

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**GENERACIÓN DE MODELOS DE BASAMENTO DE LOS  
ARCOS DE ARAUCA Y MÉRIDA EN LA CUENCA BARINAS-  
APURE A TRAVÉS DE INTEGRACIÓN DE DATOS  
GEOFÍSICOS**

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
Optar al título de Ingeniero Geofísico  
Por el Br. Jaspe C Juan A

Caracas, Noviembre de 2004

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **GENERACIÓN DE MODELOS DE BASAMENTO DE LOS ARCOS DE ARAUCA Y MÉRIDA EN LA CUENCA BARINAS- APURE A TRAVÉS DE INTEGRACIÓN DE DATOS GEOFÍSICOS**

**Tutor académico:** Franklin Ruiz

**Tutor industrial:** Elías Roa

Trabajo Especial de Grado  
Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela para  
Optar al título de Ingeniero Geofísico  
Por el Br. Jaspe C Juan A

Caracas, Noviembre de 2004

**Caracas, Noviembre de 2004**

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el consejo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller Juan Antonio Jaspe Celis, titulado:

**GENERACIÓN DE MODELOS DE BASAMENTO DE LOS ARCOS DE ARAUCA Y MÉRIDA EN LA CUENCA BARINAS-APURE A TRAVÉS DE INTEGRACIÓN DE DATOS GEOFÍSICOS.**

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

---

Profesora Inírida Rodríguez

Jurado

---

Profesor Antonio Ughi

Jurado

---

Profesor Franklin Ruiz

Tutor Académico

## DEDICATORIA

*A las personas más importantes en mi vida, las cuales contribuyeron de forma directa e indirecta en el éxito de mi carrera como estudiante, desde el comienzo hasta la culminación de este trabajo especial de grado.*

***Mi madre, padre y hermana.***

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Escuela de Geología Minas y Geofísica, de la Universidad Central de Venezuela, por permitirme crecer tanto personal como académicamente en sus instalaciones. Un especial agradecimiento al profesor Franklin Ruiz y a la profesora Inirida Rodríguez.

Igualmente a Gustavo Taboada por su gran aporte, Sra. Morella, Eduardo, Arhiana, Jamirel, Alba, Ernando. A mis amigos de cagua, Molina, Harry, Jhony, Sidonio, Oliver, Alexander, Angel Pérez, Angel Contreras, Raúl, y Gregori.

A PDVSA Pto. La Cruz por brindarme su apoyo para la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Agradezco enormemente a la Profesora Celia Bejarano, Ing Pedro Vera, Ing Elías Roa, y al Dpto de Geodesia y Sensores Remotos a Darvis Várela, Alfredo Montserrat, Mario Forgioni, Ingrid Oropeza, Anhely Guacha, Erly Méndez, María Magnolia, Jaime Salazar, Rodolfo, Juan Carlos, Juan Piret, Carlos Vargas, Carlos Gil, Noya, Joctan y al Ing. Nelson Fernández.

A PDVSA INTEVEP, especialmente por su gran colaboración en todo momento agradezco a Nieves Nevado, Francisco Araujo, Freddy Fernández y Hugo.

A mis tías, Julia, Jadiris, Eludís, Dilia, Janet, Irlanda, Nancy y a mis tíos Luis, Chacín, Ricardo, Jhony, Alberto y especialmente a mi tío Juan Castelar.

A mis Abuelos Antonio, Juan Celis, Francisca y María. A mis primos Ricardo, Ramón, Wilmer, Angel, Juan Alberto, David, Jesús y a mis primas Celeste, Juliana, Alejandra.

**Jaspe C. Juan A**

**GENERACIÓN DE MODELOS DE BASAMENTO DE LOS  
ARCOS DE ARAUCA Y MÉRIDA EN LA CUENCA BARINAS-  
APURE A TRAVÉS DE INTEGRACIÓN DE DATOS  
GEOFÍSICOS**

**Tutor Académico: Prof. Franklin Ruiz. Tutor Industrial: Ing. Elías Roa.  
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y  
Geofísica. Ingeniero Geofísico, Año 2004, 110 Pág.**

**Palabras Claves:** Análisis Espectral, Sensores Remotos, Sistema de Información Geográfica, Geoestadística, Interpretación Sísmica, Modelaje Gravimétrico-Magnético.

**Resumen.** El propósito del presente Trabajo Especial de Grado fue realizar un estudio gravimétrico y magnético, con la finalidad de estimar la orientación de los Arcos de Arauca y Mérida en el basamento de la cuenca de Barinas-Apure, así como determinar su geometría exacta, continuidad hacia la Cordillera Andina y el papel que estos desempeñaron a nivel estructural en la sedimentación.

El estudio cubre un área de 10539 Km<sup>2</sup>, entre los 6° 55' 12" y los 9° 27' 36" de latitud norte, y desde los 68° 04' 48" hasta los 72° 08' 24" de longitud oeste. Esto abarca la parte sur del lago de Maracaibo, el flanco surandino y el borde oeste del Escudo de Guayana.

Para realizar dicho estudio, se generó un conjunto de mapas de anomalías gravimétricas y magnéticas; entre los cuales se encuentran, mapas de anomalía de Bouguer, regional, residual de la continuación del campo de la anomalía de Bouguer, mapas de intensidad magnética total y de reducción al polo. Los datos utilizados para esta interpretación fueron suministrados por el banco de datos potenciales de INTEVEP PDVSA. Con la finalidad de estudiar el comportamiento tanto espacial como la calidad cuantificada de estos datos, se realizó un análisis estadístico y geoestadístico de los mismos.

Se trazó un transecto sísmico perpendicular a ambos arcos y paralelo a los Andes de Mérida, de dirección (suroeste-noreste). Para la asignación de las densidades de

las capas sedimentarias, se contó con información de velocidades de pozo. Con el propósito de obtener un mejor resultado en la interpretación, se integró información de geología de superficie de imágenes satelitales, mapas de profundidad de basamento y sistemas de fallas interpretados por el proyecto VIPA. Para tener un mayor control de las profundidades de las fuentes causantes de las anomalías, se realizó un análisis espectral del mapa de Bouguer e Intensidad Magnética Total.

Finalmente, a través de la interpretación bidimensional se obtuvo que la influencia de los Arcos de Arauca y Mérida se ven reflejadas en la respuesta de la curva observada, el modelo tuvo como característica principal un basamento que aumenta de espesor hacia el noreste, desde 4 km en profundidad al suroeste hasta aproximadamente 1 km al noreste, esto se debe a la influencia ejercida por las rocas graníticas del Arco de El Baúl. La columna sedimentaria del transecto t-11 permitió controlar la respuesta de las primeras capas, aumentando las densidades con la profundidad.

Debido a que el perfil elaborado en este trabajo comprende a un estudio regional, fue necesario incluir los topes de la corteza inferior, aproximadamente 22 km y el tope del manto a 35 km; esto se hizo debido a que la respuesta gravimétrica incluye indudablemente los efectos de estructuras mucho más profundas que las observadas en la interpretación sísmica.

Una vez corroborada la ubicación de los Arcos tanto en el transecto sísmico como en el modelaje, se determinó la continuidad de los Arcos en el subsuelo, teniendo como base información suministrada por los cambios de tonalidades en los mapas elaborados e interpretados.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	Iii
AGRADECIMIENTOS	Iv
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL	Vii
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	Xii
1. CAPÍTULO I	
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Localización del Área de Estudio	3
1.4 Trabajos Previos	4
1.5 Método de Trabajo	6
1.5.1 Revisión Bibliográfica	7
1.5.2 Selección de los Datos Gravimétricos y Magnéticos	7
1.5.3 Selección de Imágenes de Satélite	7
1.5.3.1 Combinación Falso Color de Bandas Espectrales	8
1.5.3.2 Corrección Radiométrica (Realce de Contraste)	10
1.5.3.3 Construcción de Mosaicos	11
1.5.3.4 Digitalización y Georeferenciación de Estructuras de Superficie	11
1.5.4 Digitalización de Mapas de Basamento	13
1.5.5 Análisis Estadístico y Geoestadístico de los Datos	15
1.5.6 Análisis Espectral	15
1.5.7 Construcción de Mapas	15
1.5.8 Construcción del Perfil	16
1.5.9 Modelado de Perfiles	17
2. CAPÍTULO II. MARCO GEOLÓGICO	
2.1 Geología Regional	18
2.2 Evolución Tectónica de la Cuenca Barinas-Apure	18



2.2.1 Paleozoico	19
2.2.2 Jurásico-Cretácico Temprano	19
2.2.3 Cretácico Medio-Tardío	20
2.2.4 Paleoceno-Eoceno Medio	21
2.2.5 Eoceno Tardío-Oligoceno	22
2.2.6 Mioceno-Pleistoceno	22
2.3 Estratigrafía de la Cuenca Barinas-Apure	24
2.3.1 Formación Aguardiente	25
2.3.2 Formación Escandalosa	26
2.3.3 Formación Gobernador	27
2.4 Estructuras de Basamento (lineaciones)	28
2.4.1 Arco de Mérida	29
2.4.2 Arco de Arauca	31
2.5 Sistema de Fallas de Apure	33
<b>3. CAPÍTULO III. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE SENSORES REMOTOS, MÉTODO GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO</b>	
3.1 Sensores Remotos	34
3.1.2 Espectro Electromagnético	34
3.1.3 Procesamiento Digital de Imágenes	35
3.1.4 Efecto de la Atmósfera en una Imagen de Satélite	36
3.1.5 Corrección Radiométrica	36
3.1.6 Realce de Contraste	37
3.1.7 Histograma Lineal	37
3.2 Satélite Landsat MT	39
3.3 Sistema de Información Geográfica (SIG)	40
3.4 Método Gravimétrico	43
3.4.1 Campo Gravitatorio Terrestre	43
3.4.2 Ley de Newton	44
3.4.3 El Geoide	45
3.4.4 Anomalías Isostáticas	45
3.5 Separación de Efectos Regionales y Residuales	46
3.5.1 Continuación Analítica del Campo	47

3.6 Modelado Gravimétrico	49
3.6.1 Uso de formas geométricas tipos	49
3.6.2 Estimación de la profundidad	50
3.6.3 Elección de la densidad	50
3.7 Método Magnético	53
3.7.1 Propiedades de la prospección magnética	54
3.6.2 Variaciones del Campo Magnético	55
3.8 Elaboración e interpretación de Mapas Magnéticos	56
3.8.1 Mapa de Reducción al Polo	57
4. CAPÍTULO IV. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS	
4.1 Fuente de los Datos Gravimétricos	58
4.2 Análisis Estadístico de los Datos Gravimétricos	59
4.3 Fuente de los Datos de Intensidad Magnética Total	62
4.4 Análisis Estadístico de los Datos de Intensidad Magnética Total	63
4.5 Análisis Geoestadístico de los Datos Gravimétricos	65
4.6 Análisis Geoestadístico de los Datos de Intensidad Magnética Total	68
5. CAPÍTULO V. ANÁLISIS DE RESULTADOS	
5.1 Mapa de Anomalía de Bouguer	70
5.2 Mapa Regional de la continuación (2km) hacia arriba	73
5.3 Mapa Regional de la continuación (10 km) hacia arriba	76
5.4 Mapa Residual de la continuación (10 km) hacia arriba	78
5.5 Mapa de Intensidad Magnética Total	83
5.6 Mapa de reducción al Polo de la Intensidad Magnética Total	85
5.7 Mapa de profundidad de Basamento Magnético	87
5.8 Interpretación Bidimensional	92
5.8.1 Selección de las líneas Sísmicas para la construcción del perfil	92
5.8.2 Análisis espectral del perfil NE, aplicado al mapa (AB)	93
5.8.3 Análisis espectral del perfil NE, aplicado al mapa (IMT)	94
5.8.4 Restricciones para el modelo Gravimétrico y Magnético	95
5.8.5 Información de pozos y Registro Tectono-estratigrafico	96
5.8.6 Modelado del perfil NE	97
5.8.7 Análisis del Modelo	102

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Fig. N°	Pág.
1.1 Ubicación relativa del área de estudio	3
1.2 Flujograma de la metodología empleada	6
1.3 Ubicación de imágenes Landsat utilizadas. Path/Row Cobertura del satélite Landsat TM para Venezuela.	8
1.4 Bandas 1 (azul del visible), banda 2 (verde del visible) y banda 3 (rojo del visible). Imagen Landsat 007/054.	9
1.5 Bandas 4 (infrarrojo cercano), banda 5 (infrarrojo medio) y banda 3 (rojo del visible). Imagen Landsat 007/054	9
1.6 Histogramas ecualizados	10
1.7 Mosaico creado de las 6 imágenes Landsat sin interpretar estructuras	11
1.8 Mapa estructural obtenido a partir de la interpretación de la Imagen LANSAT complementado con información del proyecto VIPA 2002.	11
1.9 Mapa de geología de superficie CREOLE 1949, digitalizado por Adams Consulting S.A	12
1.10 Representación esquemática de los mapas de basamento seleccionados.	13
1.11 Mapa de interpretación de basamento. Hoja N° 50.	13
1.12 Georreferenciación de hoja N° 50 del mapa de contorno de basamento de la cuenca Barinas-Apure	14
1.13 Digitalización de las líneas de basamento de los mapas elaborados por GEOTERREX LTD.	14
1.14 Ubicación del perfil NE (T-11) utilizado en el modelaje y de los pozos suministrados por PDVSA	16
2.1. Mapa de distribución de las cuencas petrolíferas en Venezuela, basado en la distribución de sus provincias sedimentarias. Tomado de YORIS y OSTOS (1997).	17
2.2. Mapa de distribución de los terrenos alóctonos en el norte de Sudamérica en los cuales hay rocas paleozoicas. Estos terrenos fueron suturados secuencialmente. Tomado de YORIS y OSTOS (1997).	
2.3. Distribución de las rocas de edad jurásica en Venezuela, mostrando que lamismas afloran en la Sierra de Perijá	19
2.4. Avance de las Napas de Lara en Venezuela. Tomado de OSUNA (1990)	20
2.6. Sección NO-SE de la Cuenca de Barinas- Apure. Modificado de PARNAUD et al. (1995). Tomado de YORIS y OSTOS (1997)	23

2.7. Cuadro de correlación estratigráfica, muestra las unidades presentes en la cuenca de Barinas-Apure y sus zonas aledañas. Tomado de KISER (1989), INTEVEP (1997)	24
2.8. Estructuras mayores del Basamento, basadas en geología, sísmica y aeromagnetismo. Tomado de KISER (1988)	28
2.9 Elementos Tectónicos del Nor-Oeste de Sur-América, Venezuela y Colombia. Modificado por DENGÓ y COVEY (1993)	30
3.1 Espectro electromagnético	34
3.4 Efectos profundos que enmascaran y dificultan la resolución de anomalías locales	45
3.5 Elementos del Campo Geomagnético	53
4.1 Localización de los datos gravimétricos en el área de estudio	57
4.2. Histograma de frecuencia de la Anomalía de Bouguer	59
4.3 Localización de las líneas magnéticas	61
4.4 Histograma de frecuencia de la Anomalía Magnética	62
4.5 Variograma teórico de la anomalía de Bouguer	65
4.6 Roseta de distribución espacial de la anomalía gravimétrica	66
4.7 Elipse de anisotropía de la anomalía gravimétrica	66
4.8 Variograma teórico de la Intensidad Magnética Total	67
4.9 Elipse de anisotropía de la Intensidad Magnética Total	67
4.10 Roseta de distribución espacial de la Intensidad Magnética Total	68
5.1 Mapa de Anomalía de Bouguer	72
5.2 Mapa de la continuación (2 km) hacia arriba de la Anomalía de Bouguer	75
5.3 Mapa de la continuación (10 km) hacia arriba de la Anomalía de Bouguer	77
5.4 Mapa de residual de la continuación (10 km) hacia arriba (AB)	79
5.5 Perspectiva 3D de las continuaciones de 2, 10 km y residual de (AB)	81
5.6 Perspectiva 3D de la ubicación de los arcos	82
5.7 Mapa de Intensidad Magnética Total	84
5.8 Mapa de Reducción al Polo	86
5.9 Mapa de líneas de Basamento Magnético	88
5.10 Perspectiva 3D del mapa de Reducción al Polo y el mapa de profundidad del basamento	90
5.11 Perspectiva 3D de la ubicación de los arcos	91
5.12 Ubicación del Perfil (T-11) utilizado en el modelaje	93
5.13 Análisis espectral de la Anomalía de Bouguer en el perfil NE	94
5.14 Análisis espectral del mapa IMT en el perfil NE	95
5.15 Código de Tectonosecuencias VIPA PDVSA	96
5.16 Transecto Sísmico Regional T-11 interpretado a partir de Tectonosecuencias del Proyecto VIPA PDVSA	99
5.17 Marco Tectono-estructural del T-11. Tomado de Di Croce (2000)	100
5.18 Características de cada una de las tectonosecuencias utilizadas en el modelo	101
5.19 Modelo de la Anomalía de Bouguer y de IMT	103

5.20 Modelo de la Anomalía de Bouguer y del IMT, representando a la coteza inferior, superior y manto.	104
--	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°	Pág.
1. 1 Vértices de la ventana de estudio	3
3.1. Intervalos de frecuencias en las distintas regiones del espectro	35
3.2 Combinaciones de bandas y aplicaciones	39
3.3 SIG versus procedimientos manuales, tomado de SIG Manual Base, 1999	41
3.4 Funciones básicas de un SIG, tomado de SELPER, SIG Manual Base, 1999	42
3.5 Densidades de sedimentos y rocas sedimentarias	51
3.6 Densidades de rocas metamórficas	51
3.7 Densidades de rocas ígneas	52
4.1 Resumen de procesamiento de casos de los datos de Anomalía de Bouguer	59
4.2 Valores de tendencia central de la Anomalía de Bouguer	60
4.3 Valores descriptivos de Anomalía de Bouguer	61
4.4 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la variable de Anomalía de Bouguer, distribución de contraste, Normal	62
4.5 Resumen de procesamiento de casos de los datos de Anomalía Magnética	63
4.6 Valores de tendencia central de la Anomalía de Magnética	64
4.7 Valores descriptivos de Anomalía de Magnética	65
4.8 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Anomalía Magnética, distribución Normal	65
5.1 Ubicación de las líneas Sísmicas utilizadas en el perfil	92
5.2 Velocidades Sísmicas utilizadas y las densidades obtenidas la ecuación de Gardner	98

# CAPÍTULO I

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Las trampas estructurales en Barinas y Apure son básicamente altos estructurales y donde algunas fallas pueden ser también factor de entrapamiento como ocurre con el campo Guafita. Dos rasgos tectónicos importantes han influido notablemente en la distribución de facies y espesores del Cretácico y Terciario y son, el Arco de Arauca y el Arco de Mérida. OSUNA (1989) establece que el Arco de Arauca representa una plataforma que separa las depresiones de Capitanejo y Arauca respectivamente. Dicha plataforma incluye una lineación de altos estructurales “a nivel de basamento” que aparentemente están asociados a fallamientos pre-Terciario reactivados.

CHIGNE (1985) establece que los Arcos de Mérida y Arauca fueron activos durante la sedimentación de las capas basales del Cretácico y fueron reactivados en la orogénesis a finales del Cretácico. Dichos arcos prevalecieron durante el Eoceno como altos estructurales, donde se depositaron sedimentos de aguas poco profundas tal como lo muestra la distribución de facies del Eoceno.

En la Cuenca de Barinas-Apure existen dos cocinas que revisten importancia, la Eocena al noroeste de la cuenca, que generó el petróleo de los campos de Barinas y la cocina de Arauca, la cual generó el petróleo de Guafita - La Victoria. El hidrocarburo de la primera, debió migrar hacia el sur-sureste y entraparse en virtud de un sello tan significativo como las lutitas de la Formación Paguey. Este petróleo, en parte, pudo haber alcanzado el área de Capitanejo y no haberse entrapado por falta de sello. Sin embargo, se presume que no alcanzó dicha área por que el Arco de Mérida sirvió de barrera a la migración. De igual manera existe la incertidumbre de por que el hidrocarburo de la cocina de Arauca no alcanzó el área de Capitanejo, teniéndose como primera opción que el Arco de Arauca sirvió al igual que el Arco de Mérida de estructura sello.

Es por esta razón que se plantea la necesidad de realizar un modelo de basamento con información gravimétrica y magnética de la zona, incluyendo los dos arcos, con el fin de determinar su geometría exacta, continuidad hacia la cordillera Andina y el papel que éstos desempeñaron a nivel estructural en la sedimentación eocena.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivos Generales**

Se tiene como objetivo principal la obtención de un modelo del basamento de la cuenca de Barinas-Apure, específicamente entre Barinas y la depresión de Arauca. Esto implica forma y ubicación del basamento en profundidad, para luego obtener una ubicación regional de ambos arcos a nivel del subsuelo. Este modelo se obtendrá a partir de un perfil trazado sobre mapas de anomalías de Bouguer e Intensidad Magnética Total.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Realizar el análisis estadístico y geoestadístico de los datos gravimétricos y magnéticos
2. Elaborar mapas de Anomalías de Bouguer, Intensidad Magnética Total y Reducción al Polo.
3. Separar los efectos regionales y residuales de los datos de Anomalía de Bouguer.
4. Realizar el análisis espectral a los perfiles gravimétricos y magnéticos, los cuales se encuentran sobre el transecto sísmico utilizado.
5. Modelar el perfil seleccionado a partir del análisis espectral y la información disponible sobre geología de superficie, imágenes de satélite, sísmica, pozos, mapas de profundidad de basamento y trabajos geofísicos previos en la zona.

- Representar gráficamente la ubicación de los Arcos a partir de la interpretación de los mapas y del modelo propuesto.

### 1.3 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio cubre un área de 10539 Km<sup>2</sup>, entre los 6° 55' 12" y los 9° 27' 36" de latitud norte, y desde los 68° 04' 48" hasta los 72° 08' 24" de longitud oeste. Esto abarca la parte sur del lago Maracaibo, el flanco surandino y el borde oeste del Escudo de Guayana (figura 1). En la tabla 1.1 se muestran las coordenadas del área en sistema UTM.

Vértice	UTM (E-W)	UTM (N-S)
1	264.053	1.031.585
2	264.053	729.017
3	559.733	729.017
4	559.733	1.031.585

Tabla 1. 1 Vértices de la ventana de estudio

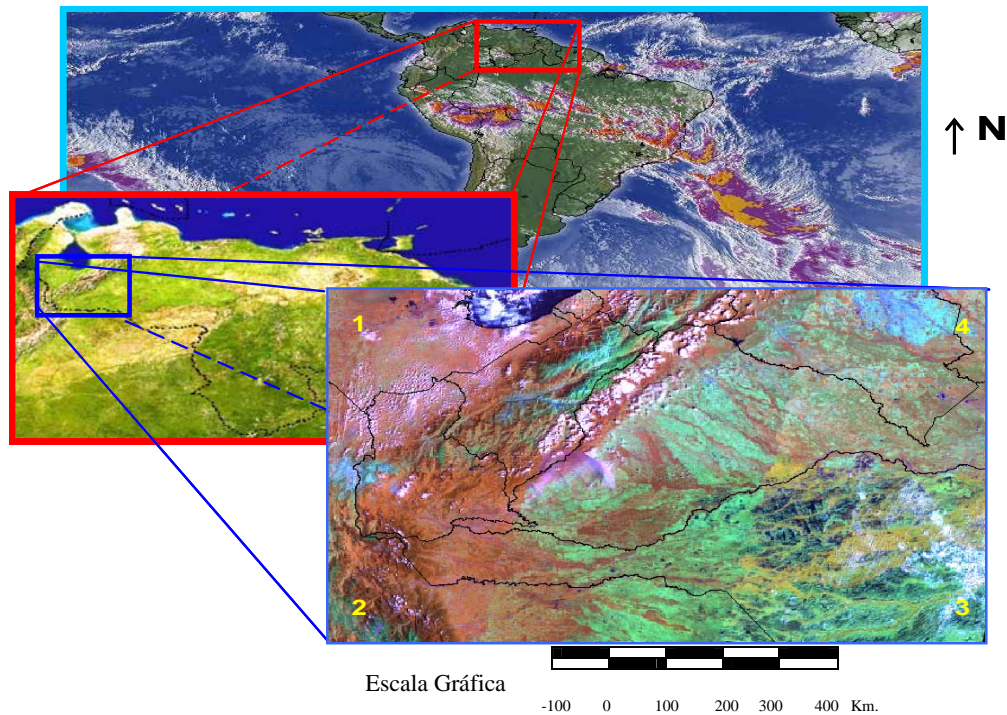


Figura. 1.1 Ubicación relativa del área de estudio



## 1.4 TRABAJOS PREVIOS

La exploración de la Cuenca de Barinas – Apure se inició en los años veinte con los estudios geológicos de superficie. En el año de 1977 se realizó un levantamiento, procesamiento e interpretación de datos gravimétricos y magnéticos de la zona, bajo la dirección del MEM, obteniéndose como resultado, que la estructura principal en la zona es la cuenca de Barinas – Apure y parte de la cuenca oriental.

Posteriormente en el año 1978, el BEICIP hizo la evaluación del potencial petrolífero de la Cuenca de Barinas-Apure, los únicos datos que se pudieron conseguir fueron los resultados de la campaña llevada a cabo en 1957 por Aeromagnetic Surveys Ltd of Canadá (Subsidiaria de Hunting) en la parte sureste de la Cuenca y en el área El Baúl-Guanarito; en esta campaña se obtuvo como resultado, que los contornos del campo total muestran para las rocas magnéticas del basamento una dirección SSO-NNE.

En el año de 1982 PDVSA y sus filiales realizaron un levantamiento magnético que cubrió toda la Provincia Barinas-Apure (con la excepción de una franja cercana a Los Andes donde fue difícil volar) y dió a los geofísicos y geólogos una perspectiva extraordinaria de las estructuras que existen en el basamento. En este trabajo se destacó la presencia de provincias magnéticas en el basamento; la interpretación de los mapas arrojó información sobre la presencia de una fosa o graben llamado graben de San Fernando, en el otro lado del graben se apreció una faja (llamada Alto de Mantecal) que posiblemente consta de rocas ígneas, por sus características, seguido por otra fosa o graben de rocas sedimentarias, llamado graben de Nutrias. Adyacente al graben de Nutrias, y entre él y los Andes de Mérida, están las Provincias de Apure, Barinas y Guanarito, cada uno con diferentes rumbos de estructuras.

CORPOVEN, S.A. realizó un proyecto micromagnético al oeste del estado Apure, entre las coordenadas de latitud  $7^{\circ} 02' 30''$  N y  $7^{\circ} 37' 30''$  N y longitud  $-70^{\circ} 02' 30''$  W y  $-72^{\circ} 05' 00''$  W entre el 15 de diciembre de 1994 y 4 de enero de 1995; este reporte final consta de mapas de anomalías magnéticas residuales, a escala 1:100.000 (SRM) o Magnetic Bright Spot anomalías, mapa de intensidad magnética total corregido y basamento magnético en profundidad.

En 1994 PDVSA en el marco del proyecto Análisis Geológico Integrado de las Cuencas de Barinas- Maracaibo, realizó un estudio gravimétrico y magnetométrico en el Occidente de Venezuela como apoyo para la elaboración del modelo geodinámico del área.

Con la recuperación de más de 30.000 estaciones gravimétricas y la compilación de un mapa magnético se procedió a realizar una secuencia de filtros digitales y se obtuvo una serie de mapas de anomalías gravimétricas de la cuenca occidental de Venezuela.

## 1.5 MÉTODO DE TRABAJO

El estudio se realizó en varias etapas. En la figura 1.2 se muestra un flujograma en el cual se indica detalladamente los pasos seguidos en el presente trabajo.

