



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS

**Estudio gravimétrico de la transversal central de la cordillera de los Andes,
con fines de evaluación tectónica y profundidad cortical del basamento.
Tramo Manta-Quevedo-La Maná, cuenca de Manabí.**

TRABAJO DE TITULACIÓN.

AUTOR: Bravo Jiménez, Diego Andrés

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

CO-DIRECTOR: Soto Luzuriaga, Jonh 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>

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 de la transversal central de la cordillera de los Andes, con fines de evaluación tectónica y profundidad cortical del basamento. Tramo Manta-Quevedo-La Maná, cuenca de Manabí, realizado por Diego Andrés Bravo Jiménez, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre de 2017

f) _____

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESION DE DERECHOS

Yo, Diego Andrés Bravo Jiménez declaro ser autor del presente trabajo de titulación: Estudio gravimétrico de la transversal central de la cordillera de los Andes, con fines de evaluación tectónica y profundidad cortical del basamento. Tramo Manta-Quevedo-La Maná, cuenca de Manabí, de la Titulación 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 o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

f.....

Autor: Diego Andrés Bravo Jiménez

Cédula: 1104663743

DEDICATORIA

La realización del presente trabajo está dedicado primeramente a Dios por guiarme a lo largo de mi vida, por la vida misma, y por las enseñanzas que me ha dejado en cada decisión tomada, a mis amados padres Alisba y Manuel porque a pesar de las circunstancias o adversidades, han sido siempre un apoyo incondicional para mí, a mis abuelitos Victoria y Agustín (+), Dolores (+) y José (+), por sus cuidados y amor desinteresado y por inculcarme desde pequeño el valor del trabajo, a mis hermanos, tíos y mi familia en general que de una u otra forma me han brindado su apoyo para culminar con éxito mi formación profesional.

Diego.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos:

Principalmente a mis padres y hermanos por su constante ayuda durante toda mi educación y por estar siempre pendiente de la misma.

A la Universidad Técnica Particular de Loja, el departamento de Geología y Minas e Ingeniería Civil y especialmente a la titulación de Ingeniería en Geología y Minas.

A cada uno de mis docentes que desde el inicio me supieron brindar sus conocimientos para tener un buen desenvolvimiento dentro del campo profesional, y en especial a mi director del trabajo de fin de titulación Ms.c. José Vidal Tamay Granda por su compromiso y orientación durante el desarrollo del mismo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESION DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	x
RESUMEN EJECUTIVO	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
ANTECEDENTES.....	4
OBJETIVOS	5
CAPITULO I.....	6
GENERALIDADES	6
1.1. Ubicación geográfica del área de estudio.	7
1.2. Geología regional.	8
1.2.1. Geología regional de la Costa.	8
1.2.2. Geología regional de la cordillera Occidental de los Andes.	11
1.3. Contexto tectónico regional.	15
1.3.1. Subducción de placas.	15
1.3.2. Levantamiento de la cordillera costanera.	16
1.3.3. Evolución de la cordillera Occidental.	17
CAPITULO II.....	19
MARCO CONCEPTUAL	19
2.1. Prospección gravimétrica.....	20
2.2. Principios físicos.....	20
2.2.1. Ley de gravitación de Newton.....	20

2.2.2.	Potencial de gravitación.....	21
2.2.3.	Medidas absolutas y relativas de la gravedad.....	21
2.2.3.1.	Medidas absolutas de la gravedad.	21
2.2.3.2.	Medidas relativas de la gravedad.	22
2.2.4.	Unidades de medida.....	22
2.3.	Esferoide normal y geoide.	22
2.3.1.	Esferoide normal.	22
2.3.2.	El geoide.	23
2.4.	Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre.	23
2.4.1.	Con la latitud.....	23
2.4.2.	Con la altitud.....	24
2.4.2.1.	Corrección de aire libre o de faye.	24
2.4.2.2.	Corrección de Bouguer.....	24
2.4.2.3.	Corrección topográfica.....	25
2.4.3.	Con el tiempo.	25
2.4.3.1.	Efecto de las mareas.....	25
2.4.3.2.	Deriva instrumental.....	25
CAPITULO III.....		26
METODOLOGÍA.....		26
3.1.	Recopilación de información existente.....	27
3.2.	Instrumentos de medición.....	27
3.2.1.	Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv.	27
3.3.	Trabajo de campo.....	28
3.3.1.	Toma de datos gravimétricos.....	28
3.3.2.	Levantamiento de datos geológicos.....	30
3.4.	Trabajo de gabinete.....	30
3.5.	Trabajo en laboratorio.....	31
CAPITULO IV.....		32

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	32
4.1. Interpretación del modelo gravimétrico.	33
4.1.1. Margen costero y cuenca Manabí.	35
4.1.2. Borde de la cordillera Occidental.	38
4.2. Discusión de resultados.....	39
CONCLUSIONES	43
RECOMENDACIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.	7
Figura 2. Mapa Geológico modificado de la margen costera ecuatoriana.	11
Figura 3. Mapa Geológico simplificado de la cordillera Occidental.....	12
Figura 4. Perfil simplificado de la cordillera Occidental.	14
Figura 5. Subducción de placas.	16
Figura 6. Relación geoide - elipsoide.	23
Figura 7. Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv.....	28
Figura 8. Toma de datos gravimétricos.	29
Figura 9. Modelo gravimétrico, perfil Manta – El Tingo.	34
Figura 10. Conglomerados, formación Tablazo.....	35
Figura 11. Lutitas, formación Dos Bocas.....	36
Figura 12. Lutitas, lodolitas, formación Ónzole.....	36
Figura 13. Areniscas, formación Borbón.	37
Figura 14. Lodolitas, formación Balzar – San Tadeo.....	37
Figura 15. Rocas volcano-sedimentarias, terrenos Macuchi.	38
Figura 16. Andesitas, terrenos Macuchi.	39
Figura 17. Perfil Geológico Manta – El Tingo; Falla El Aromo (FA), Falla Jipijapa (FJ), Falla Pichincha (FPi), Zona de sutura Guayaquil-Babahoyo-Sto Domingo (ZS), Sistema de fallas Valencia-La Maná (SFV-M).....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas del punto inicial y final del perfil realizado; referenciados en el datum UTM WGS-84 Zona 17s.	8
Tabla 2. Datos de base gravimétrica ubicada en Universidad Técnica Particular de Loja.....	29
Tabla 3. Tabla de densidades obtenidas en laboratorio.....	31

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación se orienta al levantamiento de datos gravimétricos a 1º de latitud Sur, orientados de Oeste a Este que atraviesa gran parte de la Cuenca de Manabí, entre el sector El Tingo del cantón Pujilí de la provincia de Cotopaxi hasta la ciudad de Manta en la provincia de Manabí. Se colocó un total 225 estaciones de medida gravimétricas distanciadas en un 1 kilómetro aproximadamente.

El procesamiento y corrección de datos gravimétricos genera valores de anomalía de Bouguer positivas y negativas a lo largo de toda la zona de estudio, las cuales permiten generar anomalías residuales y a partir de la variación de la densidad de los diferentes tipos de rocas se puede realizar el correspondiente modelo gravimétrico.

Con la información de campo recolectada y el modelo gravimétrico obtenido, adicional a información de estudios previos de la zona, es posible generar un perfil geológico, que permita interpretar el modelo tectónico de la región basado en estructuras profundas de las principales fallas regionales de la zona.

PALABRAS CLAVES: anomalía de Bouguer, anomalías residuales, modelo gravimétrico, tectónica.

ABSTRACT

The present research concerns about the collection of gravimetric data at 1 °S of latitude, oriented from West to East that crosses of the Manabí basin between “El Tingo” which belongs to Pujilí canton in the province of Cotopaxi to the city of Manta in the province of Manabí. The data 225 gravimetric measurement stations were placed at a distance of approximately 1 kilometer.

The processing and correction of gravimetric data generates positive and negative values of Bouguer anomaly throughout the study area, which allow generating residual anomalies and from the variation of density in different types of rocks a gravimetric model can be made.

With the collected fieldwork information and the obtained gravimetric model, in addition to information from previous studies of the area, it is possible to generate a geological profile, that allows analyzing the tectonic model of the region based on deep structures of the main regional faults of the zone.

Keywords: Bouguer anomaly, residual anomalies, gravimetric model, tectonics.

INTRODUCCIÓN

Conociendo que existen pocos estudios relacionados a la actividad tectónica sobre el basamento cortical de la cordillera de los Andes y su peligrosidad, es de suma importancia la aplicación de métodos indirectos que nos permitan establecer la profundidad y estructura de la misma. La Geofísica como ciencia ha sido vital en la investigación en diferentes campos de la Geología, por ello para realizar este estudio se aplicó metodologías que integran datos geológicos y geofísicos, en especial el método gravimétrico.

El objetivo de la presente investigación consiste en obtener información de la zona de estudio mediante la aplicación del método gravimétrico, en función de los modelos correspondientes poder definir la geometría de los rellenos sedimentarios y la profundidad cortical del basamento.

Los contenidos necesarios para la presente investigación se componen de cuatro capítulos:

En el Capítulo I, se especifica las generalidades de la investigación donde consta la ubicación geográfica de la zona de estudio, la geología y un contexto tectónico regional.

El Capítulo II, contiene el marco teórico, donde se presentan diferentes conceptos en base a la investigación, que complementan su entendimiento.

El Capítulo III, incluye la metodología de la investigación donde se da a conocer el proceso realizado para el estudio como la recopilación de información existente, trabajo de campo realizado, instrumentos de medida y la obtención y corrección de datos gravimétricos, los cuales posteriormente generan curvas de anomalías necesarias para realizar el modelo.

En el Capítulo IV, se presenta la interpretación y discusión de los resultados, derivados del modelo gravimétrico, fundamentados en estudios previos y observaciones de campo, que finalmente permiten realizar un modelo de evolución geológica.

El estudio aportará con información relevante para futuras investigaciones o proyectos a detalle en la cuenca Manabí y el borde de la Cordillera Occidental.

ANTECEDENTES

La zona de estudio no cuenta con estudios gravimétricos a detalle, el primer mapa gravimétrico de anomalías de Bouguer Simple del Ecuador, fue realizado por Feininger (1977), el cual consta de 14446 estaciones gravimétricas distribuidas a lo largo del Ecuador. El mapa presenta valores de anomalías positivas hacia la región Costa particularmente en la zona que abarca la cuenca de Manabí que alcanzan un máximo de 160 mGal y hacia la zona céntrica del Ecuador entre la cordillera de los Andes presenta anomalías negativas con valores de hasta -290 mGal, lo cual revela que existe una corteza continental engrosada.

Araujo (2013) realiza un estudio en la zona basado en análisis de imágenes satelitales determinando la profundidad del MOHO en Ecuador, con valores de engrosamiento de la corteza continental, bajo el Océano Pacífico en el límite de la Placa de Nazca y el manto es de unos 10 km. La Cordillera Occidental está formada por rocas de corteza oceánica acrecionadas, donde el grosor de la corteza puede alcanzar los 40 km, en los valles interandinos puede alcanzar un espesor entre 45-50 km.

