

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MODELO ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO EN LA REGIÓN NORESTE
DEL ESTADO FALCÓN, MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE DATOS
GEOFÍSICOS**

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por la Bra. Olivero B., Vanesa A.

Para optar por el título de Ingeniero Geofísico

Caracas, octubre de 2023

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**MODELO ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO EN LA REGIÓN NORESTE
DEL ESTADO FALCÓN, MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE DATOS
GEOFÍSICOS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Janckarlos Reyes

Presentado ante la ilustre

Universidad Central de Venezuela

Por la Bra. Olivero B., Vanesa A.

Para optar por el título de Ingeniero Geofísico

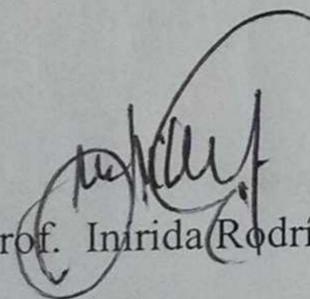
Caracas, octubre de 2023

Caracas, 31 de octubre de 2023

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Vanesa Alejandra Olivero Barreto, titulado:

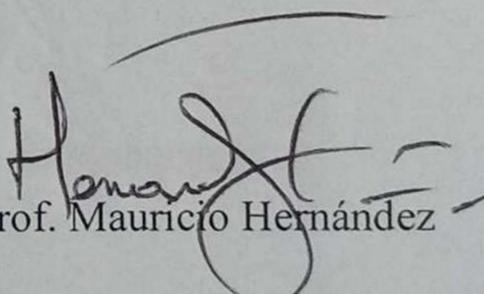
**“MODELO ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO EN LA REGIÓN NORESTE
DEL ESTADO FALCÓN, MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE DATOS
GEOFÍSICOS”**

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



Prof. Inirida Rodríguez

Jurado



Prof. Mauricio Hernández

Jurado



Prof. Janckarlos Reyes

Tutor Académico

DEDICATORIA

A Dios, a mí, a mis padres, a mi hermano y
a mis ángeles celestiales y terrenales.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme fuerzas para realizar este Trabajo Especial de Grado y culminar mi carrera universitaria.

A la Universidad Central de Venezuela por darme la oportunidad de formarme como profesional y persona, porque en su adversidad me enseñó a ser resiliente.

A los profesores que contribuyeron en mi educación en especial a los profesores del departamento de Geofísica y aquellos que dejaron en mí una huella especial, como lo son: la profesora Inírida por regalarme hilos de plata a mi cabeza, al enseñarme que siempre se puede hacer las cosas mejor; al profesor Cavada por su apoyo y por hacer de la experiencia universitaria más alegre desde sus comentarios honestos y muy especialmente, a mi tutor el profesor Janckarlos Reyes, por su apoyo y dedicación incondicional en toda la etapa profesional de la carrera, porque a mis compañeros y a mi nos ayudó a avanzar cuando las situaciones no estaban dadas, por lo cual lo considero como un gran amigo.

A mis padres Omar y Betsy, junto con mis abuelos por ser mi base, por apoyarme y educarme con el ejemplo del amor, de hacer el bien, la disciplina, del trabajo duro y honesto. A mi hermano Omar y a Zoé por acompañarme y alegrarme en los momentos difíciles. A mi super tío Eduardo por ser mi inspiración desde niña y por su cariño y apoyo tan especial. A leo, por acompañarme desde su amor incondicional a lo largo de este camino, apoyándome y entendiendo mis prioridades académicas. A mis amigos del alma “los Octanos”, en especial a Isvannis, José y Rafael porque son fuente de inspiración y motivación en mi vida. Al igual, gracias a mis compañeros y amigos que me regalo la carrera en sus distintas etapas, con mención especial al Gocho, Alix y Sirei; quienes compartieron las experiencias agradables y las no tan agradables de formación, que quedaran eternamente en mis vivencias.

Gracias a quienes esta página no alcanza para mencionar, por sus palabras de aliento en la carrera y en especial en esta etapa final.

Olivero B., Vanesa A.

**MODELO ESTRUCTURAL DEL SUBSUELO EN LA REGIÓN NORESTE
DEL ESTADO FALCÓN, MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE DATOS
GEOFÍSICOS.**

Palabras Clave: gravimetría, sísmica, deconvolución de Euler, cuenca oriental de Falcón-Falcón (Estado).

RESUMEN

Este trabajo se planteó con la finalidad de realizar el modelado estructural del subsuelo en la región noreste del estado falcón, mediante la integración de datos geofísicos. Para ello, la presente investigación se enfocó en la elaboración de 2 modelos gravimétricos (AA´ en dirección N45°E y BB´ en dirección N-S sobre la longitud 68°42'O), mediante el procesamiento e interpretación de datos gravimétricos del modelo EIGEM C-64 y de 4 líneas sísmicas del proyecto Western Geco al sur de Curazao. Además, para la elaboración del modelo se recopiló información geológica y resultados obtenidos de trabajos previos, referentes a perfiles gravimétricos, líneas sísmicas y de pozos. A partir de éstos, se infirió la geometría, y densidad de las estructuras del subsuelo. Adicionalmente, se generaron soluciones de la Deconvolución de Euler y análisis espectral a partir de los datos gravimétricos para estimar las profundidades de las distintas interfases. Se aplicaron filtros de superficies matemáticas y continuación analítica hacia arriba, para discriminar las respuestas gravimétricas debidas a cuerpos y someros y profundos. Finalmente, los resultados obtenidos permitieron concluir que, la discontinuidad de Mohorovicic buza localmente hacia el norte, mientras que, el basamento sobre la cuenca de Falcón oriental y en las islas de Curazao y Bonaire se acerca a la superficie a menos de 5 km de profundidad. Además, se observa en los modelos la presencia de altos estructurales y fallas normales e inversas en dirección SE-NO. Así como 4 secuencias sedimentarias interpretadas de la sísmica. Otro aspecto que destacar es la propuesta de un domo producto de una intrusión ígnea al noreste de la cuenca de Falcón, responsable del cierre de la cuenca.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Justificación	3
1.5 Alcances.....	4
1.6 Ubicación del área de estudio.....	4
1.7 Antecedentes.....	5
CAPÍTULO II.....	8
MARCO GEOLÓGICO	8
2.1 ASPECTO REGIONALES	8
2.2 ASPECTOS LOCALES	14
2.2.1 OCCIDENTE COSTA AFUERA.....	23
CAPÍTULO III	34
MARCO TEÓRICO	34
3.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO	34
3.1.1 Reducciones de gravedad	37
3.1.2 Anomalías Gravimétricas (A_G)	41
3.1.3 Separación Regional- Residual	43
3.2 INTERPRETACIÓN DE SÍSMICA.....	46
3.2.1 Sísmica de reflexión.....	47
3.2.2 Interfaces reflectoras	47
3.2.3 Principios Fundamentales de Interpretación Sísmica	48
CAPÍTULO IV	50
MARCO METODOLÓGICO.....	50
4.1 RECOPIACIÓN	51
4.1.1Bibliográfica	51

4.1.2 Datos.....	51
4.2 PROCESAMIENTO GRAVIMÉTRICO.....	55
4.3 INTERPRETACIÓN DE SECCIONES SISMICAS Y DE POZO.....	59
4.4 MODELADO E INTERPRETACIÓN.....	62
CÁPITULO V.....	63
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
5.1 TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA.....	63
5.2 GRAVIMÉTRIA.....	65
5.2.1 Análisis estadístico de datos gravimétricos.....	65
5.1.2 Análisis cualitativo de los datos gravimétricos.....	67
5.2.3 Espectro de potencia.....	73
5.2.4 Separación de las Anomalías Regionales y Residuales.....	74
5.2.5 Deconvolución de Euler.....	84
5.3 SÍSMICA DE REFLEXIÓN.....	86
5.3.1 INTERPRETACIÓN SISMICA.....	86
5.4 MODELADO BIDIMENCIONAL.....	95
5.4.1 Consideraciones geofísicas para el modelado.....	95
5.4.2 Modelo.....	107
5.4.2.1 Perfil AA´.....	109
5.4.2.1 Perfil BB´.....	109
CAPÍTULO VI.....	113
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	113
BIBLIOGRAFÍA.....	116
APÉNDICES.....	126

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
Tabla 1. Cuadro resumen de las unidades descritas en la Ensenada de La Vela.....	29
Tabla 2. Cuadro resumen de las unidades descritas en Golfo Triste.	31
Tabla 3. Índices estructurales para fuentes gravimétricas.....	45
Tabla 4. Estadística descriptiva de los datos de anomalía de Bouguer completa.....	65
Tabla 5. Profundidades estimadas a partir del espectro de potencia gravimétrico....	74
Tabla 6. Parámetros utilizados la Deconvolución de Euler	84
Tabla 7. Secuencias estratigráficas definidas para las líneas sísmicas	87
Tabla 8. Cuadro sinóptico de información referente a modelos.....	96
Tabla 9. Valores de densidad considerados por Rodríguez y Souza (2003).....	97
Tabla 10. Resumen de las densidades consideradas por Garzón (2007)	99
Tabla 11. Información de litología derivada de los registros de pozos	105
Tabla 12. Características de las reflexiones sísmicas	106
Tabla 13. Leyenda para de los modelos AA` y BB`	110

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
Figura I-1. Mapa de ubicación del área de estudio, generado en ArcGis Pro.	5
Figura II-1. Mapa batimétrico de la región meridional de la placa Caribe.	13
Figura II-2. Modelos de extensión cortical	16
Figura II-3. Cuenca de Falcón-Bonaire y elementos tectono-sedimentarios.	19
Figura II-4. Mapa de la Subcuenca Agua Salada en Falcón oriental.	20
Figura II-5. Correlación estratigráfica general de la cuenca de Falcón	21
Figura II-6. Mapa geológico de Falcón Oriental	22
Figura II-7. Mapa tectónico-geológico del Occidente Venezolano.	24
Figura II-8. Principales provincias del basamento	26
Figura II-9. Sistema de Fallas en la Ensenada de La Vela.	28
Figura II-10. Esquema evolutivo para la región costa afuera de Falcón nororiental. .	30
Figura III-1. Representación de las tres superficies de referencia.	37
Figura III-2. Representación de Correcciones de Anomalía de Bouguer	42
Figura III-3. Separación de anomalías de gravedad regional y residual.	43
Figura III-4. Diagrama de adquisición sísmica	46
Figura IV-1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.	50
Figura IV-2. Página de descarga de datos gravimétricos “ICGEM”	52
Figura IV-3. Página de descarga de datos sísmicos “USGS”	53
Figura IV-4. Representación espacial de las líneas sísmicas.	54
Figura IV-5. Ejemplo de la tabla de procesamiento.	55
Figura IV-6. Interfaz del programa Oasis Montaj	56
Figura IV-7. Programa Statistica	56
Figura IV-8. Resumen del control estadístico de los datos.	57
Figura IV-9. La interfaz del programa Seisee,	61
Figura IV-10. La interfaz del programa Petrel 2017.1	61
Figura V-1. Mapa topográfico-Batimétrico	64
Figura V-2. Gráficos estadísticos para de los datos de anomalía de Bouguer.	66
Figura V-3. Mapa de anomalía de Aire Libre	68

Figura V-4. a) Mapa de Anomalía de Bouguer de Falcón Oriental. 1.....	70
Figura V-4. b) Mapa de Anomalía de Bouguer interpretado de Falcón Oriental.....	72
Figura V-5. Espectro de potencia gravimétrico para la ventana de estudio.....	73
Figura V-6. Separación Regional-Residual mediante superficies matemáticas.....	76
Figura V-7 a). Separación Regional – Residual. Superficie regional.....	77
Figura V-7 b). Separación Regional – Residual. Superficie residual.....	78
Figura V-8. Separación Regional-Residual mediante “CAHA”.....	80
Figura V-9 a). Separación Regional-Residual mediante “CAHA” a 25Km.....	82
Figura V-9 b). Separación Regional-Residual mediante “CAHA” a 25Km.....	83
Figura V-10. Mapa de Deconvolución de Euler.....	85
Figura V-11 a). Perfil Sísmico de Reflexión A1.	87
Figura V-11 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión A1.	88
Figura V-12 a). Perfil Sísmico de Reflexión A2.	89
Figura V-12 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión A2.	90
Figura V-13 a). Perfil Sísmico de Reflexión A4.	90
Figura V-13 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión A4.	91
Figura V-14 a). Perfil Sísmico de Reflexión AD.	92
Figura V-14 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión AD.	92
Figura V-15. Representación 2D y 3D de los Horizontes sísmicos.....	94
Figura V-16. Modelo gravimétrico, sobre el perfil 70°O.....	97
Figura V-17. Modelos de subducción profunda, media y somera.....	98
Figura V-18. Modelo gravimétrico bidimensional.....	100
Figura V-19. Modelo de gravedad NO-SE.....	100
Figura V-20. Modelo de gravedad NE-SO.....	101
Figura V-21. Modelo de gravedad.....	101
Figura V-22. Las líneas de sísmica de reflexión en el norte de Venezuela.....	103
Figura V-23. Mapa de ubicación de los pozos en la cuenca de Falcón oriental.....	104
Figura V-24. Mapa de ubicación de los pozos en la cuenca oriental de Falcón.....	105
Figura V-25. Profundidad de topes cronoestratigráficos.....	106
Figura V-26. Diagrama de cerco a partir de las líneas de reflexión sísmica.....	107
Figura V-27. Perfiles propuestos para la generación de los modelados.	108

Figura V-28. Modelo gravimétrico AA´ SO-NE.....	111
Figura V-29. Modelo gravimétrico BB´ N-S.	112
Apéndice 1. Modelo evolutivo de cuenca “Pull apart”	126
Apéndice 2. Familia de Fallas en Venezuela y Costa Afuera.	127
Apéndice 3. Mapa estructural del occidente venezolano.	127
Apéndice 4. Mapa de contorno estructural de la profundidad al basamento	128
Apéndice 5. Cuadro de nombres litoestratigráficos del terciario Superior	128
Apéndice 6. Mapa de espesor cortical en el norte de Venezuela	129
Apéndice 7. Bloque de Bonaire.....	129

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista geográfico y geológico, Venezuela constituye un país privilegiado en la concentración de recursos de hidrocarburos. Esto se debe a que, desde el Cretácico tardío, el área comprendida desde el Golfo de Venezuela hasta el delta de Orinoco ha estado conformada por una zona de contacto transpresivo entre la placa Caribe y la placa de América del Sur. Esta condición geotectónica ha permitido la conformación de una serie de estructuras y cuencas sedimentarias que caracterizan a Venezuela como un país petrolero, con reservas de calidad, específicamente al oriente y occidente del país, siendo esta la principal razón por la que la economía de Venezuela se centra en la explotación petrolera desde el siglo pasado.

El occidente venezolano cuenta con un amplio potencial energético, es por esto que la región ha sido objeto de estudio desde la década de 1930, con la finalidad de esclarecer la complejidad estructural y estratigráfica (Ghosh *et al.*, 1997). Sin embargo, en la actualidad continúan los esfuerzos por conocer con mayor precisión las condiciones geoestructurales de la zona.

La investigación está enfocada en modelar las estructuras presentes costa afuera, al noreste del estado Falcón, mediante la interpretación de datos gravimétricos de origen satelital, en complemento con información de secciones sísmicas y de pozo disponibles para un mayor control de los resultados. Los mismos serán un aporte a la comunidad geocientífica y la industria petrolera, ya que a través de el modelado del subsuelo se puede indagar y actualizar información acerca de la morfología, profundidad, geometría y espesor de las principales estructuras y unidades geológicas.

1.1 Planteamiento del problema

Debido a la ausencia o poca información de libre acceso acerca del marco estructural y geológico presente en la región costa afuera, al noreste del estado Falcón, surge la necesidad de estudiar a fondo dicha zona mediante la integración de métodos geofísicos, con la finalidad de determinar aquellas zonas con mayor potencial prospectivo para futuras explotaciones petroleras, dada la dependencia económica y energética del país en materia de recursos de hidrocarburos.

En tal sentido, se plantea desarrollar esta investigación a partir del análisis integrado de datos gravimétricos, registros de pozo y secciones sísmicas disponibles, con la finalidad de generar modelos del subsuelo que permitan explicar las diferentes respuestas de anomalías gravimétricas que caracterizan a la zona de estudio.

Para la ejecución de este proyecto, se ha considerado la gravimetría como método principal de investigación; ya que, en comparación con otros métodos geofísicos, este permite el reconocimiento regional y local de zonas prospectivas de forma eficiente, económica y relativamente rápida. El mismo es ampliamente utilizado, por ejemplo, en la caracterización del basamento en la industria petrolera y gasífera. Sin embargo, debido a que las anomalías gravimétricas no parecen seguir exactamente la geología superficial, producto de la alteración causada por la compleja litología que compone el subsuelo (Pierre, 2012), se utilizarán secciones sísmicas y datos de pozos disponibles, para considerar la geología, tanto en superficie como su transición en el subsuelo, para generar modelos 2D con importante probabilidad de acierto.

1.2 Objetivo General

Generar modelos geológico-estructurales 2D del subsuelo, que permitan sustentar las anomalías gravimétricas observadas al noreste del estado Falcón, a partir de la integración de datos gravimétricos satelitales, secciones sísmicas interpretadas e información geológica disponible.

1.3 Objetivos específicos

- Analizar secciones sísmicas interpretadas disponibles del área de estudio para identificar posibles topes y estructuras geológicas.
- Estimar la ubicación, orientación y distribución de las principales estructuras de interés prospectivo, a partir del análisis cualitativo de las anomalías gravimétricas regionales y residuales.
- Identificar las principales estructuras someras y profundas mediante filtros aplicados a las anomalías gravimétricas presentes en el área de estudio.
- Estimar la profundidad y tendencias de las principales estructuras geológicas presentes en el área de estudio, a partir del cálculo de espectros de potencia y Deconvolución de Euler.
- Generar modelos 2D del subsuelo mediante la integración de datos disponibles de anomalías de Bouguer satelital, topografía, geología, y secciones sísmicas interpretadas disponibles.

1.4 Justificación

A partir de los resultados que se obtengan en el presente estudio, se podrá tener una mejor comprensión sobre la configuración geológica-estructural del subsuelo, constituyendo una fuente de información muy útil, la cual podrá ser utilizada para la planificación de los próximos estudios de prospección que se realicen en el futuro en esta región, bien sea tanto para fines científicos como económicos y energéticos. Adicionalmente, la metodología empleada en este estudio podrá servir de guía para otros estudios relacionados en zonas con características geo-estructurales muy similares.

1.5 Alcances

Para alcanzar los objetivos planteados, se emplearán datos gravimétricos y topográficos satelitales disponibles de forma libre en la web (por ejemplo ICGEM, la NOAA, Bureau Gravimétrique International, entre otros), los cuales serán procesados e interpretados mediante el empleo sistemas de información geográfica (Oasis Montaj, QGIS y ArcGIS Pro), con el objetivo de obtener mapas gravimétricos y proponer modelos 2D actualizados del subsuelo, que permitan ubicar e identificar las posibles estructuras geológicas que podrían estar asociadas a la presencia de hidrocarburos. Todo ello representará un aporte para la comprensión de la evolución geodinámica del límite entre la placa Sudamericana y la placa Caribe mediante sus atributos geológicos.

1.6 Ubicación del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en el margen norte de la costa caribeña venezolana, en la región occidental de la cuenca de Bonaire. La misma se extiende al noreste del estado Falcón, desde la ensenada de La Vela, hasta el noroeste de la plataforma de Golfo triste y sur de Curazao y Bonaire.

En la figura I-1, se ilustra la ubicación de la ventana de estudio, la cual abarca una superficie aproximada de 22607 km², comprendida entre las latitudes 11°00'00''N y 12° 30'00''N y las longitudes -68°15'00''O y -69°30'00''O.

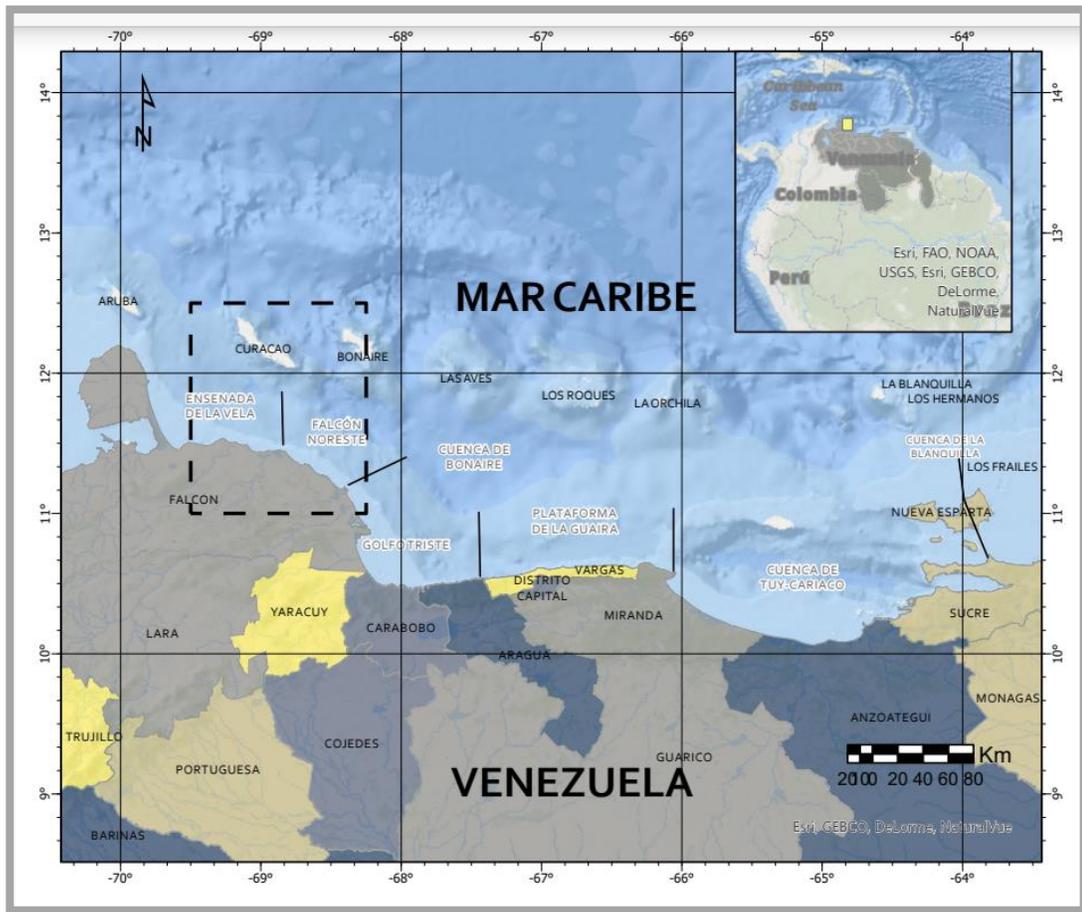


Figura I-1. Mapa de ubicación del área de estudio, generado en ArcGis Pro.

1.7 Antecedentes

La zona de investigación y sus alrededores cuentan con una amplia trayectoria de estudios de distintos enfoques y especialidades. Algunos de relevancia para la investigación son:

- Bezada *et al.* (2007) se enfocaron en estudiar la estructura de la corteza en el área de la Cuenca Falcón, en el noroeste de Venezuela, a partir de evidencias sísmicas (datos refracción sísmica y reflexión de ángulo ancho a escala de la corteza, obtenidos de la campaña sísmica del proyecto Bolívar) y gravimétricas. A partir de este estudio, dejaron como aporte un modelo VP (velocidad de onda P) de aproximadamente 450 km de longitud, de donde resaltan un adelgazamiento de la

corteza bajo la cuenca Falcón; así como también que la profundidad a la discontinuidad de Mohorovicic alcanza los 27 km desde un valor de 40 km. Otra característica reconocida fue una fase profunda en la sección de alta mar, derivada de la losa descendente del Caribe.

➤ Carrillo (2021) realizó su investigación de tipo petrofísica, sobre la subcuenca El Tocuyo, ubicada al oriente de la región de Falcón, por lo cual resulta de interés para esta investigación ya que proporciona datos de profundidad del área de investigación o cercanos a estas.

➤ Gorney (2005) estudió la cronología de los eventos tectónicos que caracterizan la cuenca de Falcón y las cuencas marinas adyacentes, a partir de datos de reflexión sísmica de la costa oeste de Venezuela y las Antillas Holandesas, en conjunto con información previa de geología y geofísica en la zona. Según Gorney (*op. cit*) tres fases tectónicas afectan a la región:

La fase 1, se originó en el Oligoceno, donde la cuenca de Falcón-Bonaire comenzó a abrirse y se inició un proceso complejo de subducción al norte de la dorsal de las Antillas Holandesas.

La fase 2, durante el Mioceno temprano, continúa la apertura de la cuenca Falcón-Bonaire, además de la migración hacia el este de la placa Caribe, que da paso a la formación de un rifting a lo largo de fallas normales N-O.

La fase 3, que corresponde al Mioceno medio-tardío, en la cual ocurre la inversión de la cuenca de Falcón y el levantamiento de los Andes de Mérida se vuelve activo, contribuyendo a la sedimentación en el restante depocentro de Bonaire.

➤ Linares *et al.* (2014), basados en la descomposición espectral de anomalías gravimétricas sobre la cuenca de Falcón y sus adyacencias, alcanzaron como resultado de su investigación un mapa de profundidad de basamento y a partir de su interpretación geológica, en conjunto con la información previa de la zona,

realizaron modelado directo sobre cuatro (4) perfiles gravimétricos, donde resaltan importantes aspectos como un sistema tectónico compresivo con componentes destrales, además del adelgazamiento cortical hacia Falcón occidental y ruptura entre Aruba y el resto de las Antillas de Sotavento.

- Rodríguez y Souza (2003) se enfocaron en la interpretación geológico-estructural de la cuenca de Falcón, a partir de un estudio multidisciplinario entre geología y geofísica a lo largo de la sección Cabo San Román-Barquisimeto, que se basó en la realización de modelos gravimétricos- magnéticos y estructurales, mediante los cuales concluyeron que hacia el centro de la cuenca, se presenta un adelgazamiento de la corteza, donde infieren vinculación a estructura tipo graben y además mencionan que la configuración actual se debe a tres regímenes tectónicos.
- Tardáguila (2008) desarrolló un estudio detallado del margen norte costa afuera de Venezuela. Este trabajo plasma información geológica de la región en un cuadro Cronoestratigráfico, que permite observar en el tiempo geológico, el desarrollo de estructuras geológicas, las cuencas sedimentarias y su relación lateral. Tardáguila *op. cit.*, infiere que, en la zona se tienen yacimientos de gas, condensado y con potenciales acumulaciones de crudos livianos.
- Ughi (2019), en su estudio doctoral de los márgenes meridional y oriental de la placa de Caribe, realizó una investigación de carácter regional, en la cual modeló 3 perfiles gravimétricos mediante la integración de datos gravimétricos, en conjunto con la tectónica. Los mismos estuvieron condicionados por la información sísmica y de pozo; a partir de los cuales, pudo interpretar la subducción de una lámina caribeña que se encuentra acoplada a la litosfera suramericana, en la región occidental de Venezuela, debajo de la cuenca de Falcón y desacoplada hacia las zonas central y oriental del mismo margen.

CAPÍTULO II MARCO GEOLÓGICO

2.1 ASPECTOS REGIONALES

La placa Caribe

A lo largo de décadas, la región del Caribe ha concentrado el interés de la comunidad geocientífica, desarrollándose así múltiples investigaciones de diversas especialidades, cuyos objetos se centran en explicar el origen y la evolución de la placa del Caribe; además de la dinámica presente entre los límites de placa. Sin embargo, Orellana (2008), destaca que, estos estudios han derivado en diversas hipótesis, que han generado una gran cantidad de debates y controversias; por ejemplo, los modelos de la Genesis del Caribe, los cuales se explican a continuación.

En torno al origen de la placa del Caribe existen modelos evolutivos opuestos. Uno de estos, es la hipótesis de formación autóctona o “*Modelo in situ*” (Meschede y Frisch, 1998), la cual establece que ésta se desarrolló en su actual posición, como consecuencia de una pluma basáltica originada durante el desplazamiento hacia el noroeste de América del Norte, entre el Jurásico-Temprano Cretácico Medio y Superior.

Por el contrario, un modelo alóctono, también conocido como “*Modelo del Pacífico*”, caracteriza el origen de la placa Caribe, el cual presenta un mayor grado de aceptación; aunque, con ciertas discrepancias al relacionarlas a las condiciones que lo generaron y al instante en que se inició el desplazamiento de la placa del Pacífico. En general, algunos autores consideran que el centro de expansión oceánica donde se originó la placa Caribe estuvo alojado en la placa el Farallón, ubicada en el Pacífico (específicamente en los Galápagos) durante el Mesozoico y posteriormente la placa migró hasta su posición actual, entre América del Norte y América del sur, como

producto de la geodinámica global (Wilson, 1966; Malfait y Dinkelman, 1972; Burke, 1988; Pindell y Barret, 1990; Mann, 1999, Pindell *et al.*, 2005 y Orihuela, 2012).

Las diferencias entre ambos modelos provienen al considerar el origen de los bloques y terrenos, la sincronización de los eventos, la configuración de las placas tectónicas y los datos paleomagnéticos (Tardáguila, 2008).

Pindell y Kennan (2001), narraron cronológicamente los eventos del modelo del Pacífico:

➤ Jurásico:

La presencia de Pangea en el Jurásico temprano, donde la sección oeste fue sometida a esfuerzos extensivos y cuyas evidencias se apreciaron en el Jurásico medio en la apertura del Atlántico Central y el Golfo de México.

➤ Cretácico:

En el Cretácico Temprano, las Américas ya se habían alejado lo suficiente para que Yucatán ocupara su posición final, permitiendo la reorganización del sistema de extensión del Proto-Caribe. Mientras, en el Albiense, el desplazamiento de la placa Caribe hacia el este, cerró progresivamente el retro arco andino, pudiendo ocasionar que la cortezas continental y oceánica al norte de este arco fuera sobrecorrida hacia el noreste, generando así la presencia de terrenos de alta presión y temperatura (metamórficos) y ocasionando la sedimentación clástica en las cuencas adyacentes

Durante el Campaniense, se registró un descenso brusco de la tasa de expansión del Proto-Caribe, lo que fue responsable del aumento de compresión entre el borde de Suramérica y el Caribe.

➤ Cenozoico:

Indican que, el Paleoceno fue testigo del levantamiento del norte de la Serranía del Interior Oriental, que comenzó producto de la subducción de la corteza del proto-Caribe bajo el antiguo margen pasivo del norte de Suramérica. Mientras, la extensión

también inició en el sureste de la placa del Caribe, conllevando a migrar hacia la Cuenca de Granada.

Durante el Eoceno medio, se generó la Fosa Caimán producto del desplazamiento sinistral (superando los 1100 km de movimiento) entre la placa Caribe y la placa norteamericana (Pindell y Kennan, 2001). Este proceso ocasionó la subducción y magmatismo en el Arco de las Antillas Menores desde aquel momento. Adicionalmente, el bloque de Chortis se acopló como parte de la placa Caribe, ya que se desplazaron en conjunto

Pindell y Kennan (*op.cit.*), estiman que, desde la transición entre el Eoceno-Tardío y el Oligoceno-Temprano, los terrenos de la Venezuela Oriental y Trinidad fueron afectados por la proximidad de la placa Caribe por el oeste. De igual forma al noreste del Caribe, la colisión continuó, ocasionando plegamiento y cabalgamiento al sur (la carga para la cuenca de Maturín). Además, la placa Farallón se fragmentó, dando origen a las placas de Nazca, Cocos y Juan de Fuca.

Pindell *et al.* (2009), comentan que la placa Caribe varió su migración respecto a las Américas durante el Mioceno tardío y, por ende, se pasó a una tectónica rumbo-deslizante este-oeste, trayendo como consecuencia un movimiento transtensional en el sureste de la misma región caribeña.

Algunas teorías concuerdan al definir a la placa Caribe como una extensa provincia basáltica (Pindell, 1994; Meschede y Frisch, 1998), cuya dirección de movimiento ha sido de oeste a este desde el Cretáceo tardío al Cenozoico temprano, con un promedio de desplazamiento con respecto a la placa suramericana de 2 cm por año (Mann, et al., 1990; Pérez *et al.*, 2001). Sin embargo, Case *et al.* (1990) y Bachmann (2001), consideraron que la placa Caribe tiene tres tipos de provincias corticales:

- Bloques corticales, con un basamento pre-Mesozoico.
- Corteza continental de edad Mesozoico-Cenozoico,
- Corteza oceánica engrosada, formada durante el Cretácico Medio.

Donnelly (1994), mencionó que, algunos estudios geofísicos y la datación por edades de las ofiolitas obducidas, demostraron que la corteza del Caribe es de tipo oceánica, aunque su espesor anómalo en algunas zonas de la placa difiere de las características del resto de las cortezas oceánicas del planeta. Bachmann (2001), atribuye la razón de este aspecto atípico, a la presencia de un “planteu” de composición basáltica vinculado con el punto caliente de los Galápagos, que ocasionó que la corteza aumentara con rapidez su espesor hacia el oeste, con valores mayores a los 25 kilómetros; mientras que hacia el este mantuviera valores similares a las cortezas oceánicas promedios.

Configuración regional

La placa Caribe es una sección rígida de la litosfera, la cual tiene un área aproximada de 4.000.000 km² (Granja, 2005) y se localiza entre las longitudes de 60°O y 90°O y las latitudes 10°N y 20° N. Esta sección del mundo se caracteriza como una zona de intensa deformación con diversas unidades geomorfológicas, cuya causa es atribuida a su interacción con las grandes placas que la circundan. Molnar y Sykes (1969), lo describe de la manera siguiente:

- En su estudio al este de la placa Atlántica, Pindell *et al.* (2009), determinaron que la placa Atlántica subduce por debajo de la placa Caribe, con dirección hacia el oeste y su límite se encuentra al este del arco volcánico de las Antillas Menores. Es decir, es un margen convergente que ha producido un magmatismo calco alcalino, aún activo en la cadena de islas de las Antillas Menores.

- Al Suroeste con la placa Cocos y al oeste con la placa Nazca. Según Pindell *et al.* (*op. cit.*), el límite occidental, en general, se ve establecido por la fosa del Pacífico, donde se identifica la subducción en dirección este de la placa de Nazca y Cocos, por debajo de la placa Caribe.

- Al norte limita con la placa de América del Norte. Orihuela (2012), indica que, se está en presencia de un borde de tipo transcurrente (con movimiento lateral sinistral alineado en dirección este-oeste). El mismo, de acuerdo Mattson (1984), se extiende desde Guatemala hasta las Antillas Menores, trayecto en el cual presenta variaciones de los tres tipos de regímenes tectónicos, ya que expone: transpresión al sur de La Española y Puerto Rico; transtensión en el paso de la Mona y en el paso Anegada; Mientras que en la Fosa Cayman hay extensión con expansión (Pindell *et al.*,2009).

- Al Sur con la placa Suramérica, este límite no se encuentra claramente establecido, razón por la cual es objeto de debate.

Según Izarra *et al.* (2005), El límite tectónico entre las mencionadas placas se basa en los regímenes tectónicos principales (Compresivo, extensional y transcurrente).

Orihuela (2012), comenta que este borde es transcurrente de tipo dextral; coincidiendo con Shubert (1984), quien justifica que esto se debe al desplazamiento de la placa Caribe a través de las zonas de fallas de Oca-Ancón, San Sebastián y El Pilar.

De acuerdo con Ostos (1990), la placa Caribe comprende 6 unidades geomorfológicas, la mitad de naturaleza positiva (crestas y elevaciones) y la otra parte consideradas negativas (cuencas), las cuales corresponden, de noroeste a sureste a: el Alto Nicaragüense, la Cuenca Colombiana, el Alto de Beata, la Cuenca de Venezuela, el Alto de Aves y la Cuenca de Granada (figura II-1).

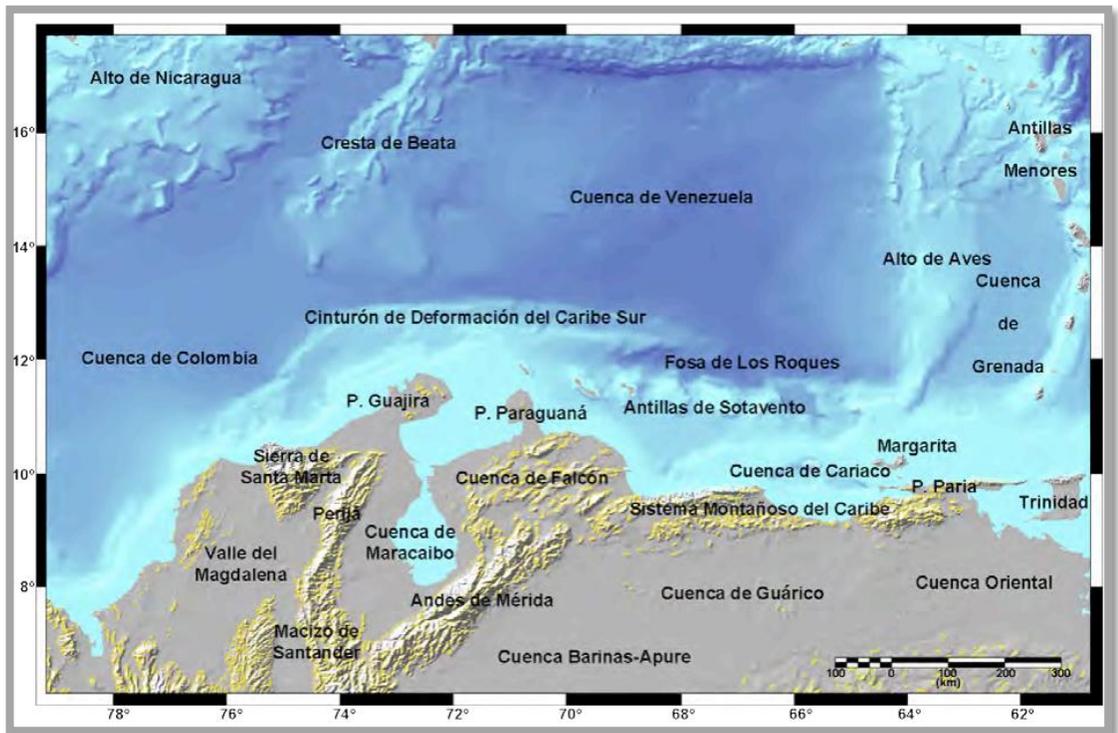


Figura II-1. Provincias geomorfológicas (cuencas, cordilleras y cadenas de islas) de la región meridional de la placa Caribe. Tomado de French y Schenk (1997).

Plataforma Caribe y Plataforma Continental de Venezuela

De acuerdo con Audemard (2001), El margen norte de la placa Suramérica, desde Trinidad y Tobago hasta la parte oeste de Colombia, se caracteriza por ser una amplia zona con combinación de deslizamiento y convergencia entre placas del tipo "transpresión tectónica". Lo que ha ocasionado una cadena montañosa como geología continental, la cual se denomina Sistema Montañoso del Caribe (SMC).

El sistema montañoso del Caribe, según Bellizzia (1985), está integrado por superposición de napas desplazadas en el norte de América del Sur, hacia el sur.

Teniendo en cuenta los estudios de González de Juana *et al.* (1980), el SMC venezolano se propaga desde la Península de Paria en el este, hasta la depresión de Barquisimeto al oeste. Además, Urbani y Rodríguez (2004), indican que, uno de los dos subsistemas geográficos (el occidental) alberga a la península de Paraguana y gran parte de las islas venezolanas.

El sector central y parte del oriental de la costa del país, está dominado por la sección montañosa de SMC, conocida como cordillera de la Costa. Sin embargo, la región occidental del país no tiene elevaciones montañosas importantes adyacentes a la línea de costa.

2.2 ASPECTOS LOCALES

Cuenca de Falcón- Bonaire

La región del mar Caribe se relaciona con la parte norte de la América del Sur, por importantes provincias geológicas, siendo una de estas la cuenca sedimentaria de Falcón-Bonaire, es decir, es una zona de transición entre el dominio oceánico y el dominio continental.

En el occidente venezolano, Audemard (1997), sostiene que, se extiende de este a oeste la cuenca de Falcón, específicamente al noreste de cuenca de Maracaibo, con una extensión de 36.000 km².

González de Juana *et al.* (1980), describió la cuenca de Falcón, como una estructura geológica elongada, cuyo eje está orientado en dirección NE-SO. Además, la misma, está limitada regionalmente por los bordes de la placa Caribe y la placa Suramérica; mientras que localmente se encuentra enmarcada por: la elevación paralela a la divisoria estatal Falcón-Lara (al sur), la divisoria Zulia-Falcón (al oeste) y por el Alto de Dabajuro - Istmo de los Médanos (al Noreste) adentrándose en costa afuera de Falcón oriental.

La historia geológica de la cuenca se puede reconstruir brevemente considerando los argumentos de varios autores (Renz,1948; Muessig, 1984; Boesi & Goddard, 1991; Audemard, 1993; Macellari, 1995; Díaz de Gamero, 1997; Pestman *et al.*, 1998; Audemont, 1999; Carnevali *et al.*, 2000; Porras, 2000; Rodríguez y Souza, 2003; Gorney *et al.*, 2007), de la siguiente manera:

➤ Paleoceno Superior-Eoceno temprano:

La interacción entre la placa Caribe y la Placa Suramérica, afectó el oeste de Venezuela, por un evento compresivo de componente dextral conocido como “Colisión Oblicua”, en el cual una masa de rocas cretácicas se emplazó en dirección sur, lo cual se definió como “el basamento alóctono del Caribe”.

En el arrastre dextral atribuido por la colisión, Pestman *et al.* (1998.) indicaron que éste se presentó en varias fases compresivas que fueron responsables de generar y desplazar las napas de la cordillera. La formación de las napas de Lara en la primera fase; el desarrollo del corrimiento de las napas de Tinaco-Tinaquillo en el Eoceno medio durante la segunda fase y por último el corrimiento de Caroca- El Tocuyo.

El basamento alóctono del Caribe es de relevancia geológica para la cuenca de Falcón, debido que, las unidades sedimentarias de la sección central y oriental de la cuenca descansan sobre el mismo (Audemard, 1993).

➤ Eoceno Tardío:

Diversos autores (Muessig, 1984; Boesi & Goddard, 1991; Carnevali *et al.*, 2000; Gorney *et al.*, 2007) plantean que, en el Eoceno tardío, se inició el proceso de desarrollo en tierra de la cuenca, el cual es conocido como “extensión cortical”. Se han planteado dos modelos de extensión cortical, estos son: el modelo “Pull apart” y “Back arc” (figura II-2).

Renz (1948) comenta que la deposición de sedimentos para ese periodo ocurre primordialmente en la región oriental de la cuenca, donde fueron almacenados inicialmente esquistos calcáreos oscuros, correspondientes a la sedimentación marina asociada a la primera subsidencia extensional.

➤ Oligoceno:

A nivel regional predominó una tectónica vertical en ambientes extensivo y transtensivo, que abrió las cuencas del margen continental, lo cual localmente, se evidenció en la cuenca de Falcón como la continuación de la extensión hacia el oeste, alcanzando su máximo desarrollo (superficie actual) y profundización en el oligoceno superior.

Díaz de Gamero (1997), considera que, en este periodo el eje de la cuenca se deprimió rápidamente y la cuenca estuvo prácticamente envuelta de regiones emergidas, razón por la cual, se le atribuyó a la geometría de la cuenca el control del depósito sedimentario, y se caracterizó a la sedimentación como poco interrumpida. Este inició con la sedimentación de areniscas y conglomerados de chert negro y seguido de sedimentos marino (esquistos oscuros). Mientras que, sobre el eje de la cuenca destaca una franja de aproximadamente 50 km de ancho, que se caracteriza por la intrusión de cuerpos ígneos entre las facies de aguas profundas.