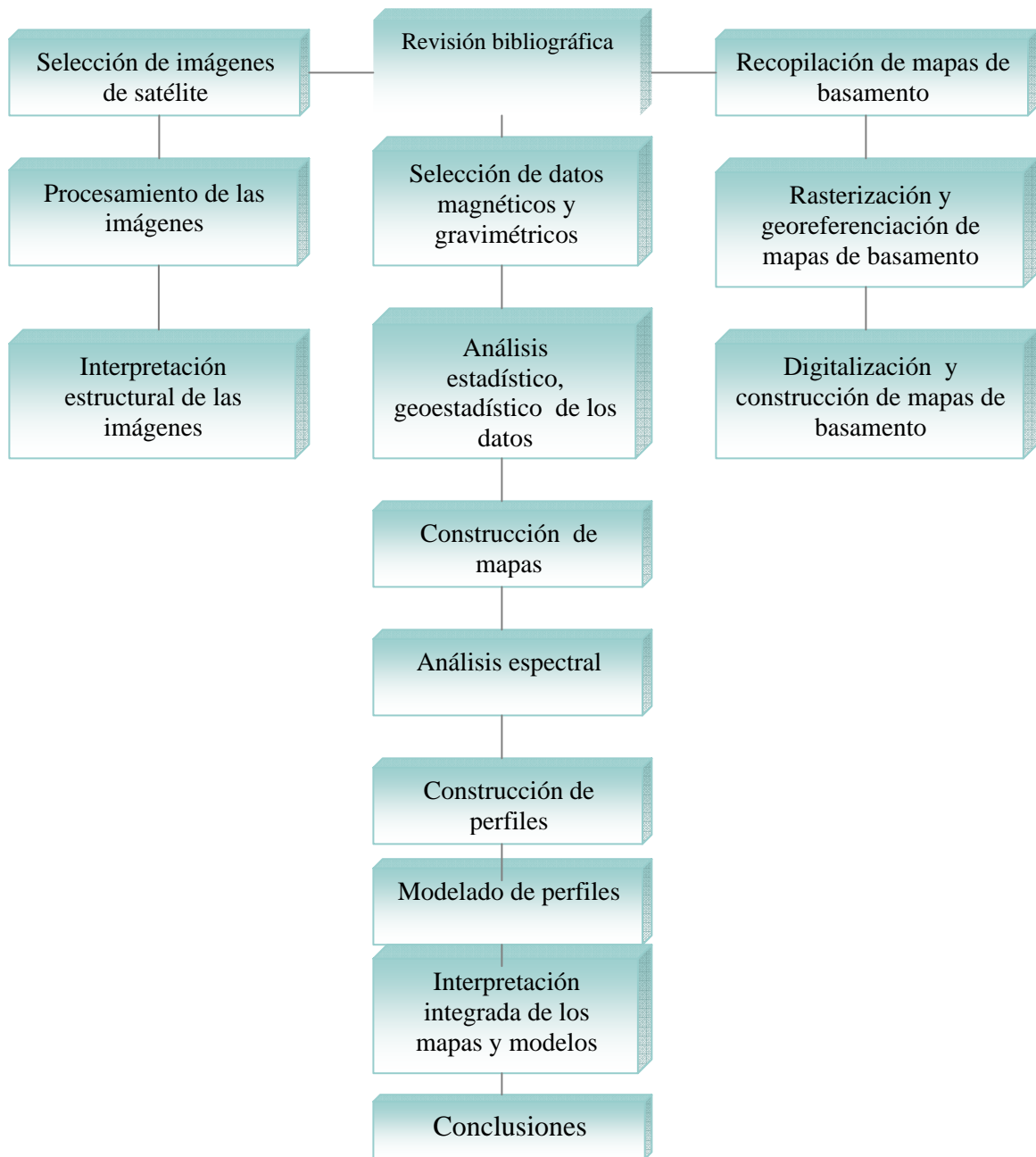


Figura 1.2 Flujograma de la metodología empleada

### **1.5.1 Revisión Bibliográfica**

Se realizó una revisión bibliográfica del origen y evolución de la Cuenca de Barinas-Apure, incluyendo marco estructural, tectónico y estratigráfico. En lo que respecta a estudios geofísicos, se contó con información de levantamientos anteriores de la misma área. Este tipo de información permite un mayor control a la hora de realizar la interpretación.

### **1.5.2 Selección de los Datos Gravimétricos y Magnéticos**

En el estudio gravimétrico se contó con información del Banco de Datos Potenciales de PDVSA INTEVEP; estos datos fueron procesados con una densidad de Bouguer de 2.3 g/cc. Para el estudio magnético se utilizó información correspondiente al levantamiento aeromagnético realizado por Geoterrex L.T.D entre 1981 y 1982, el cual se adquirió a una altura de vuelo única de 500 m sobre el nivel del mar. Ambos datos cuentan con sus correspondientes reducciones.

### **1.5.3 Selección de Imágenes de Satélite**

Con la finalidad de tener un mejor control de los eventos estructurales y geológicos en superficie de la cuenca Barinas-Apure a la hora de realizar la interpretación de los diferentes mapas, se seleccionó un conjunto de imágenes satelitales del área de estudio para su posterior procesamiento e interpretación. Para este trabajo se tomaron seis imágenes del satélite Landsat. Para el procesamiento e interpretación de las imágenes de satelitae se utilizaron los software ArcView v3.2 (Neuron Data) y Erdas Imagine v8.5 (Erdas).

Las imágenes seleccionadas resultaron ser las siguientes: 007/054, 006/054, 005/054, 007/055, 006/055 y 005/055, cuya ubicación espacial se pudo verificar en la figura 1.3.

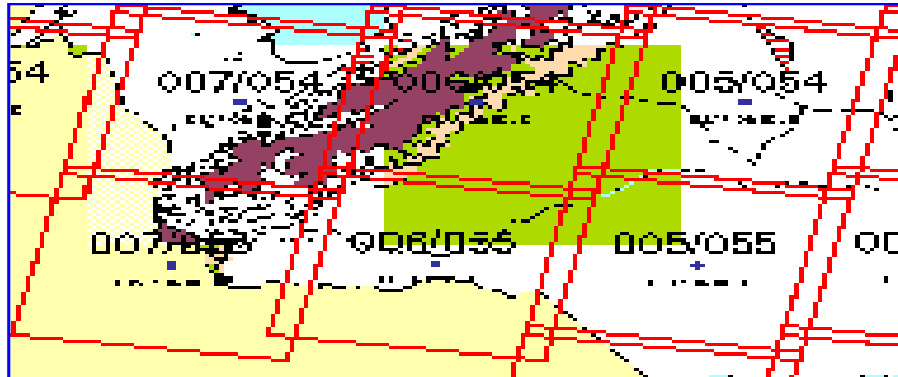


Figura 1.3 Ubicación de imágenes Landsat utilizadas. Path/Row Cobertura del satélite Landsat TM para Venezuela..

Antes de usar las imágenes se realizó una corrección radiométrica para su interpretación definitiva.

A continuación se explica detalladamente el procesamiento digital efectuado a las imágenes, para posteriormente realizar la interpretación geológica estructural de superficie.

### 1.5.3.1 Combinación Falso Color de Bandas Espectrales

Este procesamiento tiene como finalidad determinar la combinación de bandas más apropiadas según los objetivos del estudio, el cual es en nuestro caso es obtener un control estructural regional en superficie de la zona en estudio

En la figura 1.4 se muestra la imagen originalmente tomada sin el previo procesamiento.

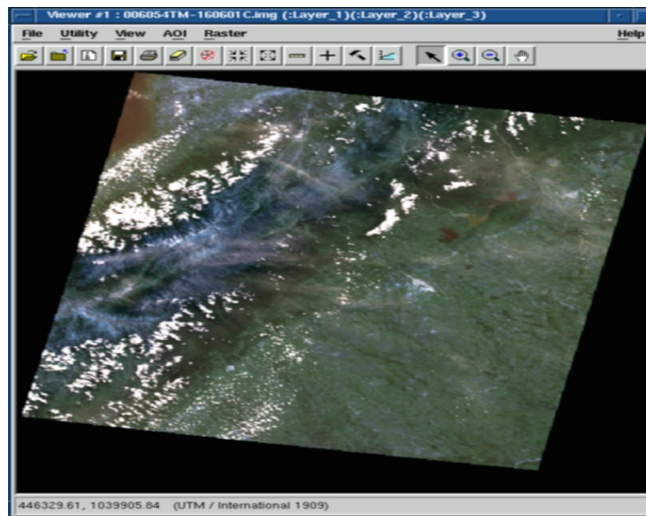


Figura 1.4 Bandas 1 (azul del visible), banda 2 (verde del espectro) y banda 3 (rojo del espectro). Imagen Landsat 007/054.

Después de haber realizado un análisis visual de las diferentes combinaciones de bandas, se seleccionó la combinación 453, las cuales representan el efecto ocasionado por el suelo, vegetación y agua (figura 1.5), dicha selección permite representar bien las estructuras, la discriminación se lleva a cabo mediante el análisis de tonalidades, texturas y aplicaciones propias del procesamiento.

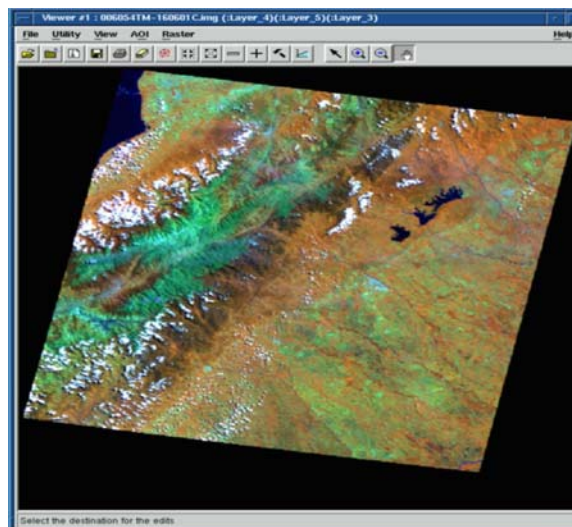


Figura 1.5 Bandas 4 (infrarrojo cercano), banda 5 (infrarrojo medio) y banda 3 (rojo del espectro). Imagen Landsat 007/054

### 1.5.3.2 Corrección Radiométrica (Realce de Contraste)

La corrección radiométrica se basó en la remoción del ruido existente en la imagen provocado por distorsiones en la atmósfera y problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor al momento de la captura. Esto se realizó con la finalidad de atenuar los niveles digitales y acercarlos a una recepción ideal.

Para el realce del contraste se aplicó el método de manipulación de histogramas. Este método consiste en una transformación no lineal que considera la distribución acumulativa de la imagen original, para generar un histograma que sea uniforme.

Para el caso de las imágenes satelitales Landsat, las cuales usan combinaciones de bandas, los histogramas se dividieron en los niveles RGB (rojo, verde y azul) y se obtuvo un histograma para cada color (figura 1.6).

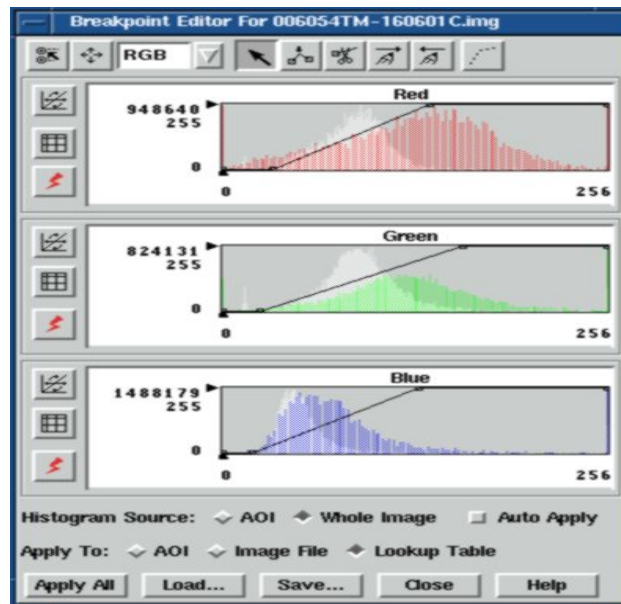


Figura 1.6 Histogramas ecualizados

### 1.5.3.3 Construcción de Mosaicos

Luego de realizado el proceso de asignación de bandas y realce de contraste a las imágenes seleccionadas, se procedió a elaborar el mosaico de las mismas (figura 1.7), el cual consistió en solapar los bordes hasta crear un solo conjunto.

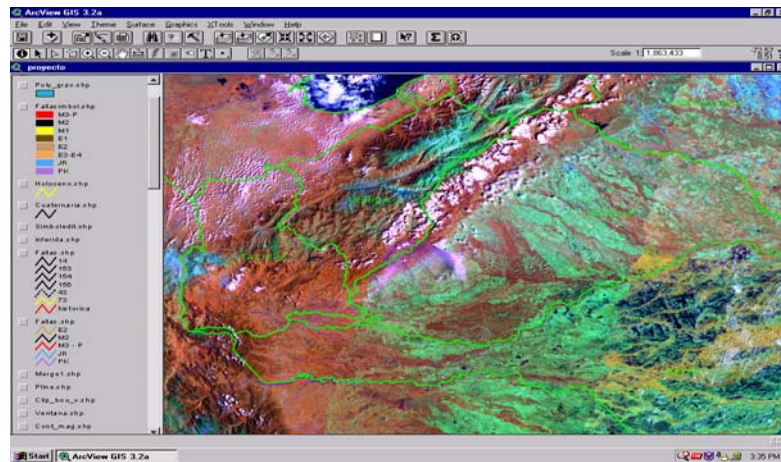


Figura 1.7 Mosaico creado con las 6 imágenes Landsat sin interpretar estructuras

### 1.5.3.4 Digitalización y Georeferenciación de Estructuras en Superficie

Para la interpretación estructural de la imagen de satélite LANDSAT, se contó con la ayuda del Mapa de fallas Cuaternarias de Venezuela, elaborado por Audemard (FUNVISIS, 2000). Como parte del Programa Internacional de la Litosfera. Principales fallas activas. La interpretación estructural se complemento con fallas y estructuras suministradas por el proyecto VIPA PDVSA (figura 1.8).



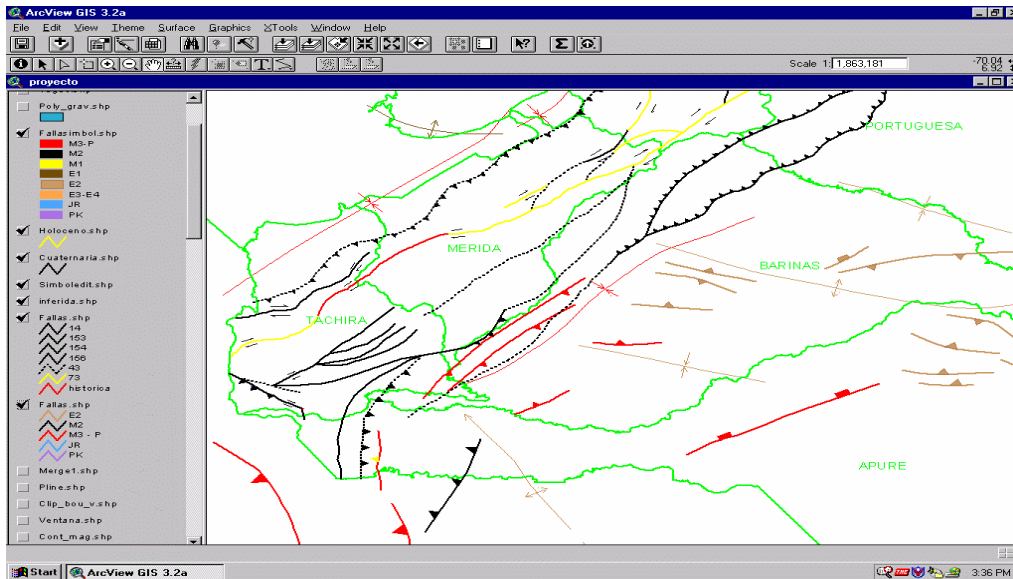


Figura 1.8 Mapa estructural obtenido a partir de la interpretación de la Imagen LANSAT complementado con información del proyecto VIPA 2002.

Siempre que se realiza un estudio integrado de datos geofísicos, es importante contar con un mapa geológico de la zona en estudio, y más si éste se encuentra georreferenciado a la misma escala de los mapas gravimétricos y magnéticos a analizar.

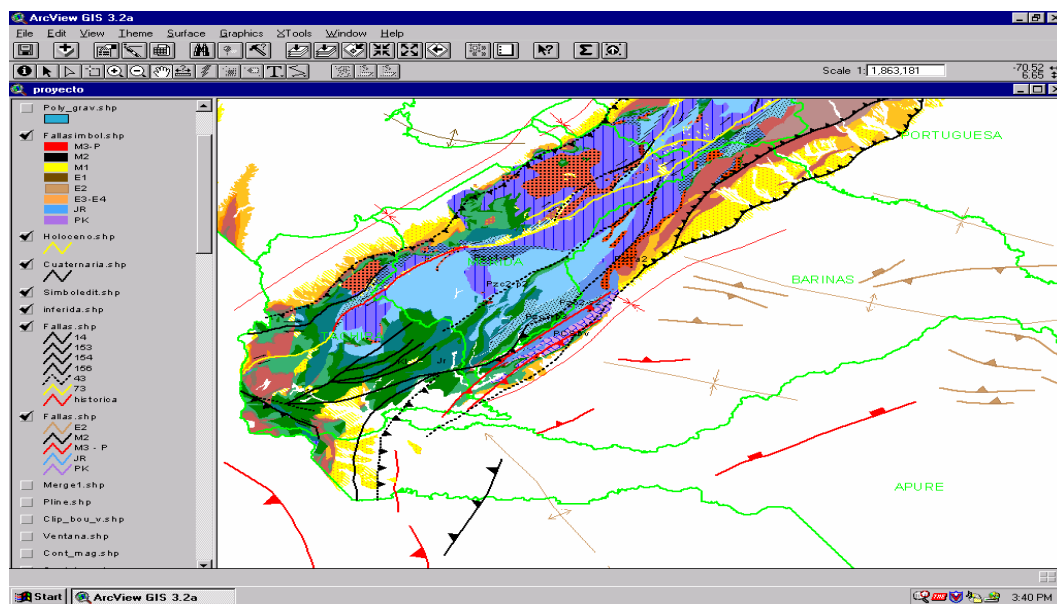


Figura 1.9 Mapa de geología de superficie CREOLE 1949, digitalizado por Adams Cpsulting S.A

El mapa de la figura 1.9 fue suministrado por PDVSA, digitalizado y llevado al código del programa ArcView por Adams Consulting S.A. Con la información geológica y estructural de superficie de la zona en estudio.

#### 1.5.4 Digitalización de Mapas de Basamento

Para tener mayor control de la ubicación de las estructuras que se interpretaron a nivel de basamento, se procedió a rasterizar y a digitalizar, un conjunto de 14 mapas a escala 1/100.000 de curvas de profundidad de basamento.

A continuación se presenta de manera detallada la metodología utilizada para la elaboración del mapa de profundidad de basamento.

1. Se rasterizaron 14 mapas a escala 1/100.000 de la cuenca Barinas-Apure (figura 1.10) denominados (interpretación sobrepuesta al mapa de contornos del gradiente vertical reducido al polo), elaborado por GEOTERREX LTD, 1981-1882.

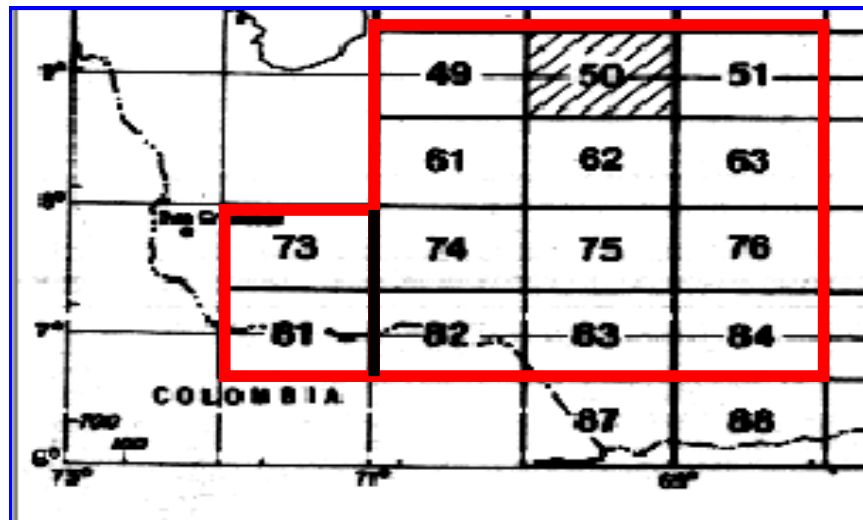


Figura 1.10 Representación esquemática de los mapas de basamento seleccionados.

2. Posterior a la selección se procedió a rasterizar cada mapa.

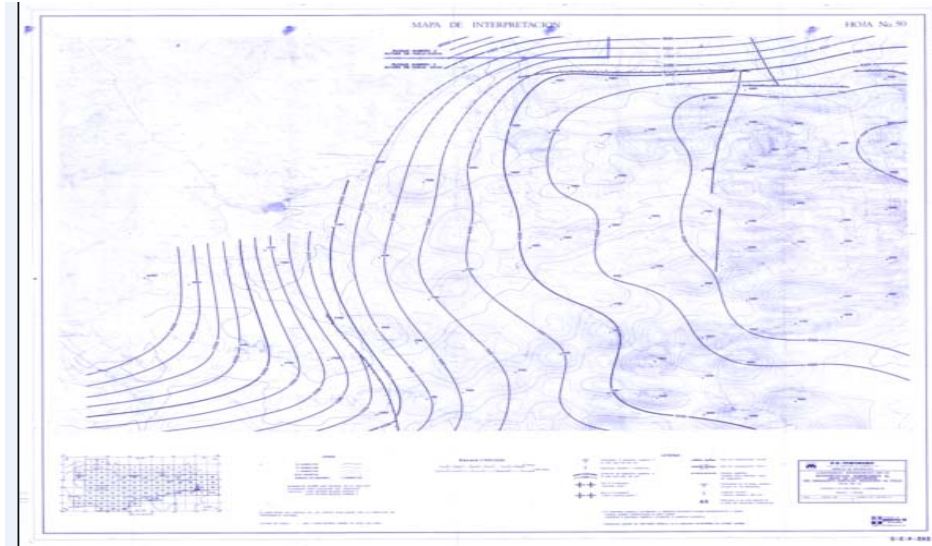


Figura 1.11 Mapa de interpretación de basamento. Hoja N° 50.

3. Luego se procedió a la georreferenciación de cada mapa (figura 1.12), con la ayuda del programa Erdas Imagine v.8; dicha georreferenciación consiste en una corrección geométrica por posicionamiento, en la cual se toman los vértices de cada mapa y se le asigna las coordenadas correspondientes, ya sea en coordenadas UTM o Geográficas.

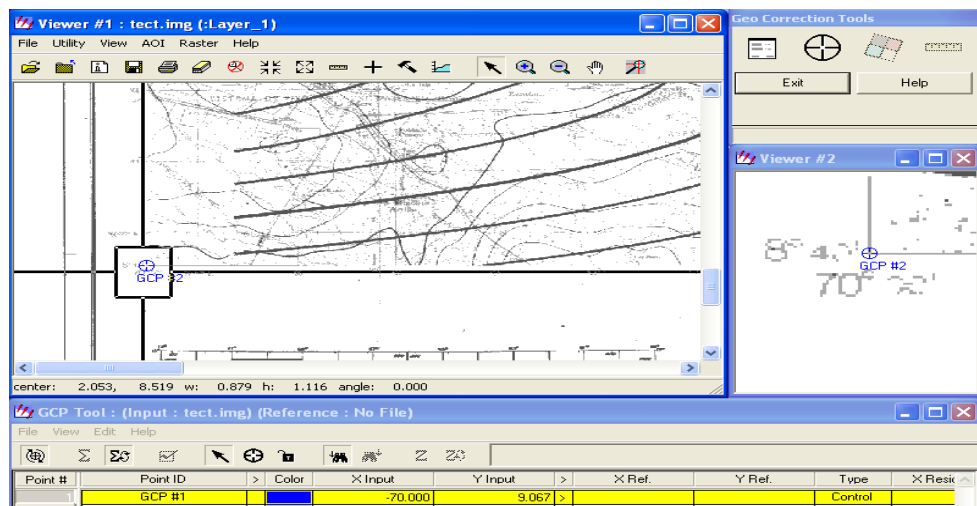


Figura 1.12 Georreferenciación de hoja N° 50 del mapa de contorno de basamento de la cuenca Barinas-Apure

- Una vez georreferenciados los mapas, se llevaron al programa ArcView, en el cual se inició la digitalización (figura 1.13).

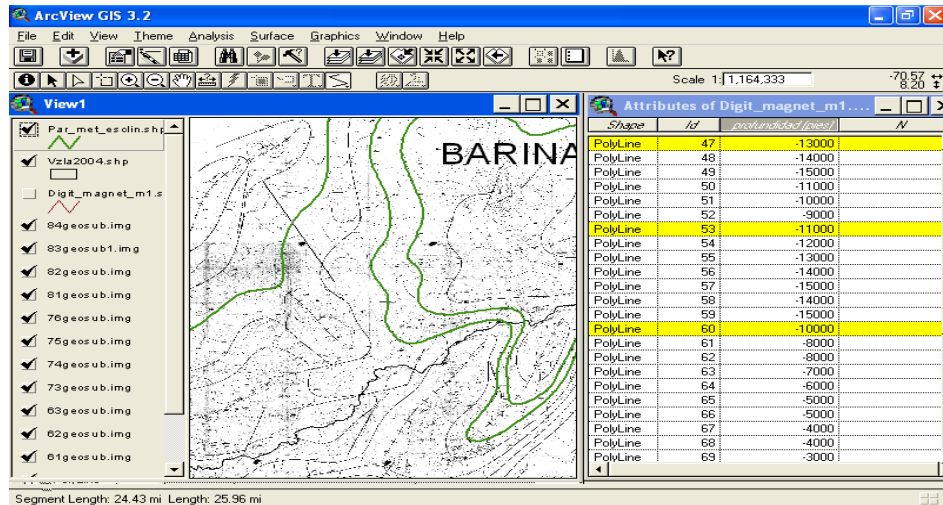


Figura 1.13 Digitalización de las líneas de basamento de los mapas elaborados por GEOTERREX LTD.

Obtenidas todas las líneas se procedió a la interpolación, agregando una escala de colores que permitiera diferenciar estructuras someras de las profundas (Este mapa se mostrará más adelante y se discutirá en el análisis de resultados).

### 1.5.5 Análisis Estadístico y Geoestadístico de los Datos

Con el fin de conocer en detalle la calidad cuantificada de los datos a estudiar, se realizó un análisis estadístico descriptivo, con la ayuda del software SPSS v.10.0 desarrollado por SPSS Inc. (1997). Este análisis consistió en el cálculo de medidas de tendencia central, desviación estándar, prueba de kolmogorov-Smirnov y el histograma de frecuencias. El análisis geoestadístico se efectuó con el fin de conocer la variación de los datos y su correlación espacial con la geología, a través del ajuste de variogramas. Este estudio se llevó a cabo utilizando el programa GRIDSTAT, versión 2003, el cual cuenta con variogramas y elipses de anisotropía derivados de la muestra.

### **1.5.6 Análisis Espectral**

Se realizó el cálculo de la profundidad del basamento, utilizando la estimación cuantitativa de la profundidad de la fuente. Esto consiste, en tomar el conjunto de datos de entrada en el dominio espacial y transformarlos al dominio de la frecuencia.

### **1.5.7 Construcción de Mapas**

En cuanto a la construcción de los mapas regionales y residuales, se contó con el programa GEOSOFT (1998), el cual suministró valores puntuales de latitud, longitud y diferentes anomalías, para posteriormente ser interpolados con el programa ArcView v.3. El método utilizado para la separación fue el de la continuación analítica del campo, éste se basa en determinada correspondencia del orden de las estructuras geológicas y de las anomalías que les corresponden. El objetivo fundamental de la transformación de las anomalías consiste en una más completa división del campo inicial observado en componentes en que cada una de ellas corresponda a fuentes de diferente naturaleza geológica.

### **1.5.8 Construcción del Perfil**

Como complemento para el control geológico, pero al nivel del subsuelo, se seleccionó un transecto regional con dirección NE T-11 (figura 1.14), el cual corresponde a una sísmica interpretada estructuralmente por PDVSA. Es importante acotar que el perfil trazado sobre este transecto es paralelo a las curvas isoanomalías de los mapas gravimétricos y magnéticos. Se escogió con esta dirección debido a que las estructuras a determinar en este trabajo son perpendiculares al perfil. Este transecto presenta el escenario geológico requerido para este Trabajo Especial de Grado.

