DETERMINACIÓN DE LA DORSAL MALPELO A PARTIR DE GRAVIMETRÍA SATELITAL

María Fernanda Rodríguez Velásquez
Kevin Fernando Rojas Gaitán

Determinación de la dorsal Malpelo a partir de gravimetría satelital

María Fernanda Rodríguez Velásquez
Kevin Fernando Rojas Gaitán

Proyecto de grado en modalidad de monografía para optar al título de ingenieros Catastrales y Geodestas

Director:

Profesor Luis Fernando Gómez Rodríguez

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
BOGOTÁ D.C. COLOMBIA
2019

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CATASTRAL Y GEODESIA

Proyecto de grado

DETERMINACIÓN DE LA DORSAL MALPELO A PARTIR DE GRAVIMETRÍA SATELITAL

DIRECTO:

Profesor Luis Fernando Gómez Rodríguez

PRESENTADO POR:

María Fernanda Rodríguez Velásquez - 20132025039

Kevin Fernando Rojas Gaitán – 20122025050

Bogotá D.C, 2019

Agradecimientos

A Dios por darme la fortaleza y sabiduría de seguir con este proyecto a pesar de los obstáculos que desde el inicio se presentaron y porque hoy me permita finalizar una etapa tan importante de mi vida.

A mi madre por ser el apoyo más grande de mi vida, por sus consejos, por su amor y por jamás dejar de creer en mis capacidades.

Al querido profesor Andrés Cárdenas por su inmenso apoyo en el desarrollo de este proyecto porque desinteresadamente nos compartió su conocimiento y nos brindó su ayuda cuando no veíamos el final, por ser una excelente persona, por su tiempo, claramente por depositar toda su confianza y por dejarme tantas enseñanzas que harán de mí no solo una buena profesional sino también una gran persona.

Al director Luis Fernando Gómez por unir nuestros caminos y apoyar firmemente nuestro proyecto, por sus consejos y aportes que hicieron de este un gran trabajo de grado.

Al colega y compañero Yerson Pardo quien compartió su gran conocimiento en el tema y nos guio en gran parte de este camino.

Y finalmente quiero agradecer a todas las personas que desde el inicio pensaron que un proyecto en geofísica era una locura, a quienes jamás nos dieron una respuesta a tantas preguntas, a quienes en mitad del camino desistieron de la confianza y el apoyo, pues a pesar de que nada de esto fue fácil hoy me siento orgullosa del trabajo realizado y los resultados obtenidos.

El presente trabajo investigativo es dedicado primeramente a Dios, gracias por ser el inspirador, el Padre, aquel que me llenó de fuerzas, coraje y valentía en el proceso de obtener uno de los anhelos más deseados, gracias por enseñarme que sí creo, veo y que tus promesas siempre se cumplen. A ti, gracias. Juan 11:40.

A mi familia, por su constante apoyo, dedicación y sacrificio por los cuales hoy llego hasta aquí, por nunca haber truncado mis sueños y enseñarme el significado de lucha y dedicación. Mención especial a mi abuela, Emma Cuervo, quien siempre creyó en mí y tenía una palabra de ánimo, gracias viejita linda por todo lo que hiciste siempre por mí.

A Daniela Martínez, gracias por ser mis brazos cuando los míos no tienen fuerzas, por ser mi apoyo, quien me brinda constante motivación y siempre está a mi lado, por ser mi mejor amiga y mi novia, quien estuvo siempre, a pesar de las múltiples dificultades y desmotivaciones que llevo este proceso.

A María Fernanda, por ser una excelente compañera de tesis y una persona increíble de quien me llevo muchas lecciones, gracias por las ganas de sacar el proyecto adelante y no desfallecer cuando todo parecía no tener un norte.

Un sincero y profundo agradecimiento a la profesora Erika Sofía Upegui, quien compartió siempre sus conocimientos, me enseñó de lo que se encuentra en la vida profesional y siempre creyó que cualquier idea podría ser siempre explotada, gracias por creer siempre en que podemos hacer grandes proyectos y animarnos a seguir adelante siempre.

Al profesor Andrés Cárdenas, quien tiene mi franco reconocimiento, gracias por la colaboración y apoyo brindados en la realización de este proyecto, por brindarnos su apoyo desconsideradamente, por las lecciones enseñadas, por sus consejos y recomendaciones y por dedicar su vida al desarrollo científico de las geociencias, por sus aportes a la investigación y desarrollo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, mi más sincero respeto.

Al profesor Luis Fernando Gómez, quien me dio lecciones de vida imborrables, quien compartió su conocimiento siempre y quien nunca se negó a resolver cualquier duda que se tuviera.

Al ingeniero Yerson Pardo, por su contribución intelectual tan significativa en el desarrollo de éste proyecto, por su aporte y dedicación al aporte geocientífico del país.

A mis mejores amigos: Alejandro Mesa, Juan Sebastián Pire, Samantha Torres y Heidy Barrera; gracias porque nunca me dejaron desfallecer, porque siempre estaba la preocupación y la duda, siempre creyeron y nunca desconfiaron de lo que podría llegar a hacer, muchas gracias por su incondicional apoyo.

Índice

Introducción 10
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 11
1.1. Planteamiento del problema 11
1.2. Justificación 11
1.3. Objetivos 12
1.3.1. Objetivo General 12
1.3.2. Objetivos Específicos 12
1.4. Alcance del proyecto 12
1.5. Metodología 13
1.5.1. Fase 1. Diagnóstico e información geológica y gravimétrica 13
1.5.2. Fase 2. Modelo geofísico, gravimétrico e isostático 13
1.5.3. Fase 3. Marco geológico regional 14
1.5.4. Fase 4. Análisis de resultados 15
1.6. Descripción de la zona de estudio 15
1.6.1. Ubicación 16
1.6.2. Clima 17
1.6.3. Hidrología 18
1.6.4. Flora y Fauna 18
CAPÍTULO 2. GRAVIMETRÍA E ISOSTASIA 19
2.1. Gravedad. 19
2.1.1. Ley de gravitación universal. 19
2.1.2. Campo de gravedad. 21
2.1.3. Gravedad observada. 21
2.2. Gravimetría. 21
2.2.1. Método Gravimétrico. 22
2.3. Correcciones y anomalías. 22
2.3.1. Corrección Aire Libre. 22
2.3.2. Corrección por la capa intermedia y reducción de Bouguer. 23
2.3.3. Corrección por topografía. 23
2.3.4. Anomalía Aire Libre 24
2.3.5. Anomalía de Bouguer. 24

2.4. Topex-Poseidon. 25
2.5. Filtros. 25
2.6. Isostasia 27
2.6.1. Anomalía isostática 27
2.6.2. Reducciones isostáticas. 28
2.6.3. Sistema de Airy 28
2.6.4. Sistema de Pratt 30
2.7. Método de interpolación (Mínima curvatura) 31
CAPITULO 3. ANÁLISIS GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DEL PACIFICO COLOMBIANO Y MALPELO. 33
3.1. Marco geológico de la zona de estudio. 33
3.2. Geodinámica de la zona de estudio. 40
3.3. Sísmica 43
3.3.1. Sismo de 1970 44
3.3.2. Sismo de 1979 45
3.3.3. Sismo de 1991 45
3.3.4. Sismo de 2005 45
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS 47
4.1. Procesamiento de datos 47
4.1.1. Información topográfica y gravimétrica satelital 47
4.1.2. Información sísmica 48
4.2. Mapa metodológico 49
CAPITULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS 50
5.1. Mapa Topográfico 50
5.2. Mapa Anomalía Aire Libre 52
5.3. Mapa anomalía de Bouguer Simple 54
5.4. Mapas regional – residual 59
5.5. Mapa primera derivada vertical 62
5.6. Mapa Primera derivada horizontal 64
5.7. Dorsal Malpelo 66
5.8. Mapa anomalía isostática 71
5.8.1. Comparación de la anomalía isostática por medio de los modelos de Airy, Pratt y geología estructural 74

5.9. Modelo de Airy 75
5.10. Modelo de Pratt..... 78
5.11. Datos sísmicos históricos (1970-2019) 81
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 85
CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA..... 87

Tabla de figuras

Figura 1. Ley de gravitación universal, entre dos masas m1 y m2. 19
Figura 2.Ley de gravitación universal, para una masa atraída unitaria. 20
Figura 3.Sistema de compensación isostática de Airy – Heiskanen. 29
Figura 4.Nivel de compensación isostática de Pratt – Hayford. 30
Figura 5. Marco geodinámica de la Cordillera de Carnegie, el cual indica la relación en cuanto a los movimientos de la placa nazca y cocos con respecto a la placa sudamericana considerando esta última como fija.. 34
Figura 6.Mapa tectónico de Colombia con las principales fallas y ubicación de nidos sísmicos. 35
Figura 7.Ubicación geográfica de la cuenca Atrato, San juan y Urabá. 38
Figura 8. Unidades litoestratigráficas pertenecientes a la Cuenca Atrato y Cuenca San Juan. 39
Figura 9. Greater release of seismic energy associated with flat slab vs steep slab segments (Gutscher et al., 2000) 41
Figura 10. Mapa tectónico de la zona occidental de Colombia, donde se identifican las principales zonas de subducción y el volcanismo que se genera en la parte continental. Tomado de " Boletín Geológico 43" del Servicio Geológico Colombiano. 42
Figura 11. Mapa de ubicación de sismos más importantes. 46
Figura 12.Fuente de descarga de datos. 47
Figura 13. Ejemplo de la información descargada, en imagen izquierda se encuentran los datos de latitud, longitud y altura topográfica; en la imagen derecha se encuentra los datos de latitud, longitud y anomalía aire libre. 48
Figura 14. Fuente descarga de datos. 49
Figura 15. Mapa metodológico acerca del procesamiento de datos y los resultados obtenidos. 49
Figura 16. Perfil del trazo correspondiente al mapa topográfico del ítem 5.1..... 51
Figura 17.Perfil del trazo correspondiente al mapa anomalía Aire Libre del ítem 5.2. 53
Figura 18.Tabla de cálculo de: Gravedad teórica, gravedad observada, corrección aire libre, corrección Bouguer y Anomalía Bouguer simple. 56

Figura 19.Perfil del trazo correspondiente al mapa de anomalía de Bouguer simple del ítem 5.3..... 57
Figura 20.Perfil del trazo correspondiente al mapa anomalía residual del ítem 5.4. 61
Figura 21. Modelo de velocidades y gravimétrico de Malpelo. Tomado del artículo structure of the Malpelo Ridge (Colombia) from seismic and gravity modelling. ... 66
Figura 22. Perfil de la topografía enfocada a Malpelo. 69
Figura 23.Perfil de la Anomalía de Bouguer Simple enfocada a Malpelo. 70

Tabla de mapas

Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio. 16
Mapa 2.Mapa de Malpelo sobre el Océano Pacífico. 17
Mapa 3. Representación topográfica de la zona de estudio con trazo para perfil. 50
Mapa 4.Representación de la Anomalía Aire Libre de la zona de estudio con trazo para perfil. 52
Mapa 5.Representación de la Anomalía de Bouguer simple de la zona de estudio con trazo para perfil. 57
Mapa 6. Representación regional de la zona de estudio. 59
Mapa 7. Representación residual de la zona de estudio con trazo para perfil. 60
Mapa 8. Representación primera derivada vertical. 62
Mapa 9. Representación primera derivada horizontal. 65
Mapa 10. Representación de la topografía enfocada en Malpelo. 69
Mapa 11.Representación de la Anomalía de Bouguer Simple enfocada en Malpelo 70
Mapa 12.Representación de la Anomalía Isostática por el método de Airy. 74
Mapa 13.Representación de la Anomalía Isostático por el método de Pratt. 74
Mapa 14. Representación de la geología estructural en la zona de estudio. 74
Mapa 15. Modelo isostático de Airy. 76
Mapa 16. Modelo isostático tridimensional de Airy. 77
Mapa 17. Modelo isostático de Pratt. 79
Mapa 18. Modelo isostático tridimensional de Pratt 80

Introducción

Los métodos geofísicos potenciales son una herramienta que permite la determinación de diferentes densidades de la corteza terrestre como el método gravimétrico, con los cuales es posible obtener los modelos de inversión geológica y entender el comportamiento del interior de la tierra en la corteza oceánica y continental.

En el proyecto de grado que se realizó se estudia la zona de subducción de la placa Nazca con la placa sudamericana en el pacifico Colombiano y se analizará especialmente el área de interés de la isla Malpelo en el sur occidente Colombiano. Los datos gravimétricos utilizados fueron descargados de la información disponible de gravimetría satelital del satélite topex-Poseidon de la Universidad de California. Con base en esta información y con el modelo gravimétrico e isostático se realiza un procesamiento de los datos y la interpretación de los resultados en la zona de interés de la dorsal Malpelo.

La importancia del proyecto de grado radica en que es un aporte al conocimiento del estudio geofísico en las zonas marítimas de Colombia, en especial el pacifico Colombiano que ha sido poco estudiado, es por esto que éste proyecto contribuirá al desarrollo en investigación en otras áreas de la geofísica aplicada desde la Universidad Distrital a través del pregrado de ingeniería Catastral y Geodesia.

Se utilizó la anomalía de Bouguer Simple, la anomalía Aire Libre y anomalía isostática para correlacionar los datos de la geología estructural y entender la estructura interna en esta zona de subducción, muy activa desde el punto de vista sísmico. Se utilizaron los modelos isostáticos de Airy y Pratt, con los cuales se validó la información gravimétrica obtenida y con la información geológica de estudios previos realizados se modelo la zona de subducción en el área de investigación.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

La información geofísica y de inversión geológica del pacifico Colombiano en la zona de subducción, requiere de más estudios dado que es una zona sísmicamente activa. Esto lleva a señalar que la realización de estudios gravimétricos es de vital importancia para representar las diversas anomalías que conducen a interpretaciones científicas.

Tomando en consideración los reducidos estudios de carácter geofísico en el territorio colombiano, especialmente en la zona oceánica; es de importancia generar investigaciones que aporten al avance del conocimiento geofísico en Colombia.

Adicionalmente, la relación entre geofísica, sísmica y geología debe ser desarrollada para que permita determinar mejores interpretaciones que contribuyan al conocimiento del interior de la tierra, que es una herramienta fundamental en la investigación.

1.2. Justificación

En el desarrollo de este trabajo se espera obtener un modelo gravimétrico que pueda ser relacionado con la actividad sísmica y el marco geológico general para aportar al conocimiento del comportamiento de la estructura geológica de la dorsal Malpelo.

Debido a que el pacifico colombiano presenta características significativas correspondientes a las fallas que allí se encuentran; la presencia de las placas: Nazca (oceánica) y suramericana (continental) se crea la necesidad de generar nuevos estudios que permitan la confirmación de las investigaciones ya existentes y den confiabilidad de las interpretaciones ya planteadas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Calcular las anomalías Bouguer e isostática en la zona de subducción del pacifico Colombiano y relacionarlas con los modelos isostáticos ya existentes, la información de geología estructural y la sismicidad del área de estudio.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las anomalías Bouguer e isostática del pacifico Colombiano a partir de información gravimétrica satelital.
- Determinar la dorsal Malpelo a partir de información gravimétrica satelital.
- Relacionar el modelo gravimétrico con la geología estructural y el modelo isostático con fines de predicción.

1.4. Alcance del proyecto

El presente proyecto tiene un área de estudio correspondiente al pacifico Colombiano donde se encuentra la zona de subducción entre la placa Nazca y Suramericana y la dorsal Malpelo. La base de datos utilizada permitirá la determinación de las anomalías Bouguer Simple e isostática. Los resultados obtenidos otorgaron la posibilidad de correlacionar datos sísmicos, de geología estructural y los modelos isostáticos.

Teniendo en cuenta que la zona escogida para el proyecto presenta gran extensión de área y el difícil acceso a esta, no se consideró por falta de recursos realizar trabajo de campo que permitiera la adquisición terrestre y marítima de los datos.

1.5. Metodología

Al emplear métodos gravimétricos con datos obtenidos por medio de satélite, en el presente proyecto se realizará un análisis de anomalías gravimétricas en cercanías el pacifico colombiano y la isla de Malpelo, para ello se utilizan cuatro importantes fases en el desarrollo del mismo.

1.5.1. Fase 1. Diagnóstico e información geológica y gravimétrica

En la primera fase de desarrollo del proyecto se efectúan cuatro procesos relevantes para el progreso del proyecto, el primero es la identificación de la zona de estudio, la que se definió el pacifico colombiano y la dorsal Malpelo, dentro de la cual se encuentra la Isla Malpelo, sobre la que podemos expresar que " es una isla de origen volcánico, se encuentra localizada sobre la Dorsal de Malpelo en posición latitud 03°51'07" Norte y longitud 81°35 '40" Oeste La isla tiene una extensión de 2900 metros de largo, y de 1300 metros de ancho por lo que tiene aproximadamente 3,77 kms², y una altura máxima sobre el nivel del mar de 300 metros, en el cerro de la Mona". (DIMAR, 2018). Es por la ubicación de la Isla Malpelo que la zona de estudio se define entre las coordenadas 1,26° a 9,30° de latitud norte y 76° a 82° de longitud oeste.

En segundo lugar, la descarga de datos con información de gravimetría satelital. Para esto se utilizan los servicios web que contienen información satelital y permiten su descarga, la principal fuente de descarga será la página de la Universidad de California San Diego. Con base en los modelos que se descargan con contenido gravimétrico y topográfico capturados por el satélite Topex – Poseidon, se transita a evaluar la utilidad y confiabilidad de estos, basados en la delimitación de la dorsal Malpelo y las coordenadas que serán utilizadas en la definición de la placa continental en el proyecto.

En un tercer paso, se definen los métodos de interpolación que pudiesen ser utilizados. En este punto se elige el procedimiento de mínima curvatura por ser el proceso más eficaz para el posterior análisis de información, con el objetivo de obtener resultados confiables y veraces.

1.5.2. Fase 2. Modelo geofísico, gravimétrico e isostático

En la segunda etapa, se efectúa el procesamiento de la información, esto requiere realizar correcciones y reducciones en los dato, las correcciones que destacan por

su importancia a realizar son la reducción de gravedad, corrección aire libre y corrección Bouguer.

Para el procesamiento de datos se emplea el software especializado *Oasis Montaj*, que permite el tratamiento de la información de gravedad y topografía que se obtiene de la descarga de datos mencionada en la Fase 1, además de este software se hace necesario utilizar herramientas ofimáticas para el análisis inicial de los datos, para lo cual se acude a las herramientas de Microsoft Office como las que se encuentran en Microsoft Office Excel, donde se tabula la información descargada.

Para que el proceso se realice de manera adecuada se deben tomar en consideración la conversión de coordenadas geográficas a planas, así como la estimación de las correcciones descritas anteriormente, con esto se efectuará el proceso de articular esta información en el software elegido para poder aplicar los diferentes filtros que permitan detallar las anomalías evidenciadas en la interpolación de datos.

Posterior a obtener los resultados del método de interpolación se aplican los filtros de primera y segunda derivada vertical, los cuales permiten mejorar las fuentes geológicas más superficiales y también profundas.

1.5.3. Fase 3. Marco geológico regional

La tercera fase del proceso se lleva a cabo tomando en consideración estudios acerca de geología estructural, sísmica, isostasia y gravimetría, que describan el marco geológico general a partir de la teoría de la isostasia, esto permitirá abordar y completar de una manera más detallada los lineamientos que se deben tener al momento de analizar datos origen gravimétrico sobre corteza oceánica principalmente.

El proceso de evaluación se basa en las diferentes teorías de isostasia, con estas se hará una revisión de las compensaciones en términos de densidad de la corteza, lo cual genera la posibilidad de una interpretación de los resultados obtenidos basados en la distribución de cargas de gravedad por medio de la isostasia, para este proceso se utiliza principalmente la teoría de Airy - Pratt.

Con lo anteriormente expuesto, se podrá determinar el posicionamiento de la dorsal Malpelo en el pacífico colombiano, dejando una visión clara de los procesos de subducción que se están generando por el choque de las placas Nazca y Suramericana.

1.5.4. Fase 4. Análisis de resultados

En el análisis de resultados se muestra la anomalía Bouguer, isostática y residual, que se presentan en la zona objeto de estudio, con base en estas y los estudios geológicos de la zona se realiza una interpretación de la composición geológica, de igual manera se generan mapas que ejemplifiquen las anomalías y se indica de manera informativa la tendencia general de anomalías, la determinación de la placa continental sobre la dorsal Malpelo.

1.6. Descripción de la zona de estudio

El pacífico colombiano se encuentra al occidente del país, conformado por los departamentos del Chocó, Valle del Cauca, Nariño y Cauca. En lo que respecta a la zona territorial se tiene que la región pacífica ocupa “una superficie superior a los 116000 km^2 sobre la franja occidental de Colombia” (Defensoría del pueblo, 2016).

La influencia del océano en la parte territorial pacífica presenta una característica peculiar, consiste en que "la formación del suelo divide la región en dos tipos de superficie, al norte sobresalen los acantilados rocosos, las bahías y ensenadas, mientras que al sur se encuentra la llanura inundable del Pacífico, compuesta por la presencia de ciénagas y esteros" (Defensoría del pueblo, 2016).

“Las características geológicas de los fondos oceánicos que bordean la costa pacífica colombiana han originado una costa con topografía accidentada. Se evidencian elevaciones y promontorios rocosos de mediana altura originados en el período terciario en una matriz de fondos blandos.” (INVEMAR, 2016), a nivel topográfico el océano pacífico colombiano presenta varias irregularidades, esto debido a que ha presentado diferentes formaciones como fosas en el transcurso de la historia, estas han sido producidas por choques entre placas tectónicas que debido a los procesos sísmicos pueden emerger como zonas montañosas o pueden subducir al generarse un choque entre placas que genere que una de ellas tome dirección hacia el interior de la tierra provocando las fosas en los territorios.

Es importante definir de manera más detallada el área escogida donde se realizará el estudio, para ello se generan diversos ítems que permiten construir la zona a observar, para la cual se tiene:

1.6.1. Ubicación

La dorsal Malpelo es adyacente a la Isla Malpelo, la cual tiene un “origen volcánico, se encuentra localizada sobre la Dorsal de Malpelo en posición latitud 03°51'07" Norte y longitud 81°35 '40" Oeste, se encuentra separada del puerto de Buenaventura a una distancia de 265 millas náuticas en línea recta y la parte más cercana al continente es punta Mangle a 207 millas.” (CIOH, 2017).

Los límites de esta están descritos por el norte con la placa Coiba, al sur con la placa de Nazca, por el oeste con la placa Cocos y al este con la Placa de los Andes, todas ubicadas en el pacifico. (CIOH, 2017).

Los puntos de referencia de la zona de estudio se encuentran situados en las siguientes coordenadas (9°18’00” N, 82°00’00”W), (9°18’00” N, 74°00’00”W), (1°36’00” N, 74°00’00”W), (1°36’00” N, 82°00’00”W).



Mapa 1. Ubicación de la zona de estudio.

Dentro de la zona de estudio es importante situar la pequeña isla para tener una clara definición del lugar donde se encuentra.



Mapa 2.Mapa de Malpelo sobre el Océano Pacífico.

1.6.2. Clima

La zona de estudio cuenta con un clima predominantemente cálido y un estado húmedo durante la mayor parte del año, es decir que las altas temperaturas en promedio 25.1°C hacen parte de las características de la isla.

1.6.3. Hidrología

"Por su origen geológico, la isla no tiene fuentes de agua dulce" (Alvarez, Gast & Krieger, 1999). "El agua que alimenta las corrientes en la isla es únicamente meteórica, por lo cual las corrientes intermitentes sólo descargan agua en época de lluvias. En la parte oriental se presentan fuentes continuas, producto del entrampamiento del agua lluvia por parte de la formación de rocas que por su tipo actúa como una esponja" (Caita & Guerrero, 2000).

De acuerdo con los datos registrados, las aguas costeras alrededor de Malpelo muestran valores normales en aguas oceánicas, que fluctúan entre los siguientes rangos:

- Temperatura: entre 27,8°C y 29,4°C
- Salinidad: entre 33 y 35 ppm.
- Oxígeno disuelto: 6,03 y 8,83 mg/l
- Saturación de oxígeno: entre 79,1 y 113,7%

Al igual que en las muestras tomadas en el trayecto Buenaventura – Malpelo, los registros de temperatura superficial tomados alrededor de Malpelo están por encima de lo normal. Según Brando, Prahl & Cantera (1992), en meses con presencia del fenómeno El Niño se han observado temperaturas superficiales cercanas a 28°C (noviembre de 1987; marzo de 1988) e incluso superiores (28,5°C en noviembre de 1982).

1.6.4. Flora y Fauna

A pesar de la gran rocosidad en la isla, los procesos de erosión y las lluvias que se presentan, permiten el desarrollo de diferentes plantas como algas y líquenes. Por otro lado, se encuentran las especies en el agua que son diversas y en gran cantidad, gracias al guano que es formado por el excremento de las aves, brindan nutrientes para la aparición de algas que favorecen a muchas de las especies como predadores de coral, pez mariposa, etc.

CAPÍTULO 2. GRAVIMETRÍA E ISOSTASIA

A continuación, se relacionarán diferentes conceptos que se hacen importantes para el desarrollo del presente proyecto:

2.1. Gravedad.

"La resultante de las aceleraciones de gravitación y centrífuga causada por la rotación de la Tierra; es normal al geoide en todos sus puntos, y en general a todas las superficies equipotenciales. Puede ser determinada por diversos métodos tales como péndulo reversible, control de tiempo de un cuerpo moviéndose libremente bajo la acción de la gravedad, etc. También llamada gravedad absoluta." (Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 1977).

2.1.1. Ley de gravitación universal.

Para hablar de la ley de gravitación universal es necesario recurrir primero a la ley de gravitación de Newton, donde se expresa que "dos partículas con masas m_1 y m_2, separados una distancia l, se atraen en proporción directa a sus masas e inversa al cuadrado de la distancia que los separa, lo cual expresado matemáticamente corresponde a:" (Fernandez Ch, 2002).

$$|F_1| = |F_2| = G\frac{m_1 m_2}{l^2} \quad (1)$$

Donde G es la constante de gravitación universal $6{,}67 * 10^{-11}\, {Nm^2}/{kg^2}$.

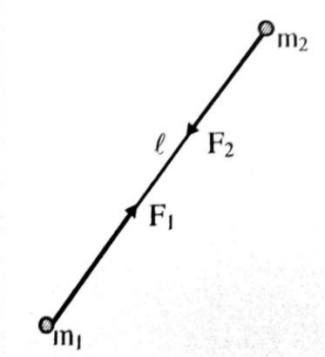


Figura 1. Ley de gravitación universal, entre dos masas m1 y m2.

