



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS

**Estudio gravimétrico transversal meridional de la Cordillera de los Andes,
con fines de evaluación tectónica y profundidad cortical del basamento.**

Tramo río Puyango- Loja

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: Dávila Robles, Bonny Sismay.

DIRECTOR: Tamay Granda, José Vidal, M. Sc.

CO-DIRECTOR: Soto Luzuriaga, John Egverto. M. Sc.

LOJA-ECUADOR

2017



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, 2017

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Master.

José Vidal Tamay Granda

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: “Estudio gravimétrico transversal meridional de la Cordillera de los Andes, con fines de evaluación tectónica y profundidad cortical del basamento. Tramo río Puyango- Loja” realizado por Dávila Robles Bonny Sismay ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, Febrero del 2017

f.....

M. Sc. José Vidal Tamay Granda.

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Dávila Robles Bonny Sismay declaro ser autora del presente trabajo de titulación: Estudio gravimétrico transversal meridional de la Cordillera de los Andes, con fines de evaluación tectónica y profundidad cortical del basamento. Tramo río Puyango- Loja, de la Titulación de Ingeniería 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.....

Autora: Dávila Robles Bonny Sismay.

Cedula: 1900767516

DEDICATORIA

En la vida siempre existen retos, el verdadero éxito no es superarlos si no disfrutar del recorrido que te da la oportunidad de experimentar y conocer personas que de una u otra forma impulsan a seguir adelante. Mi recorrido lo hice junto a mi familia y amigos que con su apoyo, consejos y buenos momentos vividos han hecho de esta carrera el mejor trayecto de mi vida.

Los amo.

AGRADECIMIENTO

Expreso mis sinceros agradecimientos a la Universidad Técnica Particular de Loja especialmente a los docentes del área de Geología y Minas que han sido un gran apoyo en mi formación, especialmente a mi director y co-director de fin de titulación M. Sc José Tamay y M. Sc John Soto quienes me han orientado en el desarrollo del presente estudio.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA.....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
INDICE DE CONTENIDOS.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN EJECUTIVO.....	1
ABSTRACT.....	2
ANTECEDENTES.....	4
OBJETIVOS.....	5
CAPITULO I.....	6
GENERALIDADES.....	6
1.1. Ubicación geográfica y vías de acceso.....	7
1.2. Relieve.....	7
1.3. Geología Regional.....	8
1.3.1. Generalidades.....	8
1.3.2. Litología.....	9
1.3.3. Historia Geológica.....	14
CAPITULO II.....	17
MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Principios de gravimetría.....	18
2.1.1. Ley de Gravitación Universal de Newton.....	18
2.1.2. Aceleración gravitacional.....	18
2.1.3. Unidades de medida.....	18
2.2. Método gravimétrico de prospección.....	19
2.3. Correcciones de las medidas de gravedad.....	19
2.3.1. Corrección de Latitud.....	19
2.3.2. Corrección con el tiempo:.....	20
2.3.3. Corrección por Altitud.....	20
2.4. Densidad de rocas y minerales.....	22
CAPITULO III.....	23
METODOLOGÍA.....	23
3.1. Levantamiento de información.....	24
3.2. Levantamiento de información en campo.....	24
3.2.1. Gravímetro.....	24
3.2.2. Perfil gravimétrico.....	25
3.3. Trabajo de Gabinete.....	25

CAPITULO IV.....	27
INTERPRETACION DE RESULTADOS.....	27
4.1. Interpretación del Modelo Gravimétrico.....	28
4.1.1. Cuenca Alamor-Lancones.....	31
4.1.2. Cuenca de Catamayo.....	33
4.1.3. Cuenca de Loja.....	34
4.2. Discusión de resultados.....	36
CONCLUSIONES.....	40
RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42
ANEXOS.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica y principales vías de acceso.	7
Figura 2. Perfil topográfico de la zona de estudio.	8
Figura 3. Geología cuenca Celica.	10
Figura 4. Geología cuenca de Catamayo.	12
Figura 5. Geología cuenca de Loja.	13
Figura 6. Resumen de la evolución geodinámica de la sierra sur del Ecuador durante el Neógeno.	16
Figura 7. Esquema de gravedad en un punto de la tierra.	19
Figura 8. a) Corrección al aire libre para un punto de observación a una altura h. b) Lámina de dimensión horizontal infinita para calcular la corrección de Bouguer simple. c) Corrección del terreno.	21
Figura 9. Plantilla de Hammer.	22
Figura 10. Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv, UTPL.	24
Figura 11. Determinación de densidad por método del picnómetro (Laboratorio.	26
Figura 12. Mapa de anomalías de Bouguer simple en mGal.	29
Figura 13. Modelo gravimétrico hipotético, perfil Loja-río Pindo.	30
Figura 14. Formación Ciano.	31
Figura 15. Formación Celica aflorando en el sector Naranjito, sobre el afloramiento se observa un deslizamiento de tobas riolíticas producto del volcanismo Paleógeno.	32
Figura 16. Formación Zambí, afloramiento de lutitas semi-metamorfizadas.	32
Figura 17. Unidad Chigüinda.	33
Figura 18. Formación Catamayo.	34
Figura 19. Cuello volcánico riolítico, formación Sacapalca.	34
Figura 20. Formación Quillollaco (Vía Loja-Zamora).	35
Figura 21. Unidad Tres Lagunas (Parque eólico Villonaco).	35
Figura 22. Perfil geológico Loja – Río Pindo.	39

RESUMEN EJECUTIVO

El presente estudio hace referencia a un modelo gravimétrico generado a lo largo del tramo Loja-Río Pindo, en el que se ha determinado datos gravimétricos cada 1km obteniendo un total de 79 estaciones gravimétricas, tomando como referencia la base gravimétrica de la UTPL.

La corrección de datos gravimétricos mediante software dio como resultado anomalías de Bouguer que permitió realizar un modelo gravimétrico de anomalías residuales generadas a partir de la variación de densidad, interpretando estructuras geológicas y profundidad de basamento.

El modelo gravimétrico permitió generar un modelo evolutivo en el que se relaciona estudios geológicos previos e información de campo.

Palabras Clave: Modelo gravimétrico, anomalía de Bouguer, anomalía residual, cuencas sedimentarias, basamento.

ABSTRACT

This research refers to gravimetric model produced throughout the stretch Loja- Río Pindo, in which gravimetric data were determined 1 km each getting a total of 79 gravimetric centers considering the gravimetric base of UTPL.

The correction of gravimetric data through software gives Bouguer anomalies as a result, which allowed making a gravimetric model of residual anomalies from the variation of density interpreting geological structures and basement depth.

The gravimetric model allowed to produce an evolutionary model, in which previous geological studies and field information were related.

Keys words: gravimetric model, Bouguer anomaly, residual anomaly, sedimentary basins and basement.

INTRODUCCIÓN

La región austral del Ecuador a la altura de la provincia de Loja comprende una evolución geológica compleja que inicia con la anatexis Permo-Triásica de los sedimentos Paleozoicos sometidos a variables de fusión durante el aumento de flujo de calor en un ambiente tectónico de fragmentación de Pangea occidental (Cochrane et al., 2014). Producto de esta configuración tectónica en el margen pasivo se origina el cinturón montañoso de los Andes cuya actividad sísmica se asocia a la peligrosidad geológica de la región.

El estudio sobre la transversal meridional de la Cordillera de los Andes abarca las cuencas sedimentarias de Loja, Catamayo y Celica a lo largo de la vía E35/E50, tiene como propósito realizar un modelo de evolución geológica a partir de anomalías gravimétricas causadas por la variación en la densidad del sustrato rocoso, permitiendo definir tanto la profundidad del basamento como la geometría del relleno sedimentario que junto con observaciones de campo y estudios preliminares podría interpretarse estructuras falladas que tendrían relación con los riesgos geológicos de la zona. El presente estudio consta de cuatro capítulos:

Capítulo I corresponde a las generalidades del área en el que se describe las características de la zona de estudio y la geología regional.

Capítulo II, el marco teórico hace referencia a definiciones que fundamentan la investigación.

Capítulo III explica la metodología en la que hacen referencia las correcciones de datos gravimétricos que dan como resultado anomalías gravimétricas que corresponden a variaciones en la densidad de las rocas y generan un modelo gravimétrico a profundidad.

Capítulo IV la interpretación de resultados en base al modelo gravimétrico y estudios geológicos anteriores para generar un modelo geológico.

Este estudio aporta con información gravimétrica y geológica en la región sur del Ecuador, en lo que respectan las cuencas de Loja, Catamayo y Celica.

ANTECEDENTES

Este trabajo hace referencia a la geología regional de los mapas geológicos a escala 1:100.000 de Loja-56 (Kennerley,1973) y a la Hoja Geológica de Zaruma del Proyecto “Modelo Piloto para la determinación del Potencial Geológico-Minero de la zonas de Zaruma” 1:100.000 (INIGEMM, 2013a).

Feininger (1977) y Feininger & Seguin (1983) aportan con un mapa de anomalías de Bouguer en Ecuador, que sirven como base en la comparación las anomalías presentadas en el trabajo.

En lo que respecta a las cuencas Neogénicas de Loja y Catamayo estudios de (Hungerbühler et al.,2002) hacen referencia la evolución de las cuencas enfocándose en el origen de los sedimentos y sus estructuras tectónicas, en base a estudios de Tamay et al., (2016), Galindo et al., (2010) aportan con datos gravimétricos de anomalía de Bouguer y anomalía residual que se comparan con los de este estudio.

Estudios de (INIGEMM, 2013b) entre los más recientes aportan con datos geológicos y geoquímicos sobre la evolución de la cuenca Celica y la columna estratigráfica de las formaciones volcánicas y sedimentarias.

En cuanto a la evolución de la Cordillera Real estudios de Litherland et al., (1994) entre otros detallan su evolución y la litología.

OBJETIVOS

General.

Determinar la estructura tectónica cortical de la transversal meridional de la Cordillera de los Andes y su influencia con la peligrosidad geológica de la región.

Específicos.

- Establecer la evolución tectónica del tramo río Puyango-Loja, en base al levantamiento de medidas gravimétricas.
- Generar modelos gravimétricos que permitan definir estructuras profundas y su incidencia a la actual posición de la Cordillera de los Andes.
- Correlacionar datos de campo y estudios regionales para interpretar estructuras activas y su influencia con la peligrosidad geológica.
- Establecer la mejor metodología de datos geológicos y geofísicos que permitan obtener información confiable en la interpretación de datos.

CAPITULO I
GENERALIDADES

1.1. Ubicación geográfica y vías de acceso.

El área de estudio se encuentra en la provincia de Loja entre los paralelos 3° 45' 0" y 4° 0' 0" de latitud Sur y 79° 15' 0" y 79° 45' 0" de longitud Oeste, el tramo atraviesa las ciudades de Loja, Catamayo, San Pedro de la Bendita, Olmedo y Chaguarpamba. El acceso al perfil gravimétrico sigue la vía de primer orden E35/E50 (Figura 1).



Figura 1. Ubicación geográfica y principales vías de acceso.

Fuente: base de datos IGM.

Elaboración: La autora.

1.2. Relieve.

El área de estudio forma parte de los dominios fisiográficos de la Cordillera Real, las cuencas intramontañosas de Loja, Catamayo y la cuenca Alamor-Lancones.

La Cordillera Real se caracteriza por un terreno irregular montañoso con crestas alargadas abruptas que llegan hasta 3000 m.s.n.m (Figura 2) con pendientes mayores a 45% y un patrón hídrico dendrítico y subdendrítico.