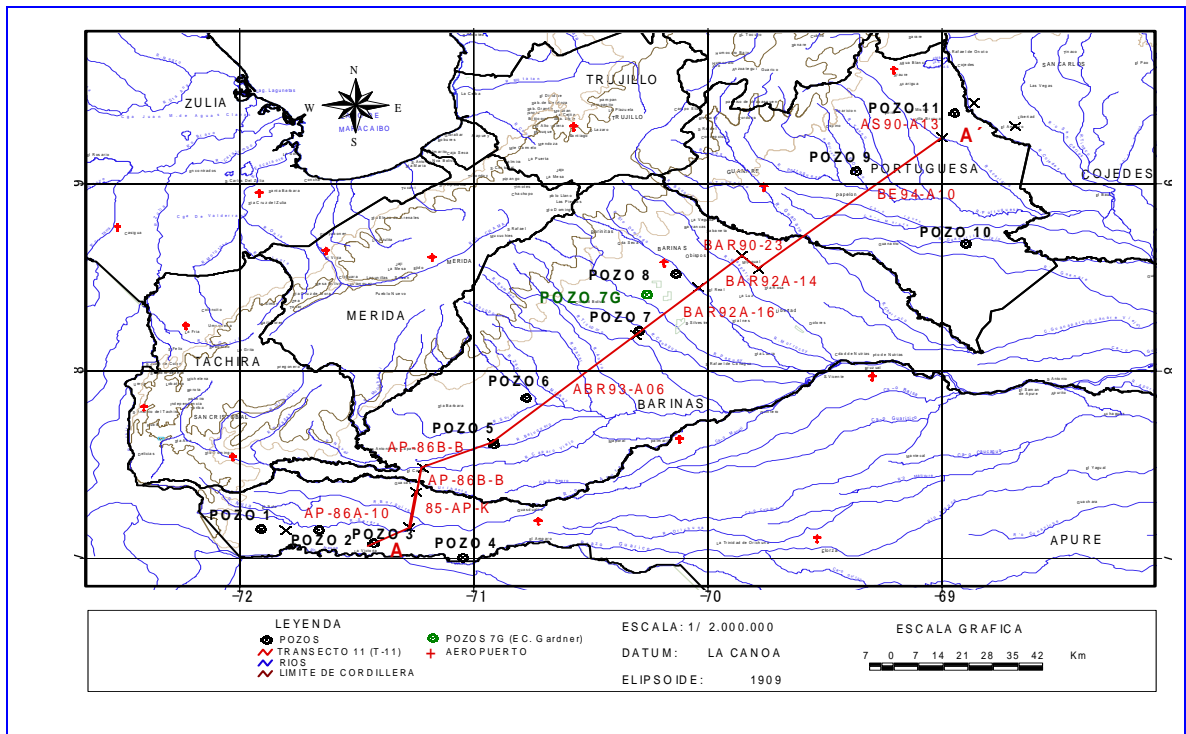


Figura 1.14 Ubicación del perfil NE-SW (T-11) utilizado en el modelaje y de los pozos suministrados por PDVSA

### 1.5.9 Modelado de Perfiles

Para la realización de los modelos gravimétricos y magnéticos, se utilizó el programa GM-SYS (Northwest Geophysical Associates, 1994) el cual permite calcular la respuesta gravimétrica y magnética que produce el modelo geológico propuesto. Este programa permite extender los modelos hacia el infinito o los acepta con sus dimensiones exactas.

## CAPÍTULO II MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La Cuenca Barinas-Apure es una extensión hacia el norte-noroeste de la cuenca subandina del Meta o también llamada Cuenca de los llanos Orientales Colombianos, con una extensión de 95000Km<sup>2</sup>. Sin embargo, algunos autores prefieren separar las dos cuencas por un alto estructural denominado Arco de Arauca. La cuenca está limitada por el escudo pre-cámbrico, los Arcos de Macarena, El Baúl y por la Cordillera Andina, y constituye la más septentrional de las cuencas subandinas.

### 2.2 Evolución Tectónica de la Cuenca Barinas – Apure

Existen diversas teorías y planteamientos acerca de la evolución tectónica del norte de Suramérica. Sin embargo, todos coinciden con la ruptura del continente durante el Jurásico y la formación de estructuras importantes que posteriormente influyeron en la formación de las cuencas venezolanas (figura 2.1). Por otra parte, DE TONI *et al.* (1995) y FIGUEROA *et al.* (1996) interpretan cronológicamente los diferentes eventos de deformación estructural de la Cuenca de Barinas-Apure.

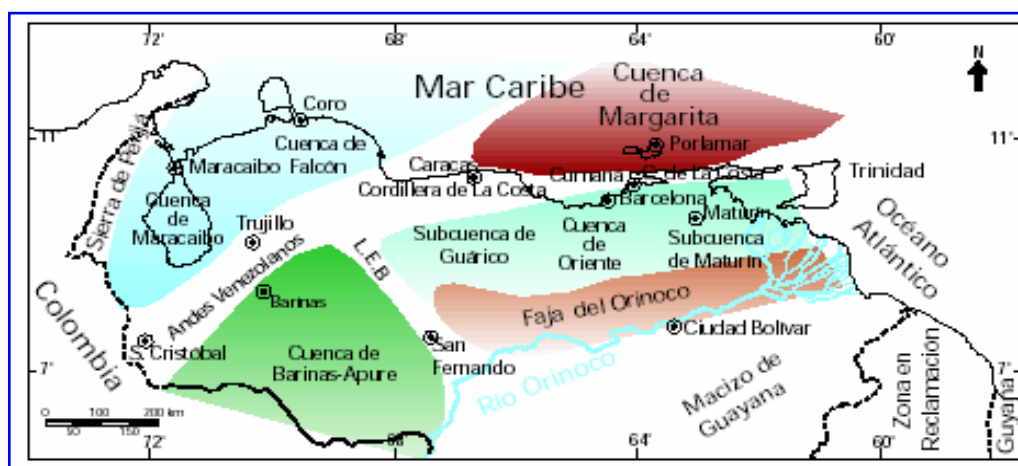


Figura 2.1. Mapa de distribución de las cuencas petrolíferas en Venezuela, basado en la distribución de sus provincias sedimentarias. Tomado de YORIS y OSTOS (1997).

### 2.2.1 Paleozoico

Durante el Paleozoico YORIS y OSTOS (1997) señalan que se reconoce una fase compresiva asociada a la acreción de terrenos en el continente Gondwana. Esta fase se evidencia por una serie de cinturones orogénicos emplazados, los cuales fueron suturados secuencialmente, a la cuenca autóctona del Paleozoico Inferior, durante el Ordovícico- Siluriano, el Carbonífero y a finales del Mesozoico hasta el presente (figura 2.2). Estos terrenos constituyen en gran parte el basamento de la cuenca Barinas-Apure.

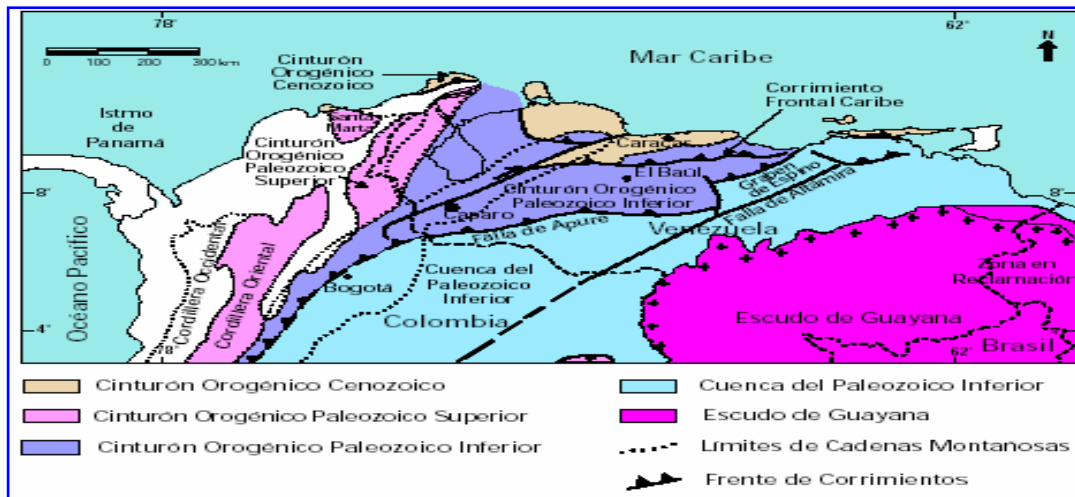


Figura.2.2. Mapa de distribución de los terrenos alóctonos en el norte de Sudamérica en los cuales hay rocas paleozoicas. Estos terrenos fueron suturados secuencialmente. Tomado de YORIS y OSTOS (1997).

### 2.2.2 Jurásico- Cretácico Temprano

Durante el Jurásico – Cretácico Temprano, se presenta la ruptura de Pangea, la cual trajo como consecuencia la generación de valles de extensión rellenos, sintectónicamente, por las formaciones La Quinta y Río Negro. OSTOS (1990) plantea que durante este evento, la separación entre la Placa Suramericana y los bloques Chortis, Oaxaca y Yucatán está relacionada con la apertura del Golfo de México o Proto-Caribe. AUDEMAR (1991) atribuye la sedimentación de la



Formación La Quinta a una cuenca “Antearco” y asocia ésta, con un período de subducción por debajo de la Cordillera Central Colombiana. FIGUEROA et al. (1996) indican como principal rasgo estructural, al norte de Venezuela, una fase distensiva asociada a la etapa del margen pasivo donde el fallamiento es predominantemente normal, con una orientación noreste-suroeste (figura 2.3).

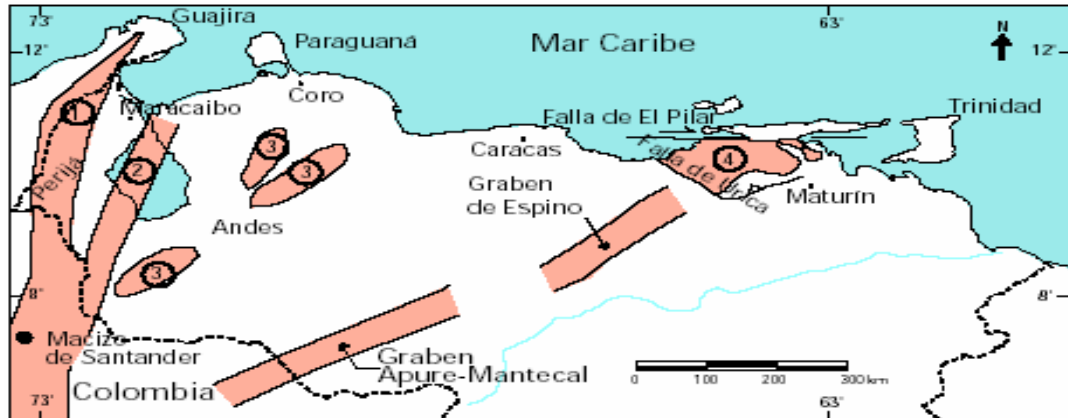


Figura 2.3. Distribución de las rocas de edad jurásica en Venezuela, mostrando que las mismas afloran en la Sierra de Perijá (1) como parte del basamento en el subsuelo de las cuencas de Maracaibo (2) Los Andes (3), en el subsuelo de la cuenca de Barinas y Oriental y han sido interpretadas como involucradas en profundidad, en los corrimientos de la Serranía del Interior. Tomado de YORIS Y OSTOS (1997).

### 2.2.3 Cretácico Medio – Tardío

OSTOS (1990) realizó una reconstrucción del norte de Sudamérica para el período Santoniense, en la que plantea la colisión del arco de islas del Caribe y el Bloque de Sebastopol, con la esquina noroeste de Suramérica, los cinturones fueron inicialmente sobrecorridos en el margen oeste-noroeste de la placa sur americana; pero debido al alto ángulo de oblicuidad en el borde de las placas, los cinturones fueron transportados transpresionalmente hacia el noreste. En el Eoceno Tardío el transporte tectónico hacia el noreste, de los cinturones tectónicos y de la placa Caribe cambió a un transporte hacia el este como consecuencia de la colisión de la placa Caribe con la Plataforma de Bahamas

#### 2.2.4 Paleoceno – Eoceno Medio

AUDEMARD (1991) señala que la interacción de los terrenos transpresionales, generaron por carga tectónica, el desarrollo de cuencas tipo antepaís, cuyas antefosas migraron hacia el este. Este autor señala también que el engrosamiento de las unidades se desplaza y se hace más joven, al este de Venezuela desde el Cretácico Tardío al presente. En este proceso estuvieron involucradas las cuencas de Maracaibo y Barinas en el occidente del país.

LUGO (1991) afirma que en este período se produce una deformación paulatina, permitiendo una colisión y posterior sutura de los terrenos asociados a la convergencia de la Placa del Caribe con el margen continental pasivo de Suramérica y cuya expresión más meridional lo constituyen las Napas de Lara. Dicha colisión fue diacrónica de sur a norte en el oeste de Venezuela, y de oeste a este en el norte de Venezuela (figura 2.4).

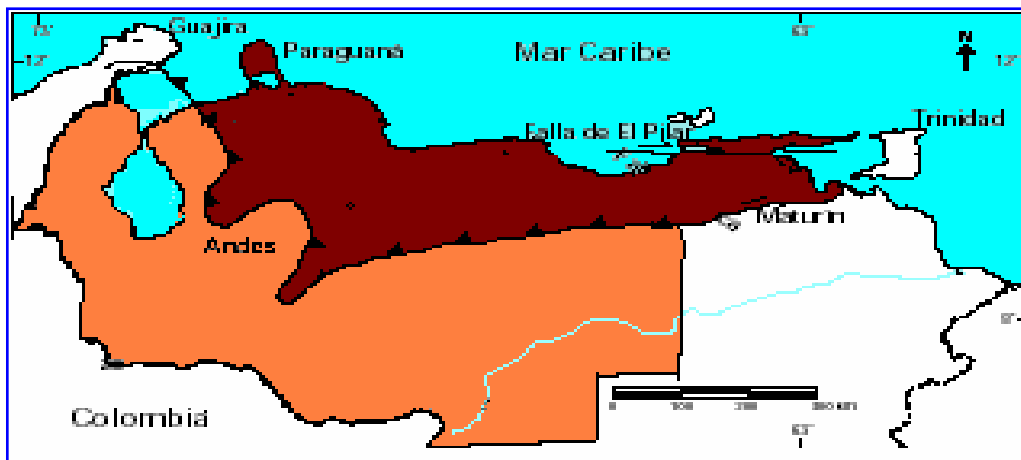


Figura 2.4. Avance de las Napas de Lara en Venezuela. Tomado de OSUNA (1990)

#### 2.2.5 Eoceno Tardío- Oligoceno

OSTOS (1990) resalta el desplazamiento del bloque Santa Marta-Maracaibo, hacia el norte a través de las fallas de Boconó y Santa Marta-Bucaramanga, en lo que se

conoce como tectónica de escape durante el Eoceno Tardío-Oligoceno. También señala la formación de cuencas extesionales, asociadas a transcurrencia, especialmente al norte de Falcón y de tipo antepaís (Barinas-Apure), evolucionando paulatinamente a medida que la placa del Caribe avanza hacia el este. Esto permite en el borde noroccidental de Venezuela la generación de extensas zonas positivas por la colisión del Arco de Panamá (figura 2.5).

DE TONI *et al.* (1995) señalan que el desplazamiento de las napas hacia el sur y la consecuente migración del frente de deformación generaron pliegues con vergencia hacia el sureste, asociados a corrimientos con despegues intra-Paguey. FIGUEROA *et al.* (1996) mencionan la existencia de una fase compresiva sur-sureste en el Eoceno Tardío, probablemente, asociada al último empuje de las Napas de Lara y al inicio del levantamiento de los Andes Orientales Colombianos. En este período se origina fallamiento inverso con orientación preferencial este-oeste, noreste-suroeste. LUGO (1991) menciona que el levantamiento de los Andes Venezolanos y la Sierra de Perijá es una consecuencia de la subducción Caribe-Nazca, e interpreta un período de transpresión que avanzó hacia el norte, a lo largo de las fallas de Icoatea - Pueblo Viejo. A medida que avanzaba la Placa del Caribe la influencia de los frentes de corrimiento se alejó.

### **2.2.6 Mioceno-Pleistoceno**

La generación de extensas áreas positivas durante el Oligoceno y finales del Mioceno (figura 2.5), constituyeron el Sistema de Montañas del Caribe y los Andes Venezolanos (OSTOS, 1990). LUGO (1991) señala la generación y reactivación de corrimientos con dirección norte-sur en la Sierra de Perijá, así como en el este y oeste de la Cuenca de Maracaibo. FIGUEROA *et al.* (1996) mencionan que durante esta fase orogénica, se reactivan e invierten estructuras preexistentes y la Cuenca Barinas-Apure adopta la configuración actual (figura 2.6). DE TONI *et al.* (1995) interpretan el sistema estructural de los Andes Venezolanos como corrimientos de basamento,

que se imbrincan en despegues profundos de la corteza, con transporte hacia el noroeste y retrocorrimentos menores con vergencia opuesta. Sin embargo, AUDEMARD (1991) los asocia con inversiones mayores de las fosas jurásicas.

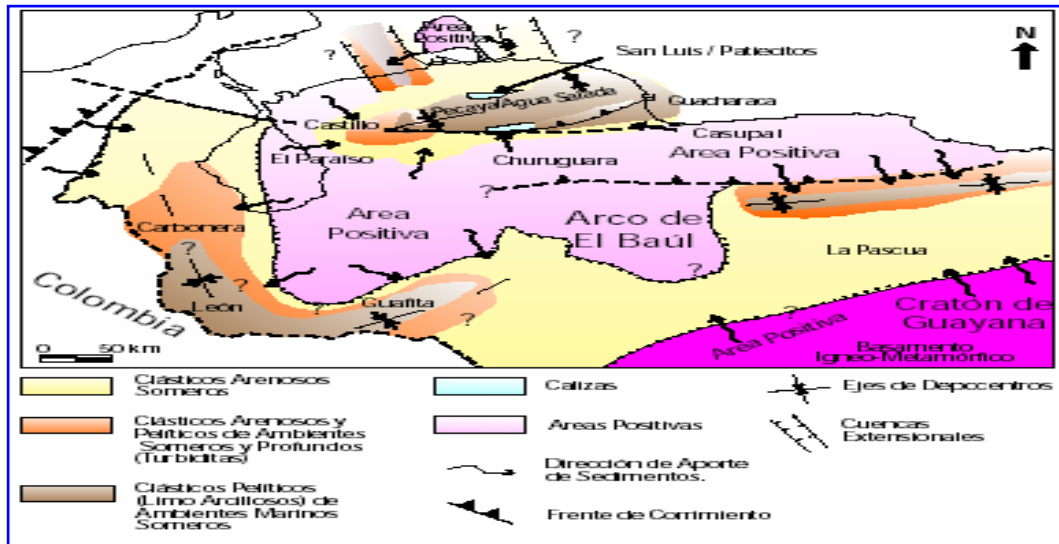


Figura 2.5 Formación de extensas áreas positivas y cuencas extensionales en el noroccidente de Venezuela. Tomado de YORIS y OSTOS (1997).

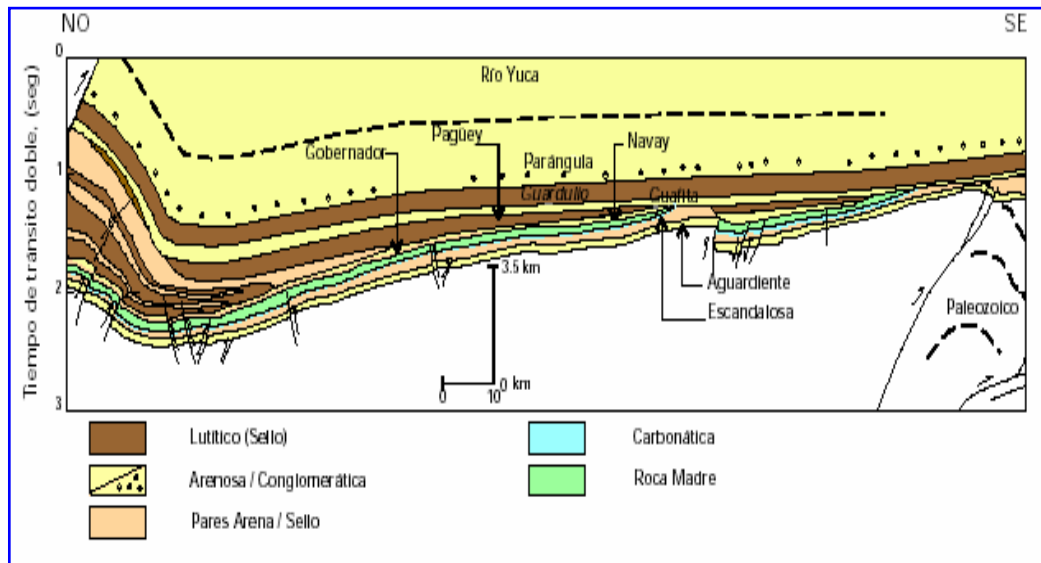


Figura 2.6. Sección NO-SE de la Cuenca de Barinas- Apure. Modificado de PARNAUD et al. (1995). Tomado de YORIS y OSTOS (1997).

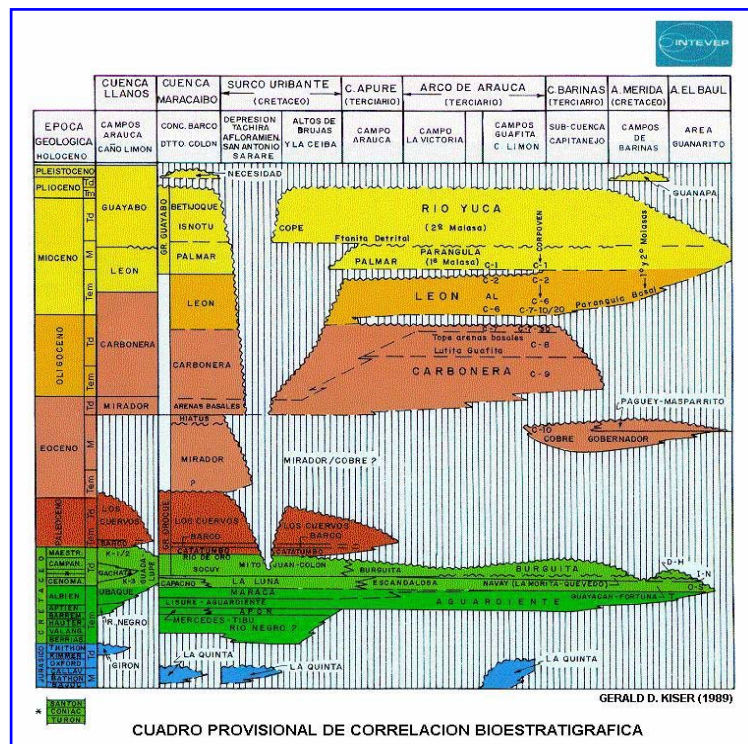


Figura 2.7. Cuadro de correlación estratigráfica, muestra las unidades presentes en la cuenca de Barinas-Apure y sus zonas aledañas. Tomado de KISER (1989), INTEVEP (1997).

### 2.3 ESTRATIGRAFÍA DE LA CUENCA BARINAS-APURE

Los sedimentos que conforman la Cuenca de Barinas-Apure poseen un rango de edad variable que se extiende desde el Jurásico hasta el Reciente. KISER (1989) realizó un cuadro de correlación estratigráfica donde señala cada una de las unidades que conforman la Cuenca de Barinas - Apure y sus alrededores (figura 2.7)

El basamento de la Cuenca de Barinas - Apure está constituido por rocas de edad Pérmico y Carbonífero, adosadas como parte de la historia de acreción del alóctono del Paleozoico Superior contra el Paleozoico Inferior (previamente suturado). Aquí se

reconocen rocas graníticas producto de la subducción bajo el borde norte de la Placa Suramericana (YORIS y OSTOS 1997). Las rocas paleozoicas ubicadas en el Flanco Surandino, como posible basamento, son los metasedimentos cuarzo-feldespático del Grupo Iglesias.

Como consecuencia de la fisura (rifting) de Pangea, y durante el Jurásico, se produjeron varias estructuras importantes, como valles de extensión o grábenes con orientación N-NE. OSTOS (1990) relaciona el periodo extensivo de los Andes con una Cuenca tipo “back-arc”. En el área andina esto trajo como consecuencia la depositación de capas rojas identificadas como la Formación La Quinta y descritas inicialmente por KUNDING (1938).

### **2.3.1 Formación Aguardiente**

Después de llenar los surcos de Uribante y Lara, la gran transgresión marina cretácica se extendió sobre la plataforma de lo que es hoy la Cuenca Barinas, depositando una secuencia uniforme de areniscas y calizas glauconíticas referidas a la Formación Aguardiente.

En el subsuelo de Barinas, las capas de la Formación Aguardiente se caracterizan por el predominio de calizas arenosas y areniscas epineríticas, intercaladas con algunas lutitas marinas oscuras. La formación tiende a volverse más oscura y localmente lignítica hacia el sureste, en dirección de la línea de playa se acuñan localmente sobre los arcos de Mérida y El Baúl en donde se vuelve más carbonática.

En los Andes, GARCIA JARPA *et al.* (1980) distinguen cinco facies litológicas de areniscas, carbonatos y lutitas dentro de la Formación Aguardiente. Las calizas son biostrómicas, grises a gris oscuras y azulosas, densas y piríticas. La arenisca es gris a gris oscuro, calcárea, glauconítica y localmente limosa. Hacia el sureste, es más masiva, de grano grueso, y característicamente carbonácea.

Las lutitas se presentan en láminas y capas delgadas, son grises, limosas, localmente calcáreas y son on más comunes en la parte inferior de la formación. Hacia la frontera con Colombia, en los campos Guafita, La Victoria, Caño Limón y La Yuca, la Formación Aguardiente se vuelve más arenosa y desaparece.

### **2.3.2 Formación Escandalosa**

La formación está compuesta por areniscas macizas, cuarzosas y muy glauconíticas, con cantidades menores de lutitas negras calcáreas. Las areniscas son de color gris, gris oscuro a marrón claro y verdoso, de grano fino a medio, bien escogidas, micáceas y carbonáceas. Se presentan en capas delgadas a masivas, con estratificación cruzada en las capas más gruesas. Las lutitas son gris oscuro, algo arenosas, calcáreas y carbonáceas. En el tope de la sección, se encuentra una caliza de unos 4 m de espesor, gris oscura, masiva, aura cristalina y coquinoidea, con manchas de dolomita microcristalina. Emite olor a petróleo al ser golpeada, y se ha correlacionado con la Caliza Guayacán del piedemonte andino (Kiser, 1989).

RENZ (1959) consideró la Formación Escandalosa como equivalente directo en una facie más arenácea de la Formación Capacho; los autores subsiguientes siguieron este criterio. KISER (1961) sugirió una equivalencia lateral con las formaciones Aguardiente, Apón y Capacho, posteriormente, este mismo autor la correlaciona con la Formación Capacho; y la parte inferior de la Formación La Luna, y acota que a su vez, equivale a la Caliza Fortuna o Miembro O, de la Mobil Oil Company, en el subsuelo de la Cuenca de Barinas. Según González de Juana *et al.* 1980, la Caliza Guayacán se correlaciona con la Caliza Infante de la Formación Tigre en la Subcuenca Guárico, y la Lutita "S" con el Miembro La Grita de la Formación La Luna en la Cuenca Maracaibo

### **2.3.3 Formación Gobernador**

La Formación Gobernador comprende las clásticas básicas, depositadas discordantemente encima del Cretáceo, por la transgresión marina que se inició en la Cuenca de Barinas en el Eoceno Medio. PIERCE (1960) describe a la formación con 80% de areniscas cuarzosas, a veces cuarcíticas, friables a bien endurecidas, color gris claro a pardo, manchadas por óxido de hierro cuando están meteorizadas, localmente conglomeráticas, en capas de espesor medio a grueso, y con estratificación cruzada. Tienen un 20% de intercalaciones de limolitas en colores claros, y laminaciones lutíticas carbonáceas gris oscuro a gris azulado. VON DER OSTEN (1966) dividió la formación en cuatro miembros, E-1 a E-4 en orden descendiente, cada miembro con características litológicas y eléctricas distintivas: el E-4 consiste en alteraciones de dos tipos de arenisca: una blanca de grano fino, con delgadas láminas carbonáceas y convolutas y lentes de arena más oscura y de grano más grueso y, esporádicamente, lutitas gris oscuro y delgadas, fosilíferas y calizas. La matriz es comúnmente arcillosa, y se encuentra en grietas. El segundo tipo de arenisca es blanca, de grano fino, homogénea, sacaroidea, subangular; pasa lateralmente a arenisca parda clara de grano medio; las porosidades de ambos tipos son buenas.

El miembro E-3 se compone predominantemente del segundo tipo de arenisca, y el E-2 del primer tipo.