Teniendo en cuenta dos masas donde una es atrayente y la otra es atraída, se puede suponer que "la masa atrayente está en el origen de un sistema de coordenadas $x, y, z,$ y la designamos por m, y además hacemos la masa atraída igual a la unidad, podemos escribir la ecuación de la siguiente manera:" (Fernandez Ch, 2002).

$$|F_1| = |F_2| = G\frac{m}{l^2} \qquad (2)$$

Donde:

$|F_1|$ Es la norma del vector F_1, siendo F la fuerza existente sobre una masa m situada sobre la superficie terrestre.

m, es la masa de la tierra y;

l, es el radio de la tierra.

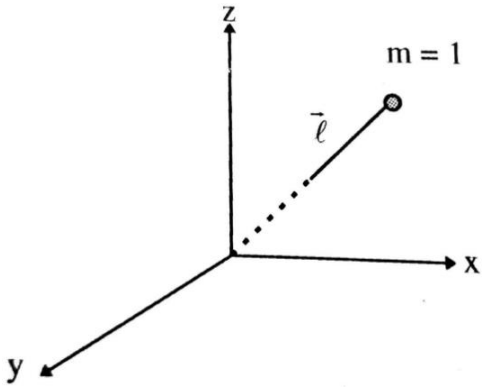


Figura 2.Ley de gravitación universal, para una masa atraída unitaria.

"La aceleración de gravedad fue primero medida por Galileo en su famoso experimento en Pisa. El valor numérico de la gravedad sobre la superficie de la tierra es alrededor de $980\ \left(cm/s^2\right)$. En honor de Galileo la unidad de aceleración de gravedad, $1\ \left(cm/s^2\right)$ es llamado el Galileo o Gal." (Fernandez Ch, 2002).

2.1.2. Campo de gravedad.

Una masa puntual situada en la Tierra experimenta: la fuerza de atracción terrestre, la fuerza centrífuga que se genera por la rotación del planeta y la fuerza de atracción que generan otros cuerpos. Al conjunto de estas fuerzas se le denomina campo de gravedad de la Tierra.

2.1.3. Gravedad observada.

"Valor de la aceleración de la gravedad en una estación, previo a cualquier corrección" (Instituto Panamericano de Geografía e Historia, 1977).

2.2. Gravimetría.

"La medición del campo de gravedad y la determinación del campo escalar a través del potencial gravitacional se estudian en dos ciencias de la Tierra: geodesia y geofísica, las cuales tienen propósitos complementarios. La determinación precisa de las dimensiones de la tierra (a través de sus parámetros geométricos y físicos) es el principal objetivo de estudio de la geodesia, mientras que la distribución de masas es el objetivo principal de la *gravimetría*." (Cárdenas Contreras, 2014).

La gravedad teórica es el valor que se tiene especulativamente para un punto que se tiene sobre el elipsoide de referencia. Para el cálculo de la gravedad teórica se usará la fórmula suministrada por la International Gravity Formula de 1967, cuya expresión es:

$$g_t = 978031.8\,(1 + 0.005278895\ \sin^2(\phi) - 0.000023462\,\sin^4(\phi))\ mGal \qquad (3)$$

2.2.1. Método Gravimétrico.

Existen diversas maneras de definir el método gravimétrico, sin embargo, la definición más sencilla es que se basa en medir la gravedad sobre un punto y detectar las variaciones que se evidencian en el subsuelo, se tomaron en consideración las siguientes dos definiciones:

"El método gravimétrico hace uso de campos de potencial natural igual al método magnético y a algunos métodos eléctricos. El campo de potencial natural observado se compone de los contribuyentes de las formaciones geológicas, que construyen la corteza terrestre hasta cierta profundidad determinada por el alcance del método gravimétrico (o magnético respectivamente). Se realiza mediciones relativas o es decir se mide las variaciones laterales de la atracción gravitatoria de un lugar al otro puesto que en estas mediciones se pueden lograr una precisión satisfactoria más fácilmente en comparación con las mediciones del campo gravitatorio absoluto. Los datos reducidos apropiadamente entregan las variaciones en la gravedad, que solo dependen de variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación." (Universidad Nacional de Colombia, 2018).

"El método Gravimétrico consiste en la medición de la aceleración de gravedad sobre un terreno con el fin de detectar las variaciones de densidades en las unidades geológicas presentes en el subsuelo." (Geodatos, 2018).

2.3. Correcciones y anomalías.

2.3.1. Corrección Aire Libre.

La reducción de aire libre se basa en efectuar una corrección a los valores observados que proporciona la fuerza de gravedad en un punto muestreado, tomando en consideración el supuesto de que entre el punto y el nivel del mar no hay presencia de masas que ejerzan atracción. Esta corrección por lo general se suma al valor observado. Está definida por la siguiente ecuación:

$$C_{AL} = -0.0386 * h \qquad (4)$$

2.3.2. Corrección por la capa intermedia y reducción de Bouguer.

Basados en que las masas situadas entre el nivel del mar y el punto observado tienen influencia sobre estas, se estima la corrección introduciéndola en una capa intermedia. La corrección es calculada bajo el supuesto de que la acción de las masas equivale a la de una capa horizontal que se amplía hacia el infinito en múltiples direcciones y con un espesor equivalente a la altura en que el punto está situado sobre el nivel del mar.

Como la atracción de la capa intermedia incrementa el valor de la fuerza de gravedad observada en el punto se debe restar dicha atracción del valor observado. Adicionando las correcciones de la capa intermedia y aire libre se estima la reducción de Bouguer.

Para el cálculo de la corrección de Bouguer, que toma en cuenta las masas adicionales entre el punto de observación y el elipsoide corrigiéndolas y aproximándolas al punto de observación, se usa la fórmula:

$$C_B = 0.04193\ \rho h\ mGal \qquad (5)$$

Donde ρ es equivalente a la densidad, la cual tomará valores de 2.67 $^{g}/_{cm^3}$ para los datos ubicados sobre plataforma continental y para los datos oceánicos de 2.9 $^{g}/_{cm^3}$ y h es la altura en metros.

2.3.3. Corrección por topografía.

La corrección por topografía permite calcular el efecto de las masas por encima y por debajo de la superficie de medición, para ello se hace indispensable tomar el promedio de elevación de los diferentes compartimentos a los que se les restaría la elevación del punto en donde se realiza la medición. Se podría efectuar esta corrección utilizando el ábaco de Hammer, con el fin de determinar la altitud media de los compartimentos mediante un modelo digital, la altitud media podría determinarse mediante el cálculo de las altitudes del modelo en diferentes puntos distribuidos de manera homogénea sobre el compartimento y calculando posteriormente la media.

Sin embargo, con el fin de hacer el trámite de cálculo menos dificultoso, se hace necesario mencionar la proposición de V.M. Beriozkin quien recomienda valorar el terreno por puntos característicos. Tomando en consideración la proposición se puede disminuir el número de excedentes necesarios por los cuales se determina la corrección. El método consiste en que se efectúe una integración desde $\propto_n$ hasta $\propto_{n+1}$ para$\propto$, desde $r_m$hasta r_{m+1}para r y desde 0 hasta h para z, después de integrar y sustituir los límites con respecto a z se obtiene:

$$\Delta g_{n,m} = k\sigma \int_{\propto_n}^{\propto_{n+1}} \int_{r_m}^{r_{m+1}} \left(1 - \frac{r}{\sqrt{r^2+h^2}}\right) d\alpha dr \qquad (6)$$

2.3.4. Anomalía Aire Libre

Esta anomalía toma en cuenta solo los cambios de altitud corregidos por medio de la corrección de aire libre. Se calcula por medio de la fórmula:

$$A_{AL} = g_{obs} - g_t + C_{AL} \qquad (7)$$

Donde:

A_{AL} = Anomalía aire libre

g_{obs}= Gravedad observada

g_t = Gravedad teórica

C_{AL}= Corrección aire libre

2.3.5. Anomalía de Bouguer.

La anomalía de Bouguer es la atracción gravitacional que permanece tras corregir la medida de la componente vertical de la aceleración gravitacional en un punto, es decir que toma en consideración la variación de la gravedad con la altura y las masas presente entre la superficie de referencia y el punto de observación, generalmente tiene valores negativos en zonas montañosas y positivos en zonas oceánicas.

Las correcciones que se aplican solo generan un pequeño cambio en la fórmula de gravedad teórica, es por esto que la anomalía de Bouguer se hace relevante y se puede definir diciendo que el valor de la anomalía es equivalente al valor de la gravedad observada restándole un modelo de tierra corregida o:

$$A_B = g_o - \gamma + C_{AL} - C_B \quad (8)$$

Donde

A_B Es la anomalía de Bouguer,

g_o La gravedad observada, γ define la gravedad teórica,

C_{AL} Corrección por altura y

C_B Corrección de Bouguer.

2.4. Topex-Poseidon.

Es un satélite perteneciente a la agencia espacial CNES que en conjunto con la NASA realizaron su lanzamiento en 1992, la finalidad de este es la medición de la topografía sobre la superficie oceánica con una precisión de 4,2 centímetros. Esta misión fue planificada inicialmente por 3 años, pero se obtuvo como resultado la obtención de datos desde la órbita por 13 años, es decir hasta el 2006. (NASA, 2018).

La gran precisión de este satélite fue su mayor cualidad ya que generó datos de niveles del mar, topografía oceánica, permitió el monitoreo de las corrientes sobre el cambio climático global y produjo los mapas globales más precisos de las mareas generando así el aumento del conocimiento en el campo de gravedad de la tierra, actualmente se usan muchos de estos datos para diferentes estudios y proyectos que permiten seguir un proceso de investigación en la zona oceánica del planeta.

2.5. Filtros.

Para el desarrollo del presente proyecto se aplicarán los filtrados de primera y segunda derivada vertical, esto con el fin de poder destacar los valores de alta frecuencia de los datos.

Las derivadas verticales se han caracterizado por ser un método estándar de procesamiento para destacar los valores de alta frecuencia. Es así como la segunda derivada vertical, se podía hallar mediante un filtro de convolución de la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 f = 0 \qquad (9)$$

O también, según la relación:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = -\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right) \qquad (10)$$

Por medio del filtro de Fourier es más sencillo obtener la derivada n-ésima a partir de la relación:

$$F_0\left(\frac{\partial^n f}{\partial z^n}\right) = k^n . F(f) \qquad (11)$$

DondeF_0 representa el campo de Fourier y k es el número de onda o frecuencia, cuya representación también se podría definir como:

$$\frac{\partial^n f}{\partial z^n} = \lim_{\Delta z \to 0}\left(\frac{f(x,y,z) - f(x,y,z-\Delta z)}{\Delta z}\right) \qquad (12)$$

Siendo f el campo potencial y z el signo positivo que generalmente se aplica hacia abajo.

Generalmente se aplica la primera derivada vertical al total de datos del campo gravimétrico con el fin de resaltar las anomalías asociadas a las fuentes geológicas que son más superficiales de la estructura de la región y los bordes de las estructuras. La segunda derivada es una transformación matemática que tiene su origen en la ecuación de Laplace acentúa o resalta la longitud de onda menor de los componentes a expensas de la longitud de onda larga.

Se debe tener en cuenta que en las derivadas verticales, entre más grande sea el orden mayor será la amplificación relativa de frecuencias muy altas, también es mayor el riesgo de acentuar el ruido a un nivel inaceptable.

2.6. Isostasia

Todos los excesos o defectos de masas por encima o debajo del nivel de geoide están compensados, de modo que, a una cierta profundidad, el material se encuentra en equilibrio hidrostático. De acuerdo con este principio, la masa adicional de las montañas y su ausencia en las regiones oceánicas han de estar compensadas. “Esta compensación tiene lugar a una cierta profundidad con un defecto o exceso de masa, respectivamente, para lograr la condición de equilibrio. La causa de este fenómeno es la imposibilidad del material por debajo de la corteza, debido a su falta de rigidez, de mantener esfuerzos de cizalla por mucho tiempo” (Dutton, 1982).

Bajo la teoría de Jeffreys, la isostasia es considerada como la distribución de masas que minimiza la diferencia de esfuerzos máximos, considerando la corteza como una capa sobre un medio con características de fluido por debajo del cual el material está en equilibrio hidrostático.

2.6.1. Anomalía isostática

Las anomalías isostáticas de gravedad tienen como objetivo mostrar la compensación isostática ideal. La existencia de anomalía significa que la región no se encuentra en equilibrio isostático. Están definidas por:

$$\Delta g_I = \Delta g_B - C_I \qquad (13)$$

“Todas las hipótesis isostáticas examinadas deducen la ley de distribución de masas en la corteza terrestre en dependencia del de la superficie exterior.” (V.S.MIRÓNOV, 1977), por esto se debe calcular la acción de las masas que compensan el relieve, esta es definida como corrección isostática, se halla utilizando cilindros de radio a, altura b y distancia c de la base del cilindro con contraste de la densidad $\Delta\rho$, dada por:

$$C^I = 2\pi G\, \Delta\rho(b + \sqrt{a^2 + (c-b)^2} - \sqrt{a^2 + c^2}) \qquad (14)$$

2.6.2. Reducciones isostáticas.

Si se presentara que las masas topográficas están sencillamente superpuestas sobre una corteza homogénea, la reducción de Bouguer refinada eliminaría las irregularidades más prominentes del campo gravitatorio, haciendo que las anomalías de Bouguer fueran pequeñas y se encontraran en valores muy cercanos a cero. Sin embargo, es lo contrario lo que sucede en la realidad, donde la anomalía de Bouguer disminuye aproximadamente 100 mGal por cada kilómetro de altitud, es decir, genera la percepción de que se está eliminando mayor cantidad de masa de la que se debería eliminar realmente con la corrección anterior.

La explicación que se puede dar a este fenómeno es que existe algún tipo de deficiencia de masas bajo las zonas montañosas, esto significa que las masas se encuentran compensadas de alguna manera.

Para evaluar y procurar una explicación de dicha compensación se elaboraron dos teorías diferentes en tiempos próximos, la de Pratt en 1854 y la de Airy en 1855.

2.6.3. Sistema de Airy

Airy propuso un modelo y Heiskanen le dio fines geodésicos mediante fórmulas de mayor precisión generando una aplicación de manera amplia.

"El principio se basa en que las montañas de densidad constante $\rho_0 = 2.67\ {}^{g}/_{cm^3}$ pero rígidas, flotan sobre una capa más densa de densidad constante pero fluida $\rho_1 = 3.27\ {}^{g}/_{cm^3}$." (Universidad Politécnica de Valencia, 2016).

$$H\ \rho_c + t\ \rho_M = (H + h + t)\ \rho_c \qquad (15)$$

En donde despejando t y remplazando valores obtenemos:

$$t\ = \frac{\rho_c}{\rho_M - \rho_c}\ h \qquad (16)$$

Por otro lado, teniendo en cuenta la ecuación planteada para la plataforma oceánica tenemos la siguiente ecuación, en este caso los parámetros usados son la densidad del manto, densidad de la corteza, densidad del agua y se tiene en cuenta en espesor de la superficie oceánica o h'.

$$H\,\rho_c = h'\,\rho_A + (H - h' - t')\,\rho_c + t'\rho_M \qquad (17)$$

$$t' = \frac{\rho_c - \rho_A}{\rho_M - \rho_c}\; h' \qquad (18)$$

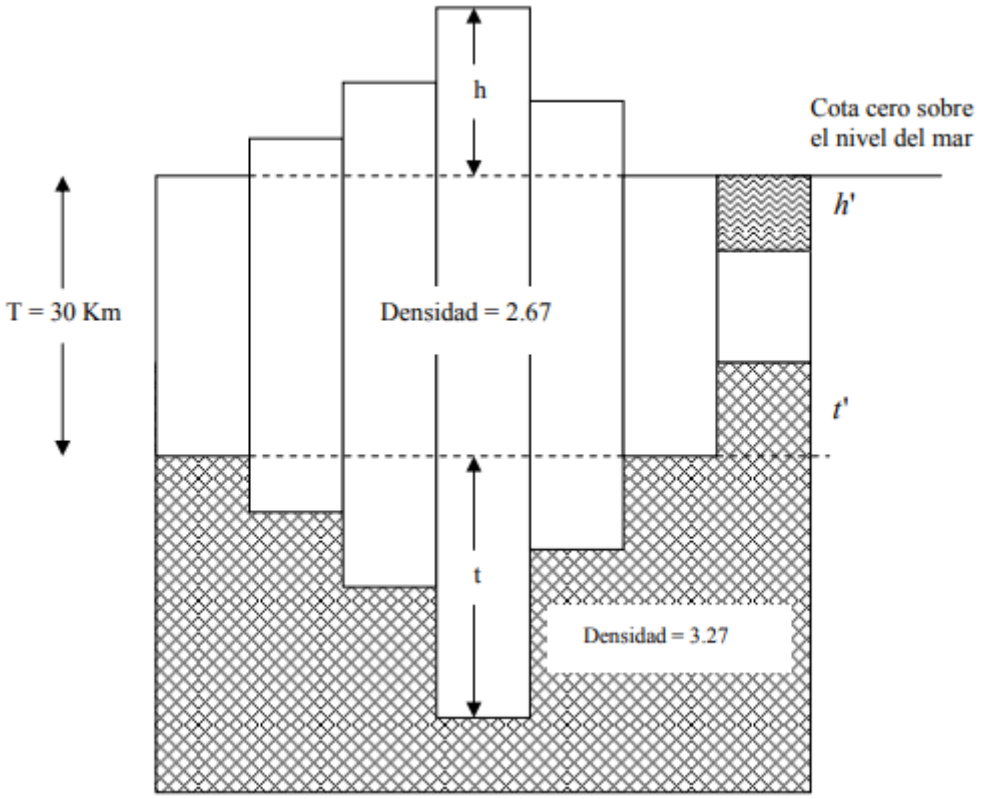


Figura 3.Sistema de compensación isostática de Airy – Heiskanen. Tomado de: http://www.upv.es/unigeo/index/docencia/etsigct/geodesia/teoria/TEMA4.pdf

2.6.4. Sistema de Pratt

La idea de Pratt junto con el desarrollo matemático de Hayford, indicaba que se podía basar un principio en el cual por debajo del nivel de compensación la densidad es uniforme. Por encima, las masas presentes de cada columna de igual sección son iguales, significa entonces que si llamamos D a la profundidad del nivel de compensación, la densidad ρ de una columna $D + h$, debe satisfacer la ecuación:

$$(D + h)\rho = D\ \rho_0 \qquad (19)$$

En la plataforma continental se tiene:

$$\rho = \frac{D}{D+h}\ \rho_0 \qquad (20)$$

Para D se toma un valor medio de compensación 100 Km y para $\rho_0 = 2.67\ {}^{g}/_{cm^3}$

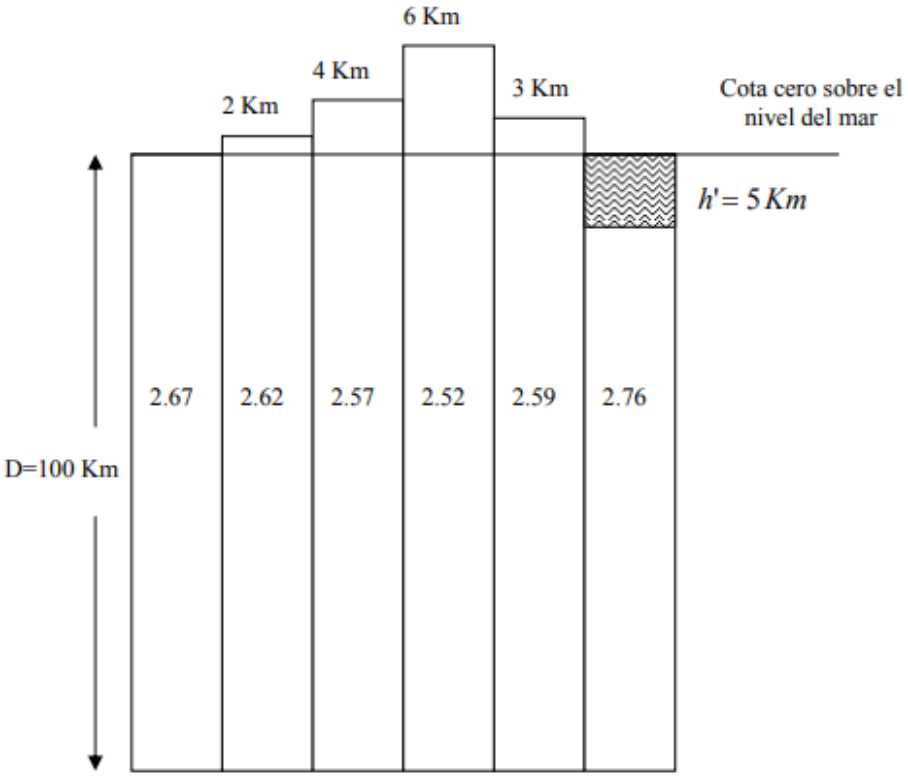


Figura 4.Nivel de compensación isostática de Pratt – Hayford. Tomado de http://www.upv.es/unigeo/index/docencia/etsigct/geodesia/teoria/TEMA4.pdf

Con esto podremos saber la diferencia de densidad entre cada columna y la teórica:

$$\Delta\rho = \rho_0 - \rho = \frac{h}{D+h}\rho_0 \qquad (21)$$

En los océanos la condición de igualdad de masas se expresa como:

$$(D - h')\rho + h'\rho_W = D\rho_0 \qquad (22)$$

Donde $\rho_W = 1{,}027\ {}^{g}/_{cm^3}$ es la densidad del océano y h'su profundidad. Por lo tanto hay un exceso en la densidad teórica de la columna oceánica dada por:

$$\rho' = \frac{\rho_0 D - \rho_0 h\prime}{D - h\prime} \qquad (23)$$

2.7. Método de interpolación (Mínima curvatura)

"La superficie interpolada generada por el método de curvatura mínima es análoga a una placa delgada y linealmente elástica que pasa a través de cada uno de los valores de los datos con una cantidad mínima de flexión. El algoritmo del método de curvatura mínima se basa en la solución numérica de la ecuación diferencial biarmónica modificada." (Dressler, 2009).

$$(1 - T)\nabla^4 f(x, y) - (T)\nabla^2 f(x, y) = 0 \qquad (24)$$

Se deben tener en cuenta tres condiciones:

1. $(1 - T)\,\partial^2 f/\partial n^2 + (T)\,\partial f/\partial n = 0$ (25)
2. $\partial(\nabla^2 f)/\partial n = 0$ en los bordes.
3. $\partial^2 f/\partial x \partial y = 0$ en las esquinas.

Donde:

T $\in <0, 1>$ es un parámetro de tensión,

∇^2 es el operador Laplaciano $\nabla^2 f = \partial^2 f/\partial x^2 + \partial^2 f/\partial y^2$

$\nabla^4 = (\nabla^2)^2$ Es el operador biarmónico y;

$\nabla^4 f = \partial^4 f/\partial x^4 + \partial^4 f/\partial y^4 + 2\,\partial^4 f/\partial x^2 \partial y^2$ (26) y n es el límite normal.

“Si T = 0, se resuelve la ecuación biarmónico diferencial; si T = 1, la ecuación diferencial de Laplace se resuelve; en este caso, la superficie resultante puede tener extremos locales solo en puntos XYZ.” (Dressler, 2009).

Ventajas del método:

“La velocidad de cálculo es alta y un número creciente de puntos XYZ tiene poca influencia en la disminución de la velocidad de cálculo.

Método adecuado para un gran número de puntos XYZ.” (Dressler, 2009).

Desventajas del método:

“Algoritmo complicado e implementación informática.

Si el parámetro T está cerca de cero, la superficie resultante puede tener extremos locales fuera de la ubicación de los puntos

Mala habilidad para conservar las tendencias de extrapolación.” (Dressler, 2009).

CAPITULO 3. ANÁLISIS GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN DEL PACIFICO COLOMBIANO Y MALPELO.

3.1. Marco geológico de la zona de estudio.

El lecho del océano pacífico, considerando la zona de estudio, reposa sobre tres diferentes placas tectónicas, las cuales permanecen en constante fricción lo que lleva a la acumulación de tensiones que generan actividad sísmica que está estrechamente ligada a los movimientos de las placas que se encuentran representados por sus velocidades y direcciones.

En esta zona las placas presentan hundimiento a gran velocidad, varios centímetros anuales. Las placas Nazca, Suramérica y Caribe generar fuerzas de fricción, cohesión y cortantes con la capacidad de generar deformaciones geomorfológicas considerables.

La tectónica se remonta al Paleozoico, en el que el proceso geológico de formación del Ordovícico genero el cinturón montañoso de la Cordillera central, el cual se evidencia gracias a las rocas que se encuentran en la zona como el complejo de Cajamarca. Estas son clasificadas como rocas volcánicas y metamórficas. Por otro lado, se encuentra la Cordillera occidental que se formó durante el mesozoico, conformada por rocas piroclásticas, volcánicas y sedimentarias.

El estudio del movimiento de la placa Nazca remite a que existe convergencia oblicua con la placa Suramericana, generando diferentes fenómenos en el continente como el cinturón de deformación del sur de Panamá o acortamiento cortical en sentido perpendicular a la margen andina, y el movimiento restante es transferido directamente a los sistemas de fallas de rumbo dextral, es decir hacia la derecha (p.ej. Algeciras, Garrapatas, Ibagué), esta se desplaza en dirección W-E con un movimiento relativo entre 50 mm/año y 78 mm/año (Pennington, 1981).

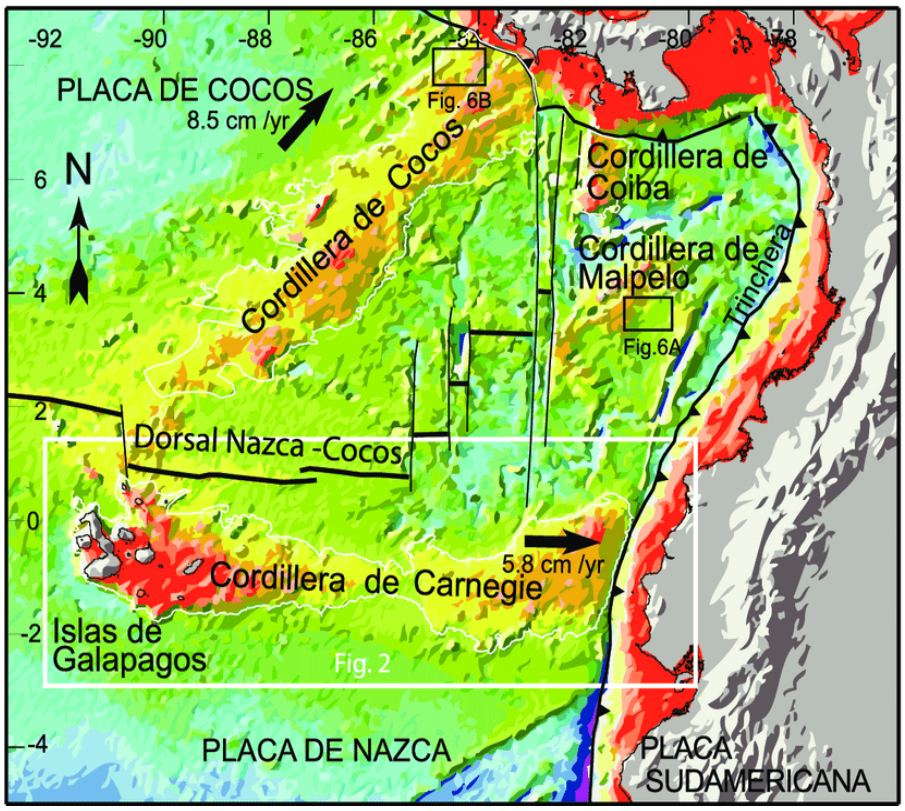


Figura 5. Marco geodinámica de la Cordillera de Carnegie, el cual indica la relación en cuanto a los movimientos de la placa nazca y cocos con respecto a la placa sudamericana considerando esta última como fija. Tomado de "El karst submarino de mega depresiones.