La cuenca de Loja es una estructura alargada en sentido N-S con alturas entre 2100 a 2300 m.s.n.m, presenta terrenos de superficie planas, valles y lomas onduladas con pendientes medias de hasta el 20%, cuenta con una red hidrográfica principal, el Río Zamora y Malacatos cuyo caudal tiene dirección norte. Por otra parte la cuenca de Catamayo posee alturas que alcanzan los 1200 m.s.n.m exhibiendo una superficie plana y ondulada con pendientes medias estimadas en un 8% (Figura 2).

A lo largo de la cuenca de Alamor-Lancones existe una transición gradual de terrenos abruptos montañosos a zonas de colinas altas y medias con crestas agudas y subredondeadas teniendo así en el tramo de San Pedro a Olmedo una pendiente media de 25% y alturas de ente 2400 y 1200 m.s.n.m que disminuye considerablemente hacia la zona de Río Pindo con elevaciones de hasta 600 m.s.n.m y pendientes medias menores al 20% (Figura 2).

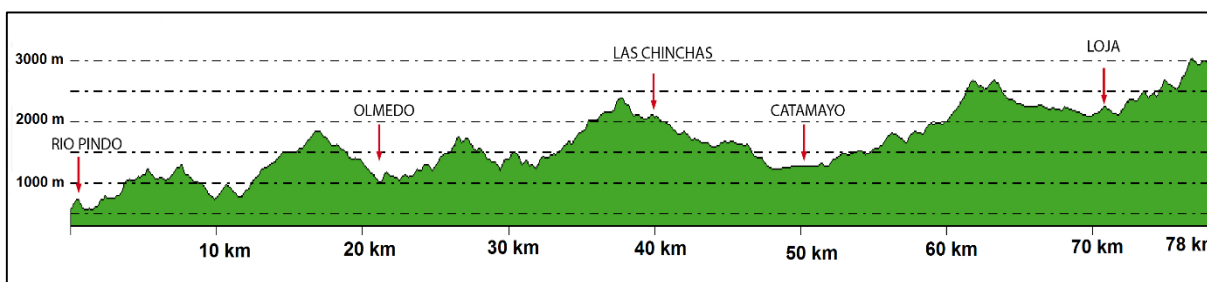


Figura 2. Perfil topográfico de la zona de estudio.

Fuente: SRTM.

Elaboración: La autora.

1.3. Geología Regional.

1.3.1. Generalidades.

El contexto geológico regional que abarca el área de estudio atraviesa varias estructuras de gran importancia en el modelo geotectónico del Ecuador entre las que tenemos: La Cordillera Real, la cuenca Cretácica Alamor-Lancones y las cuencas Neógenas de Loja y Catamayo.

La Cordillera Real corresponde una estructura ubicada a lo largo del margen activo del Pacífico, Litherland et al., (1994) divide esta cordillera en regiones litotectónicas que muestran homogeneidad y continuidad estratigráfica separadas por fallas regionales de dirección N-S, el “Terreno Loja” pertenece a una de estas divisiones que atraviesa el tramo de estudio incluyendo las Unidades Paleozoicas de Chigüinda y Tres Lagunas.

Por otra parte la cuenca Cretácica Alamor-Lancones se ubica al Sur de Ecuador y Norte de Perú, entre el Bloque Paleozoico Amotape-Tahuín al Oeste y el complejo Olmos-Loja hacia

el Este; comprende una cuenca marginal con series volcánicas y volcanoclásticas desarrolladas en un ambiente de arco volcánico (Jaillard et al., 1996). Las secuencias litológicas en el área de estudio incluyen las formaciones de Celica, Bramaderos, Chaguarpamba, Ciano y Zambi (Figura 3).

En cuanto a las cuencas Neógenas de Catamayo (Figura 4) y Loja (Figura 5) ubicadas al Sur de Ecuador, se caracterizan por ser depresiones controladas por la tectónica de fallas que se establecen en el seno del macizo montañoso de la Cordillera Real, los análisis estructurales sobre las deformaciones dúctiles y frágiles realizados en las cuencas y sus bordes indican que el régimen compresivo fue constante desde el Oligoceno Superior hasta el Plioceno (Marocco et al., 1993).

1.3.2. Litología.

1.3.2.1. *Cordillera Real*

Unidad Chigüinda.

Génesis: Rocas semipelíticas de origen continental derivadas de una cuenca Intracratónica.

Geocronología: Paleozoico (Devónico y Carbonífero)

Petrología: Rocas semipelíticas de grano fino a medio principalmente cuarcitas, filitas negras, pizarras y metagrawvacas con asociaciones de minerales metamórficos de cuarzo-albita-moscovita y clorita.

Unidad Tres Lagunas.

Génesis: Fusión parcial de la corteza (anatexis).

Geocronología: Triásico Tardío.

Petrología: Monzogranitos y granodioritas con megacristales de feldespatos alcalinos y cristales de cuarzo azul.

Unidad Chaguarpamba.

Génesis: Pertenece a una secuencia volcanoclástica distal como parte de un complejo ensamblaje de rocas oceánicas relacionadas a un arco insular.

Geocronología: Cretácico Superior (Cenomaniano).

Petrología: Rocas verdosas de grano fino a medio generalmente estratificadas que incluyen tobas arenosas, aglomerados finos y lentes de lutita y limolita.

Unidad Ciano.

Génesis: Sedimentos característicos de flysh continental.

Geocronología: Cretácico Superior (Coniciano-Santoniano).

Petrología: Constituida de capas estratificadas de lutitas, limolitas, arcillolitas y areniscas. Las lutitas, limolitas y arcillolitas de color negro que ocurren como finas laminaciones de capas centimétricas, contienen granos de plagioclasa, cuarzo y líticos volcánicos; las areniscas de grano fino a medio contienen en gran parte líticos volcánicos además de plagioclasa, cuarzo, sericita, etc.

Unidad Zambi.

Génesis: Sedimentos turbidíticos característicos de flysch oceánico, ligeramente metamorfizado.

Geocronología: Cretácico superior (Campaniano-Maastrichtiano Tardío)

Petrología: Compuesta de filitas, pizarras y areniscas gris oscuras intensamente deformadas. Las filitas y pizarras se disponen en capas laminadas constituidas por una matriz arcillosa y minerales de cuarzo y micas. Las areniscas de grano fino a grueso dispuestas en capas centimétricas contienen cristales de plagioclasa, cuarzo, etc., soportados en una matriz pelítica.

1.3.2.3. Cuenca de Catamayo.

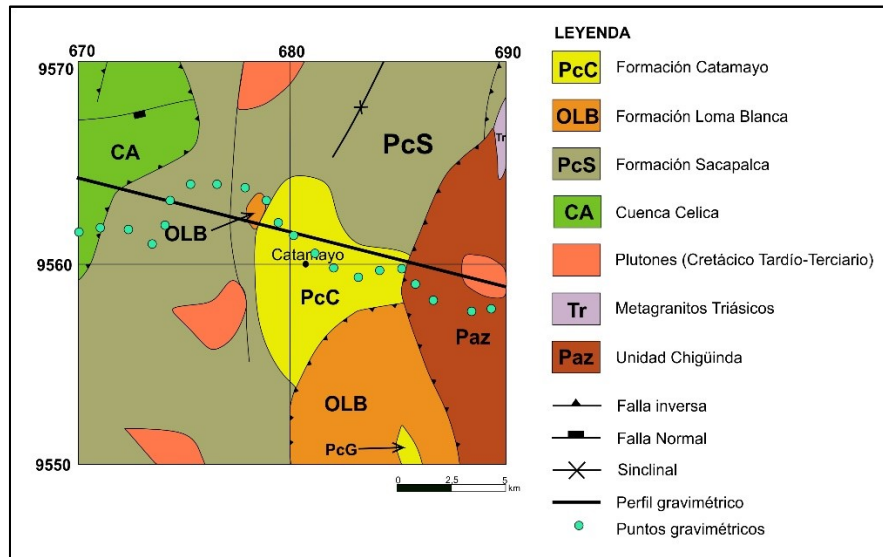


Figura 4. Geología cuenca de Catamayo.
Fuente: Hungerbühler et al.,(2002).

Formación Sacapalca.

Génesis: Secuencias volcánicas y volcanoclásticas de arco volcánico continental.

Geocronología: Paleoceno-Mioceno Medio.

Petrología: Comprende tobas andesíticas y dacíticas, flujos de lava y brechas volcánicas.

Formación Loma Blanca.

Génesis: Secuencias volcánicas y volcanoclásticas de arco volcánico continental.

Geocronología: Eoceno-Oligoceno.

Petrología: Formado de piroclastos de intermedios a ácidos principalmente ignimbritas, pumitas, tobas y brechas volcánicas. Los diques y sills indican la proximidad de un centro eruptivo.

Formación Catamayo.

Génesis: Ambiente fluvial y llanura de inundación costera.

Geocronología: Mioceno Medio.

Petrología: La parte inferior constituye lutitas, areniscas y calizas, la parte media es rica en areniscas gruesas y conglomerados y la parte superior está dominada por lutitas con intercalaciones menores de arenisca y caliza.

1.3.2.4. Cuenca de Loja.

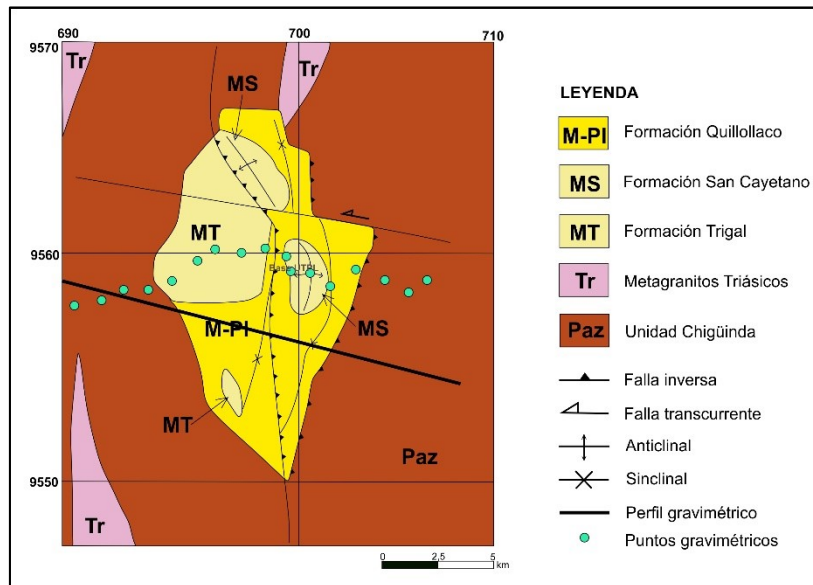


Figura 5. Geología cuenca de Loja.
Fuente: Hungerbühler et al.,(2002).

Formación Trigal.

Génesis: Ambiente fluvial.

Geocronología: Mioceno Medio.

Petrología: Compuesta de areniscas de grano grueso, conglomerados y limolitas menores.

Formación La Banda.

Génesis: Ambiente de lagoon con incursiones intermareales.

Geocronología: Mioceno Medio Tardío.

Petrología: Contiene calizas blancas, finas láminas de lutitas y calizas carbonatadas, capas de chert, brechas de limolita y areniscas amarillas de grano fino.

Formación Belén.

Génesis: Sedimentos depositados en un sistema deltaico.