El E-1, aproximadamente la mitad de la formación, se compone de arenisca blanca a amarillenta, de grano medio a grueso, friable a bien endurecida, angular a subangular. Contiene tubos de gusanos, lentes conglomeráticos y cambios bruscos en el tamaño del grano. Los conglomerados predominan en la base del miembro; su porosidad es excelente.



SCHUBERT (1986) describe la Formación Gobernador del área de Santo Domingo, como capas macizas muy espesas de arenisca de colores gris oscuro, negro, marrón o rosado, de grano fino a grueso, localmente conglomeráticas, redondeado a subredondeado, generalmente de cuarzo lechoso, con óxido de hierro intersticial. Tiene buena compactación y estratificación cruzada, con láminas finas carbonáceas de color negro. Los moldes de carga son comunes, y los tubos de gusano ocurren en la base de la formación.

#### **2.4 ESTRUCTURAS DE BASAMENTO (lineaciones)**

PORTILLA (1988) establece que los lineamientos estructurales con dirección noroeste, Arco de Mérida y Arauca (Figura N° 2.8), tienen relación con la interacción con la Placa del Pacífico ya que las depresiones sedimentarias en el borde pacífico se conocen desde el Cretácico Inferior (Surco de Uribante) y evolucionan hasta construir un elemento positivo a comienzos del Paleoceno. CHIGNE (1985) menciona que la orogénesis andina generó estructuras que quedaron superpuestas o reactivaron a las antiguas, dando lugar a rasgos estructurales combinados, y que durante el levantamiento Andino se generaron fosas tectónicas adyacentes que se rellenaron con sedimentos molásicos y las dos fosas más pronunciadas adyacentes a Barinas-Apure fueron la de Arauca y Capitanejo que se formaron entre elementos estructurales pre-andinos.

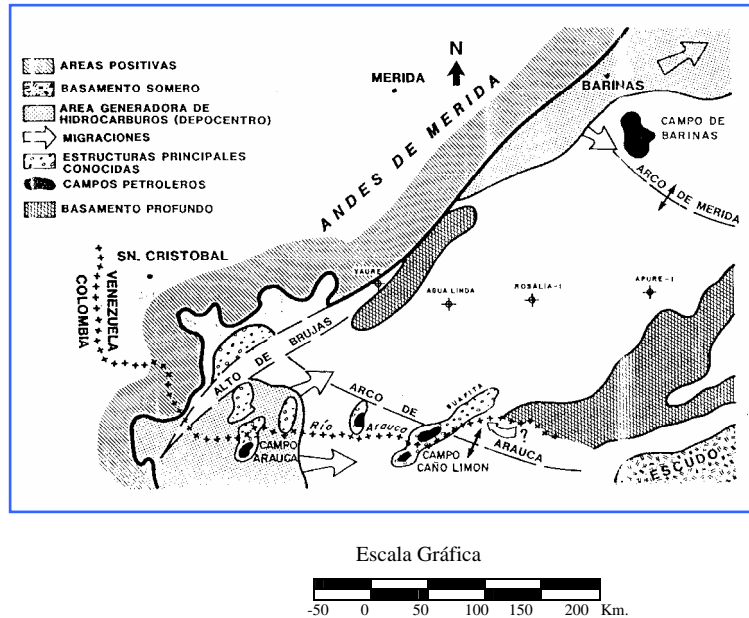


Figura 2.8. Estructuras mayores del Basamento, basadas en geología, sísmica y aeromagnetismo. Tomado de KISER (1988).

#### 2.4.1 Arco de Mérida

Según GONZÁLEZ DE JUANA *et al.* (1980), los cambios paleogeográficos ocurridos al final del Pérmico, como consecuencia de la Orogénesis Herciniana, determinaron la elevación del borde septentrional del Escudo de Guayana y en consecuencia, la retirada de los mares hacia el norte en casi toda Venezuela y se produce por vez primera, la elevación del núcleo precámbrico-paleozoico de la Cordillera de Los Andes. Dentro de la cadena, destaca la presencia de una estructura transversal al Orógeno, conocida como el Arco de Mérida, que en épocas posteriores constituyó un elemento paleogeográfico de gran importancia, al influir en el desarrollo de la sedimentación durante el Mesozoico y el Terciario Inferior. En el flanco surandino, KUNDING (1938) identifica un basamento de rocas metamórficas pre-ordovícicas asignadas a la Formación Bellavista, que constituye el Macizo Colorado y sedimentitas del Ordovícico Medio, del grupo Caparo.

LUGO (1994) establece que el Arco de Mérida representa una cadena montañosa, pre-Pensilvaniana y de orientación noroeste-sureste, constituida esencialmente por metasedimentos pelágicos de la Formación Mucuchachi, y por lo tanto sería parte del basamento de la secuencia sedimentaria que rellena las Cuencas de Maracaibo y Barinas; el basamento incluye rocas del Precámbrico, Paleozoico y continentales del Mesozoico temprano. Este autor también menciona que el Arco de Mérida controló la ubicación de los surcos de Machiques, Táchira y Barquisimeto ( Trujillo), así como los desarrollados en la Cuenca de Maracaibo, durante el Mesozoico Temprano. El Arco de Mérida impidió el avance de los corrimientos de Lara de vergencia sureste, durante el Paleoceno-Eoceno Temprano y obligó a los mismos a reorientarse paralelos a esta estructura.

BELLIZZIA y PIMENTEL (1994) denominan al Arco de Mérida como Arco de Barinas, la cual es una estructura joven de relieve moderado, cortada por fallas normales de orientación este-noreste, oeste-suroeste, que afectan toda la secuencia sedimentaria comprendida entre el basamento y la Formación Paguey de edad Eoceno medio y por lo tanto su estructura es post-Eoceno-pre molasas neógenas.

FIGUEROA *et al.* (1994) consideran que las acumulaciones de hidrocarburos en la Cuenca, están asociadas a estructuras originadas en las dos primeras fases compresivas del Cretácico Tardío-Eoceno Temprano y del Eoceno Medio, respectivamente, procesos en los cuales se desarrollaron fallas normales e inversas en dirección noroeste-sureste. En la fase compresiva del Mioceno Medio-Reciente se invierten las estructuras pre-existentes y la cuenca adquiere su configuración actual; es decir, que la Cuenca de Barinas se desarrolla durante el Mesozoico-Cenozoico y por lo tanto, no existe ningún Arco o dorsal del Paleozoico que se corresponda con el llamado “Arco de Mérida”.

YOUNG (1985), sobre la base de interpretaciones de levantamientos aeromagnéticos y sísmicos y de datos de pozos, pone de relieve que el “Alto de Mérida”, termina contra la Fosa de Barinas y por lo tanto no penetra el Orógeno Andino.

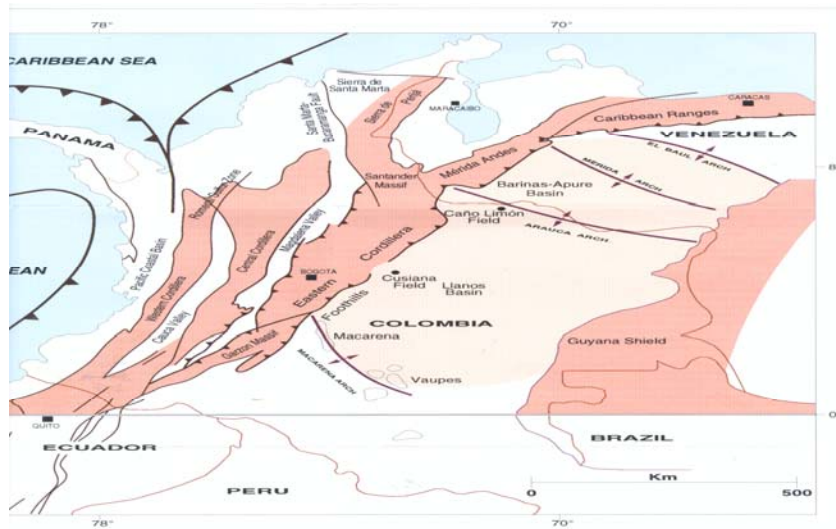


Figura 2.9 Elementos Tectonicos del Nor-Oeste de Sur-America, Venezuela y Colombia. Modificado por DENGO y COVEY (1993).

#### 2.4.2 Arco de Arauca

KISER (1988) lo ha definido como un alineamiento estructural con dirección oeste-noroeste que atraviesa los campos Guafita y La Victoria, el cual no se ha reportado hacia la zona de afloramientos. CHIGNE (1985) menciona que este arco ha actuado como barrera para el desarrollo de facies sedimentarias del Terciario y por lo tanto se presenta un acuífamiento erosional del Eoceno al norte de los campos Guafita-La Victoria que pudo servir de barrera de migración a los hidrocarburos. BASS (1988) se refiere al alto de Arauca como una serie de anticlinales distribuidos en dirección aproximada este-oeste de edad pre-Terciaria entre La Victoria y Guasdalito. OSUNA (1990) estima que se trata de un paleorrelieve muy suave durante la sedimentación

Terciaria pero no actuó como arco en sentido estricto, sino más bien lo considera como una prominencia del escudo, pues no tiene continuidad hacia Los Andes, por otro lado establece que la orogénesis al final del Cretáceo causó una regresión de los mares hacia el norte y se levantan los Arcos de Mérida, el Baúl y el Arco de Arauca.

El arco de Arauca se considera como una digitación del escudo o dorsal tectónica cuyo eje es casi perpendicular a Los Andes (CHIGNE,1985) este autor establece a través de información sísmica, que el Arco tiene una orientación N 40° O tomando como referencia el área de Guafita, su extremo norte podría estar asociado al Macizo Colorado o también penetrar directamente en el sector noroccidental contra el Alto de Brujas y menciona que hacia el sur el Arco se extiende contra el Escudo de Guayana, aunque su relación con el escudo y su ubicación en el sur aún no están claramente definidas; este autor considera que el arco de Arauca es un elemento tectónico que a partir del Terciario inferior separó las Cuencas de Barinas y de los llanos colombianos y que en ambos flancos del Arco se acuñan o truncan capas, tanto de la misma como de diferentes edades. Por último este autor estima que el Arco juega un papel importante en la sedimentación de formaciones y distribución de facies sedimentarias terciarias.

En el sector suroriental de Apure y sobre el Arco de Arauca se ha encontrado la secuencia Carbonera-Mirador. Es probable que el eje del Arco de Arauca pudo haberse desplazado a partir del Mioceno hacia el sur hasta su posición actual, debido a que la sección oligo - miocena identificada parece extenderse contra el flanco norte del Arco de Arauca.

A fines del Mioceno se inicia el levantamiento de Los Andes y la consecuente sedimentación post-orogénica de la molasa que alcanza sus depocentros al pié de Los Andes y en los flancos de los arcos. Los movimientos orogénicos y el continuo aporte de estos potentes depósitos molásicos permitieron la máxima evolución de los Arcos y la configuración actual que presentan las Cuencas de los llanos y Barinas.

## **2.5 SISTEMA DE FALLAS DE APURE**

OSUNA (1990) deduce que muchas de estas fallas son de edad pre-terciaria y algunas tienen poca extensión como la falla de la victoria, mientras que otras son más extensas y presentan evidentes cambios de rumbo como la falla de Guafita, haciendo suponer que existen elementos estructurales paleozoicos que influyeron en el desarrollo de las estructuras al final del cretácico.

En concordancia con esto, la falla de Guafita sigue una dirección que coincide con el borde norte del Graben de San Fernando y las fallas de la Victoria, Sanare y El Nula-Cutufito son fallas de extensión limitada que terminan en el flanco oeste del Arco de Arauca. Debido a lo expuesto anteriormente, este autor estima que algunas fallas son de edad pre-terciaria y que de acuerdo a su tendencia y extensión, están relacionadas con estructuras pre-cretácicas. La orogénesis Mio-Pliocena reactivó las antiguas fallas y produjo nuevas estructuras en el Terciario. Sin embargo, otras estructuras de la Cuenca como la de Cutufito parecen haber evolucionado totalmente durante la orogénesis andina ya que tanto el cretácico como el Terciario presentan la misma conformación estructural.

## CAPÍTULO III

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE SENSORES REMOTOS, MÉTODO GRAVIMÉTRICO Y MAGNÉTICO.

#### 3.1 SENSORES REMOTOS

Desde el momento que se lanzó el primer satélite con fines de observación de la Tierra, emergió un gran interés de la parte científica en la exploración remota utilizando las imágenes que eran obtenidas por dichos satélites. La exploración comenzó a realizarse con fines ambientales, forestales, de exploración minera y petrolera entre otros.

En el proceso de exploración de hidrocarburo hay dos etapas que están directamente relacionadas con la tecnología satelital. La primera, *Reconocimiento Regional*: Cuyo objetivo es la determinación de cuencas sedimentarias. Se pueden utilizar mosaicos a escalas pequeñas de Landsat o Radar alternativamente en conjunto. La segunda, *Interpretación detallada usando sensores remotos*: Es aquí donde la interpretación detallada en la búsqueda de lineamientos, trampas estructurales y definición de litología es permitida a través de la utilización de imágenes Landsat TM o ETM.

#### 3.1.2 Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético es un arreglo ordenado de la Radiación Electromagnética, de acuerdo a la longitud de onda y/o frecuencia. En la tabla 3.1 se muestran las frecuencias de cada región del espectro y en la figura 3.1 se presentan las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

Región del espectro	Intervalo de frecuencias (Hz)
Radio – microondas	$0 - 3.0 \times 10^{12}$
Infrarrojo	$3.0 \times 10^{12} - 4.6 \times 10^{14}$
Luz visible	$4.6 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$
Ultravioleta	$7.5 \times 10^{14} - 6.0 \times 10^{16}$
Rayos X	$6.0 \times 10^{16} - 1.0 \times 10^{20}$
Radiación gamma	$1.0 \times 10^{20} - \dots\dots$

Tabla 3.1. Intervalos de frecuencias en las distintas regiones del espectro

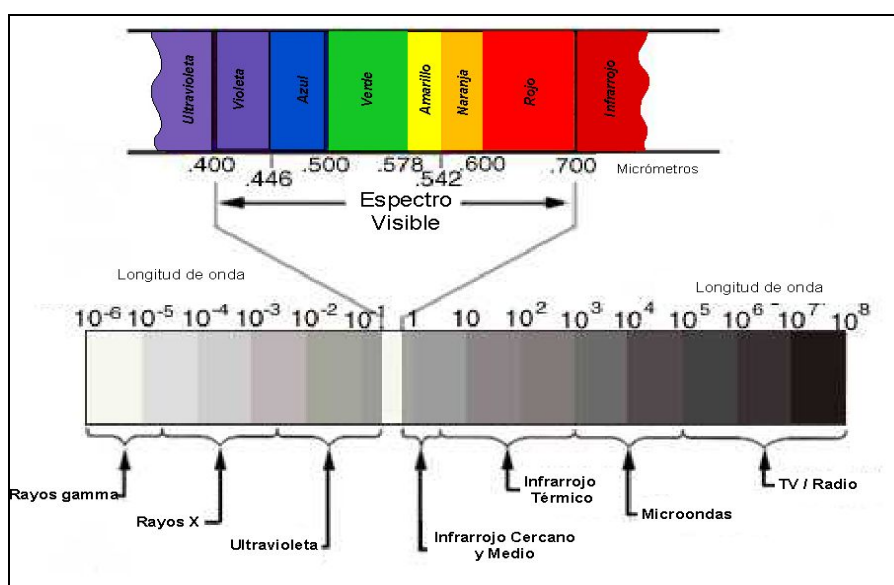


Figura 3.1. Espectro electromagnético

Las imágenes Landsat son obtenidas en la región óptica del espectro electromagnético. Estas imágenes una vez adquiridas, sugieren de un previo procesamiento numérico.

### 3.1.3 Procesamiento Digital de Imágenes

El principal objetivo del procesamiento digital de imágenes en general, ya sea imagen óptica tipo Landsat o Radar, es manipular y analizar los datos de las imágenes generadas por los sensores remotos.



Este incluye una serie de procedimientos que permiten la extracción de información de las imágenes satelitales. El procesamiento varía de acuerdo a la imagen a analizar, que incluyen el formato, las condiciones iniciales de la imagen, la escena, entre otros.

Una imagen en formato digital consta de píxeles (celdas), los cuales se encuentran dispuestos en filas y columnas. La posición de cada píxel es determinada por un sistema de coordenadas XY. Cada píxel tiene un valor numérico llamado número digital o nivel digital, que registra la intensidad de energía electromagnética medida para la celda de resolución de la Tierra representada por dicho píxel, los niveles digitales van de cero a 255 que, en la mayoría de los casos son representados por una escala de grises.

En el caso particular de la imagen de satélite Landsat, se debe realizar una serie de correcciones para su interpretación definitiva. Entre éstas se encuentran las correcciones radiométricas, las atmosféricas y geométricas ó georeferencia espacial.

#### **3.1.4 Efecto de la Atmósfera en una Imagen de Satélite**

Las distorsiones provocadas por la atmósfera son producidas debido a que los elementos atmosféricos causan un cambio en la radiación original que proviene de la superficie terrestre. Uno de los efectos es el de dispersión (provocado por aerosoles, gases y vapor de agua); esto implica un aumento en la señal recibida por el sensor. Este efecto es más sensible en longitudes de onda corta por la escasa variación en el comportamiento radiométrico (Chuvieco, 1990).

#### **3.1.5 Corrección Radiométrica**

Las correcciones radiométricas se refieren a la remoción o disminución de las distorsiones en el grado de energía electromagnética registrada por cada detector. Estas correcciones engloban las distorsiones provocadas por la atmósfera, al igual que los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor. Existen

varios agentes que distorsionan los valores de cada celda en la imagen. Las distorsiones más comunes a las cuales se les puede realizar corrección son: cuando se tienen valores uniformemente elevados por la neblina atmosférica.

### **3.1.6 Realce de Contraste**

El realce de contraste es una técnica que tiene como objetivo mejorar la calidad de las imágenes bajo los criterios subjetivos del ojo humano. Normalmente, esta técnica es utilizada como una etapa de pre-procesamiento para sistemas de reconocimiento de patrones. El contraste entre dos objetos puede ser definido como la razón entre sus niveles de gris medios. La manipulación de contraste consiste en una transferencia radiométrica en cada "píxel" con el objetivo de aumentar la discriminación visual entre los objetos presentes en la imagen. La operación es realizada punto a punto, independientemente de la vecindad. Esta transferencia radiométrica es realizada con ayuda de histogramas, que son manipulados para obtener el realce deseado. Dicha manipulación depende, en gran parte, de lo que se esté buscando resaltar en la imagen, es decir el objeto del estudio. Se realiza la manipulación de histogramas para cada una de las bandas que se estén usando. El realce de contraste se clasifica en lineal, mínimo, máximo.

### **3.1.7 Histograma Lineal**

El histograma lineal consiste en una representación gráfica de los niveles digitales de cada píxel de la imagen en los cuales se encuentra la información de la intensidad de energía electromagnética, estos niveles son graficados tanto en el eje x como el y. Esta representación se aplica a imágenes que se basan en combinaciones de bandas.

La función de transferencia es una recta y sólo son controlados los parámetros de inclinación de la recta y el punto de intersección con el eje x, donde la inclinación controla la cantidad de aumento de contraste (figuras 3.2)

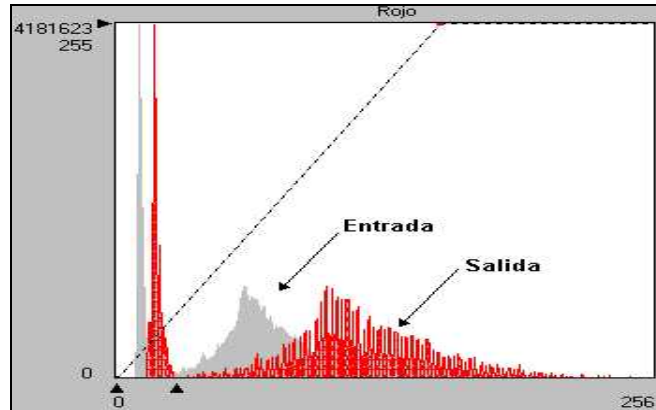


Figura 3.2. Histograma lineal (ESRI, 1997).

La imagen landsat está compuesta por 7 bandas. Sin embargo, en el computador sólo se pueden representar simultáneamente 3, los cuales comprenden los niveles RGB. Por lo que es necesario un ensayo con las combinaciones apropiadas según el estudio a realizar.

Las combinaciones posibles entre bandas en el sistema Landsat TM alcanzan a 210, cada una de ellas tiene sus particularidades y sus ventajas. Cada intérprete de imágenes tiene sus preferencias y reconoce propiedades, a veces de forma subjetiva, a algunas fórmulas establecidas.

Con el tiempo el uso de la banda 7 ha ido ganando su espacio en la exploración geológica, especialmente, en terrenos desérticos. Alguna de las combinaciones RGB más comunes son 7-4-1, 7-5-3, 7-5-2, 7-4-3, 7-4-2, las cuales representan bien las estructuras y diferentes litologías geológicas. La discriminación litológica se lleva a cabo mediante el análisis de tonalidades, texturas y aplicaciones propias del

procesamiento. En la imagen también se resaltan muy claramente los lineamientos estructurales en el área. En superficies con alto dominio de vegetación se han usado las siguientes combinaciones 4-3-2, 5-3-2, 7-3-2 y 4-5-3.

En la tabla 3.2 se muestran otras combinaciones de bandas comúnmente usadas.

Combinación de Bandas	Observaciones
321	Aproximadamente color natural. Útil para ser usada por personas no familiarizadas con falso color., pero de mucho menor contenido de información geológica que la presentación en falso color. No recomendable para imágenes de invierno y pleno verano, pero para imágenes de primavera y otoño puede ser útil.
234	Falso color infrarrojo. Esta es la misma presentación de color que la película infrarroja o la combinación del sistema MSS 4, 5, 7. Es recomendable para todo uso. Muestra variaciones en la cobertura vegetal, caminos y carreteras, cuerpos de agua y rocas.
345	Esta combinación, denominada RIS1 por rojo – infrarrojo – SWIR1, es apropiada para estudios de humedad del suelo y para la clasificación de los tipos de bosque.
145	Discrimina los tipos de rocas en suelos carentes de vegetación. Recomendable para fines geológicos.

Tabla 3.2 Combinaciones de bandas y aplicaciones

### 3.2 SATÉLITE LANDSAT MT

El satélite Landsat realiza su órbita con una inclinación de 99° con respecto al meridiano, a una altura de 917 km y circunda la Tierra cada 103 minutos. En un día realiza 14 órbitas para volver sobre la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días (Chuvieco, 1990).

Es importante acotar que debido a que cada imagen se toma en tiempos diferentes, ellas son afectadas en forma diferentes por las condiciones atmosféricas, ya que la absorción y la respuesta electromagnética varía.

### **3.3 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

Para poder trabajar en la interpretación de las imágenes se requiere de una herramienta de visualización. Un Sistema de Información Geográfica permite dicha labor, la cual consiste en una herramienta informática de gestión y análisis integral de datos con referencia espacial. Esta combina un sistema gestor de bases de datos y una serie de herramientas específicas para el manejo de información espacial, permitiendo la realización de múltiples operaciones tales como consultas, cruzamientos de datos, generación cartográfica, estadísticas, informes, complejos modelos territoriales, etc., que por otros medios resultarían difíciles de abordar ( Chuvieco, 1990).

Un sistema de información geográfica se define como un sistema de información que se utiliza para ingresar, almacenar, recuperar, manipular, analizar y obtener datos referenciados geográficamente o datos geoespaciales, a fin de brindar apoyo en la toma de decisiones sobre planificación y manejos de usos del suelo, recursos naturales, medio ambiente, transporte, instalaciones urbanas y otros registros administrativos (SIG Manual Base, 1999)

Los Sistemas de Información Geográfica permiten así recoger una visión integrada del territorio municipal, tanto en lo temático como en lo espacial. A partir de información recogida en el banco de datos, el sistema es capaz de realizar complejos y exhaustivos análisis sobre la problemática y potencialidad ambiental del medio, de manera consistente y a una escala adecuada para la toma de decisiones. En este sentido, la posibilidad que ofrece para simular acciones futuras o marcar pautas de comportamiento frente a determinadas actuaciones previstas en el territorio lo convierten en un instrumento de gran utilidad (Chuvieco, 1990).

Un sistema de computación para un SIG está compuesto por hardware, software y procedimientos diseñados para manejar la captura de datos, el procesamiento, el análisis, el modelado y la visualización de datos geoespaciales. Las fuentes de datos

geoespaciales son mapas digitalizados, fotografías aéreas, imágenes satelitales, tablas estadísticas y otros documentos relacionados.

El SIG proporciona muchos beneficios, entre los cuales están:

- Los datos geoespaciales están mejor mantenidos y en un formato estándar.
- La revisión y actualización es más fáciles de realizar.
- Los datos geoespaciales y la información son más sencillos de buscar, analizar y representan productos con mayor valor agregado.
- Los datos geoespaciales pueden ser compartidos e intercambiados libremente.
- Se ahorra tiempo y dinero
- Pueden tomarse mejores decisiones.

En la tabla 3.3 se comparan las cualidades de un SIG con los procedimientos manuales.

<b>Actividad</b>	<b>SIG</b>	<b>Procedimientos Manuales</b>
Mapas	Estandarizado e integrado	Diferentes escalas en diferentes estándares
Almacenamiento	Base de datos digital	Mapas en papel, tablas.
Superposición	Muy rápido	Consume tiempo e inserta errores.
Análisis Espacial	Sencillo	Complicado

Tabla 3.3 Comparación del SIG con procedimientos manuales, tomado de SIG Manual Base, 1999.

En la tabla 3.4 se muestran las funciones y sub-funciones que comúnmente realizan los SIG.

<b>Funciones</b>	<b>Sub-funciones</b>
Adquisición de datos y procesamiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digitalización</li> <li>• Transformación de Proyecciones</li> <li>• Asignación de atributos</li> </ul>
Administración y recuperación de base de datos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Archivos de datos</li> <li>• Consulta de atributos</li> <li>• Base de datos orientada a objetos, etc.</li> </ul>
Medición y análisis espacial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operación de medición</li> <li>• Operación de superposición</li> <li>• Operación de conectividad, etc.</li> </ul>
Salida gráfica y visualización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformación de escala</li> <li>• Generalización</li> <li>• Mapa topográfico</li> <li>• Mapa estadístico</li> <li>• Vista en perspectiva</li> </ul>

Tabla 3.4 Funciones básicas de un SIG, tomado de SELPER, SIG Manual Base, 1999.

### **3.4 MÉTODO GRAVIMÉTRICO**

La gravedad es la fuerza de atracción que ejerce la Tierra sobre cualquier cuerpo en la superficie y dentro de ciertos límites del espacio. Esa fuerza, llamada campo gravitatorio de la Tierra, varía de un lugar a otro a causa de diversos factores entre los cuales destacan la densidad de las rocas y su posición con relación a la superficie.

Las rocas ígneas del basamento son más densas que las sedimentarias y éstas, cuando están compactadas o consolidadas son más densas que las no consolidadas. Además, debido a las grandes deformaciones que ha sufrido la corteza, la posición de las rocas es muy variable y su relieve va desde elevaciones cercanas a la superficie que dan valores altos de gravedad hasta depresiones muy profundas que dan cifras bajas.

La medición de esas variaciones de gravedad es la base de los estudios gravimétricos, los cuales se llevan a cabo sobre extensas superficies de terreno siguiendo un patrón o mallado determinado. Inicialmente, estas mediciones se hacían con instrumentos conocidos como balanza de torsión y péndulo; actualmente se utiliza el gravímetro, el cual, explicado en forma simple es una masa de cuarzo unida a un resorte muy sensible. El alargamiento del resorte debido a la atracción de las rocas subterráneas sobre la masa suspendida, determina el valor de la gravedad en cada punto de medición y con estos valores se preparan mapas que reflejan la configuración del subsuelo en la región bajo estudio.

#### **3.4.1 Campo Gravitatorio Terrestre**

El método gravimétrico de prospección se basa en la medida en superficie, de las pequeñas variaciones (o anomalías) de la componente vertical del campo gravitatorio terrestre. Estas variaciones son debidas a una distribución irregular en profundidad de masas de diferentes densidades, por lo que conociendo aquellas se puede llegar a una



interpretación más o menos probable de la situación de las masas en el subsuelo, dependiendo del conocimiento geológico y de la distribución de densidades en profundidad.

