdo a las estructuras encontradas a profundidad, se corroboró con los aportes de autores anteriores que han realizado la geología del sector superficialmente en base a fotografías aéreas y mapeo de campo; y se pudo constatar que lo expuesto por Kennerley concuerda con la gravimetría realizada lo cual indica que estas estructuras continúan a profundidad. Kennerley habla de fallas normales que limitan las formaciones sedimentarias, sin embargo Hungerbühler expone que la fallas de borde son de tipo inverso por lo tanto hay diferentes propuestas con lo expuesto por Hungerbühler y el presente estudio gravimétrico.

Con respecto a los modelos gravimétricos obtenidos se puede determinar que la parte noroeste es la zona que tiene mayor profundidad de relleno sedimentario con 600 y 900 metros respectivamente alcanzando valores de anomalías de -12 mGal y -9,5 mGal. Por lo tanto, analizando ambos perfiles se puede concluir que la profundidad del relleno sedimentario aumenta a medida que nos dirigimos hacia el norte donde la profundidad es de 900 m.

Estructuras plegadas como anticlinales y sinclinales no se pudieron encontrar a profundidad, lo cual concuerda que en la zona de Malacatos específicamente en la formación Cerro Mandango los conglomerados se encuentran dispuesto de forma subhorizontal siendo en la parte sur, el sector de Quinara y Vilcabamba donde los estratos se encuentran fuertemente plegados.

CONCLUSIONES

- Con los modelos gravimétricos resultantes, se concluyó que la parte noroeste es la zona con mayor profundidad de relleno sedimentario con 600 y 900 m respectivamente alcanzando valores de anomalías de -12 mGal y -9,5 mGal. En el análisis de los dos perfiles se puede decir que la profundidad del relleno sedimentario aumenta a medida que nos dirigimos hacia el norte donde la profundidad es de 900 m.
- De acuerdo al mapeo geológico de campo se pudo comprobar que las formaciones geológicas expuestas por autores como Hungerbühler y Kennerley son las mismas encontradas en el polígono de estudio, y las estructuras tectónicas como fallas se relacionan con los mapas estructurales recopilados para la investigación, discrepando únicamente con el análisis de Hungerbühler que expone fallas inversas en los límites de las formaciones sedimentarias.
- Los estratos de las formaciones Santo Domingo y San José se encuentran buzando fuertemente hacia el este debido a fuerzas de compresión en los bordes de la cuenca siendo de mayor intensidad en la parte oeste, por lo cual los estratos se encuentran buzando fuertemente hacia el este con una inclinación promedio de 30°, formando cuevas monoclinales.
- Para definir los perfiles gravimétricos de la zona de estudio se necesita de información recopilada y corroborar en campo para posteriormente realizar el procesamiento de datos, obteniendo modelos gravimétricos que indican la geometría y profundidad del relleno sedimentario.
- Con los datos recopilados e interpretados junto con la geología de campo realizada, se pudo constatar la continuidad de las estructuras en profundidad, debido a que solo se disponía de información de superficie.