Geocronología: Mioceno Medio Tardío.

Petrología: Caracterizado por depósitos de areniscas y conglomerados intercalados con niveles de capas finas de arenisca y lutita.

Formación San Cayetano.

Génesis: Ambiente fluvial de agua dulce.

Geocronología: Mioceno Tardío Último.

Petrología: Miembro inferior *Sandstone* consiste en areniscas de grano grueso, conglomerados y vetas de carbón. Miembro *Siltstone* compuesto de lutitas cafés, grises y blancas con abundantes capas de diatomitas y piroclastos. Miembro superior *Sandstone* con la misma litología del miembro inferior pero de grano fino.

Formación Quillollaco.

Génesis: Abanico aluvial.

Geocronología: Mioceno Tardío-Cuaternario.

Petrología: Conforman conglomerados fuertemente apilados e imbricados y lentes de areniscas.

Formación Salapa.

Génesis: Evento volcánico.

Geocronología: Plioceno-Pleistoceno.

Petrología: Constituye clastos líticos y tobas volcánicas fuertemente caolinizadas.

1.3.3. Historia Geológica.

La evolución geológica en la zona de estudio inicia en el Paleozoico con el depósito de sedimentos semipelíticos de la Unidad Chigüinda a lo largo de una cuenca marginal intracratónica (Litherland et al., 1994), durante el Triásico tardío debido a la fragmentación de Gondwana occidental produce un modelo de Rift abortado que puede explicar los regímenes extensivos que produjeron la anatexis de la corteza dando como resultado las rocas graníticas de la Unidad Tres Lagunas (Jaillard et al., 1990), en el Cenozoico estas rocas fueron sometidas a complejos sucesos de eventos tectónicos y magmáticos que provocaron su metamorfismo (Aspden et al., 1992), durante el Jurásico Medio y tardío tuvo lugar una importante actividad volcánico-plutónica tanto en la Cordillera Real como en la Zona Subandina producto del cambio de dirección en la subducción causando el emplazamiento

de granitoides calco-alcalinos (arco volcánico Misahuallí) (Litherland et al., 1994; Eguez & Aspdén, 1993).

La cuenca Alamor-Lancones se interpreta como una cuenca oceánica marginal desarrollada desde el Neocomaniano gracias a la desmembración del bloque Amotape-Tahuín de la Cordillera Real en un proceso de traslación/rotación a lo largo de la falla Las Aradas (Eguez & Poma, 2001).

El volcanismo de origen continental desarrollado en el Paleoceno dio lugar a depósitos volcánicos definidas por Kennerley (1973) como formaciones Sacapalca y Loma Blanca además de la intrusión de rocas granodioríticas (INIGEMM, 2013b). Hungerbühler et al., (2002) señala que las formaciones del Paleoceno al Mioceno Temprano depositadas en la región austral ecuatoriana en su mayoría son rocas piroclásticas y volcánicas (intermedias a ácidas) y en cuanto a las series sedimentarias Neógenas que descansan sobre rocas volcánicas o basamento metamórfico fueron depositadas en dos etapas:

- a) Subsistencia extensional en la región interandina produciendo un ambiente Pacífico Costero durante el Mioceno Medio a Tardío (15 - 10 Ma).
- b) Inversión tectónica que inicio una compresión orientada E-W controlada por la colisión y acoplamiento de la Cordillera de Carnegie en el margen costero ecuatoriano desde 15 – 9 Ma.

Esta etapa compresiva según análisis estructurales sobre las deformaciones dúctiles y frágiles realizados en las cuencas y sus bordes indican que fue constante desde el Oligoceno Superior hasta el Plioceno, cuya evolución geodinámica se debe a una rotación de esfuerzos que inicia con la deformación de los sedimentos de la primera gran secuencia A (Figura 6 a, b) indicando una evolución de la dirección de acortamiento desde NNE-SSW (N23°E) hasta ENE-WSW (N64°E) y la segunda gran secuencia B (Figura c, d) cuya dirección de acortamiento varia de ENE-WSW (N71°E) a aproximadamente E-W (N170°E) (Marocco et al., 1993).

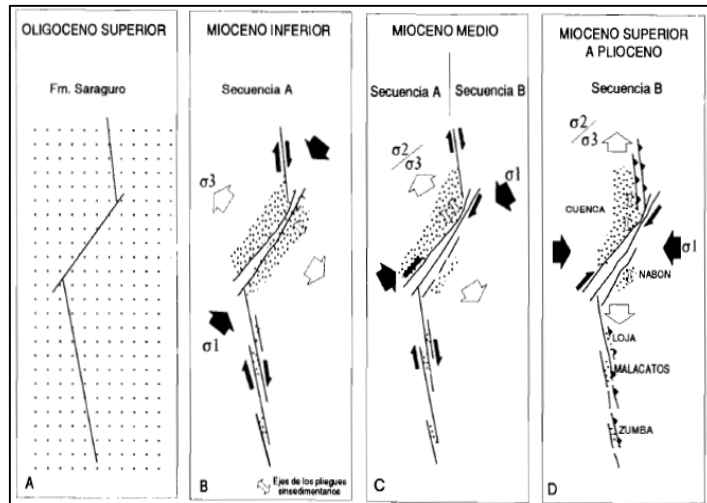


Figura 6. Resumen de la evolución geodinámica de la sierra sur del Ecuador durante el Neógeno.

Fuente: (Marocco et al., 1993. Referido a Noblet, et al. 1988).

CAPITULO II
MARCO TEÓRICO

2.1. Principios de gravimetría.

La historia de la gravedad, tiene lugar en una época de transición renacentista en la cual la ciencia y las artes tomaban nuevos matices empíricos basados en la lógica y la experimentación, provocando la ruptura de las concepciones teológicas con respecto a la ciencia. Es así como en contra de los pensamientos medievales establecidos en razones “mágicas” el científico Galileo Galilei propone la primera definición de gravedad de los cuerpos: “Llamamos por tanto, gravedad a la tendencia a moverse naturalmente hacia abajo, en los cuerpos pesados se descubre causada por la mayor o menor abundancia de la materia por la que estén constituidos” (Gatto, 2000).

Galileo, al igual que otros científicos como Copérnico y Kepler, liberaron la mentalidad rígida de la época, así Isaac Newton basado en esas teorías heliocéntricas y gravedad de los cuerpos, crea la ley universal de gravitación (Strathern, 2014).

2.1.1. Ley de Gravitación Universal de Newton.

La interacción gravitacional entre dos masas puntuales m_1 y m_2 es directamente proporcional a su producto, disminuyendo equitativamente al aumento del cuadrado de su distancia (r^2), en estas mediciones interviene la constante G ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{Kg}^2$) de la gravitación universal (Wilson et al., 2007)

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

2.1.2. Aceleración gravitacional.

La aceleración de la gravedad se debe a la fuerza atractiva que la tierra ejerce sobre un cuerpo, menos la fuerza centrífuga que experimenta el cuerpo hacia afuera por causa de la rotación de la tierra. El valor de la g sobre la superficie es de 980 gales, pero varía desde unos 978 gales en el ecuador hasta unos 983 gales en los polos siendo mayor en los polos a causa del achatamiento terrestre (Parasnis, 1971).

$$a = g = \frac{F}{m} = G \frac{m_1}{r^2}$$

2.1.3. Unidades de medida.

En el sistema cegesimal la unidad de aceleración de gravedad es 1 cm/s^2 a esta unidad se la denomina gal ($1 \text{ gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$; $1 \text{ miligal} = 10^{-3} \text{ gales}$) (Cantos, 1987).

2.2. Método gravimétrico de prospección.

El método de prospección gravimétrica, se basa en el estudio de las pequeñas variaciones de gravedad, debido a la heterogeneidad en las densidades de la masa terrestre. La gravedad en un punto cualquiera de la tierra es prácticamente igual a la resultante de la atracción de su masa y la de la fuerza centrífuga debido a su movimiento de rotación (Figura 7). En cada punto de la tierra tiene una dirección y una magnitud determinadas. La primera está representada por la dirección de la plomada y la segunda depende de la latitud geográfica. (Siñeriz, 1928).

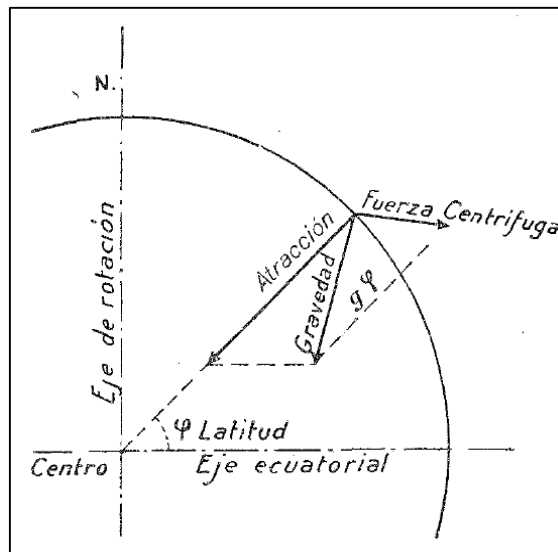


Figura 7. Esquema de gravedad en un punto de la tierra.
Fuente: (Siñeriz, 1928)

Este concepto se refiere a una gravedad casi constante ($9,8 \text{ m/s}^2$) y para poder detectar los cambios de densidad mencionados se requiere medir un valor 10^{-5} veces menor, requiriendo instrumentos muy sensibles (Estrada, 2012). Los más usados en el método gravimétrico son: la balanza de torsión (mide derivadas de la gravedad), el péndulo (mide la gravedad absoluta y relativa) y el gravímetro (mide la gravedad relativa) (Cantos, 1987).

2.3. Correcciones de las medidas de gravedad.

2.3.1. Corrección de Latitud.

La gravedad se rige a cambios debido a la forma elipsoidal de la tierra, el cual genera un campo de gravedad de referencia o gravedad normal (g_N) que está en función de la distancia geocéntrica y su latitud (φ) (Navarro, 2003). De esta manera tenemos valores de gravedad (g_E) que varían aproximadamente 978 gales en el Ecuador a 983,2 gales en los Polos. Como la tierra es matemáticamente un esferoide con diferentes radios y exceso de masa en el Ecuador tenemos un efecto gravimétrico contemplado por la constante

$B=0,00002$ quedando en definitiva lo que se conoce como fórmula internacional de la gravedad, que permite conocer la gravedad normal (teórica) a cualquier latitud (Estrada, 2012).

$$g_N = g_E (1 + A \sin^2 \varphi - B \sin^2 2\varphi)$$

Siendo A el aplastamiento dinámico= 0,005.

2.3.2. Corrección con el tiempo:

2.3.2.1. Corrección de Deriva.

Según (Gallastegui, 2000): “Corrige las variaciones en el tiempo de las medidas del gravímetro debido a las alteraciones mecánicas del aparato. Se corrige haciendo medidas en el mismo lugar a distintas horas y comparando su evolución temporal”.

2.3.2.2. Corrección Mareal.

Esta corrección se basa en el efecto luni-solar que como consecuencia causan mareas, dependiendo de la posición astronómica de ambos y la latitud, siendo variable con el tiempo, provocando una pequeña deformación en la superficie marina, pudiendo variar solamente 0,005 mGal/hora (Cantos, 1987).