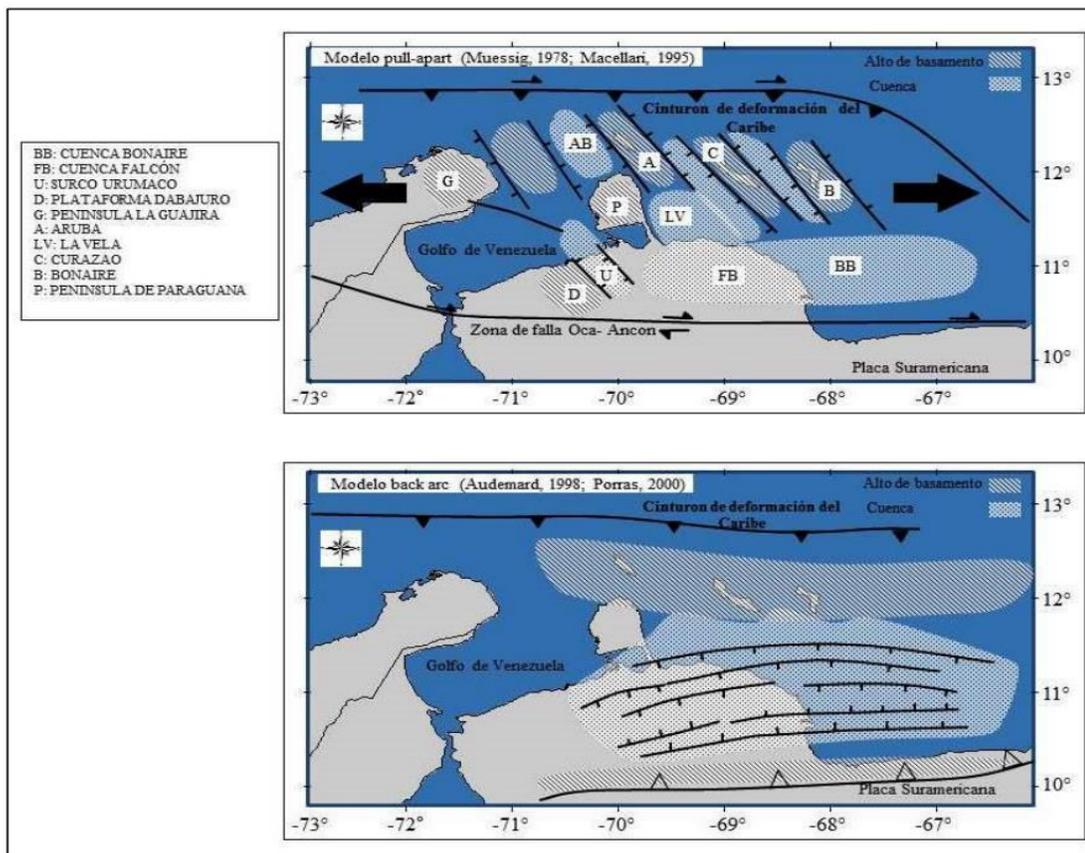


Figura II-2. Modelos de extensión cortical. a) Pull-apart: Muessig (1984), plantea en esta hipótesis que la cuenca de Falcón se originó por acción de eventos transtensionales vinculados con fallas transcurrentes (Oca, Boconó-San Sebastián y el Pilar) en el Cenozoico. Abreviatura: G (Península de la Guajira), LM (Las islas de Los Monjes), D (Alto de Dabajuro), U (Surco de Urumaco), AB (Cuenca de Aruba), P (Península de Paraguaná), A (Isla de Aruba), LV (La bahía de la Vela), C (Isla de Curazao), FB (cuenca de Falcon), BB (Cuenca de Bonaire), B (Isla de Bonaire). b) Back-arc: modelo que plantea que la cuenca de Falcón - Bonaire formo parte en el Cretácico Tardío al Eoceno de una gran cuenca retro arco asociada con el "Gran Arco del Caribe"; con relación al tema, Porrás (2000), considera que, el origen de la cuenca de Falcón está asociado a colapsos extensionales internos dentro de una cuenca de retro arco (back arc basin). (Gorney *et al.*, 2007)

➤ Mioceno:

Citando a Audemont, (1999), en el Mioceno medio, se inició una fase de relajación térmica, debido que cesó en su totalidad el magmatismo, el hundimiento tectónico extensional y la apertura de la cuenca.

Posterior al Mioceno medio no se produjo más sedimentación en la cuenca y como consecuencia, durante el Mioceno Superior, se presentó el régimen tectónico transpresivo de la falla de Oca, conocido como “Inversión de la cuenca” (se extendió desde el oeste hasta el este de la cuenca) formando así la zona positiva, llamada “Anticlinorio de Falcón” (Audemar, 1997).

Según Porras (2000), el proceso de Inversión de la cuenca es el resultado del impacto del levantamiento Andino sobre la cuenca Falcón- Bonaire, lo cual paulatinamente trajo consigo el avance de la línea de Costa y el cierre de la cuenca.

Por su parte, Macellari (1995), indica que el anticlinorio controló la sedimentación hacia el flanco norte, mientras que Rodríguez y Souza (2003) manifestaron que dicho alto positivo dividió la cuenca en dos regiones sedimentarias: una al sur (facies con características marino-someras, lacustre y fluviales) y una al norte (de facies marino-profundo a costeras).

Ahora, ampliando el marco estructural de la cuenca de Falcón, Audemard (*op. cit.*), indica la presencia de los siguientes sistemas de fallas:

- Sistema de fallas Oca-Ancón, Falla de Adicora (Fallas dextrales Este-Oeste).
- Sistema de fallas Urumaco, Río Seco, La Soledad y Santa Rita (Fallas dextrales Noroeste-Sureste, fallas sintéticas Este-Oeste).
- Sistemas de fallas de Cabo San Román, Puerto Escondido y Los Médanos (Fallas normales Noroeste- Sureste).
- Sistemas de fallas de Carrizal y de El Hatillo (Fallas sinestrales Norte Sur).
- Sistemas de fallas de Mina de Coro, Taima Taima y Chuchure. (Fallas inversas Noreste-Suroeste, sub-paralelas a los ejes de pliegues).

En general, los procesos de deformación sucedieron la cuenca a lo largo del tiempo, han condicionado las características depositacionales de las unidades estratigráficas. Aunado a esto, se considera que la variación de los depocentros y los procesos transgresivos y regresivos asociados a la tectónica activa proporcionan la alternancia en la sedimentación de material marino y continental (Ghosh *et al.*, 1997; Porras, 2000).

La cuenca se divide en dos grandes megasecuencias depositacionales: la primera se inició en el Eoceno superior y finalizó en el Mioceno inferior, marcada por sedimentos de naturaleza transgresiva (observándose lutitas), mientras que la segunda secuencia, de naturaleza regresiva, comenzó en el Mioceno medio (Carnevali *et al.*, 2000).

Falcón oriental

El área de estudio se ubica en la región de Falcón oriental, en la cuenca que lleva igual nombre, la cual limita con el mar Caribe, al noroeste con la Ensenada de La Vela, al oeste con el canal Falconiano, al sur con el Cerro Misión y la subcuenca de Casupal y al sureste con el sector costa fuera de Golfo Triste. Además, esta se subdivide por el alto de Guacharaca y Esperanza en dos subcuencas, al sur la subcuenca del Tocuyo y al norte la subcuenta de Hueque o Subcuenca Agua Salada (figura II-3).

La Subcuenca de Agua Salada es en donde específicamente se ubica la zona de investigación en tierra (figura II-4), la cual fue definida por Ghosh *et al.* (1997), como una de las diez unidades tectono-sedimentarias de la cuenca Falcón-Bonaire (Figura II-3).

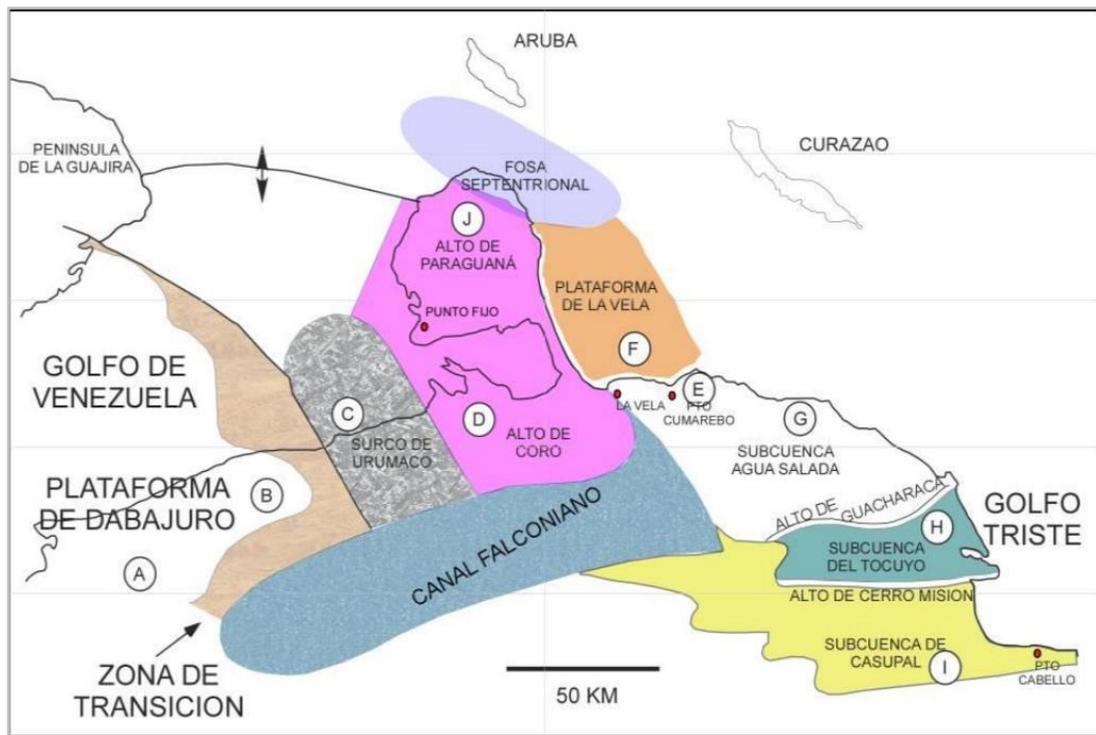


Figura II-3. Cuenca de Falcón-Bonaire y elementos tectono-sedimentarios de la cuenca. Tomado de Ghosh (1997).

La Cuenca de Agua Salada entre el Oligoceno y el Mioceno superior, según Renz (1948), se caracterizó, por ser una cuenca marina abierta con un alto volumen de sedimentación (formación Guacharaca).

Audemard (1993) comenta que durante el Mioceno inferior- medio la inversión de la cuenca no afectó el sector oriental. Sin embargo, la sedimentación de oeste a este tendió a disminuir su carácter marino profundo, aumentando los sedimentos de carácter continental (inicia la sedimentación de la formación Agua Salada, con el miembro San Lorenzo).

En el Mioceno medio-superior la cuenca conservó su forma de cuenca profunda; aunque el margen sur si fue afectado por la tectónica (Audemard, *op.cit.*). Momento para el cual se depositó la del miembro Pozón.

Díaz de Gamero (1985) menciona que en el periodo comprendido entre Mioceno tardío- Plioceno, la cuenca oriental de Falcón fue levantada con un declive

este- oeste, expuesto bajo los efectos de la erosión, la parte norte se hundió y se depositaron las calizas de Punta Gavilán en el Plioceno.

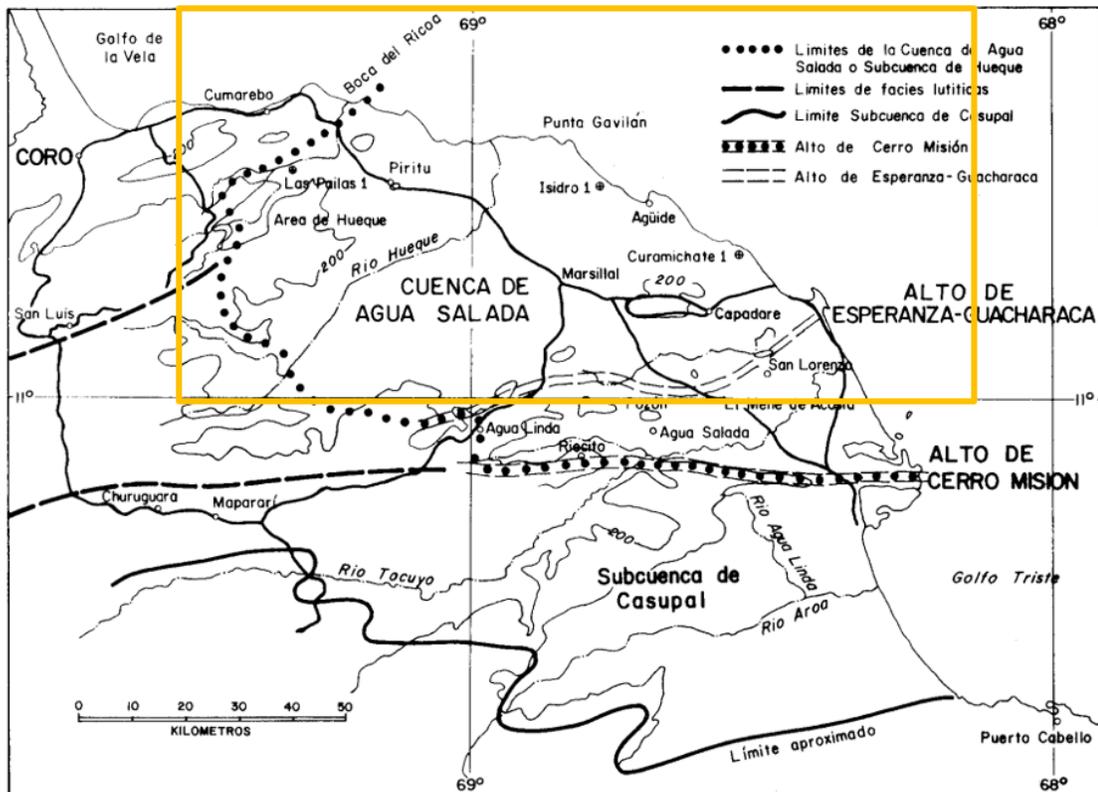


Figura II-4. Mapa de la Subcuenca Agua Salada en Falcón oriental. Recuadro amarillo: Sección correspondiente con el área de estudio. Tomado y modificado de González de Juana *et al.* (1980).

Algunas formaciones geológicas (figuras II-5 y II-6) de la Subcuenca de Hueque, descritas por González de Juana *et al.* (1980), son:

➤ La formación Guacharaca del Oligoceno-Mioceno:

Secuencia de areniscas (sección superior arenas Guacharaca) y lutitas con transición gradual, infrayacentes al grupo Agua Salada (contacto concordante y transicional por debajo de las areniscas del Mb. El Salto-Fm. San Lorenzo- Grp. Agua Salada, cuyo espesor oscila entre 235-250 m.

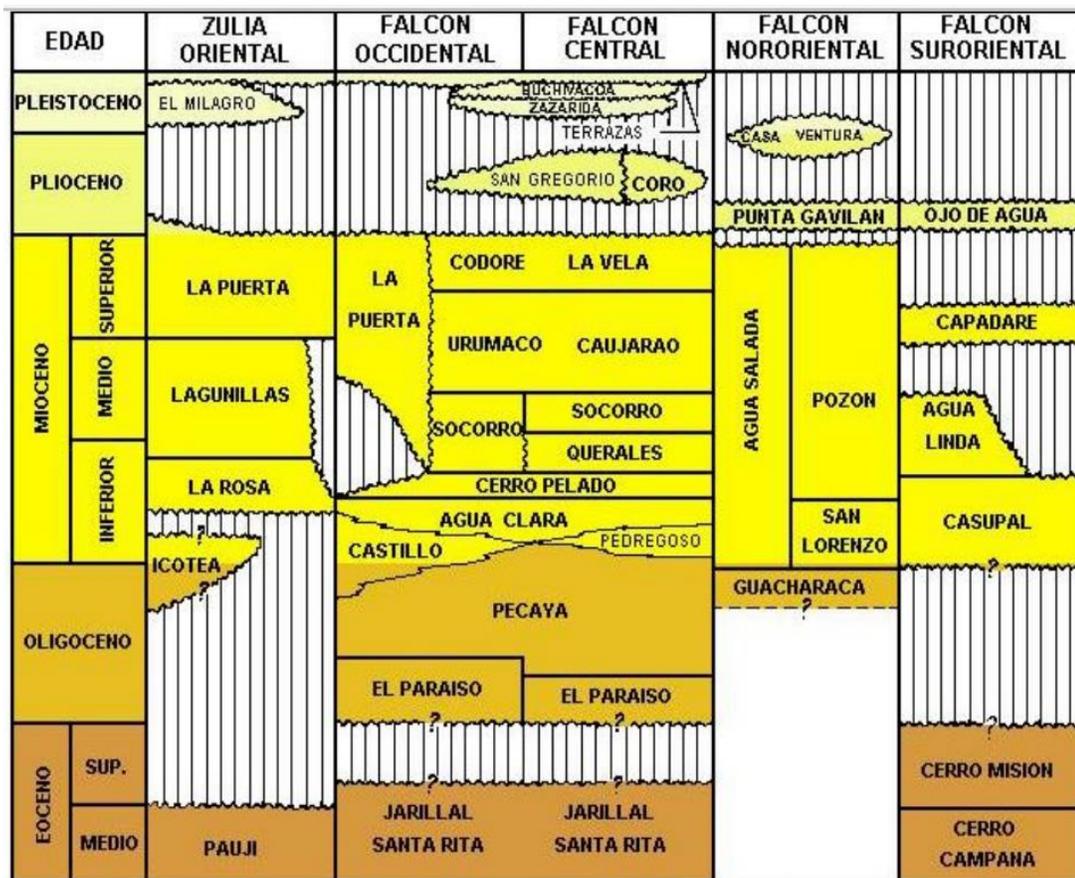


Figura II-5. Correlación estratigráfica general de la cuenca de Falcón. Tomado de Díaz de Gamero (1997).

➤ Grupo Agua Salada:

Secuencia de arcillas, limos y areniscas del Mioceno inferior al Mioceno superior.

Estratigráficamente, este grupo se compone de forma ascendente por:

- La formación San Lorenzo, tiene un espesor de 400m (hacia el oeste puede alcanzar hasta los 500m), subdivididos para los miembros:
 - El Salto, sección de arenas intercaladas con arcillas y limos de 261.5 m de espesor.
 - Menecito, cuenca uniforme de arcillas y margas de 138.5 m de espesor.
- La formación Pozón: intercalación monótona de lutitas correspondientes entre el Mioceno inferior hasta el Mioceno superior, cuyo espesor tipo es de 1042m. Está

delimitada superiormente de forma concordante con la formación Ojo de Agua e inferiormente por la formación San Lorenzo, igualmente de forma concordante.

Esta formación esta compuestas de los miembros:

- Policarpio: arenas y margas con 10m de espesor.
- Husito: 536 m de arcillas margosas, que presentan una transición concordante con el miembro anterior.
- Huso: se compone de arcillas con intercalación de margas que se acumularon en condiciones marinas a lagunares, alcanzando un espesor de 496 m. Este suprayace al miembro Huesito de forma concordante.

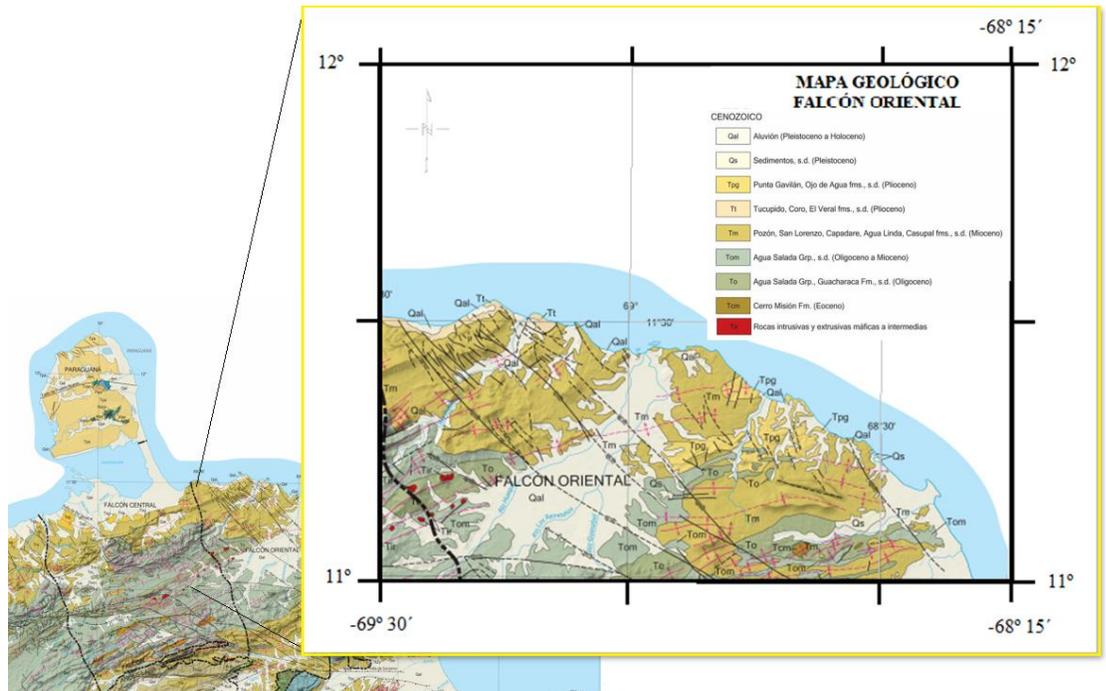


Figura II-6. Mapa geológico de Falcón Oriental, correspondiente a la ventana de estudio. Tomado y modificado de Urbani *et al.* (2006).

- Formación Solito: Se considera del Mioceno inferior y se describe como paquetes de arenisca de grano fino a medio, con espesor variable entre los 45 y 120 cm y lutitas con un espesor de 375 m.

- Formación Ojo de Agua: formación del Mioceno superior, que representa facies de ambientes marinos someros y se caracteriza por ser una unidad de arenas, arcillas y caliza con un espesor que varía entre 0 y 250 m. Esta formación tiene un contacto superior discordante con los sedimentos del cuaternario, mientras que, suprayace concordantemente al norte con la Formación Pozón, al sur con la formación Capadare y más al sur con rocas metamórficas.

2.2.1 OCCIDENTE COSTA AFUERA

Se caracteriza esta región, por presentar la zona de deformación intra-placas más ancha, debido a que se propaga desde el cinturón deformado del Caribe Sur hasta los Andes, logrando así una extensión de aproximadamente los 600 km (Silver *et al.*, 1975).

El área comprendida entre el noroeste de Venezuela y las Antillas Holandesas, específicamente en el margen continental de Venezuela y Colombia, representa un área altamente deformada, donde resalta como característica geomorfológica, la “Prominencia de Curazao o el cinturón deformado del Sur del Caribe”, la cual es una espesa secuencia de sedimentos deformados que interrumpe las secuencias sedimentarias no disturbadas de la Cuenca del Caribe (Ughi, 2002). Por otra parte, Silver *et al.* (*op.cit.*) añaden que otra característica Tectono – geomorfológica en el área, conocida como “Bloque de Bonaire”, el cual es descrito como un bloque rígido de transición entre la placa Suramérica y la placa Caribe, con forma de un prisma triangular invertido y delimitado por la Prominencia de Curazao y la Falla de Oca, lo que lo ha convertido en una zona sísmicamente activa. (Silver *et al.*, 1975; Bosch y Rodríguez, 1992; Ughi, 2002).

El marco geodinámico costa afuera de Venezuela, envuelve 26 cuencas sedimentarias, rodeadas por una serie de islas y varias zonas de importante desarrollo de plataforma continental. Tardáguila (2008) señala que, en la parte occidental de la placa Caribe, al sur de la cuenca de Venezuela, se han desarrollado las cuencas del Golfo de Venezuela, la Ensenada de La Vela y el Golfo Triste (figura II-7). Mientras que, al sur

de la Cumbre de Curazao se encuentra la Fosa de Los Roques y la cadena lineal de las islas de Aruba, Curazao, Bonaire, Aves de Sotavento y Barlovento, Los Roques y La Orchila.

De acuerdo con Lugo *et al.* (1992) la actividad tectónica en el área occidental de Venezuela se encuentra gobernada principalmente por la falla de Boconó (figura II-7), que es protagonista de la conformación de los Andes venezolanos y por el sistema de fallas de Icotea y Pueblo Viejo y las fallas de Oca Ancón y Valera. Aunque Gorney *et al.*, (2005) resalta la presencia de tres fases tectónicas que afectan a la región costa afuera, mencionadas a continuación:

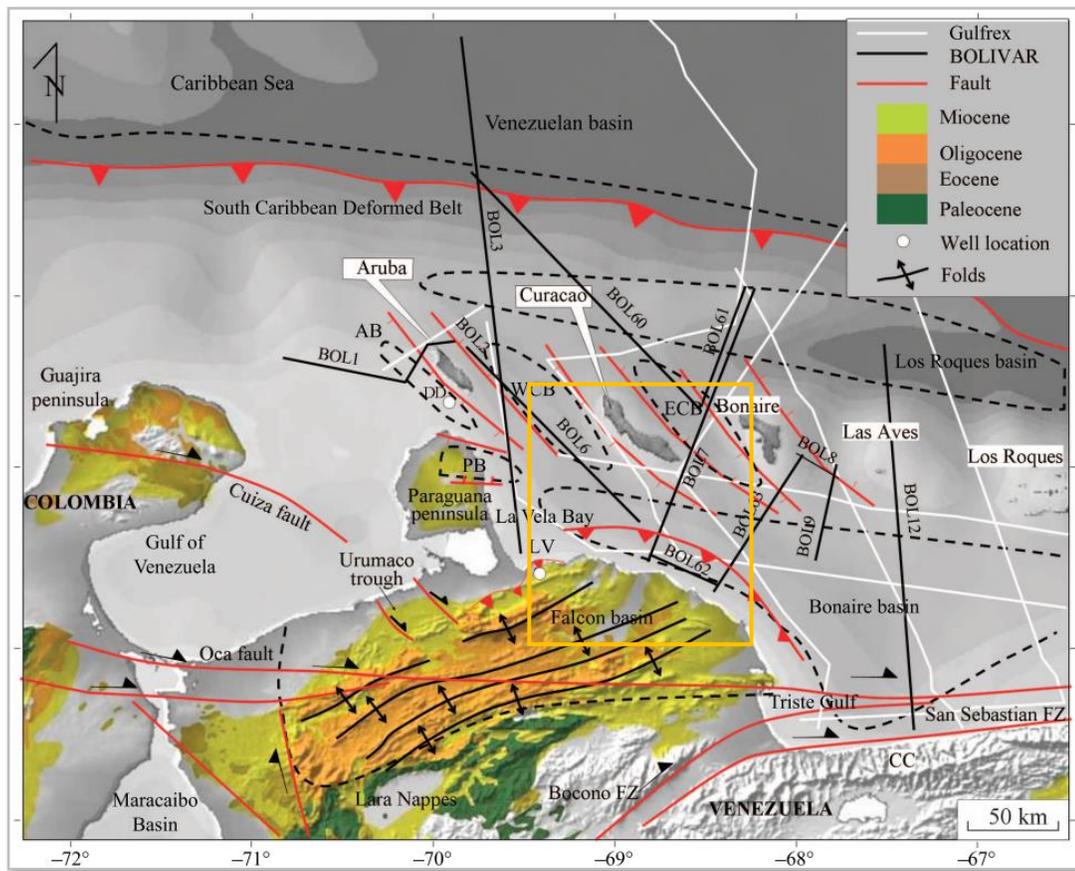


Figura II-7. Mapa tectónico-geológico del Occidente Venezolano. Incluye datos sísmicos del proyecto Bolívar y del proyecto Gulfrex. Las líneas discontinuas indican la extensión de las cuencas terrestres y marinas. AB: Cuenca de Aruba; CC: Cordillera de la Costa; ECB: Este de la cuenca de Curazao; PB: cuenca de Paraguaná; WCB: oeste de la cuenca de Curazao y LV: pozo La Vela. Recuadro amarillo: Ventana de estudio. Tomado de Gorney *et al.* (2007).

➤ Fase 1: fallas normales de dirección este-oeste

A lo largo de la costa de Falcón, se extiende un sistema de fallas normales en dirección este-oeste y de buzamiento inferior a los 45°, que se propagan a través del basamento acústico y en las capas sedimentarias más antiguas; cuyo límite superior es la discordancia del Mioceno Medio. Gorney *et al.* (*op.cit.*), menciona en su investigación, que estas fallas estuvieron activas durante la deposición de las unidades sedimentarias más antiguas de la cuenca de Bonaire.

➤ Fase 2: fallas normales de rumbo noroeste

Fallas normales con rumbo noroeste y una inclinación pronunciada entre los 50° y 60°. Estas limitan los altos del basamento de las islas de las Antillas Holandesas y controlan grandes fosas, como la cuenca de Aruba, la cuenca de Curaçao Occidental y la cuenca de Paraguaná. Las fallas se extienden desde el basamento hasta las secciones sedimentarias, las cuales muestran desplazamiento en el fondo marino, lo que indica movimientos recientes de las fallas.

➤ Fase 3: fallas inversas de rumbo oeste-noroeste

Concentración de fallas inversas frente a la costa oriental de Falcón con una extensión lateral de 150 km, desapareciendo hacia el oeste en la bahía de La Vela, donde forman el cinturón de pliegues y cabalgamientos. Además, tienen una débil expresión superficial al sur de la cuenca de Bonaire que indica su actividad reciente. Estas fallas son sub-paralelas a las fallas normales de Fase 1, y se desprenden por encima del basamento.

Provincias del basamento entre el oeste de Venezuela y las Antillas Holandesas

Basados en estudios cartográficos y datos de pozos, diversos autores concordaron y concluyeron en la presencia de tres tipos de provincias de basamento

entre el occidente de Venezuela y las Antillas Holandesas (Figura II-8), considerando el deslizamiento terciario (lateral derecho sobre la falla de Oca, alrededor de 20 km), como una de las razones de la diferenciación de las provincias, (González de Juana *et al.*, 1980; Feo-Codecido *et al.*, 1984; Macellari, 1995; Curet, 1992; Gorney, 2005 y Gorney *et al.*, 2007). Estas provincias se mencionan a continuación:

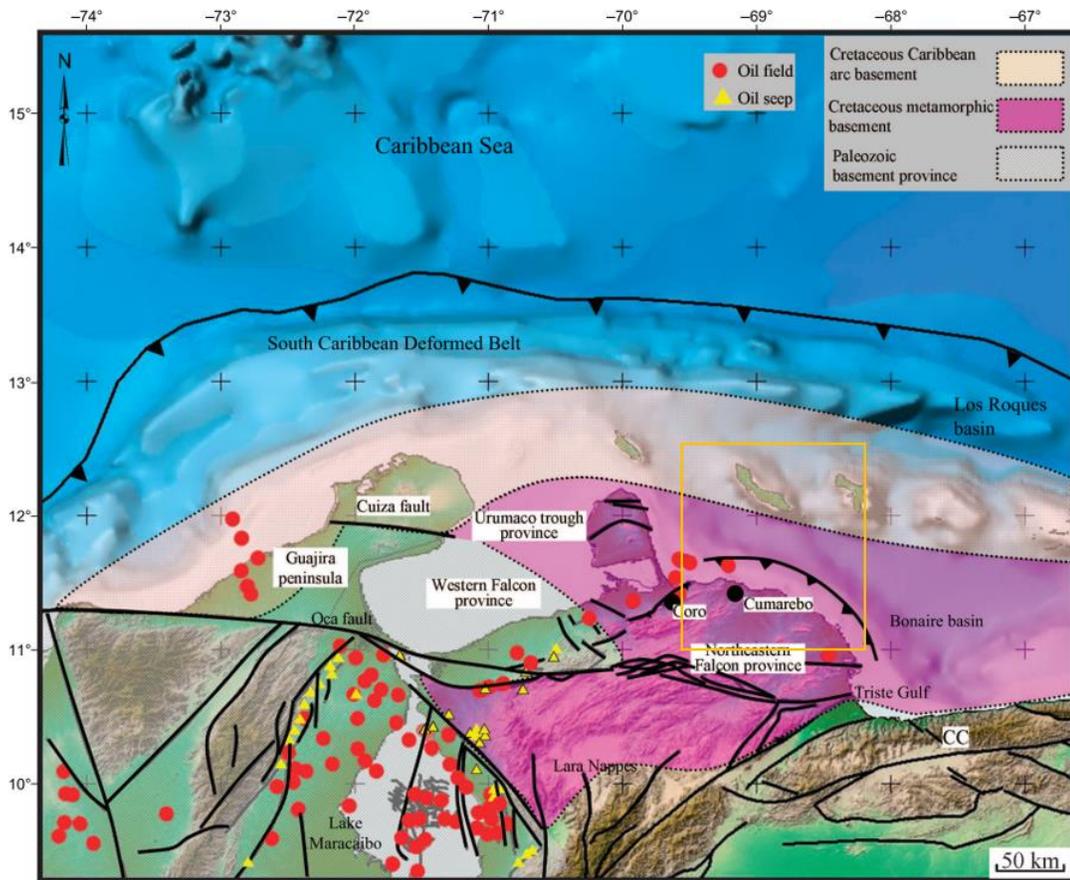


Figura II-8. Principales provincias del basamento que controlan los sistemas de la cuenca Falcón y las cuencas marinas adyacentes, Recuadro amarillo: ventana de estudio. (Gorney, 2005).

➤ Basamento Cretácico del arco caribeño

Esta provincia se caracterizó por la presencia de rocas ígneas, metamorfoseadas de edad cretácica, vinculadas al arco del Caribe. Esta descripción se realizó por datos de pozo tomados al suroeste de la isla de Aruba, en los cuales adicionalmente se identificaron basaltos oceánicos toleíticos, similares a los afloramientos ígneos cretácicos de las islas Antillas Holandesas.

➤ **Basamento Cretácico Metamórfico**

El basamento de las zonas terrestres de la cuenca de Falcón y de la bahía de La Vela, se asocia al entorno del arco posterior. En esta provincia se distinguen basaltos cretácicos relacionados con el arco; además de, gneis, filita y rocas ígneas metamorfoseadas del Cretácico que carecen de la afinidad oceánica.

➤ **El basamento continental Paleozoico**

Esta provincia está relacionada con el basamento de la cuenca de Maracaibo y, además, se vincula con el basamento descrito anteriormente; aunque, se diferencia por contener rocas del basamento paleozoico. Esta provincia se limita al oeste de la fosa de Urumaco; mientras que, la provincia anterior se dispone al este de dicha fosa.

Dirigiendo la atención hacia la plataforma de la costa oriental del estado Falcón, la cual corresponde a la ventana de estudio, se tiene que la misma es descrita en los trabajos de González de Juana *et al.* (1980), como una forma arqueada paralela a la línea de costa, de ancho variable entre 10 y 40 km. Además, ésta alberga dos plataformas más amplias: La plataforma del Golfo o Ensenada de La Vela y la Plataforma de Golfo Triste.

La Ensenada de La Vela

Es parte de la extensión costa afuera de la cuenca de Falcón, por tal razón se encuentra ubicada al norte de la plataforma oriental de Falcón.

Desde el punto de vista estructural, la Ensenada de la Vela es una plataforma ancha y con borde prácticamente semejante al de la península de Paraguaná, que según Macellari (1995), divulga regionalmente un declive en dirección Sur – Sureste. En relación con el tópico, Ghosh *et al.*, (1997) la definen como una unidad tectonosedimentarias, limitada por fallas lítricas al norte y sur.

Porras (2000), afirma, la existencia de estructuras tipos grabens o/y horst en la zona (Alineados Noroeste- Sureste), para el período del Oligoceno- Mioceno

Temprano. Dichas estructuras se encuentran soportadas en un basamento metamorfozido, sobre el cual descansa discordantemente una espesa sección de origen marino.

En la zona se identifican 5 estructuras (conformadas, de norte a sur por: una estructura entre el sistema de anticlinorio, un bloque levantado, un pilar tectónico, un domo y otro bloque levantado) enmarcadas por 3 sistemas de fallas “maestras y secundarias” (figura II-9) (CORPOVEN 1980; Phillips, 2000; Carnevali *et al.*, 2000; Girón *et al.*, 2009; Rueda, 2016 y Rojas, 2018.).

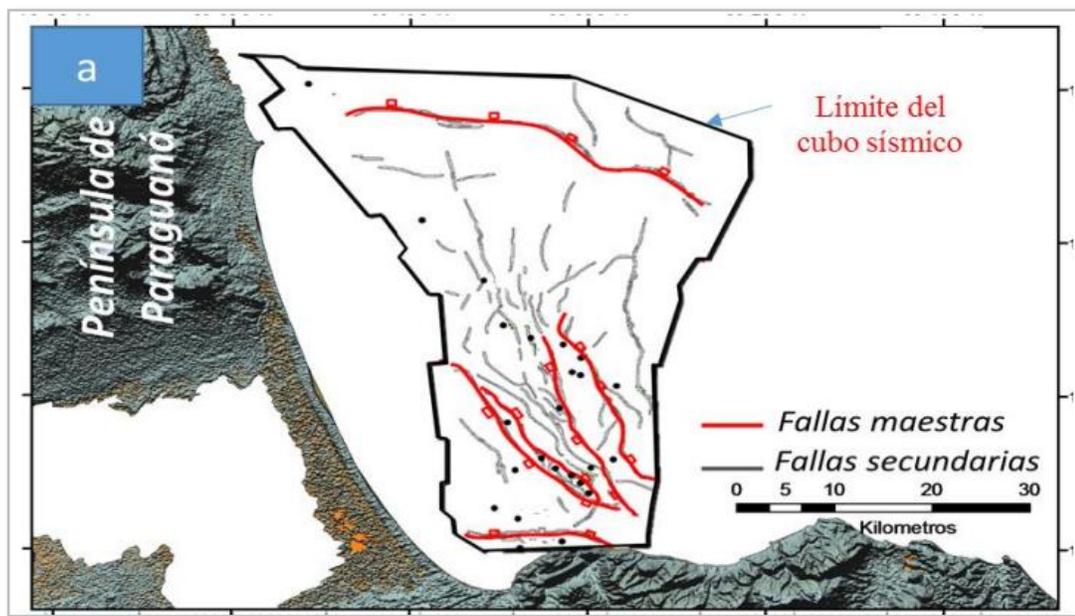


Figura II-9. Sistema de Fallas en la Ensenada de La Vela. Primer sistema: fallas lítricas (Este-Oeste) Al norte y sur de cubo sísmico. Segundo sistema: fallas normales con rasgos de transcurrancia en el centro del cubo, que delimita estructuras tipo grabens o horst. Tercer sistema: fallas normales secundarias con rasgos de transcurrancia, (Suroeste-Noreste) asociadas al segundo sistema. Tomado de Rueda (2016).

Macellari (1995), comenta que el área de la Ensenada de la Vela contiene una estratigrafía similar a la cuenca de Falcón. Por tal razón González de Juana *et al.* (1980), identificaron unidades que consideraron equivalentes a las formaciones Coro, La Vela, Caujarao y Socorro, además de, hacer referencia a la continuidad de secciones desde el Reciente hasta Plioceno-Pleistoceno. Las unidades estratigráficas se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Cuadro resumen de las unidades descritas en la Ensenada de La Vela. Tomado de Tardaguila (2008).

Formación	Edad	Litología	Ambiente
	Plioceno-Pleistoceno	Arenas friables de color amarillo verdoso, de grano fino, limolitas y arcillas de color amarillo verdoso	
La Vela	Plioceno Temprano	Arcillas de colores variados, calcarenita con poco contenido fósil, arenas de grano fino medianamente consolidadas, con lutitas compactas de color gris	Ambiente litoral con cierta influencia terrígena, Marino marginal, con una laguna costera protegida en parte por pequeñas barreras
Caujarao	Mioceno Medio a Plioceno Temprano	Arcilla de colores crema, gris claro y verde; calcarenita gris con glauconita; arenas sueltas grano medio a conglomerados; y lutitas grises, fosilíferas	Ambiente de complejo próximo-costero, conformado por laguna, isla de barrera y playa, con aporte limitado de clásticos
Socorro	Mioceno Medio	Arcillas grises y gris verdosas, calcarenitas, grano fino a medio, de color gris; lutitas grises y marrones concreciones de glauconita; areniscas grano fino a medio, color pardo	Frente deltáico, continuando con depósitos fluvio-deltáico-paludales y de llanura de mareas
Cerro Pelado	Mioceno Temprano	Lutitas marrones, calcáreas en algunas partes	Delta progradante, con todo el complejo de facies asociadas, empezando con el frente deltaico, con desarrollo de gruesas barras de desembocadura
Agua Clara	Mioceno Temprano	Miembro Cauderalito (caliza blanca, crea, gris claro, bioclástica, pirítica y calcarenita grano fino a grueso); el resto de la litología característica de esta formación se describió como un intervalo monótono de lutitas grises delgadas y escasas intercalaciones de calizas, calcarenitas y areniscas	Ambiente marino que, en su parte superior, fue sedimentada en un ambiente de escasa profundidad pasando hacia arriba a un ambiente de prodelta
Basamento		Filitas, gneises y rocas máficas. Luego le sigue unas capas rojas constituidas por arcillas y arenas rojas	

En estas secciones se tienen espesores que van desde los 4300 a 4900 ft (1,3 a 1,5 km) para la formación Agua Clara, mientras que, para la formación Cerro Pelado se tienen espesores que van desde los 3.300 a 5.900 ft (1 a 1,8 km). Luego suprayace la formación Socorro, que tiene como espesor tipo 8.300 ft (2,5 km). La siguiente en depositarse fue la formación Caujarao, con un espesor aproximado de 4000 ft (1,2 km). Por último, la formación La Vela, con espesores que varían entre 1.900 y 2.000 ft (aproximadamente 0,6 a km).

Golfo triste

Golfo Triste es relacionado con la Ensenada de La Vela y la costa noreste de Falcón (figura II-10), en lo que respecta a su evolución geológica. En consecuencia, se ubica geográficamente al sur de la plataforma oriental de Falcón, con una extensión de 28 km de ancho (González de Juana *et al.*, 1980).

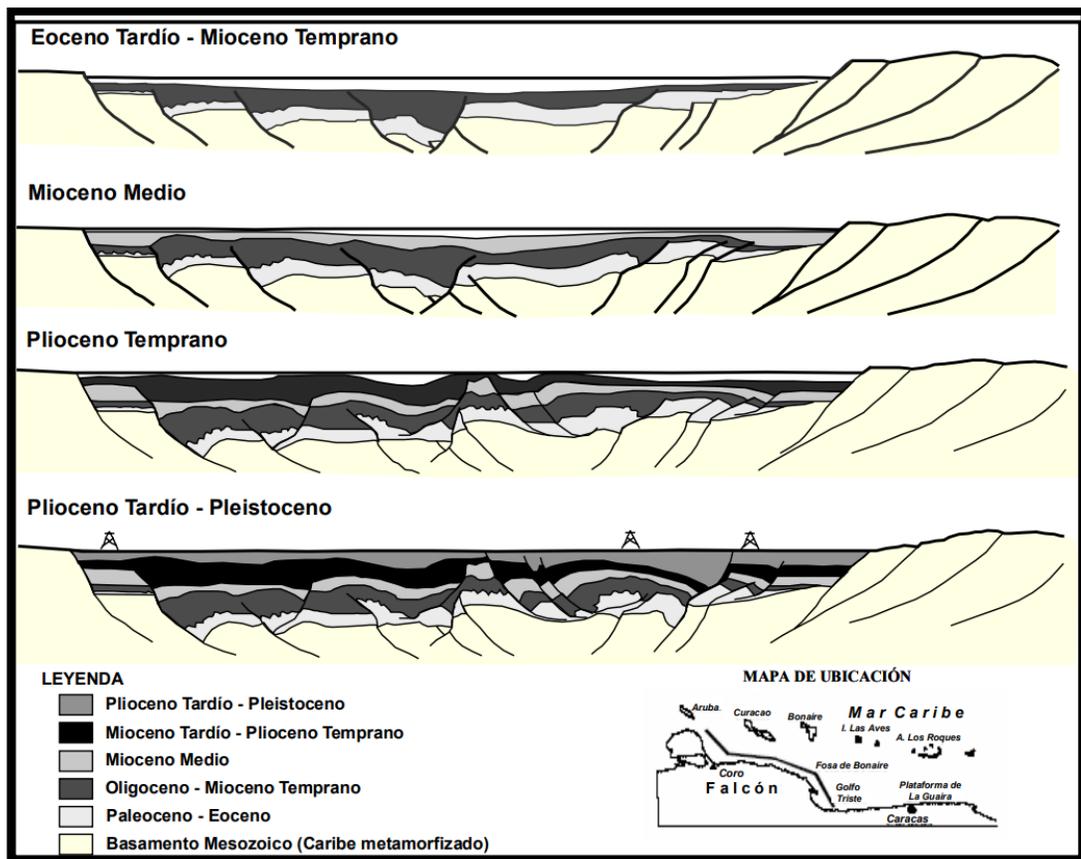


Figura II-10. Esquema evolutivo para la región costa afuera de Falcón nororiental, desde la Ensenada de La Vela hasta el Golfo Triste. (Porrás, 2000).

El marco estructural de la región del Golfo Triste es descrito por Porrás (2000), mediante periodos de actividad tectónica, en donde el Mioceno Medio en adelante, es definido estructuralmente como de tipo compresivo, producto de la tectónica andina, que se vincula directamente con la inversión de la cuenca de Falcón, razón por la cual mantiene al área del Golfo Triste en ambientes marinos someros.

Según Porras (*op.cit.*), las fallas de Boconó (la cual se extiende hacia el sur del Golfo Triste y se cree que se empalma con la falla de San Sebastián, con un rumbo Oeste-Este, tal como se observa en la figura II-7) y San Sebastián son protagonistas de la última etapa tectónica, la cual es caracterizada de tipo transtensión-transpresión. Por esta razón, se identifican estructuras de grandes dimensiones en el Golfo Triste.

La litología descrita de base a tope por Macellari (1995), son las formaciones: Cerro Misión, Guacharaca, San Lorenzo, Agua Linda-Riecito, Capadare y Pozón; éstas están descritas en la tabla 2. Posterior a su deposición ocurre el hundimiento de la cuenca del Golfo Triste debido al marco tectónico que prevalece en la región, razón por la cual se va cubriendo en forma discordante por aluviones.

Tabla 2. Cuadro resumen de las unidades descritas en Golfo Triste. Tomado de Tardaguila (2008).