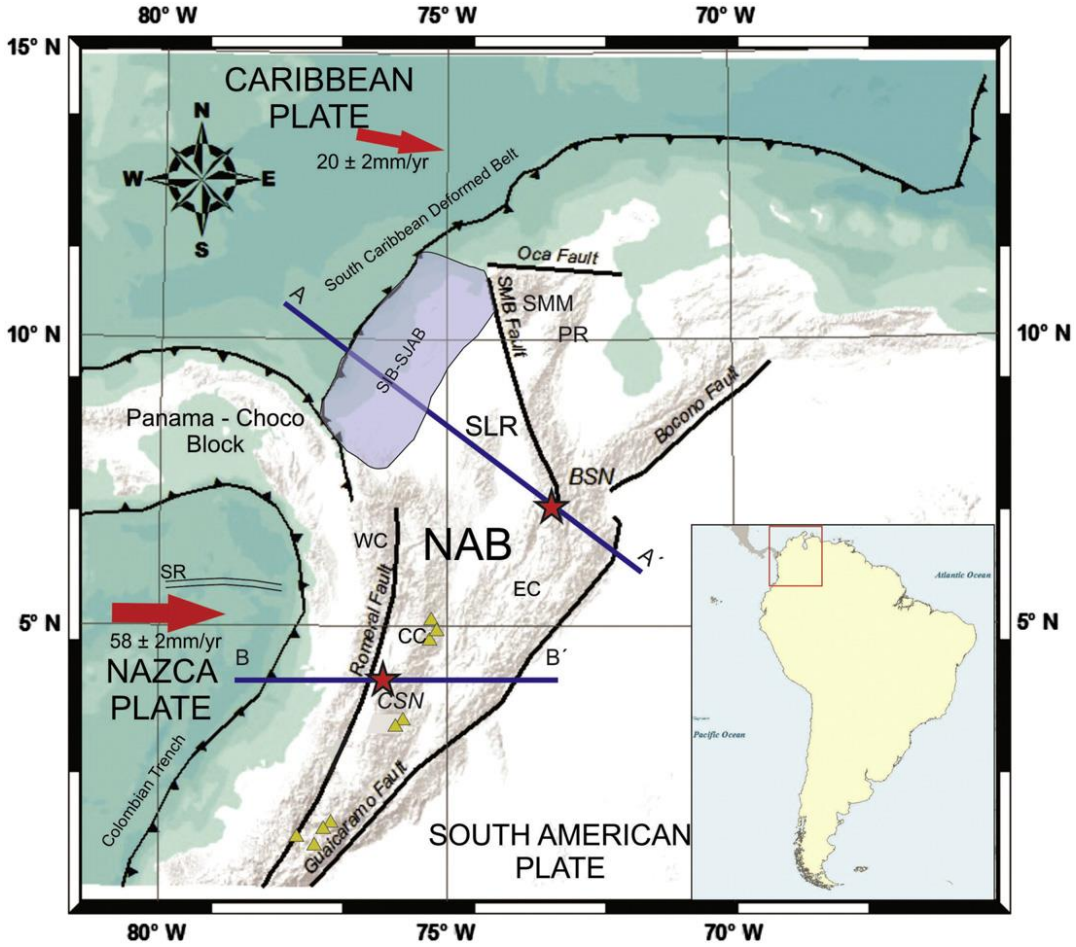


Figura 6.Mapa tectónico de Colombia con las principales fallas y ubicación de nidos sísmicos. Tomado de "Seismological observations in northwestern South America: Evidence for two subduction segments, contrasting crustal thicknesses and upper mantle flow"

Análisis geofísicos y geológicos han permitido postular tres zonas de comportamiento homogéneo en la zona de subducción al occidente de Colombia, "1. Subducción Norte, que representa la subducción del bloque Coiba bajo el extremo noroeste de Colombia; 2. Subducción Centro, frente a las costas del sur de Chocó y Valle del Cauca, orientada hacia los 4°, y que permite definir una zona de Benioff hasta 200 km de profundidad, y 3. Subducción Sur, frente a las costas de Cauca, Nariño y norte del Ecuador, en un tramo de fosa situado entre los 2° y 4°" (Arcila & Dimaté, 2005). Ver figuras 5 y 6.

Tomando en consideración los estudios de la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) podemos hablar que la zona de estudio se encuentra, en su parte continental, ligada a las cuencas San Juan y Atrato, la cual se caracteriza como un depósito en ambientes desde marinos a continentales sobre un complejo ígneo-sedimentario.

Cuenca Atrato: La secuencia sedimentaria se compone por seis diferentes unidades litoestratigráficas, que se extienden desde la época geológica nombrada como eoceno hasta el Plioceno. Sus límites fueron basados en el contenido de fauna dentro de las mismas, caracterizado por la presencia abundante de foraminíferos planctónicos y bentónicos. (Haffer, 1967)

La cuenca Atrato contiene secuencia sedimentaria espesa de hasta 10 km, sobre un basamento ígneo-sedimentario en ambientes marinas por predominancia pero con influencia de ambientes continentales durante el desarrollo geológico reciente, esto debido a su ubicación geográfica.

Debido al área que abarca la cuenca, esta se encuentra dividida en diferentes formaciones como Uva, Napipí, Sierra y Quibdó que se encuentran ubicadas en mayor porcentaje en la margen izquierda de la zona. Diferente de la formación Clavo que se encuentra en la margen derecha. Cada una de las unidades son caracterizadas de diferente manera en cuanto las litologías, pues el afloramiento varia al interior según las condiciones de los depósitos.

Gracias a las diferentes campañas exploratorias se ha podido determinar información acerca de las unidades, como la composición, continuidad y profundidad e incluso la variación en los espesores de cada una de ellas.

Cuenca San Juan: Una gran parte de los estudios estratigráficos realizados en la cuenca San Juan han sido de carácter local y concentrado en el denominado Alto Condoto, valle superior del río San Juan. (ANH, 2006)

La secuencia sedimentaria consta de cinco unidades litoestratigráficas y se extiende desde el Paleoceno hasta el Plioceno, según el contenido faunístico, gran aporte de la secuencia se depositó en ambientes marinos con fuerte influencia continental. La posible ausencia de rocas en el intervalo Paleoceno - Eoceno y de los periodos Oligoceno y Mioceno superior dan muestra de procesos de erosión intensa y de larga duración. (ANH, 2006)

Debido a que no se han realizado exploraciones de hidrocarburos en la zona, no ha sido posible definir específicamente que unidades conforman esta cuenca como se hizo en la cuenca Atrato, sin embargo existen algunos reportes bioestratigráficos que evidencian material estéril, es decir se trata de un resultado seco. (ANH, 2006)

Por otro lado, se encuentra la isla Malpelo que está localizada en la cuenca de Panamá, considerada una región tectónicamente compleja ya que allí convergen

las placas de Nazca y Cocos, es considerada como el pico más alto de la Dorsal Malpelo.

La isla da la apariencia de ser el resultado de diferentes “erupciones voluminosas de lava basáltica, que no permitieron la formación de lavas almohadilladas; en las rocas se observa una diferenciación vertical progresiva y cristalización fraccionada dentro de la cámara magmática” (INVEMAR - DIMAR - UAESPNN, 2002).

La zona ha sido objeto de diferentes estudios que tienen como fin generar nueva información acerca de su evolución y composición, en la zona centro oriental se evidencian depósitos de escombros de rocas que se desprenden de la parte superior de la isla y forman una matriz limo arcillosa. “Macroscópicamente en la isla se pueden diferenciar dos tipos de roca, con contacto erosional: conformando la estructura misma de la isla se presenta un Basalto toleítico caracterizado por su color oscuro, textura afanítica masiva, a veces con fenocristales de piroxenos y plagioclasa y pseudoestratificaciones de material volcánico amigdalar e hialoclástico. Presenta oxidación superficial y hasta una profundidad de 6 cm aproximadamente y alteración hidrotermal caracterizada por amígdalas con materiales como epidota, cuarzo y zeolitas. Son frecuentes los diques que atraviesan la roca basáltica; ellos son de composición más básica” (Caita y Guerrero 2000).

“El segundo tipo de roca es de composición intermedia (riodacita), procedente de lavas expulsadas por fracturas alrededor del cono volcánico y es posterior a la formación basáltica, ya que se presenta como rellenando la morfología preexistente. Se caracteriza por su color claro, textura vesicular y en ocasiones fragmentos de roca basáltica. Presenta alteración hidrotermal evidenciada por silicificación y epidotización de la matriz volcánica y de las amígdalas” (Sarmiento, 1953) adicional a eso se resalta que “se trata de una lava vesicular que ha sufrido una transformación debida a los agentes atmosféricos, que consiste en un proceso químico que ha llenado todos los intersticios y vacíos con materiales fecales provenientes de las aves que habitan en la isla” (Caita y Guerrero, 2000). Ver figura 7.

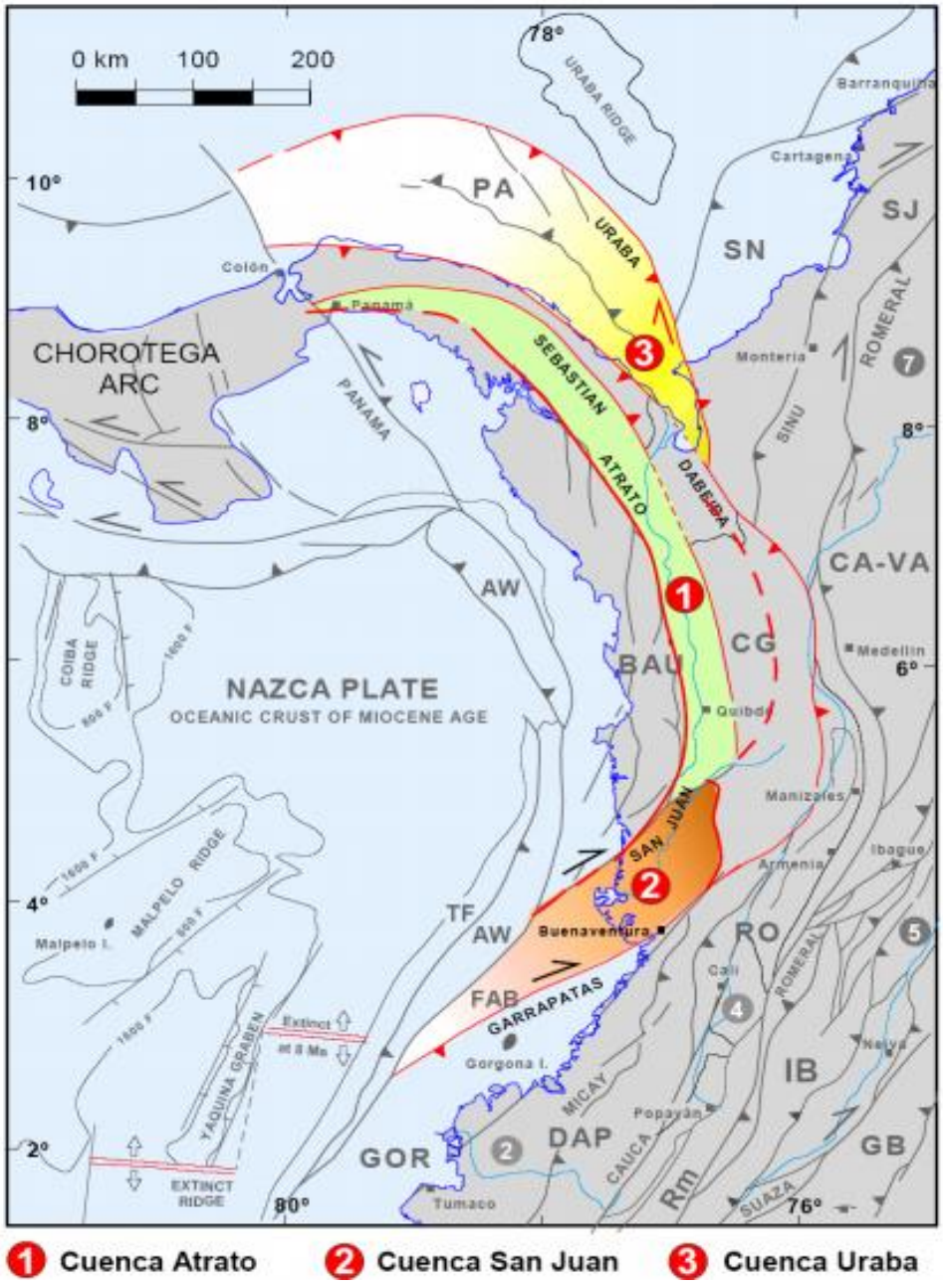


Figura 7.Ubicación geográfica de la cuenca Atrato, San juan y Urabá. Tomado de "Evaluación integral de la información geológica, geofísica y geoquímica de la cuenca Atrato y San Juan"

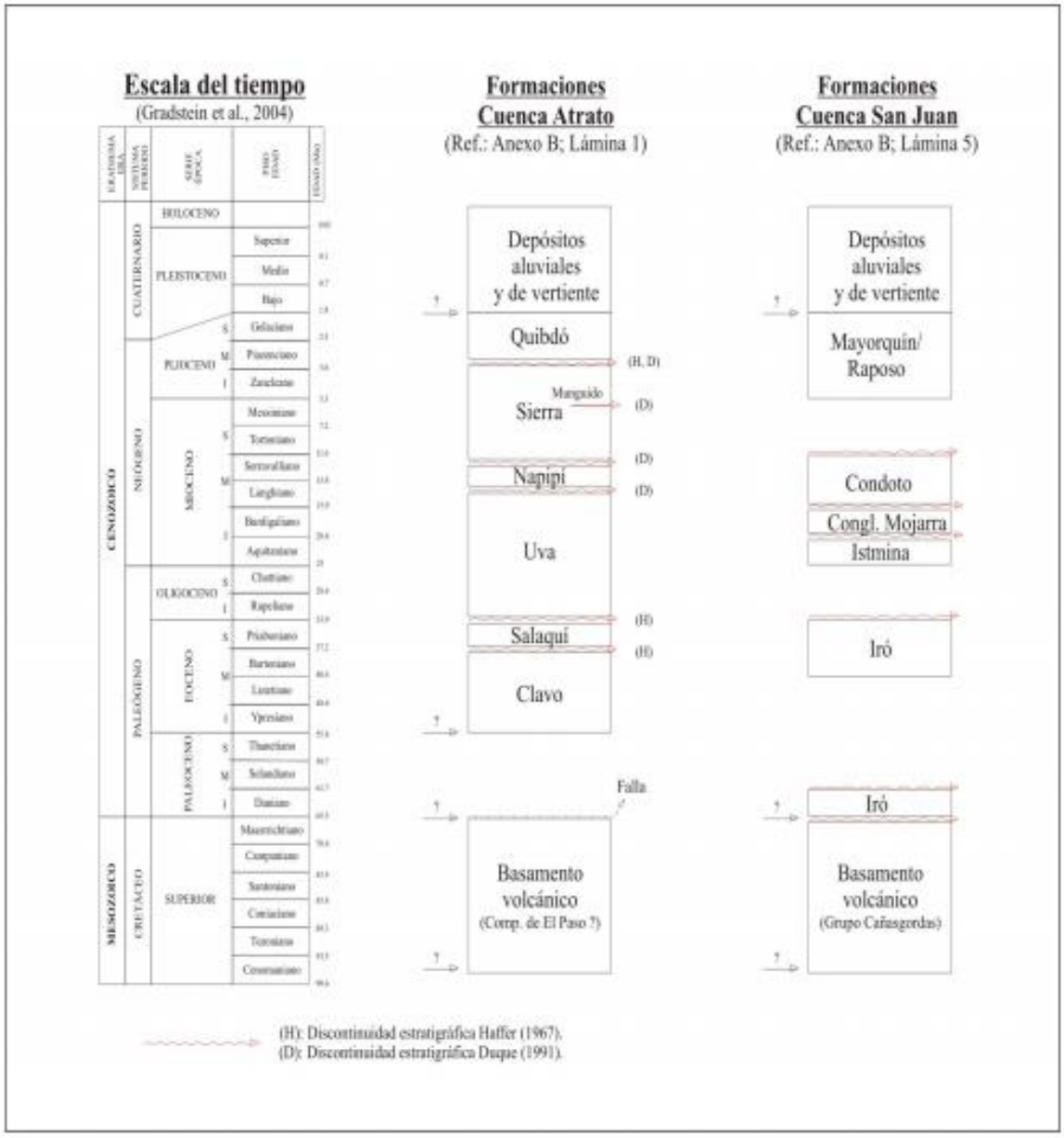


Figura 8. Unidades litoestratigráficas pertenecientes a la Cuenca Atrato y Cuenca San Juan. Tomado de " Evaluación integral de la información geológica, geofísica y geoquímica de la cuenca Atrato y San Juan"

3.2. Geodinámica de la zona de estudio.

La sismicidad en el área ha sido caracterizada por grandes procesos de subducción, la placa tectónica sudamericana abarca millones de kilómetros ya que América del sur y parte del océano Atlántico se encuentran ubicados sobre esta, limita específicamente al oeste con la placa Nazca, provocando con el paso del tiempo la formación de la cordillera de los Andes donde existe gran actividad sísmica y volcánica, siendo parte del famoso “Cinturón de Fuego del Pacifico”. Debido al contacto de estas placas y el proceso de subducción, los Andes se caracteriza por tener un sistema montañoso de aproximadamente 8.000 km y elevaciones de hasta 7.000 msnm (Ramos, 1999).

En Sudamérica la actividad sísmica es generada por la falla circunpacífica, pues según el mapa propuesto por (Barbat, 1982), “se generaron epicentros con sismos de magnitudes mayores a 8.0 ubicados en la costa, en el mar o bajo la cordillera de la costa, en la zona de subducción donde los focos o hipocentros de los sismos presentan menor profundidad, cuanto más al este de la costa se encuentren los epicentros, la profundidad de los focos correspondientes es mayor, dado que en el proceso de hundimiento la placa Nazca bajo la placa Sudamericana mientras más se adentre la placa primera bajo la segunda la fricción y por lo tanto la acumulación de tensión se dará a mayor profundidad” (Mora, 2017).

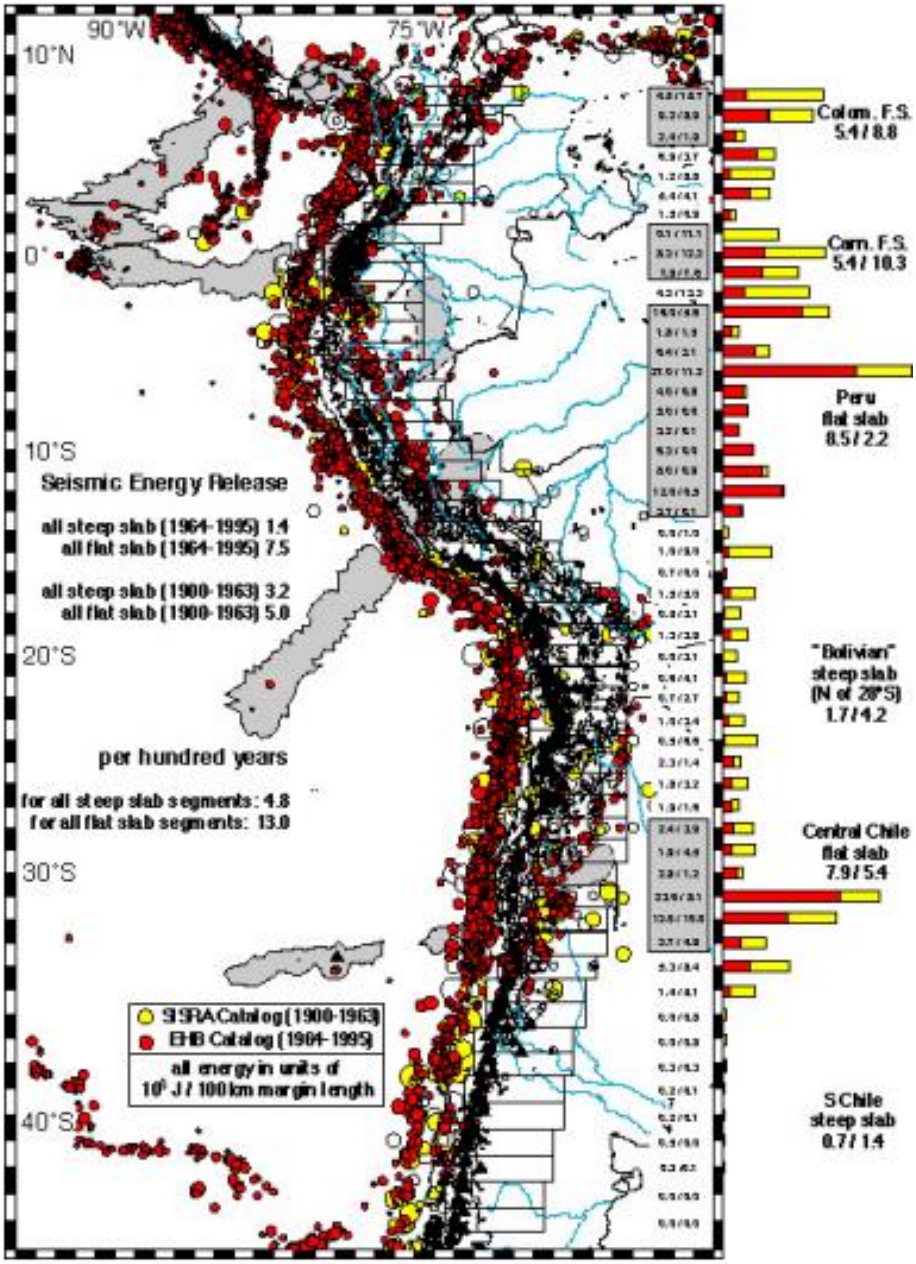


Figura 9. Greater release of seismic energy associated with flat slab vs steep slab segments (Gutscher et al., 2000)

La zona seleccionada sufre gran deformación por consecuencia de la interacción de la placa Nazca, Suramericana y el Boque de Panamá. El área donde existe la relación entre dichas placas, es la zona de deformación de los Andes de Colombia, se ha definido como el Bloque de los Andes del Norte (Trenkamp, 2002). Gracias a los estudios y tomografías sísmicas realizadas se estima que la placa Nazca posee un ángulo de subducción de 50° y una profundidad de 500 km.

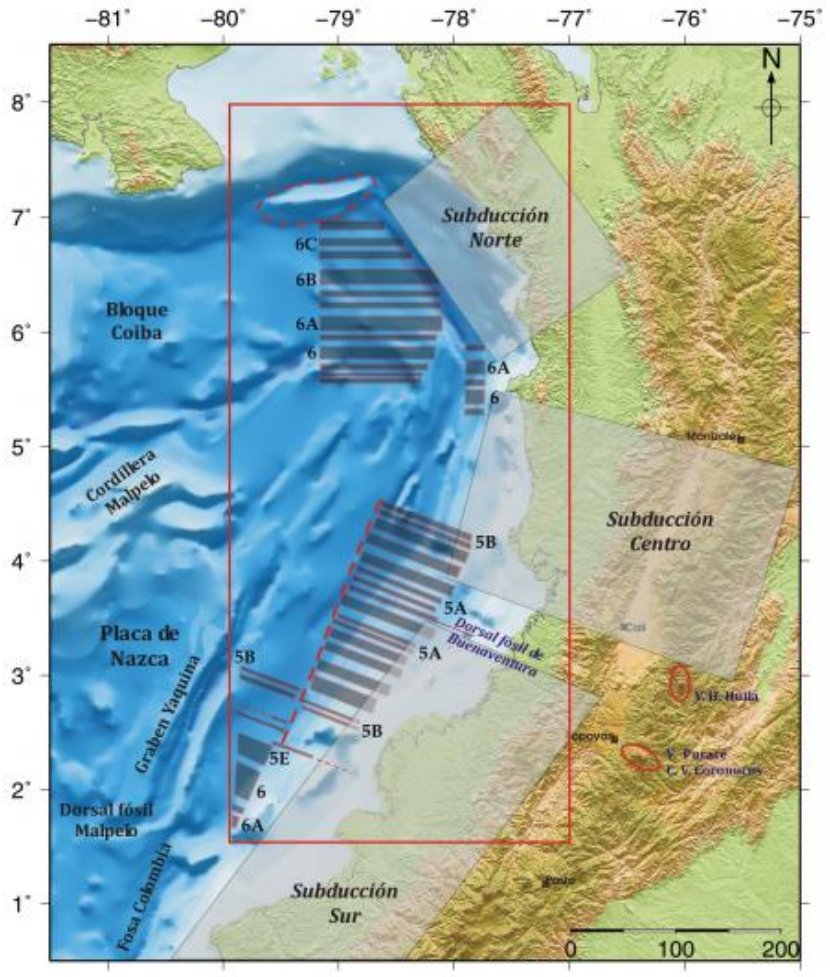


Figura 10. Mapa tectónico de la zona occidental de Colombia, donde se identifican las principales zonas de subducción y el volcanismo que se genera en la parte continental. Tomado de " Boletín Geológico 43" del Servicio Geológico Colombiano.

En los bordes de las placas se presenta bastante sismicidad a causa de la subducción, la placa Nazca que es la causante de sismos con magnitudes iguales o superiores a cinco que ocurren con alguna frecuencia en el segmento occidental oceánico; en el segmento norte de la zona de estudio está dominado por una falla denominada "Murindó-Atrato" la cual se presenta por la colisión entre la placa Caribe y la suramericana. Relaciones topográficas indican la presencia de una fosa tectónica de 20 km de ancho entre las fallas de Murri y Murindó (Montes y Sandoval, 2001). La gran cantidad de fallas que existen en todo el país como: el romeral, Murindó, Atrato, entre otras, son la respuesta a la actividad sísmica que se presenta, es decir que estas son fuentes de tensión donde históricamente se producen los sismos más fuertes.