### 3.4.2 Ley de Newton

La atracción de las masas obedece a la ley de la gravitación de Newton que establece que la atracción de dos masas  $m_1$  y  $m_2$ , es directamente proporcional a su producto e inversamente proporcional al cuadrado de su distancia

A partir de la Ley de Newton se tiene que la gravedad sobre la superficie es:

$$g = GM / R^2 \quad (\text{ec.1})$$

donde:  $g$  = aceleración de gravedad.

$G$  = Constante de gravitación Universal.

$M$  = Masa de la Tierra.

$R$  = Radio de la Tierra.

A cierta altura ' $h$ ' sobre el nivel de referencia se tiene que la gravedad en el punto ' $p$ ' es:

$$g_p = GM / (R + h)^2 = GM / R^2 * 1/(1 + (h/R)^2) \quad (\text{ec.2})$$

y despreciando términos de segundo orden porque  $h \ll R$ , se tiene:

$$g_p = g(1 - 2h/R). \quad (\text{ec.3})$$

Esta ecuación demuestra que la gravedad decrece linealmente con la altura.

Unidades:

' $g$ ' sobre la superficie terrestre es aproximadamente igual a  $980 \text{ cm/seg}^2$

$1 \text{ gal} = 1 \text{ cm/seg}^2$  ;  $1 \text{ mgal} = 10^{-3} \text{ gales}$

El gradiente vertical es :

$$2g / R = (2 * 980 * 1000) / (6371 * 1000) = 0.3086 \text{ mgal / mts.}$$

### **3.4.3 El Geoide**

DOBRIN (1961) establece que al hacer referencia al esferoide o elipsoide en los trabajos geodésicos, se debe relacionar la superficie matemática con alguna superficie física de la Tierra. Sobre los océanos esta superficie es la media del nivel del mar. En la tierra firme también podemos relacionar la superficie matemática con el nivel del mar, que en este caso se considera como una superficie imaginaria que tiene el mismo potencial gravitatorio que la superficie media de los océanos.

En general, el geoide no coincidirá con el esferoide de referencia aunque las constantes del esferoide se ajusten para dar la mayor aproximación. Esto ocurre porque en el geoide existen ondulaciones que se deben a atracciones horizontales no compensadas, junto con irregularidades superficiales (que pueden ser rasgos muy extensos como masas continentales, sistemas montañosos y cuencas oceánicas, u otros más reducidos como cerros aislados o elevaciones del basamento).

### **3.4.4 Anomalías Isostáticas**

El grado de compensación isostática en cualquier área se puede determinar cuantitativamente a partir de los datos de la gravedad haciendo una corrección adicional para el efecto gravitatorio de las variaciones de densidad por debajo del nivel del mar, que según la teoría isostática, compensan la topografía superficial. La forma de esta corrección dependerá del tipo de compensación isostática supuesta. Si es de la del tipo Pratt, es necesario calcular el exceso o déficit de densidad en la base de la corteza. Si la compensación es del tipo Airy, se calcula el espesor de la corteza por debajo de cada rasgo topográfico.

### 3.5 SEPARACIÓN DE EFECTOS REGIONALES Y RESIDUALES

Las anomalías de la gravedad obtenidas de un levantamiento gravimétrico reflejan muchos factores geológicos, cada uno de estos factores son expresados en el campo gravitatorio observado. Por eso, en el campo gravitatorio, la estructura geológica se manifiesta en forma de complejas anomalías superpuestas. Al resolver problemas geológicos concretos, de este campo total hay que destacar las anomalías que respondan a los distintos objetos que nos interesen. Para ello, las anomalías iniciales de la gravedad se transforman de manera que se subrayen o intensifiquen, unas peculiaridades del campo gravitatorio y se excluyan o mitiguen otras. (Mironov, 1977).

El objetivo fundamental de la transformación de las anomalías de la gravedad consiste en una más completa división del campo inicial observado en componentes en que cada una de ellas corresponda a fuentes de diferente naturaleza geológica (figura 3.4), que yacen a distintas profundidades, etc.

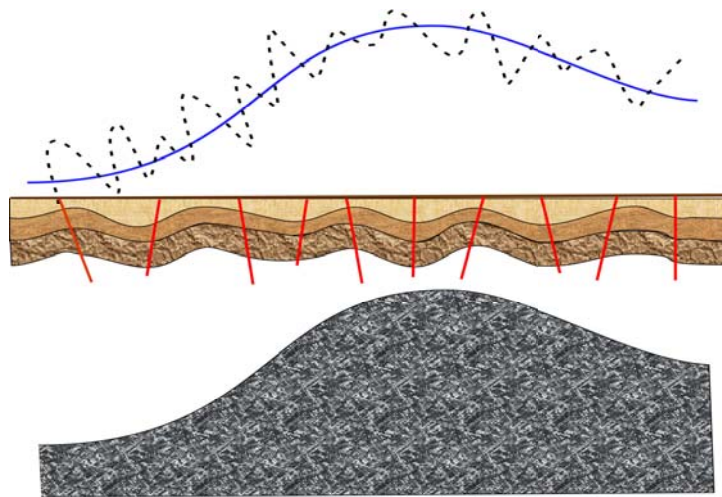


Figura 3.4 Efectos profundos que enmascaran y dificultan la resolución de anomalías locales.

Hasta ahora se han elaborado numerosos métodos de transformaciones de las anomalías de gravedad. Sin embargo, todos se basan en determinada correspondencia del orden de las estructuras geológicas y de las anomalías que les corresponden. Es

importante tener presente que con ninguno de los métodos de transformación pueden separarse del campo total observado particularidades nuevas cualesquiera que no contenga el campo inicial. En otras palabras, la transformación no conduce a la obtención de una nueva información, sino que sólo subraya unas particularidades del campo inicial, aminorando y excluyendo otras.

Los numerosos métodos analíticos de separación de las anomalías de la gravedad basados en la semejanza de las estructuras geológicas y de las anomalías, pueden dividirse convencionalmente en tres grandes grupos.

1. Premediación.
2. Continuación Analítica del Campo.
3. Cálculo de las derivadas de orden superior del potencial de gravedad.

### **3.5.1 Continuación Analítica del Campo.**

La esencia de la separación de las anomalías de la gravedad en su continuación analítica consiste en que con el aumento de la distancia de las fuentes de las anomalías, éstas disminuyen de distinta manera, según la profundidad y dimensiones de la fuente origen: las anomalías de los objetos pequeños y que yacen a poca profundidad, decrecen con mayor rapidez que las anomalías de objetos más grandes y de mayor profundidad. En otras palabras, al acercarse al objeto en el campo anómalo, empiezan a resaltarse detalles que a grandes distancias del objeto eran imperceptibles y viceversa, al alejarse del objeto se conserva solamente el aspecto general del campo y los detalles desaparecen.

Sean dos esferas: una a la profundidad  $h$  y de masa  $M$ ; otra a la profundidad  $nh$  y de

de masa  $n^3M$ . Las anomalías de la fuerza de gravedad sobre los centros de estas esferas serán.

$$U_{z_1}(0,0,0) = kM \frac{1}{h^2}; \quad (\text{ec.4})$$

$$U_{z_2}(0,0,0) = kn^3 M \frac{1}{n^2 h^2} = kM \frac{1}{h^2} n, \quad (\text{ec.5})$$

La anomalía de la primera esfera es  $n$  veces menor que la de la segunda.

Al prolongar analíticamente a la altura  $H=h$ , se tendrá que

$$U_{z_1}(0,0,-H) = \frac{kM}{4h^2}; \quad (\text{ec.6})$$

$$U_{z_2}(0,0,-H) = \frac{kn^3 M}{h^2 (n+1)^2}, \quad (\text{ec.7})$$

y entonces,

$$\frac{U_{z_2}(0,0,-H)}{U_{z_1}(0,0,-H)} = \frac{4n^3}{(n+1)^2} > n \quad (\text{ec.8})$$

siendo  $n > 1$ .

De lo anterior se infiere que al continuar analíticamente las anomalías de la gravedad en el semiespacio superior, las anomalías de las masas concentradas y que yacen a poca profundidad disminuyen con mayor intensidad que las anomalías de las fuentes que yacen a mayor profundidad, con lo cual se subraya la influencia de las anomalías regionales y se debilita la influencia de las locales.

En la continuación analítica de las anomalías de estas esferas en el semiespacio inferior a la profundidad  $H=0,5h$  se obtendrá respectivamente.

$$U_{z_1}(0,0,-H) = \frac{4kM}{4h^2}; \quad (\text{ec.9})$$

$$U_{z_1}(0,0,-H) = \frac{kMh^3}{4h^2} \cdot \frac{4}{(2n-1)} < n \quad (\text{ec.10})$$

y en este caso,

$$\frac{U_{z_2}(0,0,-H)}{U_{z_1}(0,0,-H)} = \frac{n^3}{(2n-1)^2} < n \quad (\text{ec.11})$$

$$n > 1$$

Así, pues, al continuar las anomalías en el semiespacio inferior, la anomalía regional  $U_{z_2}$  aumenta más lentamente que la local  $U_{z_1}$ , es decir, la anomalía local se destaca con mayor relieve en el campo gravitatorio general.

### 3.6 MODELAJE GRAVIMÉTRICO

Para realizar la interpretación de mapas y perfiles gravimétricos en zonas donde no se conoce la estructura subyacente, se utiliza en lo posible el método inverso. Sin embargo, este proceso no es por entero reversible, pues mientras que una determinada masa subterránea origina un único y predecible efecto gravitatorio sobre un punto cualquiera de la superficie, un perfil gravimétrico determinado con base solamente en razonamientos físicos puede ser producido por un número infinito de distribuciones posibles de masa

#### 3.6.1 Uso de formas geométricas tipos

Aunque las estructuras geológicas buscadas en la prospección gravimétrica nunca tienen prácticamente la forma de esferas, cilindros, tablas o conos perfectos, a veces es útil, durante la interpretación comparar un perfil gravimétrico observado con el que resultaría de un cuerpo que tenga alguna forma geométrica sencilla que pueda ser descrita analíticamente. Una comparación de este tipo no está justificada más que

cuando los datos gravimétricos sean de gran precisión y se disponga de una red tupida de puntos de observación, o bien cuando hay información de otras fuentes que indique la forma probable de la estructura.

### **3.6.2 Estimación de la profundidad.**

Existen diversos métodos para el cálculo de la profundidad de la fuente anómala, entre los cuales se encuentra el análisis espectral, cuyo principio físico consiste en la estimación cuantitativa de la profundidad de la fuente, tomando el conjunto de datos de entrada en el dominio espacial y transformándolos al dominio de la frecuencia.

### **3.6.3 Elección de la densidad**

En la interpretación de las anomalías gravimétricas es necesario estimar las densidades de las rocas subyacentes antes de poder interpretar su estructura. Por ello es conveniente incluir algunos datos sobre las densidades de las rocas más frecuentes que se encuentran en las zonas donde suelen efectuarse investigaciones gravimétricas. En algunos casos interesan más los contrastes de densidad que sus valores absolutos; en las rocas sedimentarias estos contrastes son casi siempre pequeños, y no suelen pasar de  $0,25 \text{ g/cm}^3$ . No obstante, como en cualquier tipo de roca hay siempre un margen de variación entre sus posibles densidades, existe cierta indecisión en el valor elegido, lo cual constituye un factor más de error en las interpretaciones gravimétricas. En las tablas 3.5, 3.6 y 3.7 se muestran los valores de densidad de una serie de rocas típicas.

Nombre	Rango	Promedio (Húmedo)	Rango	Promedio (seco)
	gr./cm <sup>3</sup>		gr./cm <sup>3</sup>	
Aluvión	1.96 - 2.06	1.98	1.50 - 1.60	1.54
Arcilla	1.63 - 2.60	2.21	1.30 - 2.40	1.70
Arena	1.70 - 2.30	2.00	1.40 - 1.80	1.60
Arenisca	1.61- 2.76	2.35	1.60 - 2.68	2.24
Caliza	1.93 - 2.90	2.55	1.74 - 2.76	2.11
Dolomita	2.28 - 2.90	2.70	2.04 - 2.54	2.30
Grava	1.70 - 2.40	2.00	1.40 - 2.20	1.95
Limo	1.80 - 2.20	1.93	1.20 - 1.80	1.43
Loess	1.40 - 1.93	1.64	0.75 - 1.60	1.20
Lutita	1.77 - 2.70	2.40	1.56 - 2.70	2.10
Suelos	1.20 - 2.40	1.92	1.00 - 2.00	1.46

Tabla 3.5 Densidades de sedimentos y rocas sedimentarias

Nombre	Rango gr/cm <sup>3</sup>	Promedio gr/cm <sup>3</sup>
Anfibolita	2.90 - 3.04	2.96
Cuarcita	2.50 - 2.70	2.60
Eclogita	3.34 - 3.54	3.39
Esquisto	2.39 - 2.90	2.64
Filitas	2.68 - 2.80	2.74
Gneiss	2.59 - 3.00	2.80
Mármol	2.60 - 2.90	2.75
Pizarra	2.70 - 2.90	2.79
Serpentina	2.40 - 3.10	2.78
Promedio:		
Rocas metamórficas	2.40 - 3.10	2.74

Tabla 3.6 Densidades de rocas metamórficas.



<b>Nombre</b>	<b>Rango</b> gr./cm <sup>3</sup>	<b>Promedio</b> gr./cm <sup>3</sup>
Andesita	2.40 - 2.80	2.61
Anortosita	2.64 - 2.94	2.78
Basalto	2.70 - 3.30	2.99
Dacita	2.35 - 2.80	2.58
Diabasa	2.50 - 3.20	2.91
Diolita	2.72 - 2.99	2.85
Dunita	3.20 - 3.31	3.28
Gabro	2.70 - 3.50	3.03
Granito	2.50 - 2.81	2.64
Granodiolita	2.67 - 2.79	2.73
Lava	2.80 - 3.00	2.90
Norita	2.70 - 3.24	2.92
Obsidiana	2.20 - 2.40	2.30
Peridotita	2.78 - 3.37	3.15
Piroxenita	2.93 - 3.34	3.17
Porfirita	2.60 - 2.89	2.74
Triolita	2.35 - 2.70	2.52
Sienita	2.60 - 2.95	2.77
Promedio:		
Ígneas Ácidas	2.30 - 3.11	2.61
Ígneas Básicas	2.09 - 3.17	2.79

Tabla 3.7 Densidades de rocas ígneas.

### 3.7 MÉTODO MAGNÉTICO

La Tierra se comporta magnéticamente al igual que un gigantesco imán irregular. Este imán imaginario se alinea determinando lo que se conoce como eje magnético terrestre, el cual intercepta a la superficie del globo terrestre en dos puntos denominados polos magnéticos. En el campo magnético terrestre se pueden considerar dirección, sentido e intensidad. Por otra parte, la intensidad del campo magnético terrestre en un lugar cualquiera de la Tierra es la fuerza con la que actúa dicho campo sobre la unidad de masa colocada en dicho lugar, mientras que la declinación es el ángulo que se forma entre los ejes del Norte Geográfico y el Norte Magnético.

El método magnético se basa en el estudio de la distribución espacial de las variaciones del campo magnético, consecuencia de la desigual magnetización de las diferentes rocas. Este método permite identificar anomalías causadas por cambios en las propiedades físicas de las rocas subyacentes, tales como la susceptibilidad magnética y la magnetización permanente de las mismas

La intensidad del geomagnetismo en la Tierra varía de un punto a otro de la superficie terrestre. El conjunto del complejo sistema de fuerzas magnéticas de la Tierra constituye el campo geomagnético terrestre. El método magnético permite determinar el espesor de los tramos sedimentarios y cartografiar rasgos estructurales sobre la superficie del basamento.

Esta intensidad se define como una magnitud vectorial, cuyos elementos se refieren a un sistema cartesiano ortogonal tridimensional, donde el eje x está dirigido hacia el Norte geográfico; el eje y hacia el Este, y el eje z dirigido en sentido vertical.

### 3.7.1 Propiedades de la prospección magnética

El campo magnético terrestre tiene carácter vectorial. En consecuencia, para caracterizarlo en cada punto de su superficie es necesario determinar tres escalares: Intensidad  $F$ , inclinación  $I$ , declinación  $D$ , o bien las proyecciones sobre los ejes geográficos: Norte  $X$ , Este  $Y$  y Nadir  $Z$ .

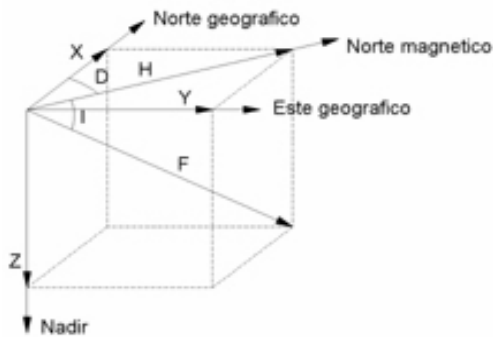


Figura 3.5 Elementos del Campo Geomagnético.

El parámetro que se mide en la prospección magnética es el campo magnético. A partir del campo magnético puede determinarse la susceptibilidad de la roca, la cual depende principalmente del porcentaje de magnetita presente en la roca. En las rocas ígneas o metamórficas su proporción es mayor que en las rocas sedimentarias. Las rocas básicas tienen generalmente mayor susceptibilidad que las ácidas, ya que el contenido de materiales magnéticos es mayor. Los elementos magnéticos están relacionados con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 H &= F \cdot \cos I = (X^2 + Y^2)^{1/2} \\
 X &= H \cdot \cos D \\
 Y &= H \cdot \operatorname{sen} D \\
 Z &= H \cdot \operatorname{tg} I
 \end{aligned}
 \tag{ec.12}$$

$$\begin{aligned}
 F &= (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} \\
 D &= \operatorname{arctg}(Y/X) \\
 I &= \operatorname{arctg}(Z/H)
 \end{aligned}$$

### 3.6.2 Variaciones del Campo Magnético

Las medidas del campo magnético se ven influenciadas por pequeños cambios en la magnitud del campo. Estos cambios corresponden a varias causas, y se clasifican en seculares, diurnos solares, diurnos lunares y tormentas magnéticas.

- **Variación secular.** Son las que van progresando lentamente durante décadas o siglos. Se observan por pequeñas desviaciones en la declinación, inclinación y en los distintos componentes de la intensidad; la intensidad del cambio varía con el tiempo.
- **Variación diurna.** De más importancia en prospección geofísica son las oscilaciones, menores pero más rápidas, que tienen una periodicidad de aproximadamente 24 horas y una amplitud de 25 gammas por término medio. Estas *variaciones diurnas* son registradas con regularidad en gráficas por los observatorios magnéticos. Los registros, en general, muestran dos tipos de variación: en los «días tranquilos» la variación es suave, regular y de poca amplitud; puede ser descompuesta en componentes que pueden ser predichas y que tienen periodicidades solares y lunares. En los «días inquietos», la variación es menos regular y está asociada a tormentas magnéticas.
- **Variación solar diurna.** El análisis de los registros de variación en los días magnéticamente tranquilos pone de manifiesto una periodicidad definida de 24 horas, que depende con bastante aproximación solamente del tiempo local y de la latitud geográfica. Por esta correlación de la variación con el período de rotación terrestre, aquélla es atribuida al Sol y por eso se denomina

variación diurna solar. Por término medio, esta variación de intensidad es del orden de 30 gammas, aunque su amplitud crece durante el verano en cada hemisferio.

- **Variación lunar diurna.** Hay otra componente en la variación periódica de los elementos magnéticos terrestres que tiene una periodicidad de unas 25 horas y una amplitud 15 veces menor que la de la variación solar diurna. Puesto que esta es la duración del día lunar, estas variaciones se suponen que están en relación con la rotación terrestre con respecto a la Luna; por eso se denominan variaciones lunares diurnas. Esta variación se diferencia de la solar porque mientras ésta es aproximadamente constante a lo largo del tiempo, la variación lunar varía cíclicamente a lo largo del mes.
- **Tormentas magnéticas.** Además de las variaciones poco amplias y predecibles en el campo terrestre, hay bruscos disturbios que, por analogías meteorológicas, se llaman tormentas magnéticas. Las tormentas magnéticas originan cambios característicos en los elementos magnéticos que dependen principalmente de la latitud. Hay además variaciones diurnas características que son muy distintas de las observadas en los días tranquilos.

### **3.8 ELABORACIÓN E INTERPRETACIÓN DE MAPAS MAGNÉTICOS**

La interpretación de datos magnéticos se lleva a cabo, tanto sobre mapas como sobre perfiles. Básicamente, se pretende correlacionar las diversas anomalías encontradas con los eventos geológicos en los que están envueltos cambios o contrastes de susceptibilidad magnética en las rocas del basamento ígneo-metamórfico.

En el análisis de los resultados magnéticos los mapas comúnmente usados, son los siguientes.:Intensidad Magnética Total, Reducción al Polo de la Intensidad Magnética Total (RTP), Continuaciones del Campo, Derivadas Horizontales y Derivadas Verticales.

### **3.8.1 Mapa de Reducción al Polo**

El mapa de Reducción al Polo se realiza con el propósito de corregir las variaciones en el valor del campo causadas por cambios en la naturaleza de la anomalía magnética. Generando mapas con anomalías unipolarizadas que reflejan exactamente la fuente que lo produce. Por lo tanto su propósito es corregir las variaciones en las apariencias de una anomalía, dependiente de su latitud magnética y la correspondiente variación del ángulo de inclinación del vector de magnetización en el campo.

## CAPITULO IV

### 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS.

#### 4.1 Fuente de los Datos Gravimétricos

En el estudio gravimétrico se contó con información del Banco de Datos Potenciales de INTVEP. En la figura 4.1 se muestra la distribución de las estaciones gravimétricas adquiridas en tierra. En la base de datos suministrada, también se contó con un grid interpolado de 2x2km. Para los objetivos del presente estudio, este grid resulta adecuado ya que hay regiones donde no se cuenta con estaciones gravimétricas y el estudio tiene fines regionales.

La base de datos dispone de: gravedad medida, gravedad teórica, corrección de aire libre y de la anomalía de Bouguer para varias densidades; con o sin corrección topográfica. En el presente estudio solo se hizo uso de la Anomalía de Bouguer con una densidad de 2.3 g/cc, la cual es adecuada para la zona en estudio, donde afloran solo rocas sedimentarias.

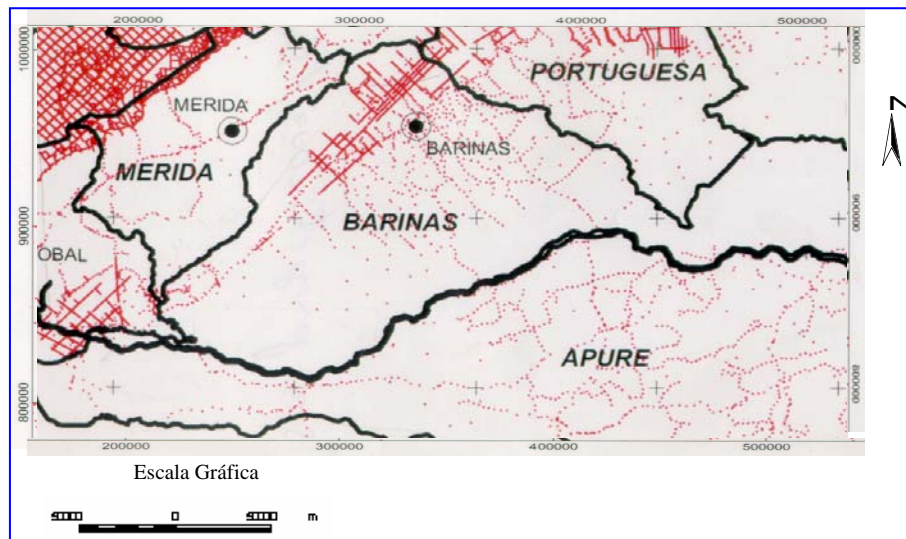


Fig. 4.1 Localización de los datos gravimétricos en el área de estudio

## 4.2 Análisis Estadístico de los Datos Gravimétricos

Para conocer en detalle la calidad de los datos a estudiar, se realizó un análisis estadístico descriptivo de los mismos, para ello se contó con la ayuda del software de análisis estadístico SPSS v.10.0 desarrollado por SPSS Inc. (1997).

El análisis se inició con el estudio de frecuencias de repeticiones o arreglo de datos. Entre las medidas que se obtuvieron se encuentran, la medida de: tendencia central, dispersión y los principales estadígrafos para establecer la normalidad de los datos.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos del estudio estadístico.

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
<b>AB</b>	28704	100.0%	0	.0%	28704	100.0%

Tabla 4.1. Resumen de procesamiento de casos de los datos de Anomalía de Bouguer

El análisis de distribución de frecuencias de la anomalía de Bouguer, se realizó con el uso del histograma figura 4.2, con fin de determinar si en los datos existe una distribución uniforme de los mismos. El histograma muestra como información, que los 28704 datos no corresponden a una distribución normal, sino por el contrario siguen una tendencia de distribución multimodal. En este estudio se aprecian dos modas, las cuales representan los dos valores que más se repiten y coinciden con los máximos observados en el histograma. Este comportamiento se debe a que el área presenta una distribución poco uniforme de los datos debido al difícil acceso en cuanto a características geográficas a la hora de realizar la adquisición y colocación de las estaciones. Sin embargo, se estima que los datos siguen un comportamiento normal, debido a que los valores del intervalo [-50, -30] corresponden a una ausencia de estaciones.



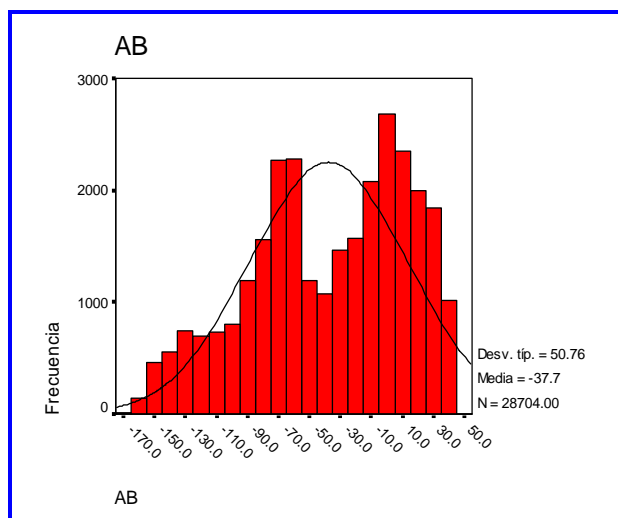


Figura 4.2. Histograma de frecuencia de la Anomalía de Bouguer

En la tabla 4.2 se observa la tendencia central de los valores de la anomalía de Bouguer, la cual presenta poca variabilidad con respecto al rango, teniendo en cuenta que la distribución es asimétrica

### Estadístico

	N		Media	Mediana	Moda
	Válidos	Perdidos			
AB	28704	0	-37.6645	-30.0200	5.67

Tabla 4.2 Valores de tendencia central de la Anomalía de Bouguer

En la tabla 4.3 se muestran los valores descriptivos. Se observa una desviación estándar de 50.7604. Este valor mide la dispersión de los datos, en torno a la media la cual es apreciablemente bajo, significando un comportamiento de poca variabilidad en la litología debido a que son sedimentos recientes a lo largo de la cuenca. En cuanto al máximo valor se obtuvo 46.12 y el mínimo  $-165.47$ , y un valor medio de  $-37.6645$  y una asimetría de  $-0.402$  debido a que la cola de los datos se encuentra hacia la izquierda.

### Descriptivo

		Estadístico	Error típ.	
AB	Media	-37.6645	.2996	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior		-38.2517
		Límite superior		-37.0772
	Media recortada al 5%	-35.9124		
	Mediana	-30.0200		
	Varianza	2576.621		
	Desv. Típ.	50.7604		
	Mínimo	-165.47		
	Máximo	46.12		
	Rango	211.59		
	Amplitud intercuartil	78.8075		
	Asimetría	-.402		.014
	Curtosis	-.809		.029

Tabla. 4.3 Valores descriptivos de Anomalía de Bouguer

En la prueba de K-S de distribución normal (figura 4.4), corrobora lo expuesto en histograma de frecuencias. Se trata de una distribución multimodal, esto se debe a la presencia de varias poblaciones, esta están agrupadas en 3 zonas; el macizo, la zona de los llanos con sedimentos recientes y la cuenca del flanco nor-andino.

### Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		AB
N		28704
Parámetros normales	Media	-37.6645
	Desviación típica	50.7604
Diferencias más extremas	Absoluta	.090
	Positiva	.058
	Negativa	-.090
Z de Kolmogorov-Smirnov		15.296
Sig. asintót. (bilateral)		.000

Tabla 4.4 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la variable de Anomalía de Bouguer, distribución de contraste, Normal.