2.3.3. Corrección por Altitud.

Según (Gallastegui, 2000) tenemos las siguientes correcciones:

2.3.3.1. Corrección de aire libre.

Corrige la disminución de la gravedad en el aire libre con la altura, debido a que a mayor altura (h), menor será la aceleración gravitacional (Figura 8 a). Una vez corregidas quedan reducidas al *datum*; esta corrección es positiva para puntos por encima del geoide y tiene un valor de aproximadamente 0,3086 mGal por cada metro de separación del geoide de referencia:

$$\Delta g_{FA} = g_{obs} - g_N + 0,308557 h.$$

2.3.3.2. Corrección de Bouguer.

Tiene en cuenta el efecto gravitacional de la roca presente, el punto de observación y el datum. Se calcula obteniendo la gravedad de una lámina en la cual se aproxima la capa de

roca de densidad δ bajo la estación a una lámina horizontal infinita, tangente al elipsoide de referencia, de espesor h (Figura 8 b), cuya atracción gravitacional es:

$$\text{gravedad de la lámina} = 2\pi G\delta h = 0,04193 \delta h.$$

Esta corrección debe restarse para alturas sobre el datum, se obtiene:

$$\Delta g_{Bs} = g_{obs} - g_N + 0,308557 h - 0,04193 \delta h.$$

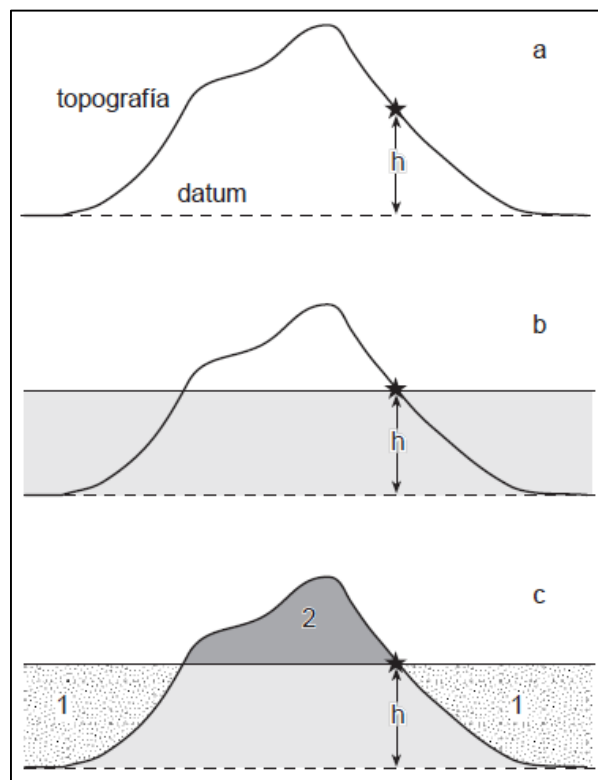


Figura 8. a) Corrección al aire libre para un punto de observación a una altura h . b) Lámina de dimensión horizontal infinita para calcular la corrección de Bouguer simple. c) Corrección del terreno.

Fuente: (Gallastegui, 2000)

2.3.3.3. Corrección topográfica.

Tiene en cuenta el relieve de los alrededores de la estación y corrige el error en el cálculo de la anomalía de Bouguer al asumir que el relieve es plano (Figura 8 c). El valor de esta corrección se calcula para cada estación utilizando la plantilla o círculo de Hammer (Figura 9), entonces tenemos:

$$\Delta g_{Bs} = g_{obs} - g_N + 0,308557 h - 0,04193 \delta h + CT$$

Donde: Δg_{Bs} , g_{obs} y g_N están en mGal, h en metros, δ en $g\text{ cm}^{-3}$ y CT corrección topográfica en mGal.

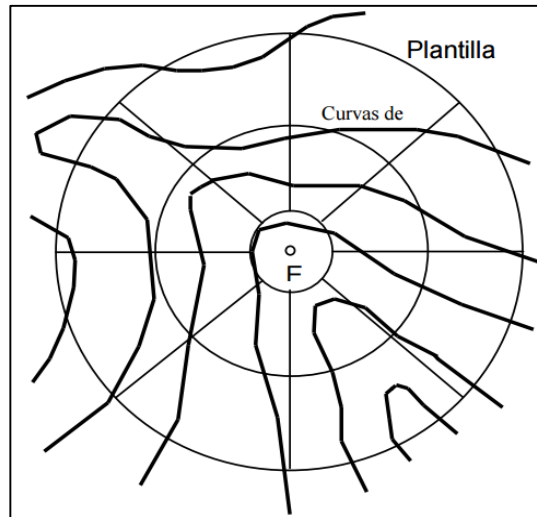


Figura 9. Plantilla de Hammer.
Fuente: (Estrada, 2012).

2.3.3.4. Anomalías Gravimétricas.

Cuando todas las correcciones han sido aplicadas se obtiene la anomalía de Bouguer:

$$g_B = g_{obs} \pm \Delta g_{obs} \pm \Delta g_{FA} \pm \Delta g_{Bs} \pm CT$$

Es decir, el mapa de Bouguer mostraría la suma de los efectos de las rocas sedimentarias próximas, del basamento ígneo e incluso del magma en el interior de la tierra (Cantos, 1987)

2.4. Densidad de rocas y minerales

Se puede definir como densidad a la relación entre la masa de la roca y su volumen, esta densidad (Anexo 1) puede considerarse un exponente objetivo de la historia de los procesos geológicos a las que han sido sometidas que influyen directamente en la composición y estructura del esqueleto mineral, porosidad, humedad, etc., (Mirónov, 1977).

En estudios gravimétricos generalmente lo que se mide es la variación lateral de la densidad de las rocas, en la que las anomalías gravimétricas resultan de la diferencia de densidad entre los cuerpos de roca y sus alrededores (López & Zura, 2013).

CAPITULO III
METODOLOGÍA

La metodología empleada en el desarrollo del trabajo de investigación se llevó a cabo en tres etapas:

3.1. Levantamiento de información

Previo al trabajo investigativo es necesario realizar una recopilación de información, para esto se utilizó las cartas geológicas 1:100.000 de Loja (Kennerley & Almeida, 1973) y Zaruma (INIGEMM, 2013), las cuales proporcionaron información sobre la geología, fallas, contactos, etc., información previa que se tomó como referencia para el modelamiento del perfil gravimétrico, además se utilizó la base cartográfica escala 1:50.000 (IGM, 2011) con el fin de elaborar un mapa del perfil gravimétrico, trazando puntos cada kilómetro a lo largo de la vía Loja-Río Pindo; la base de datos fue trabajada en el sistema de referencia UTM WGS84, zona 17 hemisferio Sur. Complementando la investigación se recopiló información de diversos trabajos de investigación usados en la corroboración de estructuras en el perfil gravimétrico.

3.2. Levantamiento de información en campo.

3.2.1. Gravímetro.



Figura 10. Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv, UTPL.
Fuente: La autora.

En la metodología empleada uno de los instrumentos de medida fue el gravímetro Scintrex CG-5 AutoGrav con un rango de medida de más de 8000 mGal y una resolución de lectura de 0,001 mGal (Scintrex Limited, 2006). En si las lecturas del gravímetro son medidas del

desplazamiento de un peso suspendido en un resorte sensible el cual mide las variaciones verticales de atracción gravitatoria del suelo debido a los cambios de densidad, estos deben multiplicarse por una constante de calibrado a fin de obtener diferencias de gravedad en miligales (Parasnis, 1971). La única información que se puede obtener del gravímetro es una lectura que permite obtener la gravedad relativa (diferencia de gravedad entre dos puntos terrestres).

Para la lectura de los puntos se abrió un ciclo de medida en la estación del Campus de la Universidad Técnica Particular de Loja, la cual permite conocer los valores de gravedad absoluta, corregidas con las medidas por la deriva del instrumento considerando el tiempo de diferencia entre las medidas, estableciéndose un valor de 977432,01 mGal (Galindo et al., 2010), este ciclo de medidas se toma cada 1km a lo largo del área de estudio y se cierra en la estación del campus con la finalidad de que el equipo realice la corrección de deriva instrumental.

3.2.2. Perfil gravimétrico.

El perfil gravimétrico cubre la zona Sur del Ecuador atravesando la provincia de Loja de Este a Oeste. Se planificó la toma de datos gravimétricos a lo largo de la vía Loja-Río Pindo a una distancia de 1 km entre ellos, obteniendo un total de 79 puntos de medida de gravimétrica; estos se referencian geográficamente a través de GPS.

En el ciclo de toma de datos gravimétricos se ubicaron los puntos de coordenadas con GPS, el reconocimiento de la litología en los afloramientos y la recolección de muestras representativas para realizar un análisis de densidades, la lectura de datos en campo se registró en una plantilla en la que constan los siguientes parámetros: número de estación gravimétrica, latitud, longitud, cota (msnm), distancia (m), hora (h:min), gravedad (mGal), error (no mayor a 0,1), SD- desviación estándar (no mayor a 0,4), observaciones.

3.3. Trabajo de Gabinete.

Los datos gravimétricos adquiridos en campo requieren de un proceso de correcciones, debido a que los valores de gravedad pueden cambiar con respecto a su estación base dependiendo de la altitud, latitud y tiempo, como resultado de las correcciones se obtiene una anomalía gravimétrica que varía según la densidad del sustrato rocoso. Este proceso comprende de:

- Corrección de la deriva instrumental y acción de las mareas (efecto luni-solar) que varía con respecto al tiempo.

- Corrección de aire libre y de Bouguer que requiere de valores de la gravedad absoluta de la estación base UTPL (977432,01 mGal) y coordenadas (UTM y geográficas).
- Corrección topográfica empleando un SRTM 3 con una malla de 90 m que se ajusta a la zona de estudio con una densidad promedio de 2,67 g/cm³.
- En función a las correcciones en los valores de gravedad se analiza la variación de densidad debido al cambio de litología a lo largo del tramo de estudio definido como modelo gravimétrico.

3.4. Laboratorio.

Complementariamente se analizó las densidades de las rocas recolectadas en campo, por medio del método del picnómetro (Figura 11) el cual es un recipiente calibrado del que se obtiene un volumen con gran precisión, esto permite medir la densidad de la roca en referencia de la densidad de un fluido conocido (agua) (Anexo 3). En la metodología se aplicó la norma ASTM D 854 (Standard test methods for specific gravity of soil solids by wáter pycnometer).

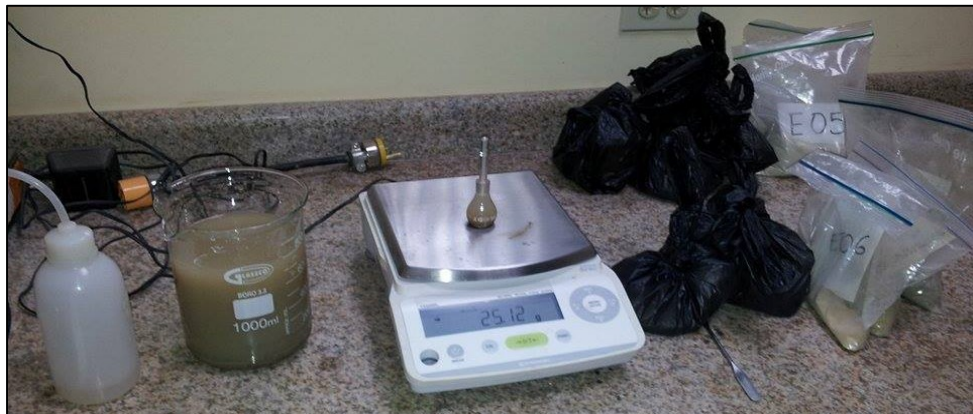


Figura 11. Determinación de densidad por método del picnómetro (Laboratorio de beneficio de minerales UTPL).