Formación	Edad	Litología	Ambiente
Pozón	Mioceno Tardío- Plioceno	Esencialmente lutítica	Sedimentación a profundidades entre 200 y 600 m, de condiciones marinas normales
Capadare	Mioceno Medio	Calizas arrecifales margosas, arenáceas o limosas, y algunas areniscas calcáreas	Marino someras
Agua Linda / Riecito	Mioceno Medio	Lutitas, margas y arenas	Ambientes marinos similares a los de la Formación Pozón
San Lorenzo	Mioceno Temprano	Lutitas predominantemente calcáreas, calizas, margas, arcillas, limos y arenas	Condiciones marinas de poca profundidad, probablemente inferior a 100 m
Guacharaca	Oligoceno	Lutitas y arenas calcáreas muy finas	Marino relativamente profundo
Cerro Misión	Eoceno Tardío	Lutitas marinas calcáreas	Marino, profundidades batiales

González de Juana *et al.* (1980), identificaron tres discordancias que le permitieron definir tres ciclos de sedimentación (correlacionables con los reconocidos en la Cuenca de Agua Salada de Falcón Oriental). Estas son: la discordancia basal de las calizas de la Formación Capadare; la discordancia basal de la Formación Agua Linda, (atenuándose hacia el norte); el tercer reflector corresponde a la base de la formación San Lorenzo.

Antillas Holandesa

Aruba, Curazao y Bonaire son islas que integran a las Antillas Holandesas. A su vez, estas Antillas forman parte de uno de los arcos (en la región occidental y central) que componen las Antillas de sotavento (sucesión de islas y archipiélagos alineados Este- Oeste en las costas al norte de Venezuela (Ughi, 2019). Los cuales son producto de la colisión del Gran Arco del Caribe con el margen pasivo de Suramérica en el cretácico Tardío); razón por la cual se conocen como “Antillas Holandesas de Sotavento”.

Isla de Aruba

Aruba tiene un núcleo de rocas ígneas y metamórficas cretácicas (basaltos submarinos, diabasas, rocas volcanoclásticas y piroclásticas, de 3km de espesor), rodeado por depósitos de formaciones sedimentarias del Cenozoico superior (Priem *et al.*, 1978).

El complejo basal de esta isla está alineado en dirección noroeste- sureste y cuyas rocas más longevas de naturaleza ígnea, están soterradas por la formación Seroe Domi (Capa de ropa caliza, depositada en el Mioceno) y luego por terrazas de arrecife coral (depositadas en el Pleistoceno) (Hippolyte y Mann, 2009).

Isla de Curazao

Beets *et al.* (1977), explica que, Curazao se puede dividir por sus características petrofísicas en tres provincias geológicas: La primera es la formación Curazao Lava, datada del Albiense (5 km de basaltos almohadillados, hyaloclastos retrabajados, sills doleríticos, y una secuencia delgada de lutitas síliceas y calizas). La segunda es la formación o grupo Knip de edad Campaniense (rocas ricas en sílice y clásticos sedimentos) y la tercera región es la formación de Midden – Curazao del Cretácico

superior (conglomerado, arenisca y la pizarra). Estas unidades son localmente discordantes por capas de calizas, areniscas y arcillas del Eoceno.

Isla de Bonaire

Bonaire está descrita estratigráficamente, de base a tope por Beets *et al.* (1977), de la siguiente forma: Primero se depositó en el Albiense la formación volcánica Washikemba (5 km de espesor, con intrusiones de basalto, andesita y dacita con intercalaciones de rocas calizas); luego en el Maastrichtiense, de forma discordante se depositaron rocas calizas (espesor de 30 m en la región central y de 400 m sobre la formación Soebi Blanco).

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

El método gravimétrico o gravimetría, es un método de prospección geofísica, que consiste en detectar las variaciones y contrastes de gravedad sobre la superficie terrestre conocidas como anomalías gravimétricas, las cuales dependen de factores como: la latitud, la elevación y/o topografía del terreno, las mareas luni-solar y principalmente de los cambios de densidad de los materiales que se encuentran por debajo de la superficie terrestre, siendo éstos últimos los que representan mayor interés en el estudio de prospección geofísica. Mediante este método geofísico, es posible generar modelos geológicos, ajustados a las anomalías gravimétricas observadas, a partir de los cuales se puede interpretar las estructuras regionales o locales de una zona de estudio (Dobrin y Savit, 1988), con diversidad de aplicaciones, ya sea simplemente conceptual, o con intereses en la explotación de hidrocarburos y/o minerales.

De acuerdo con Suárez (2021), los inicios de la gravimetría como disciplina, se sustentan en dos leyes propuestas por Isaac Newton, Las cuales se describen a continuación:

Teoría de Gravedad

- Ley de Gravitación Universal (Tercera Ley de Newton): Serway y Jewett (2005), expresan que toda partícula del universo con masa m_1 atrae a otra partícula de masa m_2 con una fuerza F que es directamente proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional a la distancia R entre sus centros de masa al cuadrado, cuya notación es la siguiente:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2} \quad (1)$$

Donde F es la fuerza de atracción en dinas y G es la constante de gravitación universal con un valor $6,672 \times 10^{-11}$ ($\text{Nm}^2 / \text{kg}^2$).

➤ Ley de movimiento (Segunda Ley de Newton): ésta propone que, si una partícula experimenta una fuerza F , ésta se acelerará en la dirección y sentido de dicha fuerza. Si la fuerza F es debida a la atracción de gravedad, siendo esta fuerza conocida como el peso P de un objeto, entonces su aceleración estará dirigida en dirección vertical, y siempre apuntará hacia el centro de masa de la tierra. En tal sentido, si se considera un cuerpo de masa m cercano a la superficie de la tierra, el módulo de la aceleración será directamente proporcional a la fuerza e inversamente proporcional a su masa m y vendrá dado por la siguiente expresión:

$$F = mg \quad (2)$$

Suárez (2021), comenta que, al combinar y simplificar las ecuaciones 1 y 2 se obtiene una expresión (ecuación 3), la cual describe que la magnitud de la aceleración que experimenta un cuerpo de masa m cercano a la superficie, debida a la gravedad g de la Tierra, es directamente proporcional a la masa M de la Tierra e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia R que existe entre el centro de masa de la tierra y el objeto. De modo que:

$$mg = G \frac{mM}{R^2}$$

Donde m se cancela a ambos lados de la igualdad y entonces se obtiene que:

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (3)$$

Donde:

$M = 5,9722 \times 10^{24}$ kg y $R = 6371$ km

de lo cual finalmente se obtiene que:

$$g = 6,672 \times 10^{-11} \left[\frac{m^3}{kg \cdot s^2} \right] \frac{5,9722 \times 10^{24} [kg]}{(6.371.000 m)^2} = 9,816918 m/s^2$$

Superficies de referencia a un cuerpo planetario

La ecuación 3, de forma teórica, indicaría que la gravedad sobre la Tierra debería ser prácticamente constante. Sin embargo, como se comentó previamente, existen variaciones denominadas “anomalías gravimétricas” que dependen de factores inmiscuidos directamente con el cuerpo planetario “Tierra”.

En la geodesia y en la geofísica, es requerida una superficie de referencia (lugar geométrico de todos los puntos que tendrían igual gravedad) con la finalidad de uso geométrico para proyecciones de mapas y navegación por satélite, así como un campo de gravedad normal a la superficie de la Tierra.

Esta superficie matemática se denomina “Elipsoide de rotación, revolución o referencia” y su teoría, considera en primer lugar, que las capas que componen a la Tierra son de densidad homogénea y que la geometría de Tierra tiende a tener forma casi esférica o elipsoidal, debido a la fuerza de gravedad. Por otra parte, la fuerza centrífuga tiende a ensanchar la tierra en el ecuador y aplanarla en los polos (Li y Götze, 2001). Por ende, el cambio de gravedad desde el ecuador a los polos es de alrededor de 5 Gal o 0,5 % del valor promedio de g ($980 \text{ Gal} = 9,8 \text{ m/s}^2$), y el efecto de la elevación puede ser tan grande como 0,1 Gal o 0,01% de g (Telford *et al.*, 1990).

El “Geoide”, en cambio, es la forma de la superficie equipotencial física de gravedad, capaz de reflejar la verdadera distribución de las masas dentro de la tierra, ya que se relaciona con la geometría de la Tierra y coincide con la superficie del mar en equilibrio estático (excluyendo los efectos perturbadores temporales de las mareas y los vientos) (Lowrie, 2007). Además, se asigna una continuación ficticia por debajo de los continentes esquematizada en los distintos modelos de geoides.

A la distancia entre la topografía y el elipsoide se le designa el nombre de altura Elipsoidal h , y a la altura entre el Geoide y la topografía se denomina altura ortométrica

H , y la altura entre el Elipsoide y el Geoide se conoce como altura Geoidal N . Estas alturas se ilustran en la figura III-1.

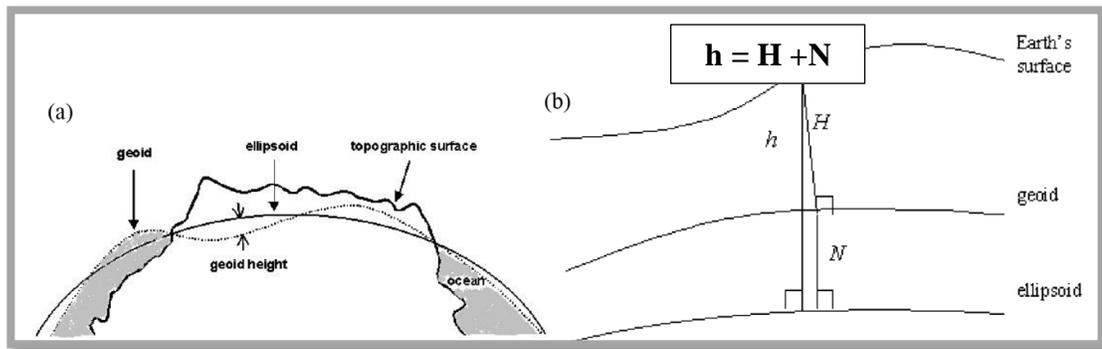


Figura III-1. (a) Representación de las tres superficies de referencia de un cuerpo planetario. (b) Relaciones de altura entre el elipsoide, geoide y la superficie topográfica. (Li y Gotze, 2001).

Densidad

Las variaciones de densidad, es el parámetro en el que se fundamenta la prospección gravimétrica, ya que, en las mediciones de gravedad, representa la manera de considerar el efecto ocasionado por los cambios de litología en el subsuelo y las posibles condiciones que este experimente. Por ejemplo: las rocas muy densas provocan mayor atracción gravitatoria, mientras que las menos densas son las que presentan menor atracción. Además, una misma litología incrementa su densidad con la profundidad de soterramiento y el consecuente aumento de la carga litostática (Chelotti *et.al*, 2009).

Milson (2003), comenta que, las rocas de la corteza terrestre poseen densidades entre $2,0$ y $2,9 \text{ kgm}^{-3}$. Aunque, el valor estándar establecido para la corteza superior es de $2,67 \text{ kgm}^{-3}$, comúnmente usado para el modelado y calcular correcciones de elevación para mapas de gravedad estandarizados.

3.1.1 Reducciones de gravedad

Los datos gravimétricos deben ser sometidos a ciertos cálculos (correcciones), ya que, como explica Chelotti *et al.* (2009), cuando se realizan mediciones de gravedad

en la superficie de la Tierra, éstas se ven afectadas por diferentes factores, tales como: mareas, superficie topográfica, altura, entre otros; que no son de interés geológico, por ende, los valores deben ser corregidos para ajustar los valores observados con el comportamiento real de la Tierra.

Estas correcciones son las siguientes:

➤ Corrección de aire libre (C_{AL})

De acuerdo con Lowrie (2007), es aquella corrección que ignora los efectos de masa del material y que se interesa en eliminar el efecto de la elevación h adscrito a la estación de observación donde se realice la medición, para reducir las lecturas a un nivel de referencia uniforme. Esta corrección tendrá signo positivo, si la estación se encuentra por encima del nivel de referencia, para compensar la disminución de la gravedad debida al mayor distanciamiento del centro de la Tierra, y tendrá signo negativo en caso contrario (Telford *et al.*, 1990).

Para calcular la corrección se tienen dos expresiones:

➤ Aproximación de primer orden:

$$C_{AL} = 0,3086 h \text{ [mGal]} \quad (4)$$

➤ Aproximación de segundo orden dada por Hinze *et al.* (2005):

$$\Delta g_{\text{gal}} = -(0,308769 - 0,0004398 * \sin^2 \phi) * h + 7,2125 * 10^{-8} * h^2 \text{ [mGal]} \quad (5)$$

Dónde ϕ representa latitud en grados y h la diferencia en metros entre el datum o nivel de referencia y la estación medida.

➤ Corrección de Bouguer (C_B)

Esta corrección se vincula directamente con el parámetro de la gravimetría, es decir, la densidad. Es por ello por lo que se aplica para corregir el efecto que generan los cuerpos rocosos que se encuentran entre la estación de medición y el nivel de referencia (Lowrie, 2007). Esta corrección se calcula al suponer que las capas terrestres

entre la estación y el datum vertical se pueden representar por una placa horizontal, con una altura h y densidad ρ_B constantes.

$$C_B = 0,04191 \rho_B h \quad [\text{mGal}] \quad (6)$$

Si la estación se encuentra por encima del nivel de referencia, esta corrección deberá tener signo negativo para poder remover el efecto de atracción ejercido sobre la estación por el material ubicado entre ésta y el nivel de referencia; en caso contrario, deberá tener signo positivo para contrarrestar el déficit atractivo de la lámina faltante de material. De este modo se observa que el signo de esta corrección es siempre opuesto al de la corrección de aire libre (Telford *et al.*, 1990).

➤ Corrección de Latitud (G_{Teo})

La corrección de latitud también es conocida como gravedad teórica. Esta se refiere a la variación de la gravedad observada en un punto, debido a la latitud en la cual se encuentra la estación, y resulta, en primer lugar, a las diferencias en la forma del geoide respecto a la superficie matemática de mejor ajuste (contribuye cerca de un 40 %) y por otra parte, se debe al efecto ocasionado por la rotación del planeta (un 60% de contribución), ya que la velocidad angular desde un punto de la superficie, disminuye desde un máximo en el ecuador hasta cero en los polos (Fowler, 2005).

Para contrarrestar los efectos mencionados previamente, se calcula el valor de gravedad a nivel del mar en cualquier punto de la superficie de la Tierra y se resta de la gravedad observada para corregir la variación por latitud, mediante la fórmula Somigliana (1980):

$$G_{Teo} = \frac{g_e (1+k(\text{Sin}(\varphi))^2)}{\sqrt{1-e^2(\text{Sin}(\varphi))^2}} \quad [\text{mGal}] \quad (7)$$

Donde g_e es la gravedad normal en el ecuador del elipsoide de referencia GRS80, con un valor de 978032,67715 mGal. Mientras que, k es una constante de valor igual a

0,001931851353. Entre tanto φ es la latitud y por último e es la primera excentricidad numérica, cuyo valor elevado al cuadrado es 0,0066943800229.

➤ Corrección atmosférica (G_{Atm})

Xiong *et al.*, (2006) explican que, en una estación sobre la superficie terrestre, el efecto gravitatorio de un modelo de masa atmosférica puede ser calculado con un error de 0.01 mGal a alturas superiores a los 10 km. Este efecto puede ser restado de la gravedad teórica o añadido a la gravedad observada, ya que el elipsoide de referencia toma en consideración esta masa sin medir su efecto gravitatorio, asumiendo que la atmósfera consiste en una cubierta esférica homogénea.

$$G_{Atm} = 0,874 - 9,9 \times 10^{-5}h + 3,56 \times 10^{-9}h^2 \quad [\text{mGal}] \quad (8)$$

➤ Corrección topográfica (C_T)

Es la corrección que toma en cuenta los relieves y busca eliminar el efecto de depresiones y elevaciones en el terreno, no tomados en cuenta por la corrección de Bouguer. Esta corrección siempre es positiva, ya que contrarresta el efecto negativo de las montañas por encima de la placa o el efecto de la placa en un valle (Milson, 2003). La corrección topográfica se realiza calculando las diferencias de alturas entre el terreno y la estación de medición. Anteriormente, se realizaba mediante el gráfico Hammer, el cual se dibujaba en papel semi transparente sobre el mapa de elevación, y se calculaba la diferencia de alturas en un radio cercano, intermedio y lejano a la estación de medición. Si embargo, debido al laborioso trabajo que se realiza al realizar este método, en la actualidad, gracias al avance de la informática, se ha optimizado el tiempo y trabajo, mediante el uso de algoritmos computacionales definidos por Nagy (1966) y Kane (1962). Un ejemplo es el programa Geosoft Oasis Montaj, que a través de su módulo Gravity and Terrain Correction es posible realizar esta corrección topográfica.

➤ Corrección por mareas:

Kearey *et al.*, (2002), explican el uso de esta corrección, debido a la variación periódica de la gravedad en un mismo punto, a consecuencia de los efectos gravitacionales que el Sol y la Luna ejercen sobre la tierra y están asociados con sus movimientos orbitales (mareas lunares y solares). En la actualidad, existen distintos algoritmos computacionales que calculan la corrección por mareas considerando la latitud geográfica, fecha y hora de adquisición (Telford *et al.*, 1990).

3.1.2 Anomalías Gravimétricas (A_G)

Las anomalías gravimétricas, de acuerdo con Lowrie (2007), son la diferencia entre el valor conocido de la aceleración de la gravedad en una estación de referencia en la Tierra (gravedad observada o en forma abreviada: G_{obs}) y la gravedad teórica (G_{teo}), como se indica en la expresión 9. Estas son medidas considerablemente pequeñas, en relación con el valor medio de la gravedad de la superficie (981 cm/s^2), por lo cual, la unidad más conveniente para expresarla es conocida como el miligal (mGal), equivalente a 10^{-3} cm/s^2 (Udías y Mezcua, 1997; Fowler, 2005).

$$A_G = G_{obs} - G_{Teo} \quad [\text{mGal}] \quad (9)$$

Una anomalía de gravedad resulta de la distribución no homogénea de densidad en la Tierra y su aparición se ve afectada por las dimensiones, densidad y profundidad del cuerpo anómalo (Lowrie, *op.cit.*).

➤ Anomalía de aire libre (A_{AL})

Esta anomalía de acuerdo con Lowrie (2007), sólo considera los cambios de altitud (corregidos por la Corrección de Aire libre C_{AL} como se ilustra en la Figura III-2) y los efectos atmosféricos. En otras palabras, es la diferencia entre la gravedad observada G_{obs} y el modelo, considerando la gravedad teórica G_{Teo} en el elipsoide GRS80 y el

efecto atmosférico C_{Atm} presente en la localidad o estación. Esta se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$A_{AL} = G_{Obs} \pm C_{AL} + C_{Atm} - G_{Teo} \quad [\text{mGal}] \quad (10)$$

➤ Anomalías de Bouguer (A_B)

Udías y Mezcua (1997), concuerdan en que las anomalías de aire libre excluyen las masas presentes entre la estación de observación de la gravedad medida y la superficie de referencia; razón por la cual, adicionalmente se implementa la corrección de Bouguer C_B , para contrarrestar el efecto de atracción generado por la disposición, densidad y forma de las rocas del subsuelo, en las estaciones de observación. No obstante, si se ignora el efecto de las masas, ésta se suele denominar anomalía de Bouguer simple (Figura III-2. b).

Por otra parte, la anomalía de Bouguer completa (Figura III-2.c), considera absolutamente todas las correcciones mencionadas anteriormente (corrección de aire libre C_{AL} , corrección de Bouguer C_B , corrección atmosférica C_{Atm}) sobre la medida de gravedad observada G_{Obs} , incluyendo el efecto topográfico alrededor del punto de medición o también conocido como corrección topográfica C_T .

La expresión de la anomalía de Bouguer completa es la siguiente:

$$A_B = G_{Obs} \pm C_{AL} \mp C_B + C_{Atm} + C_T - G_{Teo} \quad [\text{mGal}] \quad (11)$$

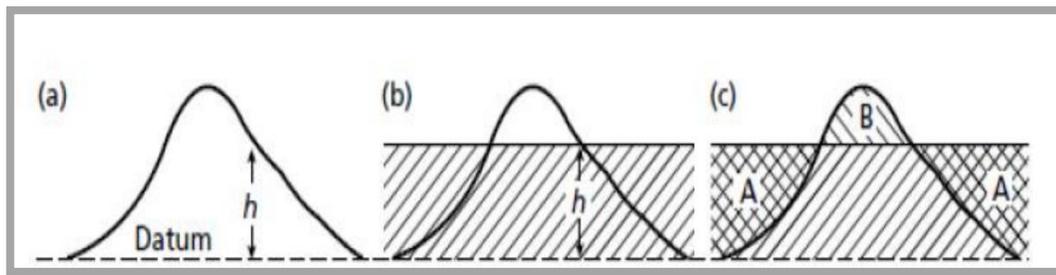


Figura III-2. Representación de Correcciones de Anomalía de Bouguer. a) La Corrección de Aire Libre para una observación a una altura h encima del dato. b) La corrección Bouguer. La región sombreada equivale a una losa de roca del grosor h extendiéndose al infinito en ambas direcciones horizontales. c) La corrección del terreno. Tomado de Lowrie (2007).

3.1.3 Separación Regional- Residual

Los mapas gravimétricos manifiestan generalmente el efecto combinado o superpuesto de varias fuentes (Lowrie, *op.cit.*). En este sentido, se hace necesario para la investigación, separar las anomalías de carácter regional, de las de carácter residual, para evitar así que la interpretación se vea afectada simultáneamente por uno u otro efecto (figura III-3).

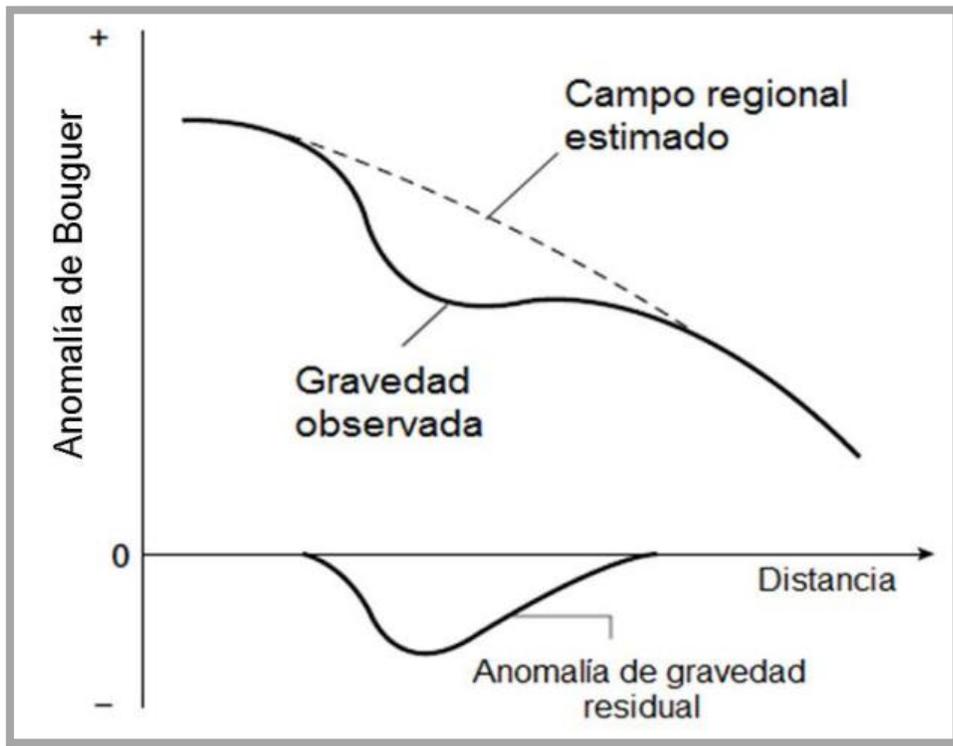


Figura III-3. Separación de anomalías de gravedad regional y residual a partir de anomalías de Bouguer. Tomado de Kearey *et al.* (2002).

Las anomalías regionales, se caracterizan por ser de alta amplitud y baja frecuencia y son consecuencia del contraste de densidad en las regiones inferiores de la corteza terrestre y las superiores del manto. Además, permiten determinar rasgos geológicos a nivel macro-regional, tales como contacto de placas, crestas oceánicas, cuencas y discontinuidades. Mientras que, las anomalías residuales son de baja amplitud y alta frecuencia y son producidas por contraste de densidad en las regiones

intermedias y superiores de la corteza; su estudio permite determinar efectos someros como fallas, domos de sal y anticlinorios (Lowrie, *op. cit.*).

Algunas herramientas para esto son:

➤ Análisis espectral

Sánchez Jiménez *et al.* (1998), explicaron que, el análisis espectral de datos de anomalías gravimétricas es un método que, permite separar la contribución de distintas fuentes de anomalía de gravedad, debido a que, proporciona una estimación de la profundidad media en la que se encuentran las distintas fuentes que genera el campo observado.

Spector y Grant (1970), plantearon que, este método matemático, consiste en transformar los datos del dominio espacial al dominio de la frecuencia, a partir de la transformada de Fourier, específicamente mediante el espectro de potencia radial; el cual, consiste en graficar la longitud onda ($1/k$, inverso del número de onda) en función del logaritmo de la potencia $Ln(P)$.

A partir del gráfico del espectro, se identifican los rangos de longitudes de ondas, donde exista una relación lineal en conjunto con las respectivas pendientes ($m_1, m_2, m_3...$) de la curva, pudiendo así calcular la profundidad Z a la que se encuentra el tope de un cuerpo geológico (Spector y Grant, *op. cit.*; Cahuana, 2012). Esta profundidad puede ser estimada mediante la fórmula:

$$Z = \frac{m}{4\pi} \quad (12)$$

➤ Deconvolución de Euler

De acuerdo con Bello (2018), el objetivo de la deconvolución de Euler es el de producir, en un mallado bidimensional, un mapa que muestre las localizaciones y las estimaciones de profundidades de las correspondientes fuentes de anomalías

gravimétricas y/o magnéticas asociadas a elementos geológicos (tales como fallas o contactos geológicos), logrando así definir las, delinearlas y establecer sus tendencias preferenciales.

Zhang *et al.* (2000), explican que, para alcanzar el objetivo mencionado previamente, este procedimiento matemático, utiliza los tres gradientes ortogonales del potencial de gravedad. Además, que este procedimiento está basado en el desarrollo de la ecuación de homogeneidad de Euler, mostrada a continuación:

$$(x - x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial f}{\partial z} = N(f - B) \quad (13)$$

Donde f representa el campo total gravimétrico o magnético, mientras que x_0 , y_0 y z_0 son las posiciones de las fuentes anómalas, donde el campo total f es detectado en un punto de coordenadas x , y y z , estimado para un valor regional de la gravedad B y un Índice Estructural N (o también denominado IE).

La ecuación (13) se expresa en función del índice estructural (IE). El cual, se entiende como la proporción de cambio de un campo con el aumento de la distancia a la fuente. Por ende, también se asocia a la geometría de la fuente (Reid *et al.*, 1990).

Orihuela y García (2015), destacan que, los valores de referencia del índice estructural se determinan mediante modelos de geometría simple, que consideran la mejor representación geológica. Estos valores se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Índices estructurales para fuentes gravimétricas (G) y magnéticos (M) de diferentes fuentes geométricas. Tomado y modificado de Reid y Thurston (2014).

Geometría de la fuente	IE(G)	IE(M)
Esfera	2	3
Cilindro Vertical	1	2
Cilindro Horizontal	1	2
Diques	0	1
Sill	0	1
Contactos	-1	0

3.2 INTERPRETACIÓN SÍSMICA.

Método Sísmico

Método basado la propagación de ondas elásticas de origen artificial (figura III-4), mediante el uso de explosivo, masas pesadas” mandarria”, vibroseis o pistolas de aire (ya sea en la sísmica de pozo o sísmica marina), cuyo objetivo radica en el estudio general del subsuelo, desde sus estructuras, hasta su composición litológica, para la detección de estructuras de interés, asociados, por ejemplo, a yacimientos de hidrocarburos (Maita, 2010).

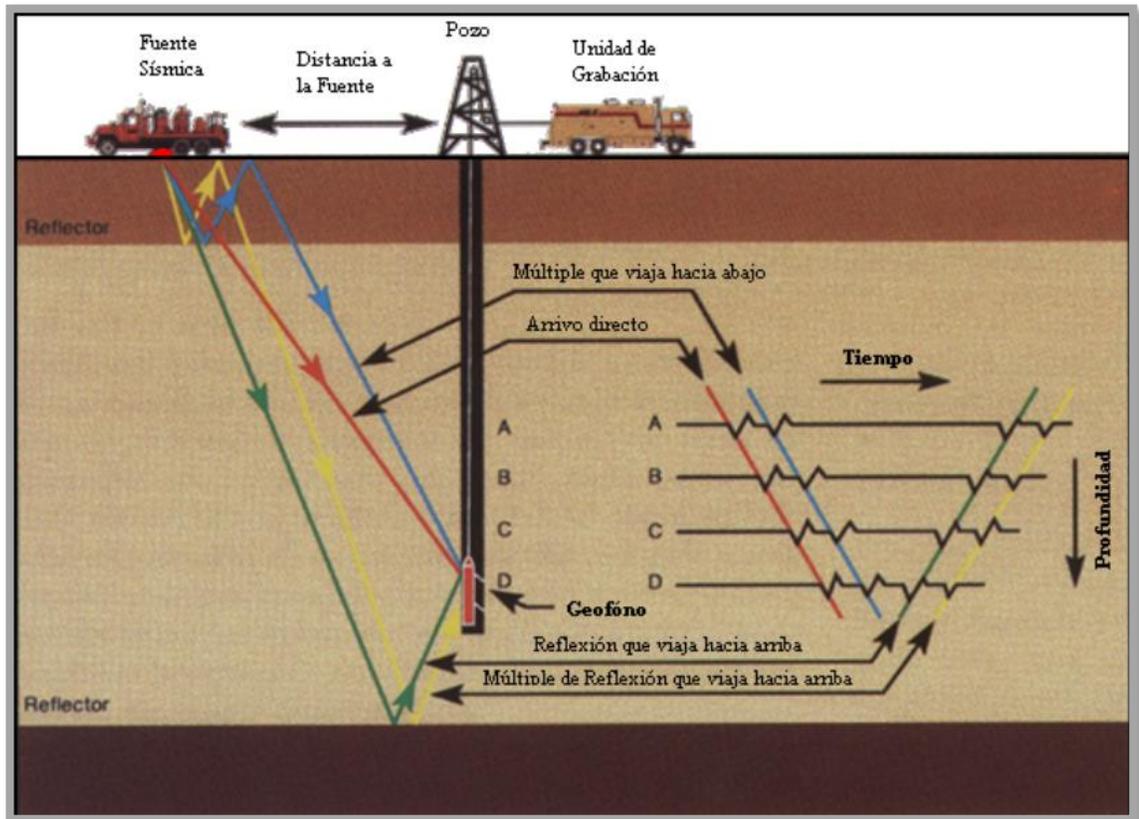


Figura III-4. Diagrama de adquisición sísmica. (Schlumberger, 2007).

3.2.1 Sísmica de reflexión

El método de prospección sísmica de reflexión es una de las técnicas geofísicas más conocida y usada en la actualidad; en virtud que, se trata de uno de los métodos de mayor aporte de información del subsuelo (principalmente en la industria de los hidrocarburos). Esta técnica abarca desde la búsqueda de recursos minerales, hasta estudios de geotecnia e incluso arqueología y estudios de riesgo ambiental (Keary *et al.*, 2002).

El objetivo primordial de esta variante prospectiva es la de estimar, mediante el procesamiento y análisis de las señales de las ondas recibidas (ondas que se reflejan y se refractan en su tránsito por el interior de la Tierra), las posiciones de las diferentes capas que conforman el subsuelo. Éste método, no se restringe a únicamente registrar el tiempo de primer arribo en cada traza (como en sísmica de refracción) o medir profundidades, sino que también mide los tiempos de viaje (ida y vuelta) que tardan en viajar las ondas sísmicas, desde que son generadas en superficie, hasta retornar nuevamente a esta y ser detectados por los receptores que se encuentran en la superficie (geófonos o hidrófonos, según sea el caso), luego de haberse reflejado o refractado en las diversas interfaces geológicas del subsuelo, a una determinada profundidad (Regueiro, 1997).

3.2.2 Interfaces reflectoras

Chelotti *et al.*, (2009), aseguran que las superficies sísmicas, también conocidas como horizontes, nivel guía, reflector o marker, son aquellas que muestran en su expresión geológica, el resultado de unos rasgos de sedimentación originales (alterados estructuralmente por la tectónica posterior).

Ahora bien, la representación de un contraste de impedancia acústica se conoce como el horizonte reflector.

Impedancia

La impedancia acústica, se define como el producto de la densidad por la velocidad de un medio (Schlumberger Oilfield Glossary). Los cambios litológicos de cualquier origen casi siempre implican contrastes en las impedancias acústicas, aunque hay algunos casos en que esto no sucede (Chelotti *et al.*, *op.cit.*).

La impedancia acústica variará, si existe un cambio en las condiciones del ambiente sedimentario dentro de un mismo tiempo geológico, lo cual se refleja en una variación lateral del tipo de litología. No obstante, los contrastes verticales, serán indicativos de los cambios en las condiciones de depositación (Chelotti *et al.*, *op.cit.*).

3.2.3 Principios Fundamentales de Interpretación Sísmica

Espeso (2018), argumenta que el propósito básico de la interpretación sísmica es determinar a partir de los datos sísmicos, el significado geológico (unidades estructurales y estratigráficas de un área; así como también, extraer información acerca de las propiedades de las rocas y quizás cambios de espacio y tiempo en los fluidos) donde, además, se puedan complementar a otras disciplinas geológicas para establecer modelos estructurales y estratigráficos confiables. Por esta razón, Regueiro (1997) sostiene que la interpretación de la sísmica 2D y 3D, sustenta los modelos geológicos. Por ende, resulta importante conocer los principios básicos sobre los que se fundamenta la interpretación sísmica, los cuales son:

➤ Continuidad

Propiedad que permite detectar alineaciones de un pulso sísmico en trazas sucesivas, razón por la cual dan características de continuidad a lo largo de las secciones (reflectores).

La continuidad lateral será mayor o menor dependiendo de cuán estables lateralmente sean las condiciones sedimentarias en un tiempo geológico dado.

➤ Correlación

Es un proceso de reconocimiento de patrones. El patrón puede ser un pulso simple (se distingue por su amplitud y frecuencia) o un grupo de reflexiones que conformen un paquete.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

La presente investigación es de tipo aplicada, compartiendo la opinión que plantea Álvarez (2013), basado en las definiciones de Tamayo y Tamayo (2004), y por Sabino (2007). En tal sentido, este tipo de investigación consiste en el estudio y aplicación del conocimiento a problemas concretos, en circunstancias y características concretas, con el fin de atender a una necesidad, para aprovechar una oportunidad, o para mostrar la efectividad de un enfoque, método, tecnología, técnicas o herramienta; esencialmente se dirige a su aplicación inmediata y no al desarrollo de teorías. Con base en lo anteriormente expuesto y mediante el análisis integrado de datos geofísicos disponibles, se generarán modelos geológicos de la zona de estudio que permitan indagar sobre el marco geológico de la zona y su potencial para el desarrollo de proyectos de exploración y explotación petrolera.

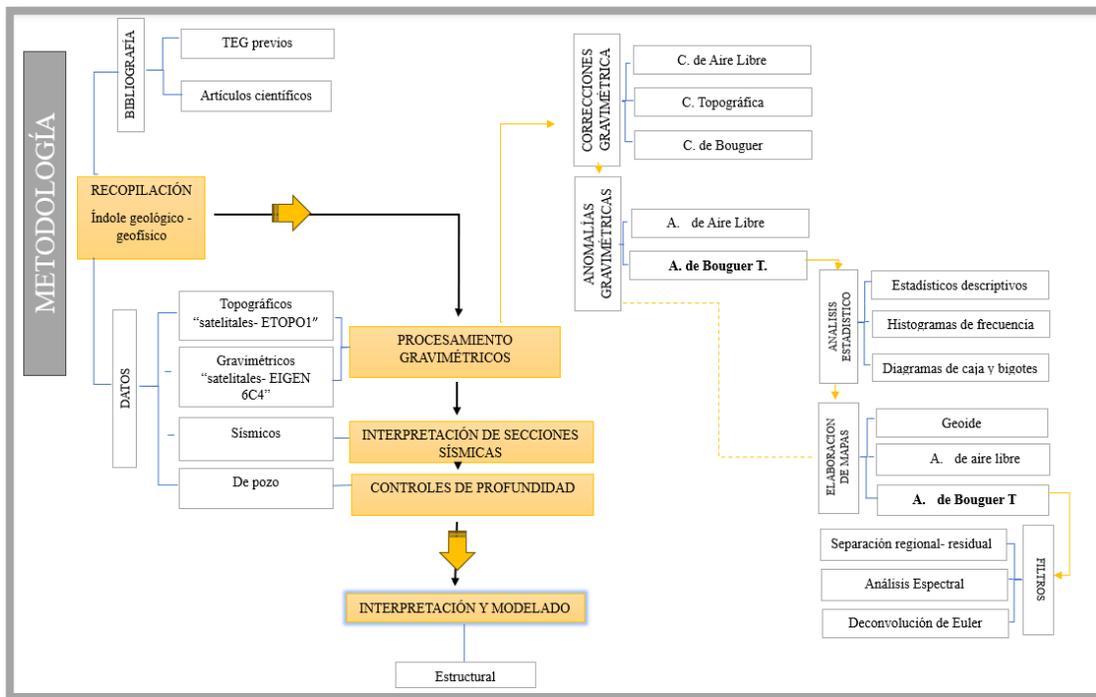


Figura IV-1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo.

La caracterización estructural del subsuelo en la región oriental del estado Falcón, mediante la integración de datos geofísicos de distintas ramas, consistió en llevar a cabo las fases progresivas, plasmadas en flujograma de la figura IV-1. Estas fases o etapas principales son: recopilación, procesamiento gravimétrico, interpretación de secciones sísmicas y elaboración de modelos integrados con las secciones sísmicas interpretadas (en tiempo) y datos de pozos disponibles, en los perfiles seleccionados.

4.1 RECOPIACIÓN

4.1.1 Bibliográfica

Etapla enfocada en la recopilación de material bibliográfico (especialmente de trabajos de grado y revistas de divulgación geocientífica) correspondiente a los antecedentes de estudios geológicos y geofísicos llevados a cabo en las costas venezolanas, situadas al noreste del estado Falcón. Esta etapa definió la línea base que ayudó a la comprensión geológica y estructural de la zona de estudio, al igual que los alcances del trabajo y la certeza o validez de los sus resultados.

4.1.2 Datos

En esta fase se describe la compilación de datos geofísicos para la realización de este estudio.

➤ Datos Gravimétricos

Los datos utilizados en el estudio gravimétrico fueron obtenidos a partir del modelo de gravedad EIGEN-6C4 y del modelo digital de elevación ETOPO-1 (modelo de datos topográficos que considera la contribución de la mayoría de las masas de superficie), proporcionados por el Centro Internacional de Modelos de Campo de Gravedad Global (ICGEM, por sus siglas en inglés, 2019). Este organismo ofrece un servicio de suministro de datos de forma libre (ver figura IV-2), mediante una red

gravimétrica internacional de origen estadounidense, con cobertura mundial y una resolución espacial ajustada a las exigencias geofísicas regionales.



Figura IV-2. Página de descarga de datos gravimétricos y topográficos “ICGEM” (ICGEM International Center for Global Gravity Field Models (gfz-potsdam.de)).

A partir del modelo EIGEN-6C4, en la función de “gravity_earth” se pudo obtener un mallado de 75.551 datos correspondientes a información de gravedad observada de la zona de estudio, con sus coordenadas asociadas para la ventana estudio (comprendida entre las longitudes 69,5°O a 68,25°O y entre las latitudes 11°N a 12,5°N). Mientras que, del modelo ETOPO-1, se extrajeron dos modelos digitales de elevación o DEM (por las siglas en inglés de Digital Elevation Model), uno de carácter local y otro de carácter regional (se extendió la ventana 0,25° en cada dirección, descargando así datos topográficos y batimétricos correspondientes a las longitudes 69,75°O a 68°O y entre las latitudes 10,45°N a 12,45°N) necesarios para complementar el procesamiento de los datos, específicamente la corrección topográfica y seguidamente la anomalía de Bouguer Completa.

Tanto los datos de gravedad como los de topografía local, fueron descargados con una resolución de 0,005 arcos por minuto (500 m entre cada punto de control o estación). Mientras que, el DEM regional para la corrección topográfica, se descargó

con una menor resolución de 0,01 arcos por minuto, generando una grilla de 19.026 datos.

➤ Datos sísmicos y de Pozo

Para realizar la interpretación sísmica, se descargaron secciones sísmicas disponibles de la zona de estudio, desde la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (figura IV-3). Sin embargo, éstas corresponden a las costas territoriales de Curazao, debido a que los datos de las costas venezolanas son de carácter restringido y estratégico, pero esto no ha limitado el importante aporte de numerosas investigaciones que se han realizado en el área en el transcurso de los años.

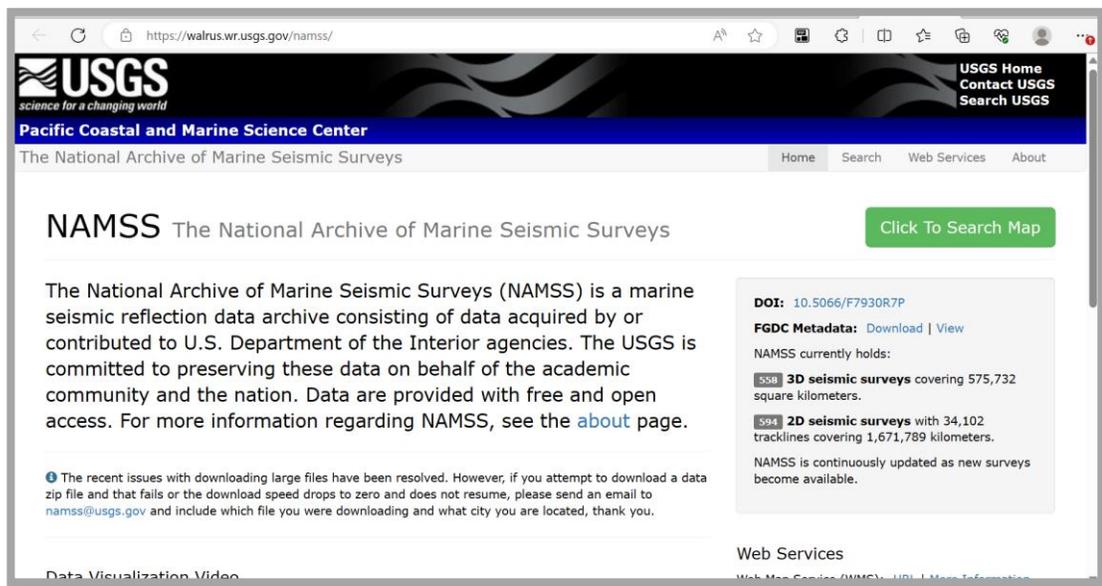


Figura IV-3. Página de descarga de datos sísmicos “USGS” (National Archive of Marine Seismic Surveys - Home - USGS PCMSC).

Los datos sísmicos de reflexión de las costas de Curazao fueron recolectados por la empresa Western Geco en el transcurso del año 1979. Esta adquisición se caracterizó por ser del tipo sísmica multicanal 2D, cuya fuente fue el cañón de aire y el Streamer fue instrumento receptor (sensor de adquisición); generando como resultado 12 líneas sísmicas (migradas en Tiempo) cuya información, actualmente está disponibles en línea, en 12 archivos SEG-Y, uno por cada línea sísmica adquirida y un

archivo UKOOA (por sus siglas en ingles de UK Offshore Operators Association), usado para la identificación de los registros sísmicos e información de ubicación.

A partir de este proyecto sísmico, se hizo uso de 4 líneas (A1, A2, A4 y AD), que fueron representativas para la interpretación de la zona de investigación. Éstas se ilustran en la figura IV-4, en la cual se observa que los perfiles sísmicos A1, A2 y A4 guardan relación de paralelismo, ya que están orientadas en dirección SO-NE; mientras que, el registro AD es perpendicular a los registros anteriormente mencionados.