Para la geología de la zona existen diversos estudio entre ellos el de Hughes & Pilatasig (2002), que brinda información sobre la cordillera Occidental, el Mapa Geológico de la margen costera ecuatoriana realizado por Reyes & Michaud (2012) y los mapas geológicos regionales de la cordillera Occidental del Ecuador entre 0°-1°S, y entre 1°-2°S a escala 1:200.000, además de las hojas geológicas de Manta, Portoviejo y Quevedo a escala 1:100.000, tomadas del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico.

OBJETIVOS

Objetivo 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.

Objetivos Específicos.

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

CAPITULO I
GENERALIDADES

1.1. Ubicación geográfica del área de estudio.

El Ecuador se encuentra situado al noroeste de Sudamérica, la zona de estudio se ubica al Oeste de los Andes ecuatorianos aproximadamente a 1° S de latitud, la misma atraviesa una gran extensión de la Cuenca Manabí. Limita al Este con las estribaciones del borde de la Cordillera Occidental de los Andes y al Oeste con el margen del Océano Pacífico y la Cordillera Costanera. El perfil de estudio tiene una orientación E-W, con una longitud de 185 Km que se extiende entre las provincias de Cotopaxi, Los Ríos, Guayas y Manabí (figura 1).



Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.
 Fuente: Autor
 Elaboración: Autor

La siguiente tabla muestra la ubicación de los puntos de coordenadas de la zona de estudio.

Tabla 1. Coordenadas del punto inicial y final del perfil realizado; referenciados en el datum UTM WGS-84 Zona 17s.

DATOS	OBSERVACIÓN	COORDENADAS		
		X	Y	Z
Punto inicial	Parroquia Rural “El Tingo – La Esperanza”. Pujilí, provincia de Cotopaxi.	716112	9898629	1477
Punto final	Manta, provincia de Manabí	532240	9894863	8

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

1.2. Geología regional.

1.2.1. Geología regional de la Costa.

El área de estudio, atraviesa formaciones geológicas Cretácicas y Cuaternarias donde la actividad tectónica influye en su proceso de formación. La geología del margen costanero corresponde a rocas formadas por un basamento de corteza oceánica subyacida por rocas sedimentarias de origen marino y continental.

Las rocas más antiguas hacia la región costa corresponden a la formación Piñón, que constituye el basamento Cretácico compuesto por rocas de corteza oceánica. La sedimentación marina ocurrió desde el Cretáceo Superior (Fm. Cayo), hasta el final del Cretáceo (Fm. Guayaquil, Maestrichtiano) y depósitos Mio-Plioceno a Cuaternarios en la cuenca Manabí (Reyes & Michaud, 2012) (figura 2).

Formación Piñón (Albiano – Cenomaniano).

La Formación Piñón, aflora al noroeste de la población costera de Cayo, en la provincia de Manabí, corresponde a un plateau-basáltico (Reynaud, Jillard, Lapierre, Mamberti, & Mascle, 1999) de edad cretácica superior (89 Ma). La formación es esencialmente de una serie volcánica, incluye gabros, basaltos, volcano-sedimentarios y pillow lavas. Pequeños afloramientos de esta unidad pueden ser confundidos con emanaciones ígneas básicas posteriores.

La formación Piñón tiene localmente segregaciones de características granodioríticas, y cerca de estos ambientes, se encuentran a veces, incrustaciones de especularita (Núñez, 2003).

En el cerro Hojas, al oeste de Portoviejo, las rocas volcánicas consisten en aglomerados basálticos con lapilli y lechos de toba. Estas rocas están penetradas localmente por diques basálticos porfírico y en general por rocas ígneas básicas de color gris oscuro a negro, tales como gabro y diabasas.

En la sección tipo del noroeste del Puerto de Cayo, las series volcánicas se componen de rocas piroclásticas no estratificadas, con intersedimentación de lavas porfíricas, brechas y aglomerados, del tipo diabasa – basalto. Unos pocos horizontes menores, arcillosos y arenosos, están presentes (Núñez, 2003).

Formación Cayo.

Se presenta ampliamente en la cordillera Chongón Colonche, yace sobre la formación Piñón, con un espesor que alcanza los 3 km aproximadamente, comprende areniscas, conglomerados, cherts, tobas y aglomerados volcánicos de edad cretácica superior (Núñez, 2003).

Formación San Mateo.

Consiste de areniscas de grano fino a medio que descansan sobre un conglomerado basal, vetillas de lignito se aprecian en ciertos sectores de la secuencia que alcanza los 800 m aproximadamente, la formación del Eoceno Medio Tardío a Superior sugiere una deposición principalmente en aguas someras y ocasionalmente en aguas algo más profundas (Baldock, 1982).

Formación Punta Blanca.

Aflora localmente en el sistema de fallas de Jama, la formación de hasta 1000 m de potencia está representada por una serie de rocas silíceas diatomáceas pelíticas de origen marino del final del Eoceno e inicios del Oligoceno (Reyes & Michaud, 2012).

Formación Dos Bocas.

Aflora masivamente en el área de Tosagua donde alcanza un espesor de 2.5 km; comprende lutitas y lodolitas de color chocolate localmente cortadas por diques sedimentarios de areniscas finas y algunas vetillas de yeso de edad miocénica.

Presenta concreciones calcáreas y acumulaciones locales de óxido de hierro y azufre sedimentario (Reyes & Michaud, 2012).

Formación Villingota.

Sobreyace transicionalmente a las lutitas de la formación Dos Bocas, consiste de lutitas laminadas con un color blanco de meteorización, variando de 250 – 650 metros de espesor, la abundante micrófauna indica una edad mioceno inferior a medio (Baldock, 1982).

Formación Angostura.

Ocurre en los escalones orientales de la cordillera Chongón Colonche, comprende conglomerados, capas de arenisca de grano fino a medio y lutitas calcáreas del Mioceno Medio, con un espesor aproximado de 550 metros (Núñez, 2003).

Formación Ónzole.

Se emplaza concordantemente encima de la formación Angostura y subyace también concordantemente a la formación Borbón, tiene un espesor de 250 metros, y se caracteriza por limolitas silíceas azuladas y horizontes de areniscas finas, que se meteorizan a café amarillento. La formación de edad miocénico medio es equivalente al miembro Progreso de la formación con el mismo nombre (Núñez, 2003).

Formación Borbón.

Se presenta en los cerros de la cuenca baja de Manabí, sobreyace transicionalmente y concordantemente a la formación Ónzole, su espesor promedio es de 200 metros, y está formado por areniscas masivas con niveles lenticulares de conglomerado, e intercalaciones de lutitas tobáceas del Mioceno Superior a Plioceno (Núñez, 2003).

Formación Balzar.

Esta formación del Plioceno se desarrolla al este de la falla Pichincha de hasta 80 metros de espesor, está formada por series de lodolitas masivas de color café amarillento y poco consolidadas, las cuales están cubiertas por los abanicos aluviales de Santo Domingo y Pedro Vicente-Maldonado cuyas facies más distantes han sido cartografiada en la cuenca hidrográfica del río Guayas en el sector Balzar donde forman terrazas bien estratificadas (Reyes & Michaud, 2012).

Formación Tablazo.

Se la puede observar principalmente en algunos sectores de la cuenca del Guayas, en la península de Santa Elena, en la isla de Puná y en el área de Manta, su espesor es variable con un máximo de 80 metros, formada por areniscas calcáreas, arenas finas, conglomerados y arcillas del Pleistoceno a Holoceno (Núñez, 2003).

Depósitos Cuaternarios.

Los depósitos cuaternarios más recientes se presentan a las coberturas sedimentarias de los abanicos aluviales desarrollados sobre el flanco occidental de la Cordillera Occidental. (Reyes & Michaud, 2012).

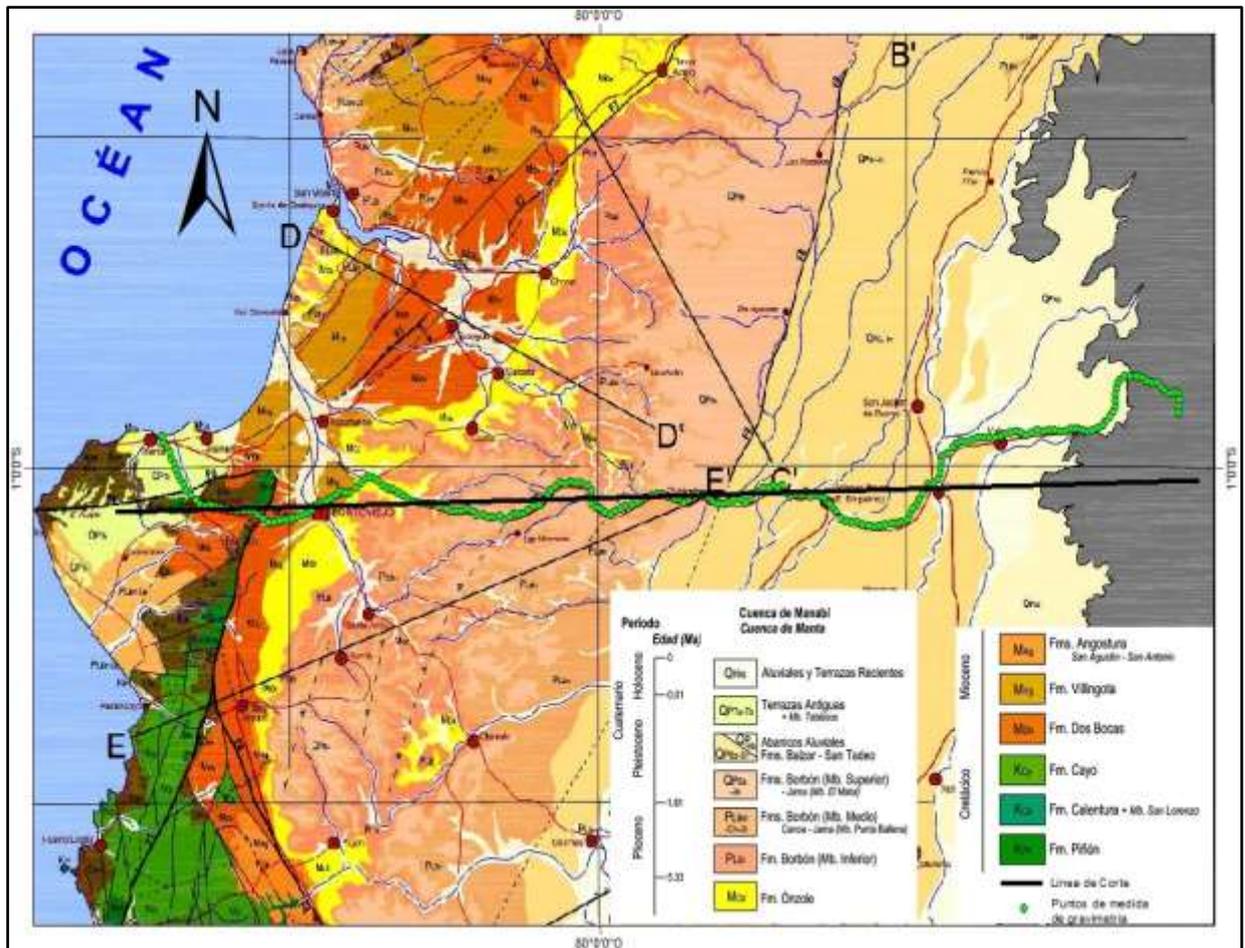


Figura 2. Mapa Geológico modificado de la margen costera ecuatoriana.