De otra parte, se encuentra la estructura de la dorsal Malpelo que muestra una gruesa raíz cortical asimétrica de14 kilómetros con una transición suave a la cuenca oceánica sudeste, mientras que la transición es abrupta debajo de su flanco noroeste. El engrosamiento de la corteza está relacionada principalmente con el engrosamiento de la corteza inferior, que exhibe velocidades de 6,5 km/s y 7,4 km / s (Marcaillou, Charvis, & Collot, 2006)

Diferentes proyectos han favorecido la hipótesis de que Malpelo fue antiguamente una continuación de la dorsal de Cocos con un desplazamiento similar pero que luego de su separación se desvió hacia el sur con relación a Cocos. El vulcanismo también se encuentra relacionado con esta dorsal pues hace parte del arco volcánico generado por Cocos y Nazca, pues debido a estudios batimétricos se ha determinado que la parte superior de la cresta Malpelo está a una profundidad de 1 a 2 km y cuenta con altos subcirculares interpretados como edificios volcánicos siendo el más grande representado por la isla de Malpelo (Marcaillou, Charvis, & Collot, 2006)

3.3. Sísmica

Debido a la ubicación geotectónica en la cuenca del Pacífico Oriental, Colombia se encuentra inmersa en una zona de impacto directo de tsunamis que pueden ser cercanos o lejanos, estos movimientos pueden ser generados por la zona de subducción que se está estudiando en el presente proyecto, es por esto que se hace necesario realizar la evaluación de su amenaza sísmica.

Según lo los registros, son dos los sismos que han afectado de gran manera el sur del territorio colombiano, en su mayoría los departamentos de Nariño y Cauca.

“El sismo de 1906, con magnitud MW 8,8 y considerado como uno de los más grandes registrados en la historia sísmica del mundo, se localizó en el océano Pacífico frente a la costa norte ecuatoriana, en 1.0º N y 80.0ºW, profundidad superficial. Según observaciones de testigos, produjo varias olas con alturas entre 2 y 5 m y afectó toda la costa comprendida entre los municipios del Bajo Baudó (Pizarro) al norte y Esmeraldas al sur.” (Arcila Rivera, 2010).

“El sismo de 1979, con una magnitud MW 8,1, se localizó en el Océano Pacífico, a 75 km de la costa de Tumaco, en 1.602ºN y 79.363º W, profundidad superficial. Este sismo originó un tsunami que afectó las costas de los departamentos de Nariño y Cauca, especialmente la zona comprendida entre Guapi y San Juan de la Costa. Según observaciones de testigos, fueron entre 2 y 3 violentas olas con una altura mayor a 5 m.” (Arcila Rivera, 2010).

Con los sucesos anteriores se da evidencia de la fuerte actividad sísmica que se puede presentar en la zona, estos antecedentes indican la importancia de mencionar que la zona de subducción entre las placas Nazca y Suramérica es la responsable de que se produzcan movimientos sísmicos tan fuertes en el Pacífico colombiano aunque no sea tan frecuentes presentan gran actividad.

En el sitio en donde se encuentra la subducción y el cual es área importante de la zona de estudio apreciamos que “el segmento sur, frente a las costas de Valle, Cauca, Nariño y norte del Ecuador, en un tramo de fosa orientado a 40° de azimut y con 500 km de longitud, buzando 30° hacia los 130°. Este segmento es el que ha generado los dos mayores sismos de la historia de Colombia.” (Arcila Rivera, 2010).

Con el fin de explorar un poco más la información existente, para este proyecto se decidió hacer la descarga de algunos sismos en un periodo de tiempo desde 1970 hasta 2019 los cuales involucran magnitud y profundidad en la zona de estudio, se realizaron las respectivas representaciones que son analizadas en el ítem 5.11, a continuación se describen algunos de los sismos más importantes en este intervalo de tiempo:

3.3.1. Sismo de 1970

Fue un evento tectónico denominado “Terremoto de Bahía Solano” que se produjo el 26 de septiembre de 1970, su foco se encontró a 8 km de profundidad y tuvo una magnitud de 6.5 Mw cerca de la ciudad de Bahía Solano, basados en estudios de alturas posteriores al sismo se “deduce que este terremoto generó entre 20 y 30 cm de subsidencia en la ciudad.” (Arcila Rivera, 2010).

3.3.2. Sismo de 1979

El 12 de diciembre de 1979 se produce un sismo en el litoral pacífico que alcanza una magnitud de 8.1 Mw, fue conocido como "fue conocido como “terremoto de Tumaco” se situó a una profundidad de 23.7 km, el epicentro de este sismo se encontró situado en las coordenadas 1° 36' 10.8" N y 79° 21' 50.4" W, este sismo “Produjo aproximadamente 500 víctimas entre muertos y desaparecidos. Gran tsunami y destrozos enormes en Tumaco y poblaciones menores de la costa del Pacífico, en los departamentos de Nariño y Cauca. Intensidad IX MM en la costa Pacífica Nariñense.” (Arcila Rivera, 2010).

3.3.3. Sismo de 1991

Sismo que fue detectado el 19 de noviembre de 1991 se generó en el litoral pacífico, más exactamente en las coordenadas 4° 32' 56.4" N y 77° 21' 39.6" W, a una profundidad de 21 km de la superficie, la magnitud del sismo fue de 7.2 Mw, el sismo se caracterizó por haber sido un “fuerte y prolongado temblor que causó alarma y algunas escenas de pánico en el país. Epicentro en los límites del Valle y Chocó, en una zona despoblada en la desembocadura del río San Juan.” (Arcila Rivera, 2010).

3.3.4. Sismo de 2005

El 15 de noviembre de 2005 se produce un sismo de magnitud 7.2 Mw, a escasos 12.6 km de profundidad, este fue localizado en las coordenadas 4° 41' 27.6" N y 77° 30' 21.6" W, el sismo fue “sentido en todo el Occidente colombiano, con efectos importantes en la zona epicentral asociados básicamente a efectos inducidos por el sismo, y daños importantes en la ciudad de Cali, por efectos locales.” (Arcila Rivera, 2010). Ver figura 11.

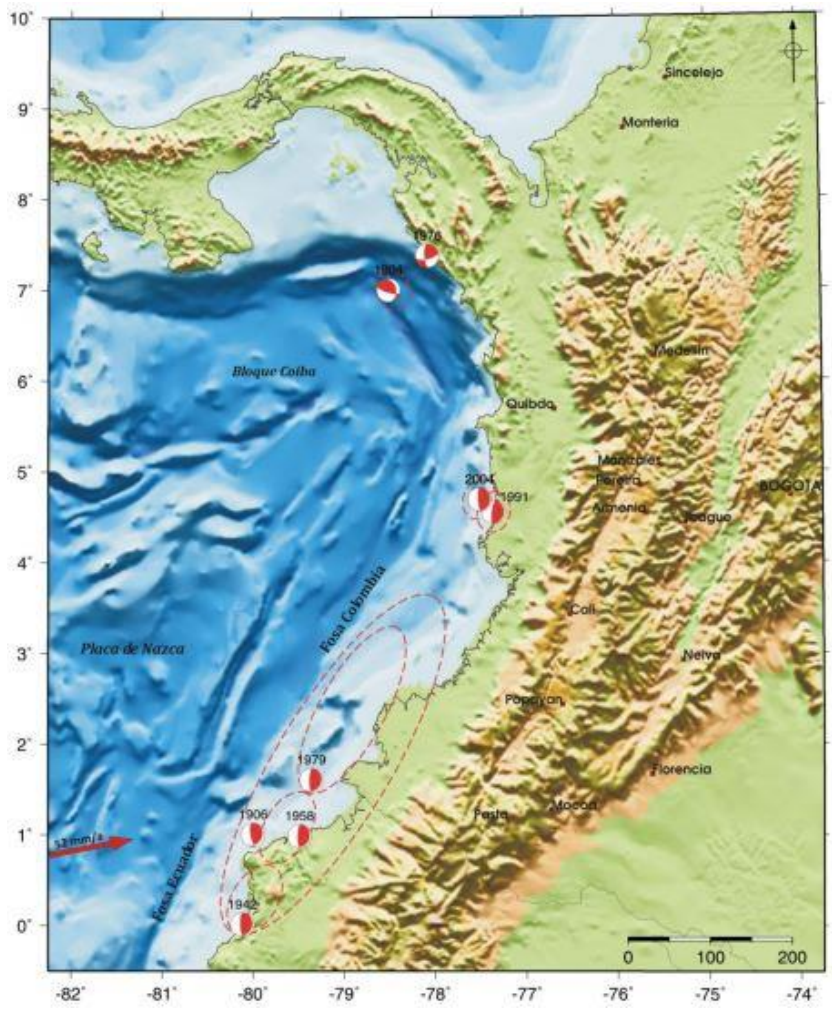


Figura 11. Mapa de ubicación de sismos más importantes.
Tomado de: (Arcila Rivera, 2010)

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Procesamiento de datos

Se desarrolló un proyecto en el cual se aplicó gravimetría satelital, los datos topográficos y gravimétricos descargados se editaron y se comenzó con el proceso de interpretación y modelamiento gravimétrico, también se usó como herramienta datos sísmicos para apoyar los resultados obtenidos.

4.1.1. Información topográfica y gravimétrica satelital

Para nuestro estudio utilizamos los datos adquiridos por el satélite Topex – Poseidon, el cual fue una misión conjunta entre la NASA y CNES (Agencia Nacional Francesa) puesta en marcha el 10 de agosto de 1992 y recolecto 481 ciclos de datos.

Esta misión logró medir alturas significativas especialmente en la parte oceánica de la tierra, en el caso de este proyecto tomamos los datos de la zona: Norte 9.3° Sur 1.6° Oeste -82 Este -74. La información que permite descargar de manera libre en la página (EXTRACT XYZ GRID – TOPOGRAPHY OR GRAVITY) fue: Latitud, Longitud, Altura y un dato de gravedad el cual corresponde a la anomalía Aire Libre para posteriormente realizar su análisis y procesamiento respectivo con el fin de hallar la anomalía Bouguer y anomalía Isostática.

.

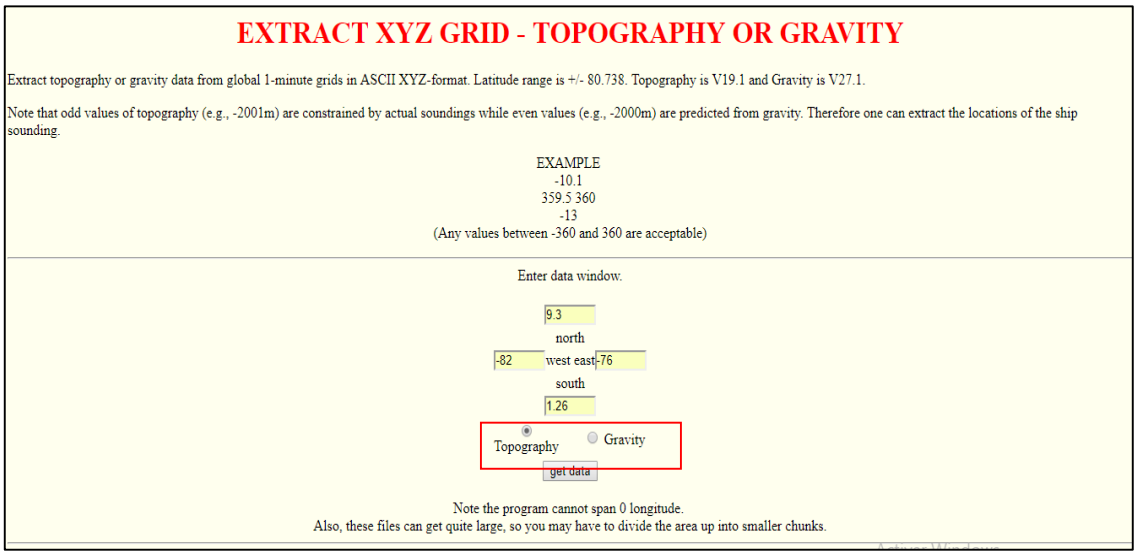


Figura 12.Fuente de descarga de datos. Tomado de https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cg

278.0083	9.3006	-43.00
278.0250	9.3006	-63.00
278.0417	9.3006	-103.00
278.0583	9.3006	-250.00
278.0750	9.3006	-533.00
278.0916	9.3006	-691.00
278.1083	9.3006	-449.00
278.1250	9.3006	-292.00
278.1417	9.3006	-237.00
278.1583	9.3006	-498.00
278.1750	9.3006	-869.00
278.1917	9.3006	-901.00
278.2083	9.3006	-958.00
278.2250	9.3006	-861.00
278.2416	9.3006	-712.00
278.2583	9.3006	-564.00
278.2750	9.3006	-437.00
278.2917	9.3006	-429.00

278.0083	9.3006	16.30
278.0250	9.3006	16.50
278.0417	9.3006	14.90
278.0583	9.3006	10.50
278.0750	9.3006	5.20
278.0916	9.3006	2.50
278.1083	9.3006	4.40
278.1250	9.3006	9.40
278.1417	9.3006	10.90
278.1583	9.3006	5.20
278.1750	9.3006	-1.80
278.1917	9.3006	-4.20
278.2083	9.3006	-3.40
278.2250	9.3006	-2.40
278.2416	9.3006	-1.30
278.2583	9.3006	1.00
278.2750	9.3006	3.10
278.2917	9.3006	2.80

Figura 13. Ejemplo de la información descargada, en imagen izquierda se encuentran los datos de latitud, longitud y altura topográfica; en la imagen derecha se encuentra los datos de latitud, longitud y anomalía aire libre.

A partir de la descarga de datos se hizo el análisis e interpretación de la zona de estudio. Inicialmente se realizó el cálculo de valores específicos de gravedad teórica, observada, corrección aire libre y corrección Bouguer con el fin de generar los mapas de la topografía, anomalía Aire Libre, anomalía Bouguer simple, anomalía regional y residual. Se obtienen las derivadas verticales y horizontales de primer grado, que permite definir fuentes geológicas superficiales y bordes anómalos.

Los datos fueron obtenidos en coordenadas geográficas Datum WGS84, fueron transformados a coordenadas planas Gauss Kruguer origen Oeste Datum WGS84. Para el desarrollo del procesamiento se hizo uso del software Excel y Oasis Montaj 6.4.2. La grilla utilizada para el proyecto fue N 9.3° S 1.26° W -82 y E -76, además como se mencionó en el segundo capítulo el interpolador utilizado fue el de mínima curvatura pues la velocidad de calcula es mucho mayor al interpolador Kriging.

4.1.2. Información sísmica

La información sísmica fue uno de los insumos utilizados, estos fueron tomados del catálogo de terremotos del Servicio Geológico Norteamericano (USGS). Se tuvo en cuenta un periodo de tiempo entre 1970 y 2019, específicamente se consideró importante la ubicación, la magnitud y la profundidad de los sismos para realizar los mapas correspondientes que fueron analizados en el quinto capítulo según los rasgos generales del contexto geodinámica y gravimétrico.

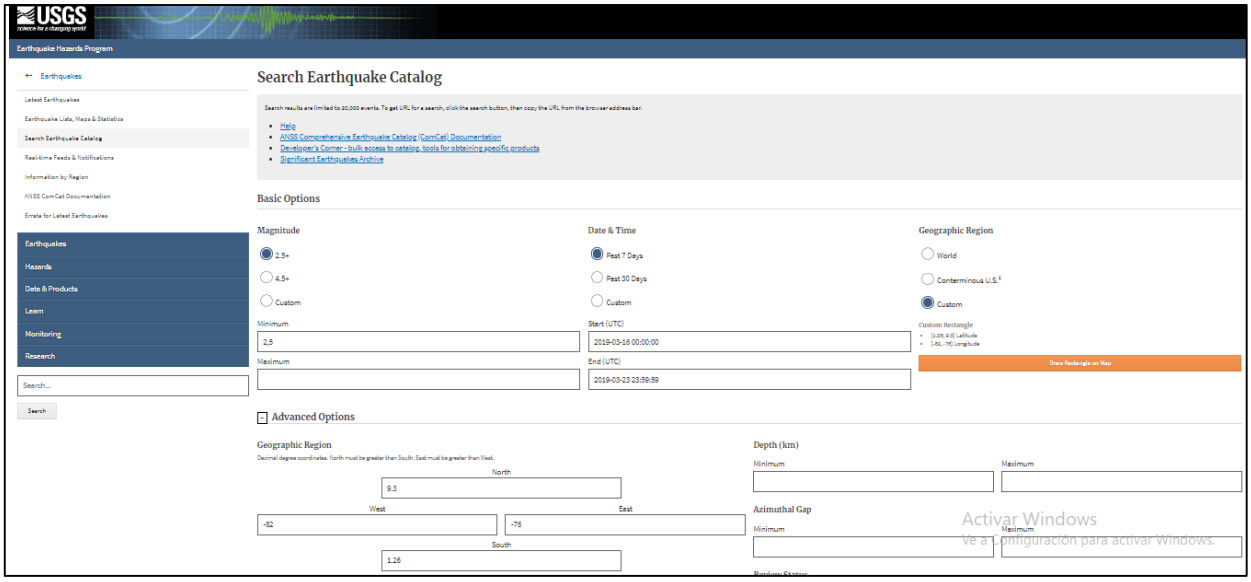


Figura 14. Fuente descarga de datos. Tomado de: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

4.2. Mapa metodológico

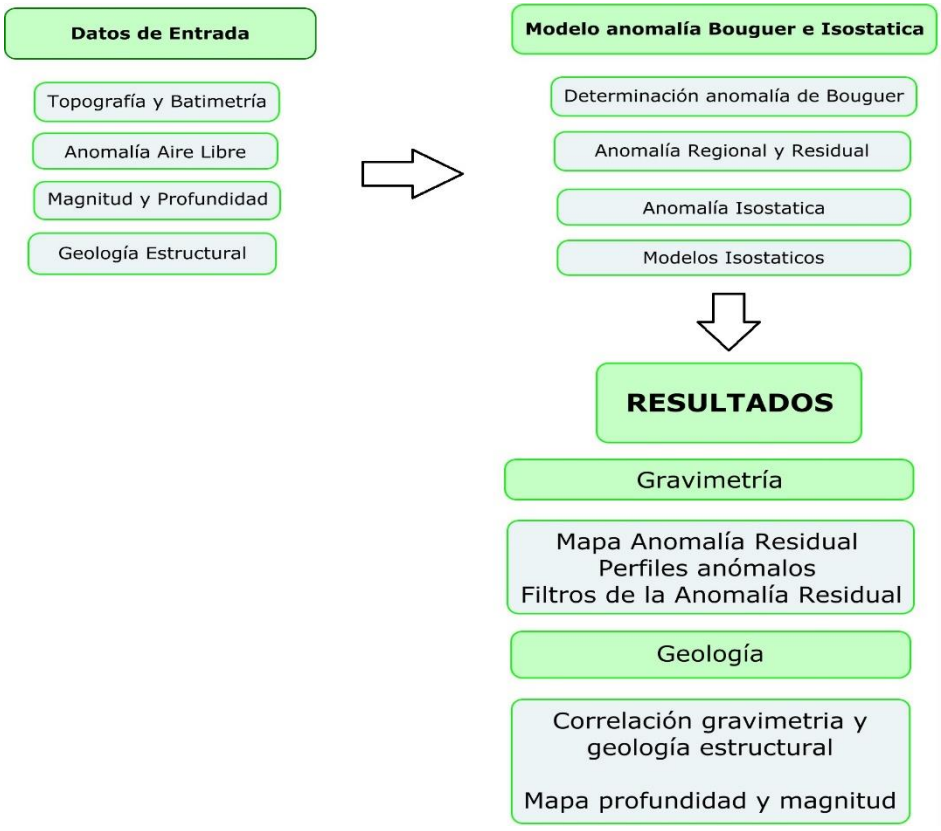
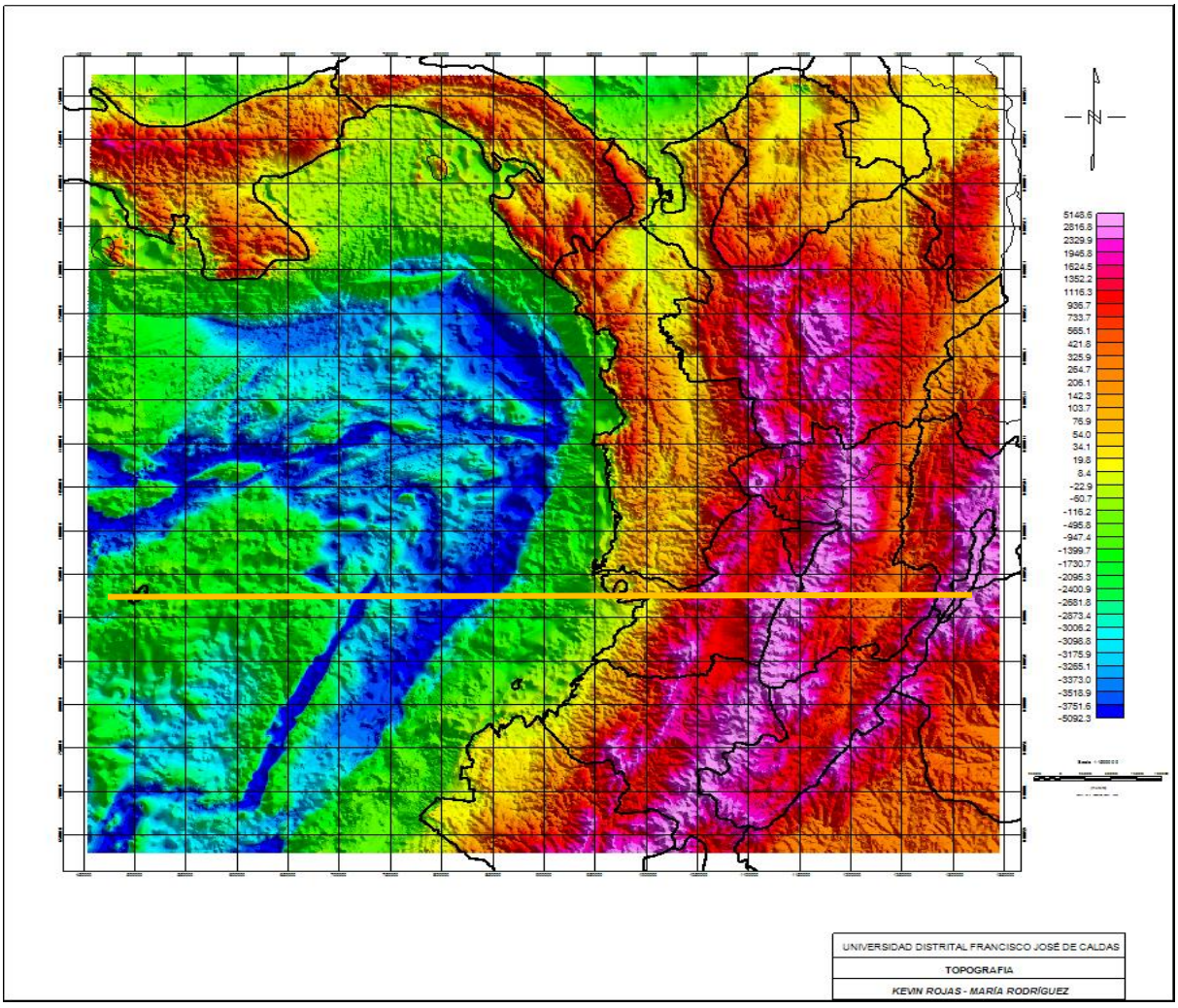


Figura 15. Mapa metodológico acerca del procesamiento de datos y los resultados obtenidos.

CAPITULO 5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

5.1. Mapa Topográfico

La información satelital correspondiente a la altimetría y batimetría, fue la base para el desarrollo del proyecto ya que permitió diseñar el mapa topográfico de la zona de estudio, los datos fueron obtenidos como se especificó en el capítulo 4 de Topex/Poseidon y gracias a la alta resolución espacial de 1 minuto de arco, nos permitió tener más detalle en la información como se observa en el mapa 3.



Mapa 3. Representación topográfica de la zona de estudio con trazo para perfil.

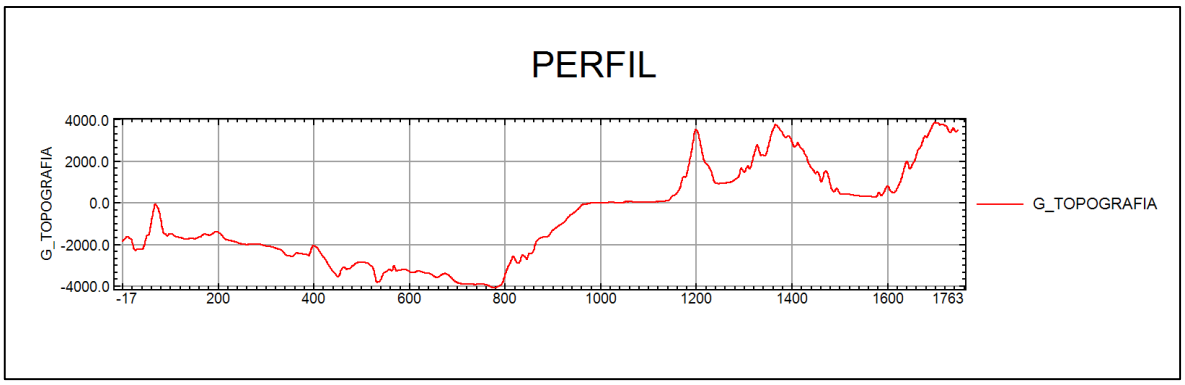


Figura 16. Perfil del trazo correspondiente al mapa topográfico del ítem 5.1.