### 4.3 Fuente de los Datos de Intensidad Magnética Total

El estudio magnético contó con información del banco potencial de INTVEP. Esta base de datos contiene información correspondiente al levantamiento aeromagnético realizado por Geoterrex entre 1981 y 1982; el cual se adquirió a una altura de vuelo única de 500 m sobre el nivel del mar. En la figura 4.3 se muestra las líneas de vuelo de adquisición magnética. Los datos de la base cuentan con el campo medido y sus correspondientes reducciones.

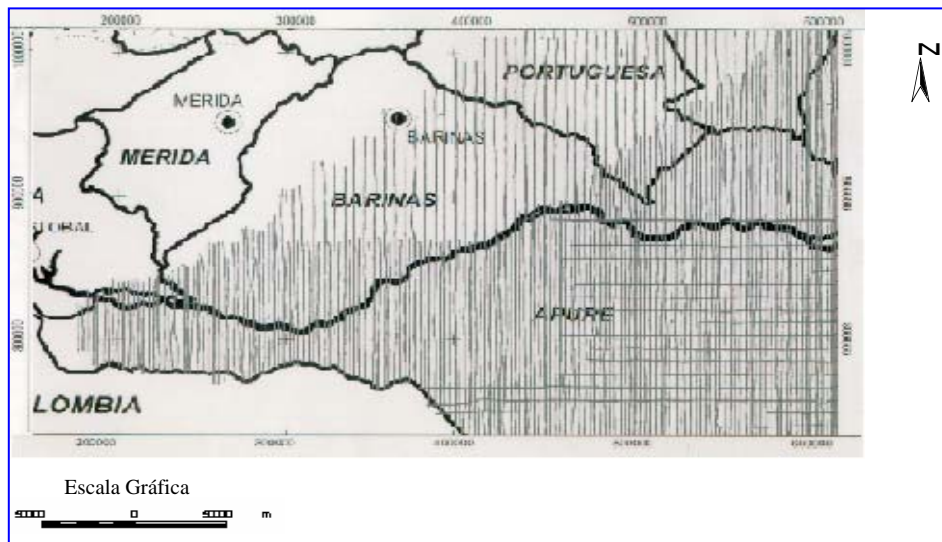


Figura 4.3 Localización de las líneas magnéticas

#### 4.4 Análisis Estadístico de los Datos de Intensidad Magnética Total

Al igual que lo realizado con los datos gravimétricos se realizó el estudio de frecuencias de repeticiones o arreglo de datos magnéticos. Entre las medidas que se obtuvieron se encuentran, la medida de: tendencia central, dispersión y los principales estadígrafos para establecer la normalidad de los datos.

En la tabla 4.5 se muestran los resultados obtenidos del estudio estadístico.

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
<b>Gammas</b>	28319	100.0%	0	.0%	28319	100.0%

Tabla. 4.5 Resumen de procesamiento de casos de los datos de Anomalía Magnética.

La distribución observada corresponde a una distribución normal. A diferencia que en el análisis gravimétrico se aprecia una sola moda, en el intervalo 9750- 9800 gammas. La diferencia en el comportamiento modal entre el estudio gravimétrico y magnético se debe, a que el levantamiento cuenta con una mayor densidad de datos.

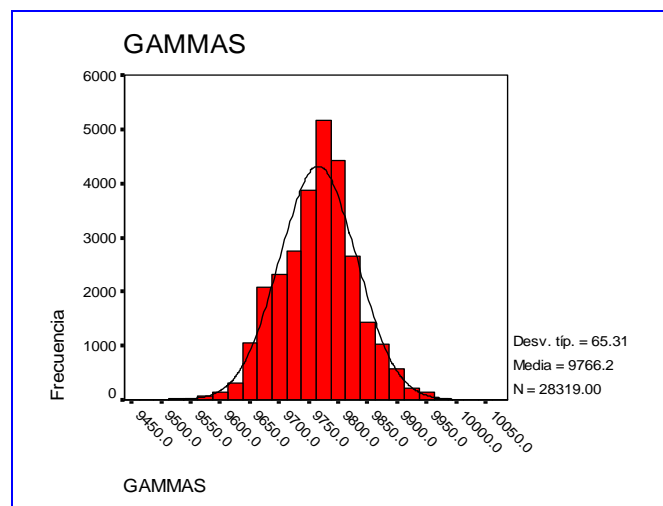


Figura. 4.4 Histograma de frecuencia de la Anomalía Magnética.

En la tabla 4.6 se observa la tendencia central de los valores de la anomalía de magnética, la cual presenta poca variabilidad con respecto al rango.

### Estadístico

	N		Media	Mediana	Moda
	Válidos	Perdidos			
<b>Gammas</b>	28319	0	9766.2497	9770.4697	9781.62

Tabla 4.6. Valores de tendencia central de la Anomalía de Magnética

En la tabla 4.6 se observa la tendencia central de los valores de la anomalía Magnética, la cual presenta poca variabilidad o sea poca diferencia cuadrática de los datos con respecto a su media aritmética, debido a que la distribución es normal.

En lo referente a los valores descriptivos, en la tabla 4.7 se observa una varianza de 4256.095 Gammas y una desviación estándar de 65.30. Este valor de desviación estándar resulto ser un poco más alto que el observado en el estudio gravimétrico y se debe al cambio litológico casi brusco entre las rocas del cartón de Guayana y los sedimentos de la cuenca de Barinas-Apure. En cuanto al máximo valor se obtuvo 10076.79 y el mínimo 9456.76, y un valor medio de 9766.2497 y una asimetría de  $-0.027$  debido a que la pequeña cola de los datos se encuentra hacia el lado izquierdo del histograma.

### Descriptivos

		Estadístico	Error típ.
<b>Gammas</b>	Media	9766.2497	.3881
	Intervalo de confianza para la media al 95%	9765.4890	
	Límite inferior		
	Límite superior	9767.0104	
	Media recortada al 5%	9765.9628	
	Mediana	9770.4697	
	Varianza	4265.095	
	Desv. típ.	65.3077	
	Mínimo	9456.76	
	Máximo	10076.79	
	Rango	620.03	
	Amplitud intercuartil	84.1093	
	Asimetría	-.027	.015
	Curtosis	.301	.029

Tabla 4.7 Valores descriptivos de Anomalía de Magnética

La prueba de K-S de la tabla 4.4, presenta un valor de  $Z= 5.7$ , lo cual significa que la muestra tiene una distribución normal y corrobora lo observado en el histograma.

#### Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Gammas
N		28319
Parámetros normales	Media	9766.2500
	Desviación típica	65.3077
Diferencias más extremas	Absoluta	.034
	Positiva	.026
	Negativa	-.034
Z de Kolmogorov-Smirnov		5.709
Sig. asintót. (bilateral)		.000

Tabla 4.8 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para la Anomalía Magnética, distribución Normal.

### 4.5 Análisis Geoestadístico de los Datos Gravimétricos

La geoestadística consiste en un conjunto de métodos estadísticos, los cuales basan su trabajo en determinar la variabilidad de determinada propiedad, está describe la autocorrelación espacial entre datos de la muestra y se utilizan varios modelos espaciales.

El análisis geoestadístico se efectuó con el fin de conocer la variación de los datos y su correlación espacial con la geología a través del ajuste de variogramas. Este estudio se llevó a cabo utilizando el programa GRIDSTAT. El programa cuenta con los algoritmos para elaborar variogramas y elipses de anisotropías.

Debido a que la versión de GRIDSTAT disponible solo permitía trabajar con 1000 datos, lo que es mucho menor de los datos a analizar, se utilizó el SPSS para la selección aleatoria de la muestra de población. Posteriormente se cargaron solo 1000 datos en el programa.

En la figura 4.5 se muestra el variograma obtenido para la muestra de los datos gravimétricos. Del mismo se puede determinar que el menor error de ajuste es el modelo gaussiano, con valor de 55.70.

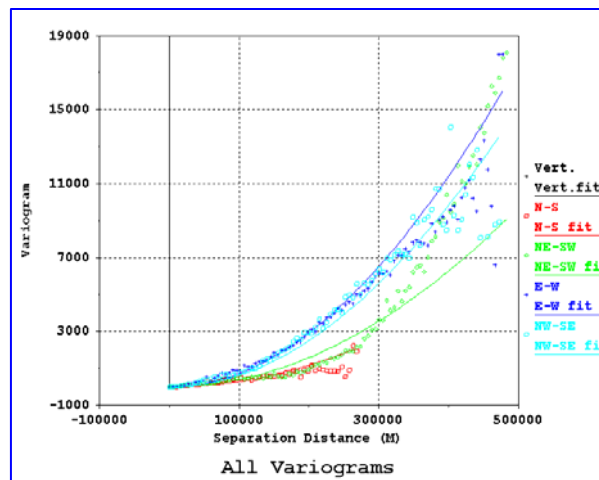


Figura. 4.5 Variograma teórico de la anomalía de Bouguer

Para determinar la continuación espacial de los datos gravimétricos, se procedió a construir la roseta de distribución figura 4.6 y la elipse de anisotropía figura 4.7. Se puede observar que el eje mayor corresponde a la dirección de mayor continuidad N30 E aproximadamente y coincide con la orientación de las curvas isoanomalías del

mapa de Bouguer. La mayor variabilidad se presenta en el eje menor con dirección perpendicular a los Andes.

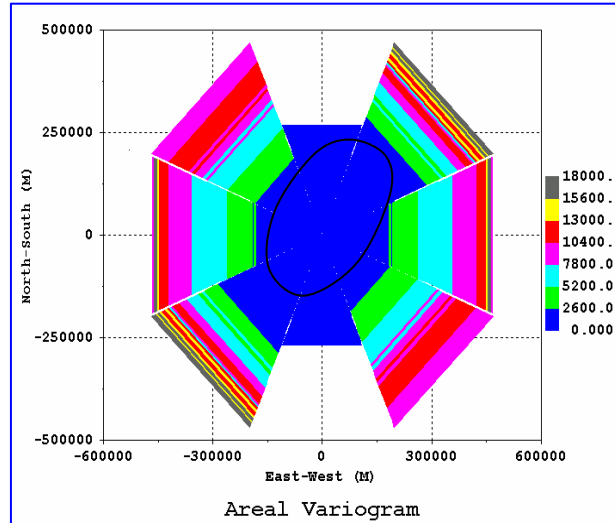


Figura. 4.6 Roseta de distribución espacial de la anomalía Gravimétrica

En la figura 4.5 se muestra la elipse de anisotropía. Se puede apreciar que el eje mayor muestra un valor de 4947202 y el menor de 2914395.

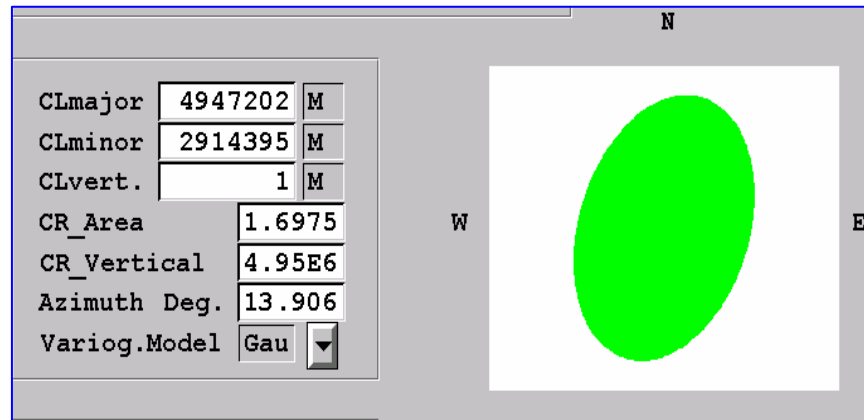


Figura. 4.7 Elipse de Anisotropía de la anomalía gravimétrica.



#### 4.6 Análisis Geoestadístico de los Datos de Intensidad Magnética Total

En el variograma de los datos magnéticos figura 4.6 se determinó que el modelo exponencial aporta el menor error (52.927).

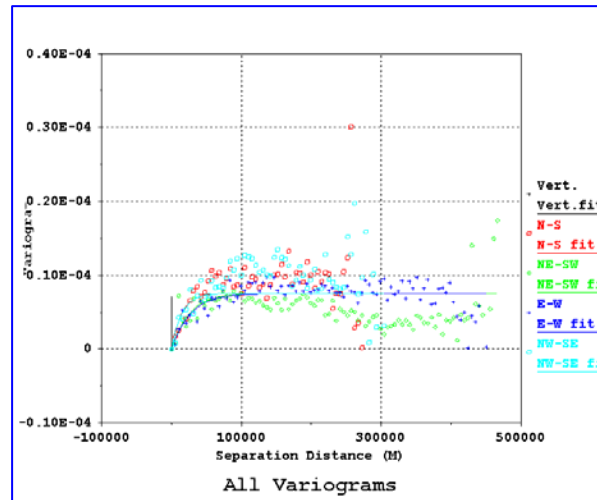


Figura 4.8 Variograma teórico de la Intensidad Magnética Total

En Cuanto al comportamiento espacial de la elipse de anisotropía (figura 4.7) para estos datos, se determino lo siguiente: valor de eje mayor 107459 , eje menor 39916 y la zona con mayor continuidad espacial con azimuth de 69.215°. Esta orientación difiere de la obtenida por los datos magnéticos, lo cual puede ser por diferencia en la densidad de los datos originales.

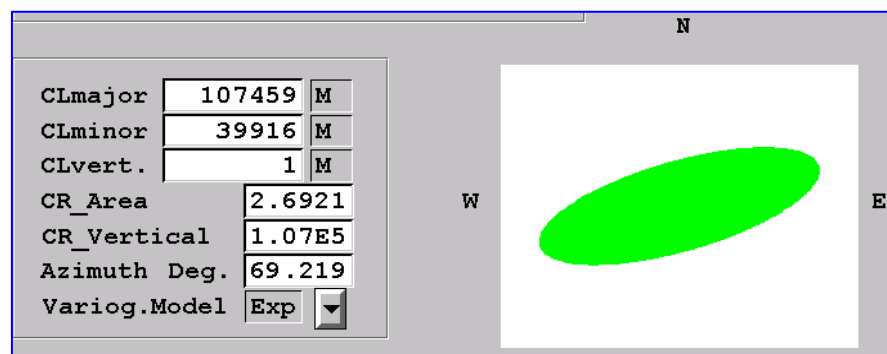


Figura 4.9 Elipse de Anisotropía de la Intensidad Magnética Total

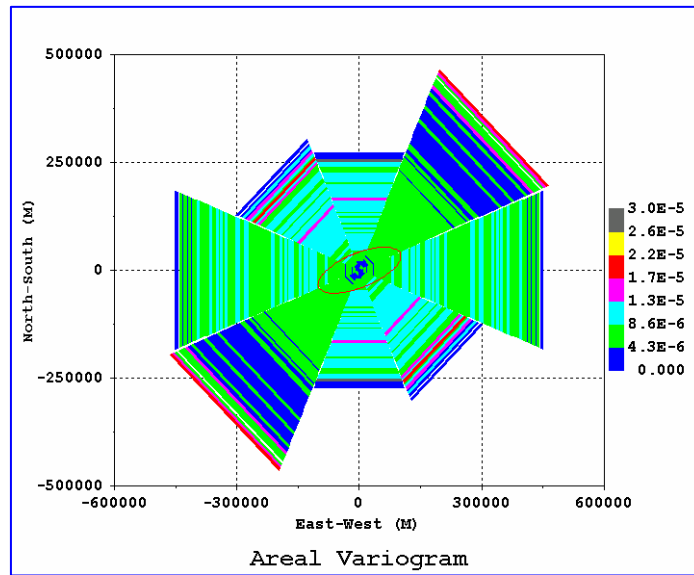


Figura. 4.10 Roseta de distribución espacial de la Intensidad Magnética Total

La roseta de distribución para el modelo exponencial, presenta igual orientación que la elipse de anisotropía, con mayor variación en dirección N-W aproximadamente y su menor en sentido N-E (Figura 4.6).

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 Mapa de Anomalías de Bouguer

A partir de los datos de Anomalía de Bouguer para una densidad de 2.3 g/cc, se elaboró un mapa de Anomalías de Bouguer el cual se muestra en la (figura 5.1); éste cubre un área de 10539 Km<sup>2</sup>, entre los 6° 55' 12" y los 9° 27' 36" de latitud norte, y desde los 68° 04' 48" hasta los 72° 08' 24" de longitud oeste. Esto abarca la parte sur del lago de Maracaibo, el flanco surandino y el borde oeste del Escudo de Guayana. El mapa de anomalías de Bouguer cuenta con una orientación preferencial N60E, lo cual refleja la estructura geológica de la zona.

El mapa de Anomalías de Bouguer presenta dos mínimos importantes al noroeste de la cordillera; el que está más al noreste con -165 mgales, el otro -150 mgales los cuales corresponden a los máximos espesores sedimentarios, tanto del flanco norandino, como al norte de los llanos colombianos, los cuales presentan un gradiente de 2,66 mgales/km . Ninguno de ellos está sobre el eje andino como era de esperarse, por el contrario, están desplazados. En cuanto a la Cuenca Barinas-Apure las curvas son más espaciadas, el gradiente es más suave alcanzando un valor de 1,33 mgales/km lo cual corresponde a espesores menores de sedimentos, estos mínimos de las anomalías no exceden de -70 mgales.

Entre la ciudad de Mérida y la ciudad de Valera, se aprecia un alineamiento de curvas isoanómalas, que corresponde con la interpretación del sistema de fallas que se extienden en el lugar, paralelas a la falla de Bocono y con las mismas características de rumbo y dirección de desplazamiento, las cuales fueron obtenidas y georreferenciadas a través del mapa estructural superpuesto e interpretado con la imagen satelital.

Las irregularidades en general, de las Anomalías de Bouguer hacia la región occidental parecen relacionarse con el levantamiento andino y al hundimiento de las Cuencas del Lago de Maracaibo y Apure-Barinas, como consecuencia de la flexión de la litosfera frente a la carga producida por el emplazamiento del orógeno. Esta interpretación está basada en el hecho de que estas cuencas están típicamente flanqueadas por dos márgenes de muy distintas características: un margen pasivo en el lado cratónico, donde emerge el basamento poco o nada deformado, y un margen activo constituido por el orógeno.

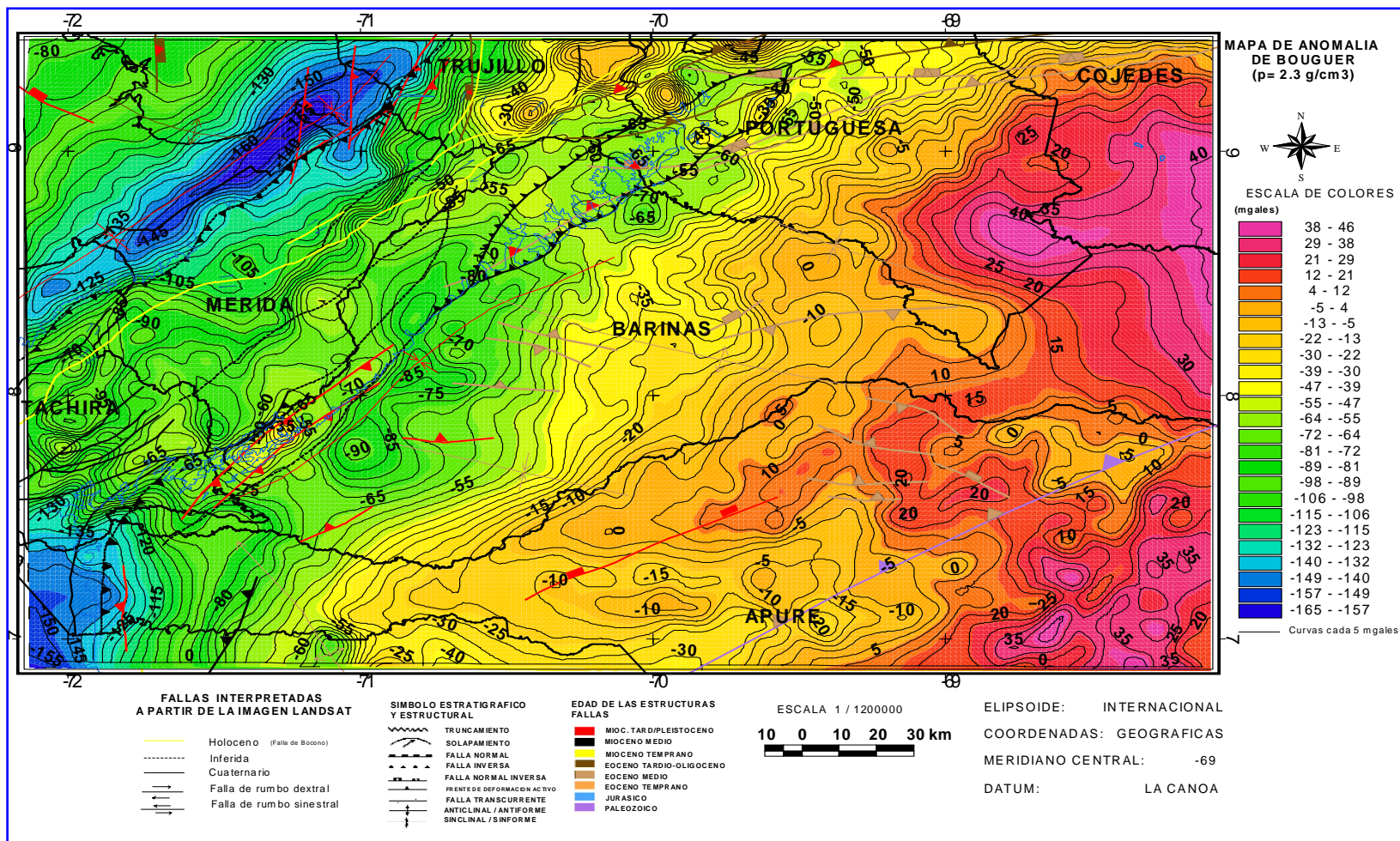


Figura 5.1 Mapa de Anomalías de Bouguer, en el cual se encuentran las fallas interpretadas a partir de la imagen satelital y las suministradas por el proyecto VIPA.

En cuanto a la correlación de las fallas suministradas por el proyecto VIPA y el mapa de anomalías de Bouguer, se puede observar en la parte SE del mapa, que la falla de Altamira refleja una tendencia de igual dirección a la de las curvas isoanomalías. Este evento estructural a nivel de subsuelo coincide con la separación del basamento de la cuenca y el basamento crátonico (Graben de San Fernando). La subcuenca de Apure refleja valores de 10 y 20 mgales respectivamente, en la cual se ubican un grupo de fallas inversas; la influencia del Cratón de Guayana se aprecia al NE y SE del mapa con valores de hasta 40 mgales, asociados a la presencia de rocas de mayor densidad en su contenido mineralógico y presentan un gradiente de 1.16 mgales/km.

## **5.2 Mapa Regional obtenido de la continuación analítica (2km) hacia arriba**

El mapa de la figura 5.2 se asemeja de manera general al obtenido por el de Anomalías de Bouguer, sin embargo, en éste se puede apreciar una diferencia en cuanto a la geometría de la subcuenca de Apure, en el cual la anomalía de 10 mgales de la Ab pasa a ser de 7 mgales, lo que significa que la respuesta es más profunda y amplia. Otra diferencia apreciable en este mapa es la marcada representación de La Cuenca de Barinas-Apure con valores intermedios de -80 y -70 mgales, y gradiente de 1,16 mgales/km, esta geometría de la Cuenca no se observa en el Mapa de Anomalía de Bouguer, puesto que ésta no es tan profunda como la de Maracaibo.

El gradiente en la zona de la Cuenca de Maracaibo se mantuvo para este mapa en 2,66 mgales/km, la diferencia radica en el valor de la anomalía mínima, la cual resultó ser de -156 mgales, dando como diferencia 11 miligales, lo cual hace analizar que mientras se aumenta el campo hacia arriba, más suave se hace la respuesta y por ende disminuye el valor en magnitud. Esta característica también se aprecia hacia la zona del cratón de Guayana, donde el máximo valor de anomalía para este regional alcanzó los 40 mgales, teniendo una diferencia de 6 miligales con respecto al de la anomalía de Bouguer. El gradiente en esta zona se comporta similar al mapa de Bouguer.

En lo que respecta al comportamiento de las curvas isoanomalas, frente a las fallas suministradas por el proyecto VIPA, estas se asemejan bastante a lo mencionado en el análisis del mapa de la figura 5.1.

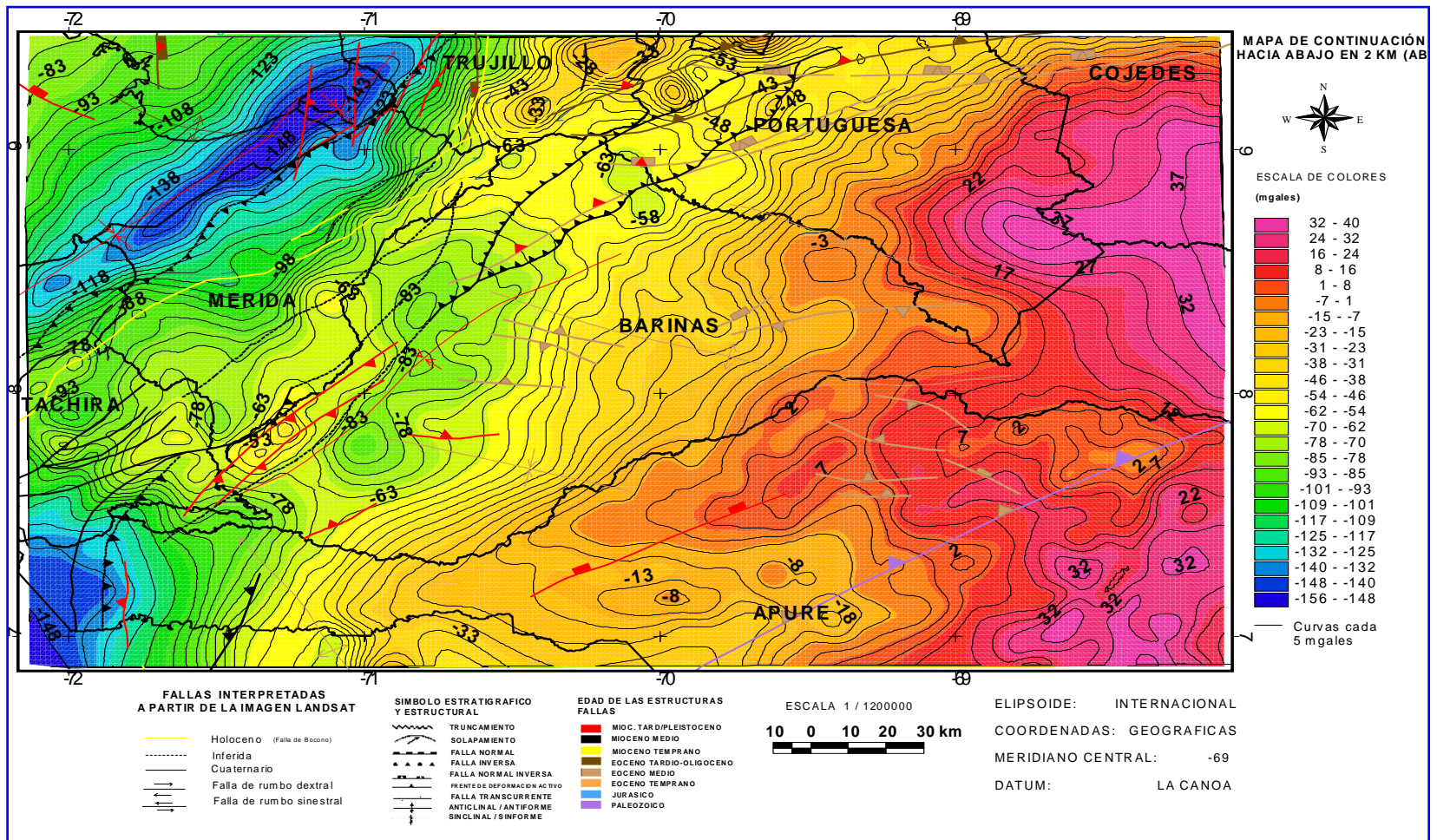


Figura 5.2 Mapa de la continuación hacia arriba 2 km (AB), en el cual se encuentran las fallas interpretadas a partir de la imagen y las suministradas por el proyecto VIPA.



### **5.3 Mapa Regional de la continuación analítica (10 km) hacia arriba**

Debido a que el objetivo principal de este trabajo, es ubicar las lineaciones a nivel de basamento de el Arco de Arauca y Mérida, se procedió a realizar una continuación a mayor altura, en este caso de 10 km.