Fuente: La autora.

CAPITULO IV
INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.1. Interpretación del Modelo Gravimétrico.

La zona de estudio se extiende de oriente a occidente desde la ciudad de Loja, atraviesa Catamayo, Las Chinchas, Olmedo, Chaguarpamba hasta el puente de Río Pindo. Los puntos gravimétricos se correlacionan en una sola línea de perfil (Coordenada UTM: Oriente X=707409, Y=9554288; Occidente X= 631900, Y= 9573572) de aproximadamente 77 km. La anomalía de Bouguer se define como la diferencia entre la gravedad observada medida con el gravímetro y la gravedad teórica calculada para cada estación, con este valor se genera una curva de anomalía residual que tiene como objeto identificar la variación en la densidad del sustrato rocoso y su profundidad, mediante un modelo gravimétrico

Así los valores de anomalía de Bouger (Figura 12) en el área de estudio disminuyen progresivamente hacia el borde Este; en la cuenca de Loja existe una variación de anomalías de -215 a -197 mGal que pone de manifiesto el efecto de las raíces isostáticas que soporta la Cordillera Real y un significativo contraste de densidad en la que el área de anomalías mínimas de la cuenca corresponden a la mayor profundidad del relleno sedimentario. Entre las zonas de Catamayo y Velacruz, inicia un estrecho contraste en la anomalía de Bouguer (-185 a -140 mGal) debido al cambio de densidad de las rocas hasta la zona de contacto entre la Cordillera Real y el arco de islas de la cuenca Alamor-Lancones. Las rocas de alta densidad del arco de islas generan anomalías de Bouguer que aumentan progresivamente E-W desde -137 a -101 mGal.

La interpretación de la anomalía residual en el modelo gravimétrico (Figura 13) se divide en secciones según las cuencas que atraviesa la zona de estudio:

- Cuenca Alamor-Lancones (sección A y B).
- Cuenca de Catamayo (sección C y D).
- Cuenca de Loja (sección E).

Esto con el fin de describir las series de rocas dependiendo de la densidad y formación geológica a la que pertenecen, además el modelo permite definir una profundidad promedio de cada serie.

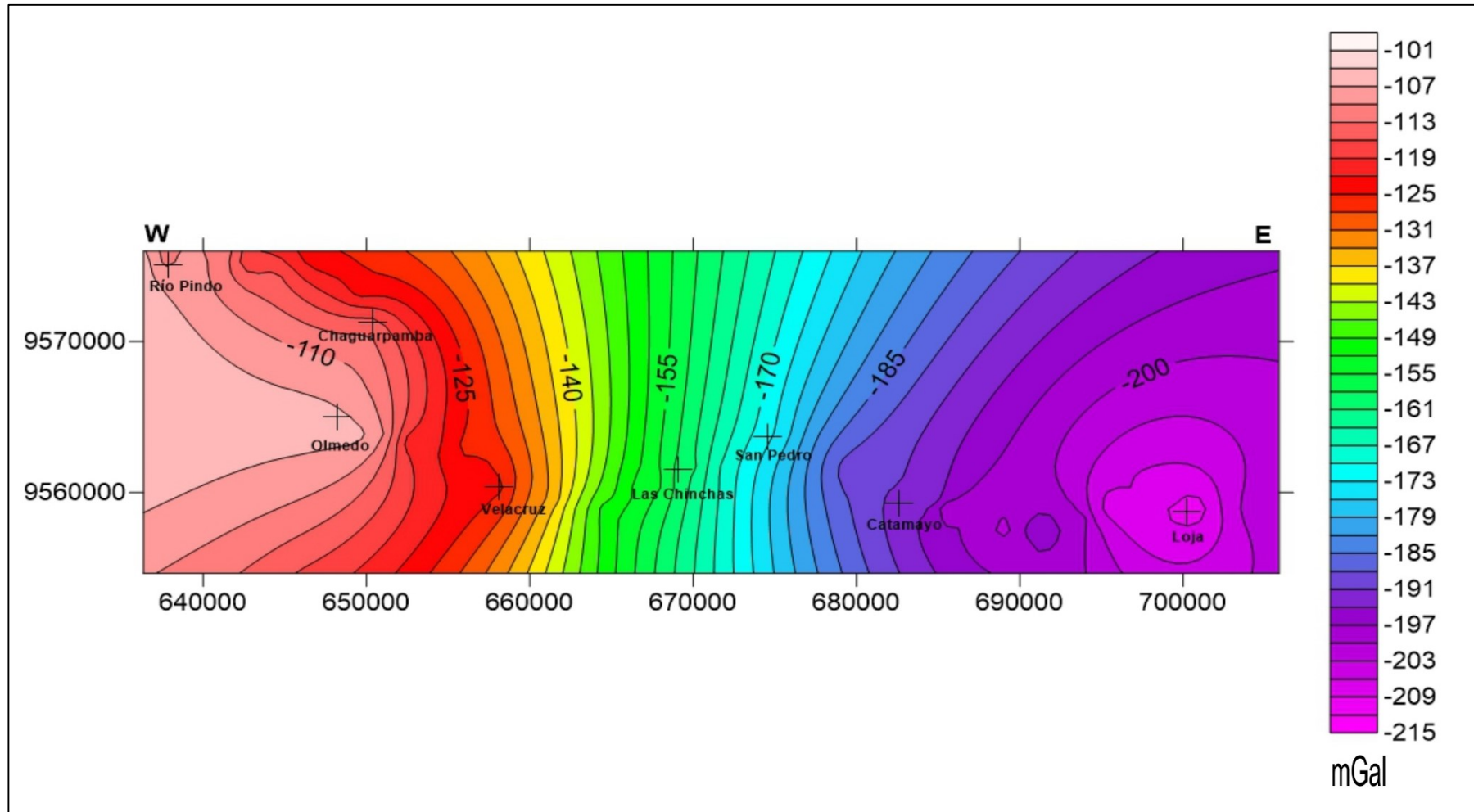


Figura 12. Mapa de anomalías de Bouguer simple en mGal.
Fuente: La autora.

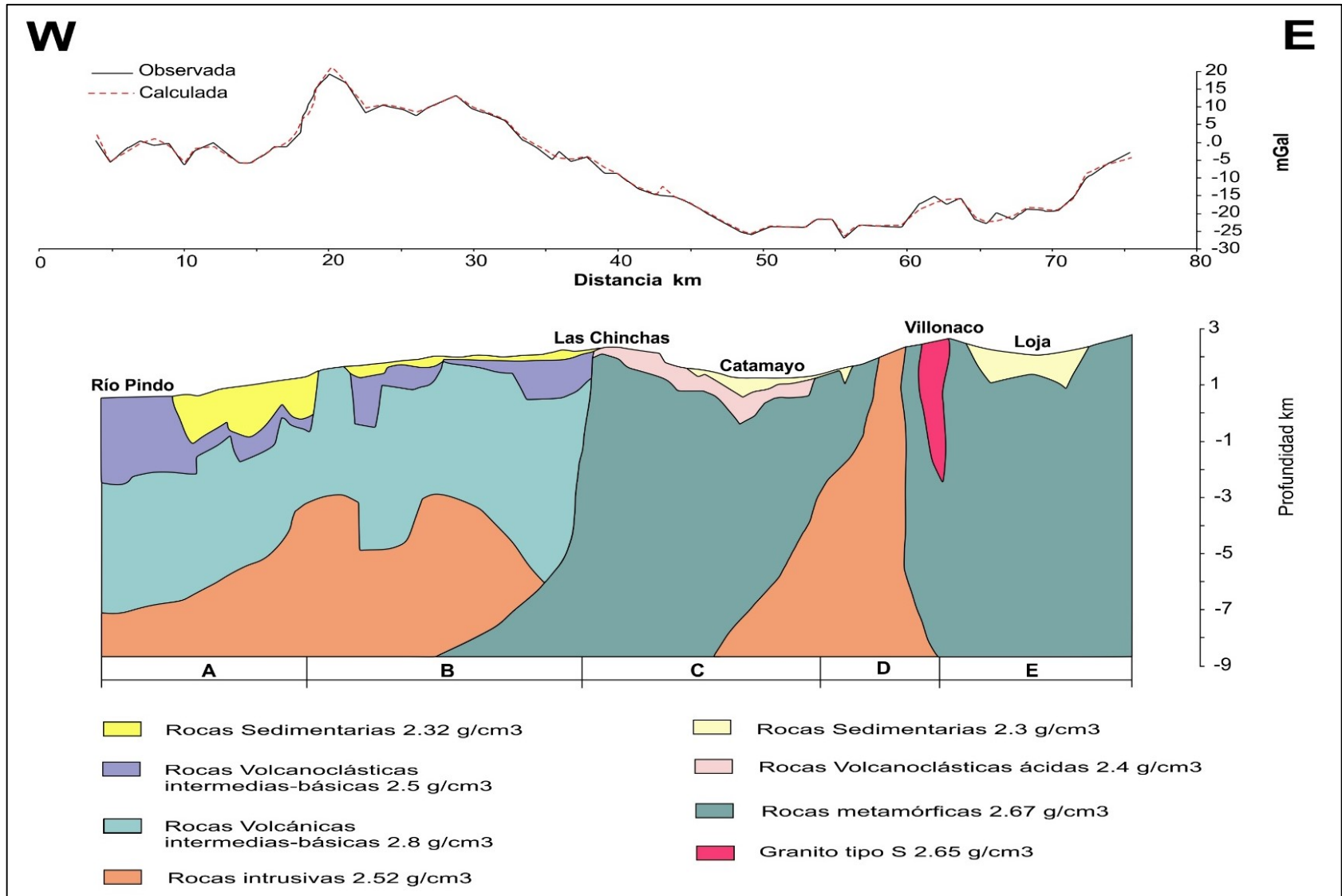


Figura 13. Modelo gravimétrico hipotético, perfil Loja-río Pindo.
Fuente:La autora.

4.1.1. Cuenca Alamor-Lancones.

El modelo gravimétrico en la sección de esta cuenca se extiende 32 Km caracterizada por tener valores en anomalía residual de -5 a 20 mGal generados por la alta densidad que concuerda con la geología del sector, desarrolladas en un arco volcánico de islas que constituye el basamento denominado Formación Celica, secuencias volcanoclásticas de las formaciones Bramaderos y Chaguarpamba y secuencias sedimentarias de las formaciones Ciano y Zambi. Su interpretación se divide en dos secciones:

Sección A.- Representa el Oeste de la cuenca con valores de anomalía residual de -5 a 0 mGal interpretados como una mayor profundidad en las series sedimentarias y volcanoclásticas duplicados por el tectonismo de la zona cuya densidad es menor a la del basamento, entre las que se identifica: la secuencia sedimentaria de la formación Ciano (Figura 14) de $2,32 \text{ g/cm}^3$ con un espesor de 2000 m aproximadamente, las formaciones Bramaderos y Chaguarpamba que al estar constituidas por litología similar se les atribuye una densidad de $2,5 \text{ g/cm}^3$ alcanzando espesores hasta 2500 m y la formación Celica como basamento (Figura 15) con una densidad de $2,8 \text{ g/cm}^3$ se localiza a una profundidad de 3000 m con un espesor entre 3000 a 4500 m subyacida por un contraste de rocas de menor densidad ($2,52 \text{ g/cm}^3$) interpretada como una intrusión de rocas granodioríticas de composición ácida a una profundidad de 6000-7500 m aproximadamente.