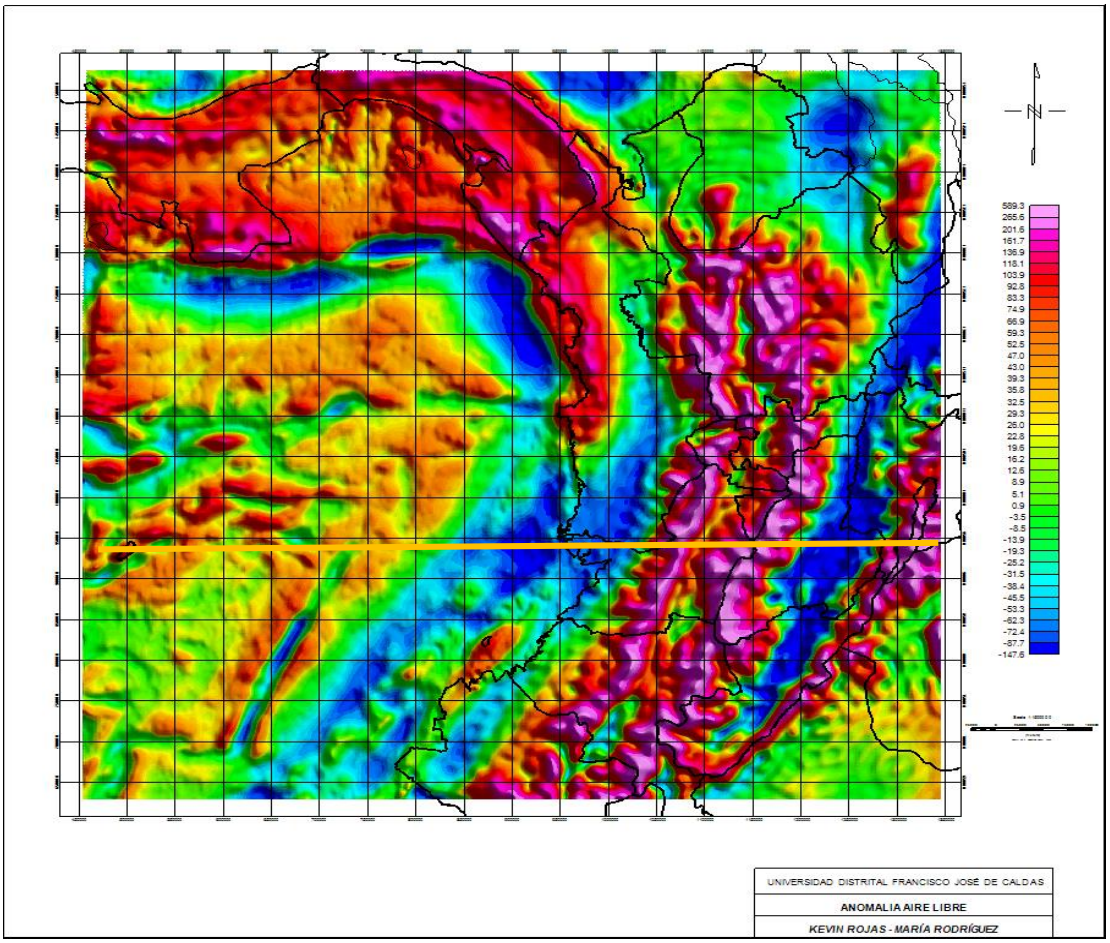
En la zona de estudio se obtuvieron datos entre -5093 msnm y 5148 msnm, los valores más altos están representados con colores rojizos y rosa, los cuales muestran las zonas montañosas correspondientes a la cordillera occidental, central y una parte de la cordillera oriental, por otro lado los valores negativos están representados en la zona oceánica la cual muestra gran hundimiento en el centro correspondiente al macizo Colombiano.

La geodinámica sobre la cual se encuentra el territorio básicamente es la causante de la respuesta que se genera en los modelos topográficos y batimétricos ya que la interacción de las placas y sus movimientos desatan gran actividad en cuanto al relieve. De acuerdo con la figura 15 se puede concluir que la topografía concuerda con las diferentes características tectónicas, es decir que es consistente con el sistema de fallas que se encuentran en la zona de estudio, por ejemplo: los tonos rojizos que se ajustan a valores entre 936.7 msnm y 1116.3 msnm en sentido oeste en el flanco de la cordillera central ratifican la existencia de la falla romeral y los tonos verdes con valores entre -1730.7 msnm y -947.4 msnm concuerdan con la línea de costa donde según el artículo "*Seismological observations in northwestern South America: Evidence for two subduction segments, contrasting crustal thicknesses and upper mantle flow"* es la zona de contacto entre la placa Nazca y la placa Sudamericana. Ver figura 16.

5.2. Mapa Anomalía Aire Libre

La anomalía Aire libre, tiene como propósito mostrar variaciones de densidad con respecto a la altura. Para la zona de interés se obtuvieron valores entre 589.3 miligales y -147.6 miligales, indicando que existe gran variación de densidades puesto que se está tomando parte continental y parte oceánica.

En este modelo podemos ver que en la parte oceánica donde se observan valores muy bajos entre -72.4 miligales y -147.6 miligales son perfectamente coincidentes con la geología estructural descrita en el capítulo 3, donde se menciona la zona de subducción del pacifico al borde de la zona costera del país; por otro lado también vemos que al sur del istmo de panamá se encuentran estos tonos que resaltan la presencia de la presión que generan los bordes de las placas cocos que tiene movimiento WE, la placa del caribe con movimiento SW y la placa Nazca con moviendo WE como se describe en el documento *The solid eath-an introduction to global geophisycs* en la P.8.



Mapa 4.Representación de la Anomalía Aire Libre de la zona de estudio con trazo para perfil.

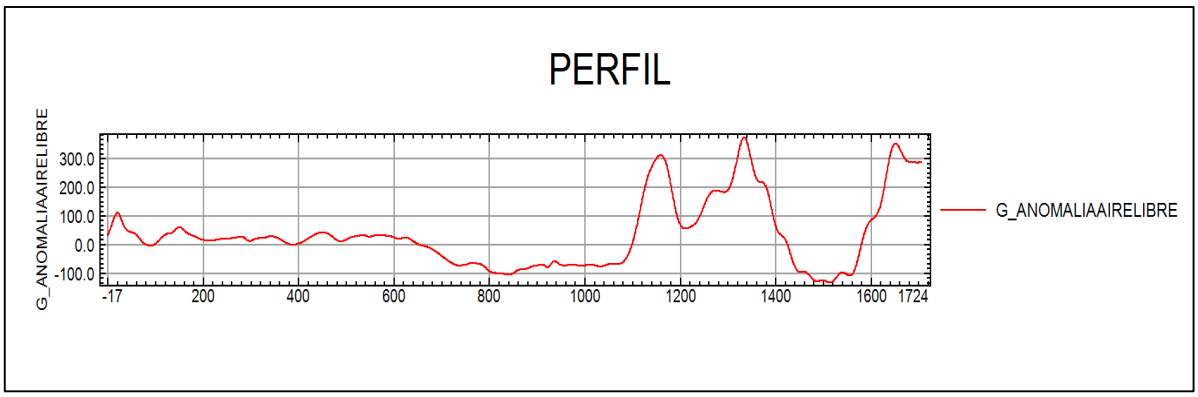


Figura 17.Perfil del trazo correspondiente al mapa anomalía Aire Libre del ítem 5.2.

Esta anomalía tiene una relación directamente proporcional con la topografía del área de investigación; tal como se ve en el mapa 4 se comportan de manera similar. Los valores más altos 161.7 miligales y 589.3 miligales están ubicados en una tendencia de SE-NW, que concuerdan con la zona montañosa tanto de las cordilleras colombianas como del istmo de Panamá que en topografía tienen valores entre 1949.8 msnm y 5148.6 msnm; mientras que los calores bajos -147.6 miligales y -87.7 miligales tiene tendencia especialmente en la zona costera, esto puede darse debido al choque y al proceso de subducción que se da entre las placas Nazca y Sudamericana que forma parte del cinturón de fuego del pacifico.

5.3. Mapa anomalía de Bouguer Simple

Para la definición la anomalía de Bouguer simple se tuvo en cuenta diferentes parámetros que fueron calculados previamente, inicialmente se contó con los datos de coordenadas (Latitud – Longitud), altura y anomalía aire libre como se muestra en la figura 11, se obtuvo la gravedad teórica con la siguiente ecuación:

$$g_t = 978031.8\ (1 + 0.005278895\ \sin^2(\phi) - 0.000023462 \sin^4(\phi))\ mGal \qquad (27)$$

La corrección aire libre que tiene como objetivo mostrar las variaciones de densidad llevadas a un nivel de referencia que en este caso es el nivel medio del mar, la ecuación utilizada fue:

$$C_{AL} = -0.0386 * h \qquad (28)$$

Donde h corresponde al dato de altura descargado en el proceso inicial.

La celda de corrección de Bouguer está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta g_B = 2\pi G \rho h \qquad (29)$$

Donde:

Δg_B = Correción por Bouguer

π= Constante pi

G= Constante gravitacional

ρ= Densidad media

h =Elevacion del punto

Reemplazando las constantes de la formula anterior, la corrección de Bouguer aplicada en los datos fue la siguiente:

$$\Delta g_B = 0.0412 * \rho * h \qquad (30)$$

Teniendo en cuenta que la densidad usada en la plataforma oceánica fue de 2.9 g/cm^3 y en la plataforma continental fue de 2.67 g/cm^3.

Posteriormente, calculamos la gravedad observada por medio del despeje de la formula por la cual se obtiene la Anomalía Aire Libre que en nuestro caso fue el dato descargado y obtenido por el satélite.

$$A_{AL} = g_{obs} - g_t + C_{AL} \quad (31)$$

$$g_{obs} = A_{AL} + g_t - C_{AL} \quad (32)$$

Donde:

A_{AL} = Anomalía aire libre

g_{obs}= Gravedad observada

g_t = Gravedad teórica

C_{AL}= Corrección aire libre

Por último se halló la celda anomalía Bouguer Simple, haciendo uso de todas las expresiones descritas, de la siguiente manera:

$$A_{BS} = g_o - g_t + C_{AL} - C_B \quad (33)$$

Donde:

A_{BS} = Anomalía de Bouguer simple

g_o= Gravedad Observada

g_t= Gravedad Teórica

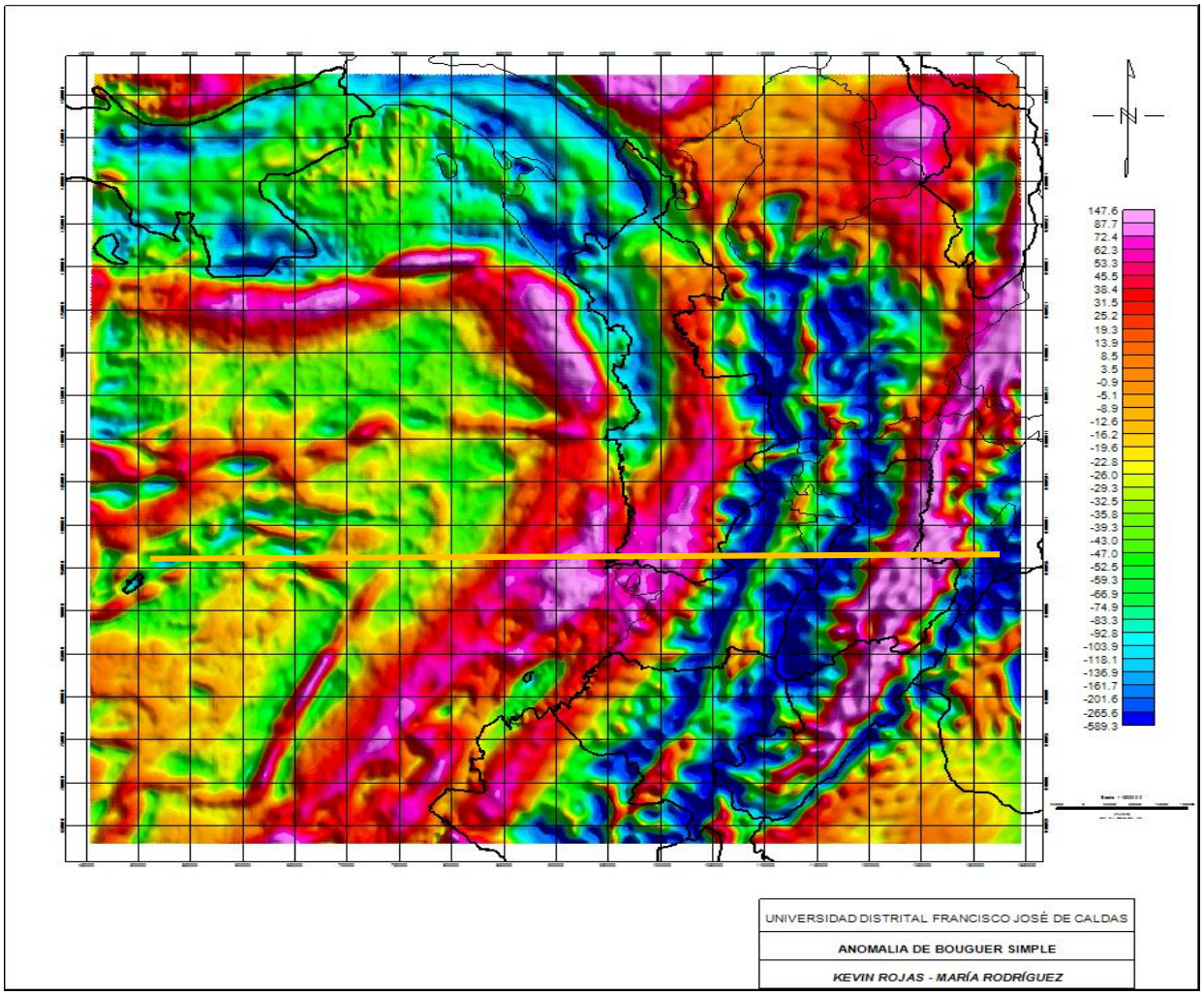
C_{AL}= Corrección Aire Libre

C_B= Corrección de Bouguer

ID	LONGITUD	LATITUD	h	ANOMALIA AIRE LIBRE	GRAVEDAD TEORICA	GRAVEDAD OBSERVADA	CORRECCION AIRE LIBRE	CORRECCION BOUGUER	ANOMALIA BOUGUER SIMPLE
1	-75,325	4,8858	5155	515,3	978069,3216	976539,8939	1590,833	576,705315	-515,3
2	-75,3083	4,8858	5057	496,6	978069,3216	976577,8732	1560,5902	565,741761	-496,6
3	-75,325	4,9024	5053	497,7	978069,5764	976577,8149	1559,3558	565,294269	-497,7
4	-76,025	2,9238	4999	276,9	978045,2583	976784,92	1542,6914	559,253127	-276,9
5	-76,025	2,9405	4915	330,1	978045,4124	976748,3991	1516,769	549,855795	-330,1
6	-75,325	4,8692	4883	512,5	978069,0677	976595,9498	1506,8938	546,275859	-512,5
7	-75,3417	4,8858	4787	513,6	978069,3216	976613,9895	1477,2682	535,536051	-513,6
8	-75,3083	4,8692	4753	489,9	978069,0677	976644,1243	1466,7758	531,732369	-489,9
9	-75,375	4,8028	4747	453,8	978068,0606	976680,3976	1464,9242	531,061131	-453,8
10	-75,3417	4,9024	4741	492,2	978069,5764	976644,6937	1463,0726	530,389893	-492,2
11	-76,025	2,9072	4729	227,3	978045,1061	976887,4841	1459,3694	529,047417	-227,3
12	-75,3083	4,9024	4725	481,8	978069,5764	976658,2413	1458,135	528,599925	-481,8
13	-75,375	4,8194	4659	465,5	978068,3111	976686,26	1437,7674	521,216307	-465,5
14	-75,325	4,919	4633	464,3	978069,832	976694,0958	1429,7438	518,307609	-464,3
15	-75,3583	4,8194	4633	458,9	978068,3111	976697,9749	1429,7438	518,307609	-458,9
16	-75,375	4,7862	4633	445,3	978067,811	976711,0748	1429,7438	518,307609	-445,3

Figura 18.Tabla de cálculo de: Gravedad teórica, gravedad observada, corrección aire libre, corrección Bouguer y Anomalía Bouguer simple.

Según los resultados obtenidos con los valores de la anomalía de Bouguer simple (ABS) se puede ver que en los límites de las placas Nazca y Suramericana se observan valores de anomalía entre 82.76 miligales y 126.70 miligales, sector en donde existe una subducción de la placa Nazca hacia la placa Suramericana en sentido WE, el fraccionamiento por el choque se podría decir que se genera en sentido SW – NE. Los valores obtenidos de la altura topográfica confirman la subducción puesto que oscilan entre -3700 msnm y -4000 msnm. Situándose sobre la placa de Nazca, en cercanías a la zona objeto de estudio, se obtiene una respuesta de valores de ABS entre 20.9miligales y 42.6 miligales.



Mapa 5.Representación de la Anomalía de Bouguer simple de la zona de estudio con trazo para perfil.

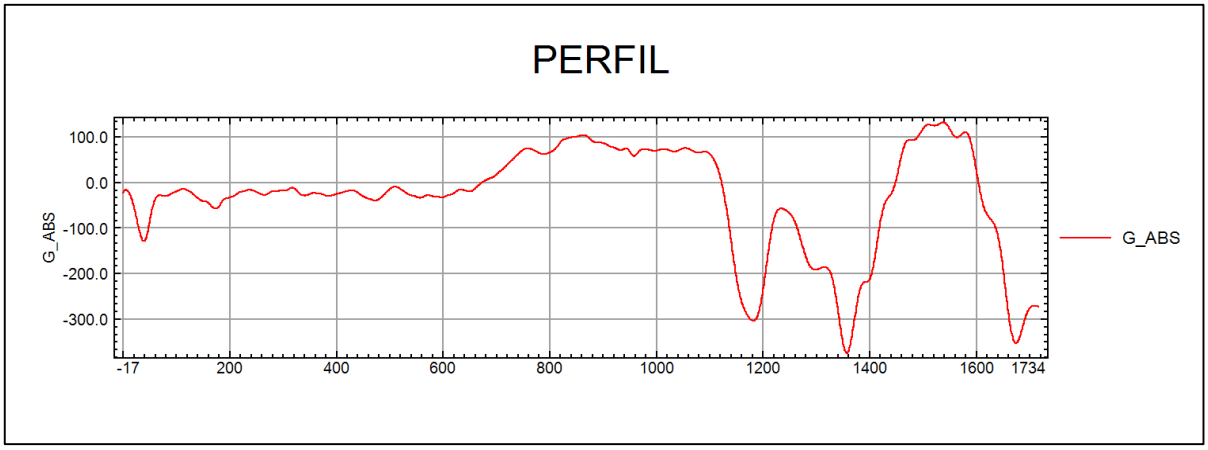


Figura 19.Perfil del trazo correspondiente al mapa de anomalía de Bouguer simple del ítem 5.3.

En la parte norte de la zona de estudio se observa la interacción que existe entre la placa Caribe y la placa Nazca, aunque también presenta choque con la suramericana. En la placa Caribe se tienen valores entre 86.3 miligales y 100 miligales con alturas aproximadamente de 3350 msnm.

La presencia de los valores negativos da evidencia de que estamos frente a una gran masa continental, es decir, que encontramos una densidad menor en la corteza terrestre en comparación con la corteza oceánica. Con respecto a la cordillera occidental y oriental colombiana, se puede afirmar que en sentido N – S los valores de la anomalía tienden al aumento debido a la existencia de una cuenca sedimentaria.

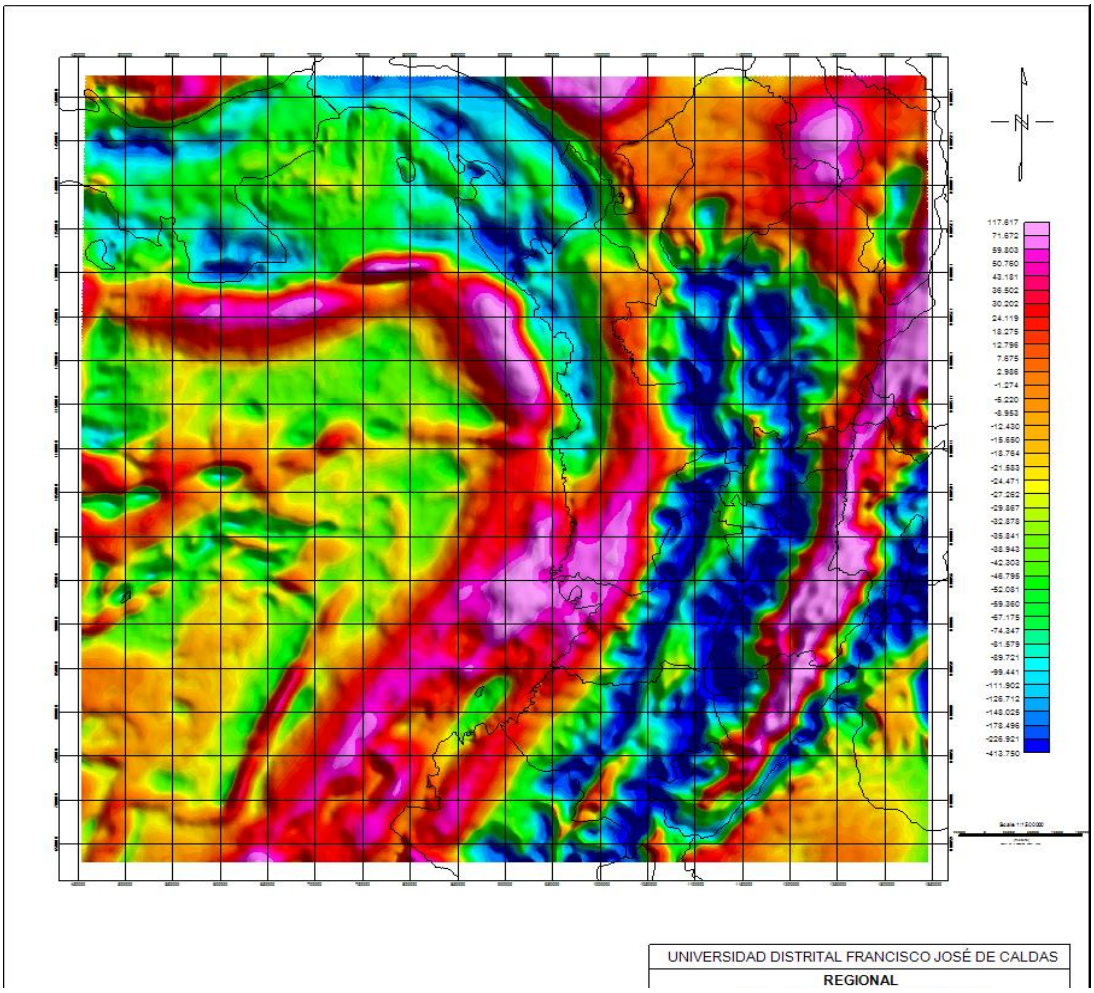
Teniendo en cuenta el mapa sismo tectónico del artículo *Seismic structure cocos and Malpelo volcanic ridgees and implications for hot spot.ridge interaction* P. 3, los valores más altos en la zona sur de la parte oceánica permiten identificar Malpelo ridge muy cercano a la línea del litoral del pacifico, además se puede observar que al S-W de Panamá se encuentra Coiba ridge, que de acuerdo a los valores altos del mapa 5 son consistentes.

Se hace importante mencionar que entre las cordilleras central y oriental colombianas, situadas en la parte derecha del mapa 5 se evidencia una diferenciación en los valores de anomalía en la separación de estas, es en el espacio que hay entre ellas donde se registran los valores mayores de anomalía, los cuales equivalen al rango de 87.7 y 146.6 miligales y en las cordilleras los valores más bajos situados en el intervalo de los -265.6 y -589.3 miligales, lo cual ratifica la diferenciación que se evidencia en valores donde se tienen diferentes valores de altura.

5.4. Mapas regional – residual

Las anomalías de gravedad resultan de la distribución no homogénea de la densidad en la tierra, estas se ven afectadas por la densidad del contraste y la profundidad generando así longitudes de onda largas o cortas (Lowrie, 2007).

Según el libro "*fundamentals geophysics",* la anomalía regional tiene longitud de onda larga, es decir que son cuerpos profundos que muestran características generales de la tierra. Este obtiene aplicando uno de los métodos de separación regional – residual, el filtro polinómico de grado 2 en el software Oasis Montaj que ajusta la tendencia regional de la anomalía Bouguer simple para dar como resultado el mapa 6, en el cual se observan rasgos generales de la geología estructural en la zona de estudio. Los valores calculados que representan altas densidades están entre 117.617 miligales y -18.76 miligales, zonas donde hay sistema de fallas, proceso de subducción y presencia de dorsales. Los tonos azules ubicados en la plataforma continental describen densidades bajas que coinciden con el relieve Colombiano, estos valores están entre -29.86 miligales y -413.79 miligales.

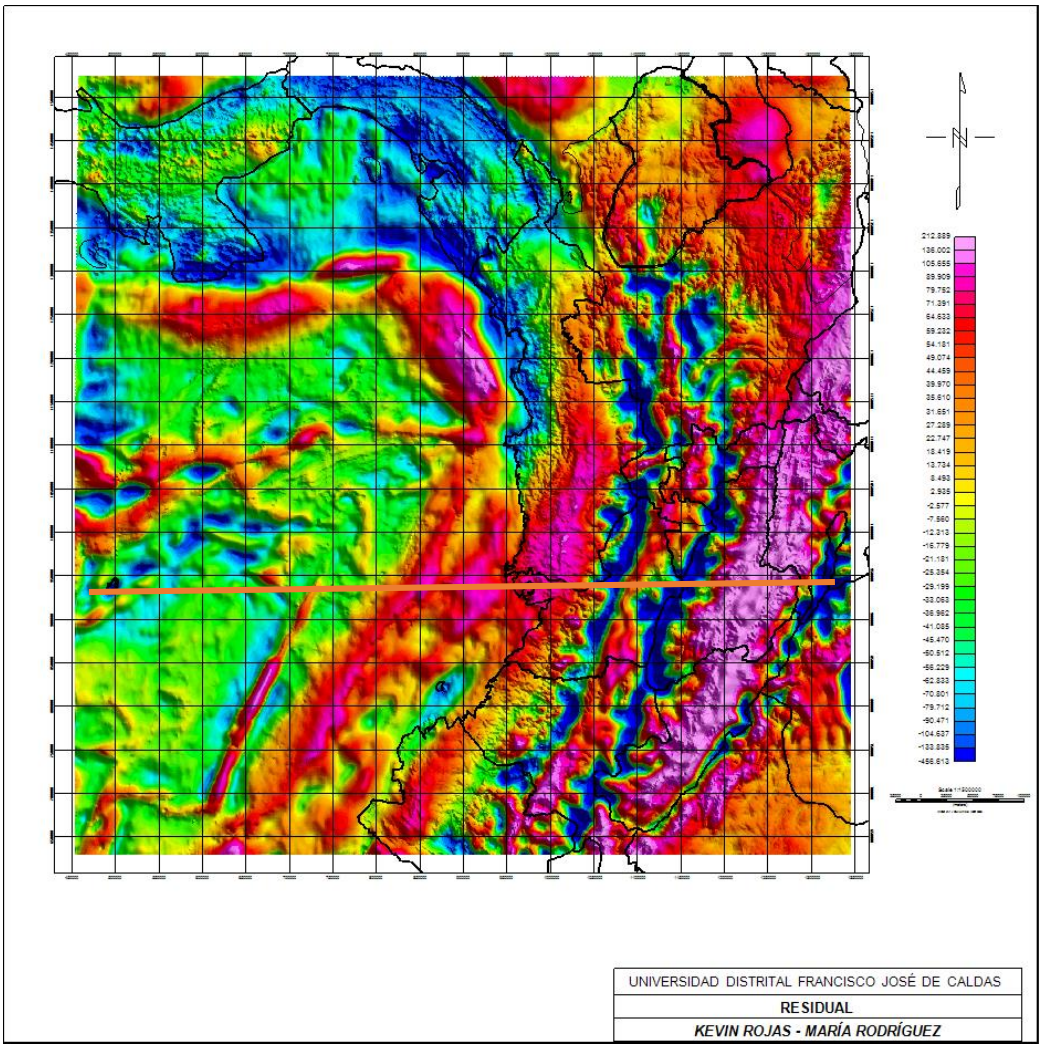


Mapa 6. Representación regional de la zona de estudio.