En el mapa de la figura 5.3 se observa que la anomalía menor presenta un valor de  $-141$  mgal, con diferencia de 15 mgales menos que la continuación de 2 km en el flanco norandino y con gradiente también mucho menor, con valor de 1,33 mgales/km, lo cual indica que el campo aplicado es el reflejo de anomalías más profundas, las curvas en este mapa son más suaves e influenciadas por estructuras más regionales, en este mapa no se aprecian los picos indicativos de efectos locales como el de Bouguer figura 5.1, el gradiente en la parte central de la Cuenca Barinas-Apure es de 0,83 mgales/km, 0,33 mgales menos que el mapa de la continuación de 2km hacia arriba. En cuanto al graben de San Fernando desaparece, lo cual indica que es menos profundo que la respuesta observada, en la parte norte del mapa se observa la influencia del arco de El Baúl el cual aflora en superficie. Las curvas en general de los tres mapas mantienen la orientación de N60E.

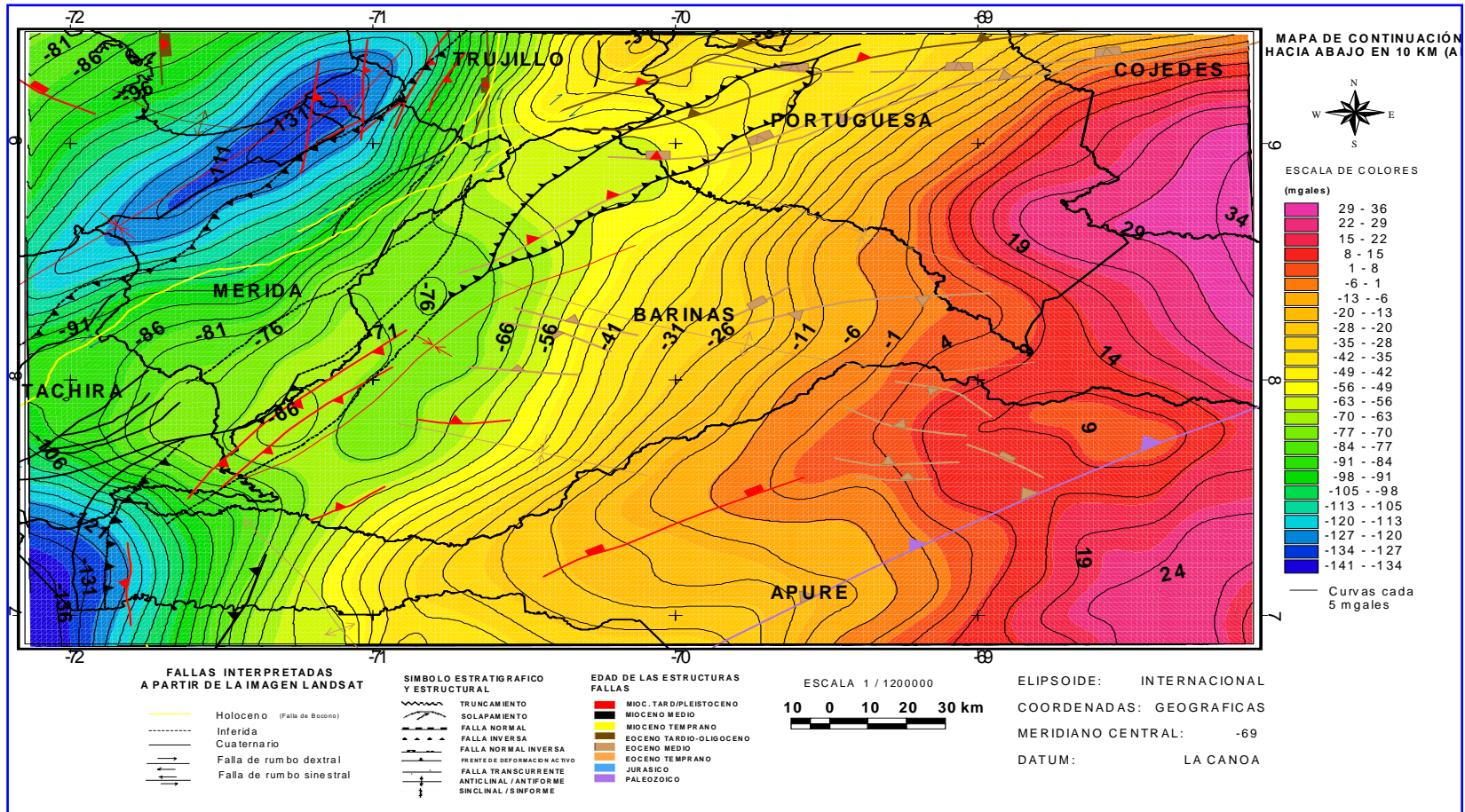


Figura 5.3 Mapa de la continuación hacia arriba 10 km (AB), en el cual se encuentran las fallas interpretadas a partir de la imagen y las suministradas por el proyecto VIPA.

#### **5.4 Mapa residual de la continuación analítica (10 km) hacia arriba**

Al realizar la resta del mapa de continuación de 10 km (figura 5.3) con el mapa de la Anomalía de Bouguer (figura 5.1), se obtiene un mapa residual de esta misma continuación, con el fin de que éste represente elementos estructurales al nivel superficial, eliminando los efectos causados por anomalías más profundas, y para resaltar, mejorar y poner en evidencia las estructuras que se acuñan contra los Arcos. Este proceso se aplica, para obtener resultados que nos lleven hacia mejores conclusiones o interpretaciones que serán aplicadas a la base de datos en este trabajo.

En el mapa de la figura 5.4, se puede observar que, la Anomalía causada por las Cuencas de Maracaibo y Llanos Colombianos fue minimizada, llevándose de -150 mgales en el mapa de Anomalía de Bouguer a -33 mgales, el gradiente en esta zona también disminuyó desde un valor de 2,66 mgales/km a 0,83 mgales/km, esta disminución en el efecto profundo de las estructuras permitirá reflejar en el modelo la influencia de estructuras locales, aunado a esto se aprecia que la Cuenca de Barinas-Apure, refleja valores que no aparecen en el mapa de Anomalía de Bouguer, debido esto a que la Anomalía de la Cuenca de Maracaibo disminuye el efecto causado por la Cuenca de Barinas-Apure; en este caso el residual permite visualizar ambas Cuencas, pero por supuesto con menor influencia aparece la de Barinas-Apure, en este mapa se aprecian anomalías del orden 12 mgales hacia el sur del Edo Apure y paralela a los Andes, dicha anomalía no se observó en los mapas anteriores, y coincide con una de las fallas normales interpretada por PDVSA (VIPA). En cuanto a la falla de Bocono se observa una tendencia marcada de cierres del orden de 36 mgales que dibujan la orientación de esta estructura.

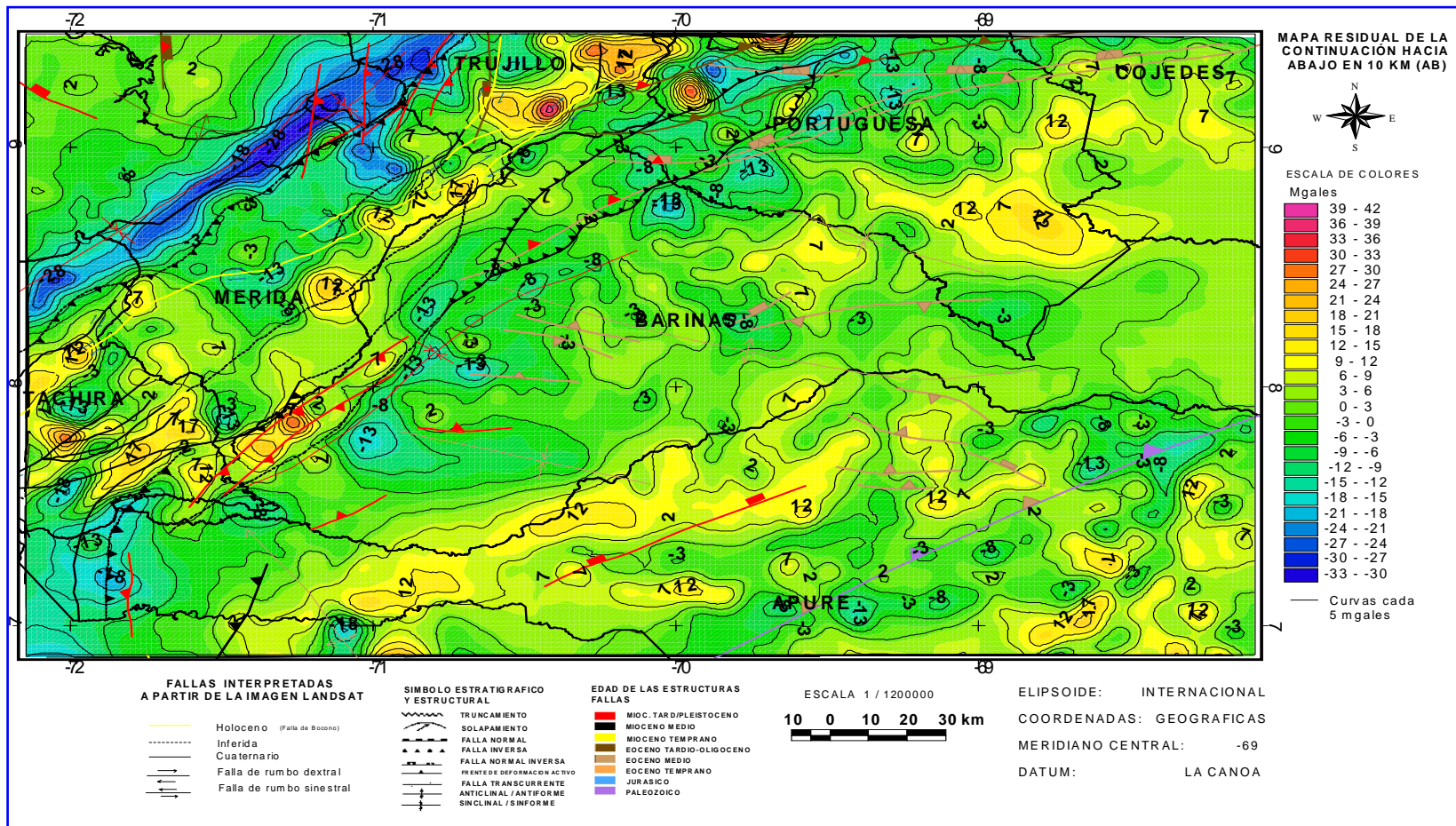


Figura 5.4 Mapa de residual de la continuación hacia abajo en 10 km, en el cual se encuentran las fallas interpretadas a partir de la imagen y las suministradas por el proyecto VIPA.





En lo que respecta a la información cuantitativa de las anomalías presentes en la Cuenca Barinas.Apure, los valores disminuyeron de -70 mgales en los mapas anteriores a -13 mgales, lo cual indica que el verdadero efecto profundo de ésta fue barrido. El gradiente en esta parte del mapa alcanza valores de 0,66 mgales/km. Los máximos valores de este mapa, fueron de 39 mgales y 35 mgales, los cuales aparecen únicamente por debajo del orogeno andino, lo que hace inferir que se trata de la respuesta del sistema de fallas presente en dicha estructura. En cuanto a las estructuras inicialmente planteadas a representar en este trabajo, se determinó con ayuda bibliográfica anteriormente citada, y partir de este mapa, que la ubicación de los arcos viene dada por anomalías del orden de los 7 mgales que contrastan con valores negativos de -5 mgales y -3 mgales, los cuales representan a la Cuenca de Barinas-Apure, dichas estructuras son perpendiculares al la cordillera Andina.

Para tener una mejor percepción visual de lo que realiza la continuación analítica del campo, se procedió a representar la secuencia de los mapas obtenidos anteriormente, en una perspectiva 3D.

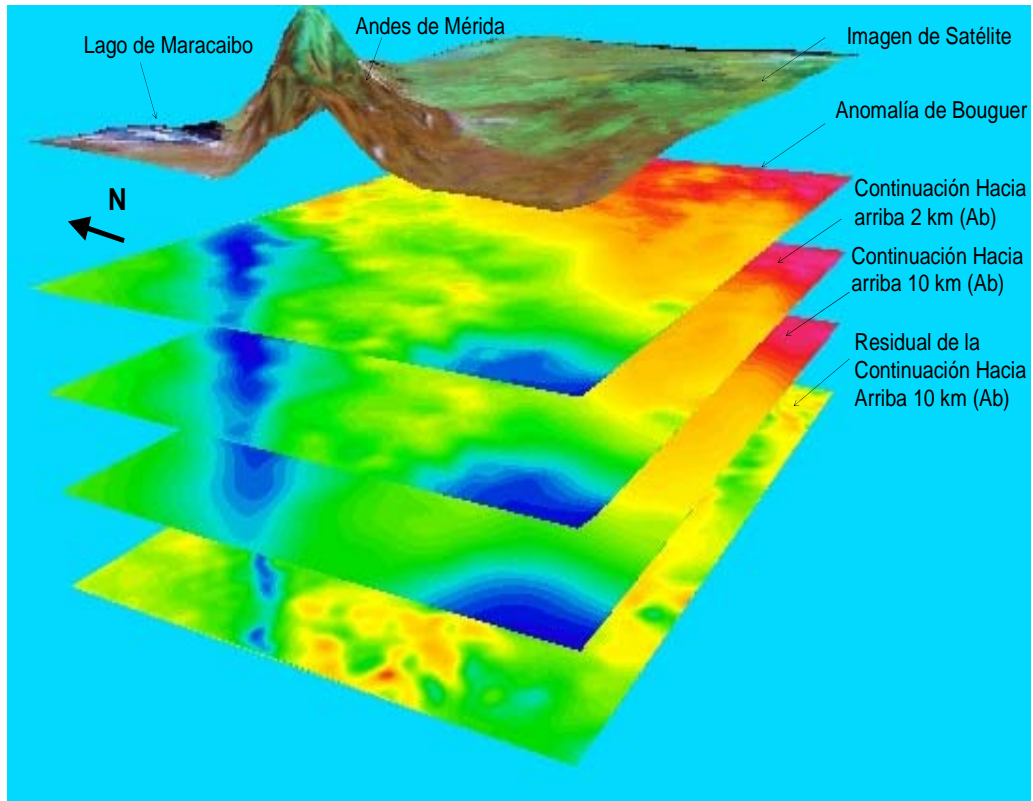


Figura 5.5 Perspectiva 3D georreferenciadas de las continuaciones analítica hacia arriba de 2 ,10 km y del residual de la Anomalía de Bouguer en 10 km.

En la figura 5.5, se puede apreciar que el mapa de Anomalía de Bouguer toma en cuenta, tanto las anomalías profundas como las locales; a medida que se aumenta la distancia a las fuentes de las anomalías, éstas disminuyen de distinta manera según la profundidad y dimensiones de la fuente origen. Las anomalías de las fuentes pequeñas y que yacen a poca profundidad, decrecen con mayor rapidez que las anomalías de objetos más grandes y de mayor profundidad. Esto es el reflejo de lo que sucede en ambos mapas de continuación del campo, los efectos locales presentes en el mapa de Anomalía de Bouguer fueron barridos, haciéndose mucho más suaves



las curvas representadas por las Cuencas de Maracaibo y de los llanos Colombianos, son efectos profundos.

En el mapa residual, resultado de la resta del regional de 10 km al de Anomalía de Bouguer, se aprecian efectos locales presentes en el de Anomalía de bouguer, pero más marcados y sin el efecto de las Cuencas. Lo cual permitirá a la hora de realizar el modelo, tener un mejor reflejo de las estructuras que se encuentran por encima de los Arcos de Arauca y Mérida, sin que el efecto de las Cuencas logre enmascararlos. Se tomó esta continuación para la construcción del residual, siguiendo el criterio de que ya las curvas estaban bastante suavizadas y limpia de efectos locales.

A continuación se muestran las estructuras interpretadas en este trabajo, que representan según las tendencias de las curvas, a los Arcos de Arauca y Mérida.

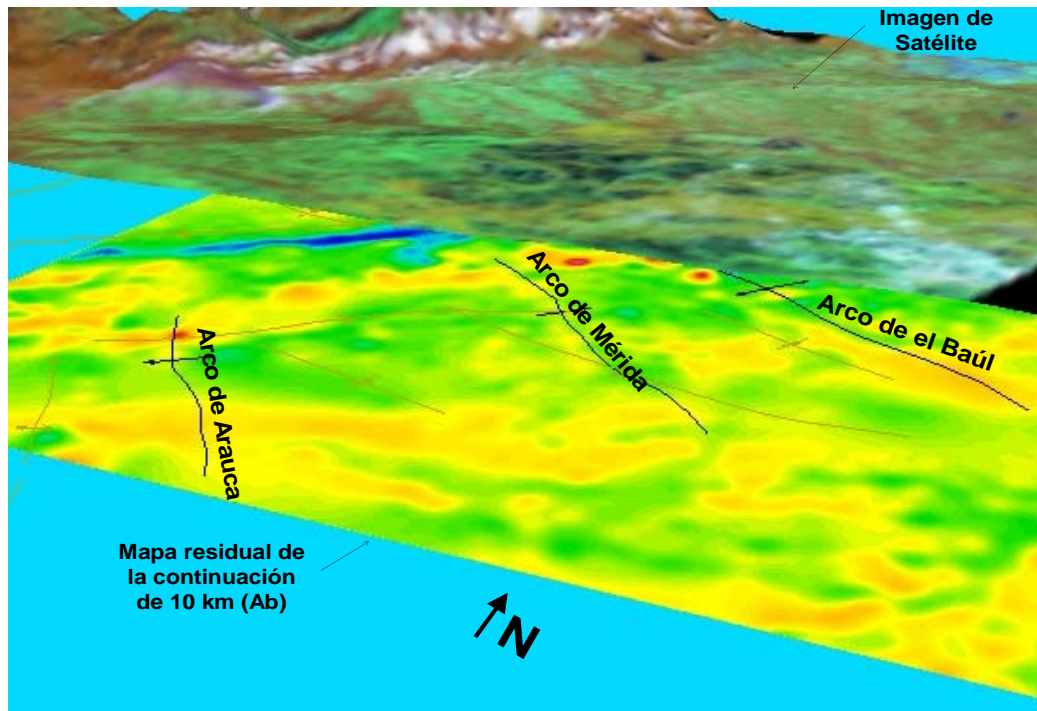


Figura 5.6 Perspectiva 3d de la ubicación de los Arcos propuestos en este trabajo.

De la figura 5.6 se puede extraer la siguiente información, la ubicación de las estructuras de basamento (Arcos de Mérida y Arauca), difiere un poco de las lineaciones suministradas por VIPA a través de registros sísmicos. Esta ubicación se realizó basándose en la bibliografía citada y en el cambio en la escala de colores (contraste de densidad), la cual indica que colores verdes son estructuras profundas y el amarillo estructuras un poco más someras.

### **5.5 Mapa de Intensidad Magnética Total**

El mapa que se presenta en la Figura 5.7, cubre un área de 7206 Km<sup>2</sup>, entre los 7° 04' 48" y los 9° 28' 12" de latitud norte, y desde los 68° 04' 12" hasta los 71° 08' 24" de longitud oeste, desde la parte sur del lago de Maracaibo hasta lo que corresponde al flanco surandino en su totalidad.

Entre las características, se pudo observar un máximo magnético de 10080 gammas cerca de la población de Guanare; Edo. Portuguesa, a este valor se la atribuye la presencia de la cocina Eocena generadora de hidrocarburos al noroeste de la cuenca. Si bien es conocido que el cambio en la temperatura presente en esta cocina no se refleja en la respuesta magnética, el cambio en el contenido mineralógico (susceptibilidad Magnética) de las rocas debido a esta temperatura si es percibido.

En cuanto al menor valor, que resultó ser de 9460 gammas, éste se pudo observar al sur del graben y al oeste del Escudo de Guayana. Entre otros valores altos de intensidad magnética relevantes, aparecen los relacionados con la provincia del Escudo de Guayana (10030 gammas) y el correspondiente al Arco de Mérida en la parte central del mapa (9800 gammas). Una de las características más resaltantes de este mapa, es que aparecen altos valores tanto paralela como perpendicularmente a Los Andes; el Graben de Nutrias aparece con valores cercanos a los 9600 gammas indicando grandes espesores sedimentarios al igual que el graben de San Fernando. Ambos grabens presentan un gradiente bastante suave de 2.1 mgals/km.

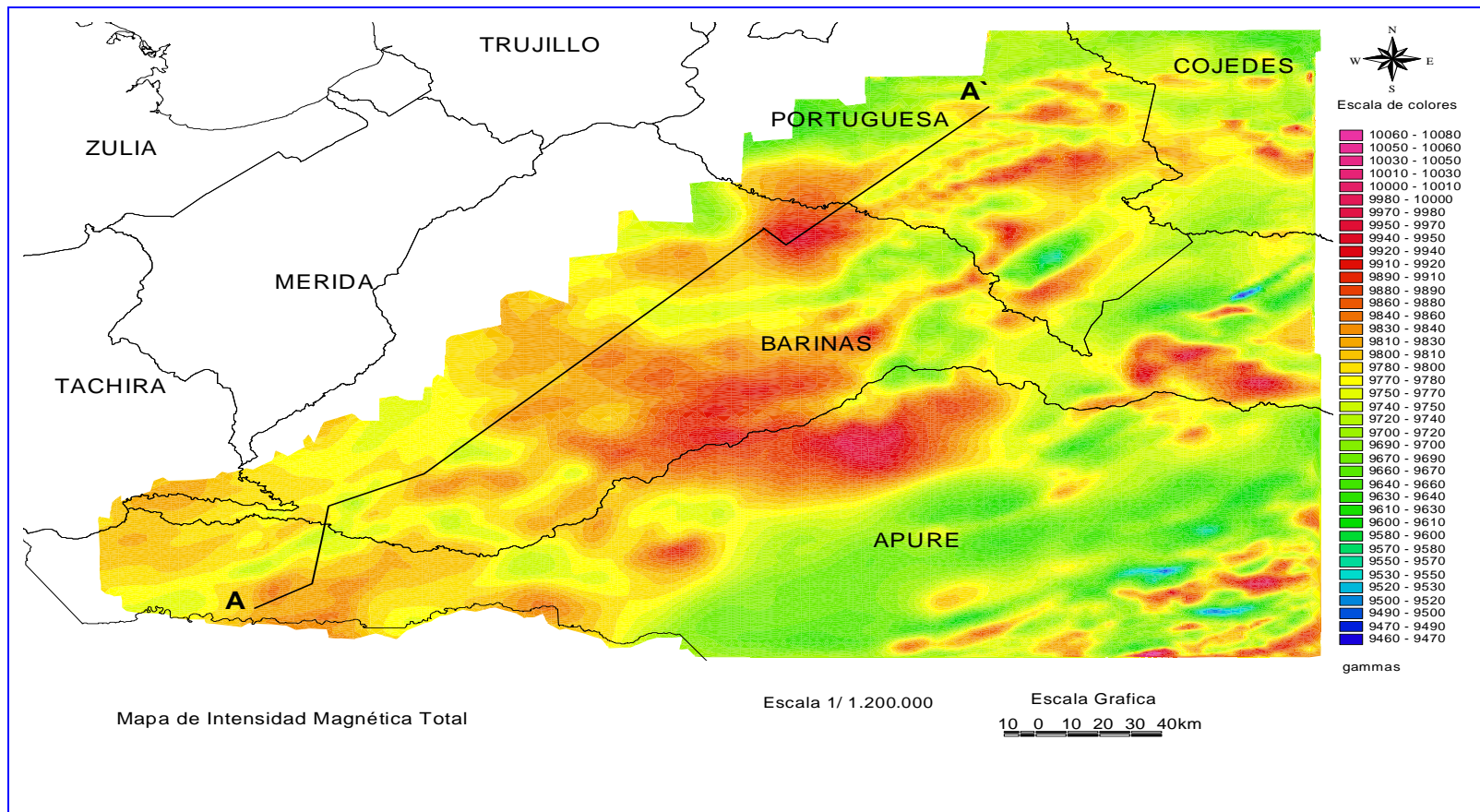


Figura 5.7 Mapa de Intensidad Magnética Total

## **5.6 Mapa de reducción al polo de la intensidad Magnética total (RTP)**

El mapa que se presenta en la figura 5.5, cuenta con la Reducción al Polo, la cual se realizó con el fin de colocar puntualmente la anomalía sobre la fuente que la produce; esto se hizo a través de GEOSOFT, PDVSA INTEVEP. Este mapa cubre un área de 7206 Km<sup>2</sup>, entre los 7° 04' 48" y los 9° 28' 12" de latitud norte, y desde los 68° 04' 12" hasta los 71° 08' 24" de longitud oeste, desde la parte sur del lago de Maracaibo hasta lo que corresponde al flanco surandino en su totalidad.

Entre las características cuantitativas más resaltantes, se pudo observar un máximo magnético de 10100 gammas.

El menor valor, que resultó ser de 9400 gammas, se pudo observar al norte del graben, específicamente en la subcuenca de Apure; para revelar si a esta subcuenca pertenecen los mayores espesores sedimentarios, se procederá a discutir más adelante con el apoyo del análisis espectral y el mapa de líneas de basamento. Entre otros valores altos de intensidad magnética relevantes, aparecen los relacionados con la provincia del Escudo de Guayana (10030 gammas), al norte del graben de San Fernando, y 9900 gammas al sur del mismo, observándose hacia esta provincia el mayor gradiente del mapa, con 15 gammas/km, lo cual es el reflejo de las propiedades magnéticas en las unidades litológicas presentes en el Escudo de Guayana..

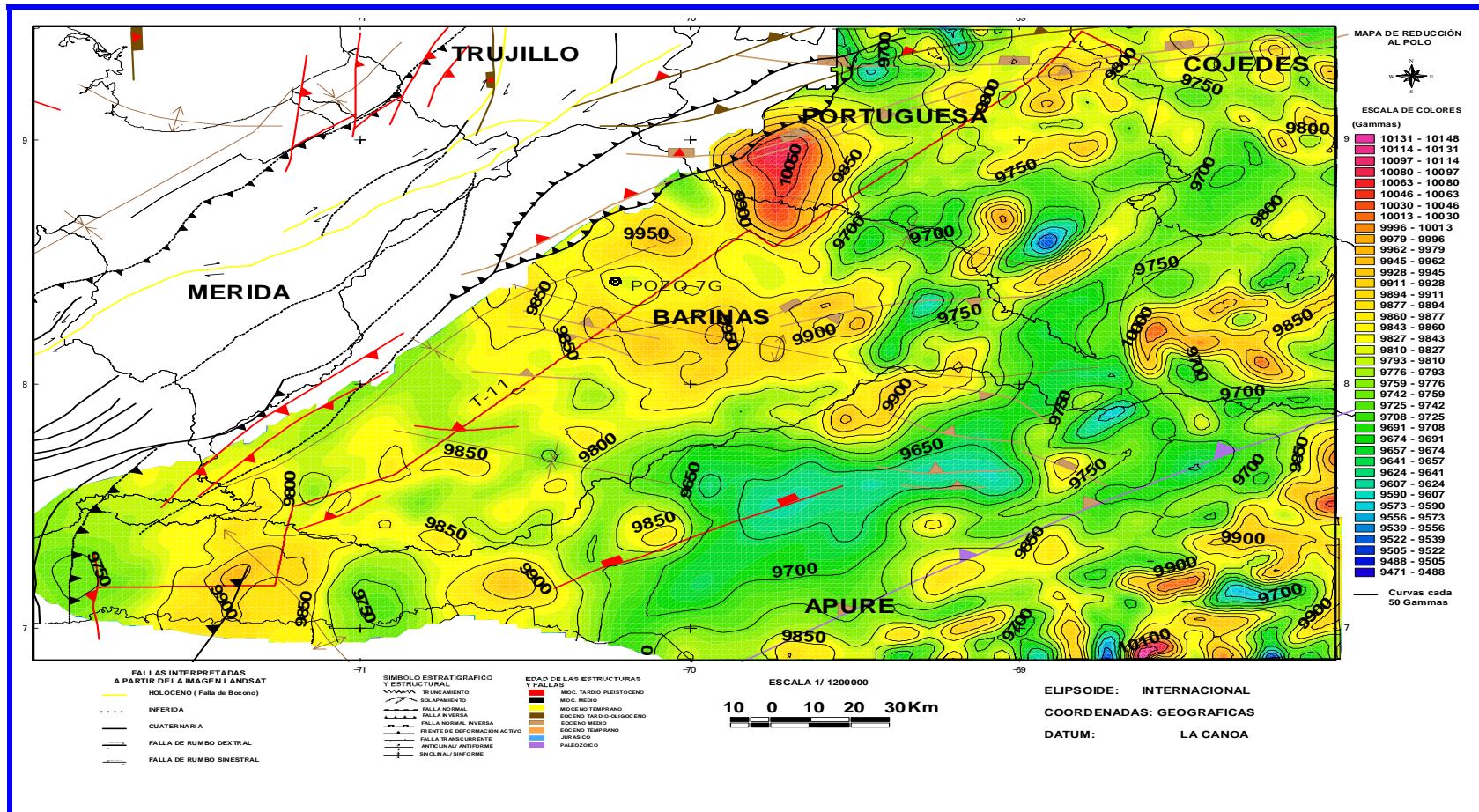


Figura 5.8 Mapa de Reducción al Polo, en el cual se encuentran las fallas interpretadas a partir de la imagen y las suministradas por el proyecto VIPA.