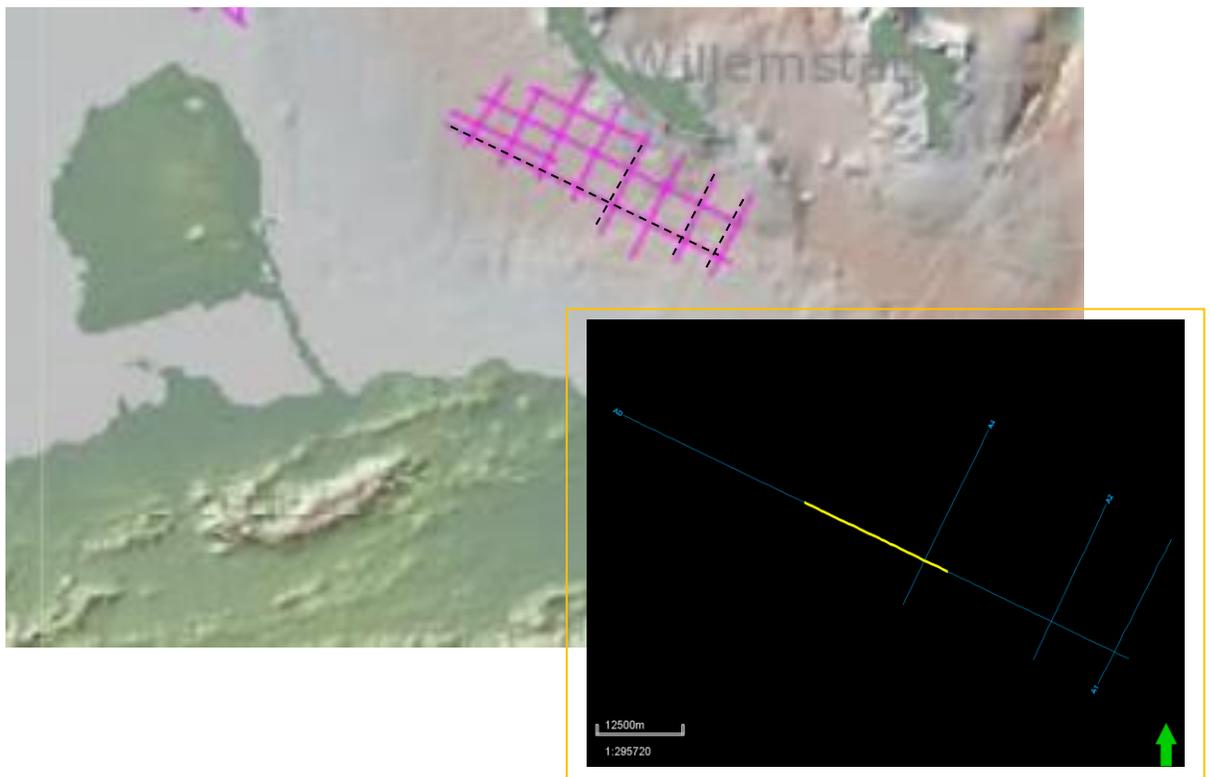


Figura IV-4. Representación espacial de las líneas sísmicas al Suroeste de Curazao.

Posteriormente, se hizo uso de los datos de pozo disponible, para amarrar o estimar (dependiendo si el pozo se clasifica como de control o no control) en profundidad los horizontes sísmicos.

Parte de los datos de pozos utilizados, fueron extraídos de la investigación de Rodríguez y Souza (2003), los cuales le fueron proporcionados por la Gerencia de

Visión País (VIPA). Ahora bien, la otra parte de los datos considerados se tomaron de del trabajo de Carrillo (2021) y estos fueron facilitados por la Dirección de Exploración de PDVSA-INTEVEP.

4.2 PROCESAMIENTO GRAVIMÉTRICO

➤ Preprocesamiento

Posterior a la descarga de los archivos de texto con los datos gravimétricos y topográficos, se procedió a importar esta información a el programa Microsoft Excel, el cual facilitó los cálculos de reducciones y anomalías gravimétricas. Estos cálculos fueron plantados, tomando en cuenta como nivel de referencia el nivel medio del mar (n.m.m.), según lo recomendado por Paolini *et al.* (2014); con una densidad de reducción gravimétrica de 2,67 g/cm³ para la lámina de Bouguer y de 1,03 g/cm³ como densidad para el agua, (Nowell, 1999; Bezada *et al.*,2008; García, 2009; Arnaiz y Garzón, 2012; Linares, 2014; Ughi, 2019).

Sin embargo, para llevar a cabo un procesamiento más completo, fue requerido el uso del software Geosoft Oasis Montaj (figura IV-6); en el cual, se agregó el set de datos registrados en la hoja de Excel (figura IV-5) y se incluyó la información de topografía local y la topografía regional, con la finalidad de generar la corrección topográfica para el cálculo de la anomalía de Bouguer Total.

LATITUD(C)	LATITUD (RAD)	LONGITUD	LONGITUD C (°)	COTA (m)	G.OBS (mGal)	CAL (mGal)	G.TEORICA (mGal)	CB 2.67 (mGal)	CTOP 2.67 (mGal)	AN.AL (mGal)	AN. B 2.67 (mGal)
12.5	0.218166156	290.5	-69.5	-1306	978191.654	-403.0316	978274.5999	-146.1410082	0	-485.9775681	-339.8365599
12.5	0.218166156	290.505	-69.495	-1313.5	978192.9324	-405.3461	978274.5999	-146.980256	0	-487.0136542	-340.0333983
12.5	0.218166156	290.51	-69.49	-1321	978194.3167	-407.6606	978274.5999	-147.8195037	0	-487.9438513	-340.1243476
12.5	0.218166156	290.515	-69.485	-1328.5	978195.8031	-409.9751	978274.5999	-148.6587515	0	-488.771961	-340.1132095
12.5	0.218166156	290.52	-69.48	-1334.6	978197.3862	-411.8576	978274.5999	-149.3413396	0	-489.0712563	-339.7299167
12.5	0.218166156	290.525	-69.475	-1340	978199.0594	-413.524	978274.5999	-149.945598	0	-489.064522	-339.118924
12.5	0.218166156	290.53	-69.47	-1345.4	978200.8145	-415.1904	978274.5999	-150.5498564	0	-488.9758959	-338.4260395
12.5	0.218166156	290.535	-69.465	-1350.4	978202.6421	-416.7334	978274.5999	-151.1093549	0	-488.6912756	-337.5819208
12.5	0.218166156	290.54	-69.46	-1354.6	978204.5319	-418.0296	978274.5999	-151.5793336	0	-488.0976116	-336.518278
12.5	0.218166156	290.545	-69.455	-1358.8	978206.4726	-419.3257	978274.5999	-152.0493124	0	-487.4530322	-335.4037198
12.5	0.218166156	290.55	-69.45	-1363	978208.4523	-420.6218	978274.5999	-152.5192911	0	-486.7694241	-334.250133
12.5	0.218166156	290.555	-69.445	-1367.2	978210.4588	-421.9179	978274.5999	-152.9892698	0	-486.0590748	-333.069805
12.5	0.218166156	290.56	-69.44	-1371.4	978212.4795	-423.214	978274.5999	-153.4592486	0	-485.3344217	-331.8751732
12.5	0.218166156	290.565	-69.435	-1375.6	978214.5023	-424.5102	978274.5999	-153.9292273	0	-484.6077941	-330.6785667
12.5	0.218166156	290.57	-69.43	-1379.2	978216.515	-425.6211	978274.5999	-154.3320662	0	-483.7059945	-329.379283
12.5	0.218166156	290.575	-69.425	-1382.5	978218.5065	-426.6395	978274.5999	-154.7013353	0	-482.7329464	-328.0316111
12.5	0.218166156	290.58	-69.42	-1385.8	978220.4661	-427.6579	978274.5999	-155.0706043	0	-481.7917123	-326.721108
12.5	0.218166156	290.585	-69.415	-1388.4	978222.3845	-428.4602	978274.5999	-155.3615435	0	-480.6756704	-325.3141269
12.5	0.218166156	290.59	-69.41	-1389.6	978224.2536	-428.8306	978274.5999	-155.4958231	0	-479.1769136	-323.6810905
12.5	0.218166156	290.595	-69.405	-1390.8	978226.0667	-429.2009	978274.5999	-155.6301028	0	-477.7341371	-322.1040343
12.5	0.218166156	290.6	-69.4	-1392	978227.8187	-429.5712	978274.5999	-155.7643824	0	-476.3523967	-320.5880143
12.5	0.218166156	290.605	-69.395	-1391.4	978229.5064	-429.386	978274.5999	-155.6972426	0	-474.4795647	-318.7823221

Figura IV-5. Ejemplo de la tabla de procesamiento de datos desarrollada en Microsoft Excel.

DB:0	UTMUY	UTMXY	UTMRV	Terrain	UEBROCEANI	ABTOCEANICA	ABTCONTINENTAL
0.000	1381894.960	445672.240	1381894.960	0.00	0.00	-542.95	-542.95
1.001	1381893.960	446758.780	1381892.930	0.00	0.00	-543.71	-543.71
2.001	1381892.930	447845.360	1381890.940	0.00	0.00	-544.97	-544.97
3.001	1381891.930	448931.940	1381888.990	0.00	0.00	-546.12	-546.12
4.000	1381890.940	450018.510	1381887.080	0.00	0.00	-546.68	-546.68
5.000	1381889.960	451105.090	1381885.210	0.00	0.00	-546.91	-546.91
6.007	1381888.990	452191.660	1381883.390	0.00	0.00	-547.05	-547.05
7.005	1381888.030	453278.230	1381881.640	0.00	0.00	-546.98	-546.98
8.003	1381887.080	454364.800	1381879.860	0.00	0.00	-546.57	-546.57
9.001	1381886.140	455451.370	1381878.150	0.00	0.00	-546.11	-546.11
10.008	1381885.210	456537.940	1381876.400	0.00	0.00	-545.61	-545.61
11.005	1381884.290	457624.510	1381874.870	0.00	0.00	-545.08	-545.08
12.001	1381883.380	458711.070	1381873.290	0.00	0.00	-544.53	-544.53
13.007	1381882.490	459797.640	1381871.750	0.00	0.00	-543.99	-543.99
14.005	1381881.660	460884.210	1381870.250	0.00	0.00	-543.24	-543.24
15.000	1381880.720	461970.770	1381868.800	0.00	0.00	-542.41	-542.41
16.004	1381879.850	463057.330	1381867.380	0.00	0.00	-541.61	-541.61
17.000	1381879.000	464143.890	1381866.000	0.00	0.00	-540.61	-540.61
18.003	1381878.150	465230.450	1381864.670	0.00	0.00	-539.16	-539.16
19.008	1381877.310	466317.010	1381863.380	0.00	0.00	-537.77	-537.77
20.002	1381876.490	467403.560	1381862.130	0.00	0.00	-536.44	-536.44
21.005	1381875.670	468490.120	1381860.910	0.00	0.00	-534.54	-534.54
22.000	1381874.870	469576.670	1381859.740	0.00	0.00	-532.71	-532.71
23.002	1381874.070	470663.230	1381858.620	0.00	0.00	-530.94	-530.94

Figura IV-6. Interfaz del programa Oasis Montaj, utilizado para procesamiento gravimétrico

➤ Análisis Estadístico:

Una vez finalizado el preprocesamiento, se procedió a realizar la evaluación estadística de los datos compilados, mediante el programa Statistica (figura IV-7), el cual permite ejecutar funciones de estadísticas básicas y avanzadas. Esto se realizó con la finalidad de conocer las características de los datos de anomalías gravimétricas en la zona de estudio, estudiando sus tendencias y distribución de los datos, lo cual permitió evaluar la presencia de valores erróneos y/o atípicos que pudieran afectar la interpretación de los resultados.

Variable	Mean	Median	Minimum	Maximum	Range	Variance	Std Dev.
AN.B 1.03 (mGal)	-211.130	-138.052	-1283.49	173.7167	1457.202	71032.50	266.5192

Figura IV-7. Programa Statistica, utilizado para el control estadístico de los datos en la investigación.

Los parámetros de control estadístico utilizados para alcanzar el objeto de la investigación se describen a continuación en la figura IV-8.

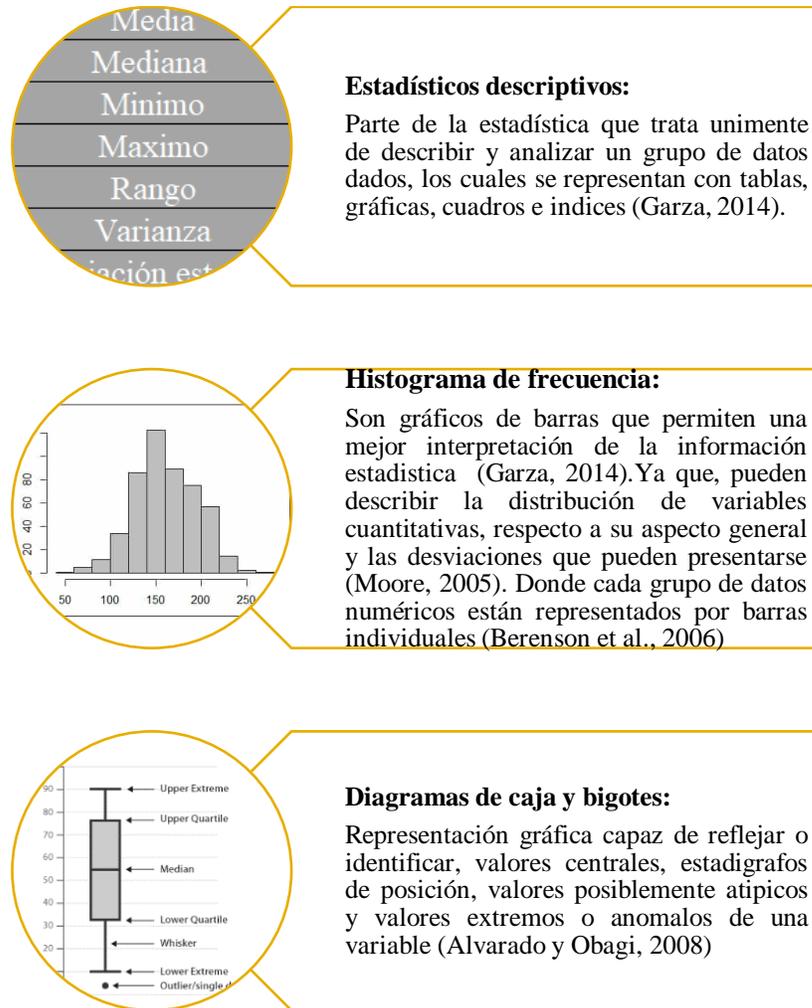


Figura IV-8. Resumen del control estadístico de los datos.

➤ **Elaboración de mapas**

Una vez culminada la validación de los datos (procedimiento esencial para el desarrollo de los mapas) se procedió a generar los mapas de topografía/batimetría, de anomalías de Bouguer Total y de anomalías aire libre, a través del programa Oasis Montaj de la empresa Geosoft.

Específicamente el desarrollo de esta fase consistió en los siguientes pasos:

- Los datos batimétricos y gravimétricos fueron importados al programa.
- Se realizó la transformación de las coordenadas geográficas a coordenadas UTM (Considerando para la zona de estudio el datum WGS84 y la zona 19N) las cuales posteriormente, se establecieron como sistema de proyección.
- Se generó el grid necesario para cada mapa mediante la interpolación por mínima curvatura. Esta interpolación, consiste en generar una superficie mediante el promedio de la distancia inversa de los datos existentes que se encuentran en un radio específico (Mederos, 2009).
- Por último, se realizaron los mapas a partir de los grids de anomalías gravimétricas, estableciendo sus elementos esenciales (Escala gráfica, Norte, contornos, nombre y leyenda grafica o escala de color).

➤ Filtros

Se aplicaron múltiples filtros a los datos de anomalías de Bouguer Total, con el objetivo de revelar y realzar la información contenida en los datos anomalía de Bouguer Total, asociada a las respuestas provenientes de las fuentes de anomalías gravimétricas, tanto regionales como locales. El software Oasis Montaj, cuenta con un módulo denominado MAGMAP, que dispone de diferentes filtros, que se pueden aplicar según sean los diferentes objetivos que se deseen alcanzar en el estudio.

- Separación Regional- Residual:

A partir del mapa de Anomalía de Bouguer Completa, se procedió a generar las respuestas gravimétricas regionales y residuales de la zona de estudio, por medio del programa Oasis Montaj. Existen diversos métodos para discriminar las respuestas regionales de las residuales, a partir de las diferentes anomalías obtenidas. Algunos de estos son el filtro de Butterworth, el filtro Gausseano, las derivadas direccionales y en el caso de esta investigación, fueron empleados los filtros de superficies polinómicas de 1. °, 2. ° y 3. °, en conjunto con el análisis de continuación analítica hacia arriba para 6 estimaciones de alturas.

- Estimación de profundidades.

Análisis Espectral:

Para estimar la profundidad a la que se encuentran las principales estructuras presentes en la zona de estudio, se calculó el espectro de potencia, utilizando nuevamente el programa Oasis Montaj, a través, de su extensión “MAGMAP” Spectrum calculation and display”. Posteriormente, estos datos fueron exportados a Microsoft Excel, en donde se generó un gráfico para clasificar las respuestas obtenidas para las profundidades somera, media y profunda, mediante la determinación de las distintas pendientes de la curva generada en el espectro de potencia radial y usando la ecuación 12, introducida en la sección 3.1.3 del marco teórico.

Deconvolución de Euler:

Se aplicó con la finalidad de estudiar la tendencia y profundidad de los contactos y estructuras geológicas más resaltantes en la zona de estudio.

Para ello, se utilizó la herramienta “Standard Euler Deconvolution” incorporada en el módulo “EULER3D” del programa Oasis Montaj. Para su aplicación, se requirió de los siguientes parámetros: el mapa de Anomalía de Bouguer Total en conjunto con las derivadas espaciales de primer orden X, Y y Z, previamente calculadas. Además, se estimó el índice estructural, el máximo porcentaje de tolerancia o error permitido y el tamaño de la ventana en la que se aplicó la deconvolución de Euler (el cual se relaciona con el tamaño del área de la zona de estudio).

4.3 INTERPRETACIÓN DE SECCIONES SISMICAS Y DE POZO

Para lograr la interpretación de las líneas sísmicas de Curazao, inicialmente fue requerido realizar ajustes geométricos de los datos. Esto consistió en la realización de los siguientes pasos:

- A partir del archivo UKOOA, se exportaron las coordenadas al programa Microsoft Excel, los cuales se interpolaron para obtener la ubicación de cada

traza, considerando que cada estación correspondía a 4 SP (energy source point). Posteriormente, esta información se convirtió y se grabó en archivos con el formato prn (delimitado por espacio) separados para cada línea.

- Por otra parte, se hizo uso del Software Seisee, en el cual se desplegaron los archivos SEG-Y (de las 4 líneas sísmicas consideradas para la investigación) tomando en consideración para el formato de la plantilla, las siguientes columnas: el número de trazas, SP, CDP (punto común de reflexión), longitud y latitud (estos últimos dos ítems, no contenían información por la ausencia de este tipo de datos en el SEG-Y). Seguidamente se generó archivos de formato txt (texto) para cada línea.
- Una vez logrado los dos pasos previos, se procedió a realizar por cada perfil sísmico, el cruce de información entre archivos (prn y txt), el cual consistió en extraer del archivo prn la información de las coordenadas, para luego asignarlas a sus correspondientes trazas en el archivo txt, mediante el programa Microsoft Notepad, generando así un archivo txt modificado, del cual se derivó luego el archivo SEG-Y de interpretación.
- Posteriormente, se importó el archivo txt modificado al programa Seisee, para luego convertirlo al formato SEG-Y (Figura IV-9).
- Finalmente, el archivo SEG-Y fue cargado al software Petrel 2017.1. para su representación e interpretación (Figura IV-10), en el cual, a través de su herramienta Seismic Interpretation que se encuentra en el menú Seismic Interpretation, se establecieron los horizontes de cada registro sísmico y se identificaron patrones de fallas, tomando en cuenta datos de la zona (sísmicos, pozos, información de superficie). Por último, se correlacionaron los horizontes entre 4 los perfiles sísmicos.

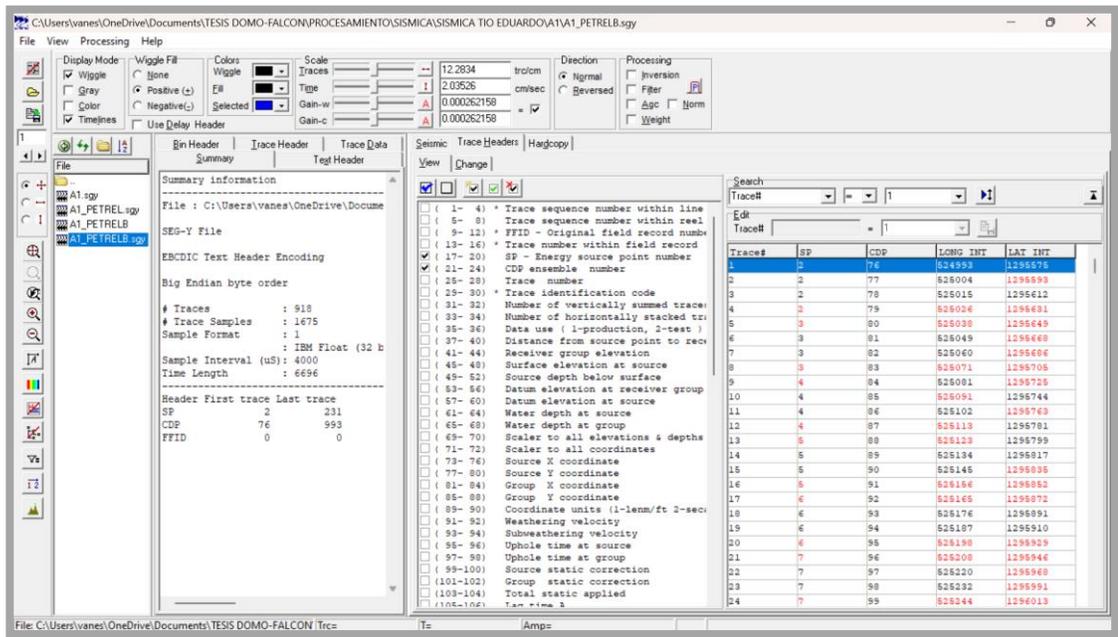


Figura IV-9. La interfaz del programa Seisview, tomando en cuenta el archivo SEG- Y integrado con las coordenadas para la línea sísmica A1, como ejemplo.

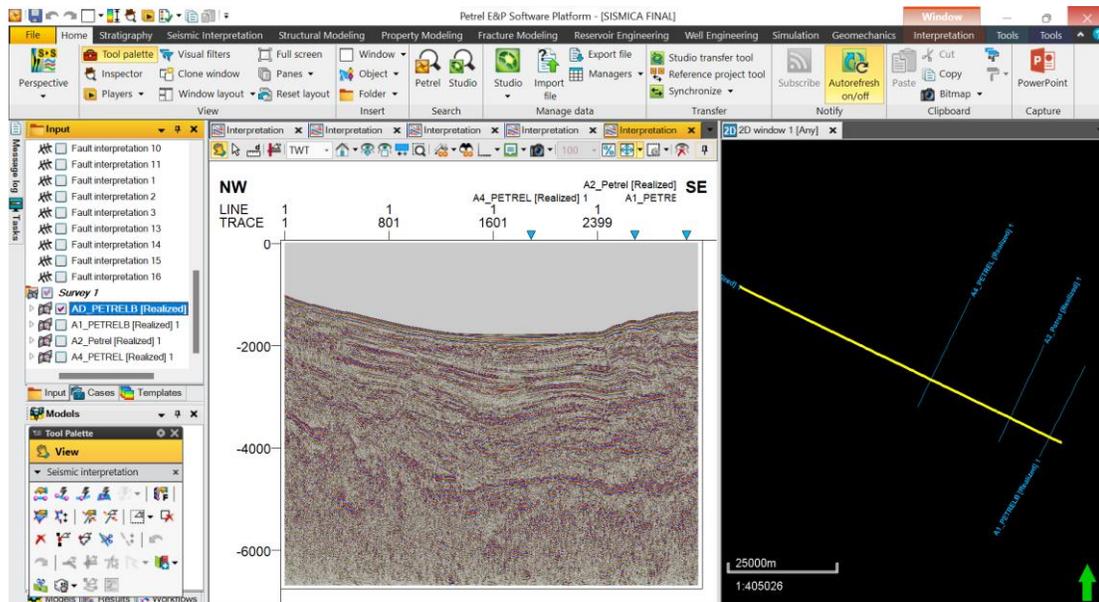


Figura IV-10. La interfaz del programa Petrel 2017.1, con la línea sísmica AD, como ejemplo.

En general, a partir de la interpretación y análisis de las secciones sísmicas migradas, se determinaron las profundidades de los horizontes o reflectores sísmicos

con continuidad lateral o sin ella y se correlacionaron con los datos de pozo disponibles, con el fin de caracterizar los topes de las estructuras en el subsuelo, que luego fueron utilizados como referencia o control en el desarrollo del modelado gravimétrico de las estructuras presentes en el subsuelo de la zona de estudio.

4.4 MODELADO E INTERPRETACIÓN

A partir de la información obtenida de los mapas de anomalías gravimétricas, análisis espectral, deconvolución de Euler y la interpretación de las secciones sísmicas, se procedió a generar dos modelos 2D del subsuelo en la zona de estudio.

Esta última fase se realizó con el empleo del programa Oasis Montaj, en su módulo GM-SYS. Donde se aplicó el modelado directo de los perfiles gravimétricos trazados sobre el mapa de anomalía de Bouguer Total (Figura V-4). Adicionalmente, durante el desarrollo del modelado, se utilizó el módulo GM-SYS como control de calidad del modelo, ya que permite visualizar el error de ajuste presente entre la gravedad calculada y la observada.

CÁPITULO V

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 TOPOGRAFÍA Y BATIMETRÍA

El mapa de la figura V-1, se compone de valores de cota mixtos con terrenos superficiales ($h \geq 0$) y regiones marinas ($h < 0$), que evidencian algunos rasgos morfológicos que caracterizan el Bloque de Bonaire.

Los terrenos superficiales representan un 28,17% de la totalidad de los datos, los cuales corresponden a la extensión oriental superficial de la cuenca de Falcón (subcuenca Agua Salada) y a las Antillas Holandesas (específicamente Curazao y una fracción de Bonaire). Donde el máximo topográfico se registra en el suroeste de la cuenca Agua Salada; mientras que, las otras elevaciones observadas son la isla de Curazao con una altura de 20 m por encima del nivel del mar y la isla de Bonaire con 0 m de cota.

El resto de los datos se corresponden en un 71,82% con datos batimétricos vinculados con la región costa afuera, conformada por la prolongación marina de la cuenca Falcón- Bonaire y las cuencas este y oeste de Curazao. El área de mayor profundidad (-2520 m) ilustrada el mapa, corresponde a la zona batial presente entre la cuenca de Curazao oriental y la fosa de los Roques. Ahora bien, el depocentro de la cuenca oeste de Curazao se ubica a 1180 m de profundidad; mientras que, el fondo marino de la cuenca de Bonaire (en su extremo occidental) alcanza 1560 m de profundidad.

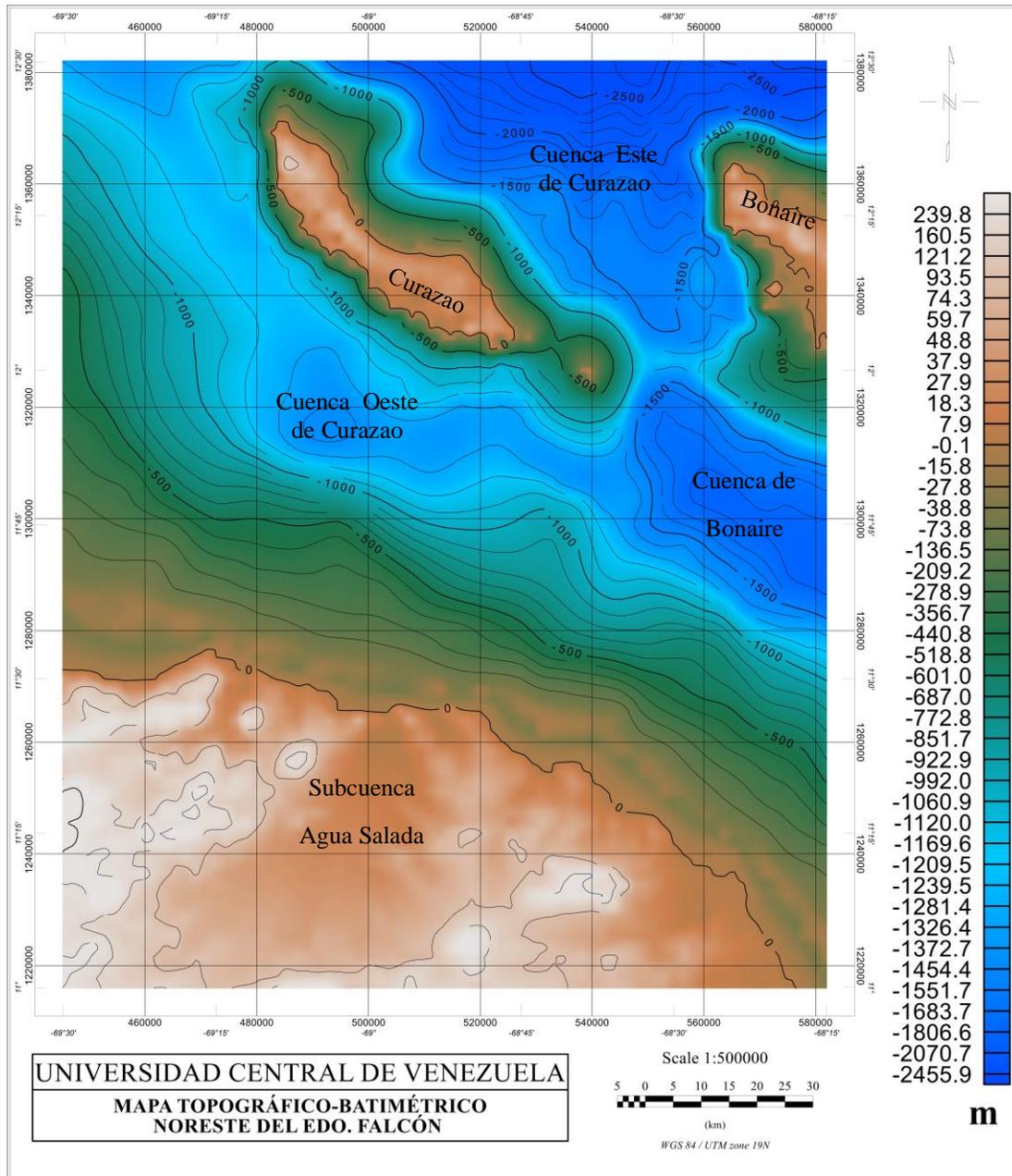


Figura V-1 Mapa Topográfico-Batimétrico de la ventana de estudio. Datos tomados del DEM ETPOI1 con resolución 0,005 arcos por minuto. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

5.2 GRAVIMÉTRIA

5.2.1 Análisis estadístico de datos gravimétricos

El control de datos gravimétricos se realizó mediante el análisis estadístico de 75.551 datos de anomalía de Bouguer correspondientes a la zona de estudio, con el fin de verificar los cálculos realizados y validar el modelo IEGEM-C64.

De la tabla 4, se puede apreciar que los valores de anomalía de Bouguer se encuentran en un rango de 948,6279 mGal, limitados entre un mínimo de -775.239 mGal y un máximo de 173,3893 mGal. Adicionalmente, se observa que las medidas de tendencia central indican que el valor promedio corresponde a -111,371 mGal y la mediana se ubica en -67,2196 mGal- En otras palabras, la mediana es superior a la media, lo cual es indicio de una distribución asimétrica de datos, con sesgo a la izquierda o negativo.

Tabla 4. Estadística descriptiva de los datos de anomalía de Bouguer completa, relacionada con el modelo EIGEM-C64

Media	-111,371
Mediana	-67.220
Mínimo	-775,239
Máximo	173,389
Rango	948,627
Varianza	26034,59
Desviación estandar	161,352

A partir del histograma de frecuencias mostrado en la figuraV-2.a, el cual se realizó con el fin de evaluar las características cualitativas de tendencia central y dispersión de la muestra, se pudo corroborar que los datos se comportan como una distribución unimodal, donde la mayor frecuencia de valores se ubican hacia los rangos de anomalías con tendencia positiva, principalmente entre 0 y 200 mGal; mientras que, las anomalías de tendencia negativa son de poca frecuencia, lo cual ocasiona la distribución irregular de los datos con sesgamiento hacia la izquierda. Esto se aprecia también en el diagrama de cajas y bigotes (figura V-2. b), donde la diferencia entre la

longitud de los bigotes es clara evidencia de la distribución asimétrica de los datos, de tipo negativa (por ser el bigote inferior de mayor longitud que el superior).

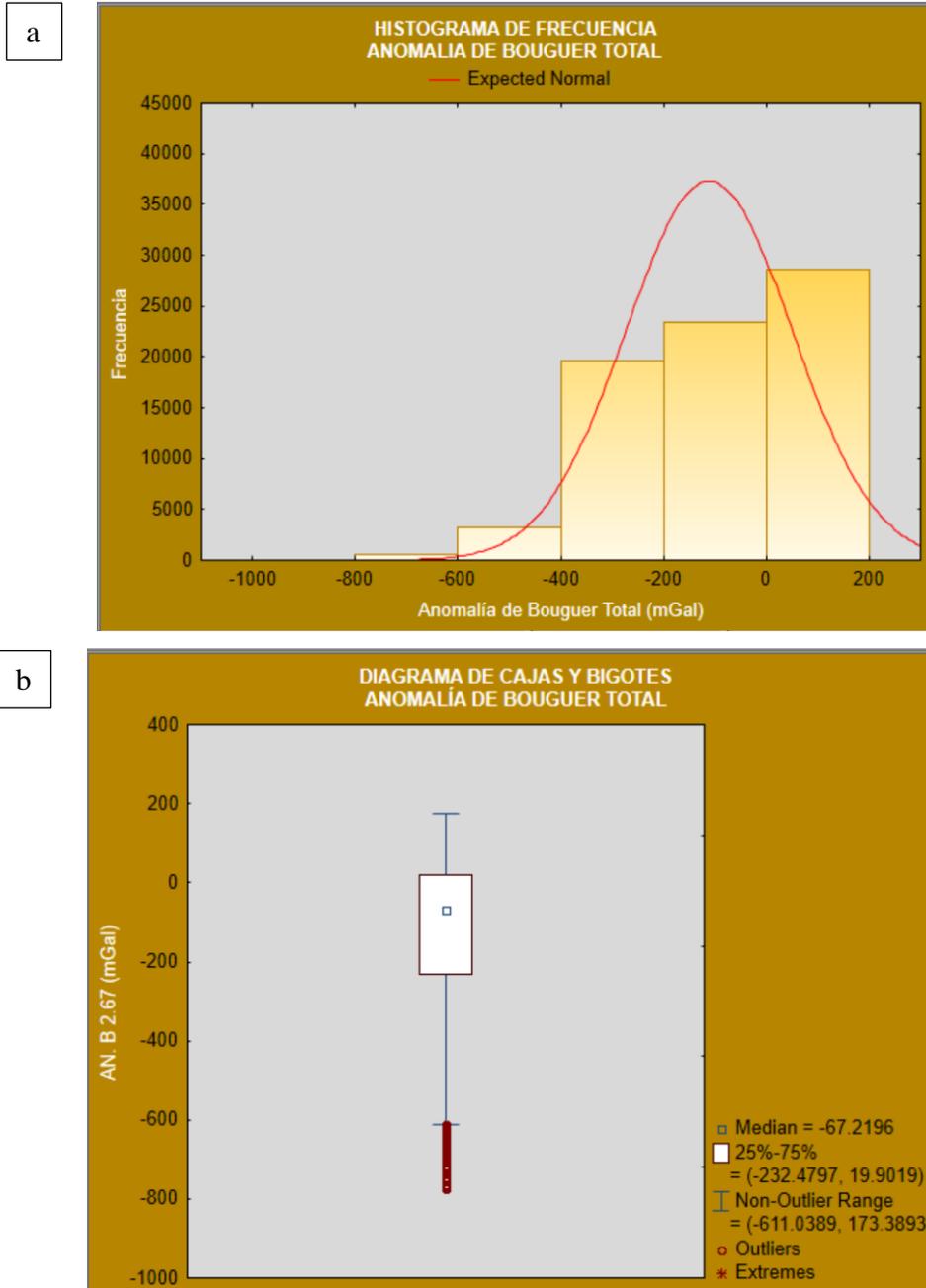


Figura V-2. Gráficos estadísticos para de los datos de anomalía de Bouguer. a) Histograma de frecuencia. b) Diagrama de caja y bigotes.

Del diagrama de bigotes también se puede resaltar que para valores de anomalías gravimétricas superiores a la mediana (-67,21 mGal), se observa una tendencia homogénea en la frecuencia de los datos. Adicionalmente, se observó la presencia de valores atípicos hacia el extremo inferior del diagrama de caja y bigotes, estos son menores -611,03 mGal.

Los datos atípicos fueron evaluados, con la finalidad de reconocer su influencia en el procesamiento gravimétrico, específicamente para la generación de los mapas, contabilizándose un total de 342 datos atípicos, que representan un 0,45% de los datos totales. Además, se observa que estos no se alejan considerablemente de la tendencia gravimétrica general, con respecto al resto de los datos que se encuentran cercanos (al noreste de la ventana de estudio, vinculado geológicamente con el oeste de la cuenca de Curazao). La presencia de estos valores atípicos puede ser atribuida a un efecto de borde, originado al momento de interpolar los datos del mallado, razón por la que no serán tomados en cuenta para la interpretación de los resultados.

5.1.2 Análisis cualitativo de los datos gravimétricos

➤ Anomalía de Aire Libre

La figura V-3, corresponde al mapa de anomalía de Aire Libre generado para la zona de estudio, en el cual se muestran las anomalías gravimétricas influenciadas únicamente por los efectos de la topografía, por tal razón, se correlaciona con el mapa de la figura V-1 para su análisis.

Se observa a partir del mapa de anomalía de Aire Libre, que al noreste del estado Falcón se encuentran los máximos gravimétricos relativos de la zona de estudio, cuyos (se resalta como la tendencia regional de los contornos gravimétricos), con valores que se aproximan entre 100 y 120 mGal, los cuales, de acuerdo con la topografía, se correlacionan con las islas de Curazao y Bonaire. A partir del máximo local que se corresponde con la región de Curazao, se puede inferir que existe una

pequeña depresión que tienden a fraccionar a la isla, causando también la división en la representación gravimétrica.

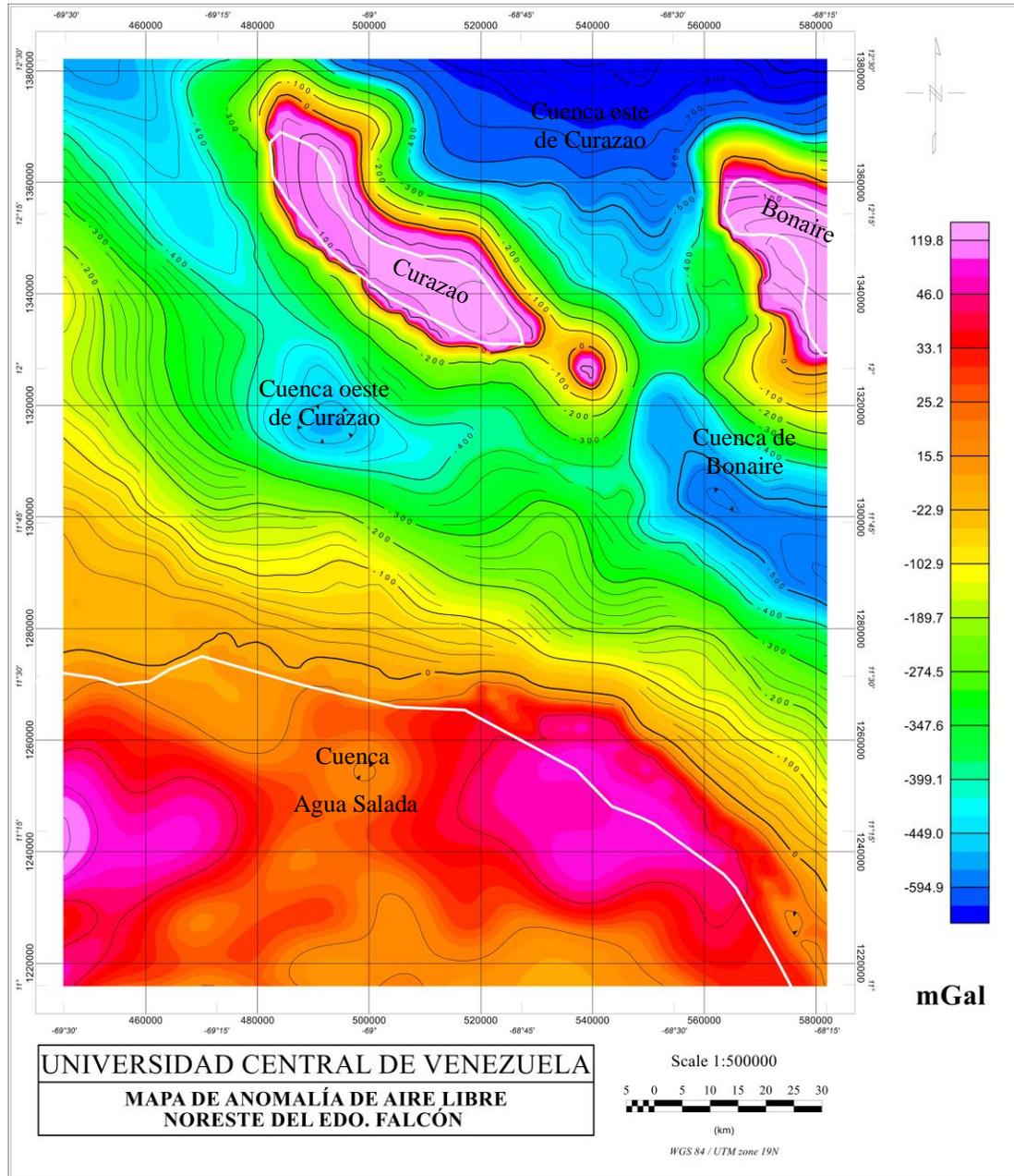


Figura V-3. Mapa de anomalía de Aire Libre de la ventana de estudio. Datos del modelo EIGEM- C64. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

En la sección sur de la zona de estudio, se aprecian otras anomalías gravimétricas positivas que varían entre 0 y 80 mGal (figura V-3), vinculadas a la

cuenca oriental de Falcón, específicamente a la cuenca de Agua Salada. En la cual, se observa al este de la cuenca una respuesta gravimétrica positiva, referenciada geográficamente al anticlinorio de Isidro (González de Juana *et al.*, 1980); mientras que, al este de la cuenca se vincula con la sección oriental del anticlinorio de Falcón (tomando en consideración el la Figura II-4).

El mínimo gravimétrico absoluto de la figura V-3, se localiza en la sección noreste de la zona de investigación, con una orientación casi O-E. Sin embargo, este se bifurca en su centro y disminuye gradualmente con una tendencia preferencial en sentido N-S. Dicha respuesta gravimétrica, se vincula a la influencia de las trincheras de Los Roques (área colindante con el límite noreste de la zona de estudio) sobre la cuenca este de Curazao. Mientras que, en el noroeste se aprecia otra representación gravimétrica negativa, cercana a los -460 mGal, de similar tendencia a los contornos de los máximos positivos (SE-NO) y el cual se relaciona geográficamente con la cuenca oeste de Curazao.

En la región centro oriental del mapa existe otra anomalía de carácter negativo, que se atribuye al extremo occidental de la cuenca de Bonaire, la cual sigue la tendencia regional de los contornos (SE-NO) y gravimétricamente es inferior a la anomalía mencionada anteriormente, debido a que es menor a los -500 mGal, ya que la cuenca de Bonaire es más profunda que la cuenca oeste de Curazao.

➤ Anomalía de Bouguer completa o total.

En el mapa de anomalía de Bouguer mostrado en la figura V-4, se pueden reconocer, en primer lugar, las variaciones de profundidad del basamento ígneo-metamórfico (fuente gravimétrica regional) y en segundo las variaciones laterales o contrastes de densidad de las estructuras bajo el nivel de referencia (fuente residual), una vez que se han aplicado las correcciones gravimétricas.

En la figura V-4, se observa que los contornos gravimétricos presentan una orientación regional preferencial en sentido SE-NO. Además, se aprecia una tendencia regional de forma descendiente de las anomalías gravimétricas, en sentido de sur a

norte (omitiendo la respuesta gravimétrica de las islas de Curazao y Bonaire), lo cual, representa la respuesta gravimétrica generada por la profundización del basamento ígneo-metamórfico hacia el norte en la zona de estudio.