Fuente: Reyes P. & Michaud F. (2012).

Elaboración: Reyes Pedro & Michaud François.

1.2.2. Geología regional de la cordillera Occidental de los Andes.

El límite oriental de la Cordillera Occidental es la zona activa de la falla Pujilí (Figuras 3 y 4), siendo ésta la extensión meridional de la falla Cauca-Patía que se puede trazar a través de Colombia hacia el Caribe (Litherland & Aspden, 1992).

Uno de los avances más importantes realizados es el reconocimiento de que las partes central y septentrional de la Cordillera Occidental del Ecuador comprenden dos terrenos

principales, separados por una zona de cizalladura regionalmente importante, llamada Chimbo – Toachi (Figuras 3 y 4).

Los terrenos Pallatanga consisten principalmente en turbiditas del Cretácico tardío, con pequeñas pero significativas hileras de basaltos y rocas ultramáficas limitadas por fallas.

El terreno Macuchi consiste predominantemente en una secuencia volcanosedimentaria del Eoceno temprano (y posiblemente del Paleoceno tardío) de composición basáltica a andesítica (Hughes & Pilatasig, 2002).

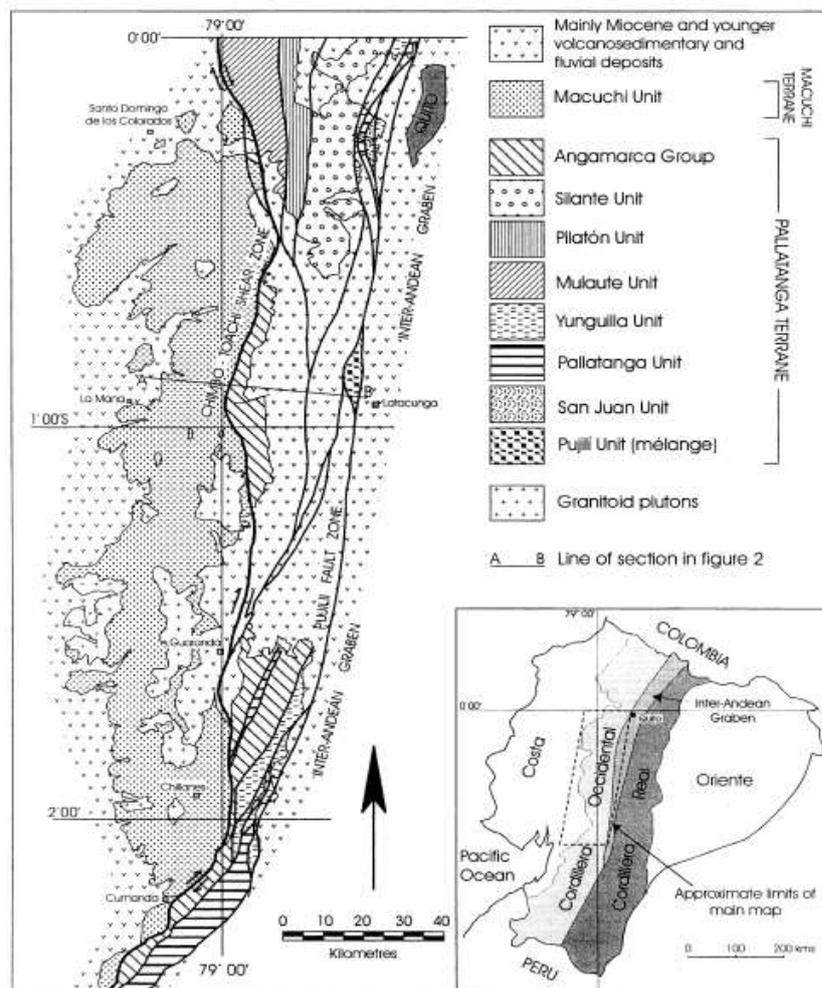


Figura 3. Mapa Geológico simplificado de la cordillera Occidental.
Fuente: Hughes & Pilatasig (2002).
Elaboración: Hughes Richard & Pilatasig Luis.

Terrenos Pallatanga.

El terreno Pallatanga aflora a lo largo del borde Este de la Cordillera Occidental y está separado de la Cordillera Real por la zona de falla activa Pujilí (Hughes & Pilatasig, 2002).

Está compuesto por una basamento máfico (Unidades Pallatanga y San Juan) interpretados como fragmentos de plateau oceánico (Kerr, Aspden, Tarney, & Pilatasig, 2002).

El borde oriental del terreno Pallatanga está marcado por la falla Calacalí- Pujilí-Pallatanga, que incluye una zona de melange tectónico conocido como melange de Pujilí. Sin embargo hacia el borde Oeste de la Cordillera Occidental los terrenos Pallatanga se encuentran en contacto con los terrenos Macuchi a través de zonas de sutura Chimbo-Toachi.

El basamento máfico está cubierto por rocas sedimentarias y volcánicas de edad Cretácico tardío a reciente. Las relaciones estratigráficas de estas secuencias son complejas debido al fuerte tectonismo que afecta estas rocas, lo que ha producido que la mayoría de las unidades se encuentren separadas entre sí por fallas en sentido N-S.

Las principales unidades geológicas se describen a continuación.

Unidad Pujilí.

Esta unidad fue descrita por Litherland en 1994, se trata de un melange tectónico caótico y altamente deformado, presente sólo a lo largo del margen oriental de la Cordillera Occidental (zona de fallas de Pujilí, figuras 3 y 4).

Los tipos de clastos dentro de la melange se derivan tanto de configuraciones oceánicas como continentales e incluyen material foliado ultramáfico serpentizado que contiene cromita y magnesita, granitoides foliados ricos en moscovita, filitas, posibles pillow lavas basálticas y limolitas silíceas rojas.

La mayoría de estos tipos de rocas exóticas no se conocen en otras partes de la Cordillera Occidental e incluyen milonitas que indican consistentemente movimiento dextral.

Unidad Pallatanga.

La Unidad Pallatanga incluye basaltos, doleritas, pillow lavas de edad Cretácica, con afinidades geoquímicas de plateau oceánico (Kerr et al., 2002), aparece como bloques tectónicos principalmente al borde este de la Cordillera Occidental.

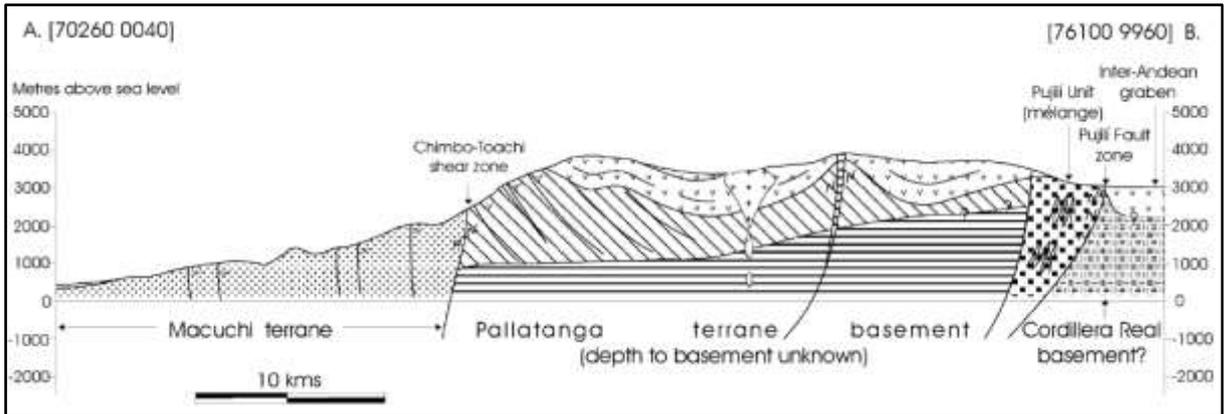


Figura 4. Perfil simplificado de la cordillera Occidental.

Fuente: Hughes & Pilatasig (2002).

Elaboración: Hughes Richard & Pilatasig Luis.

Grupo Angamarca.

Se trata de una secuencia sedimentaria dominada por turbidita de principios del Paleoceno hasta el Eoceno tardío las cuales suelen contener tobas silicias de flujo de ceniza que son correlativos del Grupo Saraguro (BGS-CODIGEM, 1997). Están conformados por piedra caliza in situ que contiene stromatolita, lo que indica una profundidad del agua de <200 metros y areniscas que suelen ser feldespáticas, ricas en sericita, y prácticamente no contienen minerales máficos.

Los conglomerados son polimíticos generalmente de composición uniforme, que contiene abundante cuarzo blanco probablemente de origen metamórfico, chert negro, raros granitoides muscovíticos foliados y algunos clastos metasedimentarios (Hughes & Pilatasig, 2002).

Terrenos Macuchi.

Excluyendo las secuencias de cobertura post-acreción, este terreno comprende sólo una unidad litoestratigráfica, conocida como Unidad Macuchi que se encuentra sólo al Oeste de la zona Chimbo-Toachi (Figuras 3 y 4). La secuencia es predominantemente (hasta el 90%) volcanosedimentario y el resto constituido por pillow lavas. Se creía que la unidad era de Cretácico tardío a Eoceno (Hughes & Pilatasig, 2002).

En 1990 Bourgois et al., declararon que el arco de la isla Macuchi estaba activo durante el Paleoceno, el Eoceno y el Oligoceno, pero presentaron pruebas bioestratigráficas que apoyan sólo al Eoceno.

Unidad Macuchi.

La Unidad Macuchi es interpretada como un arco volcánico submarino, que habría recibido material detrítico derivado de zonas fuentes muy antiguas, como podría ser la Cordillera Real o el Cratón Sudamericano.

Datada del Eoceno medio, está localizada en el borde Oeste de la Cordillera Occidental. Geoquímicamente corresponde a un basamento basáltico–andesítico tiene una afinidad de arco volcánico, con composición química bimodal (calco alcalina y toleítica) (Egüez A. , 1986).

Localmente la Unidad Macuchi está sobreyacida en conformidad por rocas del Grupo Angamarca.

1.3. Contexto tectónico regional.

1.3.1. Subducción de placas.

El proceso de subducción constituye el elemento más importante para explicar los efectos sobre la actividad sísmo tectónica, este se inició hace unos 26 millones de años con el apareamiento de las placas de Cocos y Nazca, como resultado de una reorganización de la placa Farallón (Pennington, 1981).

A lo largo del margen convergente de Ecuador, la placa de Nazca subduce bajo el continente Sudamericano con una tasa de convergencia de aproximadamente 5,8 cm/año (Trenkamp, Kellogg, Freymuller, & Mora, 2002), lo que resulta en variaciones laterales de levantamiento, sismicidad, la deformación y la distribución de sedimentos (Collot et al., 2004).