La anomalía residual se debe a cuerpos poco profundos con longitudes de onda corta. El mapa residual del área de estudio se obtiene del mapa de la anomalía de Bouguer Simple descrito en el ítem 5.3, corresponde con la resta de esta anomalía y la anomalía regional.

El mapa de anomalía residual de Bouguer simple muestra claramente el contraste de las densidades de la litosfera en la zona de subducción del pacifico colombiano, se obtienen valores entre -413.75 miligales y 117.61 miligales.

En el mapa se evidencia que los valores más negativos de la plataforma continental corresponden con las tres cordilleras y el macizo colombiano, en el caso del istmo de panamá se evidencia que también existen valores negativos que coinciden con la cadena montañosa. Todo el pacifico correspondiente a la placa nazca tiene los mayores valores que van desde -20 miligales hasta 117 miligales, evidenciando que son densidades superiores las de la placa Nazca (oceánica) con respecto a las zonas montañosas continentales de la placa suramericana.



Mapa 7. Representación residual de la zona de estudio con trazo para perfil.

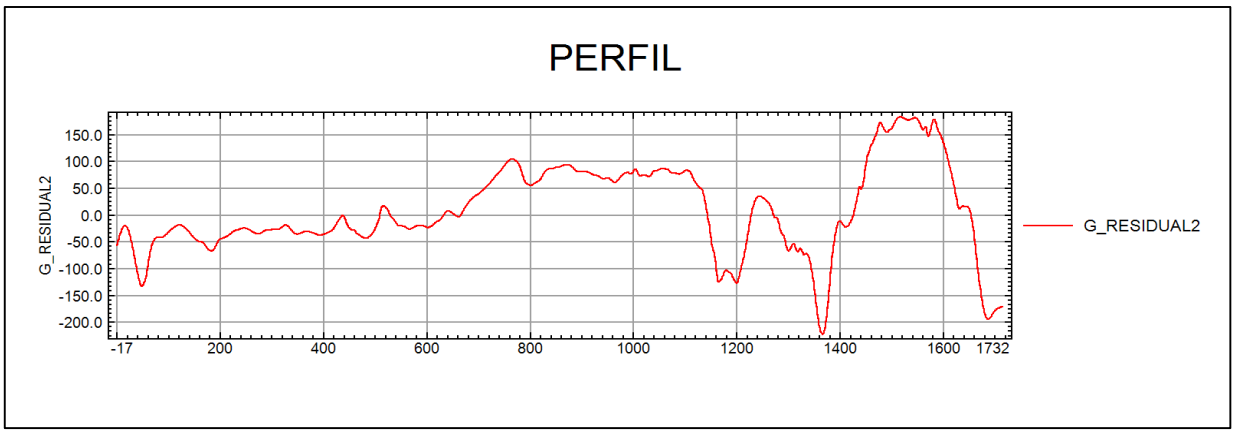


Figura 20.Perfil del trazo correspondiente al mapa anomalía residual del ítem 5.4.

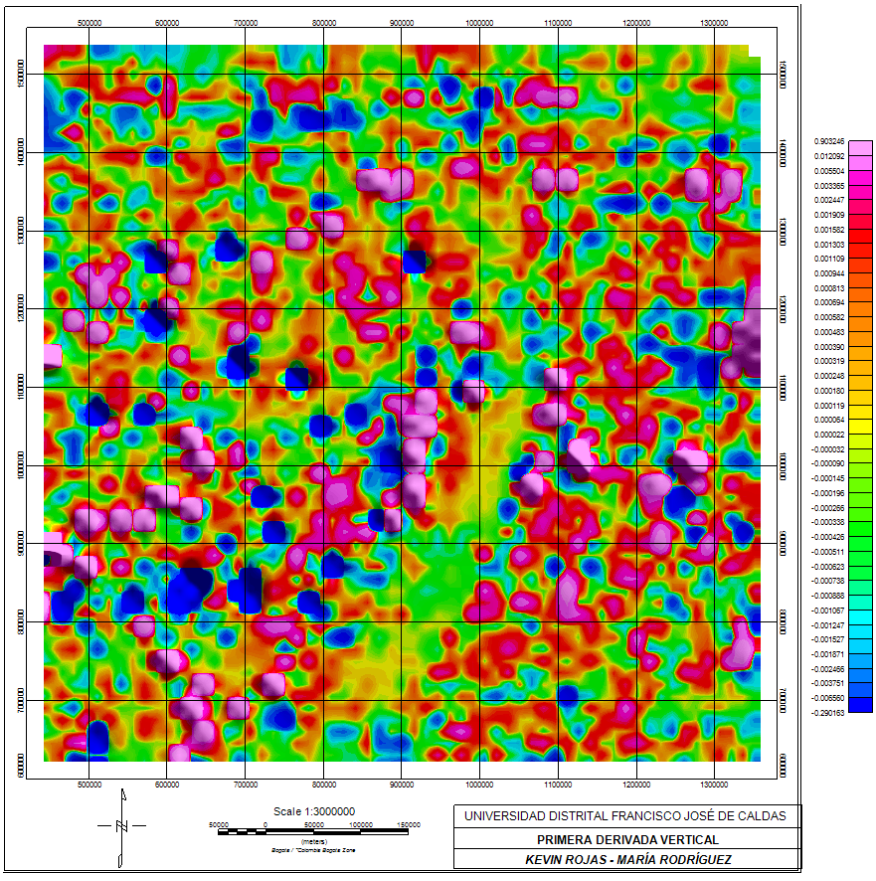
De acuerdo al mapa estructural del articulo *Caracterización sismo tectónica de la región del valle del cauca y zonas aledañas a partir de mecanismo focales de terremotos* P. 9, en el cual se define la zona de subducción, el mapa residual permite identificar que esta coincide con la línea de costa que divide la plataforma oceánica y continental.

Las líneas de falla principales son paralelas a la línea del litoral pacífico colombiano, entonces aunque no se pueden identificas detalladamente las fallas Romeral y Guaicaramo de la figura 15, en el mapa de anomalía residual si coincide con valores negativos.

5.5. Mapa primera derivada vertical

La operación matemática de la primera derivada se aplica sobre el resultado original obtenido de anomalía de Bouguer, generando así un equivalente a un mapa de anomalías residuales, aplicar este proceso permite destacar las anomalías de alta frecuencia con un contraste alto en valores de densidad.

En la representación de la primera derivada, en el mapa 8, se puede evidenciar con cierto detalle los cuerpos que presentan densidad pronunciadas, es así como se resaltan los puntos más significativos en términos de densidad de la zona de estudio, con lo cual tenemos que en las zonas que se encuentran entre los valores de 0.002447 y 0.903246 se presentan los mayores valores de cambios en la densidad, esta resalta los cuerpos anómalos en donde se destacan algunos montes y lo fosa de Malpelo producida por el choque de las placas Nazca y Suramérica.



Mapa 8. Representación primera derivada vertical.

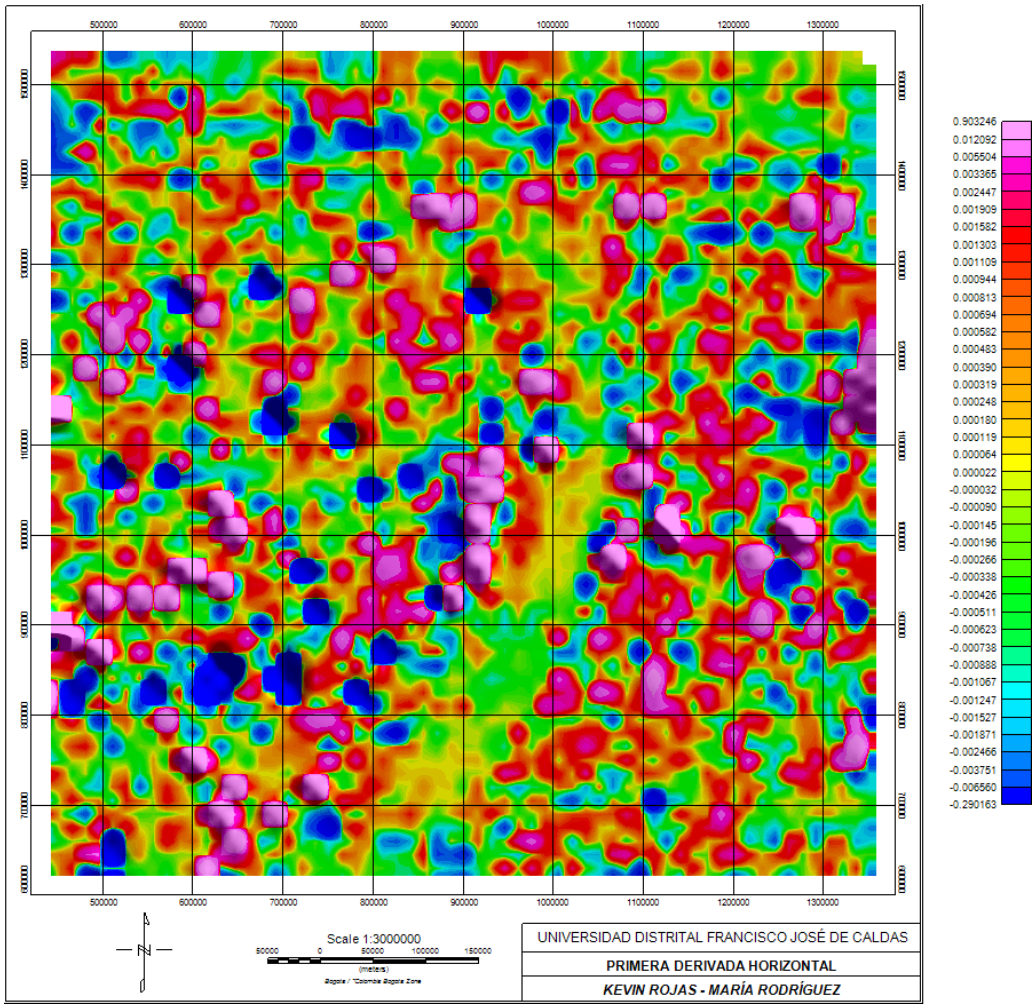
Debido a que se tiene una zona de estudio que presenta un área demasiado extensa, los valores que son resaltados al aplicar la derivada vertical no son muy dicientes, motivo por el cual el mapa no permite realizar una representación profunda de los resultados obtenidos mediante su aplicación. Es importante resaltar que debido a la amplitud de la zona de estudio y al amplio rango de valores entre los cuales se encuentra la anomalía de Bouguer, la aplicación de la primera derivada no arroja resultados dicientes sobre las diferencias anómalas que se podrían evidenciar en la zona, para resaltar este proceso se generó de manera manual un aumento en el tamaño del pixel, obteniendo resultados un poco más significativos pero que no permiten una interpretación profunda de lo que está sucediendo en algunos puntos específicos.

5.6. Mapa Primera derivada horizontal

La primera derivada horizontal permite destacar las anomalías producidas por cuerpos introducidos, es decir que si a nivel geológico se tiene evidencia de un cambio significativo en las coberturas del terreno, será marcado por esta componente, lo cual nos lleva a verificar que el tener una zona de subducción genera un fuerte comportamiento al generar estos procesos.

La representación de la primera derivada horizontal toma en consideración los valores de densidad pero mayoritariamente los cuerpos geológicamente anómalos que se presentan en la zona de estudio, es así como en los sectores que se encuentran oscilando entre 0.001303 y 0.903246 se presentan los cuerpos más significativos en cuanto a su formación en contraste a estos, se presentan los cuerpos ubicados entre los valores de -0.290163 y -0.000888; los valores más neutros, que son los ubicados entre -0.000888 y 0.001303 son los que se presentan en zonas costeras o planicies, lugares en donde no se evidencian formaciones geológicas que puedan generar afectaciones al terreno.

Los contrastes en la densidad se dan por la fuerte oscilación entre valores de anomalía en plataforma continental en comparación con la plataforma oceánica, esto conlleva a que la cercanía o la igualdad a cero no es muy marcada, por lo tanto, así como sucedía con la primera derivada vertical, este proceso es generado pero no brinda las funcionalidades que requiere para hacer un estudio detallado debido a que la zona de estudio presenta un área bastante extensa.



Mapa 9. Representación primera derivada horizontal.

5.7. Dorsal Malpelo

Para estudiar el área de interés se realizó un acercamiento más detallado de los mapas topográfico y anomalía de Bouguer analizados en el ítem 5.1 y 5.3, también se trazaron los respectivos perfiles en la zona correspondiente a la Isla Malpelo.

La dorsal Malpelo ha sido caracterizada por su formación estructural, pues esta es una parte de la provincia volcánica de Cocos-Nazca según el artículo *structure of the Malpelo Ridge (Colombia) from seismic and gravity modelling* publicado en el 2006. En 1999 se llevó a cabo una expedición (Paganini) en la cual se tomaron diferentes datos con los que se realizaron modelos de velocidades, modelos sísmicos y modelos gravimétricos en Malpelo.

Según la expedición se realizó un modelo de velocidades que logro relacionar las densidades de la corteza, arrojando resultados que muestran cómo se evidencia en nuestros mapas la variación de valores en la corteza inferior, por ejemplo, las velocidades de los sedimentos fueron *1.8 km/s* que en densidad corresponden a *1.9* g/cm^3. La corteza superior registró valores de velocidad desde *4.9 km/s* a *5.1 km/s*, modelando un cuerpo de densidad uniforme aproximada de *2.6* $^{g}/_{cm^3}$. (Marcaillou, Charvis, & Collot, 2006)

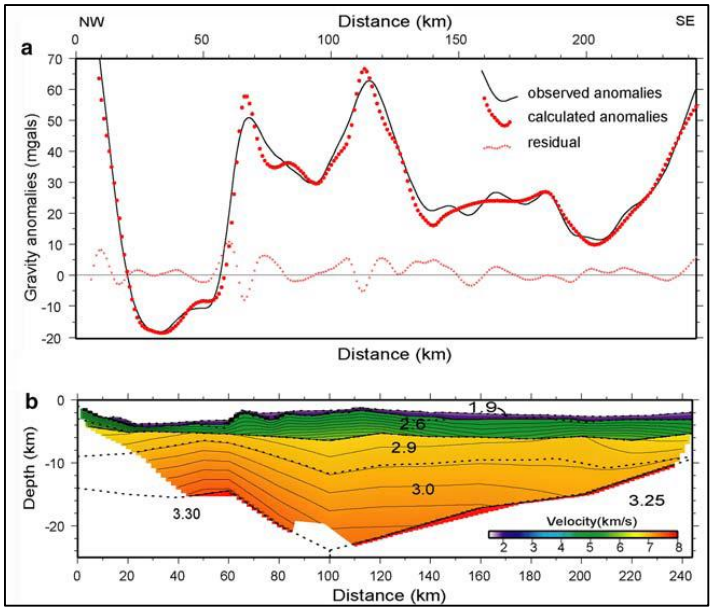


Figura 21. Modelo de velocidades y gravimétrico de Malpelo. Tomado del artículo structure of the Malpelo Ridge (Colombia) from seismic and gravity modelling.

Según esta investigación, la edad o evolución de la parte estructural de la dorsal es la causante de las representaciones que se obtienen en los estudios geofísicos, pues el proyecto apoya la hipótesis de que la dorsal Malpelo fue la continuación de Cocos Ridge, emplazando simultáneamente con Carnegie Ridge que se fueron alejando debido a la tectónica, siendo otra evidencia de esto la estructura de los flancos del noroeste y del sudeste dela cresta de Malpelo. (Marcaillou, Charvis, & Collot, 2006)

Teniendo en cuenta los mapas 10 y 11 con sus respectivos perfiles de la zona podemos evidenciar los valores altos en topografía y bajos en anomalía de Bouguer correspondientes a la isla Malpelo y los cayos que se encuentran a su alrededor. Los tonos rojizos obtenidos en la parte S-E de la anomalía de Bouguer muestran la línea pronunciada de la dorsal Malpelo.

Con referencia a la topografía y basados en los mapas 3 y 10, en el costado más occidental podemos evidenciar la dorsal Malpelo, esta se encuentra ubicada entre los -2400.9 metros y los 19.8 metros, donde se tiene el punto más alto del sector, donde se encuentra ubicada la isla, en sus alrededores se obtienen profundidades entre los mismos rangos, lo cual muestra la uniformidad en cuanto a alturas de la placa de Nazca puesto que la demarcación con la placa sudamericana si es notoria.

En lo que respecta a la anomalía de Aire libre como se puede evidenciar en el mapa 4, la dorsal Malpelo se encuentra en el rango de valores de 26 a 74.9 miligales, lo cual destaca un cambio en la densidad del lugar, lo cual contrasta con su alrededor por la isla y los cayos que allí se encuentran presentes, al tener terrenos emergidos se puede apreciar la influencia que empiezan a tener los múltiples factores atmosféricos y climáticos en los cambios de densidad en la dorsal, esta área se encuentra en los valores promedio de anomalías de aire libre de la zona de estudio.

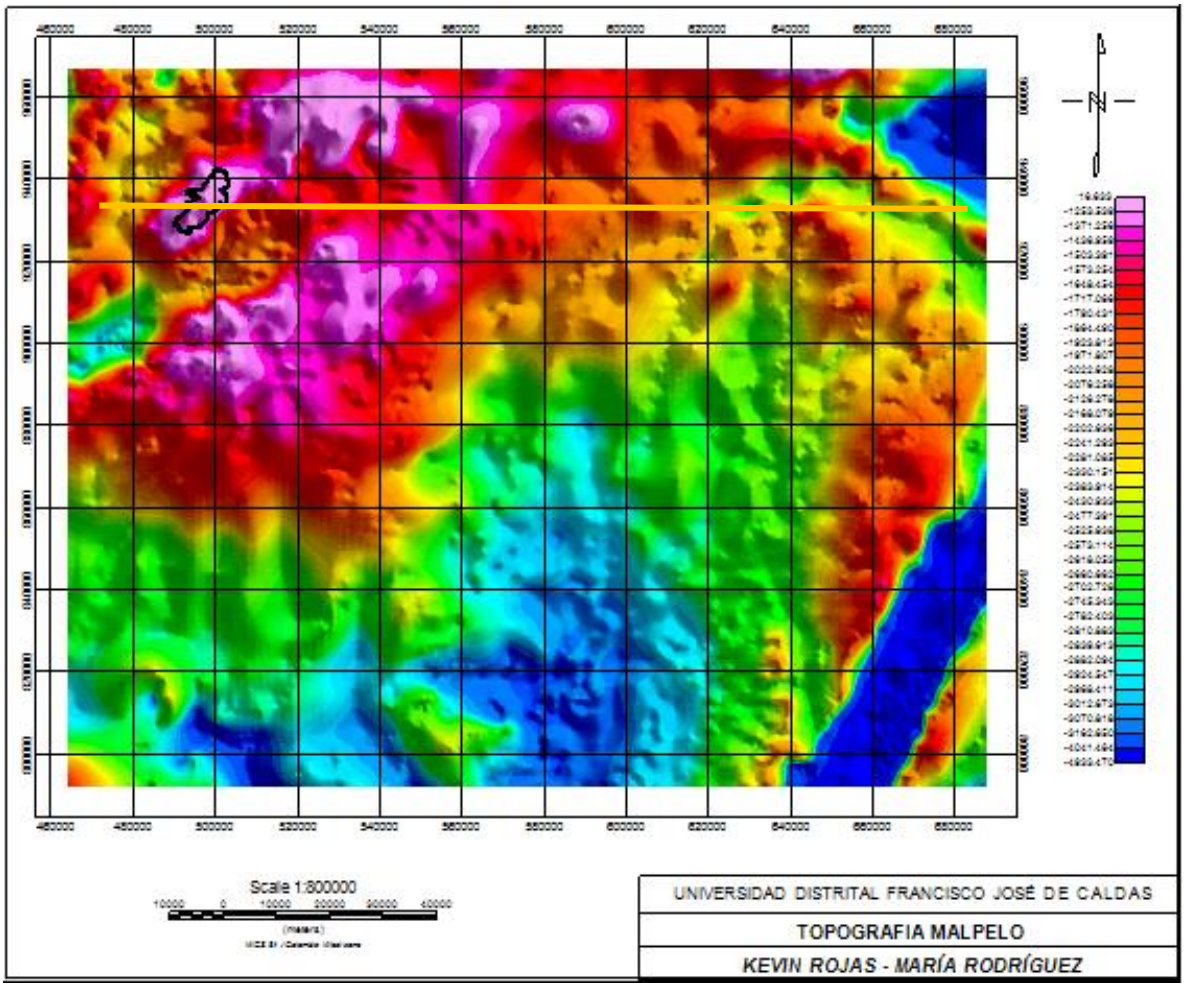
La dorsal Malpelo obtiene una respuesta en términos de anomalía de Bouguer, como se puede verificar en los mapas 5 y 11, la dorsal se sitúa en los valores que se encuentran entre los -118.1 y -32.5 miligales, los que se pueden ver en tonos claros de azul, lo cual da evidencia de la posición en la que se encuentran los puntos más altos de la zona, cabe destacar que la dorsal Malpelo se encuentra principalmente delimitada por las zonas de subducción que se han presentado en la zona, tanto de la placa de Nazca con la suramericana como de Cocos con las dos anteriores, por eso destaca esta dorsal y marca la diferencia entre los valores de anomalía que se ven en el océano.

Tomando en consideración el mapa regional de la zona de estudio, mapa 6, podemos destacar que la dorsal Malpelo presenta densidades por debajo del

promedio con referencia al resto de la zona, dado que en esta zona se destacan los valores que oscilan entre -111.902 y -67.176 miligales, esto permite inferir que los valores de densidad son bajos en comparación con las densidades observadas a nivel oceánico, también cabe resaltar que presenta valores similares a los obtenidos en el límite más al norte del territorio colombiano con el océano Pacífico y las cercanías con Panamá, sitios en donde se obtienen valores similares a los obtenidos en la dorsal, los cuales los podemos ver en tonos claros de azul.

El mapa residual se encarga de resaltar de manera más detallada los cambios en los valores de densidad, lo cual permite verificar la diferenciación que se da entre la dorsal Malpelo y el resto de la zona de estudio, para los valores de anomalía residual la dorsal se encuentra entre el rango de valores de -133.835 y -45.470 miligales, resaltando de esta manera las superficies emergidas del océano.

En los mapas 8 y 9, podemos ver que al realizar la primera derivada vertical y horizontal destacan puntos sobre la dorsal Malpelo que se sitúan entre los valores de 0.001909 y 0.903246, lo cual destaca por la diferenciación en valores de densidad con respecto a las zonas alrededor de la dorsal.



Mapa 10. Representación de la topografía enfocada en Malpelo.

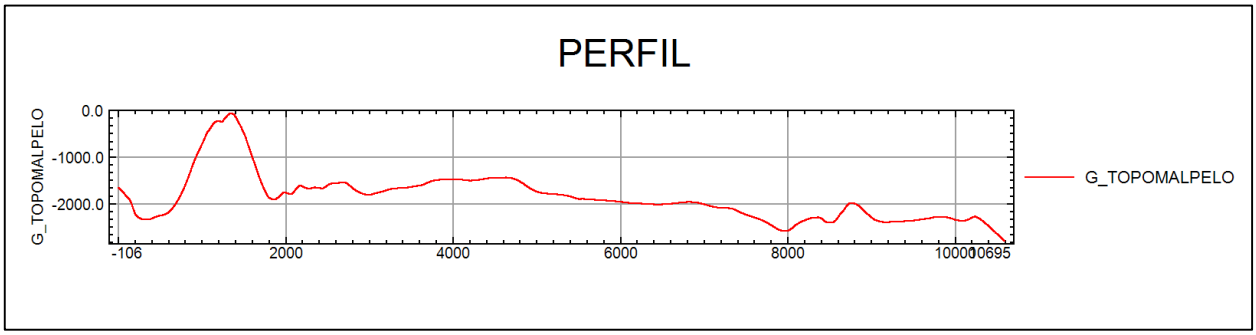
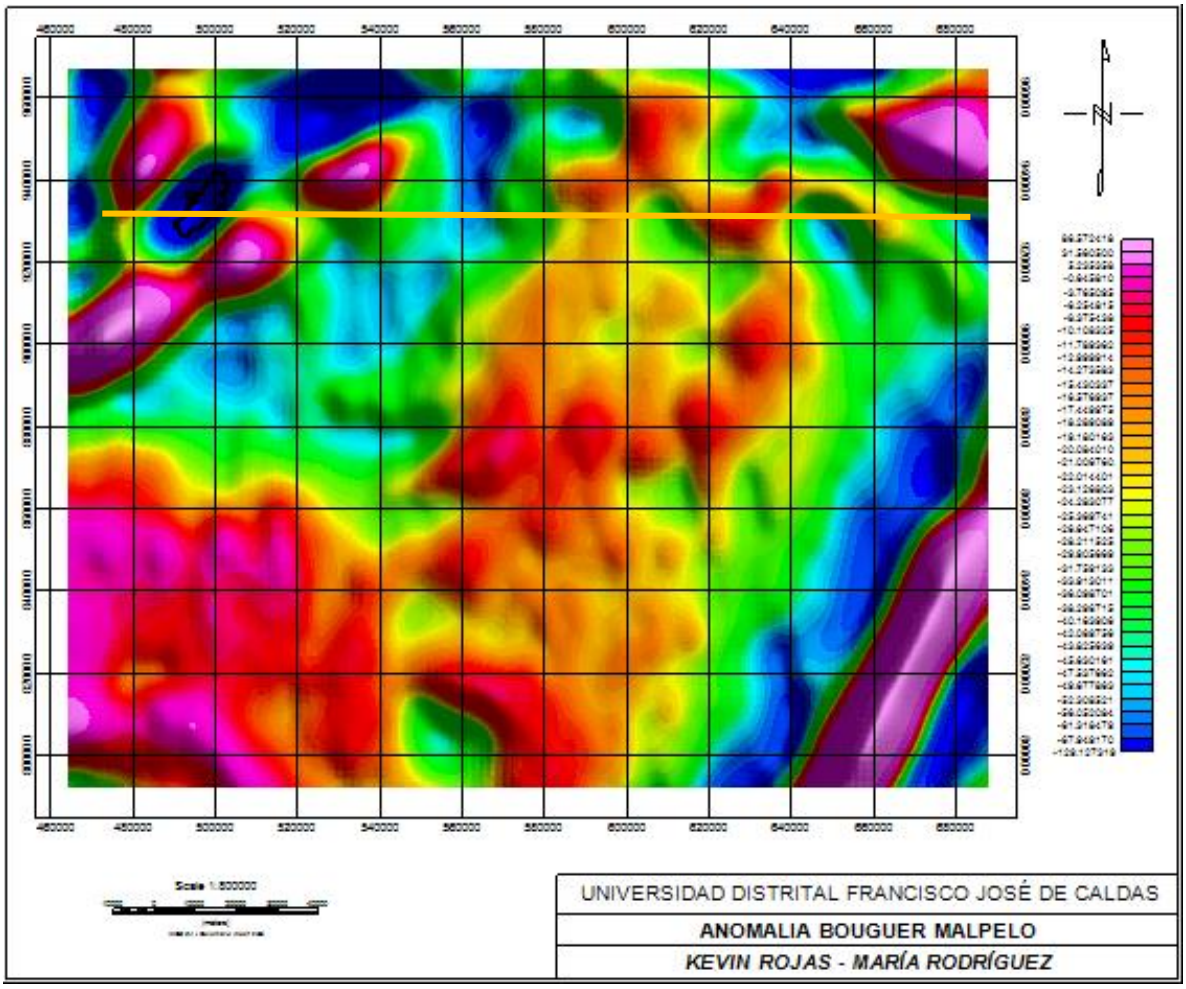


Figura 22. Perfil de la topografía enfocada a Malpelo.