Figura 14. Formación Ciano.
Coordenadas: X= 648161, Y=9565523, Z=1542 m.s.n.m.
Fuente: La autora.

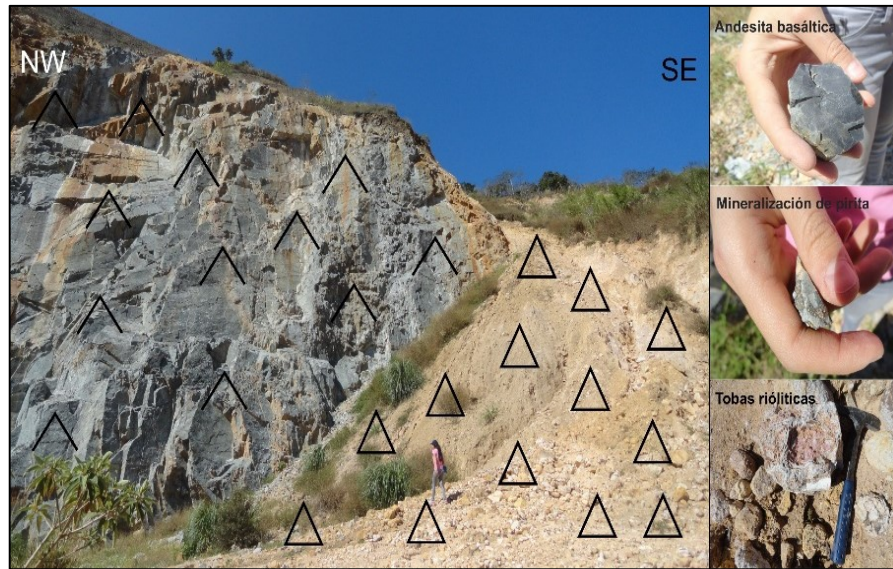


Figura 15. Formación Celica aflorando en el sector Naranjito, sobre el afloramiento se observa un deslizamiento de tobas riolíticas producto del volcanismo Paleógeno.
 Coordenadas: X= 650609, Y=9569125, Z=1499 m.s.n.m.
 Fuente: La autora.

Sección B.- Los valores de anomalía en esta sección aumentan, los picos de mayor densidad muestran el afloramiento (20 mGal) de rocas densas de la formación Celica o la poca profundidad (13 mGal) en la que se encuentra este basamento, cuyo espesor puede alcanzar hasta los 5000 m aproximadamente, esta sección también se caracteriza por el poco espesor de la serie volcanoclástica de las formaciones Bramaderos y Chaguarpamba (1800 a 500 m) y las series sedimentarias de baja densidad ($2,32 \text{ g/cm}^3$) de las formaciones Ciano hasta de 400 m y Zambí con 300 m (Figura 16).



Figura 16. Formación Zambí, afloramiento de lutitas semi-metamorfizadas.
 Coordenadas: X=669540; Y=9561190; Z=2372 msnm.
 Fuente: La autora.

4.1.2. Cuenca de Catamayo.

Esta cuenca según el modelo ocupa aproximadamente 18 km en superficie, su densidad disminuye progresivamente evidenciado en los valores más bajos de anomalía a lo largo del tramo de estudio que van desde -7 hasta -27 mGal, concordando con la geología del sector en donde rocas volcánicas, volcanoclásticas de afinidad ácida de las formaciones Sacapalca y una secuencia sedimentaria de la formación Catamayo sobreyacen el basamento metamórfico o Unidad Chigüinda (Figura 17). Los espesores del relleno de la cuenca son duplicados por acción de fallas.



Figura 17. Unidad Chigüinda.
Coordenas: X=705586; Y=9558523; Z=2774msnm.
Fuente: La autora.

Sección C.- En esta sección de Oeste a Este aumenta progresivamente la profundidad de la cuenca, contrariamente los valores de anomalía bajan de -7 hasta -25 mGal. La formación Catamayo (Figura 18) constituye sedimentos de baja densidad ($2,3 \text{ g/cm}^3$) con espesores de 200 m en sus bordes aumentando sustancialmente hacia el centro de la cuenca (700 m), la formación Sacapalca (Figura 19) constituye una serie de rocas volcánicas de afinidad ácida que registran baja densidad ($2,4 \text{ g/cm}^3$) con un espesor casi constante de 500 y 1000 m.



Figura 18. Formación Catamayo.
 Coordenadas: X=695959; Y=9559736; Z=2241 msnm.
 Fuente: La autora.



Figura 19. Cuello volcánico riolítico, formación Sacapalca.
 Coordenadas: X=678616; Y=9562014; Z=1249 msnm.
 Fuente: La autora.

Sección D.- En este segmento la anomalía de -23 mGal indican cambio lateral en las densidades de $2,67 \text{ g/cm}^3$ del basamento metamórfico (ver pág.32) interpretado como una intrusión granodiorítica de afinidad ácida de baja densidad ($2,52 \text{ g/cm}^3$) producto del volcanismo continental Paleógeno.

4.1.3. Cuenca de Loja.

La cuenca de Loja (Sección E) es una sinforma elongada N-S que se extiende 9 Km de Este a Oeste en la que el basamento de la Unidad Chigüinda (ver pág.32) forma una estructura

asimétrica cóncava sobre la que se desarrollan las secuencias sedimentarias de las formaciones Trigal, La Banda, Belén, San Cayetano, Quillollaco (Figura 20) y Salapa; según el modelo la mínima residual alcanza -23 mGal que evidencia la mayor profundidad de la cuenca, aproximadamente entre 1200 a 1500 m. A la altura del cerro Villonaco (Oeste de la cuenca de Loja) un salto en la anomalía de entre -15 y -17 mGal significa un declive en la densidad de las rocas metamórficas de la Unidad Chigüinda de 2,67 g/cm³ hasta 2,65 g/cm³ interpretado como el contacto con el granito anatóxico Tres Lagunas (Figura 21).



Figura 20. Formación Quillollaco (Vía Loja-Zamora).
Coordenadas: X=703043; Y=959535; Z=2501msnm.
Fuente: La autora.



Figura 21. Unidad Tres Lagunas (Parque eólico Villonaco).
Coordenadas: X=693796; Y=9558378; Z=2496 msnm.
Fuente: La autora.

4.2. Discusión de resultados.

Los análisis gravimétricos en Ecuador son limitados, especialmente en el área temática que abarca la cuenca de Alamor-Lancones. Valores en el mapa de anomalías de Bouguer (Anexo 4) al Sur de Ecuador de Feininger (1977) y Feininger & Seguin (1983) próximo a la zona de estudio decrecen de Este a Oeste con valores de -220 hasta -110 mGal que se correlacionan estrechamente con este estudio cuyos valores van de Este a Oeste desde -215 mGal hasta -101 mGal.

Basados en el modelo gravimétrico obtenido a lo largo del perfil de estudio, se ha realizado la interpretación geológica que muestra un modelo hipotético de las estructuras falladas y la profundidad del basamento de las cuencas, en base a esto se define el modelo evolutivo que inicia relativamente con el depósito de sedimentos Paleozoicos de la Unidad Chigüinda en una cuenca intracratónica o margen pasivo con aportes de origen continental (Litherland et al., 1994), posteriormente a inicios del Triásico (250-235 Ma) se produce un evento tectono-térmico a lo largo de él margen en donde ocurre el metamorfismo de los sedimentos semipelíticos, durante el Triásico Tardío (235-225 Ma) la fragmentación de Gondwana occidental produce una zona de rift que somete la secuencia semipelítica a la fusión parcial generando el emplazamiento de granitos tipo S (Riel et al., 2013; Eguez & Aspden, 1993), a partir del Jurásico Medio-Tardío (190-140 Ma) se originó una actividad volcánica a lo largo de la Zona Subandina y parte oriental de la Cordillera Real, tras el cese de la actividad volcánica la Cordillera Real fue deformada, elevada y erosionada (Eguez & Aspden, 1993).

Esta tectónica relativamente compleja produce un fallamiento de rumbo andino N-S, en el área de estudio los rasgos estructurales predominantes se muestran en el modelo geológico (Figura 22) interpretados como fallas corticales lítricas en el bloque Paleozoico Chigüinda de la Cordillera Real determinando la zona de fallas “Las Aradas” en la cuenca de Catamayo y al occidente el contacto con el arco de islas de Alamor-Lancones denominado zona de fallas Guayabal, en el modelo gravimétrico se interpreta estas fallas por una variante en la densidad del sustrato rocoso, en el caso del contacto con el arco de islas de la cuenca Alamor-Lancones valores de anomalía residual (-5 a 20 mGal) se relacionan con un cambio de densidad en el basamento de 2,67 a 2,8 g/cm³ además en el modelo geológico se interpreta un sistema de fallas que modifican el espesor de las series sedimentarias y volcanosedimentarias de las cuencas.

Spikings et al.,(2001) propone dos períodos de enfriamiento de la Cordillera Real durante 65-45 y 43-30 Ma, producto de la acreción de los terrenos Pallatanga y Macuchi al norte del País, estos eventos son marcados como el inicio del volcanismo continental Saraguro que

produjo el depósito de rocas de afinidad ácida en la cuenca de Catamayo además del emplazamiento de intrusivos granodioríticos en la cuenca Alamor-Lancones y el basamento Chingüinda.

Estudios recientes de Tamay et al., (2016) aportan valores locales de anomalía de Bouguer en las cuencas de Loja de -212 (Este) a -196 mGal (Oeste) y Catamayo de -190 (Este) a -158 mGal (Oeste), datos que se correlacionan parcialmente con los valores de la zona de estudio que van desde -215 mGal (Este) a en la cuenca de Loja a -185 mGal (Oeste) en la cuenca de Catamayo, los cuales indican una gran profundidad en las raíces de la Cordillera Real deformada.

La profundidad de las formaciones geológicas obtenidas en el modelo gravimétrico para la cuenca de Loja se comparan con estudios estratigráficos de Hungerbühler et al.,(2002) que propone un espesor de 1200 m para el relleno sedimentario. Los modelos gravimétricos obtenidos concuerdan con los espesores determinados en este estudio de entre 1200 a 1500 m. Para la cuenca de Catamayo, Hungerbühler et al., (2002) propone que los espesores del relleno de la cuenca llegan hasta 1000 m, según el análisis del modelo gravimétrico generado, la profundidad del relleno se extiende hasta los 1700 m por acción de fallas. En cuanto al basamento, series volcanoclásticas y sedimentarias de la cuenca Alamor-Lancones, se define en este modelo nuevos espesores basados en el modelo gravimétrico obtenido ya que no existen suficientes estudios estratigráficos en la zona.

En cuanto a la cuenca de Loja se presenta como una sinforma compleja con algunos pliegues aislados muy abiertos de ejes generalmente subhorizontales horizontados N-S, la mayoría de deformaciones afectan esencialmente la parte oriental de la cuenca y consisten en pliegues de diferentes tamaños y fallas inversas (Galindo et al., 2010; Tamay et al., 2016). En el modelo se observa la asimetría de la cuenca de Loja cuyos bordes están controlados por fallas en el margen oriental, donde descansan discordantemente sedimentos de la formación San Cayetano afectado por una deformación plástica y fallas de empuje. Sobre el basamento metamórfico de la Unidad Chingüinda existe una mayor profundidad que corresponden a anomalías negativas de hasta -19 mGals. Este depocentro habría sido generado por una compresión E-W lo que habría causado acortamiento de la corteza y elevación relativa en los bordes de la cuenca produciendo el depósito de los sedimentos (Tamay et al., 2016), hacia el borde oeste se alcanza anomalías residuales de hasta -23 mGal definiendo el área de menor profundidad de la cuenca.