El margen activo ecuatoriano está marcado, en una parte, por la entrada en subducción de la Dorsal Carnegie (Figura 5), y en segundo lugar por el escape lateral Bloque Nor- Andino y la abertura asociada del Golfo de Guayaquil. Esta aceleración del escape del Bloque Nor-Andino en el límite Plioceno-Pleistoceno y la apertura del Golfo de Guayaquil (asociado con una alta subsidencia) está vinculada a un aumento del acoplamiento inter-placa asociada a la llegada en subducción de la Dorsal Carnegie (Witt & Bourgois, 2009).

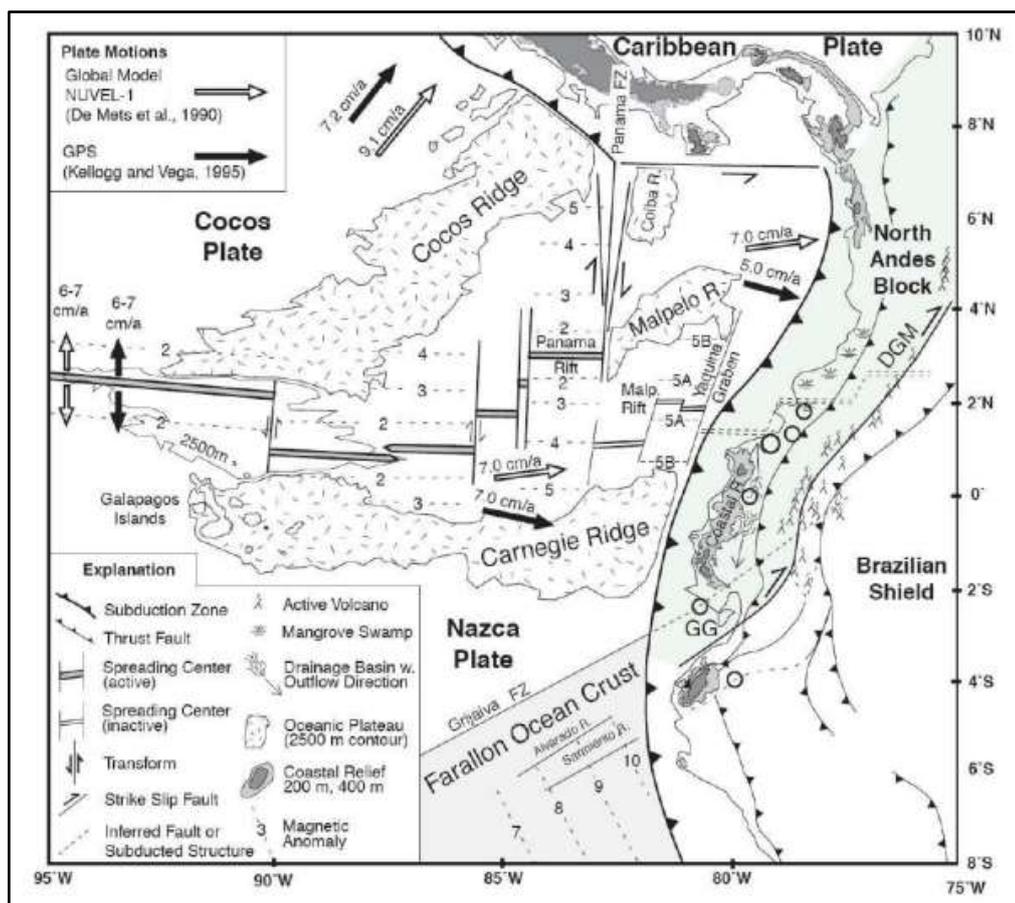


Figura 5. Subducción de placas.
Fuente: Reyes P. (2013)
Elaboración: Reyes Pedro.

1.3.2. Levantamiento de la cordillera costanera.

Diferentes estudios han sugerido que la Dorsal Carnegie es responsable de la elevación de la costa ecuatoriana (Daly, 1989; Gutscher, Malavieille, & Collot, 1999), aunque hasta ahora no se ha presentado tasas precisas de tiempo ni de elevación.

La margen costera del Ecuador constituye una gran cuenca de antearco formada dentro de un límite convergente entre las placas Nazca y Sudamérica. Las rocas que componen esta cuenca de antearco son principalmente sedimentarias de ambiente marino, con un zócalo Cretácico a la base, cuyas edades varían desde el Cretácico hasta el Cuaternario. El relieve de esta cuenca se caracteriza por dos importantes dominios geomorfológicos: la cordillera Costera en la parte litoral y la planicie Costera en la parte interna de la cuenca (Reyes P. , 2013).

La historia geológica propuesta por Benítez (1995) para la cordillera de la costa de Ecuador implica tres etapas: la etapa previa al choque en el Aptien superior al Campaniano inferior (108 a 80 Ma) correspondiente a una evolución oceánica del arco insular asociado a la formaciones Piñón, Cayo, Guayaquil y San Lorenzo; la etapa de colisión del arco insular frente a la placa Sudamericana durante el Campaniano hasta el Eoceno superior (70-36 Ma), que incluye el desarrollo de depósitos de turbiditas, y finalmente la etapa post-colisión en el Oligoceno (36 Ma), en la cual se presenta una sedimentación marina localizada.

En el Mioceno medio comienza el levantamiento de la Cordillera Chongón-Colonche en la Península de Santa Elena y el juego de fallas Jipijapa y Jama. La sedimentación marina en la cuenca Manabí continuó a lo largo del Plioceno hasta el Pleistoceno donde emerge finalmente.

Una evolución un poco diferente es la propuesta por Deniaud (2000), el cual propone que entre el Mioceno medio y el Mioceno superior (14 a 5,3 Ma) las formaciones Angostura y Ónzole inferior se caracterizan por medio ambiente de facies marina poco profunda; el Plioceno se caracteriza por las formaciones marinas Ónzole superior y Borbón, cuya sedimentación termina en el Pleistoceno inferior en la cuenca de Manabí mientras que en la cuenca Borbón la sedimentación se extendería hasta Pleistoceno superior.

1.3.3. Evolución de la cordillera Occidental.

Algunos modelos existentes de evolución para la Cordillera Occidental del Ecuador incluyen, por ejemplo, subducción temprana del Cretácico al Eoceno (Lebrat, Megard, Dupuy, & Dostal, 1987), estilo alpestre Cretácico tardío, eventos de colisión oligocénicos (Bourgeois, Eguez, Butterlin, & De Wever, 1990), y eventos de acreción en el Paleoceno - Eoceno temprano y Eoceno tardío - Oligoceno temprano (Van Thournout, Hertogen, & Quevedo , 1992).

El basamento de los terrenos Pallatanga consisten en basaltos de corteza oceánica y rocas ultramáficas localmente expuestos en las unidades de Pallatanga y San Juan. El espesor inusual y la flotabilidad resultante del basalto de la corteza oceánica significan que tales rocas son comúnmente acrecionadas, más que subducidas (Saunders, Tarney, Kerr, & Kent, 1996). La naturaleza misma de la corteza de los terrenos Pallatanga es la razón probable de su acreción.

Litherland y Aspden (1992) propusieron que el restablecimiento de edades isotópicas en la Cordillera Real de Ecuador 85 - 65 Ma fue causado por levantamiento resultante de las primeras etapas de acreción de la Cordillera Occidental. Las unidades de Pallatanga y San Juan son de principio a fin los fragmentos de corteza oceánica cretácica.

La edad de acreción de terreno Macuchi es más restringida, pruebas de la zona sugieren que el terreno Macuchi se acrecentó en, o antes, del Eoceno tardío (BGS-CODIGEM, 1998). Aquí, la inclinación pronunciada de rocas de la Unidad Macuchi y el Grupo Angamarca están unidos inconformemente por la inmersión del Grupo Zumbagua, de edad Miocénica. La evidencia indica que un evento tectónico mayor ocurrió en algún momento en los últimos tiempos del Eoceno a principios del Mioceno en el sur de la Cordillera Occidental.

La edad de corte a lo largo de la zona Chimbo-Toachi sigue siendo incierta. Sin embargo, varias evidencias encontradas le dan una edad de 48,28 a 0,55 Ma (Eoceno temprano a medio). Esta edad es casi seguramente reajustada, y puede representar las etapas más tempranas del cizallamiento dextral durante la acreción del terreno Macuchi (Hughes & Pilatasig, 2002).

CAPITULO II
MARCO CONCEPTUAL

2.1. Prospección gravimétrica.

Los métodos geofísicos estudian las propiedades físicas de los diferentes materiales del subsuelo, la gravimetría es un método que ha tomado gran importancia en los últimos años, su principio se basa principalmente en el campo gravitatorio de la Tierra, para ello se mide en superficie pequeñas variaciones de la componente vertical de dicho campo, estas variaciones se muestran debido a una distribución irregular de densidades de las unidades geológicas que se encuentran en profundidad. A lo largo de la historia se han utilizado 3 tipos de equipos para medir la gravedad: la balanza de torsión que mide las derivadas de la gravedad, el péndulo que mide la gravedad relativa o absoluta, y el gravímetro que mide la gravedad relativa (Cantos, 1987).

En la actualidad, la prospección gravimétrica es de gran importancia en la búsqueda de depósitos minerales, en el estudio de cuencas sedimentarias (medir espesores de los rellenos sedimentarios) en estudios de aguas subterránea, con fines geodésicos, estudios de tectónica regional y Arqueología.

2.2. Principios físicos.

2.2.1. Ley de gravitación de Newton.

Unas de las leyes más importantes cuando hablamos de Física, según Newton, es el efecto de fuerza a la que está sometido un cuerpo por acción de la gravedad.

La ley establece que “todos los cuerpos se atraen con fuerzas proporcionales a sus masas e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia que las separa”

$$F = \frac{(G)(M_1)(M_2)}{d^2} \quad (1)$$

En esta ecuación F es la fuerza de atracción entre los cuerpos, M es la masa de cada cuerpo, d es la distancia que los separa y G es la constante gravitacional Universal.

2.2.2. Potencial de gravitación.

Al hablar de potencial nos referimos a la energía que tiene un objeto, debido a la ubicación en el campo gravitacional.

El campo de gravedad de la tierra posee dos partes fundamentales: la primera debida a la atracción producida por la tierra de acuerdo con la ley de Newton y la segunda debido a la rotación de la tierra.

Debido a la atracción terrestre, la diferencia potencial entre dos puntos será igual al trabajo realizado al trasladar la partícula de un punto a otro en el campo gravífico, desde un punto, mientras que debido a la rotación de la tierra es igual al trabajo realizado por la fuerza centrífuga cuando trasladamos la unidad de masa desde un punto en el eje de rotación de la tierra.

2.2.3. Medidas absolutas y relativas de la gravedad.

2.2.3.1. Medidas absolutas de la gravedad.

Estas medidas consisten en observar dos unidades fundamentales, longitud y tiempo, que han de realizarse con gran precisión si se pretende detectar pequeñas variaciones de la magnitud derivada, la aceleración de la gravedad (Udías & Mezcua, 1997).

El valor de la aceleración de la gravedad (g), está estrechamente relacionado con el valor de la constante universal de gravitación (G), en 1978 se logró medir por primera vez esta constante con un experimento dirigido a medir la masa de la tierra y su densidad. Un valor actual de G es $6,673 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$.