Mapa 11.Representación de la Anomalía de Bouguer Simple enfocada en Malpelo

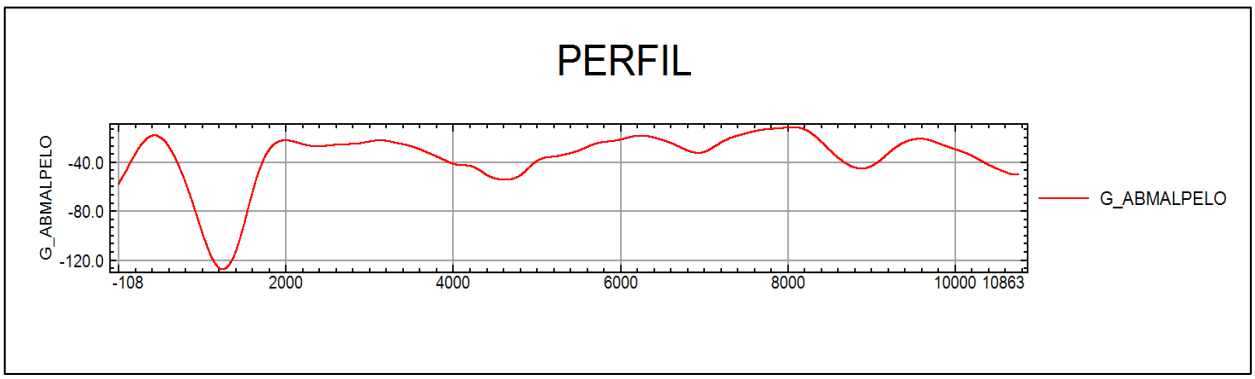


Figura 23.Perfil de la Anomalía de Bouguer Simple enfocada a Malpelo.

5.8. Mapa anomalía isostática

Las anomalías isostáticas de gravedad revelan el estado de equilibrio en la corteza para diferentes zonas, que representan movimientos verticales compensatorios. Están definidas por:

$$\Delta g_I = \Delta g_B - C_I \qquad (34)$$

Para el desarrollo del proyecto, la variable de corrección isostática fue calculada según los modelos propuestos por Airy y Pratt teniendo en cuenta diferentes consideraciones.

El modelo de Airy está definido por el cálculo de las raíces de la siguiente manera:

Plataforma continental:

$$t = \frac{\rho_c}{\rho_M - \rho_c} h \qquad (35)$$

Plataforma oceánica:

$$t' = \frac{\rho_c - \rho_A}{\rho_M - \rho_c} h' \qquad (36)$$

El modelo de Pratt definido con una superficie de compensación de 100 km de la siguiente manera:

Plataforma continental:

$$\rho = \frac{D}{D+h} \rho_0 \qquad (37)$$

Plataforma oceánica:

$$\rho' = \frac{\rho_0 D - \rho_0 h'}{D - h'} \qquad (38)$$

Los valores utilizados con respecto a las densidades fueron:

Datos	Valores
ρ_c	2,7 gr / cm^3
ρ_M	3,5 gr / cm^3
ρ_A	1,1 gr / cm^3
ρ_0	2,67 gr / cm^3

La corrección isostática, se halló utilizando cilindros de radio a, altura b y distancia c de la base del cilindro con contraste de la densidad $\Delta\rho$, dada por:

$$C^I = 2\pi G\, \Delta\rho(b + \sqrt{a^2 + (c-b)^2} - \sqrt{a^2 + c^2}) \qquad (39)$$

Con el fin de mostrar el comportamiento relacionado con la compensación isostática, realizamos dos mapas correspondientes a la anomalía isostática hallada por método de Airy y método de Pratt, estos coinciden con el mapa 5 de anomalía de Bouguer simple en cuanto a la distribución de las estructuras geológicas.

Los valores obtenidos en el mapa de anomalía isostática por Airy están entre -542.2 miligales y 164.4 miligales, es decir que las variaciones debido a la extensión de la zona de estudio muestran diferentes configuraciones adjudicadas a la geología que se muestran en el mapa 14. Por otro lado, los valores en el mapa de anomalía isostática por Pratt están entre -497.2 miligales y 240.9 miligales.

Debido a que los resultados son muy similares se puede generar una descripción conjunta. Los valores más altos se ubican también en la línea de tendencia SW-NE, contrastando los valores más bajos de la anomalía isostática conforman una línea paralela S-NE. Esta comparación coincide con las características geológicas como por ejemplo: la amplitud de la placa de Nazca, la cual "converge hacia el este con respecto a la placa Sudamericana, aun a velocidad de aproximadamente 7cm/año. La convergencia relativa entre estas dos placas se absorbe entre la zona de subducción del Pacífico y a lo largo de los sistemas de fallas y pliegues activos que se observan en las tres cordilleras y valles de la cadena Andina Colombiana" (Taboada, Dimaté, & Fuenzalida, 1998).

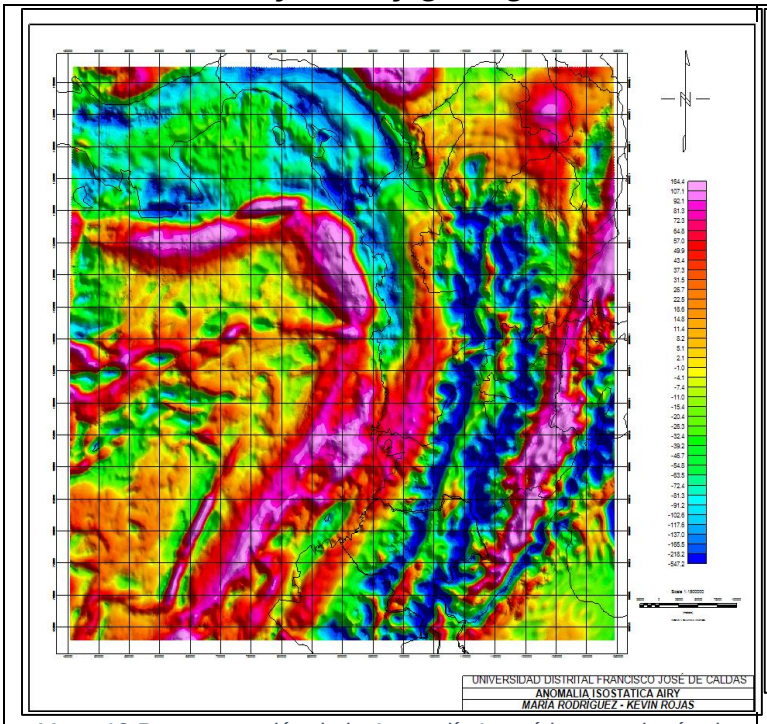
Después de las consideraciones anteriores, es importante mencionar que los dos mapas son consistentes con la geología estructural como se muestra en el mapa 14, al Noroeste se encuentra el arco de chorotega perteneciente al relieve Panameño y en la parte continental colombiana se observan las tres cordilleras (occidental, central y oriental) con valores negativos de anomalía isostática y tonos azules, por lo que confirma la sobre compensación que según el documento *"Fundamentals Geophysics"* se genera por la topografía erosionada o movimientos verticales que provocan desequilibrio isostático y sugiere una raíz que es más pequeña que la real, siendo la anomalía de Bouguer mucho mayor que la corrección isostática.

Los tonos rojizos que corresponden a los valores positivos de la anomalía isostática muestran que en la parte suroriental con línea de tendencia SW-NE se encuentra la placa nazca, donde se observa altas densidades debido al proceso de subducción con la placa suramericana, esto indica que hay sub compensación producida por la

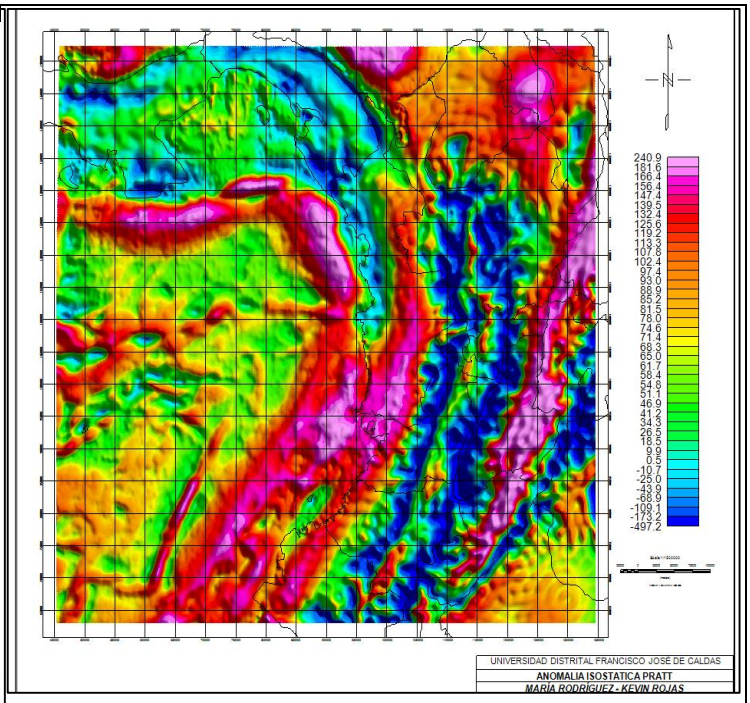
topografía en la zona que sugiere una raíz más grande que la real y ocasiona valores menores de anomalía de Bouguer con respecto a la corrección isostática.

La zona que se encuentra en equilibrio isostático es decir los valores 0, están ubicados en diferentes puntos de la plataforma oceánica donde existen bordes de dorsales como Malpelo y Coiba, en la parte plataforma continental al sureste donde estructuralmente comienza el relieve plano del país, es importante resaltar que esto se pudo concluir de los pocos puntos obtenidos en el mapa de anomalía isostática por el método de Airy ya que en los valores obtenidos en Pratt no se registra equilibrio isostático.

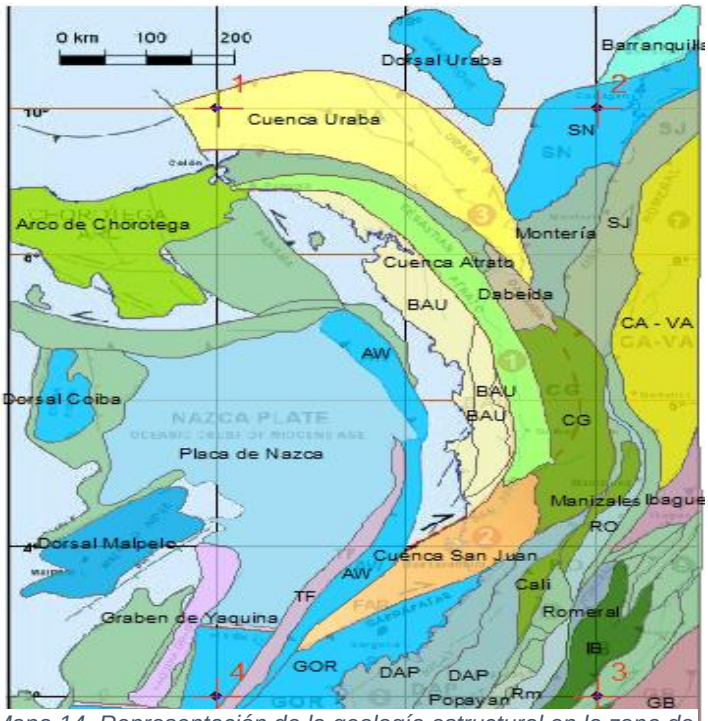
5.8.1. Comparación de la anomalía isostática por medio de los modelos de Airy, Pratt y geología estructural



Mapa 12.Representación de la Anomalía Isostática por el método de Airy.



Mapa 13.Representación de la Anomalía Isostático por el método de Pratt.



Mapa 14. Representación de la geología estructural en la zona de estudio.

En el diagrama anterior se realiza una comparación entre la anomalía isostática calculada en el proyecto por el método de Airy y Pratt y la composición geológica de la zona de estudio en donde se puede evidenciar que la estructura de la placa de Nazca es corteza oceánica de la edad del mioceno, también se evidencia la cresta de Malpelo, en donde geológicamente se presenta una formación rocosa que emerge y genera la Isla de Malpelo.

Se puede evidenciar que en la cordillera occidental colombiana se sitúa la cuenca Atrato, la cual se extiende desde los límites de Panamá hasta la zona baja de Quibdó, en relación a la anomalía de Bouguer e isostática, en esta zona se sitúa la zona con gran presencia de anomalías las cuales acompañan toda la cuenca que se extiende a lo largo de la cordillera, topográficamente en los sectores con mayor altitud de la zona de estudio.

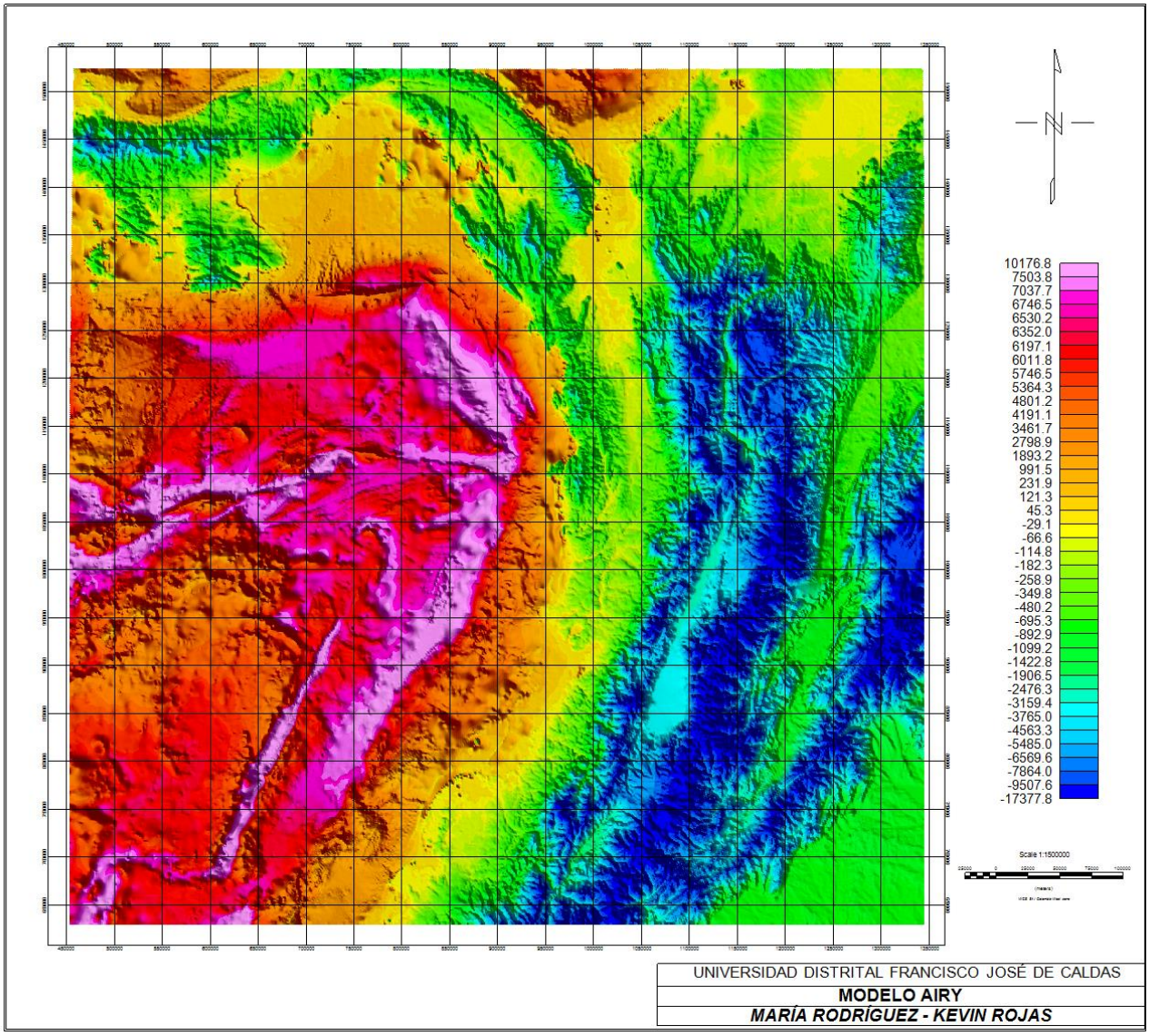
La cuenca San Juan, situada entre el bajo Quibdó y la zona occidental de la Isla Gorgona, varía según la latitud, inicialmente se tienen zonas de alta montaña y variabilidad de anomalía, dado que es en estos lugares donde se presenta la mayor diferenciación, el río San Juan, primordial en esta cuenca se posiciona por los diferentes valores de anomalía, desde los más anómalos hasta los más neutrales.

Se puede verificar que la geología en zonas montañosas se destaca por tener equivalencia al momento de realizar comparaciones con la anomalía isostática, lo cual da muestra de que las formaciones geológicas son parte fundamental de la variabilidad de los valores de anomalía en la zona de estudio.

5.9. Modelo de Airy

Para lograr comprender mejor el tema de isostasia, se decidió generar los modelos específicos de Airy y Pratt.

Primero se muestra el mapa 12 que pertenece al modelo de Airy, los valores están entre 10176.8 metros y -17377.8 metros. Según la teoría este modelo pretende mostrar que la altura de una montaña sobre el nivel del mar es mucho menor que el espesor de la corteza. El grosor de la raíz es proporcional a la elevación topográfica y la presión depende del material rocoso del cuerpo montañoso (Lowrie, 2007).



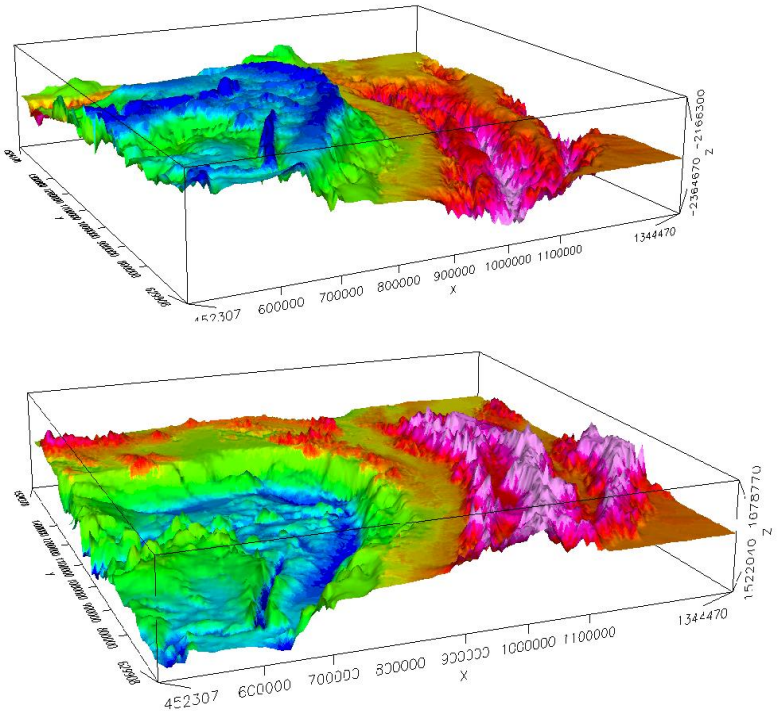
Mapa 15. Modelo isostático de Airy.

Para la generación del modelo isostático planteado por Airy, se toma inicialmente en consideración las fórmulas 12 y 14 aplicadas a los datos correspondientes a la zona de estudio, para los cuales se hallaron las raíces y anti raíces, las cuales permiten evidenciar la profundidad de estas tanto en la plataforma continental como en la oceánica.

Se puede apreciar que en la plataforma continental se sitúan los valores más negativos, los cuales se encuentran en el rango de -66.6 metros y -17377.8 metros, mostrando así la existencia de una cadena montañosa que manifiesta mayor

espesor en las raíces calculadas. Por otro lado, la plataforma oceánica se encuentra en el rango de 121.3 metros y 10176.8 metros.

El mapa del modelo isostático de Airy muestra principalmente las profundidades de las raíces y anti raíces que apoyado de los mapas de topografía, anomalía de Bouguer y especialmente de la anomalía isostática, se puede concluir que la zona de estudio tiene gran variabilidad en cuanto la formación y los movimientos geológicos que allí existen, pues el área como se explicó anteriormente no se encuentra completamente en equilibrio hidrostático.



Mapa 16. Modelo isostático tridimensional de Airy.

La representación tridimensional del modelo de Airy nos permite corroborar las diferentes profundidades de las raíces con respecto a los cuerpos que las producen, también se logra ver con claridad la fosa generada por el proceso de subducción generado entre las placas Nazca y Suramericana.

5.10. Modelo de Pratt

En el mapa 17 se puede verificar el modelo planteado por Pratt, en el cual establece que debe existir una compensación de masas, siendo esto que si se encuentra una superficie con grandes alturas, para nuestro caso las cordilleras del país, debe también existir una compensación de este exceso de masa para que haya un equilibrio, para la zona de estudio serían las zonas de subducción que son las más bajas, pero adicional a eso también plantea que los valores más altos de altura se debe tener una densidad menor, dado que debe compensar el peso con las áreas de deficiencia de masa.

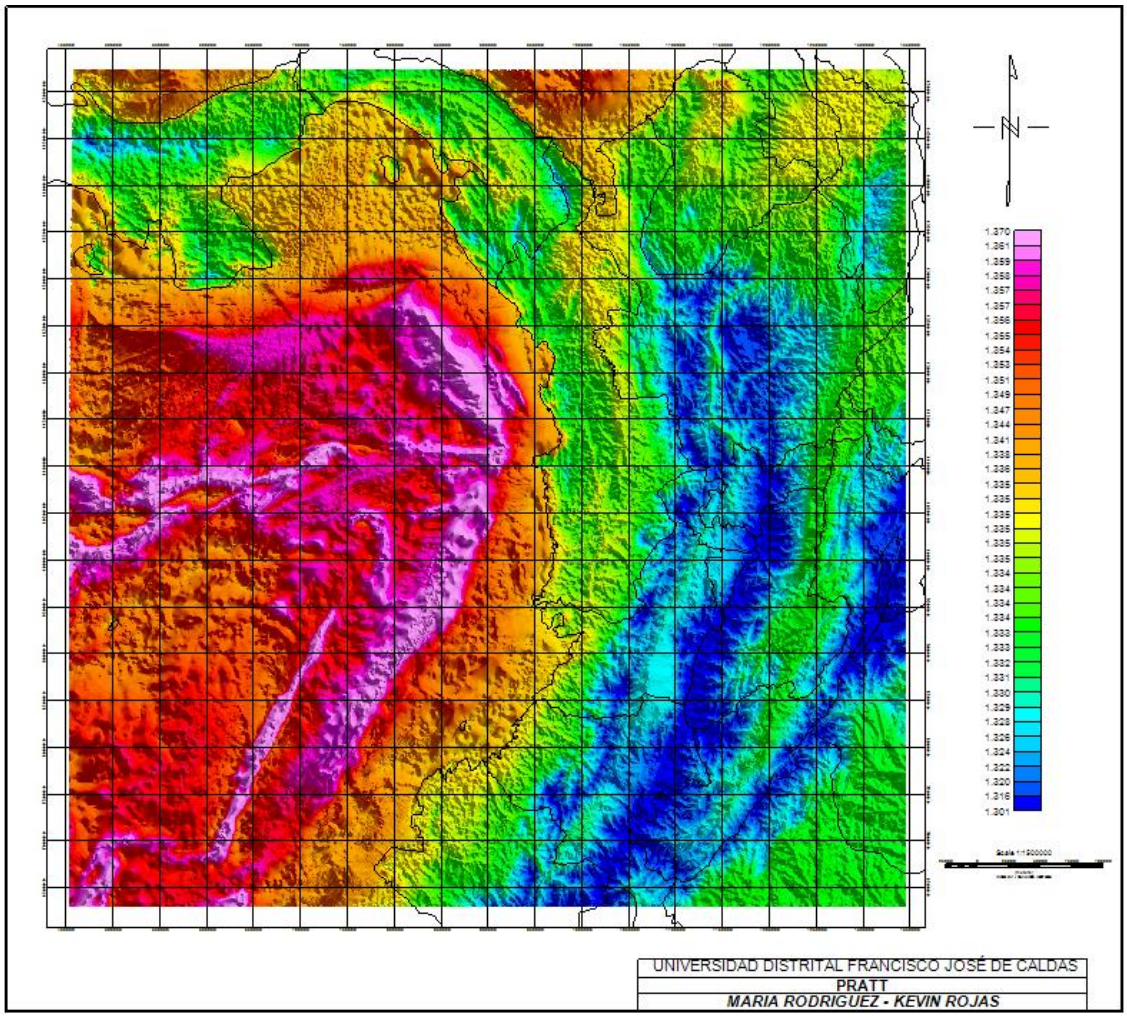
Por lo tanto, este mapa es la representación completa del modelo plateado por Pratt dado que en las zonas montañosas tenemos los valores más bajos, los cuales se encuentran en el rango de 1.301 a 1.332 $^{g}/_{cm^3}$ y hallan compensación con las zonas de subducción que son las más profundas y se encuentran entre los rangos de 1.351 a 1.370 $^{g}/_{cm^3}$.