La anomalía residual genera una curva de gravedad observada que se debe equilibrar con la curva de gravedad calculada modelada mediante el contraste de cuerpos con diferente

densidad interpretando los contactos y posibles zonas falladas, sin embargo este modelo no muestra la actividad de las fallas y su influencia con la peligrosidad del área de estudio.

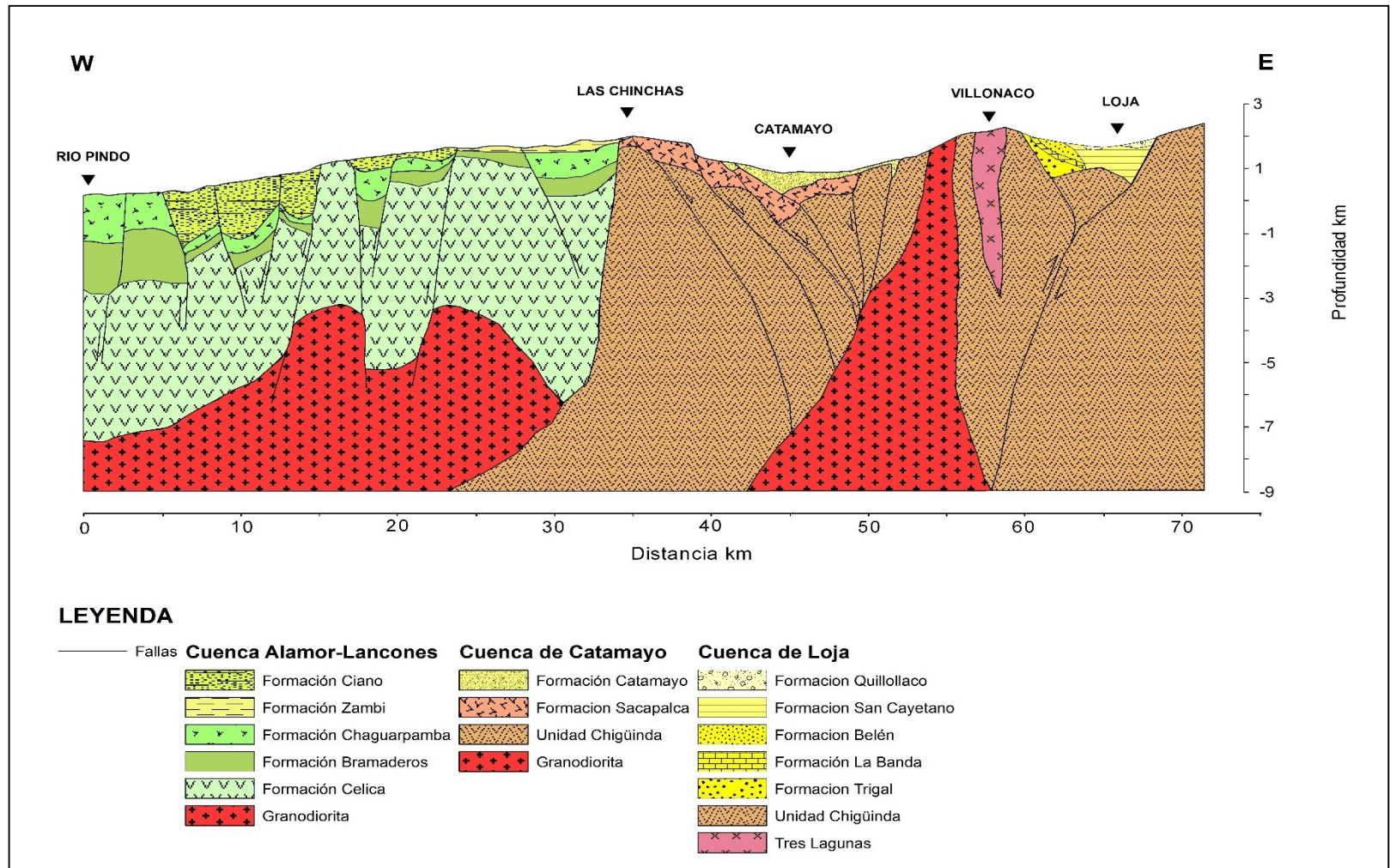


Figura 22. Perfil geológico Loja – Río Pindo.
Fuente:La autora.

CONCLUSIONES

- Mediante el modelo gravimétrico y los cuerpos anómalos identificados, se puede predecir la profundidad de las diferentes unidades litológicas y su emplazamiento en profundidad relacionado a grandes sistemas de fallas.
- En el perfil de estudio el modelo gravimétrico permitió interpretar la zona de fallas regionales "Las Aradas" en la cuenca de Catamayo y la zona de fallas Guayabal como el contacto de la Cordillera Real con el arco de islas de la cuenca Alamor-Lancones.
- El modelo permitió interpretar zonas falladas, mas no se identifica estructuras activas que puedan influir con la peligrosidad geológica en la zona de estudio.
- Los datos obtenidos de gravimetría fueron procesados para elaborar un modelo gravimétrico definiendo zonas anómalas que deben ser analizadas e interpretadas, mediante el cual se determinó la profundidad del relleno sedimentario para las cuencas Intramontañosas de Loja a 1500 m y Catamayo a 1000m y el relleno volcánico sedimentario la cuenca de Alamor-Lancones a 3000 m.
- El modelo gravimétrico permitió determinar el contraste de rocas en las que se distinguió series sedimentarias de 2,3 y 2,32 g/cm³, metamórficas de 2,67 g/cm³, volcanosedimentos ácidos de 2,4 g/cm³, volcanosedimentos básicos de 2,5 g/cm³, volcánicos básicos de 2,8 g/cm³, intrusiones granodioríticas ácidas de 2,52 g/cm³ y granitos tipo S de 2,65 g/cm³.
- Los valores de anomalía de Bouguer de -215 a -160 mGal indican el efecto de la isostasia en la Cordillera Real.
- Datos geofísicos obtenidos mediante gravimetría y geológicos de campo han demostrado ser útiles en la correlación de espesores y profundidad de las secuencias litológicas mediante la variación en su densidad y despegue del modelo que indican zonas de estructuras profundas.

RECOMENDACIONES

- Un estudio gravimétrico no aporta modelos únicos, varios cuerpos pueden generar una misma anomalía, por lo que se recomienda estudios complementarios con varios métodos geofísicos como magnetometría y sísmica de reflexión que permitan delimitar con mayor exactitud zonas de contacto y continuidad de fallas a profundidad.
- Realizar trabajos de campo teniendo como objetivo la identificación de estructuras, a lo largo de la zona de estudio. La información gravimétrica se puede complementar con métodos directos de estudio de pozos, que ayuden a correlacionar en profundidad las estructuras identificadas.
- Mediante el modelo gravimétrico no se ha podido determinar zonas de estructuras activas que puedan generar peligrosidad tectónica, recomendando un estudio neotectónico a detalle de las cuencas de Loja, Catamayo y Alamor-Lancones.

BIBLIOGRAFÍA

- Aspden, J. A., Harrison, S. H., & Rundle, C. . (1992). New geochronological control for the tectono-magmatic evolution of the metamorphic basement, Cordillera Real and El Oro Province of Ecuador, *6*(1), 77–96.
- Cantos, J. (1987). *Tratado de Geofísica Aplicada* (Tercera ed). Madrid-España: Litoprint-Palermo, S.L.
- Cochrane, R., Spikings, R., Gerdes, A., Ulianov, A., Mora, A., Villagómez, D., ... Chiaradia, M. (2014). Permo-Triassic anatexis, continental rifting and the disassembly of western Pangaea. *Lithos*, *190-191*, 383–402. <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.12.020>
- Eguez, A., & Aspden, J. A. (1993). The Mesozoic-Cenozoic Evolution of the Ecuadorian Andes, (1), 21–23.
- Eguez, A., & Poma, O. (2001). La cuenca Alamor-Lancones en el contexto Geodinámico de los andes de Huancabamca, SW Ecuador.
- Estrada, L. A. (2012). *Prospección gravimétrica*. Universidad Nacional de Tucuman, Argentina. Retrieved from <http://www.herrera.unt.edu.ar/geofisica/Gravimetria para Geologos.pdf>
- Feininger, T. (1977). Mapa de anomalías.pdf.
- Feininger, T., & Seguin, M. . (1983). *Simple Bouger gravity anomaly field and the inferred crustal structure of continental Ecuador*.
- Galindo, J., Soto, J., Ruano, P., Tamay, J., Lamas, F., Guartán, J., & Paladines, A. (2010). Gravimetría y estructuras de la cuenca neógena de Loja a partir de datos gravimétricos (Andes Ecuatorianos).
- Gallastegui, J. (2000). *Estructura Cortical de la Cordillera y Margen Continental Catámbricos: Perfiles ESCI-N*. Universidad de Oviedo. Retrieved from <http://geol.uniovi.es/TDG/Volumen22/TG22.PDF>
- Gatto, R. (2000). Consideraciones sobre Las mecánicas de Galileo. *Galileo Y La Gestación de La Ciencia Moderna*, 187–203. Retrieved from http://fundacionorotava.org/archivos adjuntos/publicaciones/actas/act_9_pdf_web/11_Romano_Gatto.pdf
- Hungerbühler, D., Eguez, A., Peterson, D. E., Helg, U., & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador, 76–123.
- INIGEMM. (2013a). Hoja Geológica Zaruma.
- INIGEMM. (2013b). *PROYECTO MODELO PILOTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL GEOLÓGICO- MINERALÓGICO DE LAS ZONAS ZARUMA Y CARIAMANGA A ESCALA 1:100.000*. Quito.
- Jaillard, E., Ordoñez, M., Berrones, G., Bengtson, P., Bonhomme, M., Jimenez, N., & Zambrano, I. (1996). *Sedimentary and tectonic evolution of the arc zone of Southwestern Ecuador during Late Cretaceous and Early Tertiary times*.
- Jaillard, E., Soler, P., Carlier, G., & Mourier, T. (1990). Geodynamic evolution of the northern and central Andes during early to middle Mesozoic times: a Tethyan model. <http://doi.org/10.1144/gsjgs.147.6.1009>
- Kennerley, J. ., & Almeida, L. (1973). Mapa geológico de Ecuador, hoja de Zaruma (38) 1:100.000.
- Kennerley, J. ., & Almeida, L. (1975). Mapa geológico de Ecuador, hoja de Loja (56) 1:100.000.
- Litherland, M., Aspden, J. a, & Jemielita, R. a. (1994). *The metamorphic belts of Ecuador. Overseas Memoir of the British Geological Survey* (Primera, Vol. 11). British Geological

Survey.