Uno de los métodos más antiguos y utilizados para la observación absoluta de la gravedad es el método pendular, con el cual Kater logró determinar el valor absoluto de la gravedad en Londres, con un valor sorprendentemente exacto, a pesar de la simplicidad del método (Udías & Mezcua, 1997).

Existe también el método de caída libre en el cual se puede medir el valor de gravedad, a partir de la caída libre de un cuerpo, este experimento consiste en el lanzamiento vertical de

un objeto en un recipiente en el que se ha realizado el vacío, y medir el tiempo que tarda en pasar por dos marcas cuya distancia es conocida.

2.2.3.2. Medidas relativas de la gravedad.

En primera instancia para las medidas relativas de la gravedad aún se usaban péndulos, hasta que en 1986 una innovación importante, la balanza de R. Eötvös que medía la componente horizontal del gradiente de la gravedad, la cual se usó durante años en geología y prospección. Entre los años 1930 y 1940 se desarrollaron los aparatos llamados gravímetros, basados generalmente en el principio de astatización, cuya precisión se ha ido aumentando con el tiempo (Udías & Mezcua, 1997).

Los gravímetros son los más utilizados en la actualidad, estos se basan en que la tensión del muelle, con una pequeña masa suspendida, varía de unos puntos a otros, por efectos de las variaciones de la gravedad. En prospección no interesa la gravedad absoluta, sino las medidas relativas de la gravedad

2.2.4. Unidades de medida.

La unidad de medida en gravimetría se la conoce como gal (en honor a galileo), $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/s}^2$, en el sistema cgs para desviaciones de la gravedad o errores de medida se usa el mgal (miligal), $1 \text{ mgal} = 10^{-3} \text{ gales}$, o el μgal (microgal) $1 \mu\text{gal} = 10^{-6} \text{ gales}$.

Como la aceleración normal de la gravedad es $g = 981 \text{ gales}$, 1 miligal es aproximadamente una millonésima de g .

2.3. Esferoide normal y geoide.

2.3.1. Esferoide normal.

Según Cantos (1987) se llama esferoide normal, al someter la masa terrestre a la fuerza de la gravedad que la hacen esférica y a la fuerza centrífuga que tiende a aplastarla, suponiendo que la tierra es pastosa formada por capas homogéneas concéntricas.

La fórmula internacional de la gravedad utilizada para este esferoide, data de 1930 y es:

$$g_0 = 978.049 (1 + 0.0052884 \operatorname{sen}^2 \varphi - 0.0000059 \operatorname{sen}^2 2\varphi) \frac{cm}{s^2} \quad (2)$$

En donde g_0 es la gravedad a la latitud φ y al nivel del mar, el factor 978.049 es el valor de la gravedad en el ecuador. Con esta fórmula se calcula el valor normal o teórico de la gravedad en cualquier latitud.

2.3.2. El geoide.

Se conoce como geoide a la superficie de equilibrio de los mares de la tierra si estos se pudieran extender por los continentes a través de canales imaginarios hechos ellos bajo el nivel del mar. Es decir sería la superficie equipotencial correspondiente al nivel de mares. Difiere del esferoide en que los continentes y los fondos marinos están irregularmente repartidos sobre la tierra y, asimismo, en las discontinuidades de densidad de la tierra (Cantos, 1987) (Figura 6).

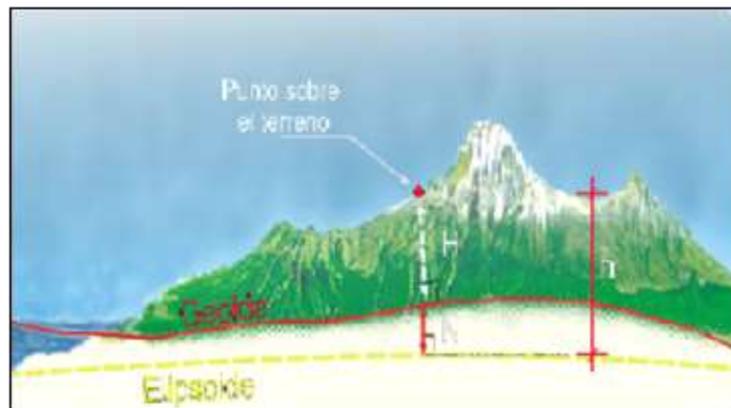


Figura 6. Relación geoide - elipsoide.
Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía México.
Elaboración: Instituto Nacional de Estadística y Geografía México.

El geoide está por encima del esferoide en los continentes y por debajo en los océanos.

2.4. Variación de la gravedad sobre la superficie terrestre.

2.4.1. Con la latitud.

Ya que la tierra no tiene forma totalmente esférica la gravedad varía de un punto a otro, al estar achatada en los polos, la distancia en el centro es máxima en el ecuador y mínimo en los polos, a esta variación se suma la fuerza centrífuga, y como resultado de ambos efectos

la aceleración de la gravedad varía aproximadamente de 978 cm/s^2 en el ecuador a 983 cm/s^2 en los polos (Cantos, 1987).

2.4.2. Con la altitud.

Ya que la gravedad es considerada sobre la superficie terrestre a una altura h , según Cantos es necesario estudiar las variaciones de la gravedad con la altitud. Para ello toma en cuenta tres correcciones: Corrección de aire libre, corrección de Bouguer, y corrección topográfica.

2.4.2.1. Corrección de aire libre o de faye.

La corrección de aire libre es debido a la altura sobre el nivel del mar, se ha definido la anomalía de la gravedad como la diferencia entre el valor observado sobre el geoide y el teórico calculado sobre el elipsoide. Las observaciones de gravedad se hacen generalmente a una cierta altitud, con lo que habrá que reducirlas a puntos sobre el geoide para calcular las anomalías, ya que éste sólo coincide con la superficie de la tierra al nivel del mar (Udías & Mezcuca, 1997).

Para realizar la corrección es aplicada la siguiente formula:

$$3.086 h \text{ u. } g = 0.3086 h \text{ mgal } (h \text{ en metros}) \quad (3)$$

2.4.2.2. Corrección de Bouguer.

Bouguer fue un geodesta francés del siglo XVIII que aplico por primera vez esta corrección, tomando en cuenta el efecto de atracción que ejercen las masas situadas entre el nivel de referencia y el punto de observación. El efecto topografía del terreno será objeto de la corrección topográfica.

Se suele unir las dos correcciones de aire libre y de Bouguer en una sola a esta unión se la conoce como correcciones de altura o combinada que sería:

$$Ch = 0.3086 h - 0.119 h = 0.1967 h \quad (4)$$

Cuyo valor hay que sumar a la gravedad observada.

2.4.2.3. Corrección topográfica.

Finalmente para reducir el valor de la gravedad hay que tener en cuenta el efecto gravífico de las masas por encima y por debajo del nivel de altura de la estación, ya que en la corrección de Bouguer se supone el terreno horizontal.

La corrección topográfica tiene en cuenta el efecto de la topografía alrededor de la estación. En las mediciones efectuadas con el gravímetro los desniveles afectan menos que en las balanzas de torsión.

El cálculo de la corrección topográfica influye en la densidad del terreno, la influencia de las masas montañosas lejanas modifican el valor de la gravedad de forma similar que una influencia regional.

2.4.3. Con el tiempo.

2.4.3.1. Efecto de las mareas.

El efecto de las mareas también llamado luni-solar, trata sobre la atracción de gravedad del sol y la luna, dependiendo de la posición astronómica de ambos, además de la latitud, lo que produce una pequeña deformación de la superficie marina.

El efecto también influye en los gravímetros, su amplitud máxima puede llegar en total a 0,3 miligales.

2.4.3.2. Deriva instrumental.

Como todo instrumento de precisión el gravímetro no está exento de la llamada deriva instrumental, la cual explica que si se efectúa medidas sobre una misma estación a diversos intervalos de tiempo obtenemos valores ligeramente distintos.

CAPITULO III
METODOLOGÍA

La metodología aplicada en esta investigación se basa en la medida de datos de gravimetría ubicados a lo largo de un perfil que cubra el polígono de estudio, cada dato es georreferenciado con la ubicación de la correspondiente coordenada. Para esto es necesario conocer la gravedad absoluta en un punto base para iniciar el ciclo de medida. Con los datos obtenidos se da inicio al trabajo de gabinete, para posteriormente obtener los valores anomálicos en cada punto, y finalmente realizar la interpretación y modelamiento del basamento y relleno sedimentario.

3.1. Recopilación de información existente.

La etapa inicial de la investigación se basa en la recopilación de información existente de la zona de estudio la cual abarca mapas geológicos y topográficos, así como publicaciones o investigaciones anteriores, que son pautas importantes para el trabajo posterior tanto en campo como en oficina. Conjuntamente se realizó la interpretación del manual de operación del equipo utilizado (Autograv CG-5 de Scintrex), con el fin de evitar problemas en campo, y se trabajó en el manejo de software (Arcgis 10.1, Global Mapper 11, Surfer 10, GravMaster, Gravmag), que se utilizan para el modelamiento y corrección de datos, además de ser necesarios para realizar los perfiles finales.

3.2. Instrumentos de medición.

Para la medición de datos en campo se utilizó un gravímetro Scintrex CG-5 Autograv.

3.2.1. Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv.

El Scintrex Cg-5 es un gravímetro de tipo lineal, cuenta con una serie de microprocesadores que facilitan la automatización de las mediciones y su procesamiento, cuenta con una rango de medición de más de 8000 mGal sin reajuste y una lectura de resolución de 0,001 mGal, esto permite que se utilice tanto para Investigaciones de campo detalladas y encuestas regionales o geodésicas a gran escala.

Mide a una frecuencia de 6 Hz durante el periodo de tiempo definido por el usuario. El sensor se basa en un sistema elástico de cuarzo fundido en el cual la fuerza gravitacional sobre la masa de prueba es balanceada por un resorte y una pequeña fuerza electrostática restauradora. Puede utilizarse de dos formas: modo levantamiento para la adquisición de mediciones discretas, y el modo cíclico para el registro continuo de datos. Cuenta con una

batería recargable Smart interna, la cual proporciona suficiente energía para operar el gravímetro durante todo un día normal. El operador puede ver el porcentaje de la batería en cualquier momento pulsando cualquier tecla y viendo la pantalla.



Figura 7. Gravímetro Scintrex CG-5 Autograv.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

3.3. Trabajo de campo.

El trabajo de campo se realizó a lo largo de un perfil con orientación E-W, para lo cual se utilizó la vía principal que conecta las diferentes cabeceras provinciales de Cotopaxi, Los Ríos, Guayas y Manabí. La toma de medidas gravimétricas se realizó cada 1 km aproximado de distancia entre puntos, para esto en base a la cartografía 1:50000 se generó la base de datos. En cada punto, se tomó la coordenada con un navegador GPS Garmin, conjuntamente se procedió a realizar la descripción de afloramientos y toma de muestras de interés para descripción petrográfica y cálculo de densidades en laboratorio.

3.3.1. Toma de datos gravimétricos.

Las medidas de gravimetría se realizaron mediante ciclos de medida, fue necesaria la ubicación de bases gravimétricas a lo largo del perfil, para esto se tomó como referencia la estación base ubicada en la Universidad Técnica Particular de Loja.