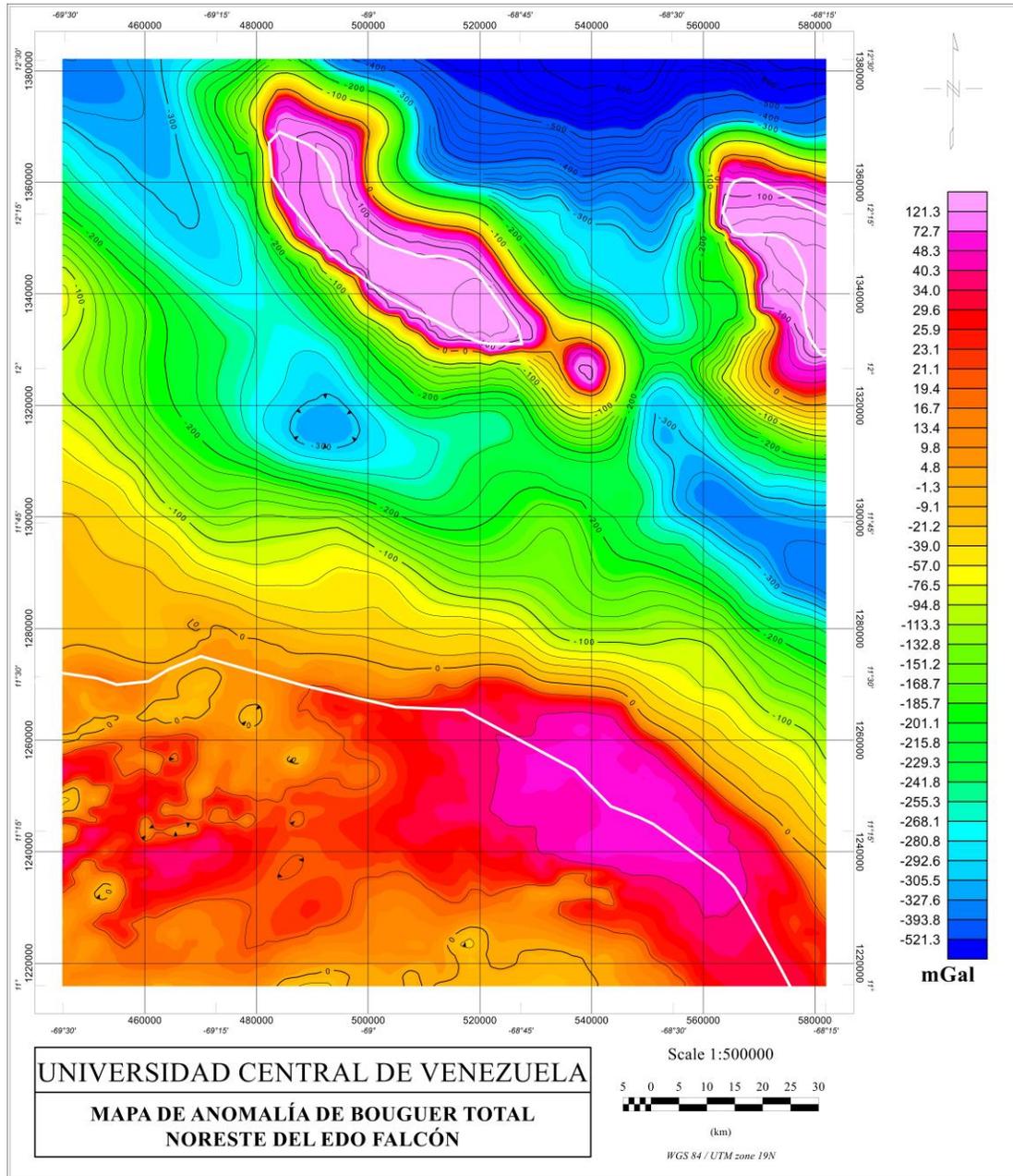


Figura V-4. a) Mapa de Anomalía de Bouguer de Falcón Oriental. 1. Consideraciones del nivel de referencia igual al n.m.n y densidad de reducción de Bouguer de $2,67 \text{ g/cm}^3$. Datos del modelo EIGEM-C64. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

En un contexto local, al norte de la ventana de estudio, se destacan máximos gravimétricos absolutos, que superan los 121 mGal, cuya fuente se asocia con las

Antillas Holandesas de Sotavento (en el caso de la zona de estudio Curazao y Bonaire). Estas fuentes son causadas por el efecto integrado de: la exposición en superficie de Curazao y Bonaire; y por el contraste de densidad generado por las estructuras cretácicas de características volcano-sedimentarias que dan origen a las islas (alta densidad) y los sedimentos aledaños a las Antillas (baja densidad).

En cambio, el mínimo (no se enfatiza su magnitud por estar influenciado por valores atípicos) localizado al noreste de la ventana de estudio se atribuye a una respuesta causada por la depresión del basamento que da forma a la cuenca al este de Curazao; además del efecto por la densidad de los sedimentos que alberga. Así como también a la influencia del borde generado por los sedimentos de la trinchera de Los Roques.

Por otra parte, el mínimo gravimétrico de -340 mGal, ubicado en la región centro oriental del mapa, se correlacionan con el efecto causado por la profundidad del basamento de la ladera occidental de la cuenca de Bonaire; además, del efecto de la espesa secuencia de sedimentos del terciario que alberga.

El ultimo mínimo observado comprendido entre -300 y -320 mGal, se localiza al noroccidente del área de estudio, con una orientación que se alinea con la tendencia regional (SE-NO) coincidiendo así con el eje de la cuenca de oeste de Curazao. Este mínimo sugiere la forma del basamento de la cuenca, de donde se puede destacar una elevación cortical que fragmenta la continuidad extremo suroriental de la cuenca, ya que la respuesta gravimétrica negativa no es continua.

En la región sur, tal como se observa en el mapa de anomalía de Bouguer, se identifica una respuesta gravimétrica positiva (0-80 mGal) correlacionable con el relieve emergido de la litosfera, correspondiente a la cuenca de Agua Salada. En ella, se aprecian máximos locales, donde el primero de estos (el de mayor extensión) se localiza al este de la cuenca y se vincula a la elevación cortical generada por el anticlinorio de Isidro, aunado al contraste de densidad originado por los meta-sedimentos y los sedimentos suprayacentes. Sin embargo, la respuesta gravimétrica es de gran expresión por lo que sugiere la presencia cuerpos ígneos en la zona. Mientras que, el máximo al oeste se asocia con el alto estructural del anticlinorio de Falcón,

además de la presencia de cuerpos autóctonos de rocas ígneas intrusivos y extrusivos embebidos en los meta-sedimentos de las formaciones Guacharaca y Agua Salada, los cuales contrastan en densidad con el material aluvial superficial acumulado entre ellos, dentro la cuenca.

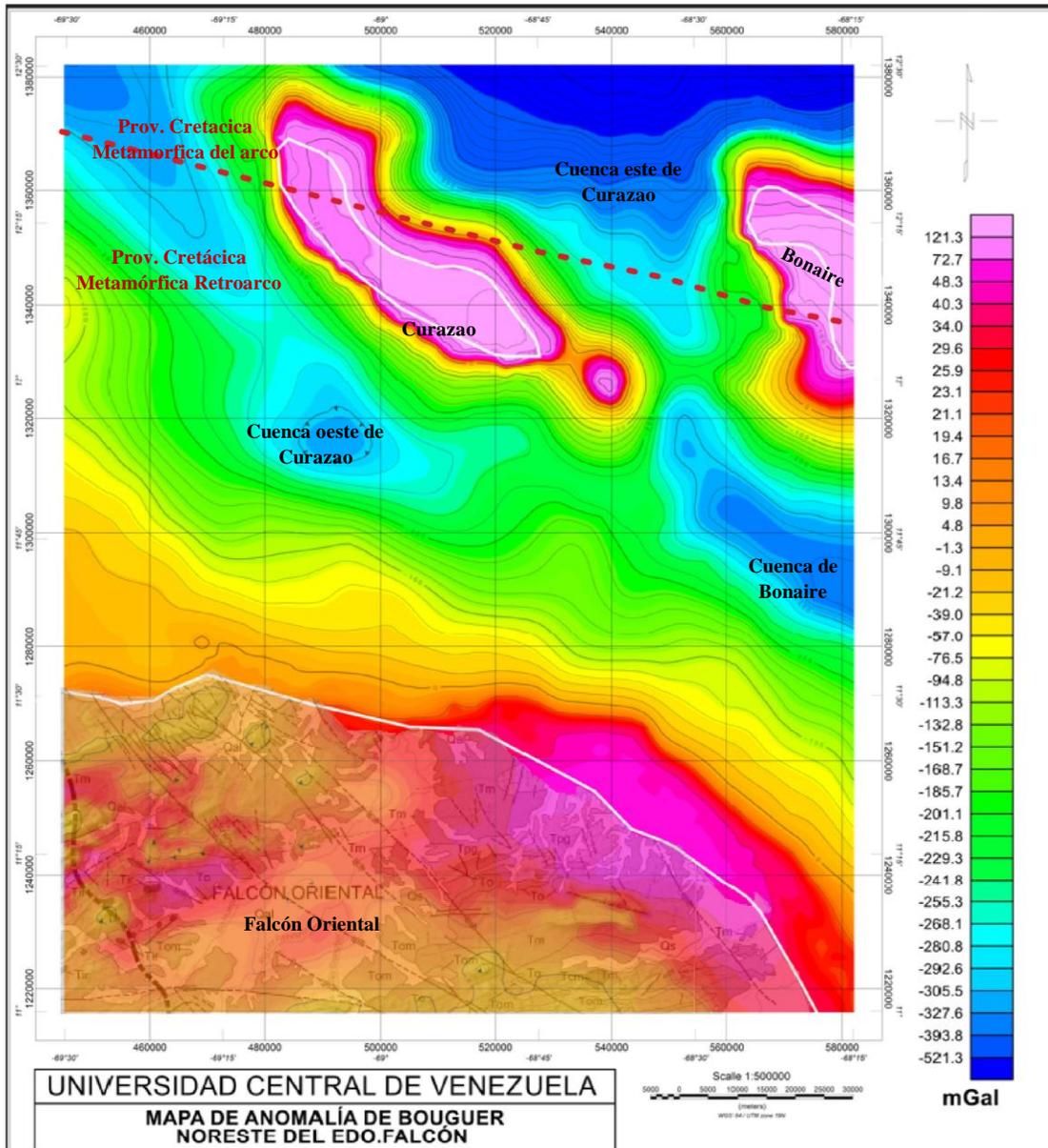


Figura V-4. b) Mapa de Anomalía de Bouguer interpretado de Falcón Oriental. Consideraciones del nivel de referencia igual al n.m.n y densidad de reducción de Bouguer de $2,67 \text{ g/cm}^3$. Datos del modelo EIGEM- C64. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N. La línea roja representa el límite entre las provincias de basamento, de acuerdo con la figura V-8

Se aplicaron diferentes técnicas y filtros a los datos de anomalía de Bouguer, con la finalidad de extraer más información de las estructuras geológicas existentes en la zona de estudio.

5.2.3 Espectro de potencia

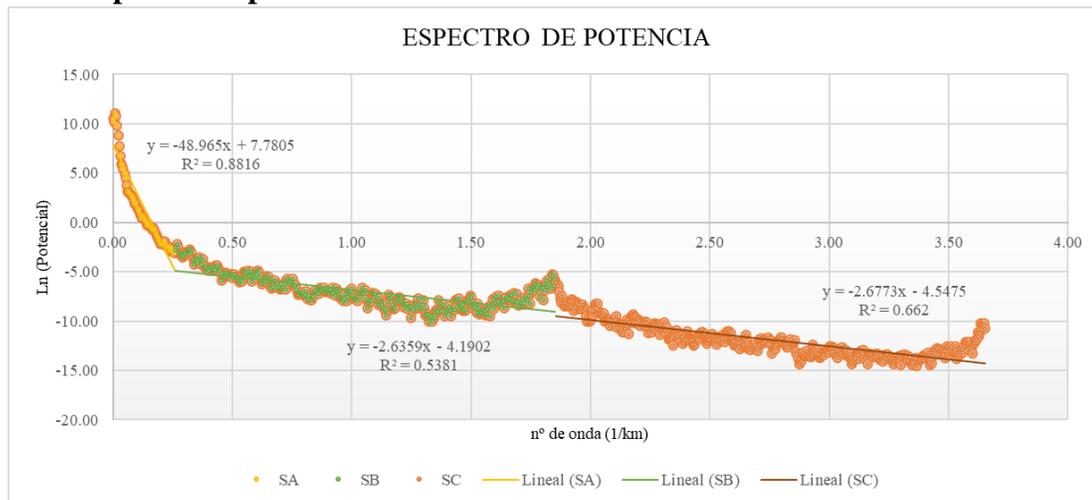


Figura V-5. Espectro de potencia gravimétrico para la ventana de estudio.

Se realizó un análisis espectral gravimétrico mediante el empleo de la herramienta Euler 3D del software Geosoft Oasis Montaj (figura V-5), con la finalidad de estimar las profundidades de las fuentes de las anomalías gravimétricas. Para ello, se generó un gráfico de Logaritmo de la Potencia Radial gravimétrica versus el número de onda (k) para la zona de estudio, en el cual se determinaron las pendientes de la distribución de datos que mantenían cierta linealidad. Para ello, se establecieron 3 tendencias lineales principales, a partir de las cuales se realizó un ajuste por mínimos cuadrados, para conseguir los valores de las pendientes de dichas rectas. Posteriormente, se calcularon los valores de profundidad de las fuentes someras (mediante la aplicación de la ecuación 12.), intermedia y profunda más representativas dentro de la escala limitada del estudio (Tabla 5). Dichos valores se usaron como referencia para generar el modelado gravimétrico.

En la Tabla 5 se exponen las distintas fuentes gravimétricas estudiadas y sus correspondientes profundidades estimadas a partir del análisis espectral. Se puede apreciar que las fuentes someras e intermedia tienden al mismo valor de profundidad (210 m), determinando así, que ambas pendientes (serie naranja y serie verde) de la gráfica del espectro de potencia gravimétrico (figura V-5) corresponden a una misma fuente de anomalía gravimétrica (o una de ellas corresponde a una capa muy delgada), aunque bifurcada por presencia de elementos ruidosos. Entonces, se sintetizó la clasificación de las fuentes según su profundidad como: profunda y somera. Se asume que, las escasas estimaciones de profundidad se deben al rango de tamaño de la ventana de la zona de estudio.

Tabla 5. Profundidades estimadas a partir del espectro de potencia gravimétrico.

Profundidad (km)	Fuente
0,209	Somera
0,213	Intermedia
3,896	Profunda

La fuente profunda identificada con 3.90 km se puede relacionar con el basamento (Bloque de Bonaire descrito como corteza transicional) de la cuenca de Agua Salada, a diferencia de la fuente somera, cercana a 210m de profundidad que puede estar relacionada a al tope de las unidades volcánicas de Curazao y Bonaire.

5.2.4 Separación de las Anomalías Regionales y Residuales

Una técnica clave en el análisis gravimétrico sobre el área de investigación, es la separación regional – residual, la cual fue un aspecto fundamental para la interpretación geológico-estructural de la zona de estudio. Mediante este método es posible diferenciar las anomalías de gran amplitud y longitud, distintivas de la disposición estructural del basamento, de las de menor amplitud y extensión, asociadas a características anómalas locales del subsuelo y cercanas a la superficie.

➤ Separación por superficies polinómicas o matemáticas

La figura V-6, resultó de la aplicación de filtros polinómicos de distinto orden, con el objetivo de dilucidar información atribuida a fuentes locales o residuales de las de origen regional. Estas superficies fueron examinadas, llegando a determinar que la superficie de tendencia polinómica que mejor se ajustó a los datos de Anomalía de Bouguer fue la de segundo grado, tanto a nivel regional como residual (figura V-7).

Se generó el mapa de anomalías regionales como resultado de descartar el efecto de las masas superficiales, (figura V-7.a), el cual presenta una tendencia general suave, con contornos isoanómalos cada 20 mGal, cuya tendencia preferencial es N45°O. Sin embargo, éste tiende a alinearse con un rumbo O-E de forma transicional al noreste y en la región centro oriental, con valores de gravedad entre -100 mGal y -200 mGal. Por tal razón, se pudo deducir el control del basamento sobre el desarrollo de las estructuras geológicas (como las Antillas y las cuencas marinas).

En la región sur los contornos regulares de anomalía gravimétrica oscilan entre -40 y 40 mGal. Específicamente sobre las coordenadas 68°45' O y 11°14' N, se observa un mínimo local de aproximadamente -40 mGal, vinculado el área, a la forma de la depresión de la cuenca de Falcón oriental.

En general, la disminución gradual en los valores de los contornos gravimétricos hacia el norte (variando desde 20 mGal hasta -400 mGal) se adjudica como respuesta de la profundidad de la discontinuidad de Mohorovicic, cuya tendencia es opuesta al comportamiento estándar, ya que suele ser más profundo en las secciones continentales, pero en este caso, por lo limitado del área de estudio se puede enfatizar el efecto de adelgazamiento cortical en la cuenca de Falcón, lo cual ubica la discontinuidad más cercana a la superficie que en los casos continentales, por lo cual su respuesta se describe como un máximo absoluto. Además, se aprecia de norte a sur una variación progresiva descendiente del gradiente gravimétrico (aproximadamente

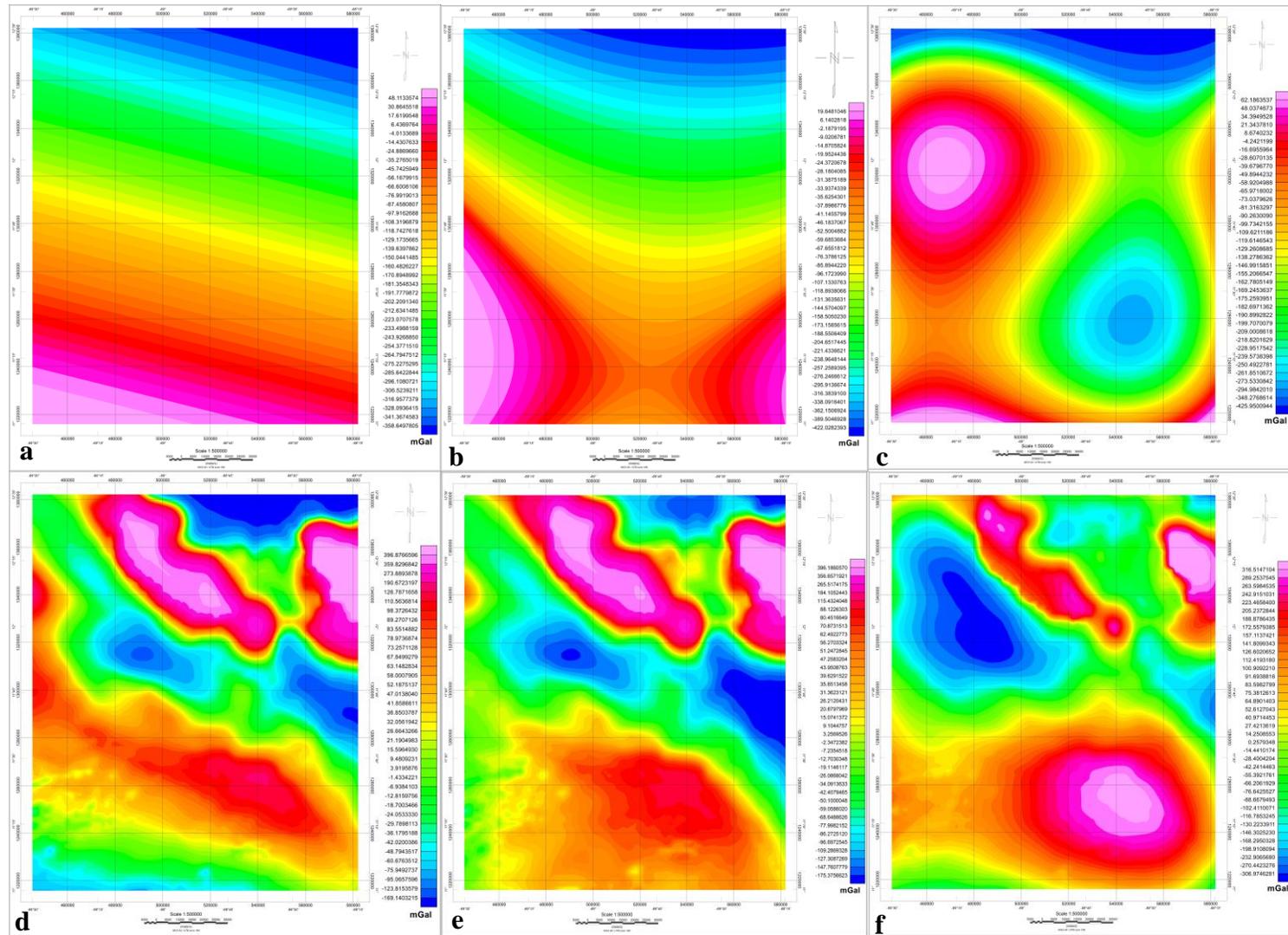


Figura V-6. Separación Regional-Residual mediante superficies matemáticas. Las figuras a, b y c son de carácter regional para el polinomio de 1^{er} °, 2^{do} ° y 3^{er} ° respectivamente; mientras que, la figura d, e y f son de carácter residual de orden de 1^{er} °, 2^{do} ° y 3^{er} °. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N

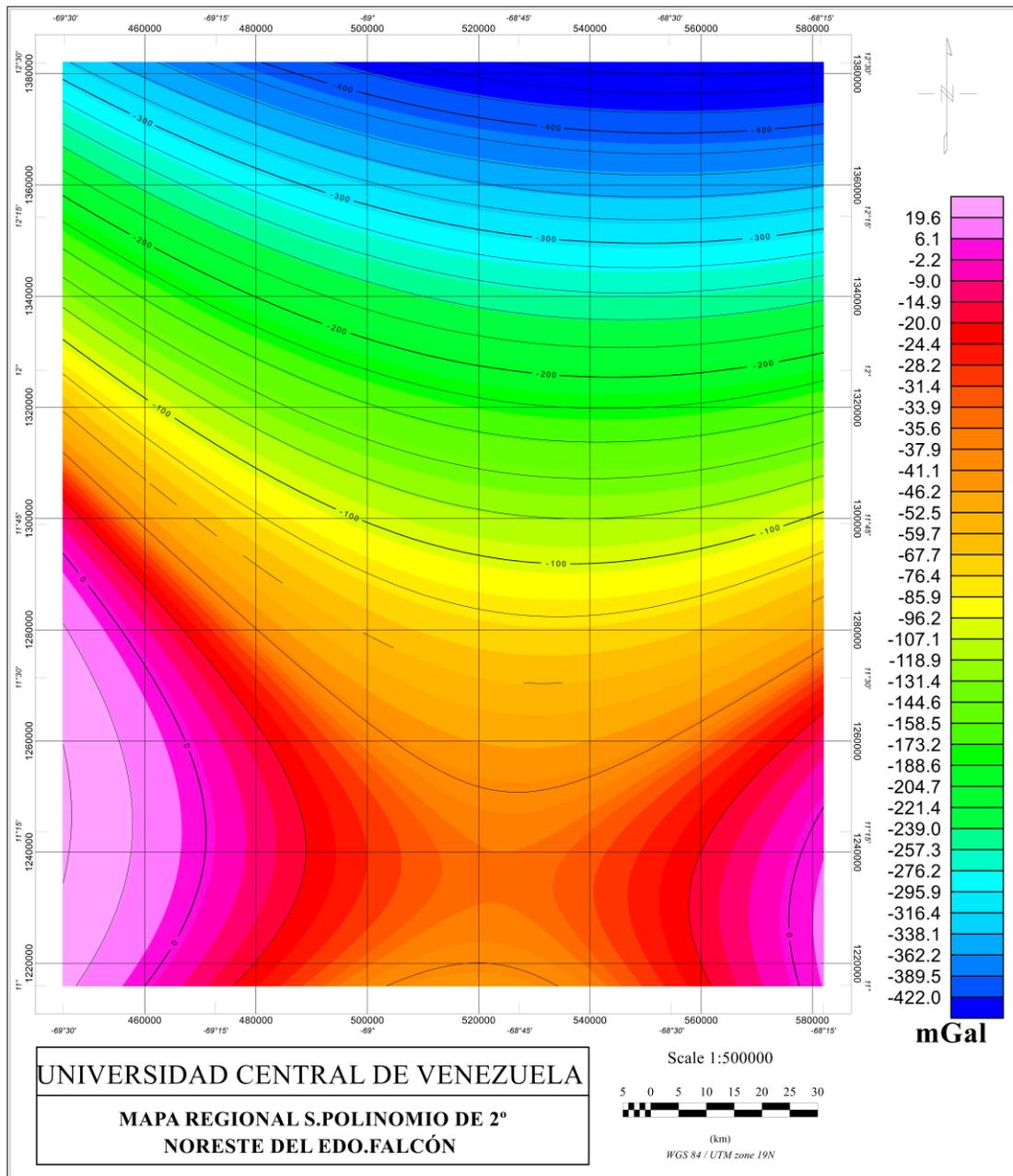


Figura V-7 a). Separación Regional – Residuall. Superficie regional mediante polinomio de 2do grado. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

de 4,76 a 1,46 mGal/km), lo cual indica que la discontinuidad aumenta su profundidad y su pendiente más rápido en la región norte.

La figura V-7. b, excluye el gradiente regional del mapa de Anomalías de Bouguer, obteniendo así el efecto de las masas superficiales que se encuentran en el subsuelo de la zona, lo que representa el mapa de anomalías residuales.

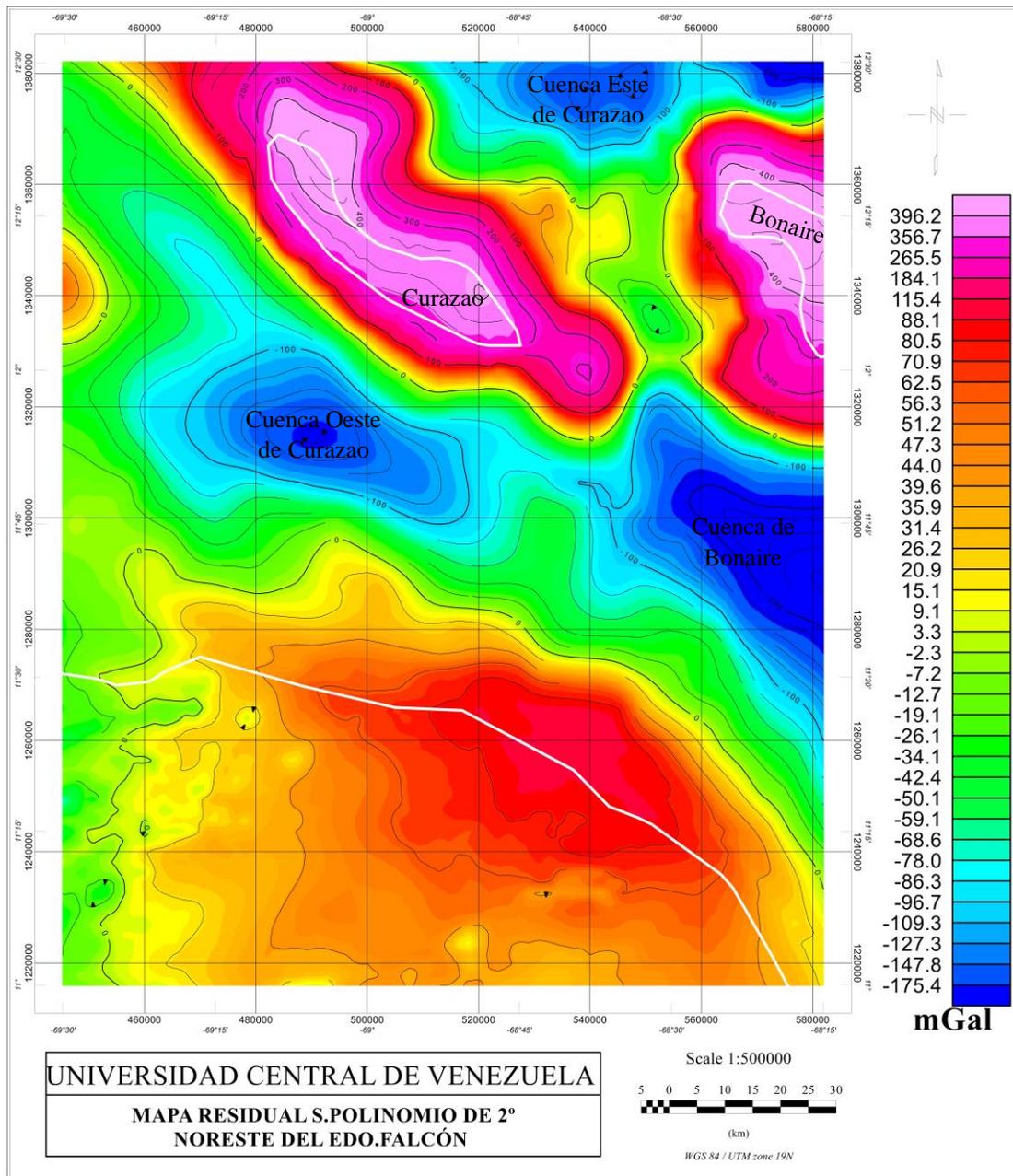


Figura V-7 b). Separación Regional – Residual. Superficie regional mediante polinomio de 2do grado. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

En este mapa (figura V-7. b) se muestran contornos isoanómalos residuales cada 20 mGal, que varían desde 400 mGal hasta -180 mGal y cuya orientación general presenta una tendencia SE-NO, aunque en algunos casos de carácter local se observa la desviación de esta tendencia, como por ejemplo en la región sur oeste de la zona de estudio.

Por otra parte, se distingue la presencia de varios máximos y mínimos gravimétricos locales, donde los mínimos se vinculan con los depocentros de la cuencas marinas y el material sedimentario que albergan; mientras que los máximos localizados al norte, de silueta elongada (máximos absolutos cercano a los 400 mGal) se atribuyen a las formaciones volcánicas y meta-sedimentarias que componen a las Antillas Holandesas; mientras que el máximo en el sur, cercano a las coordenadas $68^{\circ} 45' O$ y $11^{\circ} 30' N$, es el resultado del efecto del levantamiento del anticlinorio de Isidro y el material calcario que lo limita al norte (formación Punta de Águila)

➤ Separación por continuación Analítica hacia arriba.

Con la finalidad de validar y generar una buena representación regional y residual, se decidió aplicar como método auxiliar o secundario, el método de continuación analítica de campo hacia arriba. Este consiste en considerar a la altura como factor de control, mediante el cual el efecto residual se va atenuando en la medida que aumenta la altura, filtrando las longitudes de onda corta (alta frecuencia) y dejando en evidencia las longitudes de onda larga (baja frecuencia) con una alta correspondencia geológica.

Las figuras que componen a la ilustración V-8, se generaron aplicando continuación analítica de campo hacia arriba, calculada a diferentes alturas correspondientes a: 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km y 30 km. Examinando cada uno de estos resultados se observa cómo, conforme aumenta la altura, el efecto residual se va atenuando. A partir de esto, se asume que la mejor superficie generada para representar la componente regional de la anomalía de Bouguer total, corresponde a 25 km de altura; debido que, es la altura a partir de la cual no se observan cambios gravimétricos significativos causados por la masa de los cuerpos rocosos someros.

Previo al análisis cualitativo del mapa, se hizo una comparación general entre las figuras V-6 y V-8, observándose que la respuesta obtenida en la figura V-9 se asemeja considerablemente a las superficies polinómicas de primer grado que se muestran en la figura V-6.

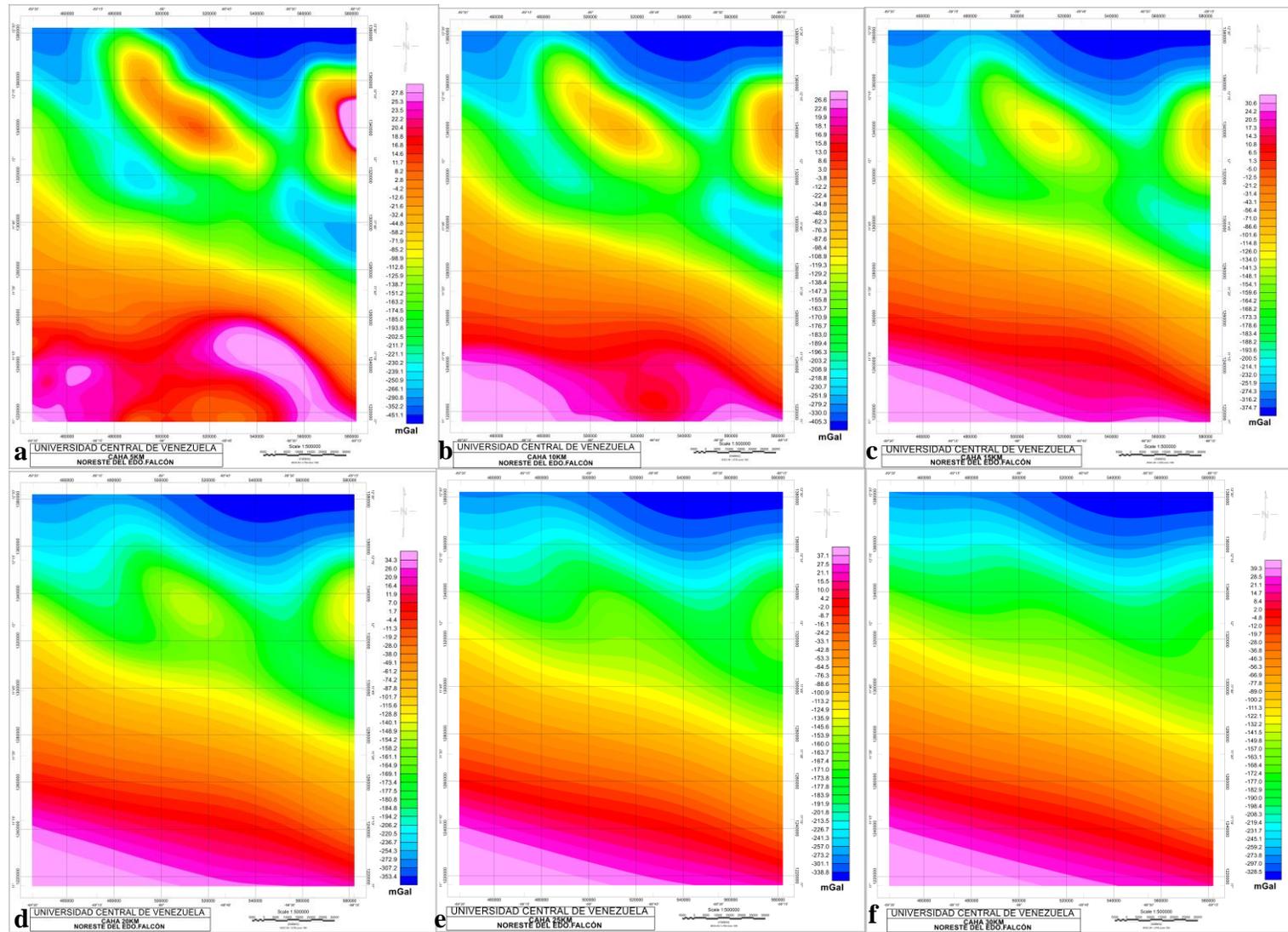


Figura V-8. Separación Regional-Residual mediante continuación analítica hacia arriba “CAHA”. Las figuras a, b, c, d, e y f son CAHA para 5km, 10km, 15km, 20km, 25km 30km respectivamente. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

Debido a que la respuesta regional obtenida por el método CAHA (figura V-9.a), presenta contornos isonómicos más suavizados, evidenciando una respuesta intermedia entre la superficie de primer y segundo grado, se consideró la CAHA de 25 km como la mejor superficie para representar las anomalías regionales.

La figura V-9.a, de forma general, presenta contornos isonómicos cada 20 mGal, los cuales presentan una tendencia preferencial en sentido SE- NO. Además, se observa que los contornos disminuyen desde 60 mGal, hasta -340 mGal, desde el suroeste al noreste, en concordancia con el buzamiento de la discontinuidad de Mohorovicic (excepción al comportamiento regional entre la placa Caribe y la placa Suramérica, ya que, por la dimensión de la ventana de estudio, es capaz de reflejar el adelgazamiento cortical presenta la cuenca). Otra característica que se aprecia es que los contornos están regularmente espaciados en el sur del área de estudio, lo que indica un gradiente uniforme en dicha zona. Sin embargo, se observan ondulaciones de los contornos entre las isonómicos de -180 mGal y -200 mGal, debido al adelgazamiento cortical bajo las Islas de Curazao y Bonaire. A partir de este mínimo local, se distingue que el gradiente gravimétrico al suroeste es menor (2,72 mGal/km) que el observado al noreste (4,54 mGal/km), lo cual representa un aumento del ángulo de buzamiento al noreste.

Con base en el mapa regional establecido, se procedió a generar el mapa residual mediante la sustracción de la componente regional al mapa de anomalía de Bouguer, obteniendo como resultado el mapa que se muestra en la figura V-9. b. En éste se pueden apreciar los contornos gravimétricos influenciados por las estructuras residuales, cuya orientación local es relacionada con la orientación regional N45°O.

En el mapa residual se distinguen varios mínimos y máximos gravimétricos. Los mínimos que se encuentran entre -100 mGal y -200 mGal, localizados en la región norte, son la respuesta generada por la forma de las cuencas marinas (cuencas de Curazao y la cuenca de Bonaire). Además, del contraste de densidad generado por su espesa y profunda columna de material sedimentario, en relación con su entorno de menor acumulación sedimentaria. Cabe acotar que estas cuencas son apreciadas gravimétricamente por contornos de orientación N45°O; aunque la cuenca de este de

Curacao tiende a alinearse con respecto a la línea E-O por influencia de la alineación trinchera de Los Roques.

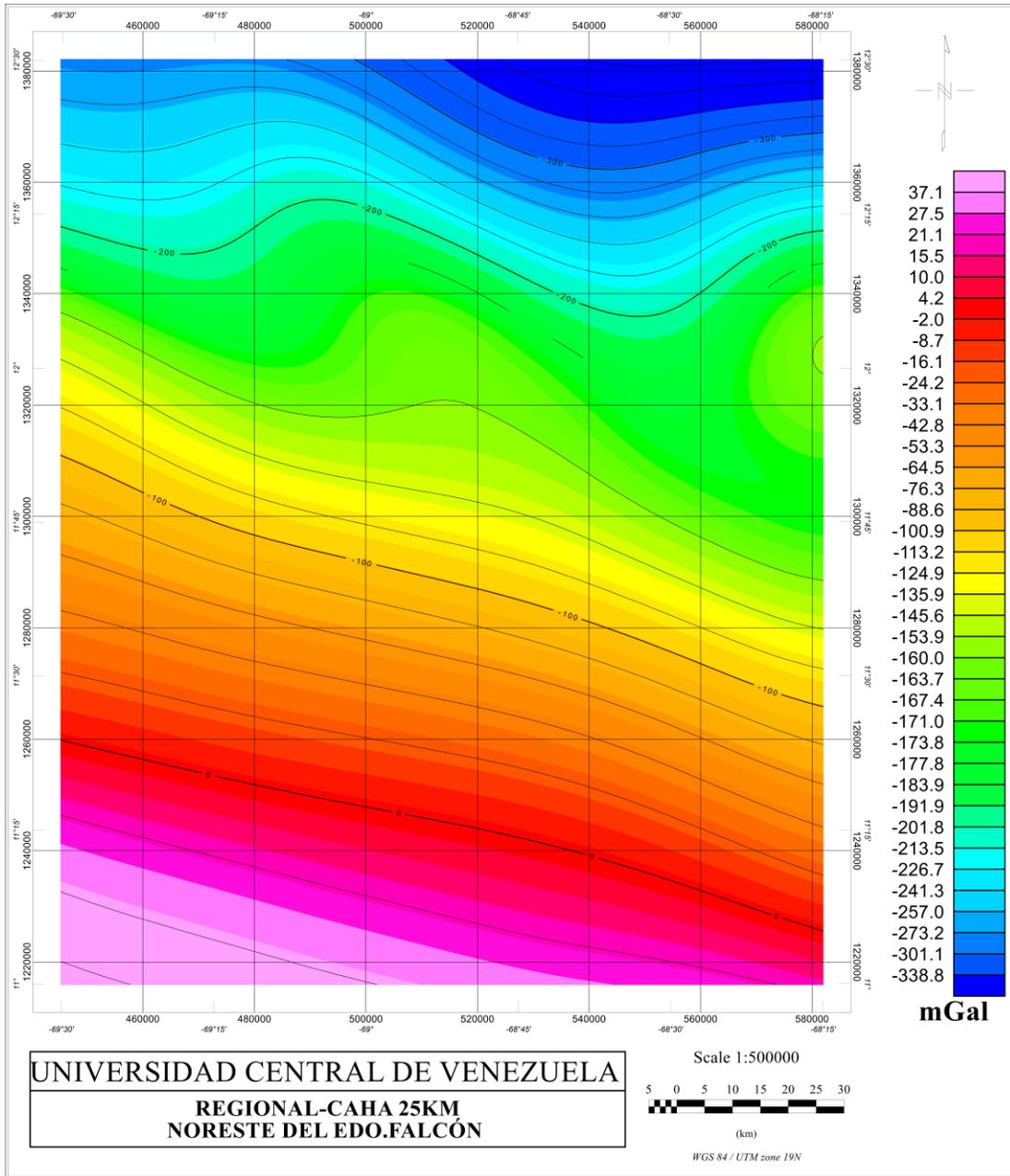


Figura V-9.a) Separación Regional-Residual, mediante continuación analítica hacia arriba “CAHA” a 25Km..Superficie Regional. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

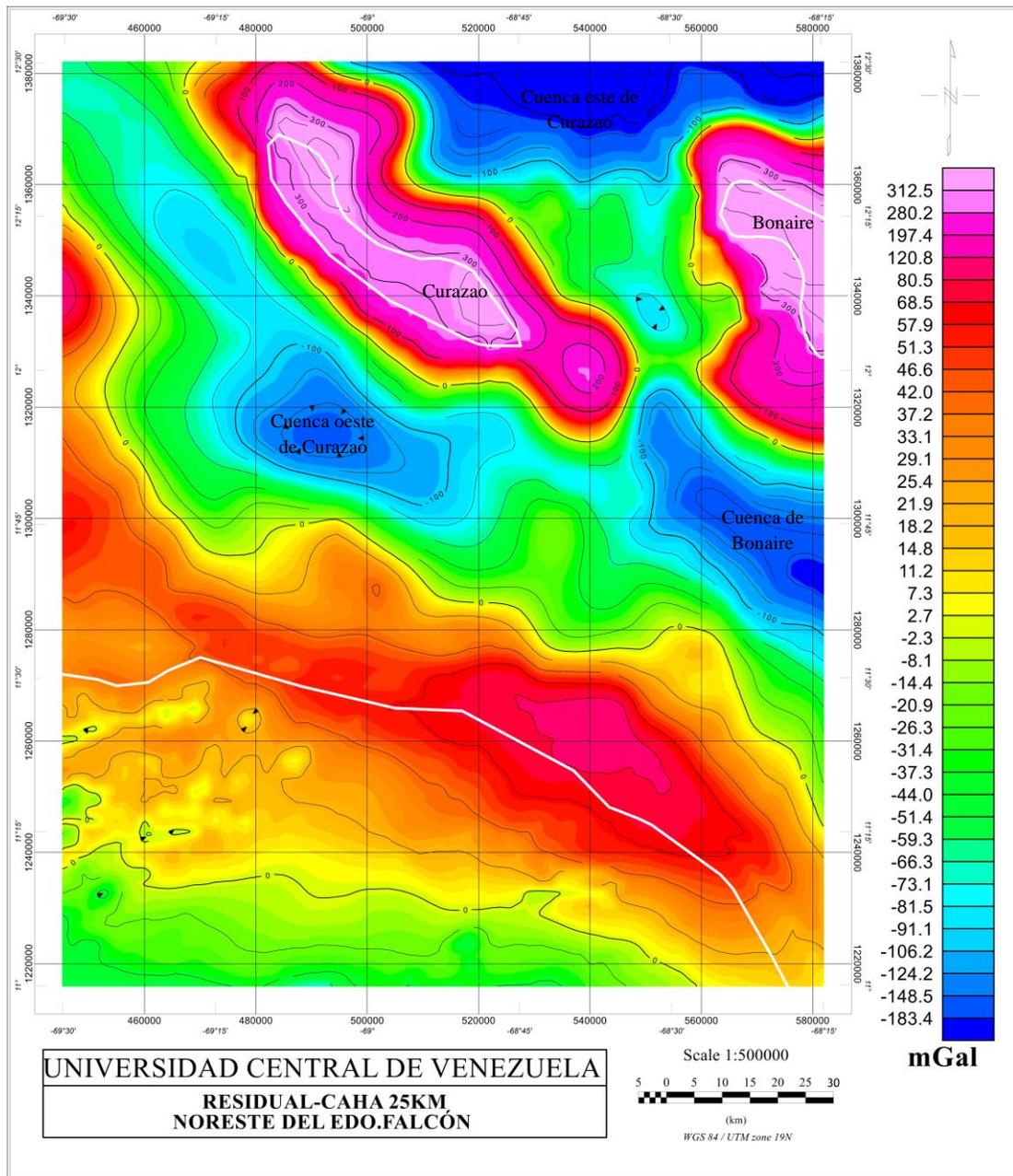


Figura V-9. b) Separación Regional-Residual, mediante continuación analítica hacia arriba “CAHA” a 25Km.Superficie Regional. Datum WGS 84/ UTM-ZONE 19N.

Todo mínimo por lo general se asocia a un máximo, razón por la cual el norte alberga también a los máximos absolutos, cercanos a 300 mGal. Estas cuentan con una orientación preferencial N45°O (tal como los mínimos descritos previamente) y se identifican como las elevaciones litosféricas de características ígneas y vulcano-

sedimentarias conocidas como la Isla de Curazao y Bonaire. Mientras que al sur se ubica un máximo local, con una orientación SE-NO y el cual se vincula con el anticlinorio de Isidro, aunque al suroeste de dicho máximo, la respuesta gravimétrica se degrada a un mínimo debido a la transición a la zona más profunda de la cuenca de Agua Salada y al material meta-sedimentario presente en ella.

5.2.5 Deconvolución de Euler

La estimación de profundidades para fuentes de anomalías gravimétricas en la zona de estudio, mediante la deconvolución de Euler, se realiza con la finalidad de estimar tendencias, orientación y profundidad de posibles fuentes de anomalías gravimétricas, tales como estructuras geológicas, tanto profundas como someras, presentes en la zona de estudio. Para ello, se realizaron 10 pruebas (tabla 6), que se basaron en alternar los parámetros de índice estructural, tolerancia y tamaño de la ventana. A partir de los resultados, se consideró la prueba 3, como la mejor respuesta para la estimación de profundidad.