- López, G., & Zura, C. (2013). Correlación de los estudios magnéticos y gravimétricos con la geología del sector de Chachimbiro para las prospección geotérmica, 104. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/726/1/T-UCE-0012-149.pdf>
- Marocco, R., Egüez, A., Lavenu, A., Noblet, C., Baudino, R., & Winter, T. (1993). Las cuencas intramontañas neogenas del Ecuador, 135–138.
- Mirónov, V. (1977). *Curso de Prospección Gravimétrica*. Madrid-España: Reverté. Retrieved from https://books.google.com.ec/books?id=L1GdtbuD884C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q=densidad&f=false
- Navarro, A. H. (2003). Carta Gravimétrica de la República Mexicana. *Revista Cartográfica*, 59–70. Retrieved from www.ebscohost.com
- Parasnis, D. (1971). *Geofísica Minera*. (E. Orellana, Ed.). Madrid: Paraninfo.
- Riel, N., Guillot, S., Jaillard, E., Martelat, J. E., Paquette, J. L., Schwartz, S., ... Yuquilema, J. (2013). Metamorphic and geochronological study of the Triassic El Oro metamorphic complex, Ecuador: Implications for high-temperature metamorphism in a forearc zone. *Lithos*, 156-159, 41–68. <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.10.005>
- Scintrex Limited. (2006). Manual Gravimetro Scintrex CG-5.
- Siñeriz, J. G. (1928). *Los Métodos geofísicos de Prospección y sus aplicaciones a la resolución de varios problemas Geológicos-Tectónicos*. Madrid.
- Spikings, R. A. Y., Winkler, W., Seward, D., & Handler, R. (2001). Along-strike variations in the thermal and tectonic response of the continental Ecuadorian Andes to the collision with heterogeneous oceanic crust, 186.
- Strathern, P. (2014). *Newton y la Gravedad*. (S. A. Siglo XXI de España Editores, Ed.) (Primera ed). Madrid. Retrieved from <http://www.ebrary.com>
- Tamay, J., Galindo-Zaldívar, J., Ruano, P., Soto, J., Lamas, F., & Azañón, J. M. (2016). New insight on the recent tectonic evolution and uplift of the southern Ecuadorian Andes from gravity and structural analysis of the Neogene-Quaternary intramontane basins. *Journal of South American Earth Sciences*, 70, 340–352. <http://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.006>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*.
- Wilson, J., Buffa, A., & Lou, B. (2007). *Física* (sexta). Mexico: Pearson Education.

ANEXOS

Rock type	Range (g/cm ³)	Average (g/cm ³)	Mineral	Range (g/cm ³)	Average (g/cm ³)
Sediments (wet)			Metallic minerals		
Overburden		1.92	Oxides, carbonates		
Soil	1.2-2.4	1.92	Bauxite	2.3-2.55	2.45
Clay	1.63-2.6	2.21	Limonite	3.5-4.0	3.78
Gravel	1.7-2.4	2.0	Siderite	3.7-3.9	3.83
Sand	1.7-2.3	2.0	Rutile	4.18-4.3	4.25
Sandstone	1.61-2.76	2.35	Manganite	4.2-4.4	4.32
Shale	1.77-3.2	2.40	Chromite	4.3-4.6	4.36
Limestone	1.93-2.90	2.55	Ilmenite	4.3-5.0	4.67
Dolomite	2.28-2.90	2.70	Pyrolusite	4.7-5.0	4.82
Sedimentary rocks		2.50	Magnetite	4.9-5.2	5.12
Igneous rocks			Franklinite	5.0-5.22	5.12
Rhyolite	2.35-2.70	2.52	Hematite	4.9-5.3	5.18
Andesite	2.4-2.8	2.61	Cuprite	5.7-6.15	5.92
Granite	2.50-2.81	2.64	Cassiterite	6.8-7.1	6.92
Granodiorite	2.67-2.79	2.73	Wolframite	7.1-7.5	7.32
Porphyry	2.60-2.89	2.74	Sulfides, arsenides		
Quartz diorite	2.62-2.96	2.79	Sphalerite	3.5-4.0	3.75
Diorite	2.72-2.99	2.85	Malachite	3.9-4.03	4.0
Lavas	2.80-3.00	2.90	Chalcopyrite	4.1-4.3	4.2
Diabase	2.50-3.20	2.91	Stannite	4.3-4.52	4.4
Basalt	2.70-3.30	2.99	Stibnite	4.5-4.6	4.6
Gabbro	2.70-3.50	3.03	Pyrrhotite	4.5-4.8	4.65
Peridotite	2.78-3.37	3.15	Molybdenite	4.4-4.8	4.7
Acid Igneous	2.30-3.11	2.61	Marcasite	4.7-4.9	4.85
Basic Igneous	2.09-3.17	2.79	Pyrite	4.9-5.2	5.0
Metamorphic rocks			Bornite	4.9-5.4	5.1
Quartzite	2.5-2.70	2.60	Chalcocite	5.5-5.8	5.65
Schists	2.39-2.9	2.64	Cobaltite	5.8-6.3	6.1
Graywacke	2.6-2.7	2.65	Arsenopyrite	5.9-6.2	6.1
Marble	2.6-2.9	2.75	Bismuthinite	6.5-6.7	6.57
Serpentine	2.4-3.10	2.78	Galena	7.4-7.6	7.5
Slate	2.7-2.9	2.79	Cinnabar	8.0-8.2	8.1
Gneiss	2.59-3.0	2.80	Non-metallic minerals		
Amphibolite	2.90-3.04	2.96	Petroleum	0.6-0.9	-
Eclogite	3.2-3.54	3.37	Ice	0.88-0.92	-
Metamorphic	2.4-3.1	2.74	Sea Water	1.01-1.05	-

Anexo 1. Densidad de rocas y Minerales
Fuente: Telford et al., (1990)

	Formación	Edad	Tipo de roca	Densidad	Anomalía de Bouguer
Cuenca de Loja	Trigal, La Banda, Belén, San Cayetano, Quillollaco, Salapa	Mioceno medio-Plioceno	Sedimentaria	2,3 g/cm ³	-215 a -191 mGal
	Tres Lagunas	Triásico	Granito tipo S	2,65 g/cm ³	
	Chigüinda	Paleozoico	Metamórfico semipelítico	2,67 g/cm ³	
Cuenca de Catamayo	Catamayo	Mioceno medio	Sedimentaria	2,3 g/cm ³	-191 a -137 mGal
	Granodiorita	Eoceno	Granodiorita	2,52 g/cm ³	
	Sacapalca	Paleoceno-Mioceno	Volcánicas ácidas	2,4 g/cm ³	
	Chigüinda	Paleozoico	Metamórfico semipelítico	2,67 g/cm ³	
Cuenca Celica	Intrusivos indiferenciados	Terciario	Granodiorita	2,52 g/cm ³	-137 a -101 mGal
	Ciano	Cretácico superior	Sedimentaria semi-metamorfizada	2,32 g/cm ³	
	Zambi	Cretácico superior	Sedimentaria	2,32 g/cm ³	
	Chaguarpamba	Cretácico superior	Volcanoclástica básicas	2,5 g/cm ³	
	Bramaderos	Cretácico superior	Volcanoclástica Básicas	2,5 g/cm ³	
	Celica	Cretácico inferior	Volcánicas básicas	2,8 g/cm ³	

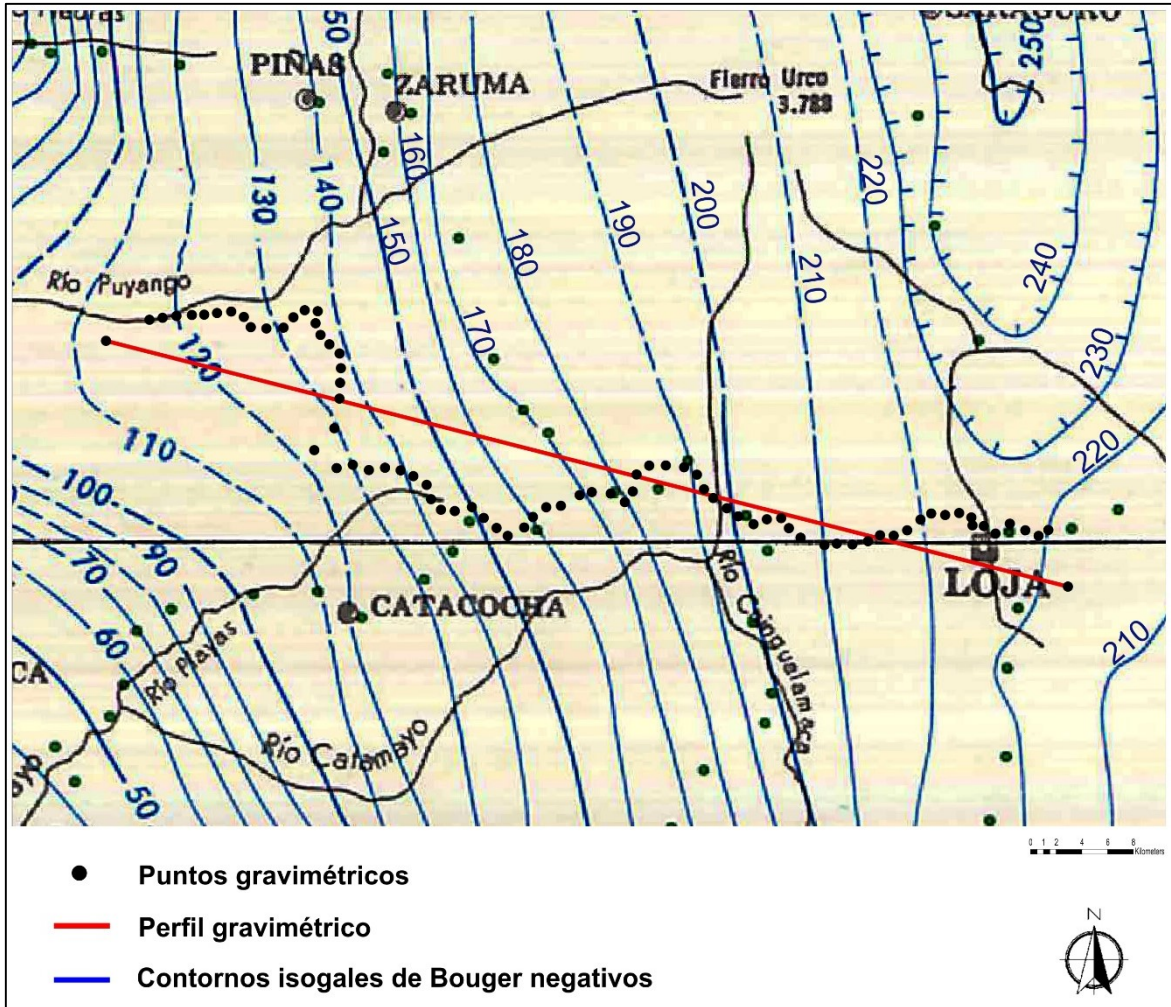
Anexo 2. Tabla de formaciones geológicas basado en datos gravimétricos.

Fuente: La autora.

ID	X	Y	Densidad	Tipo roca	Formación
Muestra 1	705880	9558725	2,66	Metamórfico	Chigüinda
Muestra 2	700816	9559035	1,91	Lutita	San Cayetano
Muestra 3	693737	9558282	2,55	Granito anatóxico	Tres Lagunas
Muestra 6	678846	9561915	2,47	Riolitas	Sacapalca
Muestra 9	665418	9559755	2,39	Filitas	Zambi
Muestra 11	650237	9569029	2,72	Andesita	Celica

Anexo 3. Tabla de densidades obtenidas en el laboratorio.

Fuente: La autora.



Anexo 4. Mapa gravimétrico de anomalías Bouguer simples del área de estudio.
 Fuente: Feininger (1977)