Figura 8. Toma de datos gravimétricos.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

Los datos de dicha base se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 2. Datos de base gravimétrica ubicada en Universidad Técnica Particular de Loja

Coordenadas UTM referidas al datum WGS84, zona 17 S			Gravedad Absoluta (mGal)
Norte (m)	Este(m)	Altura (m)	
9559100,015	699915,77	2110,8	977432,010

Fuente: Galindo, 2010.

Elaboración: Galindo Jesús.

Las medidas fueron levantadas con orientación E-W aproximados a 1°S de latitud en una distancia aproximada de 185 km. Para el tramo del perfil se partió desde el sector El Tingo en el cantón Pujilí en la provincia de Cotopaxi y se terminó en el cantón Manta provincia de Manabí. Para esto fue necesario ubicar 4 estaciones base, que permitieron cerrar los ciclos de medidas gravimétricas durante 8 horas de trabajo.

3.3.2. Levantamiento de datos geológicos.

Los datos geológicos fueron obtenidos en el campo en sitios donde se realizaron las medidas de gravimetría y en lugares específicos que se ubicaron durante el recorrido. En cada punto se realizó la descripción litológica del afloramiento y en los sitios donde fue posible se tomó medidas estructurales. Para esto se aprovechó el corte de los taludes de la vía.

En zonas donde no fue posible encontrar afloramientos (particularmente Cuenca Manabí) se tomó como referencia el mapa geológico regional de cordillera occidental del Ecuador entre 0°-1°S, y entre 1°-2°S a escala 1:200.000, además de las hojas geológicas de Manta, Portoviejo y Quevedo a escala 1:100.000, tomadas del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. Adicionalmente documentos de trabajos y publicaciones realizadas que corresponden a la zona de estudio.

3.4. Trabajo de gabinete.

Con los datos gravimétricos obtenidos en campo es necesario realizar correcciones ya que los valores de gravedad pueden ser muy variables debido a la altitud, latitud y tiempo.

Para ello primeramente se realizó la corrección de la deriva instrumental utilizando el software CICLOS, el cual elimina el efecto de las mareas que varía con respecto al tiempo.

A continuación con ayuda del software ANOM se realizó la corrección de aire libre y de Bouguer, para ello fue necesario el valor de la gravedad absoluta de la estación base UTPL, y las coordenadas UTM y geográficas, además del valor de la densidad media.

Luego se realizó la corrección topográfica mediante el software GravMaster que utiliza el método gráfico del círculo de Hammer, se empleó un SRTM3 con una malla que se ajusta a cada ciclo de medida de la zona de estudio, se utilizó una densidad promedio de 2.67 g/cm³.

Finalmente con el software PERFIL, se efectuó el procesamiento para obtener los perfiles que relacionan los valores obtenidos de la anomalía de Bouguer, tomando en cuenta la distancia desde el punto inicial al punto final.

A partir de este se puede generar el modelo gravimétrico tomando en cuenta las densidades de los diferentes tipos de litologías presentes en la zona de estudio.

3.5. Trabajo en laboratorio.

En laboratorio se realizó el análisis para determinar las densidades de las rocas muestreadas, para ello se utilizó el método del picnómetro, basado en la norma ASTM D 854, entre los resultados aparecen densidades que varían desde 1.94 g/cm³ a 2.8 g/cm³, los cuales se muestran en la tabla a continuación, los resultados obtenidos nos servirán como datos fundamentales al momento de realizar el modelo gravimétrico.

Tabla 3. Tabla de densidades obtenidas en laboratorio.

ID	X	Y	Densidad g/cm ³	Tipo de Roca
Muestra 1	538952	9883555	1.94	Lutita
Muestra2	609813	9885842	2.15	Limo
Muestra 3	614050	9882353	2.6	Arenisca
Muestra 4	714368	9901754	2.87	Andesita

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

CAPITULO IV
INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Interpretación del modelo gravimétrico.

El modelo gravimétrico se basa en la unificación de la corrección de datos que corresponden a los cuatro ciclos de medidas levantadas a lo largo del perfil, en una extensión de 185 Km que se extiende de W a E entre las provincias de Manabí, Guayas, Los Ríos y Cotopaxi. El levantamiento geológico y la correlación de los datos gravimétricos están en función de los puntos levantados donde ha sido posible determinar afloramientos de rocas. 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 lo que es posible obtener una curva de anomalía residual con dichos valores, la cual tiene como objeto identificar la variación de densidad de diferentes cuerpos basado en un modelo gravimétrico.

Los valores de anomalía de Bouguer para el área de estudio, son positivos al borde de la Costa los máximos están entre 3 a 50 mGal, donde afloran rocas de corteza oceánica, los mínimos gravimétricos se extienden desde la cordillera costanera con valores de -1 a -10 mGal, al Este de dicha cordillera se presentan nuevamente valores similares a los del borde costanero. Entre las zonas La Maná y Tingo los mínimos gravimétricos disminuyen significativamente hasta llegar a -140 mGal, que indica un engrosamiento de la corteza continental (Anexo 1).

La interpretación de anomalías residuales que presenta el modelo gravimétrico (figura 9) se divide en base a la profundidad de cuencas sedimentarias y el basamento de las mismas, que atraviesan la zona de estudio.

Para la interpretación el modelo gravimétrico se ha dividido en dos secciones:

- Margen costero y cuenca Manabí.
- Borde de la cordillera Occidental.

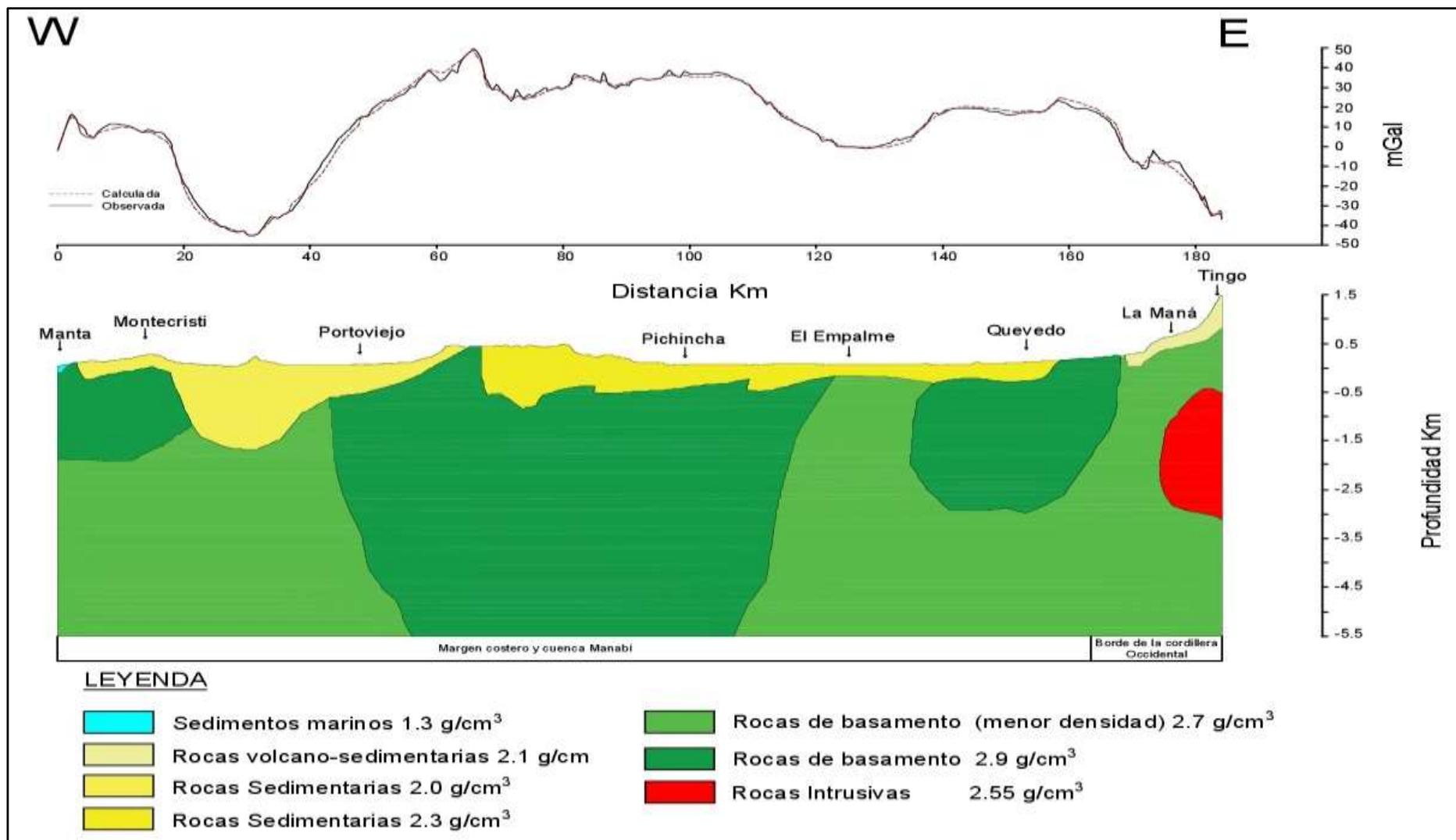


Figura 9. Modelo gravimétrico, perfil Manta – El Tingo.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

4.1.1. Margen costero y cuenca Manabí.

Hacia el borde costanero entre Manta y Portoviejo la anomalía residual va de 0 a 10 mGal lo que indica una zona anómala de corteza oceánica, separado por una anomalía negativa de -40 mGal hacia la Cordillera Costanera que indica un relleno sedimentario correspondiente a las formaciones San Mateo y Dos Bocas que se ubican entre Manta, Portoviejo y la Cordillera Costanera

Hacia la cuenca de Manabí el modelo gravimétrico abarca prácticamente la mayor parte del perfil, como se puede observar en la figura 9, limitado al Oeste por la Cordillera Costanera y al Este por el borde de la cordillera Occidental con una longitud de 90 Km aproximados.

Los valores de anomalía residual varían entre 50 mGal hacia la cordillera costanera y 5 mGal hacia la zona centro-este de la cuenca de Manabí, que indican el espesor de la cuenca entre 500 a 1500 metros, los mismos que sobreyacen sobre la corteza oceánica que constituye el basamento conocida como formación Piñón.

Al borde de la costa se puede apreciar sedimentos marinos que presentan valores de anomalía residual de -5 a 5 mGal, cuya densidad es mucho menor a la del basamento, donde se deposita posiblemente la formación Tablazo de la península de Manta (figura 10), la cual presenta arenas y conglomerados, a dichos sedimentos se le atribuye una densidad de 1.3 g/cm^3 , y un espesor de aproximadamente 100 m.



Figura 10. Conglomerados, formación Tablazo.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

Siguiendo la secuencia sedimentaria en la zona de Montecristi la anomalía residual baja considerablemente de -5 a -48 mGal, donde se observaron afloramientos de lutitas y lodolitas asociadas a la formación Dos Bocas (figura 11), en estas se pudo apreciar la presencia de fósiles que son indicativos de un ambiente marino y se les atribuye una densidad promedio de 2.0 g/cm^3 , y un espesor que alcanza los 1500 m aproximadamente.