Tabla 6. Parámetros utilizados la Deconvolución de Euler mediante el software Oasis Montaj v6.4.2

Prueba	Índice Estructural	% Tolerancia	Tamaño de Ventana
1	1	5	5
2	1	5	10
3	1	5	15
4	1	5	20
5	1	2	15
6	2	5	5
7	2	5	10
8	2	5	15
9	2	5	20
10	2	2	15

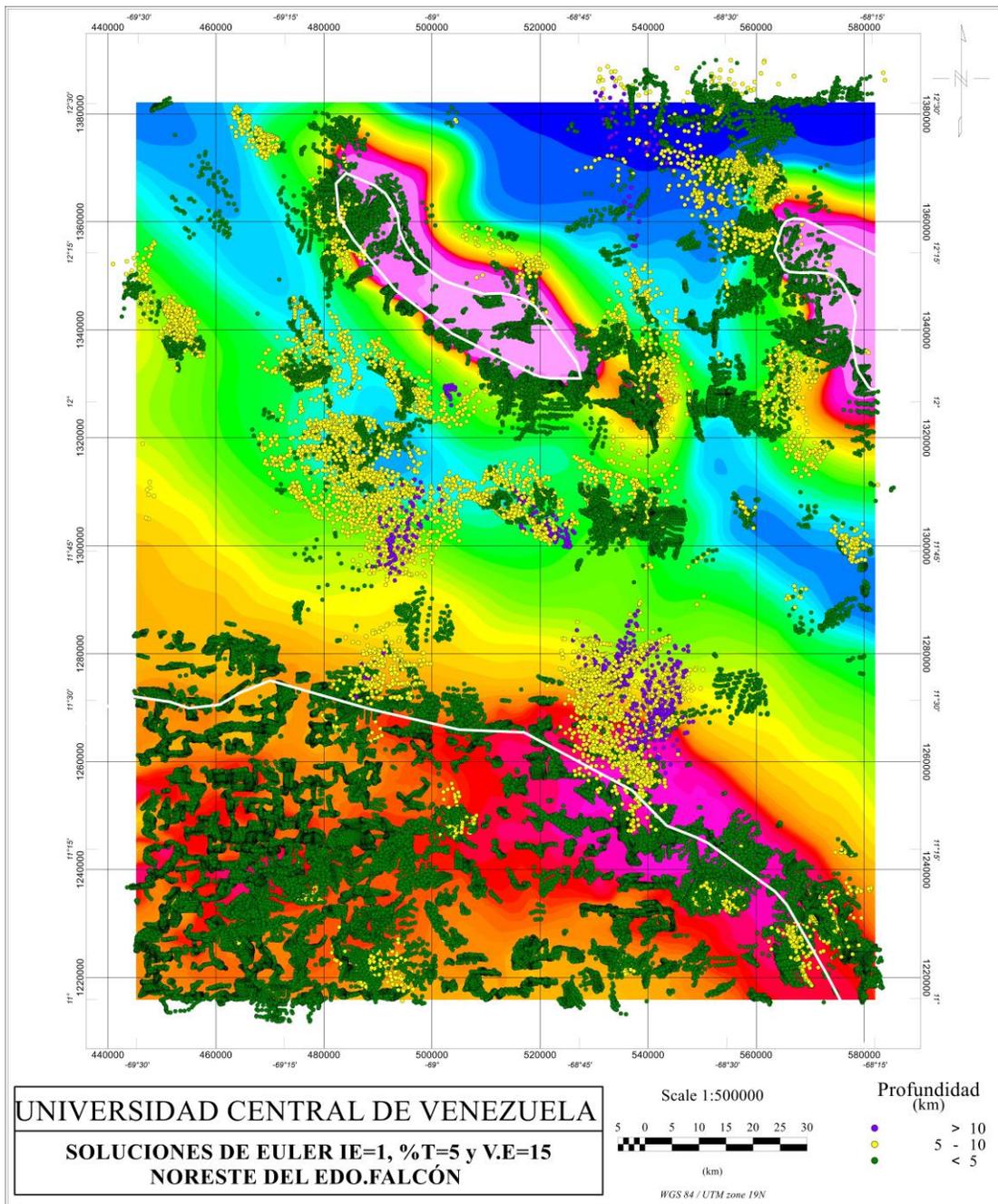


Figura V-10. Mapa de Deconvolución de Euler de los datos de anomalía de Bouguer obtenido con la prueba número 3. Las líneas negras ilustran las posibles fallas.

En la figura V-10, se aprecia una considerable cantidad de soluciones, de las cuales se sugiere que las menores a 5 km de profundidad se relacionan con las crestas del basamento del Bloque de Bonaire, ya que la región sur del área de investigación concuerda con el área de desarrollo de la cuenca de Falcón; mientras que al norte las

soluciones de Euler se agrupan sobre las Antillas Holandesas. Mientras que, al suroeste de Curazao se observa otra fuente creada por un alto del basamento que fragmenta a la cuenca oeste de Curazao.

Con referencia a las soluciones mayores a 5 km y menores a los 10 km, estas se correlacionan con los sistemas de fallas presentes en la zona, según lo ilustrado en el apéndice 2, 3 y 6; además de la profundización del basamento (principalmente en la cuenca Oeste de Curazao). Sin embargo, sobre las coordenadas $68^{\circ} 45' O$ y $11^{\circ} 30' N$, se observa que esta respuesta se extiende en conjunto con soluciones mayores a los 10 km, razón que lleva a considerar el buzamiento en dirección el norte del posible cuerpo ígneo.

Las soluciones mayores a los 10 km se ubican en el noreste de la zona de estudio como respuesta de la fuente vinculada a la fosa de los Roques. Mientras que, al sureste de la cuenca del occidente de Curazao, se aprecian soluciones de igual magnitud, asociadas a los límites entre corteza superior e inferior de esta cuenca.

5.3 SÍSMICA DE REFLEXIÓN

5.3.1 INTERPRETACIÓN SISMICA

En la actualidad, la interpretación de secciones sísmicas constituye una herramienta fundamental para realizar modelos del subsuelo con la finalidad de prospección exploratoria. Por ende, realizar una buena interpretación y generar un modelo del subsuelo lo más representativo de la zona de estudio, dependerá del conocimiento y la experiencia que se tenga de la zona de investigación, ya sea desde el punto de vista geofísico como geológico.

En general, a partir de las líneas sísmicas interpretadas en la investigación, se pudo definir un total de 5 secuencias, mediante 5 horizontes sísmicos (considerando el fondo marino o la batimetría como una uno de los horizontes) los cuales se ilustran en la tabla.7. Cabe resaltar que no se contó con información de pozos cercanos al área, lo

cual limito la calibración en profundidad de los horizontes, sin embargo, a partir de estos se generó la idea del comportamiento de los estratos en la zona.

Tabla 7. Secuencias estratigráficas definidas para las líneas sísmicas A1, A2, A4 y AD. Tomando en consideración el estudio de Bezada *et al.* (2008).

ERA	PERIODO	EPOCA	S. ESTRATIGRÁFICA	
CENOZOICO	CUARTENARIO	HOLOCENO	SECUENCIA 5	
		PLEISTOCENO		
		PLIOCENO		
	TERCIARIO	MIOCENO	SUPERIOR	SECUENCIA 4
			MEDIO	SECUENCIA 3
			TEMPRANO	
		OLIGOCENO	SECUENCIA 2	
		EOCENO		
		MEZOZOICO	CRETACICO	SEC 1- BASAMENTO

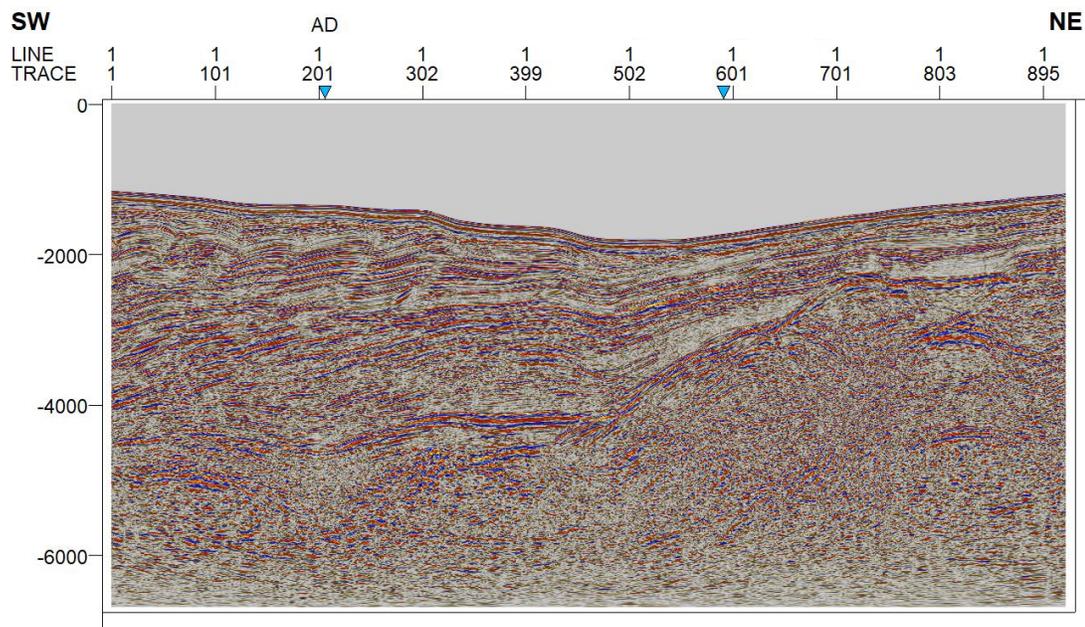


Figura V-11 a). Perfil Sísmico de Reflexión A1.

La primera línea sísmica interpretada es la A1 (figura V-11. b), siendo esta el registro más al este del conjunto sísmico (grupo de líneas sísmicas tomadas en cuenta para la investigación) cuya orientación es SO-NE. De la interpretación realizada se

puede describir que el primer horizonte sísmico, delimita lo que es el basamento ígneo-metamórfico, el cual tiende levantarse en dirección NE, asociando así con la pendiente del flanco SO del pequeño levantamiento cortical ubicado en el sureste de la Isla de Curazao.

Con respecto a la segunda secuencia estratigráfica, su tope está definido por el horizonte Oligoceno -Mioceno. Esta secuencia tiene un comportamiento concordante al SW, pero discordante al NE, como consecuencia de su truncamiento contra el basamento.

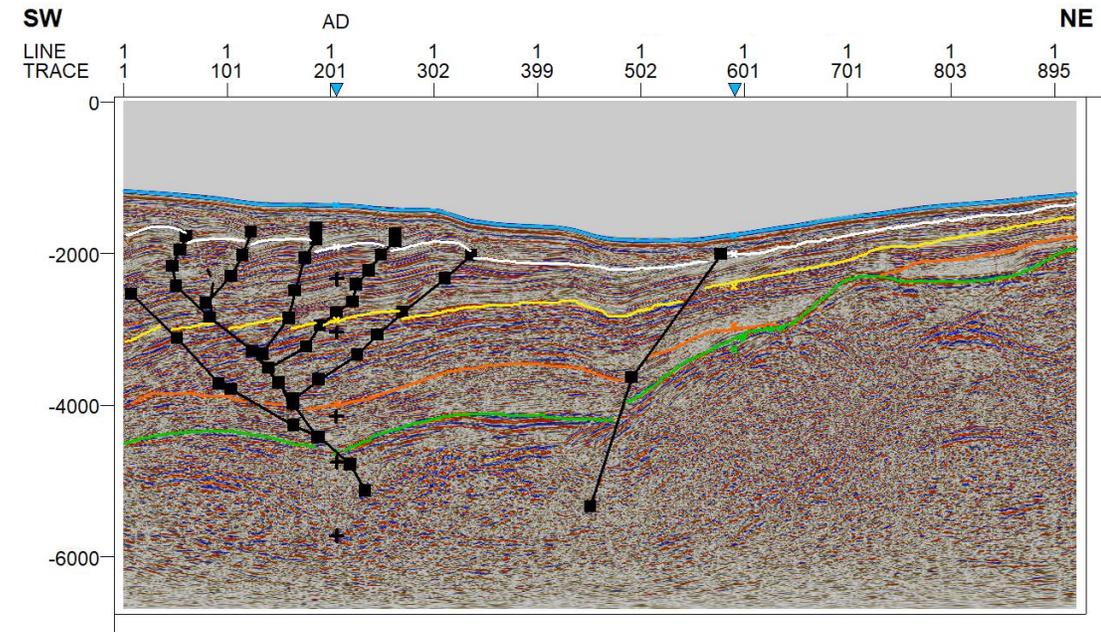


Figura V-11 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión A1.

Ahora bien, la siguiente secuencia sedimentaria estuvo comprendida entre Mioceno temprano y el Mioceno medio, en el cual se observa su engrosamiento al SO producto de la depresión del basamento en esa dirección y su adelgazamiento al NE. Este comportamiento fue replicado por las secuencias suprayacentes.

Entonces de forma general, se observa que las secuencias estratigráficas tienden a aumentar su espesor al SO, debido a la depresión del basamento ígneo-metamórfico que da paso a la cuenca occidental de Curazao; mientras que, al NE tienden a estrecharse como consecuencia del ascenso del basamento. Además, se infiere la presencia de un sistema de falla de flor en el suroeste y de una falla normal al noreste.

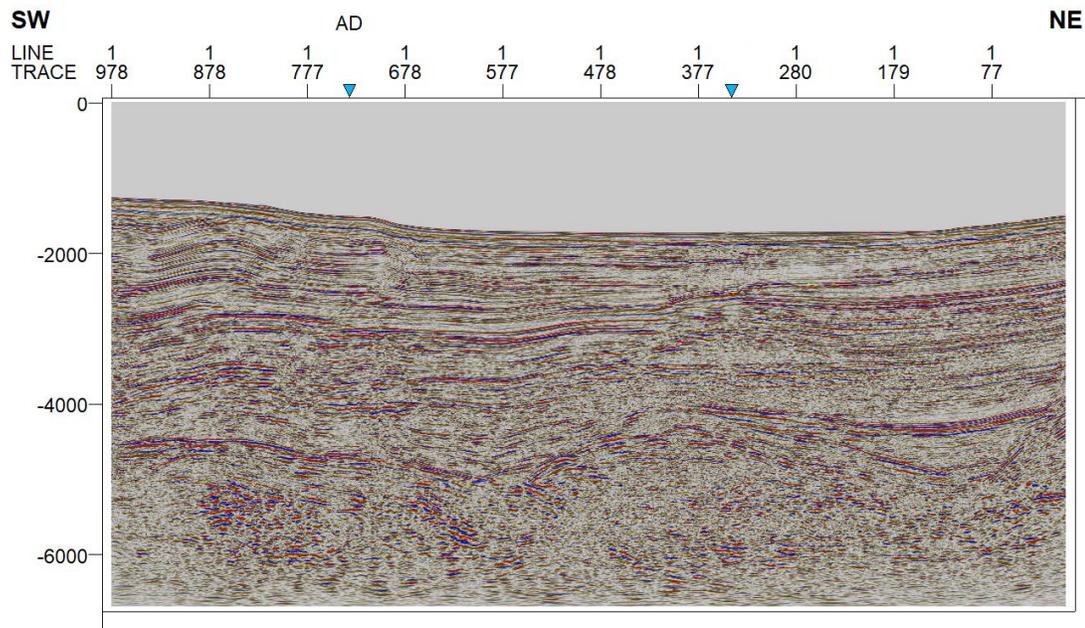


Figura V-12 a). Perfil Sísmico de Reflexión A2.

La segunda línea sísmica interpretada (figura V-12. b), se denomina A2, la cual es sub paralela a la A1, por lo cual muestra la continuidad lateral de los mismos reflectores sísmicos. Sin embargo, para el área en donde se desarrolló la sísmica se observa mayor paralelismo o concordancia entre las secuencias estratigráficas, las cuales se acercan a la horizontalidad; aunque la sugerencia de dos fallas normales cercanas a la traza 478, proponen el levantamiento de las secuencias al NE, en coherencia con la zona, por su cercanía al levantamiento de la isla de Curazao. Además, también se proponen la presencia de una falla inversa producto de los esfuerzos tectónicos mixtos.

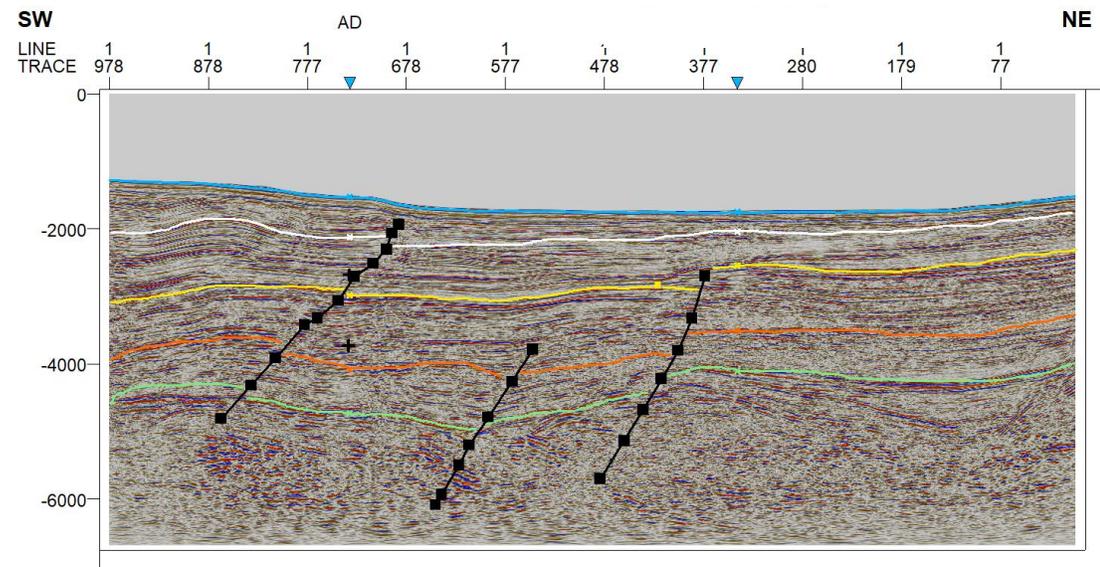


Figura V-12 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión A2.

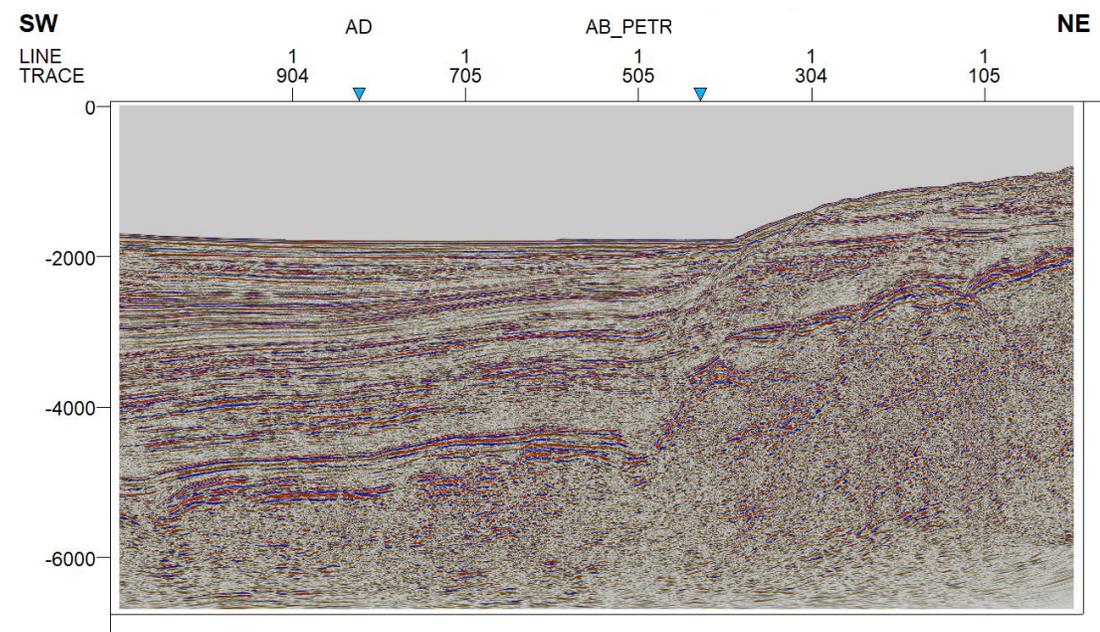


Figura V-13 a). Perfil Sísmico de Reflexión A4.

De la interpretación realizada sobre la línea sísmica A4 (figura V-13. b), se sugiere la presencia de fallas normales, que ocasionan el levantamiento de las secuencias en dirección NE, ocasionando así la erosión de las secuencias 5, 4 y 3; sobre

el bloque comprendido entre las trazas 304 y 105. Mientras que, en la región SO las formaciones tienden a decaer.

En general, esta línea es sub paralela a las dos mencionadas previamente, por lo cual los horizontes tienen continuidad lateral; al igual que las fallas normales ilustradas en las líneas en la interpretación de las líneas A1, A2 y A4 (figuras V-11. b, V-12. b y V-13. b)

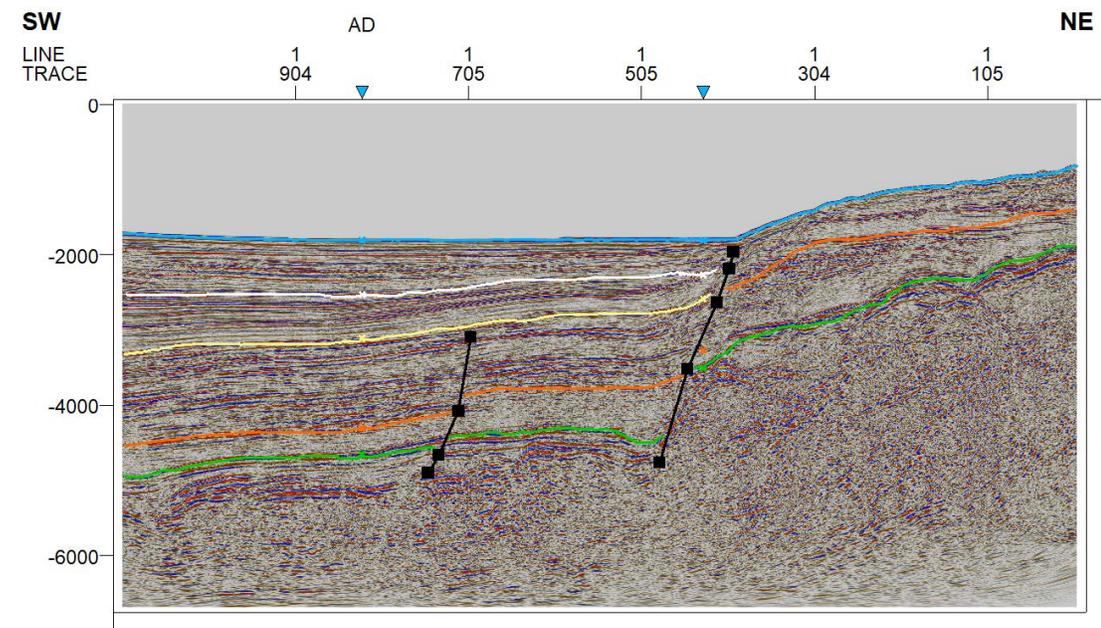


Figura V-13 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión A4.

La línea sísmica AD (figura V-14.b) tiene una orientación SE-NO, por ende, es perpendicular a las líneas descritas anteriormente, donde se observa continuidad de los horizontes sísmicos, cuya secuencia 2, se deposita de forma discordante sobre el basamento. Sin embargo, las secuencias suprayacentes son concordantes con la segunda secuencia. Además, se observa que las secuencias tienden a aumentar su ángulo de buzamiento hacia los extremos (NW Y SE) lo cual genera una leve depresión en el área central.

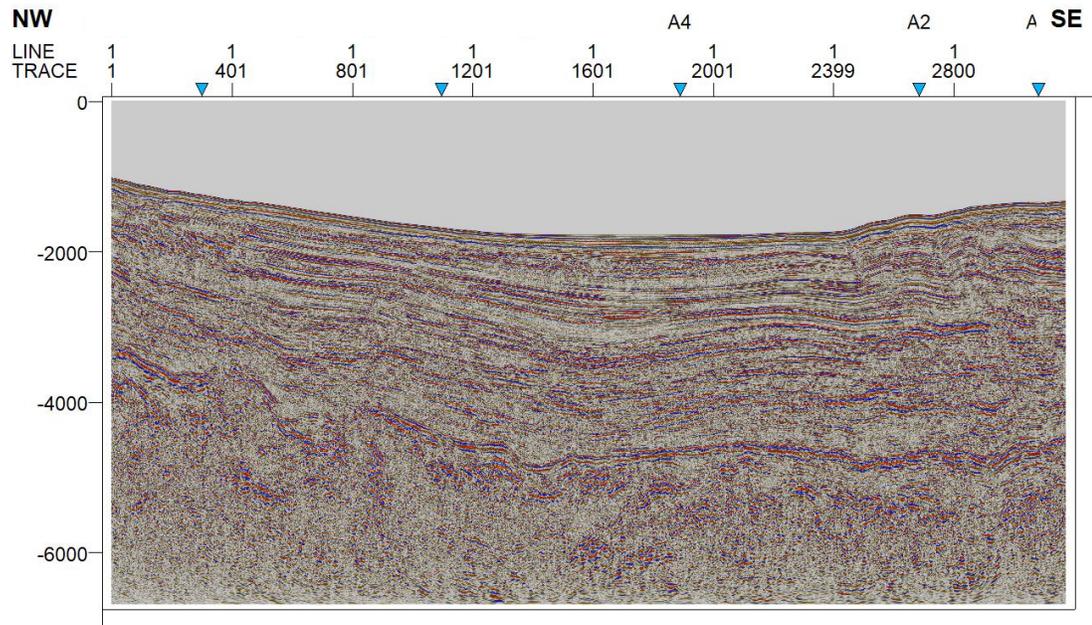


Figura V-14 a). Perfil Sísmico de Reflexión AD.

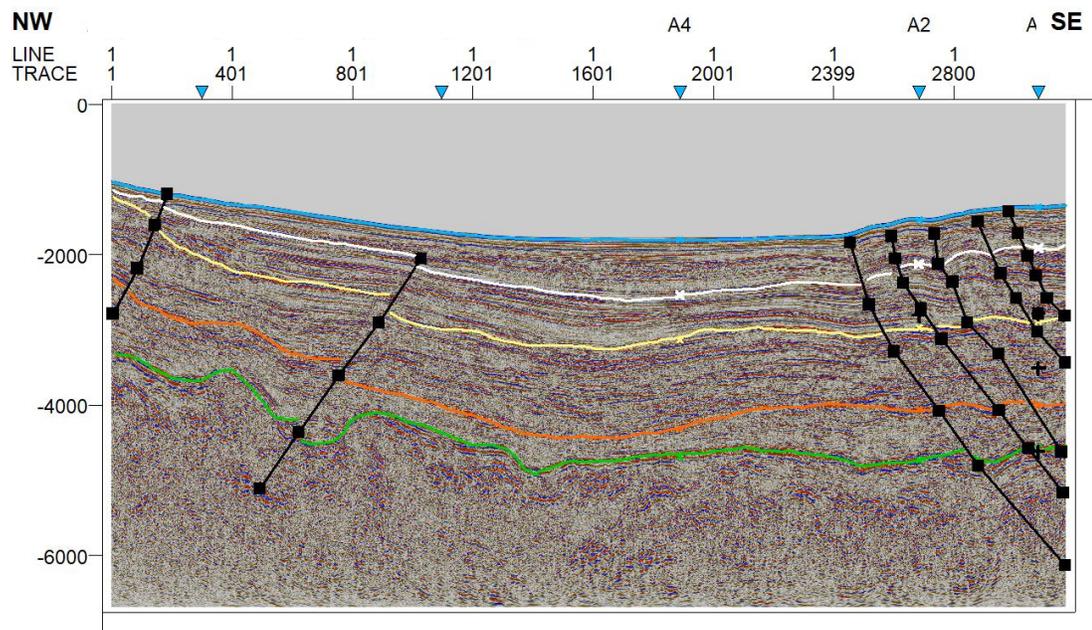
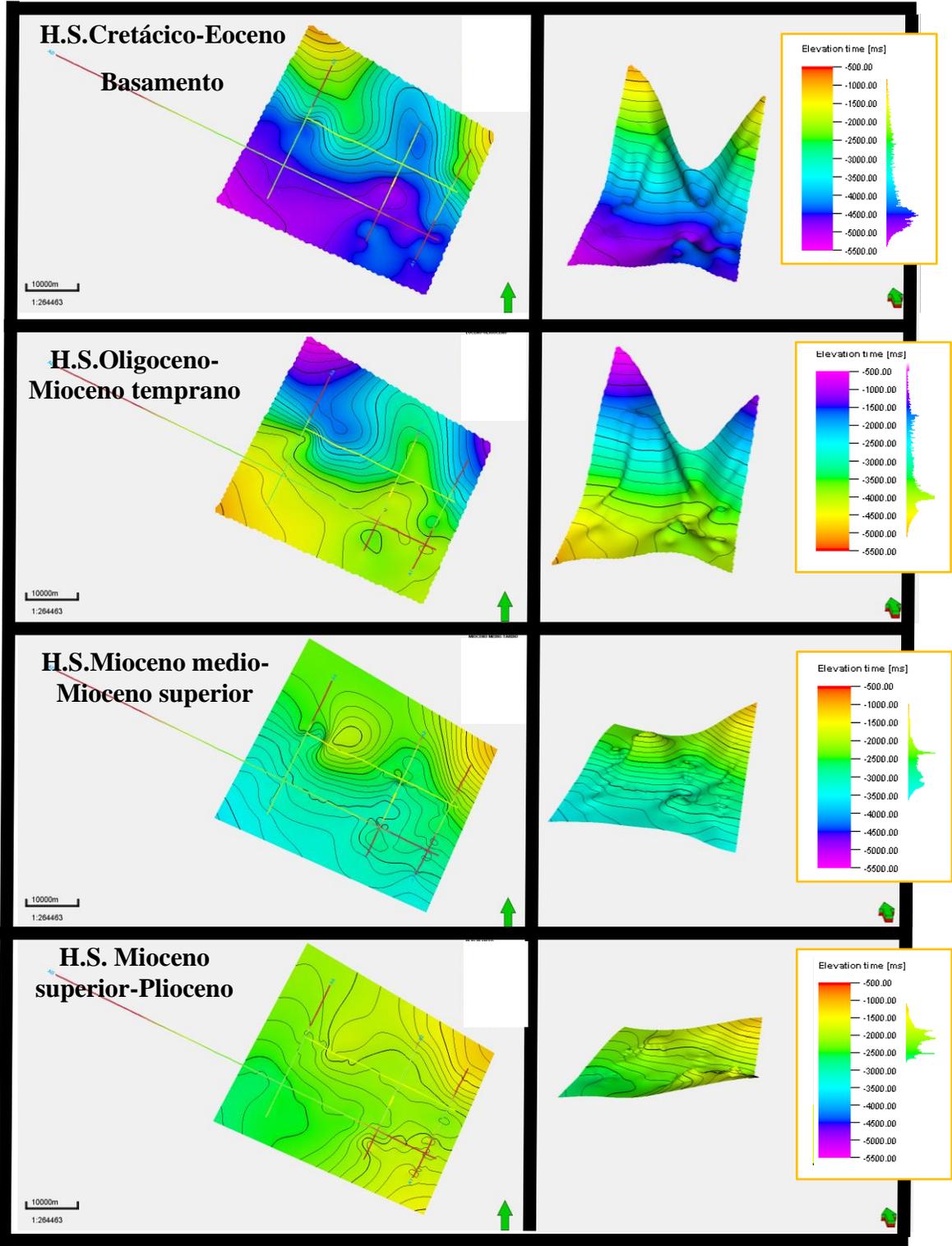


Figura V-14 b). Interpretación de perfil Sísmico de Reflexión AD.

Otro aspecto para resaltar es la coincidencia del sistema de fallas inversas al SE con la falla en flor de la figura A1 y la falla inversa al SO de la línea sísmica A2.



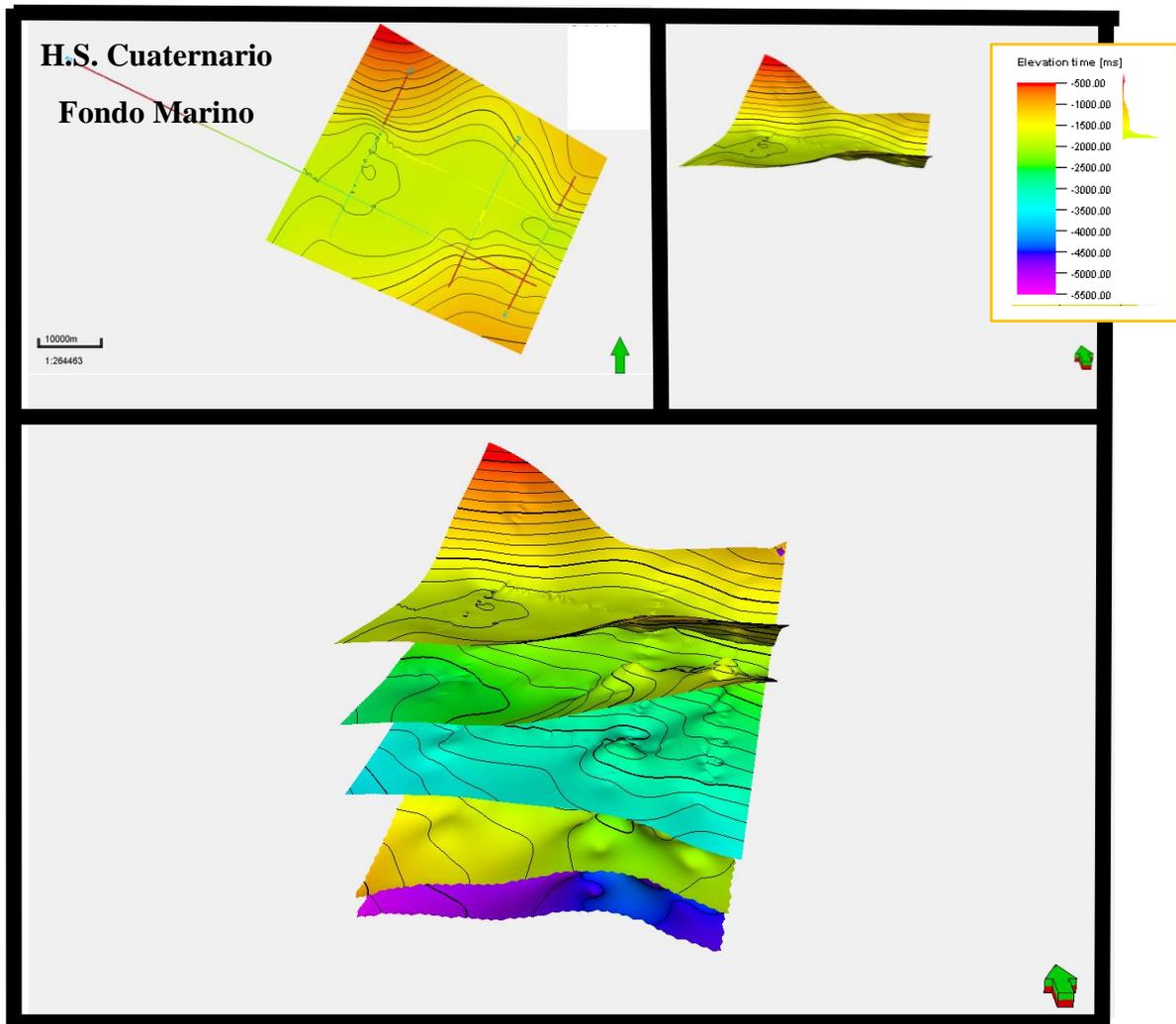


Figura V-15. Representación 2D y 3D de los Horizontes sísmicos, generados mediante Petrel 2017.1

De figura V-15, se observa que los horizontes sísmicos más antiguos exponen mayor deformación; mientras que los horizontes más jóvenes tienden a ser horizontales.

Se identifican 3 elevaciones del basamento ígneo-metamórfico, localizadas al noroeste (el de mayor elevación), noreste y sureste (de menor elevación). Las cuales afectan verticalmente a las secuencias estratigráficas, generando el adelgazamiento o acuñamiento de las secuencias. Mientras que, lateralmente, entre las elevaciones del basamento trasciende a una depresión donde las secuencias son concordantes.

También se observa que a -4500 ms se registra la mayor frecuencia de datos que definen el horizonte 1 (Basamento); mientras que, conforme trasciende a las secuencias suprayacentes la frecuencia máxima de datos que definen los horizontes disminuye en milisegundos, de forma tal que para el horizonte 2, horizonte 3, horizonte 4 y el horizonte 5, la frecuencia máxima se ubica a -4000 ms, -2250 ms, -2000 ms y -1575 ms respectivamente.

5.4 MODELADO BIDIMENSIONAL

5.4.1 Consideraciones geofísicas para el modelado

Algunas de las consideraciones tomadas en cuenta, no se ubican específicamente sobre la ventana de estudio; sin embargo, fueron incluidas por ser zonas adyacentes al área de interés, por lo cual aportan información que se puede correlacionar con el área de estudio.

➤ Gravimétricas

Dentro de las consideraciones gravimétricas, se divulgan principalmente tablas de densidades para modelos gravimétricos propuestos en otras investigaciones previas, algunos de los autores considerados son Ughi (2019), Garzón (2007), Rodríguez y Souza (2003), entre otros.

De la tabla 8, se tomó en consideración la información descrita para la placa Caribe, la placa suramericana, el Bloque de Bonaire, Manto, cuenca de Bonaire y la cuenca de Falcón. Adicionalmente, de la misma investigación realizada por Ughi (2019), se consideró el modelo 2D propuesto sobre el meridiano 70°O (figura V-16).

Tabla 8. Cuadro sinóptico de información referente a modelos de investigaciones previas. Información vinculada al área de estudio resaltada en amarillo (Ughi, 2019).

REGIÓN / ESTRUCTURA TECTÓNICA	ESTRATO / CUERPO	VELOCIDAD (km/s)	REFERENCIA	ESPESOR (km)	REFERENCIA	DENSIDAD (km/m ³)	REFERENCIA
Placa Caribe	Corteza oceánica superior	6,00 – 6,70		14 – 16	Niu et al. (2007); Quinteros et al. (2008)	2900	Bezada et al. (2008)
	Corteza oceánica inferior	6,80 – 7,10	Clark et al. (2008); Magnani et al. (2009); Bezada et al. (2010)			2950	Ughi et al. (2004); Garzón y Ughi (2008)
Placa Suramericana	Corteza continental superior	6,00 – 6,60		35 – 40	Schmitz et al. (2008)	2700 - 2750	
	Corteza continental inferior	6,70 – 7,00				2900	Bezada et al. (2008)
	Corteza transicional	-	-	-	-	2800 - 2850	
Bloque Bonaire	Metasedimentos	-	-	-	-	2400 - 2600	Bosch y Rodríguez (1992); Orihuela y Cuevas (1993); Ughi et al. (2004); Garzón y Ughi (2008); Sánchez et al. (2010)
Manto	Manto litosférico	7,50 – 8,10	Clark et al. (2008); Magnani et al. (2009); Bezada et al. (2010)	-	-	3000 - 3200	
Cinturón de deformación del Caribe sur	Sedimentos	2,80 – 4,80		-	-	1900 - 2550	Bezada et al. (2008); Garzón y Ughi (2008)
Alto de Margarita	Sedimentos	2,00 – 3,00	Bezada et al. (2010)	23,2 – 30,0	Niu et al. (2007); Schmitz et al. (2008)	-	-
Alto de La Blanquilla	Sedimentos	4,00 – 4,50	Clark et al. (2008)	19,2 – 24,0	Niu et al. (2007); Quinteros et al. (2008)	-	-
Cuenca de Cariaco	Sedimentos	2,00 – 4,50	Bezada et al. (2010)	-	-	-	-
Cuenca de Araya	Sedimentos	2,50 – 4,50	Clark et al. (2008)	-	-	-	-
Cañón de Los Roques	Sedimentos	2,00 – 4,50	Bezada et al. (2010)	28	Schmitz et al. (2008)	2400	Bosch y Rodríguez (1992)
Cuenca de Bonaire	Sedimentos	2,00 – 5,00	Magnani et al. (2009)	15,1 – 16,2		2050	Bezada et al. (2008)
Cuenca de Venezuela	Sedimentos	1,80 – 4,00	Clark et al. (2008); Magnani et al. (2009); Bezada et al. (2010)	14 – 16	Niu et al. (2007); Quinteros et al. (2008)	2000 - 2450	Orihuela y Cuevas (1993); Ughi et al. (2004); Garzón y Ughi (2008)
Alto de Aruba	Basamento	-	-	28 – 30	Schmitz et al. (2008)	2800	Bezada et al. (2008)
Cuenca de Grenada	Sedimentos	2,00 – 4,40	Clark et al. (2008)	24 – 28	Niu et al. (2007)	-	-
Cuenca de Falcón	Sedimentos	-	-	30 – 35	Schmitz et al. (2008)	2350 - 2450	Bezada et al. (2008); Garzón y Ughi (2008)

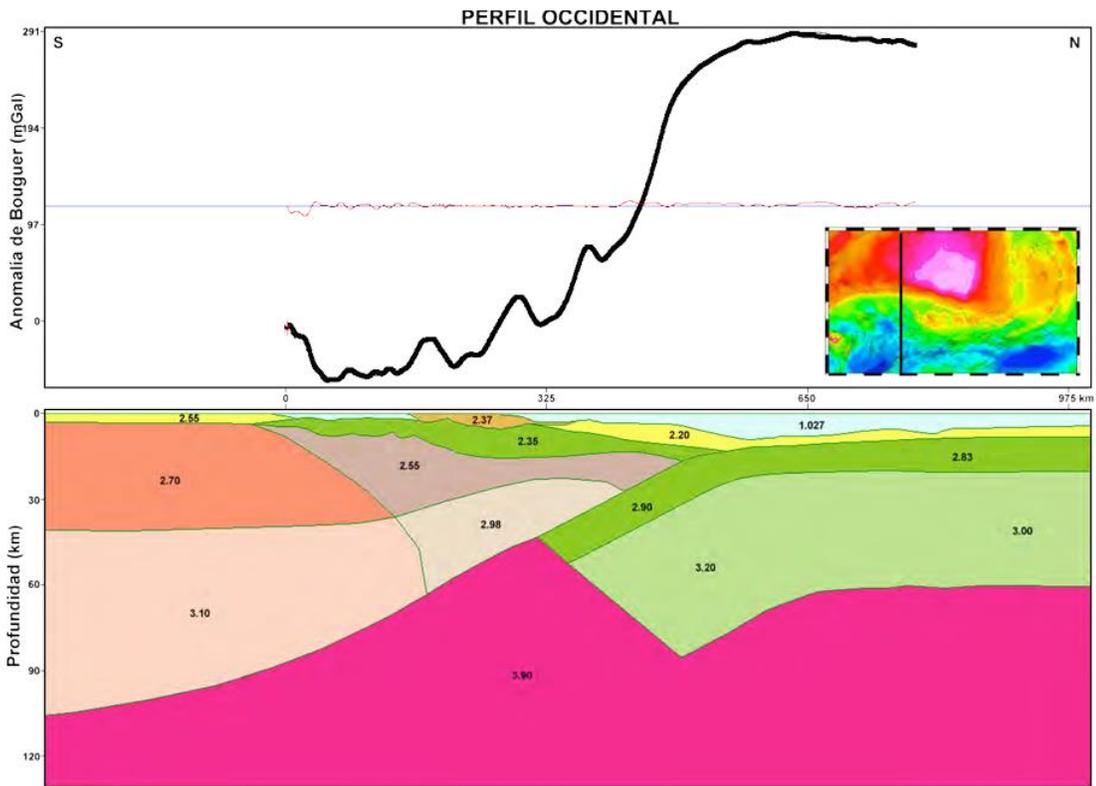


Figura V-16. Modelo gravimétrico, sobre el perfil 70°O. La placa Suramérica se representó con una densidad de 2700 kg/m³ para la corteza continental y 3100 kg/m³ para el manto litosférico; mientras que la astenosfera posee una densidad de 3900 kg/m³ y el Bloque de Bonaire posee una densidad de 3000 kg/m³ para el manto litosférico, 2550 kg/m³ para la sección cretácica y para la cobertura sedimentaria de todo el modelo se aplicó un rango de densidades entre 2200 kg/m³ y 2400 kg/m³ (Ughi, 2019).

Tabla 9. Valores de densidad considerados por Rodríguez y Souza (2003) para los modelos desarrollados en su investigación.