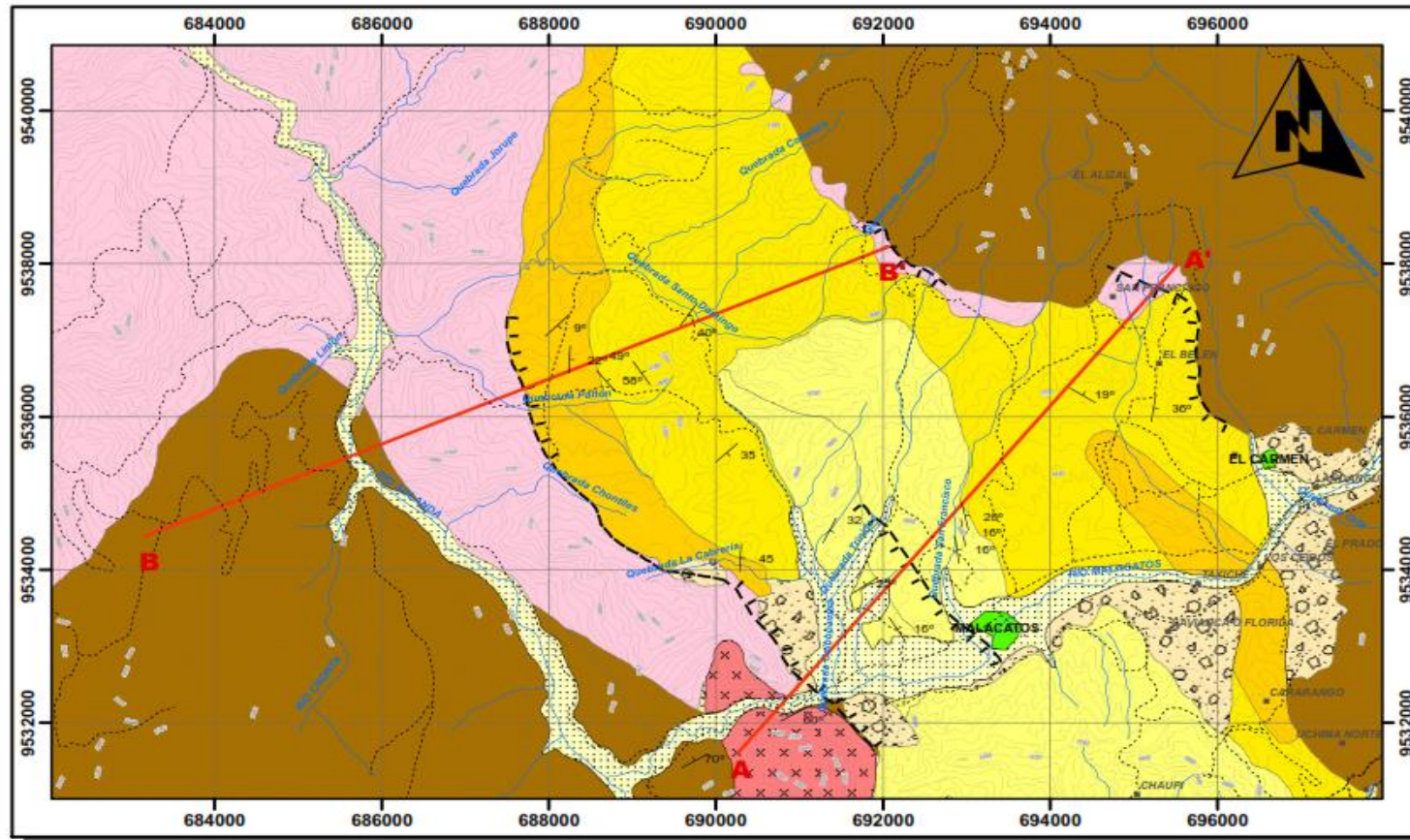
RECOMENDACIONES

- Es importante hacer una gravimetría más a detalle en zonas donde hayan indicios de posibles estructuras que continúen a profundidad o que estén afectando en superficie esto con el objetivo de obtener mapas tectónicos–estructurales para ordenamiento territorial.
- Resulta más confiable hacer un buen mapeo geológico si es posible a detalle para poder correlacionar con los datos gravimétricos y obtener resultados más confiables y con más exactitud.
- Se recomienda realizar una microgravimetría en las fallas de borde encontradas en la zona norte de Malacatos para determinar dirección y buzamiento de las mismas.
- Es necesario realizar más líneas gravimétricas con diferente dirección a las realizadas en el presente estudio para determinar continuidad de estructuras a profundidad y correlacionarlas.
- Es recomendable cuando se hace gravimetría llevar un mapa topográfico, una hoja geológica detallada de diferentes autores para corroborar y dar aportes de nuevos datos geológicos de la zona.
- Realizar análisis con indicadores geomórficos lineales a fin de determinar rasgos estructurales activos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Campoverde, J. (2010). Estudio Geológico Estructural e Inventario de Deslizamientos del Área 5 de la Cuenca de Malacatos. (Tesis de Ingeniería). Loja: UTPL. Loja.
- Cantos, F. C. (1987). Tratado de Geofísica Aplicada. Madrid: Litoprint-Palermo, S.L.
- Feininger, T., & Seguin, M. (1983). Simple Bouguer gravity anomaly field and the inferred crustal structure of continental Ecuador. *geology*, 11.
- Gordillo, J. (2014). Levantamiento de datos tectónico- estructural del borde oriental de la cuenca de Loja, zona sur oriental. Loja UTPL . Loja.
- Hungerbuhler, D. S. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern of Ecuador, *Earth- Science Reviews*. .
- Kennerley, J. (1969-1970). Hoja Geológica de Gonzanamá. Escala 1:100.000. Quito.
- Kennerley, J. (1973). Geología de la provincia de Loja en el sur del Ecaudor. Quito.
- Litherland. (1994). Breve Léxico Estratigráfico del Ecuador.
- Márquez, R. (2010). Estudio Geológico Estructural e Inventario de Deslizamientos del Área 4 de la Cuenca de Malacatos. (Tesis de ingeniería). Loja.
- Medina, J. (2014). Validación geológica estructural de la cuenca sedimentaria de Malacatos. Loja.
- Milson, J. (2003). *Field Geophysic*. England: 3ra Ed.
- Parasnis, D. (1962). Principios de Geofísica aplicada. Madrid: Paraninfo.
- Parasnis, D. (1971). Geofísica Minera. Madrid: paraninfo.
- Villareal, F. (2014). Levantamiento de datos tectónico-estructural del borde oriental de la cuenca de Loja, zona nororiental. UTPL.

ANEXOS

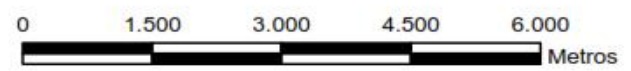


LEYENDA GEOLÓGICA

	Depósitos Aluviales	CUATERNARIO
	Depósitos Coluviales	MIO-PLIOCENO
	Fm. Cerro Mandango	MIOCENO
	Fm. Santo Domingo	MIOCENO
	Fm. San José	MIOCENO
	Fm. Loma Blanca	OLIGOCENO
	Porfido Purunuma	EOCENO
	Unidad Chiguinda	PALEOZOICO

SIMBOLOGÍA

	CURVAS DE NIVEL
	FALLAS NORMALES INFERIDAS
	DATOS ESTRUCTURALES
	LINEAS GRAVIMÉTRICAS
	RIOS
	VÍAS
	POBLADOS



SISTEMA DE COORDENADAS UTM
 SISTEMA DE REFERENCIA WGS84
 ZONA 17S

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

Titulación de Ingeniero en Geología y Minas

LEVANTAMIENTO DE DATOS GRAVIMÉTRICOS EN LAS FORMACIONES SEDIMENTARIAS DE LA CUENCA MALACATOS

REALIZADO POR: Stalin Fabián Elizalde Rodríguez
 REVISADO POR: MSc. Ing. José Tamay Granda

La base topográfica de la cuenca sedimentaria de Malacatos es elaborada a partir de las cartas a escala 1:50.000: LOJA SUR (CT-NVII-B2-3701-I), VILCABAMBA (CT-NVII-B4-3701-II), NAMBACOLA (CT-NVII-B1-3701-IV), GONZANAMA (CT-NVII-B3-3701-III) del Instituto Geográfico Militar (actualización digital - Enero 2013).