Figura 11. Lutitas, formación Dos Bocas.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

En las zonas donde se aprecia valores de anomalía residual entre 28 y 35 mGal, se destacan grandes afloramientos de lutitas, limolitas y lodolitas de tonalidad azulada a grisácea con intercalación de arenisca, que concuerda con la litología de la formación Ónzole (figura 12), continuamente los valores de anomalía residual aumentan progresivamente de 35 hasta 45 mGal en donde se evidencian areniscas masivas y niveles lenticulares de conglomerados característicos de la formación Borbón (figura 13).



Figura 12. Lutitas, lodolitas, formación Ónzole.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor



Figura 13. Areniscas, formación Borbón.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

Al terminar la secuencia sedimentaria de arenisca la curva de anomalía residual empieza a descender considerablemente hasta que su valor llega 0 mGal, en esta zona se observa lodolitas masivas de color café amarillento, poco consolidadas asociadas a la formación Balzar – San Tadeo (figura 14).



Figura 14. Lodolitas, formación Balzar – San Tadeo.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

Por el variado tipo de litología de estas formaciones para realizar el modelamiento se trabajó con una densidad promedio de $2,3 \text{ g/cm}^3$, y según el modelo se puede observar que el relleno sedimentario alcanza un espesor máximo de 1000 m aproximadamente.

Basamento.

El basamento se extiende a lo largo de toda la cuenca Manabí, los valores de anomalía residual abarcan los picos más altos de la curva que varían entre 20 y 50 mGal, esta comprende rocas de corteza oceánica como gabros, basaltos, pillow lavas, además de volcano-sedimentos pertenecientes a la formación Piñón.

Para el modelo gravimétrico se trabajó con una densidad de 2.9 g/cm^3 para las zonas donde las rocas son más masivas y $2,7 \text{ g/cm}^3$ para zonas donde posiblemente se encuentren rocas más meteorizadas, esto por la variedad de litologías que presenta la zona de estudio, de esta forma se puede observar en el modelo que el basamento a lo largo del perfil alcanza un espesor de 5500 m aproximadamente.

4.1.2. Borde de la cordillera Occidental.

Rocas volcano-sedimentarias y cuerpos intrusivos.

Al borde de la cordillera Occidental se aprecian valores de anomalía residual de -10 a -35 mGal, pertenecientes posiblemente a la secuencia de rocas volcano-sedimentarias que se observan en la zona (figura 15), estas rocas son características de la terrenos Macuchi, se les atribuye una densidad de 2.1 g/cm^3 y un espesor máximo de 100 m aproximadamente, según el modelo gravimétrico.



Figura 15. Rocas volcano-sedimentarias, terrenos Macuchi.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

También se pudieron observar rocas basáltico–andesíticas (figura 16), las cuales se presentan al borde occidental de la cordillera, y que junto con rocas volcano-sedimentarias son propios de los terrenos Macuchi, corresponden a valores de anomalía residual de 20 a 35 mGal, y según el modelo se extiende aproximadamente 15 km.



Figura 16. Andesitas, terrenos Macuchi.

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

Conjuntamente se realizó la modelización de cuerpos intrusivos asociados a granitoides indiferenciados que son característicos de la zona con una densidad de 2.55 g/cm^3 , a una profundidad de 3500 m, los cuales no afloran en la superficie a lo largo de este perfil.

4.2. Discusión de resultados.

En Ecuador existen muy pocos estudios sobre anomalías gravimétricas, particularmente para el área de estudio el mapa de anomalías de Bouguer (anexo 2) presenta valores para la Costa que tiene las anomalías de Bouguer positivas más elevadas (+162 mGal), y en la Sierra que incluye los Andes y sus estribaciones, se caracteriza por valores significativamente bajos de -292 mGal, lo que refleja la profundidad de la corteza continental bajo la cordillera de los Andes. (Feininger & Seguin, 1983), los cuales se pueden correlacionar con los valores obtenidos en el presente estudio que en la costa alcanzan un máximo de +50 mGal, y para la zona de la cordillera costanera los valores disminuyen hasta -140 mGal hacia el borde de la Cordillera Occidental.

La interpretación geológica para el área estudio se basa en el modelo gravimétrico realizado a lo largo del perfil, el cual da como resultado un modelo hipotético que presenta principalmente la profundidad de las cuencas sedimentarias y del basamento, junto con posibles estructuras falladas (figura 17).

En base a esto se realiza un modelo evolutivo que inicia con la formación Piñón, considerada como el sótano ígneo del Ecuador occidental, que se originó en la apertura de la cuenca marginal durante el Cretácico (124 – 100 Ma.) (Reynaud, Jillard, Lapierre, Mamberti, & Mascle, 1999). Esta formación es una prolongación sureña de roca ofiolítica, se le atribuyen basaltos de dorsal medio-oceánica que forman una pequeña parte de la formación Macuchi. Elevadas anomalías gravimétricas positivas indican que no existe litosfera continental para la Costa, lo que sugiere que es diferente no solamente de la Sierra sino también del Sur de la región costanera que continúa hacia Perú. (Baldock, 1982). Seguidamente el terreno Macuchi se acreciona luego de los terrenos Pallatanga, de manera oblicua durante el Eoceno tardío, formando una zona de cizallamiento llamada Chimbo-Toachi (Egüez & Aspden, 1993), otras teorías proponen que el arco Macuchi fue provocado por un cambio de polaridad en la zona de subducción, debido a la acreción oblicua de los terrenos Pallatanga contra el continente, hace probablemente 75 Ma, posteriormente se deposita una gran cuenca de antearco formada dentro de un límite convergente entre las placas Nazca y Sudamérica. Las rocas que componen esta cuenca de antearco son principalmente sedimentarias de ambiente marino, cuyas edades varían desde el Paleógeno hasta el Cuaternario (Reyes, 2013). Finalmente Los depósitos cuaternarios más recientes se presentan a las coberturas sedimentarias de los abanicos aluviales desarrollados sobre el flanco occidental de la Cordillera Occidental (Reyes & Michaud, 2012).

La descripción del modelo tectónico se basa en las estructuras falladas de rumbo generalmente N-S, que se pueden observar en el perfil geológico (figura 17), estas estructuras se interpretan como un sistema de fallas, para el borde de la Costa se identifica la falla El Aromo (FA) la cual controla la evolución de la península de Manta, la falla Jipijapa (FJ) que pone en contacto rocas Cretácicas contra los sedimentos de la cuenca Manabí, en el flanco oriental de la cordillera costanera se presenta una falla que se puede asociar a la falla Pichincha (FPi), del mismo modo se interpreta el contacto entre basamento y cuenca sedimentaria donde se nota un cambio de densidad de 2.3 g/cm^3 a 2.9 g/cm^3 , el límite que separa la litosfera continental al Este de la corteza oceánica al Oeste se interpreta como la conocida zona de sutura Guayaquil-Babahoyo-Sto Domingo (ZS) (Baldock, 1982), la misma controla el contacto entre la formación Piñón y los terrenos Macuchi, por último donde

empieza a elevarse la cordillera occidental se puede observar en el modelo (figura 9) un salto entre cuerpos rocosos que se interpreta como el sistema de fallas Valencia – La Maná (SFV-M) (Egüez, Alvarado, Yepes, Dart, & Machette, 2003).

Diversos autores proponen que la profundidad de la cuenca sedimentaria de Manabí entre 1500 y 2000 metros, lo cual concuerda con el espesor determinado en el modelo gravimétrico (1000 – 1500 metros). Para las rocas de basamento se puede observar que el modelo realizado alcanza los 5500 metros de profundidad, lo que tiene relación con un estudio hecho por Deniaud (1998), donde expone una profundidad de 7000 a 9000 metros para la formación Piñón.

La zona donde empieza a elevarse la Cordillera Occidental, está ocupada por un cuerpo de densidad relativamente baja asociado a rocas volcánico-sedimentarias, que alcanzan aproximadamente los 100 metros de profundidad, las cuales vienen siendo parte de los terrenos Macuchi, el mismo que presenta rocas de densidad similar a las existentes en la formación Piñón, aquí se observan un cuerpo intrusivo (figura 17), que es asociado a granitoides indiferenciados presentes en el Mapa Geológico de la Cordillera Occidental entre 0° - 1° S (BGS-CODIGEM, 1998).

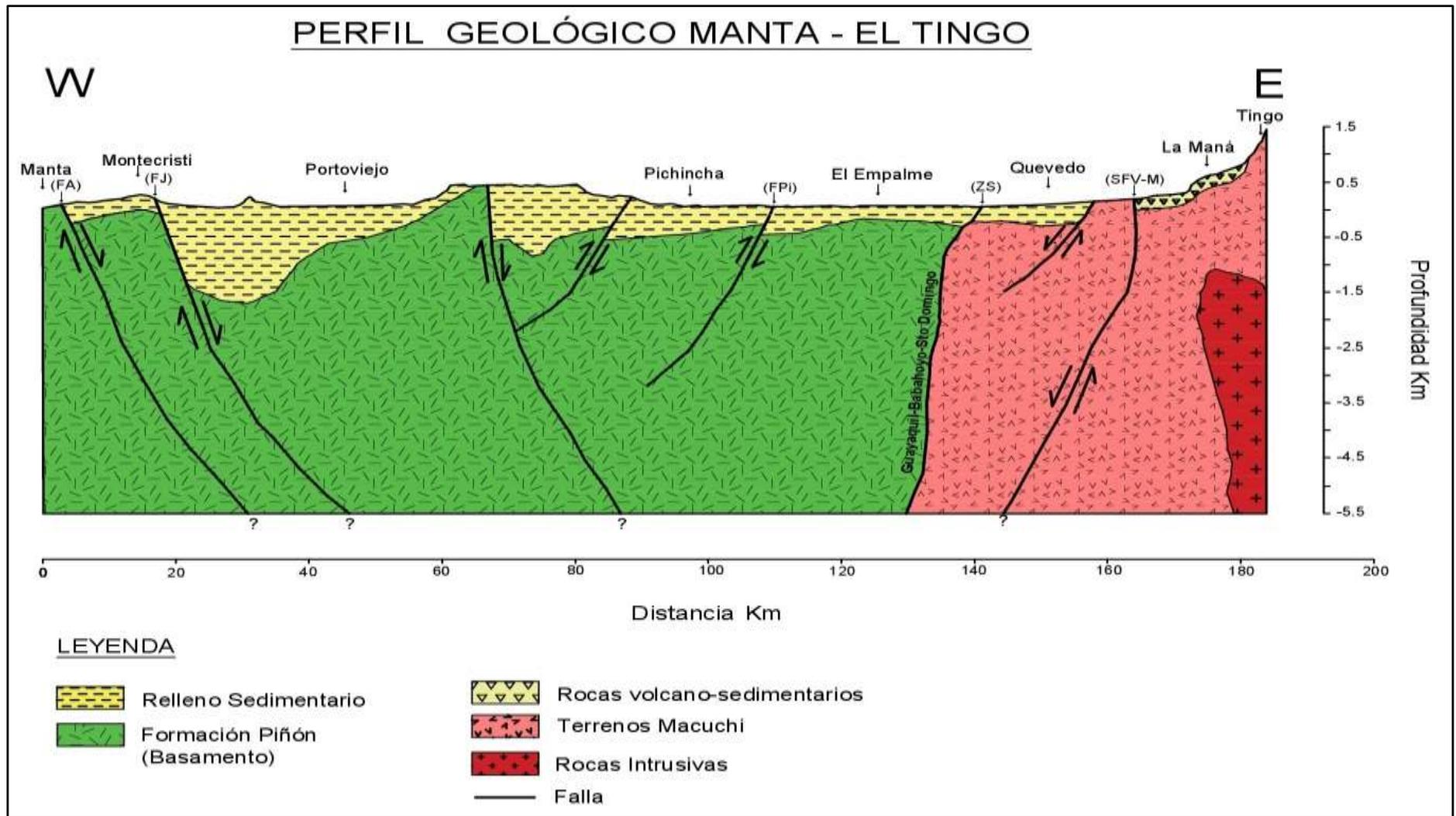


Figura 17. Perfil Geológico Manta – El Tingo; Falla El Aromo (FA), Falla Jipijapa (FJ), Falla Pichincha (FPI), Zona de sutura Guayaquil-Babahoyo-Sto Domingo (ZS), Sistema de fallas Valencia-La Maná (SFV-M).