SECUENCIA	DENSIDAD (gr/cm ³)
Mar Caribe	1,03
Sedimentos	2,35
Napas de Lara	2,65
Margen Pasivo	2,6
Corteza Continental	2,75
Corteza Transicional	2,85
Corteza Oceánica	2,95
Manto	3,20

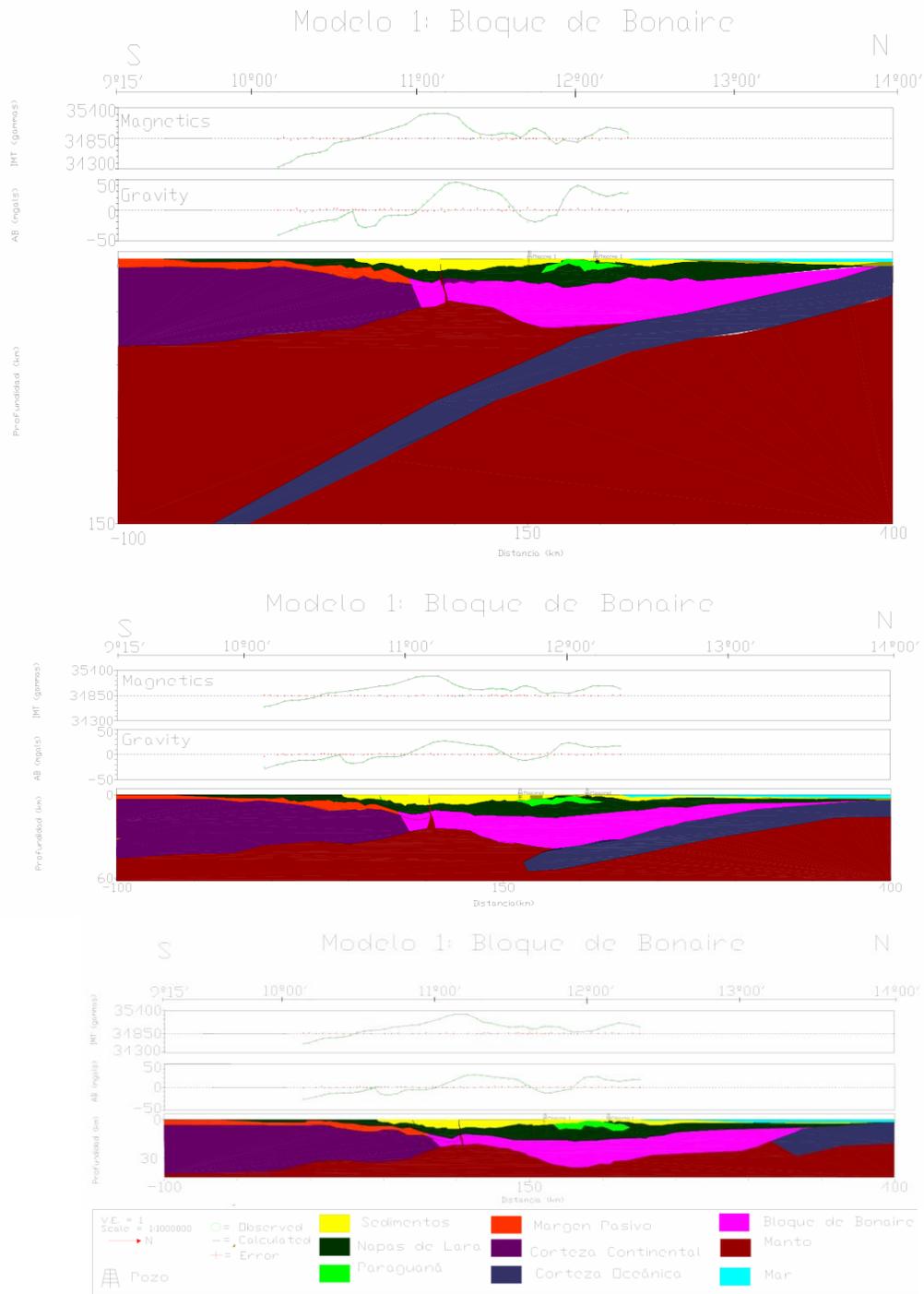
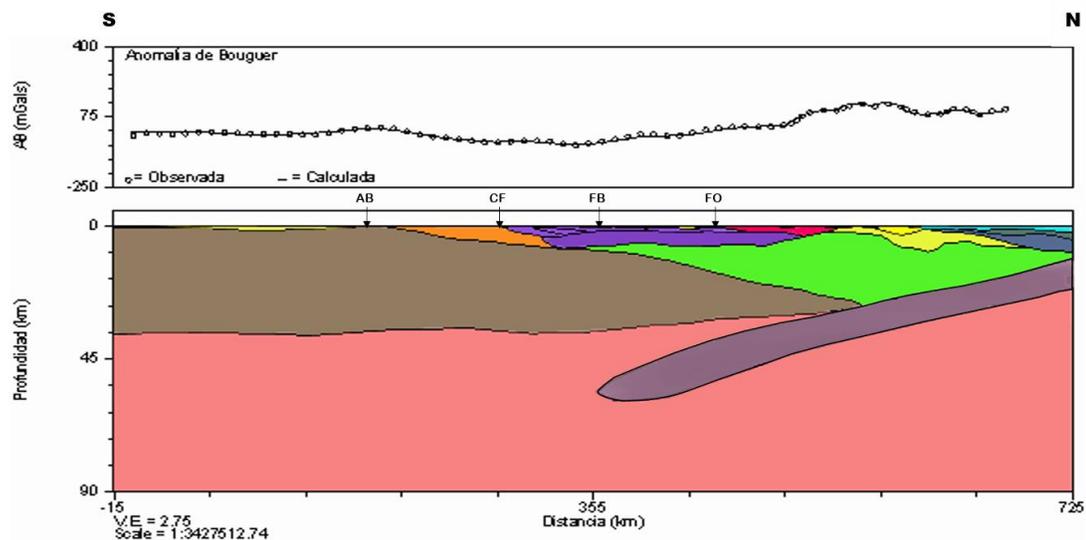


Figura V-17. Modelos Gravimétricos-Magnéticos de subducción profunda, media y somera generados con las consideraciones de la tabla 7. Los modelos contemplan la presencia del Bloque de Bonaire, el cual representan una corteza transicional entre la corteza continental y la oceánica, con espesor promedio de 15 km y limitado por el Sistema de fallas Oca-Ancón al sur y por la zona de subducción del Caribe al norte (Rodríguez y Souza, 2003).

Garzón (2007), en su investigación propuso modelos de carácter regional sobre los perfiles -69° O (figura V-18) y -70° O, evaluando la subducción intermedia y somera (tomando en consideración las densidades de la tabla 10). A partir de los resultados alcanzados, concluyó que los modelos que mejor ajuste presentan son los de subducción somera (cercana a 25 km), en concordancia con lo expresado por Rodríguez y Souza (2003) en su investigación donde desarrollo los modelos ilustrados en la figura V-17 desarrollados con los valores de la tabla 9.

Tabla 10. Resumen de las densidades consideradas por Garzón (2007) en los cuerpos de sus modelos gravimétricos (figuras V-18 y V-19)

Estructuras	Densidad (g/cm ³)	Estructuras	Densidad (g/cm ³)
(1) Manto	3,05 – 3,12	(7) Sedimentos Prisma de Acreción	2,50 – 2,55
(2) Corteza Continental	2,75	(8) Corteza Oceánica	2,95
(3) Corteza de Transición (Bloque Bonaire)	2,80 - 2,85	(9) Sedimentos Marinos	2,40 – 2,45
(4) Sedimentos metatectonizados	2,40 -2,60	(10) Napas de Lara	2,55 – 2,65
(5) Sedimentos Recientes	2,30 – 2,38	(11) Mar Caribe	1.03
(6) Cinturones de Corrimientos	2,46 – 2,80	(12) Sedimentos Cuenca de Falcón	2.35 – 2.40



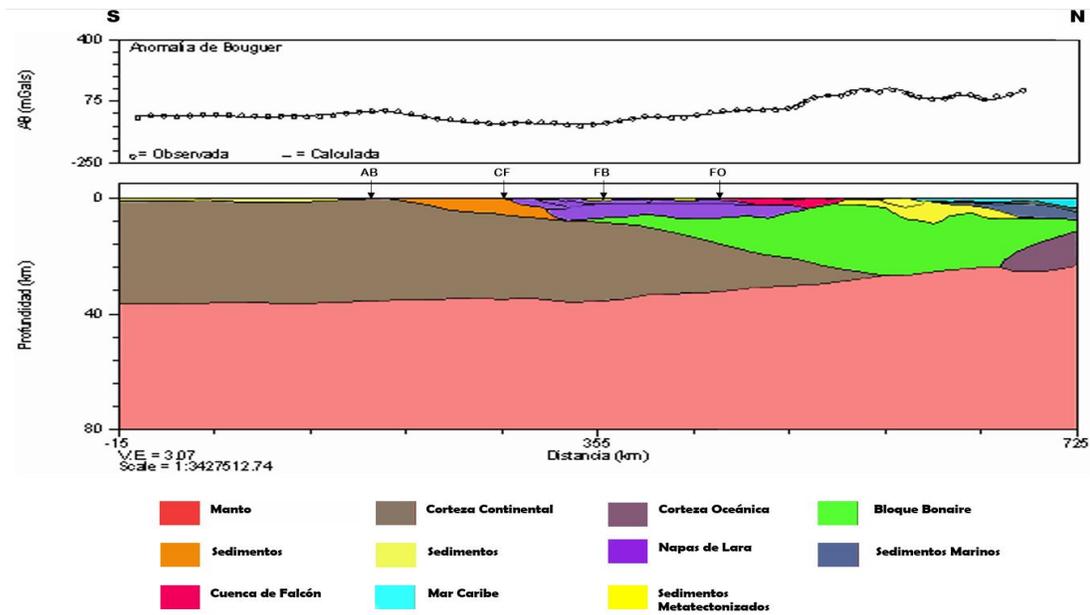


Figura V-18. Modelo gravimétrico bidimensional con lámina de subducción intermedia y somera propuesto para el perfil 69°W. AB = Alto del Baúl, CF = Corrimiento Frontal, FV = Falla de la Victoria, FM = Falla de Morón – San Sebastián (Garzón, 2007).

Linares *et al.*, (2014), planteó modelos gravimétricos (figuras V-19 y V-20) de mayor detalle, por su escala de poco carácter regional, razón por la cual no se observa la interacción entre la placa continental, la placa de transición y la placa oceánica.

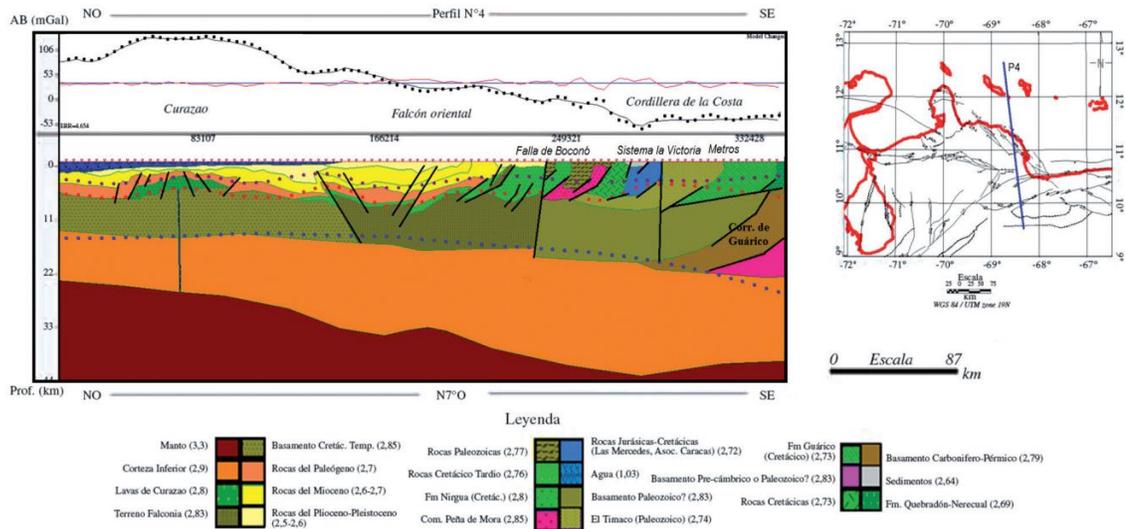


Figura V-19. Modelo de gravedad NO-SE. Puntos azules representan a la interfase de Conrad, los puntos rojos corresponden con la interfase atribuida al basamento y los puntos morados representan un contraste sedimentario somero. Líneas negras representan los sistemas de fallas. En el mapa de ubicación la línea roja representa los límites político-territoriales. Los valores de densidad en la leyenda se encuentran en unidades de g/cm³ (Linares *et al.*, 2014).

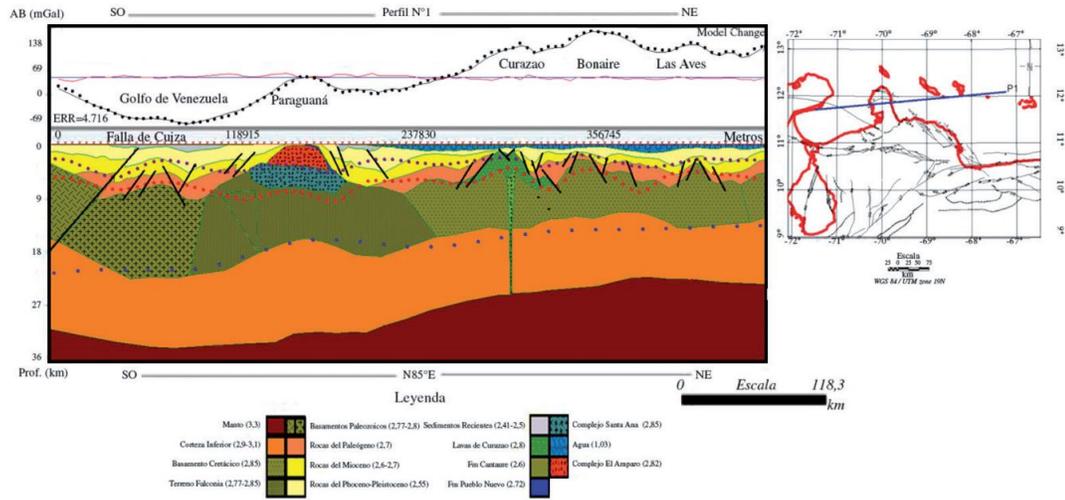


Figura V-20. Modelo de gravedad NE-SO. Puntos azules representan a la interfase de Conrad, los puntos rojos corresponden con la interfase atribuida al basamento y los puntos morados representan un contraste sedimentario somero. Líneas negras representan los sistemas de fallas. En el mapa de ubicación la línea roja representa los límites político-territoriales. Los valores de densidad en la leyenda se encuentran en unidades de g/cm³ (Linares *et al.*, 2014).

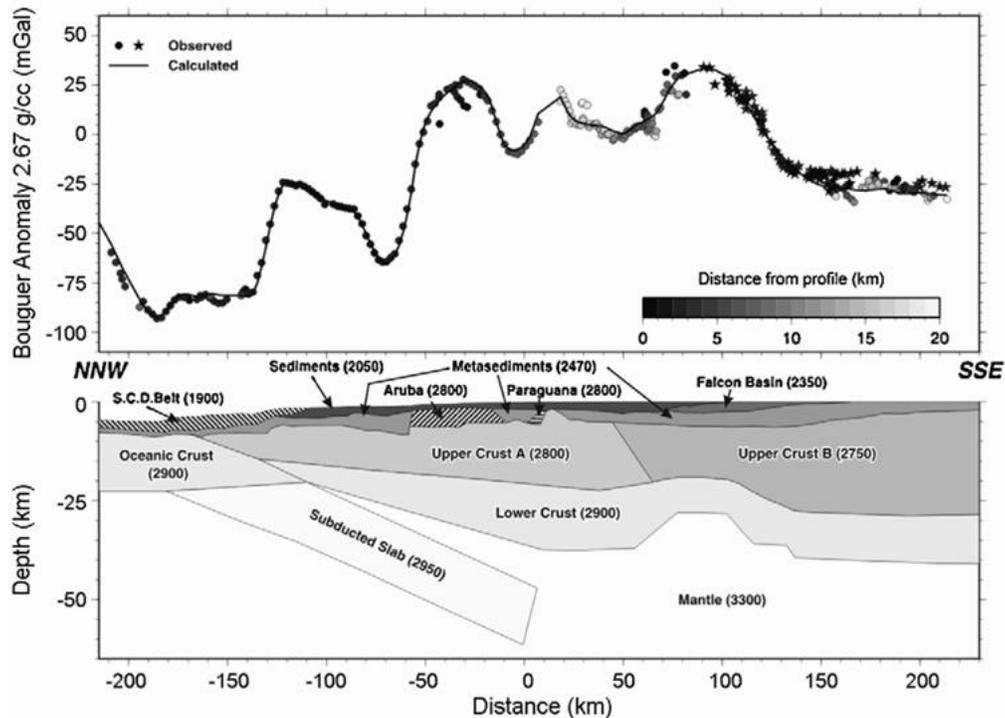


Figura V-21 Modelos de gravedad. Valor de densidad de cada bloque en kg/m³. Cinturón SCD, Cinturón Deformado del Caribe Sur. (Bezada *et al.*, 2008)

En el modelo gravimétrico (figura V-21) de Bezada *et al.* (2008), se ilustra el buzamiento de la discontinuidad de Mohorovicic en dirección sur, obviando el adelgazamiento cortical bajo la cuenca de Falcón. Además, se observa que el modelo propuesto se presenta un Slab de tipo intermedio que alcanza los 60 km de profundidad.

➤ **Perfiles sísmicos y datos de Pozo o perforación.**

La figura V-22, contiene información respecto al límite entre el Bloque de Bonaire y la placa Caribe, la cual se consideró y fue utilizada en la continuidad lateral del modelo.

De la información, se destaca los pozos ilustrados en la figura V-23, se contempló la información concerniente a los pozos LVC-17, LVC-26, LVC-12 ilustrada en las tablas 8 y 9; debido a que, estos son los pozos más próximos a la ventana de estudio. Cabe resaltar que en la figura V-23, se aprecia la representación de un pozo denominado EFR-2. Sin embargo, en la investigación no se anexaron datos de este, motivo por el cual no pudo ser considerado.

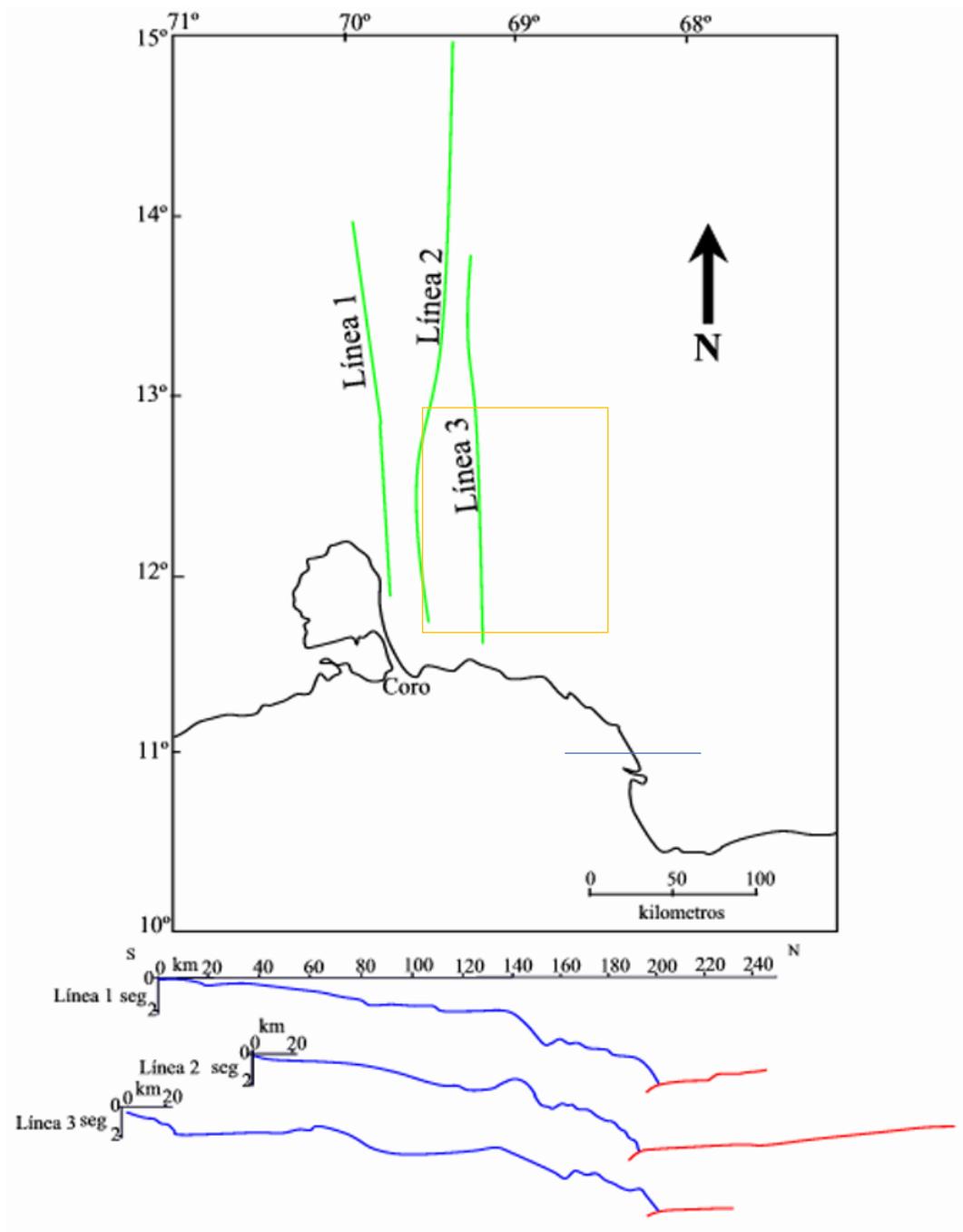


Figura V-22. Las líneas de sísmica de reflexión realizadas en el norte de Venezuela, interpretadas por Silver *et al.* (1975). Las líneas verdes representan la ubicación de los transectos sísmicos y cuya interpretación se muestra en la parte inferior del mapa, la línea azul representa el Bloque de Bonaire y la línea roja la Placa Caribe (Silver *et al.*, 1975). El recuadro amarillo representa el área de investigación.

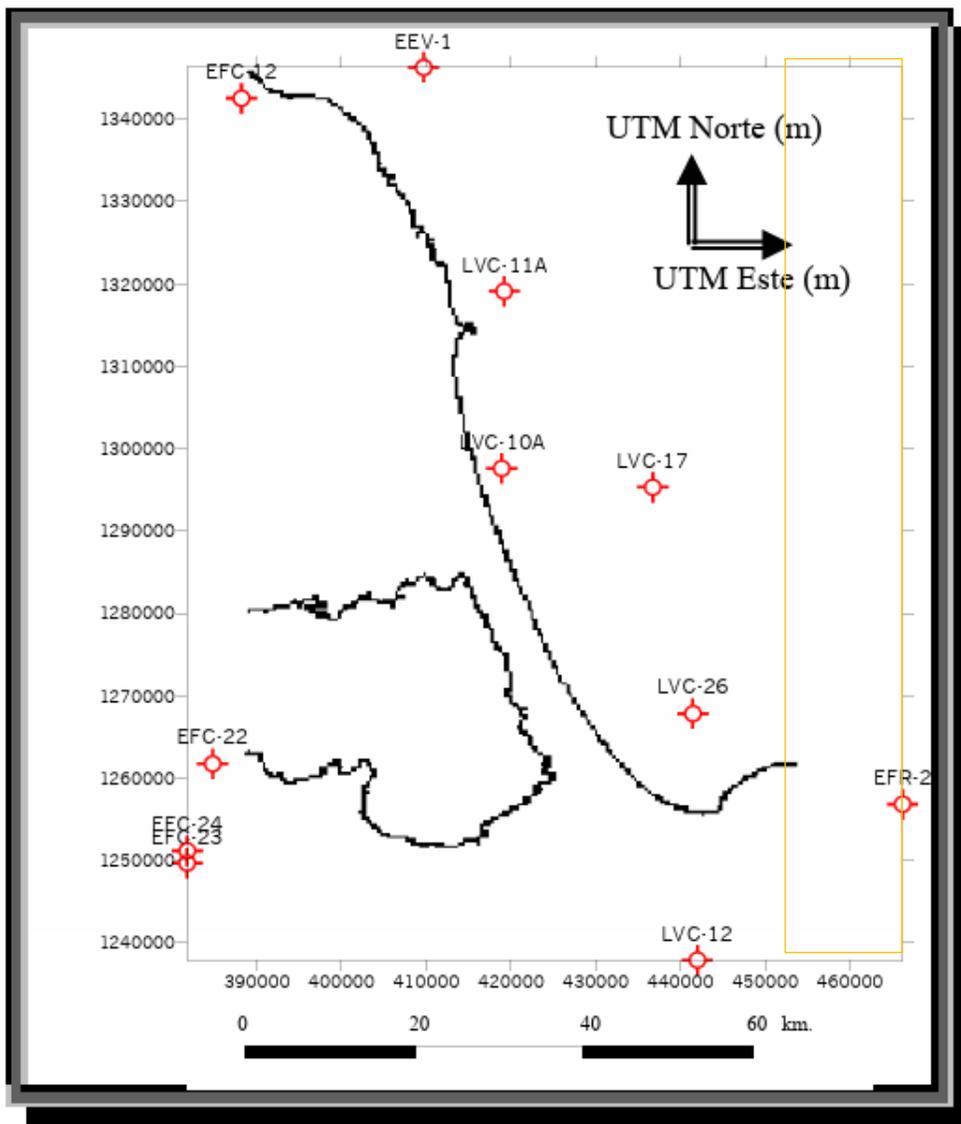


Figura V-23. Mapa de ubicación de los pozos aledaños (al oeste) a la cuenca de Falcón oriental. Los círculos rojos representan los pozos desarrollados (Souza y Rodríguez, 2003). El recuadro amarillo representa el área de investigación.

De la figura V-24 y V-25 se consideran los pozos Abundancia y Pozón. En general todos los datos de pozos tanto los tomados de Carrillo (2021) y Rodríguez y Souza (2003), son clasificados como referencia por no estar dentro de la ventana de estudio.

Tabla 11. Información de litología derivada de los registros de pozos (Souza y Rodriguez, 2003).

Nombre del Pozo	Edad	Formación, Litologías o discordancias	Profundidad (km)	Densidad a partir de los registros (gr/cm ³)
LVC-17	Tope del Mioceno inferior		2,390	2,45
	Base del Mioceno inferior		2,500	2,45
LVC-26	Tope del Mioceno superior		0,070	-
	Base del Mioceno superior		0,600	-
	Tope del Mioceno medio		0,600	-
	Base del Mioceno medio		1,320	-
	Tope del Mioceno inferior		1,320	-
	Base del Mioceno inferior		1,965	-
LVC-12	Tope Pliopleistoceno		0,04	-
	Base Pliopleistoceno		0,207	-
	Tope del Plioceno inferior	La Vela	0,207	-
	Base del Plioceno inferior	La Vela	1,022	-
	Tope del Mioceno superior	Caujarao	1,022	-
	Base del Mioceno superior	Caujarao	1,431	-
	Tope del Mioceno medio	Socorro	1,431	-
	Base del Mioceno medio	Socorro	2,347	-
		Discordancia	2,347	-
	Tope del Mioceno inferior	Agua Clara	2,347	-
		Agua Clara	2,581	-
		Discordancia	2,581	-
	Base del Mioceno inferior	Cauderalito	2,581	-
		Cauderalito	2,614	-
		Discordancia	2,614	-
		Arena basal	2,614	-
		Arena Basal	2,64	-
		Discordancia	2,64	-
		Basamento	2,64	-
		Basamento	2,70	-

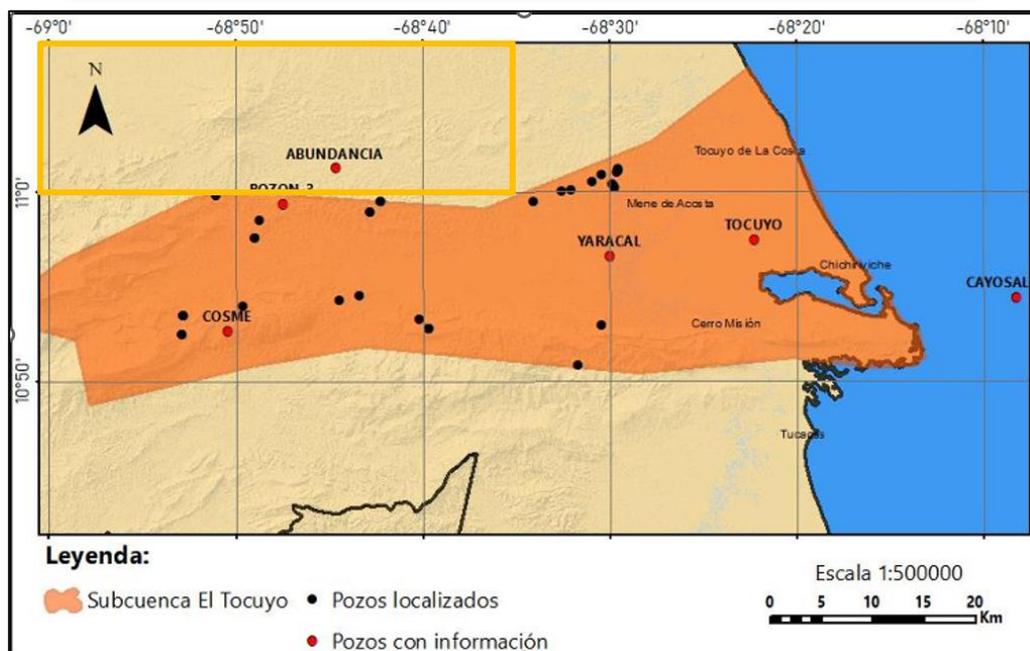


Figura V-24. Mapa de ubicación de los pozos en la cuenca oriental de Falcón. (Carrillo, 2021). El recuadro amarillo representa el área de investigación

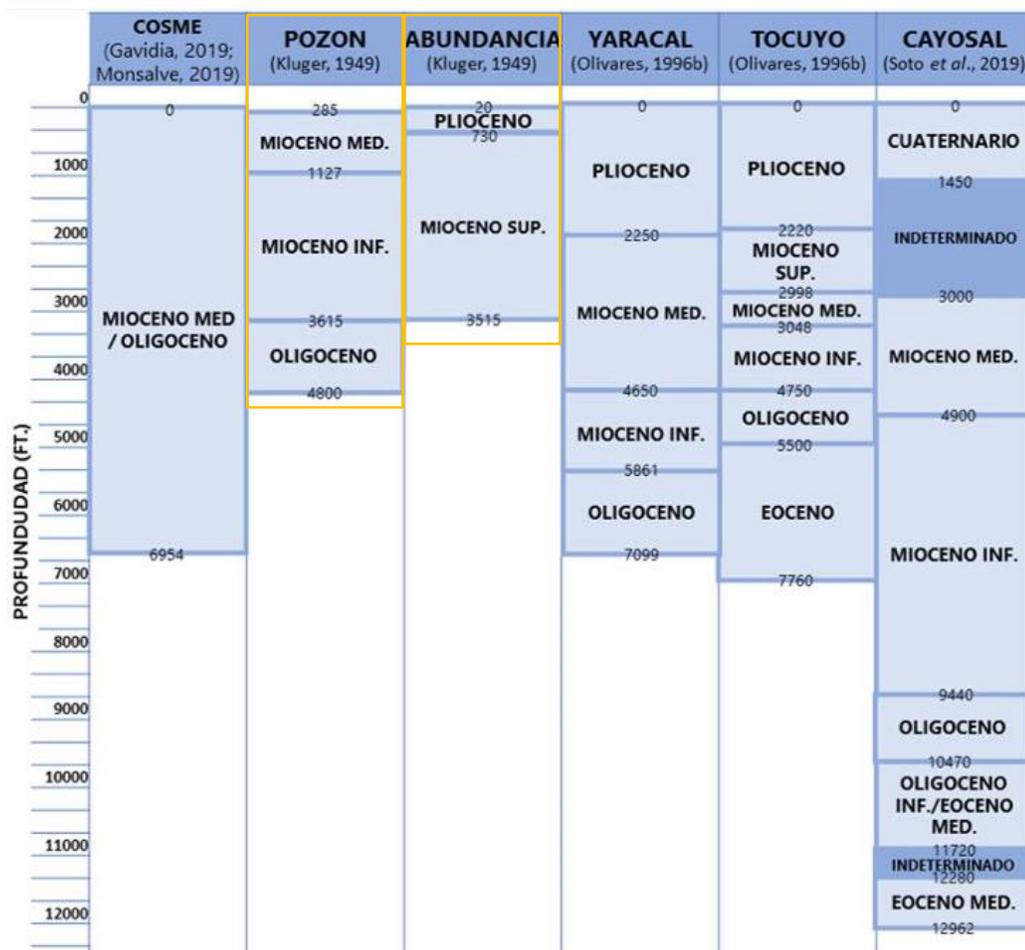


Figura V-25. Profundidad de topes cronoestratigráficos para cada pozo con información (Carrillo, 2021).

Por último, se considera la información sísmica del Proyecto Bolívar, ilustrada en la Figura V-26 y resumida en la tabla 12.

Tabla 12. Características de las reflexiones sísmicas para las secuencias definidas. (Gorney, 2005).

	Aruba basin		West Curacao basin		Paraguana basin		Bonaire basin	
	Avg. thickness (ms)	Reflection character	Avg. thickness (ms)	Reflection character	Avg. thickness (ms)	Reflection character	Avg. thickness (ms)	Reflection character
Sequence 1	300-1000	High-amplitude, low frequency, divergent to parallel reflectors onlap basement	200-600	Low-frequency, wavy to contorted, mimicking underlying structure	200-400	Low-frequency, parallel to divergent reflectors onlap basement	800-1200	Low-amplitude, parallel at base, some chaotic zones in upper part of sequence
Sequence 2	600-800	Low-amplitude, parallel	1800-4000	Chaotic/low-frequency base, high-frequency low-amplitude, parallel in upper part of sequence	1000-3000	Moderate-frequency, parallel	700-1200	Low-frequency, chaotic reflections at base, higher frequency parallel reflections at top
Sequence 3	700-1200	Northward-prograding clinofolds onlapping top of underlying sequence	400-800	High-frequency, high-amplitude parallel, some debris flow/slump features	200-600	High-frequency, onlapping underlying sequence	300-900	High-frequency, subparallel, pooling behind ABC ridge
Sequence 4	500-700	High-amplitude, subparallel-divergent	300-500	High-frequency, moderate-amplitude, parallel	500-1000	High-frequency, northward prograding	100-300	High-frequency, parallel northward prograding

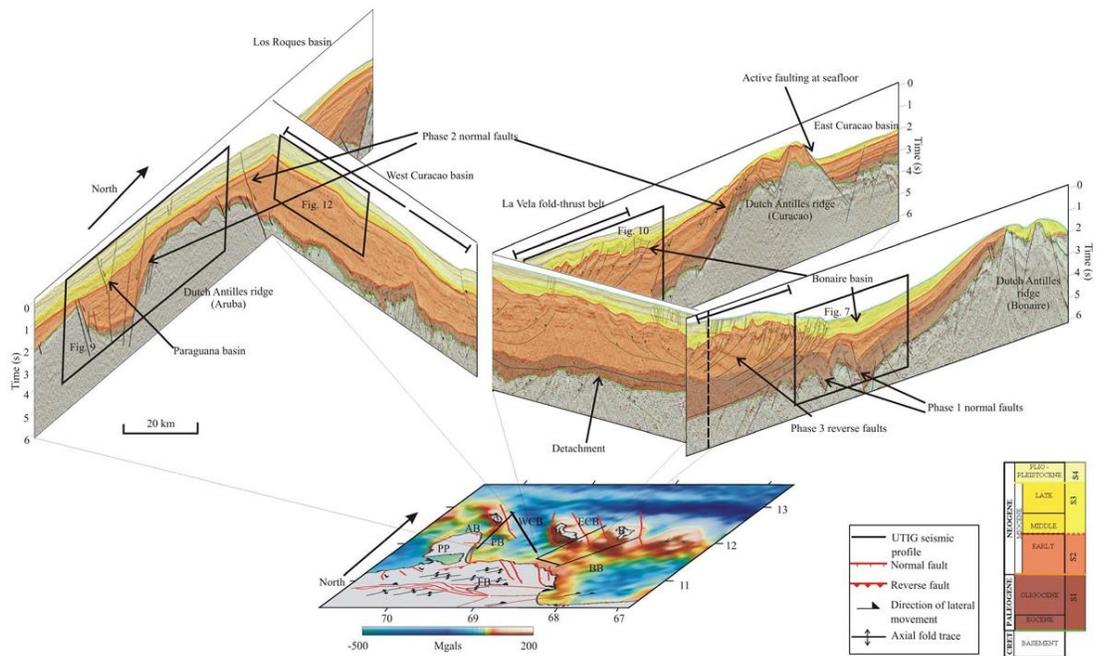


Figura V-26. Diagrama de cerco construido a partir de las líneas de reflexión sísmica del proyecto Bolívar que muestra la geometría de las principales estructuras de las costas del noroeste de Venezuela y las Antillas Holandesas. Donde se describe cuatro secuencias sísmicas descritas en la tabla 10. Tomado de Gorney (2005).

5.4.2 Modelo

Se plantearon 2 modelos gravimétricos 2D del subsuelo en la zona de estudio. Para ello, se trazaron 2 perfiles (Figura V-27), donde el primero de estos se denoto AA´ y cuenta con una orientación N45° E, atravesando desde la cuenca de Falcón hasta la isla de Bonaire. Mientras que, el segundo perfil en dirección N-S en la longitud 68°45´O, se denominó BB´ y esta cruza la el alto estructural “Domo de Isidro”, la elevación de al sur de Curazao y la cuenca este de Curazao.

Los perfiles se intersecan aproximadamente a 131 km sobre el perfil AA´, mientras que, sobre el perfil BB´ el punto de cruce esta cercano a los 89 km.

El modelado 2D con base en la recopilación de información geológica y de modelos previos realizados en la zona, se consideró distintos valores de densidad (tabla 13) para delimitar las litologías correspondientes principalmente a: la discontinuidad de Mohorovicic, la corteza inferior y superior (referida a la corteza transicional

“Bloque de Bonaire”), las cuatro secuencias sedimentarias definidas por encima del basamento mediante la sísmica, las formaciones cretácicas correspondientes a las Antillas Holandesas y a intrusiones ígneas.

Adicionalmente, se consideraron los sistemas de fallas de la zona, de acuerdo con las interpretaciones planteadas en las figuras II-6 y II-7 y los apéndices 2, 3, y 4.

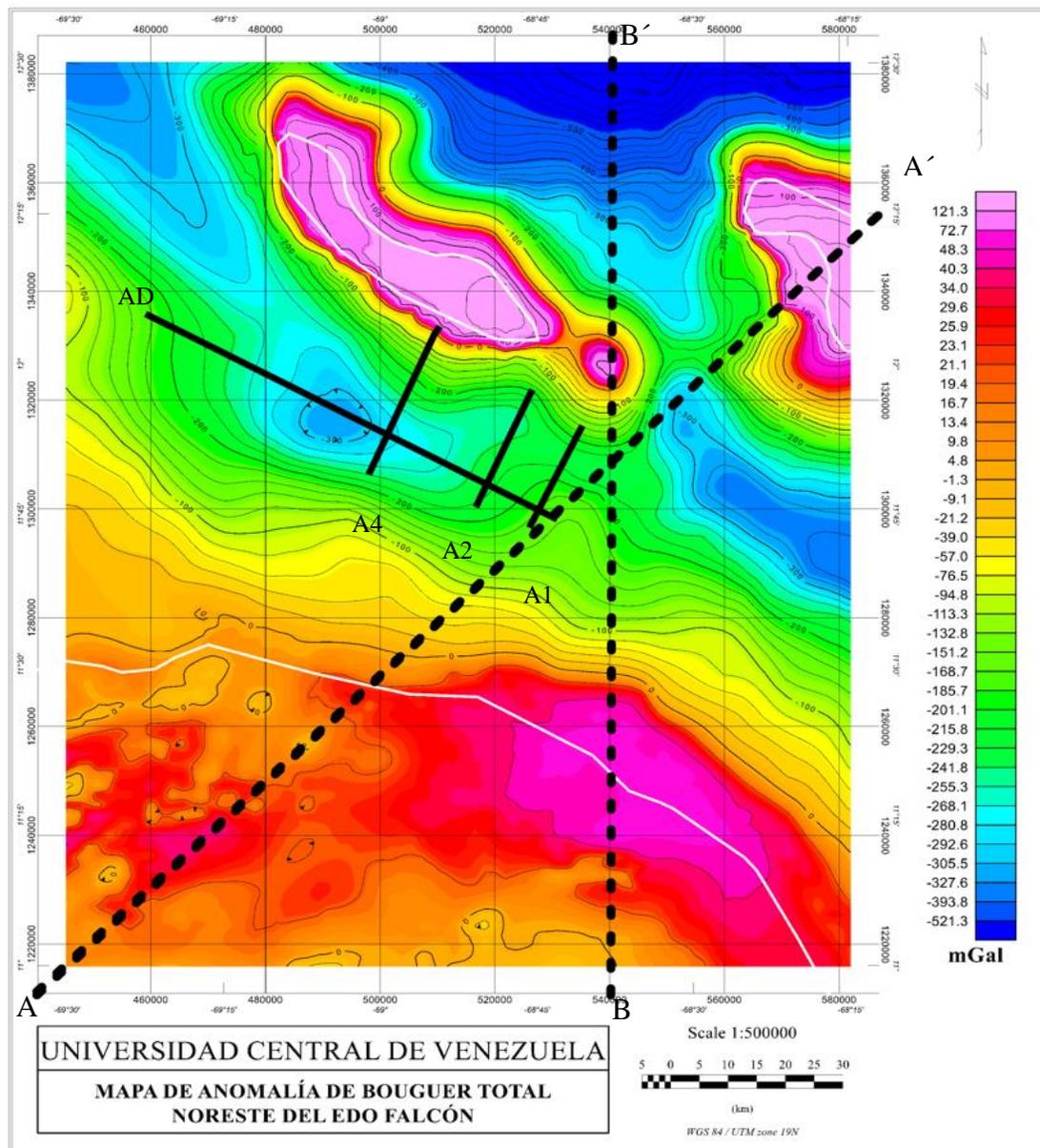


Figura V-27. Perfiles propuestos para la generación de los modelados gravimétricos 2D. Líneas segmentadas: perfiles gravimétricos. Líneas lisas: registros sísmicos.

5.4.2.1 Perfil AA´

En el modelo gravimétrico del subsuelo por debajo del perfil AA´, en sentido N45°E (Figura V-28) se muestra un ajuste de 8.979% de error para los datos.

Del modelo AA´ se observa que regionalmente la discontinuidad de Mohorovicic se eleva en la cuenca de Falcón y bajo la Isla de Bonaire (cercano a los 20 km de profundidad), lo cual directamente ocasiona un acortamiento cortical bajo estas zonas. Donde en el caso de la cuenca Oriental de Falcón permitió el paso de intrusiones ígneas dentro de la corteza transicional, mientras que en Bonaire dio paso al origen de la formación Washikemba sobre el bloque de corteza de afinidad oceánica.

En lo que respecta a la sección intermedia entre los acortamientos corticales, específicamente en los 158 km sobre el perfil AA´ (vinculado a la región este de la cuenca de Bonaire) se observa el máximo engrosamiento de la corteza, es decir, la máxima profundidad para la discontinuidad de Mohorovicic (32 km); mientras que la base del bloque sedimentario (las 4 secuencias sedimentarias) se ubica sobre los 9 km de Profundidad.

5.4.2.1 Perfil BB´

Del perfil BB´ (Figura V-29), se observa un porcentaje de error 10,25. De este perfil se interpretó regionalmente que la discontinuidad de Mohorovicic tiende a profundizar en dirección norte, concordando así con el mapa de separación regional de la zona. De esto, se interpreta que existe un adelgazamiento cortical bajo la cuenca oriental de Falcón (entre 18 y 20 km de espesor). Además, en esta región se interpreta de la respuesta gravimétrica, la presencia de una intrusión ígnea de considerable volumen.

Otra estructura identificada es el levantamiento al sur de la isla de Curazao, el cual se considera como prolongación de esta Antilla Holandesa. Esta estructura se describe litológicamente como una corteza de poco espesor, la cual dio paso a la

deposición suprayacente de la formación Lava de curazao. Ahora bien, la región de mayor profundidad tanto de la discontinuidad de Mohorovicic (25 km), de la corteza (supera los 35 km) y de espesor sedimentario (11 km), se ubica al norte y se debe a la transición de la cuenca este de Curazao a la fosa de Los Roques.

Tabla 13. Leyenda para de los modelos AA' y BB'.