De igual manera las zonas costeras, las cuales se encuentran en el rango de 1.332 a 1.351 metros, hallan su equilibrio isostático con las primeras zonas marítimas en cercanía a la costa, es decir que su equilibrio no es tan diferenciado dado que son zonas por valores poco mayores al nivel del geoide, lo cual genera que no se tengan que realizar grandes ajustes isostáticos.

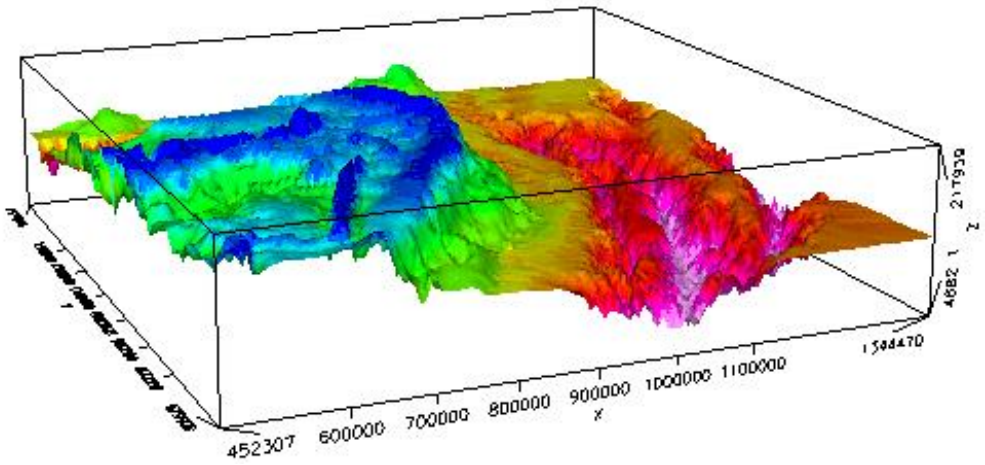
Es importante destacar que la anomalía de Bouguer residual coincide con los resultados de la hipótesis de Pratt, donde podemos evidenciar con detalle las fallas en la zona marítima de estudio, las cuales hallan su compensación isostática con las zonas montañosas y dan mayor certeza a la hipótesis de Pratt.

Se habla de una variación lateral de densidades que permite constatar en términos genéricos se produce la compensación isostática, vemos en el mapa 16 que se realiza con una representación 3D que la elevación de las cordilleras obtiene los valores de densidad más bajos, las cuales se demarcan en color azul de manera significante y en tonos rojizos su compensación que serían las zonas más densas y profundas, las cuales cumplirían con la hipótesis de Pratt.

Adicional a eso, en las zonas costeras con tonos de amarillo se puede evidenciar un tipo de planicie sobre este territorio, esto se produce debido a que en esta área no se requiere compensación puesto que es una zona que se encuentra al nivel del geoide, razón por la cual no requiere ser compensada.



Mapa 17. Modelo isostático de Pratt.



Mapa 18. Modelo isostático tridimensional de Pratt

El modelo isostático tridimensional de Pratt permite evidenciar al detalle la zona de subducción del pacífico colombiano, la cual se evidencia con los tonos azules, que representan también valores elevados de densidad, lo cual comprueba la teoría de Pratt en la que plantea que en las zonas de alta elevación se registran los menores valores de densidad y las zonas con menor altitud o elevaciones negativas los mayores valores, adicional a esto, podemos ver que en la representación se puede evidenciar la diferenciación que se da en las zonas montañosas, las cuales se evidencian en tonos rojizos, dado que en las intersecciones de las cordilleras colombianas se dan diferenciaciones en valores de densidad, otro aspecto que es importante destacar son las zonas costeras, las cuales se evidencian en color amarillo y reflejan valores muy cercanos a cero, esto se da a la poca actividad geológica que se da en estos lugares.

5.11. Datos sísmicos históricos (1970-2019)

El territorio colombiano se encuentra situado en el límite de tres placas tectónicas mayores: la placa Sudamericana, la placa de Nazca y la placa Caribe, en el presente estudio se examinan las placas de Nazca y Sudamericana en el pacífico colombiano, basados en la historia podemos evidenciar que "Los movimientos relativos de estas placas durante la era Cenozoica dieron origen al sistema orogénico de los Andes del Norte, compuesto por distintas cadenas de montaña separadas por valles y depresiones intramontañosas" (Taboada, Dimaté, & Fuenzalida, 1998), en la actualidad estas placas se están acercando entre sí y esto se puede visualizar en los mapas 12, 13 y 14,donde podemos apreciar que en las líneas que delimitan la geología estructural se producen también las variaciones en valores de anomalía isostática, lo cual demuestra la deformación que se está presentado.

“La sismicidad costa afuera hacia el Océano Pacifico muestra importantes variaciones de sur a norte. Entre 2°N y 3,5°N se observa una importante actividad, más concentrada hacia la fosa oceánica. Estos eventos corresponden a sismos en corteza oceánica subducida”. (Taboada, Dimaté, & Fuenzalida, 1998). En esta misma zona han ocurrido los grandes sismos de subducción en este siglo (1906, 1942, 1958 y 1979). Hacia el norte hasta aproximadamente 5°N la actividad es más dispersa y mucho menos notoria, aumentando de nuevo a partir de allí hasta Panamá. Esta sismicidad corresponde posiblemente a eventos en fallas que afectan la corteza en vecindad de la costa Pacífica.

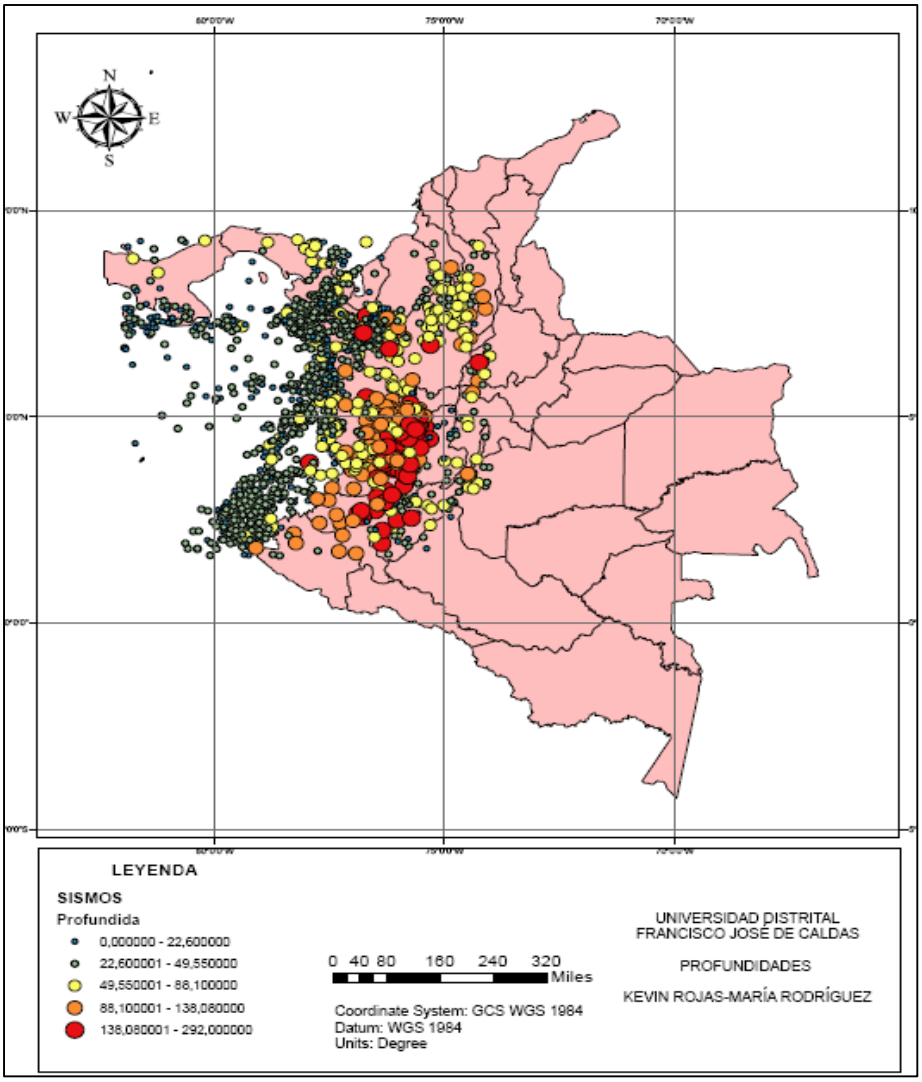
La sísmica del país es una de las disciplinas que complementan la geología estructural y la información gravimétrica, por ende fue importante revisar información histórica que fue descargada del catálogo de terremotos del Servicio Geológico Norteamericano (USGS, por sus siglas en inglés) en un periodo de tiempo entre 1970 y 2019, específicamente de profundidad y magnitud.

Se realizaron las respectivas representaciones espaciales de los datos, en el mapa 18 se evidencia los datos relacionados con la profundidad de los sismos ocurridos en este periodo de tiempo. Se tienen gran cantidad de sismos con profundidades muy superficiales en toda la parte de subducción del pacifico Colombiano y sismos con profundidades hasta de 292 km en las zonas donde se encuentran las cordilleras occidental y central.

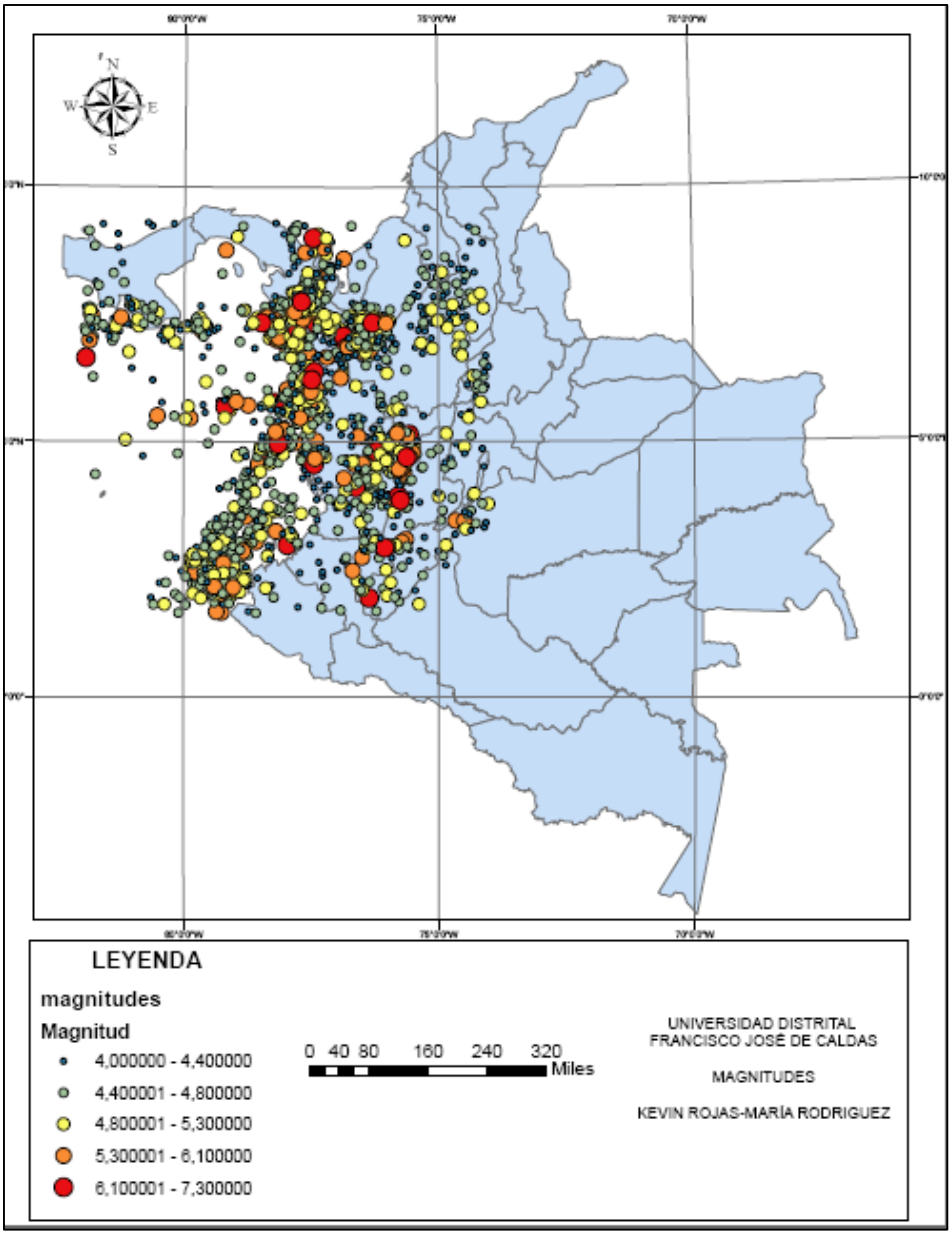
El mapa 19 muestra la magnitud de los sismos que se presentaron en la zona de estudio, estas se encuentran entre 4 y 7.3 grados registrados en la escala de Richter, estos están distribuidos en puntos importantes ya que geológicamente se encuentran fallas como la romeral y además coincide con la zona montañosa de la

parte Colombiana y el istmo de Panamá, debido a los rompimientos de la corteza terrestre que generan placas con bordes convergentes, divergentes o transformantes que generan un movimiento especifico y por ende liberan gran cantidad de energía. Se contabilizaron un total de 1853 sismos, la gran cantidad ubicados en la zona costera.

Finalmente apoyándonos en el artículo "*Caracterización sismo tectónica de la región del Valle del Cauca y zonas aledañas a partir de mecanismos focales de terremotos"* existe grandes movimientos de las placas relacionado a los esfuerzos sismotectónicos producidos por el proceso de subducción, generando superposición de las placas, siendo esto la base y el complemento de los análisis y resultados obtenidos tanto con la anomalía de Bouguer ya que el contraste de densidades en esta zona concuerda claramente con la actividad sísmica y la composición geológica real, como con la anomalía Isostática pues debido a todos los movimientos verticales que se dan en la zona y teniendo en cuenta los valores calculados, difícilmente se pueden tener puntos compensados isostáticamente.



Mapa 18. Ubicación de sismos (profundidad) entre 1970 y 2019.



Mapa 19.Ubicación de sismos (magnitud) entre 1970 y 2019.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta el objetivo principal del proyecto, se logró desarrollar el cálculo de las anomalías Bouguer e isostática en la zona de subducción del pacifico Colombiano, los cuales concuerdan con las investigaciones anteriores realizadas acerca de geología estructural que caracteriza el subsuelo de la zona de estudio.

Basados en las características de la zona de interés, un levantamiento de campo no es viable dado que la extensión, los costos y el difícil acceso a algunas áreas requerirían de mayor tiempo, preparación y disposición de investigadores.

El método geofísico aplicado en este proyecto, contribuyó a la definición de tipo geológico estructural con el fin de determinar con claridad el subsuelo oceánico y continental en el pacifico Colombiano.

Aplicar las herramientas teóricas como reducciones y filtros a los datos satelitales, permite generar un acercamiento a la geometría de las estructuras que causan las anomalías detalladas en los mapas presentados y que también muestran tendencias de aumento y disminución en los valores de las anomalías.

Principalmente se logró identificar y caracterizar la zona de subducción del pacifico Colombiano ocasionado por la actividad geológica que se da entre las placas de Nazca (oceánica) y suramericana (continental), adicional a esto se evidencia la composición estructural de la plataforma continental que corresponde especialmente a las cordilleras occidental, central y en parte oriental de Colombia.

Las anomalías de gravedad observadas a través de la cadena montañosa son fuertemente negativas debido a la baja densidad de las raíces como se observa en el mapa 12 con valores entre -547.2 miligales y -81.3 miligales, además los valores bajos de densidad también son producidos por los sedimentos que conforman las cuencas Atrato, San Juan y Urabá que coinciden con el mapa 14.

Los modelos realizados en este proyecto favorecen la zona de subducción que se encuentra caracterizada por la tendencia de las mayores densidades, por ejemplo para la anomalía de Bouguer registra valores en 87.7 miligales y 147.6 miligales, en la anomalía isostática por modelo de Airy entre 92.1 miligales y 164.4 miligales, interpretación que se ajusta a la teoría y los estudios realizados en el mundo como el mencionado en el documento *“Fundamentals Geophysics”* en la zona de los Alpes Suizos.

En el cálculo de la anomalía isostática por los dos modelos propuestos, se logró identificar que Airy genera más detalle de los puntos que concuerdan con los análisis realizados tanto con la teoría isostática como con las anomalías de Bouguer y Aire Libre pero especialmente porque se logran detectar algunas zonas que se encuentran en equilibrio isostático, que con el método de Pratt no fue posible.

Con el fin de apoyar los resultados de anomalías isostáticas, se desarrollaron los modelos isostáticos propuestos por Airy y Pratt, los cuales permitieron mostrar el comportamiento de la topografía y las raíces o anti raíces según la profundidad y las densidades.

De acuerdo a los estudios realizados en Sudamérica en cuanto a las anomalías de gravedad en la zona de subducción, se confirman los resultados obtenidos en el proyecto, pues la anomalía Aire Libre como se observa en el mapa 4 es positiva sobre los Andes y la línea de costa del océano pacifico, debido al proceso de subducción que existe entre la placa Nazca debajo de la placa sudamericana.

En términos isostáticos, según las comparaciones realizadas en el desarrollo del proyecto, se puede inferir que las cordilleras colombianas son contribuyentes a la gran actividad en el proceso de compensación que genera la subducción en el pacífico, lo cual genera que Colombia sea un país en donde hay sobre compensación y sub compensación por la variabilidad de las formaciones geológica.

De igual forma, se hizo un acercamiento a la parte sísmica en la zona que dio como resultado un contraste en el cual se evidencia que la zona de subducción presenta gran cantidad movimientos telúricos superficiales, mientras que en la parte montañosa los sismos se dan con mayores profundidades y magnitudes, sin embargo un desplazamiento certero de la placa Nazca podría ocasionar catástrofes que no se han presentado históricamente en el pacifico Colombiano.

Podemos concluir que los métodos utilizados para obtener los diferentes resultados están correlacionados, pues desde varias bases teóricas se logró llegar a análisis que se apoyan entre sí, es decir que la información representada es de calidad y garantiza confiabilidad ya que coinciden con la estructura real de la zona.

Con base a las limitaciones y resultados presentados en el desarrollo de este proyecto, nos permitimos recomendar a futuros investigadores a que inicialmente tengan en cuenta que el trabajo de campo es de gran importancia ya que este permite no solo el reconocimiento del terreno sino también la calidad de la información que se adquiera.

Aunque el enfoque del estudio no requería de una inversión gravimétrica, esta se hace necesaria en futuros proyectos ya que es una complementación para los análisis obteniendo información litológica que permita caracterizar las propiedades del medio del cual se tiene la fuente y la respuesta que produce.

A pesar de que las primeras y segundas derivadas tanto verticales como horizontales no nos permitieron identificar cuerpos valiosos de la zona, es aconsejable que se realicen cuando son campañas de zonas con menor extensión, pues se tendrán mayor cantidad de datos para un punto y se podrá identificar fuentes presentes en el subsuelo.

CAPITULO 7. BIBLIOGRAFÍA

ANH, Carson Helicopters Inc. (2006). *Adquisición, procesamiento e interpretación de datos de aeromagnetogravimetría en el litoral pacífico de Colombia.* (Informe de resultados) Recuperado de: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/AEROGEOFISICA%20PACIFICO%202006.pdf

ANH, PetroSeis. (2011). *Informe final de interpretación sísmica.* (Informe de resultados). Recuperado de: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/INTERPRETACION_2011_CHOCO_2D_2005.pdf

ANH, Universidad EAFIT. (2007). *Inventario, compilación, interpretación y evaluación integral de la información geológica, geofísica y geoquímica de la cuenca Atrato y cuenca San Juan. Arco Chocó, Colombia.* (Tesis). Recuperado de: http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/GEOLOGIA,%20GEOFISICA%20Y%20GEOQUIMICA%20CHOCO%202008.pdf

Arce, R. (2001). *Interpolación espacial. Análisis espacial.* Recuperado de: http://www.gisits.com/docs/Interpolacion_espacial.PDF

Arnaiz, M., Rodríguez, I. & Audemard, F. (2011). *Análisis gravimétrico y flexural del occidente de Venezuela.* Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v28n3/v28n3a8.pdf

Bermúdez, H., Mejía, A., Corredor, V., Numpaque, J., Restrepo, L., García, J., Rey, J., Guzmán, W., & Bedoya, E. (Septiembre, 2016). Esquema estratigráfico y paleogeografía del Occidente colombiano para el Paleógeno tardío y Neógeno. Trabajo presentado en el *XII Simposio Bolivariano 2016: Nuevas fronteras, nuevos retos*, Bogotá, Colombia.

Biblioteca Digital del ILCE (17 de octubre de 2018). *La tectónica de placas, o nueva tectónica global.* Recuperado de: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/148/htm/sec_12.htm

Bolívar, O., Sánchez, J. (2015). *Velocidades y desplazamientos en el pacífico Colombo – Ecuatoriano con base en datos de estaciones GNSS durante 2005-2015.*

Cáceres, J. (2015). *Determinación de la anomalía de Bouguer para una zona de Canadá.* Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/284564067_DETERMINACION_DE_LA_ANOMALIA_DE_BOUGUER_PARA_UNA_ZONA_DE_CANADA

Cárdenas, A., & Castillo, L. (2013). *Interpretación de datos gravimétricos con la señal analítica 3d. Estudio de caso: Los Naranjos - Facatativá (Colombia).* Boletín de Geología, 35(1), 97-107. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-02832013000100008&lng=en&tlng=es.

Defensoría del Pueblo. (2016). *Problemática humanitaria en la región pacífica colombiana.* (Informe de resultados). Recuperado de: http://defensoria.gov.co/public/pdf/Informepacificoweb.pdf

Dressler, M. (2009). Art of Surface Interpolation. Recuperado de: http://m.dressler.sweb.cz/AOSIM.pdf

Flores, D. (Mayo de 2011). *Estudio de las mediciones suministradas por la herramienta MWD (Measurement While Drilling) en varios pozos, para mejorar su posicionamiento dentro del radio del objetivo.* (Tesis). Recuperado de: http://oilproduction.net/files/CD-3590.pdf

Fowler, C. (2005). *The solid earth.* Cambridge University.

Garzón Varón, F. (2012). *Modelamiento estructural de la zona límite entre la microplaca de panamá y el bloque norandino a partir de la interpretación de imágenes de radar, cartografía geológica, anomalías de campos potenciales y líneas sísmicas.* (Tesis de maestría). Recuperado de: http://bdigital.unal.edu.co/8848/6/194358.2012.Parte_6.pdf

Geodatos, Geofísica de avanzada. (29 de agosto de 2018). *Método gravimétrico.* Recuperado de: http://www.geodatos.cl/gravimetria.php

Geología de Segovia (13 de octubre de 2018). *Glosario de términos.* Recuperado de http://www.geologiadesegovia.info/ASAM/utilidades/glosario.html

Goodacre, A.K. (1989). *Interpretación de anomalías gravimétricas y magnéticas para no especialistas.* Ontario: Comisión de geofísica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

INVEMAR, DIMAR, UAESPNN. (2002). *Expedición al Santuario de fauna y flora Malpelo. Calidad de aguas, geología y organismos del infralitoral somero.* Recuperado de: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005635/INFORME/AnexoVIExpedicionaMalpelo.pdf

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals Geophysics.* Cambridge university press

Marcaillou, B., Charvis, P. & Collot, J. (2006*) Structure of the Malpelo Ridge (Colombia) from seismic and gravity modelling.*

Michaud, F., Pazmiño, N. & Collot, J. (2009). *El karst submarino de mega depresiones circulares de la Cordillera de Carnegie (Ecuador): posible origen por*

información submarina. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/280637093_El_karst_submarino_de_mega_depresiones_circulares_de_la_Cordillera_de_Carnegie_Ecuador_posible_origen_por_disolucion_submarin

Mirónov, V.S. (1977). Reducción de la fuerza de la gravedad. *Curso de prospección gravimétrica.* (pp. 65-84). Barcelona: Editorial Reverté.

Monsalve, M., Arcila, M. (2009). *Contexto tectónico de la zona volcánica del Puracé y provincia alcalina del valle superior del Magdalena.* (Publicación de revista).

Mora, C. (2017). *Modelado de las deformaciones corticales para el departamento del Cauca, Colombia mediante la integración de datos geodésicos, geológicos y sismológicos* (Tesis).

Ramos, V. (1999). *El segmento de subducción subhorizontal de los andes centrales argentino-chilenos.* Universidad de Buenos Aires.

Sallarés, V., Cjharvis, P. (2003). *Seismic structure of Cocos and Malpelo Volcanic Ridges and implications for hot spot-ridge interaction.* Recuperado de: http://www.mantleplumes.org/WebDocuments/sallaresetalJGR2003.pdf

Servicio Geológico Colombiano (2015). *Boletín Geológico 43.* Recuperado de: https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/Seriadas/Documents/Boletin-Geologico-43.pdf

Taboada, A., Dimaté, C. & Fuenzalida, A. (1998). *Sismotectónica de Colombia: deformación continental activa y subducción.*

Ujueta, G. (2007). *Tectónica de bloques, delimitados por lineamientos de dirección NO – SE y NNE – SSO a NE-SO en el norte y nordeste de Colombia y en el noroccidente de Venezuela.* Recuperado de: http://bdigital.unal.edu.co/32490/1/32018-117364-1-PB.pdf

Universidad de Dallas. (2016) Earthquakes in Latin America. Recuperado de: http://www.utdallas.edu/~pujana/latin/PDFS/Lecture%2014%20-%20LA%20Earthquakes.pdf

Universidad Nacional de Colombia. Geología (1 de septiembre de 2018). *Gravimetría*. Recuperado de: http://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/gravimetria.htm

University of California San Diego. (12 de Agosto de 2018). Datos XYZ. Recuperado de: https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi

Vortice Barracuda (3 de septiembre de 2018). *Estratigrafía colombiana.* Recuperado de: https://sites.google.com/site/vorticebarracuda/our-company