Fuente: Autor

Elaboración: Autor

CONCLUSIONES

- Con el modelo gravimétrico se pudo diferenciar el contraste de densidades que ocupan los cuerpos rocosos en la zona de estudio, donde se distinguen sedimentos marinos de 1.3 g/cm^3 , rocas volcano-sedimentarias de 2.1 g/cm^3 , secuencias sedimentarias de 2.0 y 2.3 g/cm^3 , para el basamento de corteza oceánica se diferencian densidades de 2.7 y 2.9 g/cm^3 , y cuerpos intrusivos de 2.55 g/cm^3 .
- Los valores de anomalía de Bouguer son positivos hacia el margen costanero con máximos de hasta 50 mGal , que van descendiendo gradualmente hasta alcanzar un mínimo de -140 mGal al borde de la Cordillera Occidental, lo que indica que se empieza a engrosar la corteza continental hacia el centro del Ecuador bajo la cordillera de los Andes.
- El modelo gravimétrico permitió identificar el espesor de las diferentes unidades litológicas, junto con sus posibles emplazamientos a profundidad y zonas falladas, mas no fue posible distinguir estructuras activas que pueden incidir en la peligrosidad geológica de la zona de estudio.
- Los datos recolectados fueron procesados para realizar un modelo gravimétrico que define cuerpos anómalos, con el que se determinó el espesor máximo de la cuenca Manabí que según el modelo alcanza los 1500 metros, así como la profundidad de los volcano-sedimentos que es de 100 metros aproximadamente.
- En el perfil geológico para el borde de la Costa se pudo interpretar, la falla El Aromo que controla la evolución de la península de Manta, la zona de fallas Jipijapa que pone en contacto rocas Cretácicas contra los sedimentos de la cuenca Manabí, la falla Pichincha al centro de la cuenca de Manabí, la zona de sutura Guayaquil-Babahoyo-Sto Domingo que separa la litosfera continental al Este de la corteza oceánica al Oeste y el sistema de fallas Valencia – La Maná al borde de la cordillera Occidental.
- La cuenca sedimentaria Manabí es una cuenca de extensión que alcanza los 150 km de distancia W-E, la cual abarca diferentes litologías y zonas de depositación.

- La correlación de trabajo de campo, datos geológicos y datos geofísicos obtenidos mediante gravimetría en el presente trabajo demuestran ser útiles principalmente para identificar zonas de estructuras profundas, espesores, profundidad y emplazamiento de las diferentes unidades litológicas presentes en la cuenca sedimentaria de Manabí, mediante la variación de densidades.

RECOMENDACIONES

- Es recomendable realizar estudios a detalles en zonas específicas de la cuenca de Manabí donde se localicen contactos entre litologías de la cuenca para poder especificar con más exactitud el espesor de cada formación, así como la identificación de estructuras, para ello se pueden realizar métodos directos como perforaciones, o métodos indirectos como prospección sísmica, magnetometría, etc.
- Se recomienda realizar diversos estudios a detalle, mediante la aplicación de otros métodos geofísicos que aportarían información más exacta al hablar de sitios más puntuales, ya que el estudio realizado es de carácter regional.
- Es importante antes de salir al campo a realizar la toma de datos gravimétricos contar con un buen conocimiento geológico de la zona de estudio, y apoyarse en investigaciones anteriores o mapas detallados, esto con la finalidad de facilitar la interpretación al momento de realizar el perfil geológico.
- Es recomendable también realizar más líneas gravimétricas equidistantes en el mismo sentido W-E para correlacionar las estructuras falladas y determinar si son de carácter regional o local.

BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, S. (2013). *The Ecuadorian MOHO*.
- Baldock, J. (1982). *Geología del Ecuador*.
- Benítez, S. (1995). *Évolution géodynamique de la province cotière sud-équatorienne au Crétacé supérieur-Tertiaire*.
- BGS-CODIGEM. (1997). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 1° y 2° S, escala 1:200.000*. Quito, Ecuador: INIGEMM.
- BGS-CODIGEM. (1998). *Mapa Geológico de la Cordillera Occidental del Ecuador entre 0° y 1° S, escala 1:200.000*. Quito, Ecuador: INIGEMM.
- Bourgeois, J., Eguez, A., Butterlin, J., & De Wever, P. (1990). *Évolution géodynamique de la Cordillere Occidentale des Andes d'Équateur: la découverte de la formation éocène d'Apagua*. Paris.
- Cantos, J. (1987). *Tratado de Geofísica aplicada*. Madrid: Litoprint - Palermo, S.L.
- Collot, J., Marcaillou, B., Sage, F., Michaud, F., Agudelo, W., Charvis, P., Graindorge, D., Gutscher, M., Spence, G. (2004). *Are rupture zone limits of great subduction earthquakes controlled by upper plate structures? Evidence from multichannel seismic reflection data acquired across the northern Ecuador-southwest Colombia margin*.
- Daly, M. (1989). *Correlations between Nazca/Farallon plate kinematic and forarc basin evolution in Ecuador*.
- Deniaud, Y. (1998). *Evolución tectono-sedimentaria de las cuencas costeras neógenas del Ecuador*.
- Deniaud, Y. (2000). *Enregistrement sédimentaire et structural de l'évolution géodynamique des Andes Equatoriennes au cours du Néogène: étude des bassins d'avant-arc et bilan de masse*.
- Egüez, A. (1986). *Evolution cenozoïque de la Cordillere Occidentale Septentrionale d'Équateur: Les mineralisations associées*. Paris.
- Egüez, A., & Aspdén, J. A. (1993). *The Mesozoic – Cenozoic Evolution of the Ecuadorian Andes*.
- Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Dart, R., & Machette, M. (2003). *Mapa de Fallas y Pliegues Cuaternarias de Ecuador y Regiones Oceanicas Adyacentes*.
- Feininger, T. (1977). *Mapa Gravimétrico de Anomalías Bouguer Simples de Ecuador; Escala 1:1000000*.
- Feininger, T., & Seguin, M. (1983). *Simple Bouguer 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)*.
- Gutscher, M., Malavieille, J., & Collot, M.-Y. (1999). *Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision*.
- Hughes, R., & Pilatasig, L. (2002). *Cretaceous and Tertiary terrace accretion in the Cordillera Occidental of the Andes of Ecuador*. Quito.
- INIGEMM. (2015). *Memoria Técnica - Mapa Geológico de la Cordillera Occidental 1° - 2° S*.
- Kerr, A., Aspden, J., Tarney, J., & Pilatasig, L. (2002). *The nature and provenance of accreted oceanic terranes in western Ecuador: geochemical and tectonic constraints*.
- Lebrat, M., Megard, F., Dupuy, C., & Dostal, J. (1987). *Geochemistry and tectonic setting of pre-collision Cretaceous and Paleogene volcanic rocks of Ecuador*.
- Limited., S. (2006). *Manual Gravímetro Scintrex CG – 5*.
- Litherland, M., & Aspden, J. (1992). *The geology and Mesozoic collisional history of the Cordillera Real, Ecuador*.
- Luzieux, L., Heller, F., Spikings, R., Vallejo, C., & Winkler, W. (2006). *Origin and Cretaceous tectonic history of the coastal Ecuadorian forearc between 1°N and 3°S*.
- Núñez, E. (2003). *GEOLOGÍA DEL ECUADOR*. Guayaquil.
- Pedoja, K., Dumont, J., Lamothe, M., Ortlieb, L., Collot, J.-Y., Ghaleb, B., Auclair, M., Alvarez, V., Labrousse, B. (2006). *Plio-Quaternary uplift of the Manta Peninsula and La Plata Island and the subduction of the Carnegie Ridge, central coast of Ecuador*.
- Pennington, W. (1981). *Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America*.
- Reyes, P., & Michaud, F. (2012). *Mapa Geológico de la Margen Costera Ecuatoriana (1:500000)*. Quito.
- Reyes, P. (2013). *Evolution du relief le long des marges actives : étude de la déformation Plio-Quaternaire de la cordillère cotière d'Equateur*. Francia.
- Reynaud, C., Jillard, E., Lapierre, H., Mamberti, M., & Mascle, G. (1999). *Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America*.
- Sage, F., Collot, J., & Ranero, C. (2006). *Interplate patchiness and subduction-erosion mechanisms: Evidence from depth migrated seismic images at the central Ecuador convergent margin*.
- Saunders, A., Tarney, J., Kerr, A., & Kent, R. (1996). *The Formation and fate of large igneous provinces*.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*.

- Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymuller, J., & Mora, H. (2002). *Wide plate margin deformation, South Central America and Northwestern South America.*
- Udías, A., & Mezcuca, J. (1997). *Fundamentos de Geofísica.* illustrated.
- Van Thournout, F., Hertogen, J., & Quevedo, L. (1992). *Allochthonous terranes in northern Ecuador.*
- Witt, C., & Bourgois, J. (2009). *Forearc basin formation in the tectonic wake of a collision-driven, coastwise migrating crustal block: the example of the North Andean block and the extensional Gulf of Guayaquil-Tumbes Basin.*

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			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	Tipo de roca	Densidad (g/cm³)	Anomalía de Bouguer
Borde de la Costa	Tablazo	Sedimentaria	1.3	3 a 50 mGal
	Dos Bocas	Sedimentaria	2.0	
Cordillera costanera	Piñón	Gabros, basaltos, pillow lavas	2.7 - 2.9	-1 a -10 mGal
Cuenca de Manabí	Ónzole	Sedimentaria	2.3	1 a 50 mGal
	Borbón	Sedimentaria	2.3	
Borde de la cordillera Occidental	Macuchi	Volcano-sedimentaria	2.1	-10 a -140 mGal
	Macuchi	Basalto-andesíticas	2.7 - 2.9	
	Granitoides indiferenciados	Intrusivas	2.55	

Anexo 2.Tabla de formaciones geológicas y anomalías de Bouguer.

Fuente: Autor