Col	Densidad [gr/cm3]	Litología
	3,3	Manto
	2,92	Corteza inferior
	2,75	Corteza Superior -Basamento
	2,85	Corteza de Afinidad oceanica
	3	Fm. Lava Curazao y Fm. Washikemba
	2,9-3	Intrusiones igneas
	2,5-2,6	Suc. Sedimentaria Eoceno-Oligoceno
	2,45-2,35	Suc. Sedimentaria Mio. Inferior-Mio.Medio
	2,3-2,2	Suc. Sedimentaria Mio. Superior
	2-2,1	Suc. Sedimentaria Plioceno-Holoceno

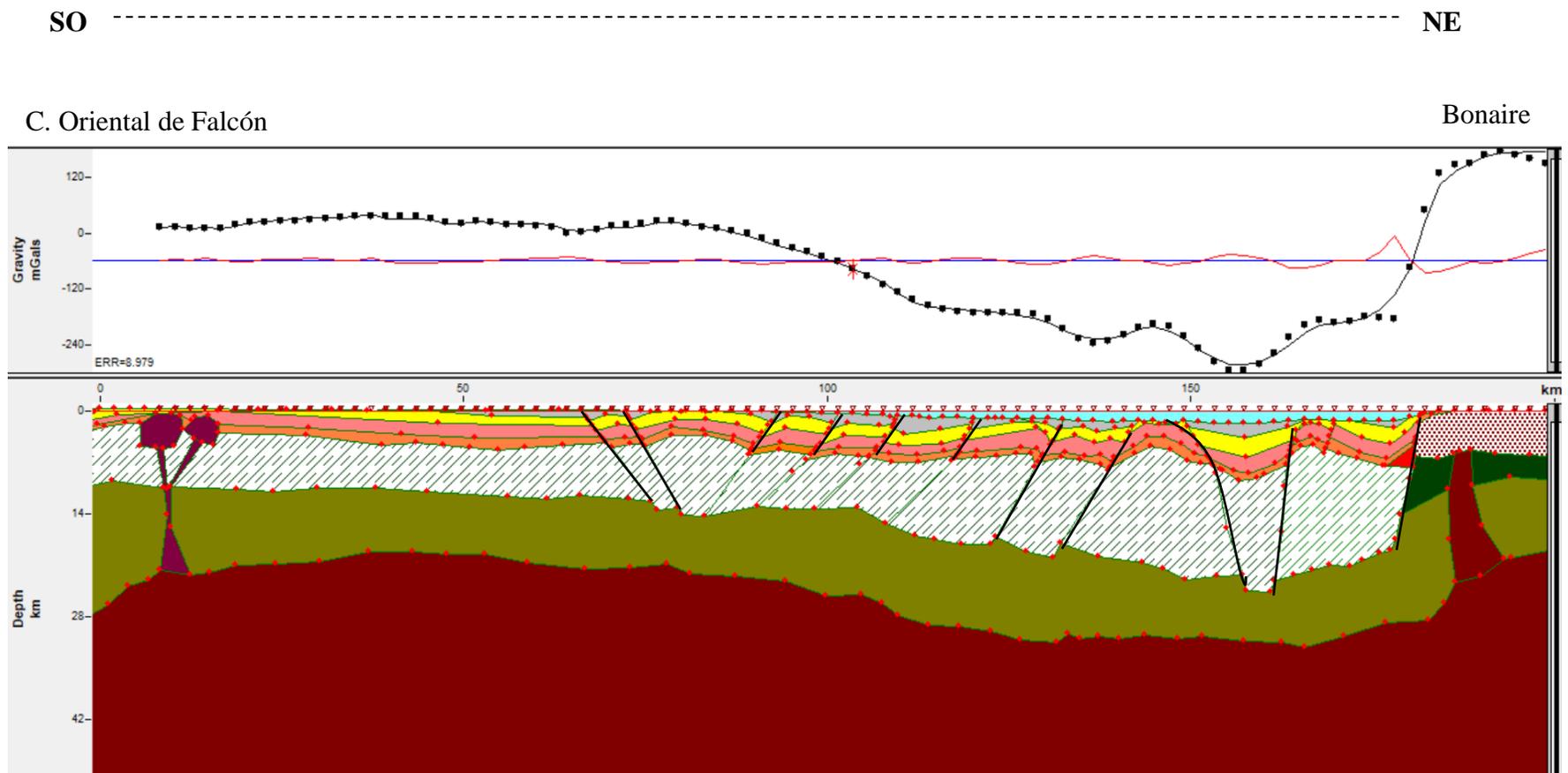


Figura V-28. Modelo gravimétrico AA' SO-NE. Curva punteada: Gravedad obsevada. Curva negra: gravedad calculada. Curva roja: Error de ajuste. Generado en Oasis Montaj

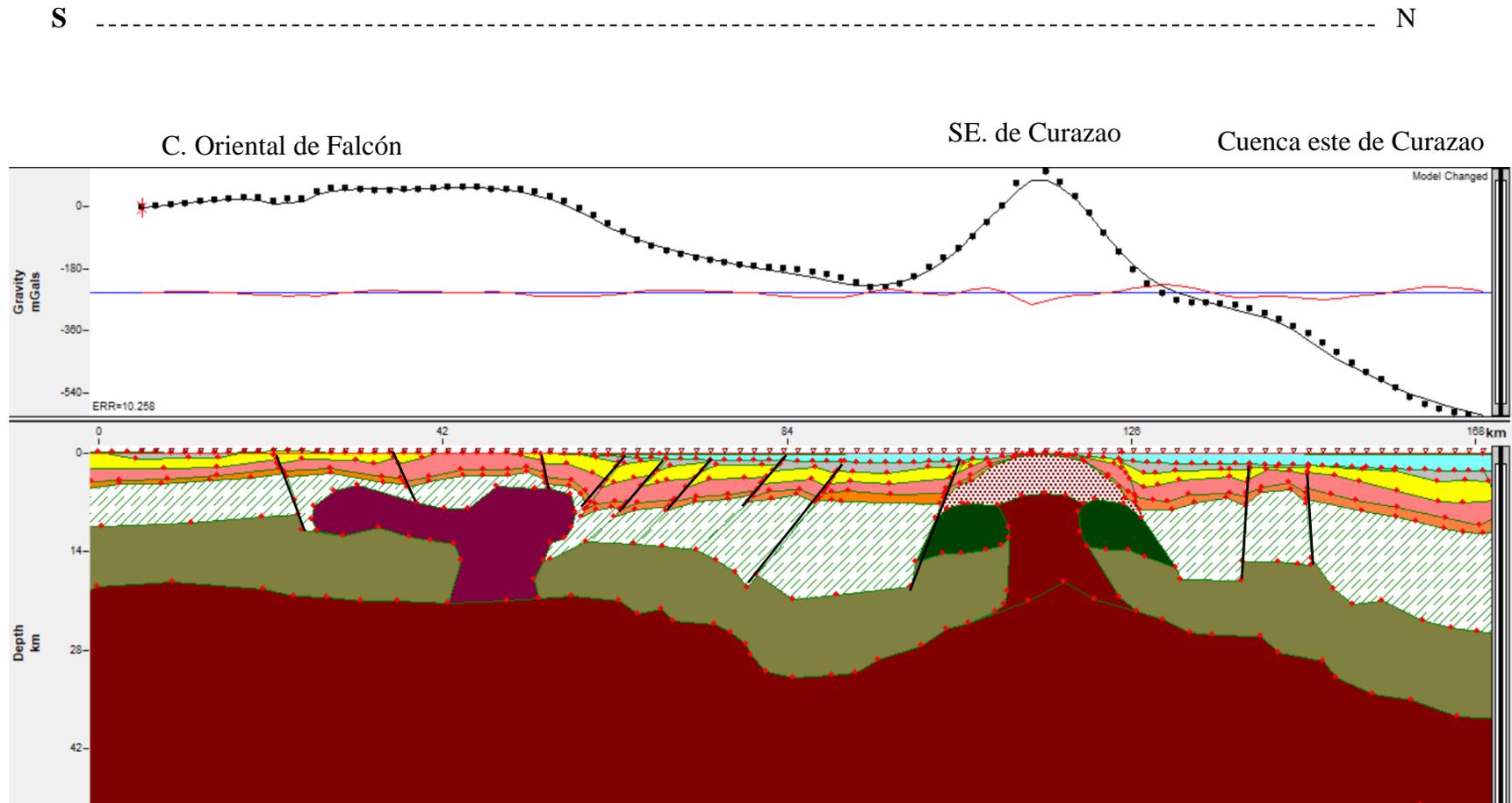


Figura V-29. Modelo gravimétrico BB´ N-S. Curva punteada: Gravedad obseada. Curva negra: gravedad calculada. Curva roja: Error de ajuste. Generado en Oasis Montaj.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos de esta investigación, mediante la interpretación integrada de datos gravimétrico, sísmicos y geológicos en la región de objeto de estudio, se concluye lo siguiente:

- Se observó, a partir del análisis cuantitativo de los datos gravimétricos, que estos presentaron una distribución unimodal, con cierto grado de sesgamiento hacia la izquierda. Adicionalmente, en la base de datos se reconocieron datos atípicos, lo cual restringió los datos típicos a un rango de 173 mGal y -611 mGal, mientras que, los atípicos se limitaron entre -948mGal y -611,03 mGal (representando el 0,45% de los datos totales). Estos datos atípicos se ubicaron en el límite noreste de la ventana de estudio y se atribuyeron a efecto de borde, razón por la que no fueron tomados en cuenta para la interpretación y construcción de los modelos.
- A partir del análisis cualitativo de los datos gravimétricos, se concluyó que la tendencia preferencial de las estructuras en la zona es de SE-NO. Estas estructuras se observan en el mapa de anomalía residual, donde se aprecia la extensión y los límites de cada una de las principales provincias estructurales, como lo son: la Cuenca de Falcón Oriental, las islas de Curazao y Bonaire y las cuencas marinas aledañas a estas Antillas. Esto se infiere a partir de la distribución, tendencia y magnitud de las anomalías gravimétricas residuales obtenidas, y que están asociadas a la presencia de diferentes estructuras y contrastes litológicos que se encuentran distribuidos a lo largo de la zona estudio.
- Se determinó que la componente regional de la anomalía de Bouguer disminuye hacia el norte, lo cual indica que la discontinuidad de Mohorovicic, buza en esta dirección. Sin embargo, este comportamiento difiere de los antecedentes, debido a la extensión de éstos. Por los cual se interpreta como un comportamiento local, evidenciado por la magnitud de la ventana de estudio.

- Mediante el espectro de potencia se identificaron dos profundidades de fuentes, una de 210m asociada a las fuentes someras (vinculado a las formaciones volcánicas de las islas de Curazao y Bonaire) y otra de una profundidad aproximada de 4km (para el basamento de la cuenca de Falcón Oriental “Cuenca de Agua Salada”). Posteriormente, se aplicó la técnica de Deconvolución de Euler, que enfatizó que el basamento de la cuenca de Agua salada no supera los 5 km, al igual que el basamento de las islas de las Antillas Holandesas.
- Otro aspecto de interés fue la concentración de soluciones de Deconvolución de Euler sobre la anomalía positiva localizada al norte de la cuenca de Agua Salada, donde se observó que las soluciones tienen una tendencia a disminuir en profundidad hacia el norte (en un margen estrecho) lo cual llevó a considerar la presencia de una intrusión ígnea que influyó en la respuesta gravimétrica del basamento.
- De las 4 líneas sísmicas consideradas dentro de la investigación se identificaron 5 horizontes sísmicos, que delimitaron 5 secuencias, de las cuales 4 de éstas, son secuencias sedimentarias, identificadas cronológicamente como: Eoceno-Oligoceno, Mioceno inferior- Mioceno medio, Mioceno Superior y Plioceno Eoceno; de donde se infiere que la secuencia de mayor espesor es la secuencia Mioceno inferior-Mioceno medio (considerando la relación y proporción entre secuencias ya que las líneas sísmicas están migradas en tiempo y no se puede estimar la profundidad). De estas líneas sísmicas al sur de Curazao se identificaron 3 elevaciones de basamento, separadas por una depresión en común. La de mayor expresión se vincula al flanco sur de la isla de Curazao; mientras que la intermedia es la propagación de la isla de Curazao al SE.
- Los modelos permiten concluir que existe un adelgazamiento cortical bajo la Cuenca Oriental de Falcón, al igual que bajo los altos estructurales de las islas de Curazao y Bonaire. Además, se observa que las islas son limitadas por fallamientos normales y que se produjeron sobre corteza de carácter oceánico, tal como fue descrito en investigaciones previas llevadas a cabo en la zona. Además, a partir de los modelos generados, se puede proponer la presencia de un domo producto de

una intrusión ígnea al noreste de la cuenca de Falcón, responsable del cierre de la cuenca.

- Para tener un mayor control en el modelado del subsuelo, especialmente si se quiere lograr un ajuste residual, se recomienda usar (en caso de estar disponibles) datos de pozos que lleguen a estructuras profundas, al menos hasta el Cretácico y apoyarse en la interpretación de secciones sísmicas migradas en profundidad para realizar la integración de los datos más eficazmente.
- Se recomienda generar nuevas campañas de exploración gravimétricas y sísmica sobre la cuenca de agua Salada, específicamente al noreste de la cuenca de Hueque, para definir la cuenca estructuralmente con mayor detalle estructural.
- Es recomendable realizar convenios con empresas públicas y privadas para realizar un banco académico de datos, de índole geofísico, con acceso libre e ilimitado para el desarrollo de futuras investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, J. y Obagi, J. (2008). *Fundamentos de inferencia estadística*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- Arnaiz, M. y Garzón, Y. (2012). *Nuevos mapas de anomalías gravimétricas del Caribe*. *Interciencia*, V:37, No^a 3.
- Audemard, F. (1993). *Neotectonique, sismotectonique et alea sismique du nord-ouest du Venezuela (systeme de failles d'Oca–Ancon)*. Trabajo especial de grado (Ph.D). Universite Montpellier II, Montpellier, France, 369 p.
- Audemard, F. (1997). *Tectónica Activa de la Región Septentrional de la Cuenca Invertida de Falcón, Venezuela Occidental*. Memorias del VIII Congreso Geológico Venezolano, Sociedad Venezolana de Geología. V:1, 93-100 p.
- Audemard, F.A., (2001). *Quaternary tectonics and present stress tensor of the inverted northern Falcon Basin, northwestern Venezuela*. *Revista de geología estructural*, V:23, 431-453 p.
- Bachmann, R. (2001), *The Caribbean plate and the question of its formation*. Department of Tectonophysics, Institute of Geology. University of Mining and Technology Freiberg.
- Beets, D. (1977). *Cretaceous and early Tertiary of Curacao. Guide to the field excursions on Curacao, Bonaire and Aruba, Netherlands Antilles*. GUA Papers of Geology series 1, 10: 7–17p.
- Bellizzia, A. (1985). *Sistema montañoso del Caribe una Cordillera alóctona en la parte Norte de América del Sur*. Memorias VI Congreso Geológico Venezolano, Caracas, 10, 6657 – 6836 p.
- Bello (2018). *Modelo de basamento a partir de la integración de datos geofísicos al noroeste del Edo Barinas*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, 44 p.
- Berenson, M.; Levine, D. y Krehbiel, T. (2006), *Estadística para administración* (4ta ed.). Pearson Educación, México
- Bezada, M., Schmitz, M., Jácome, M., Rodríguez, M., Audemard, F., Izarra, C., the BOLIVAR Active Seismic Working Group. (2007). *Crustal structure in the Falcon Basin area*,

- northwestern Venezuela, from seismic and gravimetric evidence. Journal of Geodynamics.*
- Boesi, T. y Goddard, D. (1991). *A New Geologic Model Related to the Distribution of Hydrocarbon Source Rocks in the Falcón Basin, Northwestern Venezuela.* En K. Biddle ed., *Active Margin Basins: Memoria AAPG No. 52*, 303-319 p.
- Bosch, M. Y I. Rodríguez (1992). *North Venezuelan collisional crustal block: The boundary between the Caribbean and South American plates.* *Journal of South American Earth Sciences*, 6: 133 – 143p.
- Brown, A. (2003). *Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data* (6to.Ed). Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists (AAPG) and Society of Exploration Geophysicists (SEG).
- Burke, K. (1988). *Tectonic evolution of the Caribbean.* *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 16:201-230 p.
- Carnevali, J., Lugo, J., Audemard, F., Porras, L., Parraga, F., Ysaccis, R., Pereira, J., Blanco, B., Giraldo, C., Marisol, C., DiCroce, J., Loureiro, D., Gallango, O., Bernardo, L., Hernández, O., Goncalves, A., Tarache, C., Lilliu, A & Bally (2000). *Proyecto de exploración por hidrocarburos, costa afuera de Venezuela (P.E.C.A.).* Caracas. Corporación Venezolana de Petróleo (CVP). Exploración, reporte PDVSA.
- Carrillo, J. (2021). *Caracterización petrofísica del sistema poroso de secuencias carbonáticas y siliciclásticas del Oligo-Mioceno en la subcuenca el tocuyo, estado Falcón.* Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, 83 p
- Case, J., Macdonald, W. y Fox P. (1990). *Caribbean crustal provinces, seismic and gravity, in The Caribbean Region*, In: G. Dengo and J. E. Case (Eds.), Geological Soc. of America, Boulder Colorado, 15– 36 p.
- Catuneanu, O. (2006). *Principles of Sequence Stratigraphy.* Primera edición, Elsevier B.V., 375 p.
- Chelotti, L., Acosta, N. y Foster, M. (2009). *La biblia de la Geofísica.* Primera edición. [ebook] Chubut, Argentina. 6-30 p.
- Curet, E. (1992). *Stratigraphy and evolution of the Tertiary Aruba basin.* *Journal of Petroleum Geology*, V. 153: 283-304 p.

- Díaz de Gamero, M.L. (1977). *Estratigrafía y micropaleontología del Oligoceno y Mioceno Inferior del centro de la Cuenca de Falcon*. GEOS, V: 22. Venezuela, 3–60p.
- Dobrin, M., y Savit, C. H. (1988). *Introduction to Geophysical Prospecting*. Colorado: Mc Graw Hill.
- Donnelly, T. (1994). *The Caribbean Sea Floor*. Donovan, K. and Jackson. T.A. (eds): Caribbean Geology, and Introduction, 41-64p.
- Emery, D., y Myers, K. (1996). *Sequence Stratigraphy*. Oxford, U. K., Blackwell, p. 297.
- Espeso, A. (2018). *Interpretación Sísmica Estructural* [Material del aula]. Interpretación Sísmica. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Foster, S. (1980). *El basamento y las rocas paleozoicas en la parte norte de Venezuela*. Corpoven S.A., Caracas. Informe Ven-831, 000565, V: 1, 71p.
- Fowler, C. M. (2005). *The Solid Earth: An Introduction to Global Geophysics (Second)*. New York: Cambridge University Press.
- French, C. y C. Schenk (1997). *Map showing geology, oil and gas fields, and geologic provinces of the Caribbean region*. U.S. Geological Society of America Bulletin, 104:1301-1324 p.
- Feo-Codecido, G., Smith, F., Aboud, N. y Di Giacomo, E. (1984). *Basement and Paleozoic rocks of the Venezuelan Llanos basin*. Geological Society of America, M.162, 175-187p.
- García, A. (2009). *Mapas de anomalías de gravedad y magnetismo de Venezuela generados a partir de datos satelitales*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Garza, B. (2014). *Estadística y probabilidad* (1era.Ed). México: Editorial Pearson educación de México.
- Geosoft Inc. (2005). *Tutorial and user guide: Montaj Grav/Mag Interpretation. Processing, Analysis and Visualization System for 3D inversion of potential field data for Oasis Montaj v6.1*. (N. Whitehead, y C. Musselman, Edits.) Toronto: Geosoft Oasis Montaj.
- Ghosh, S., P. Pestman, L. Meléndez, I. Truskowski y E. Zambrano (1997). *Evolución Tectonoestratigráfica y Sistemas Petrolíferos de la Cuenca de Falcón, Venezuela*

- Noroccidental*. VIII Congreso Geológico Venezolano., Sociedad Venezolana de Geólogos- Tomo I.
- González de Juana, C., J. Iturralde y C. Picard (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*; Ediciones Foninves, Caracas. V: I, 542-987 p.
- Gorney, D. (2005). *Chronology of Cenozoic Tectonic Events in Western Venezuela and the Dutch Antilles Islands Based on Integration of Offshore Seismic Reflection Data and Onland Geology*. Trabajo Especial de Grado, Universidad de Texas en Austin.
- Gorney, D., Escalona, A., Mann, P., Magnani, B y grupo de estudio Bolívar (2007). *Chronology of Cenozoic Tectonic Events in Western Venezuela and the Leeward based on Integration of Offshore Seismic Reflection data and on-land Geology*.
- Granja, J. (2005). *Geodinámica del borde noreste de la Placa Caribe*. Trabajo especial de grado (Ph.D), Universidad Complutense de Madrid. Madrid.
- Hippolyte. J. y P. Mann., (2009). *Neogene-Quaternary tectonic evolution of the Leeward Antilles islands (Aruba, Bonaire, Curacao) from fault kinematic analysis*. *Marine and Petroleum Geology*, 28 (2011): 259-277 p.
- Hinze, W. J., Aiken, C., Brozena, J., Coakley, B., Dater, D., Flanagan, G. y Winester, D. (2005). *New Standards for Reducing Gravity Data: The North American Gravity Database*. *Geophysics*, 70, J25–J32
- Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F. y Schuh, H. (2019): *ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models*, associated services and future plans. - *Earth System Science Data*, v:11, 647-674 p, Disponible: <http://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>
- Izarra, C., Jácome, M., Schmitz, M y P. Mora (2005). *Analyzing gravity anomalies over the Caribbean and northern Venezuela tectonic plate boundary*. 6th International Symposium on Andean Geodynamics. ISAG 2005, Barcelona, 394-396 p.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3rd Ed. Blackwell Science, 281 p.
- Kane, MF., (1962). *A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer*. *Geophysics* 27: 455-46

- Li, X., y Gotze, H.-J. (2001). *Ellipsoid, Geoid, Gravity, Geodesy and Geophysics*. Geophysics, 66, 1660–1668 p.
- Lugo, J. y P. Mann (1992). *Colisión oblicua y formación de una cuenca foreland durante el Paleoceno Tardío al Eoceno Medio; Cuenca de Maracaibo, Venezuela*. VIII Congreso Latinoamericano de Geología, Salamanca, Actas, 4, 60-64p.
- Lowrie, W. (2007). *Gravity, the figure of the Earth y geodynamics. Fundamentals of Geophysics*. New York, Estados Unidos: Cambridge University Press, 67-99p
- Maita, A. (2010). *Interpretación estructural y estratigráfica con el uso de atributos sísmicos, trampa GF-205X. Guafita, estado Apure*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, 37 p.
- Malfait, B. y Dinkelman, M. (1972). *Circum Caribbean tectonic and igneous activity and the evolution of the Caribbean plate*. Geological Society of America Bulletin, 83(2): 251-272p.
- Mann, P., C. Schubert y K. Burke (1990). *Review of Caribbean neotectonics*. En: The Geology of North America, Vol. H: The Caribbean Region (Editado por: G. Dengo y J. Case), 307–338p.
- Mann, P., (1999). *Caribbean sedimentary basins: Classification and tectonic setting from Jurassic to present*. Sedimentary Basins of the World, 4: Amsterdam, Elsevier Science B.V, 3-31p.
- Macellari, C.E. (1995). *Cenozoic sedimentation and tectonics of the southwestern Caribbean pull-apart basin, Venezuela and Colombia*. In: Tankard, A.J., Suarez, S.R., Welsink, H.J. (Eds.), Petroleum basins of South America, vol. 62. AAPG Mem, 757–780 p.
- Mederos, I. (2009). *Modelaje geofísico de la región Farriar-Morón estados Yaracuy y Carabobo*. Trabajo especial de grado. Departamento de Geofísica. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela, Caracas. 112 p.
- Mendoza, J. (2021). *Caracterización de estructuras salinas al norte del golfo de México mediante el análisis integrado de datos gravimétricos y sísmicos*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, 30 p.

- Meschede, M. y Frisch, W (1998). *A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean Plate, Tectonophysics*, 269-291p
- Milson, J. (2003). *Field Geophysics The Geological Field Guide Series*. University College London: Wiley.
- Moore (2005), *Estadística aplicada básica* (2ª ed). Antoni Bosch Editor
- Molnar, P. y L. Sykes (1969), *Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity*. Geological Society America Bulletin, V:80, 1639-1684 p.
- Muessig, K. W. (1984), *Structure and Cenozoic tectonics of the Falcón basin, Venezuela, and adjacent areas*, in Bonini, W. E., et al., eds., *The Caribbean-South American Plate Boundary and Regional Tectonics*: Boulder, Colorado, GSA Memoir 162, 217-230 p.
- Nagy, D., (1966). *The gravitational attraction of a right rectangular prism*. Geophysics 31: 362-371p.
- Nowell, D. A. G. (1999). *Gravity terrain corrections — an overview*. J. Appl. Geophys., 42(2), 117-134 p.
- Orellana, C., (2008). *Modelado Estructural por Medio del Análisis de Flexión de Placas en la Región Nor-Occidental de Venezuela*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela.
- Orihuela, N. (2012). *Análisis de la placa caribe a partir de modelos integrados de anomalías de campos potenciales*. Trabajo especial de grado (PhD), Universidad Central de Venezuela, 1-28 p.
- Orihuela, N. y García, A. (2015). *Deconvolución de Euler de datos gravimétricos del segmento central de la zona de borde sur de la Placa Caribe*. Boletín de Geología, 37 (2), 25-39 p.
- Ostos, M. (1990). *Tectonic Evolution of the South – Central Caribbean based on Geochemical Data*. Trabajo especial de grado (PhD), Rice University, Houston, TX, USA. 411p.
- Paolini, M., Schmitz, M. y Orihuela, N (2014). *Interpretación Geofísica integrada de la plataforma centro norte costera de Venezuela*.

- Pérez, O., Bilham, R., Bendick, R., Velandia., J., Hernadez, C., Hoyer, M. y Kozuch, M.(2001). *Velocity field across the southern Caribbean plate boundary and estimates of Caribbean-South American plate motion using GPS geodesy 1994- 2000*. Geophysical Research Letters, v: 28, 2987-2990 p.
- Pestman P., S. Ghosh, L. Melendez y M. Lorente (1998). *Marco Tecnoestratigráfico y Paleogeografía de la Cuenca de Maracaibo y Áreas Vecinas Durante el Paleógeno*. Boletín de la Sociedad Venezolana de Geólogos, 23(1): 28-45 p.
- Phillips Petroleum International Corporation, Venezuela (2000). *La Vela costa afuera*. Reporte final de evaluación del Proyecto. Reporte (02). 156 p.
- Pierre, J. (2012). *Tectónica de placas y vulcanismo en el área de del Gran Rift*. Mercator - Revista de Geografía da UFC. Universidad Federal do Ceará Fortaleza, Brasil.V.11, 183-216 p.
- Pindell, J. y Barrett, S. (1990). *Geological evolution of the Caribbean region; A plate-tectonic perspective*. The Geology of North America, the Caribbean Region, 405- 432 p.
- Pindell, J. (1994). *Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean*. Donovan S.K. and Jackson, T. A. (eds.) Caribbean Geology: an introduction, University of the West Indies Publishers Association/University of the West Indies Press, Kingston, Jamaica, 13-39 p.
- Pindell, J. y L. Kennan, L. (2001). *Processes and events in the terrane assembly of Trinidad and eastern Venezuela*. Transactions of the 21st GCSSEPM Annual Bob F. Perkins Research Conference: Petroleum Systems of Deep-Water Basins, 159-192 p.
- Pindell, J., Kennan. L., Maresch. W., Stanek, K-P., Draper, G. y Higgs, R. (2005). *Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc-continent 11 interactions: Tectonic controls on basin development in Proto-Caribbean margins*. Geological Society of America. Special Paper, V: 394,7-52p.
- Pindell, J. L., y Kennan, L., Wright, D. y J. Erikson (2009). *Clastic domains of sandstones in central/eastern Venezuela, Trinidad, and Barbados: heavy mineral and tectonic constraints on provenance and palaeogeography*. The geology and evolution of the 159 region between North and South America. Geological Society of London, Publicación especial 2009.

- Porras, L., 2000, *Evolución tectónica y estilos estructurales de la región costa afuera de las cuencas de Falcon y Bonaire*. Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas.
- Priem, H., D.J. Beets., N.A.I.M. Boelrijk., E.H. Heneda., E.A.Th. Verdurmen. y R.H. Verschure., (1978). *Rb-Sr evidence for episodic intrusion of the late Cretaceous tonalitic batholith of Aruba, Netherlands Antilles*. *Geologie en Mijnbouw*, 293-296 p.
- Regueiro, J. (1997). *Sísmica para Ingenieros y Geólogos de Yacimientos*. CIED
- Reid, A., Allsop, L., Granser, H., Millet, A. y Somerton, I. (1990). *Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution*. *Geophysics*, 55, 80-91 p.
- Reid, A. B. y Thurston, J. B. (2014). *The structural index in gravity and magnetic interpretation: Errors, uses, and abuses*. *Geophysics*, 79 , 61-66 p.
- Renz, M. M. (1948), *Stratigraphy and fauna of the Agua Salada Group, State of Falcón, Venezuela*: GSA Memoir, 32- 219 p.
- Rodríguez, J. y Sousa J. (2003). *Estudio Geológico-Estructural y Geofísico de la sección de Cabo de San Román-Barquisimeto. Estado Falcón y Lara*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.
- Rojas, Y. (2018). *Caracterización del sistema poroso de secuencias carbonáticas y siliciclásticas del Oligo-Mioceno para el campo La Vela, costa afuera Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, 12-26 p.
- Rueda, E. (2016). *Interpretación estratigráfica secuencial de la sucesión sedimentaria oligo-mioceno en La Ensenada de La Vela, sector nororiental de la cuenca de Falcón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.
- Sánchez, D.; D. Gómez, J. Bergamín y R. Tejero. (1998), *Aplicación del análisis espectral para la separación regional-residual de anomalías gravimétricas y aeromagnéticas en el SO del Macizo Ibérico*. *Revista GEOGACETA*, V: 23.
- Sánchez, J., M. Bezada, M. Schmitz, V. Rocabado, J.Ávila, E.Vieira, M. Yánez, V.Cano, R.Ollarves, L. Alvarado, J.Medina y “BOLIVAR active seismics working group” (2004). *Mediciones sísmicas marinas y terrestres realizadas en abril / mayo de 2004 en Venezuela en el marco de los proyectos BOLIVAR y GEODINOS*. FUNVISIS.

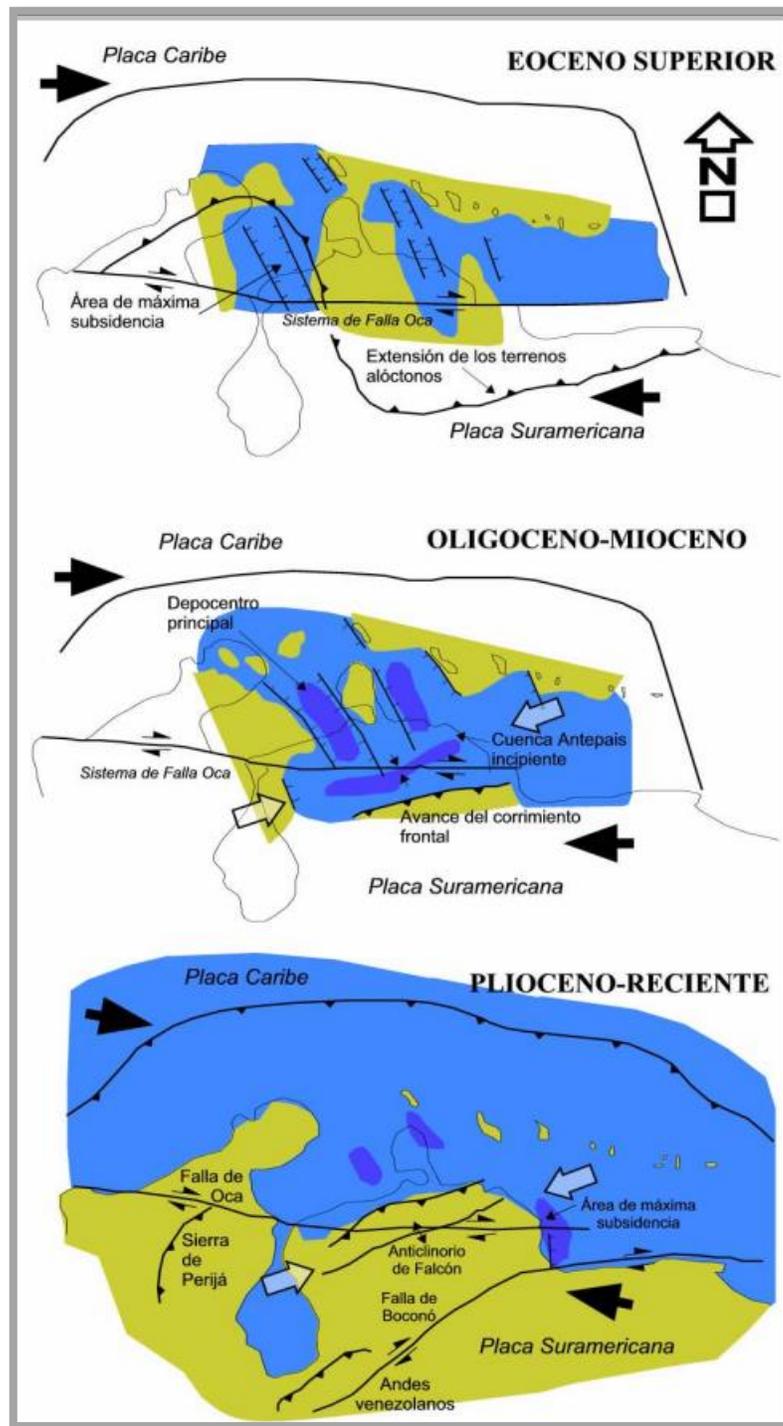
- Serway, R y J. Jewett (2005). *Electricidad y magnetismo. 6ª edición*. International Thomson Editores. ISBN 970-686-538-1. México. 356 p.
- Schlumberger (2007). *Schlumberger Oilfield Glossary*. Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms>.
- Schubert, C. (1984). *Basin formation along Boconó-Morón-El pilar fault system, Venezuela*. J. Geophys. Res, V: 89, 5711-5718 p.
- Silver, E., J. Case y H. Macgillavry (1975). *Geophysical study of the Venezuelan Borderland*. Bullitin of the Geological Society of America, V: 86, 213 – 226 p.
- Somigliana, C. (1930). *Geofisica —Sul Campo Gravitazionale Esterno del Geoide Ellissoidico*: Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Rendiconti. Classe Di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, 6, 237–243p.
- Spector, A. y Grant, F. S. (1970). *Statistical models for intrepetin aeromagnetic data*. Geophysics, 35, 293-302 p.
- Suarez, A. (2021). *Procesamiento e interpretación de datos gravimétricos en el macizo montañoso del Ávila*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, 23 p.
- Tardáguila, P. (2008). *Marco cronoestratigráfico integrado del margen norte costa afuera de Venezuela, a partir del análisis de la información geológica publicada*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, 39-150 p.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Udías, A., & Mezcua, J. (1997). *Fundamentos de Geofísica*. Alianza Editorial, S.A
- Ughi, A. (2002). *Modelaje geofísico integrado de la región central de Venezuela por medio del análisis de flexión de placas en la sección 67° 00' 00'' w*. Trabajo especial de grado, Universidad Central de Venezuela, 6-30 p.
- Ughi, A. (2019). *Gravimetría y Tectónica de los márgenes meridional y oriental de la placa Caribe*. Trabajo especial de grado (PhD), Universidad Central de Venezuela, 57 p.
- Urbani, F. y Rodríguez, J. (2004), *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa*. Caracas: Ediciones Fundación GEOS.

Vásquez E. 1975. *Results of Explorations in La Vela bay*. Proceedings IX World Petroleum Congress. (Chichester, UK), 3:195- 197 p.

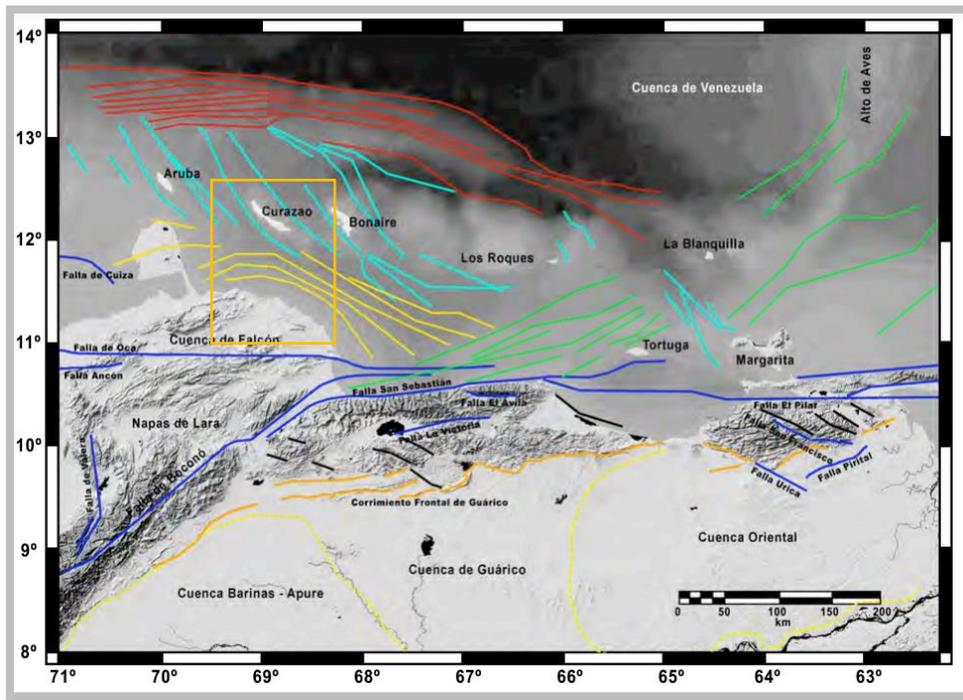
Who We Are | U.S. Geological Survey. (2014). Visualizado el 3 de febrero de 2023. Disponible en: <https://www.usgs.gov/about/about-us/who-we-are>.

Zhang, C., Mushayandebvu, M., Reid, A., y Fairhead. (2000). *Euler deconvolution of gravity tensor gradient data*. Geophysics, 65(2):,512-520 p.

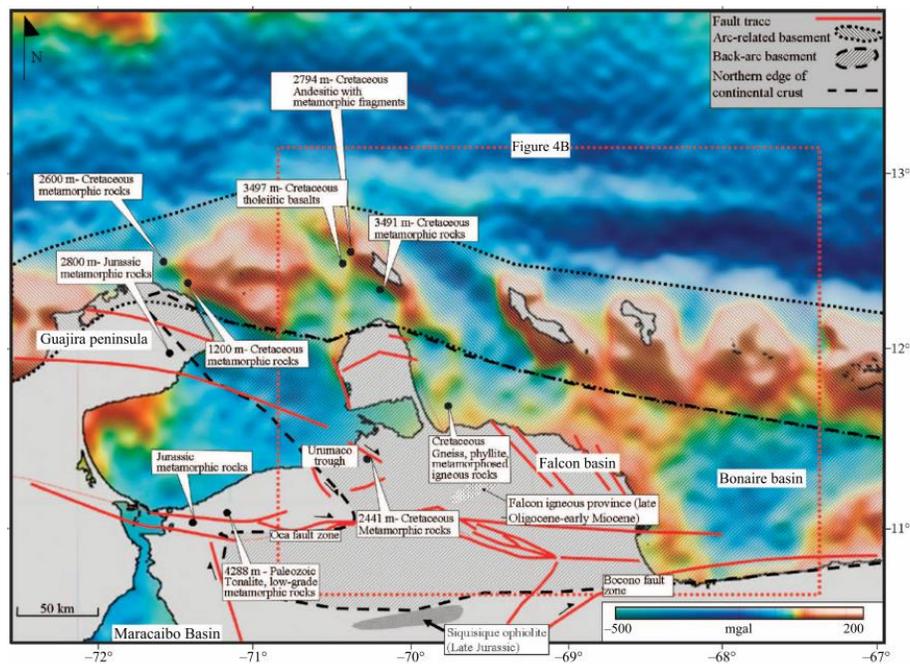
APÉNDICES



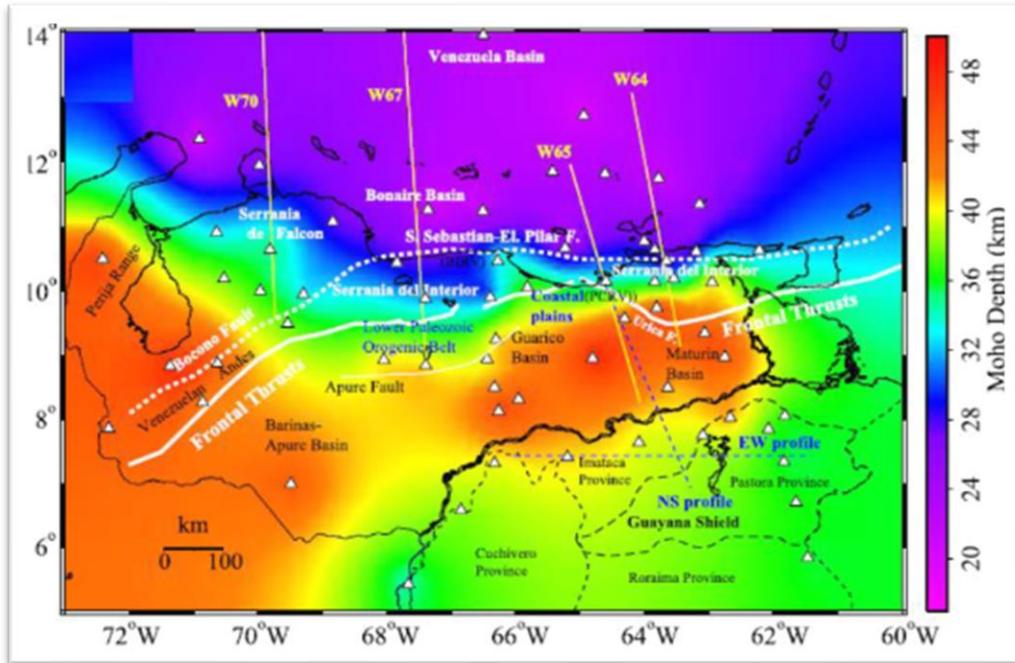
Apéndice 1. Modelo evolutivo de cuenca "Pull apart" en el noroccidente de Venezuela, durante el Oligoceno- Mioceno (Marcellari, 1995).



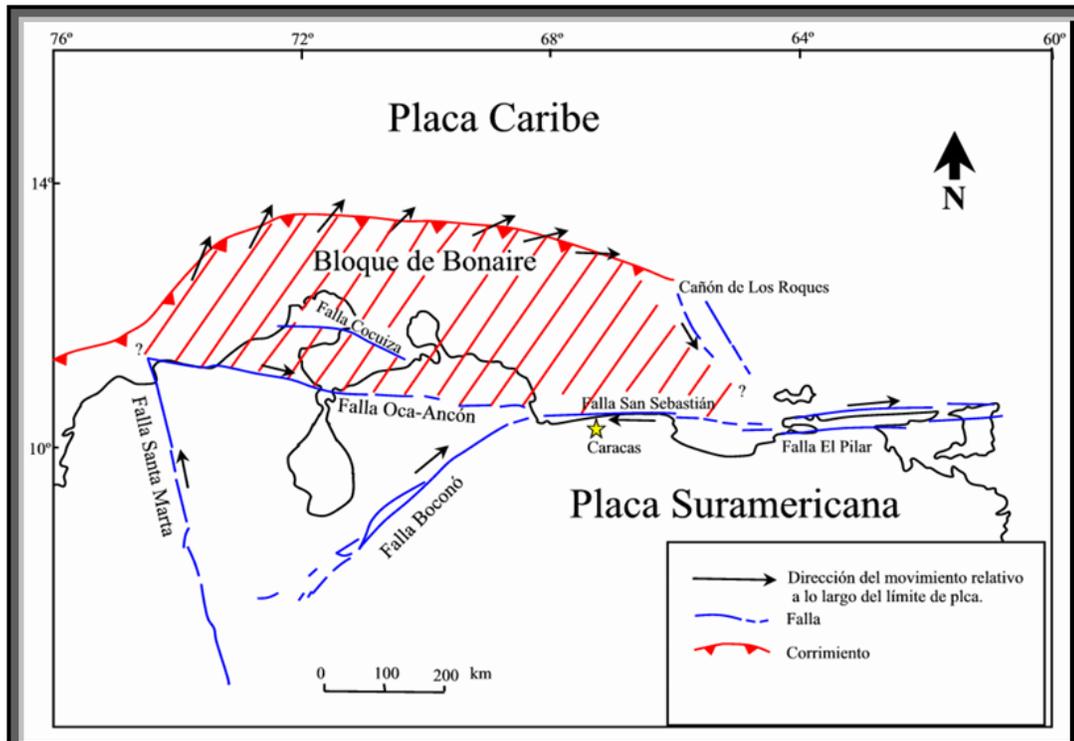
Apéndice 2. Familia de Fallas en Venezuela y Costa Afuera. (1) Fallas transcurrentes dextrales (azul oscuro); (2) fallas de rumbo suroeste (anaranjado); (3) fallas de rumbo noroeste (negro); (4) fallas con rumbo ENE (verde); (5) fallas normales rumbo suroeste (azul claro); (6) fallas de corrimiento rumbo este (rojo); (7) fallas de corrimiento noroeste (amarillo). (Ughi, 2019).



Apéndice 3. Mapa estructural del occidente venezolano. (Gorney *et al.*, 2007).



Apéndice.6 Mapa del espesor cortical en el norte de Venezuela (Niu et al., 2007).



Apéndice 7. Bloque de Bonaire y su relación con la placa Caribe y la placa Suramérica. (Silver et al., 1957).