La parte central de la Cuenca de Barinas-Apure refleja un gradiente muy suave, alrededor de 2,66 gammas/km. Esto significa que hacia esta zona se encuentran los mayores espesores sedimentarios y por ende el menor contenido de susceptibilidad en las rocas. Los valores promedios de anomalía están por el orden de los 9800 gammas.

En cuanto a la ubicación de las fallas suministradas por el proyecto VIPA resultó ser que éstas se encuentran sobre la subcuenca de Apure y la Cuenca de Barinas, la mayoría de ellas inversas; éstas coinciden con cambios en la tendencia de las curvas del mapa, indicando así que la interpretación magnética sirve como guía para la interpretación sísmica ya que muestra rumbos y buzamientos de las fallas. En lo que se refiere a las estructuras del basamento, a los arcos específicamente, se puede decir, que se observan tendencias de valores intermedios de 9800 y 9900 gammas perpendiculares a Los Andes y paralelos entre sí, los cuales tienen un ligero desfase con las lineaciones propuestos por VIPA, más adelante se mostrarán las tendencias interpretadas en este trabajo.

### **5.7 Mapa de profundidad de Basamento Magnético**

Siempre que se va a efectuar una interpretación magnética en un área, es recomendable contar con un control de la profundidad del basamento presente y de las estructuras que este contiene. Puesto que uno de los objetivos de éste trabajo es determinar lineaciones en el basamento, se procedió a la reconstrucción del mapa de la figura 5.7.

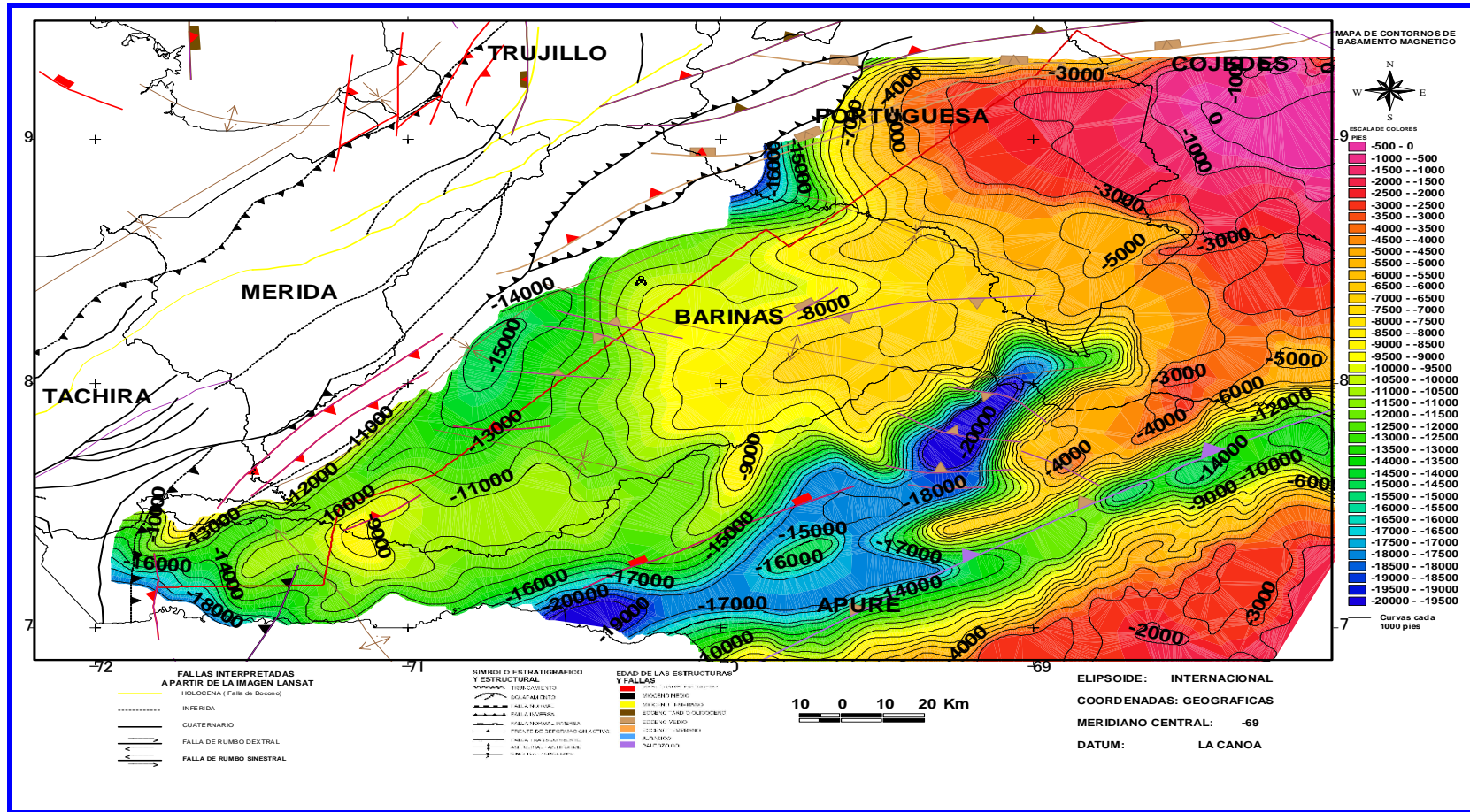


Figura 5.9 Mapa de líneas del basamento magnético en la Cuenca Barinas-Apure, obtenido de la digitalización de 14 mapas elaborados por GEOTERREX LTD (1981-82).

Del mapa de la figura 5.7 se pudo determinar, que la máxima profundidad presente es de 20.000 pies. Y corresponde a la subcuenca de Apure y no a la de Barinas como era de esperarse debido al efecto litostático que ejerce la cordillera. En cuanto al menor valor en profundidad 0 pies, está asociado a la presencia del Escudo de Guayana, tanto en la representación del arco de El Baúl al norte, como al sur del graben de San Fernando. Este graben presenta valores intermedios de profundidad (14000 pies) y coincide con la ubicación de VIPA de la falla inversa de Altamira. En lo que se refiere a la ubicación de la cocina Eocena, las curvas de profundidad arrojan un valor de 18000 pies, lo que conduce a decir según lo observado en el mapa de la figura 5.5, que éste es un máximo magnético asociado a un mínimo estructural del basamento. La Cuenca de Barinas aparece con un valor de 15000 pies.

Para determinar la tendencia de los arcos de Arauca y Mérida, fue necesario integrar la información de ambos mapas, figuras 5.5 y 5.7, dando como resultado que el valor intermedio de 8000 pies al sur de la población de Barinas resulta ser el Arco de Mérida y el valor de 9000 pies al oeste de la población de Guasdalito resulta ser el Arco de Arauca. La interpretación de los mapas de Reducción al Polo y de Anomalía de Bouguer coincide con la interpretación de la mayoría de los autores mencionados en el capítulo I, quienes los consideran como digitaciones del escudo o dorsal tectónica, cuyo ejes son casi perpendicular a Los Andes, en cambio el mapa de profundidad de basamento coincide con lo que menciona OSUNA (1990), quien estima que se trata de un paleorrelieve muy suave durante la sedimentación terciaria, pero que no actuó como arco en sentido estricto, sino más bien lo considera como una prominencia del escudo, pues no tiene continuidad hacia Los Andes.

Al igual que se hizo la representación en perspectiva 3D, con los regionales y residual, de la Anomalía de Bouguer, se procedió a elaborar la de los mapas de RTP y profundidad del Basamento (figuras 5.8 y 5.9) respectivamente, con el fin de poder correlacionar mejor ambos mapas.



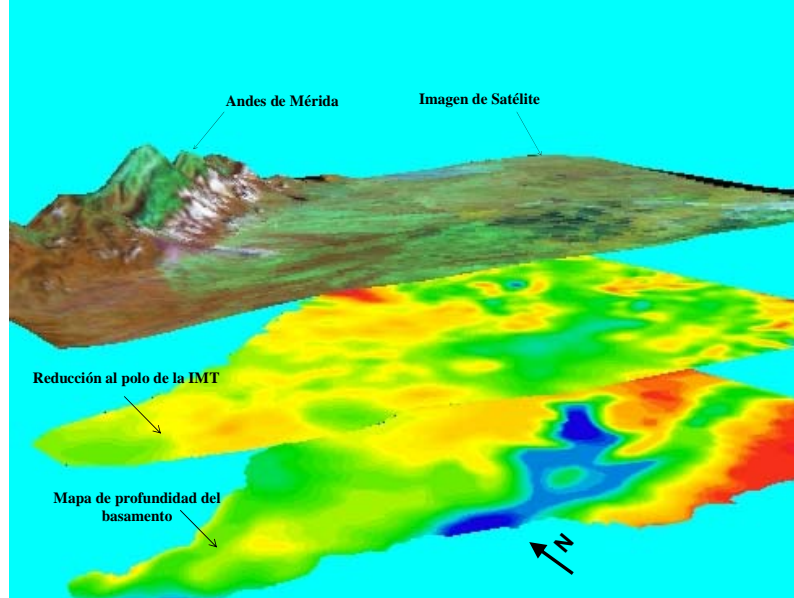


Figura 5.10 Perspectiva 3d georreferenciada del mapa de reducción al polo y del mapa de profundidad del basamento magnético.

De la representación 3D de la figura 5.8, se puede hacer la siguiente correlación, Justo en la parte central del mapa de profundidad del basamento, se encuentra la ya mencionada sub-cuenca de Apure, a la cual le corresponde una tonalidad azul clara en el mapa de RTP; otra característica que aparece en ambos mapas es el efecto de las rocas someras del Cratón de Guayana, con tonalidades rojas, el Arco de Arauca presenta una tonalidad amarilla hacia el borde sur de ambos mapas y el Arco de Mérida en la parte NO de ambos mapas.

Lo mencionado anteriormente se corrobora con la ubicación realizada en la figura 5.8, la cual correlaciona bastante con los mapas de la figura 5.7 y 5.6, la cual se muestra en la figura 5.9.

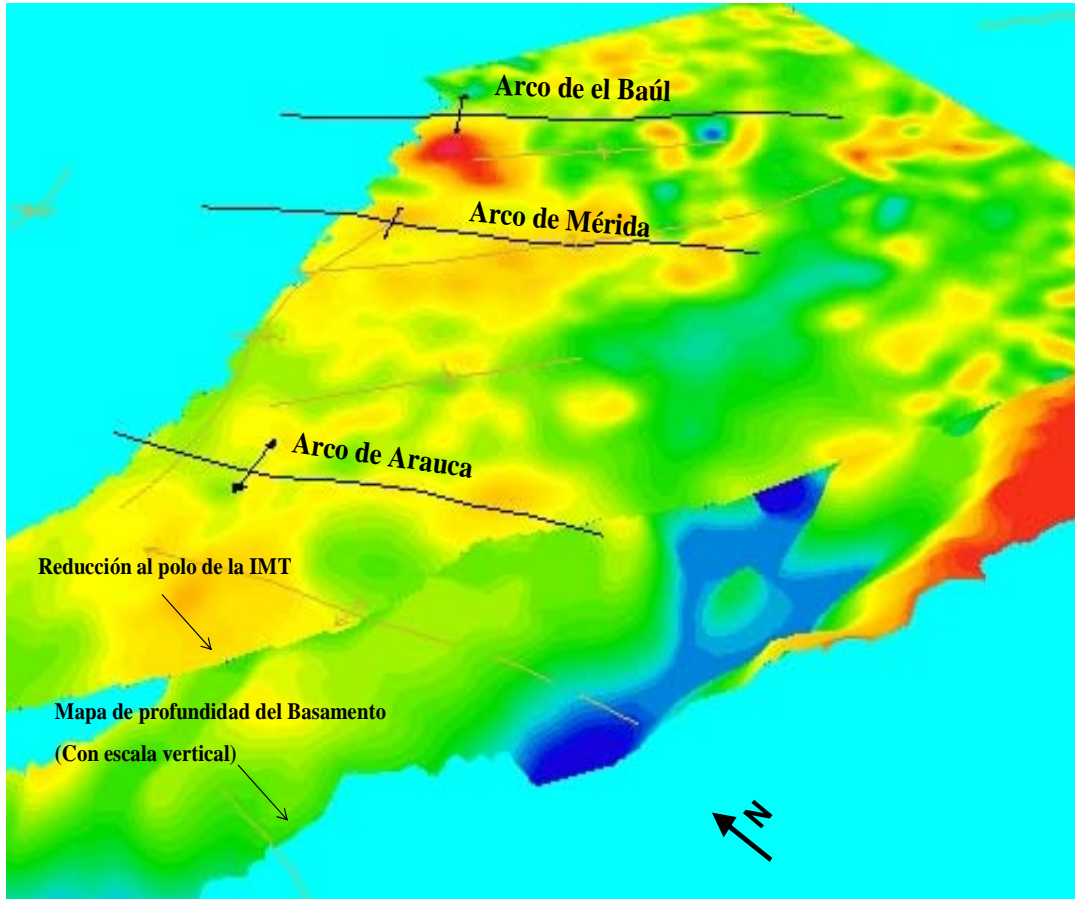


Figura 5.9 Perspectiva 3d de la ubicación de los Arcos propuestos en este trabajo y los propuestos por el proyecto VIPA, superpuesto al mapa de profundidad de basamento con escala vertical exagerada.

## 5.8 INTERPRETACIÓN BIDIMENSIONAL

### 5.8.1 Selección de las líneas Sísmicas utilizadas para la construcción del perfil NE.

Para la construcción del perfil gravimétrico y magnético se contó con un transecto regional (T-11), el cual consta de 9 líneas sísmicas, cuyas coordenadas UTM de ubicación se pueden observar en la tabla 5.

Nombre de la Línea	Dirección de la línea	Punto 1 UTM (metros)	Punto 2 UTM (metros)
AP-86A-10	Oeste – Este	190.357 E, 793.168 N	249.195E, 793.998 N
85-AP-K	Sur – Norte	249.195 E, 793.998 N	252.183E, 815.426 N
AP-86B-B	Sur – Norte	252.183E, 815.426 N	255.321 E, 829.530 N
AP-86B-1	Nor – Este	255.321 E, 829.530 N	288.635 E, 843.662 N
ABR93-A06	Nor – Este	288.635 E, 843.662 N	356.005 E, 907.429 N
BAR92A-16	Nor – Este	356.005 E, 907.429 N	385.548 E, 935.295 N
BAR90A-14	Nor – Este	385.548 E, 935.295 N	406.051 E, 954.233 N
BAR90A-23	Nor – Oeste	406.051 E, 954.233 N	413.941 E, 946.583 N
BE94-A10	Nor – Este	413.941 E, 946.583 N	500.823 E, 1.024.037 N

Tabla 5.1 Ubicación de las líneas sísmicas utilizadas para la construcción del perfil NE.

El resultado de la unión de los puntos mostrados en la tabla 5.1, da como resultado el perfil regional NE el cual se muestra a continuación

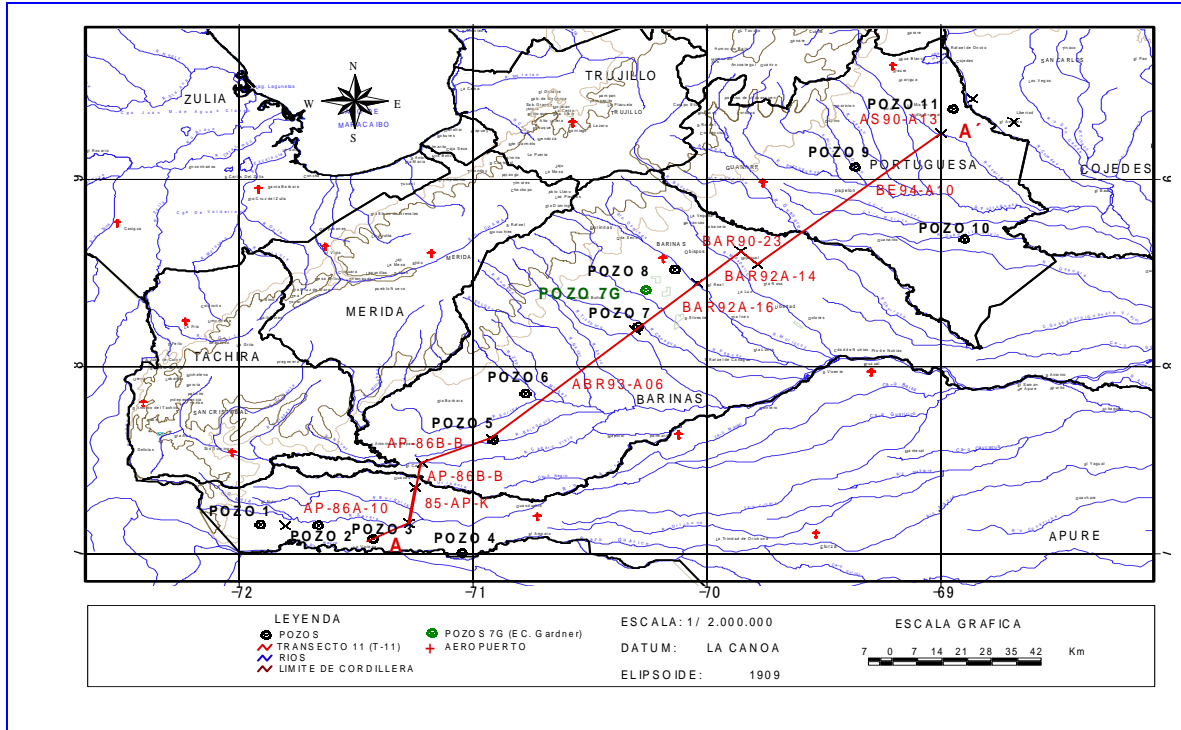


Figura 5.11 Ubicación del perfil NE (T-11) utilizado en el modelaje y de los pozos suministrados por PDVSA.

### 5.8.2 Análisis espectral del perfil NE, aplicado al mapa de Anomalía de Bouguer.

Con la ayuda del análisis espectral aplicado al transecto sísmico (perfil NE), se estimó la profundidad a la que se encuentran las fuentes de anomalías gravimétricas.

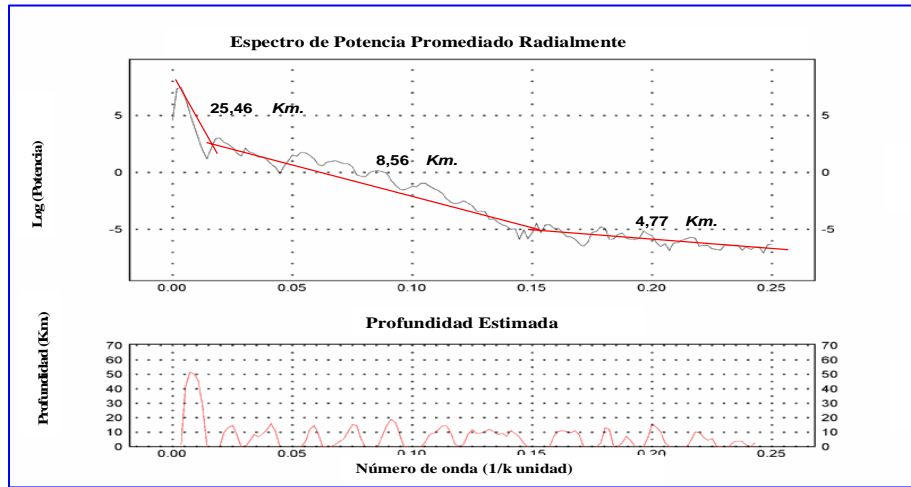


Figura 5.13 Análisis Espectral de la anomalía de Bouguer sobre el perfil NE.

En el perfil NE figura 5.11 se observan tres fuentes principales, la primera y más profunda se encuentra a 25,46 km, la cual podría tratarse de la interfase corteza inferior-moho, la segunda es la zona intermedia a 8,56 km corresponde al tope del basamento paleozoico (ígneometamórfico), hacia la zona más NE del perfil cerca de la depresión de Arauca y la menos profunda a 4,77 km otro contacto del mismo basamento pero en la parte central (depresión de Capitanejo).

### 5.8.3 Análisis espectral del perfil NE, aplicado al mapa de IMT.

Con la ayuda del análisis espectral aplicado al transecto sísmico (perfil NE), se estimó la profundidad a la que se encuentran las fuentes de anomalías magnéticas presentes en el mapa de reducción al polo de los datos del IMT.

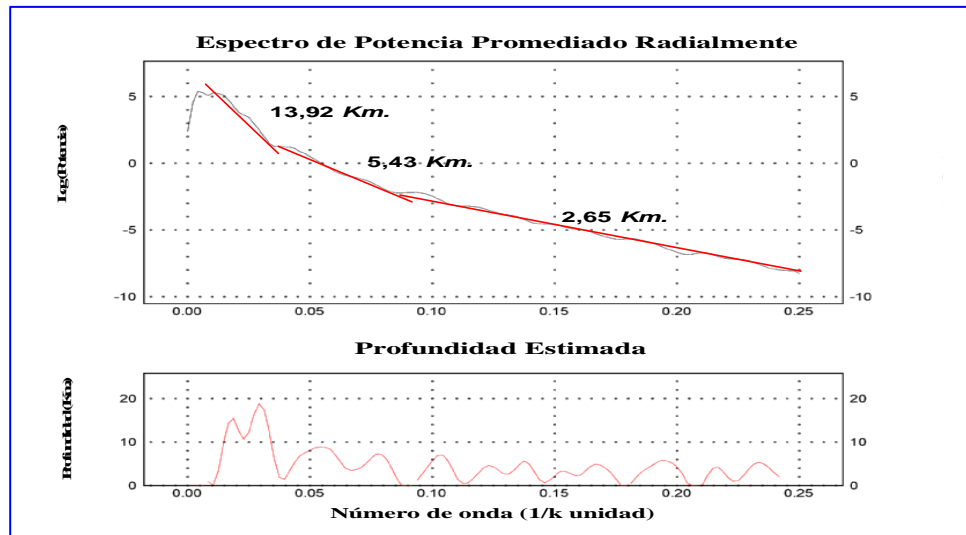


Figura 5.15 Análisis Espectral del mapa de IMT sobre el perfil NE.

En el análisis espectral de la figura 5.15, se observan tres fuentes anómalas, la primera y más profunda se ubica a 13,92 km, y se trata de cambios regionales en las propiedades magnéticas de las unidades que conforman el basamento, ya que es de comprender que en este perfil regional el basamento no se comporta igual mineralógicamente en 350 km; la segunda zona intermedia a 5,43 km corresponde al contacto entre la tectonosecuencia sedimentaria del Cretácico inferior y el basamento ígneo metamórfico específicamente el flanco suroeste del Arco de Arauca, y la menos profunda a 2,65 km corresponde a la influencia magnética del granito rosado de El Baúl, el cual aflora en algunas zonas.

#### 5.8.4 Restricciones para el Modelado Gravimétrico y Magnético.

#### 5.8.5 Transecto Sísmico interpretado en profundidad

La unión de los puntos de la tabla 5 da como resultado el perfil NE el cual coincide con el t-11 (figura 5.17), con longitud de 350 km, este fue procesado e interpretado por ESTUDIOS REGIONALES PDVSA, y suministrado con el fin de obtener un

mejor amarre a la hora de realizar el modelo. Este transecto se interpretó basándose en el código de tectonosecuencias del proyecto VIPA PDVSA, cuya leyenda se muestra a continuación (Fig 5.16).

<b>CÓDIGO DE TECTONOSECUENCIAS VIPA</b>		
Secuencia	Epoca	Edad (Ma)
<b>SP1</b>	<b>PLIOCENO-PLEISTOCENO</b>	<b>5.3- RECIENTE</b>
<b>SM3</b>	<b>MIOCENO TARDIO</b>	<b>11.2-5.3(5.9)</b>
<b>SM2</b>	<b>MIOCENO MEDIO</b>	<b>16.6-11.2(5.4)</b>
<b>SM1</b>	<b>MIOCENO TEMPRANO</b>	<b>23-16.6(6.4)</b>
<b>SE4</b>	<b>EOCENO TARDIO-OLIGOCENO</b>	<b>37-23(14)</b>
<b>SE3</b>	<b>EOCENO MEDIO</b>	<b>43.5-37(6.5)</b>
<b>SE2</b>	<b>EOCENO MEDIO</b>	<b>52-43.5 (8.5)</b>
<b>SE1</b>	<b>EOCENO TEMPRANO</b>	<b>58-52 (6)</b>
<b>SK2</b>	<b>CRETACICO TARDÍO- PALEOCENO</b>	<b>75-58 (17)</b>
<b>SK1</b>	<b>CRETACICO TEMPRANO A TARDÍO</b>	<b>124-75(49)</b>

Figura 5.16 Código de tectonosecuencias del proyecto VIPA PDVSA

Este transecto aporta la información geológica necesaria para dicho modelo, la cual se complementa con la profundidad de cada una de estas tectonosecuencias.

### 5.8.6 Información de Pozos y Registro Tectóno-estratigráfico

Para una mejor calibración de los modelos, se contó con información de pozos y de un registro tectono-estratigráfico (figura 5.18) del mismo t-11, suministrado por PDVSA (VIPA), el cual incluye las tectonosecuencias utilizadas para ese proyecto, y a su vez el detalle estratigráfico de cada una de las mismas.

### **5.8.7 Modelado del Perfil NE.**

El control geológico del perfil se realizó sobre la base de la geología y espesores interpretados en el transecto sísmico t-11 (figura 5.17), el cual coincide con el perfil NE y complementándolo con la información obtenida por el análisis espectral.

Dicho transecto cuenta con el escenario geológico requerido para alcanzar los objetivos planteados al inicio de este trabajo; entre los cuales aparecen los dos Arcos a determinar Arauca y Mérida, los cuales están separados en la parte central del perfil por la depresión de Capitanejo, en el extremo A' se encuentra la depresión de Guarumen y el Arco de El Baúl.

El modelaje gravimétrico y magnético se realizó con el software GM-SYS de GEOSOFT, basado en el método clásico de láminas poligonales desarrollado por Talwani (1959). Este método permite mediante cambios en la forma y densidades de las láminas ir ajustando el modelo hasta obtener una solución.

El GM-SYS utiliza como parámetros variables, la densidad, la susceptibilidad magnética y la magnetización (expresada en gauss). El Campo Magnético Total del área (en gammas) resultó ser de 35423,8, la inclinación 36.52 ° y la declinación magnética -5.2°.

Con las densidades y parámetros magnéticos de cada cuerpo y el modelo geológico en profundidad se procedió al modelaje del subsuelo, con el fin de generar las respuestas teóricas y compararlas con las observadas en los perfiles.



Para obtener las densidades de los diferentes secuencias involucradas se utilizaron las velocidades de ondas compresionales  $v_p$ , del pozo 7G (figura 5.11) mediante la ecuación de Gardner. Esta ecuación relaciona la densidad  $d$ , con la velocidad de ondas compresionales (Gardner *et al.*, 1974).

$$d = 0,31 * (Vel)^{0,25}, \quad (5.1)$$

donde la densidad viene expresada en gr/cc y la velocidad en m/seg.

<b>TOPE ESTRATIGRÁFICO</b>	<b>VELOCIDAD (m/seg)</b>	<b>DENSIDAD (gr/cc)</b>
Plioceno-Pleistoceno	3150.32	2,35
Mioceno Tardío	3450.85	2,37
Mioceno Medio	3710.15	2,41
Mioceno Temprano	3850	2,44

Tabla 5.1 Velocidades sísmicas utilizadas y las densidades obtenidas de la ecuación de Gardner

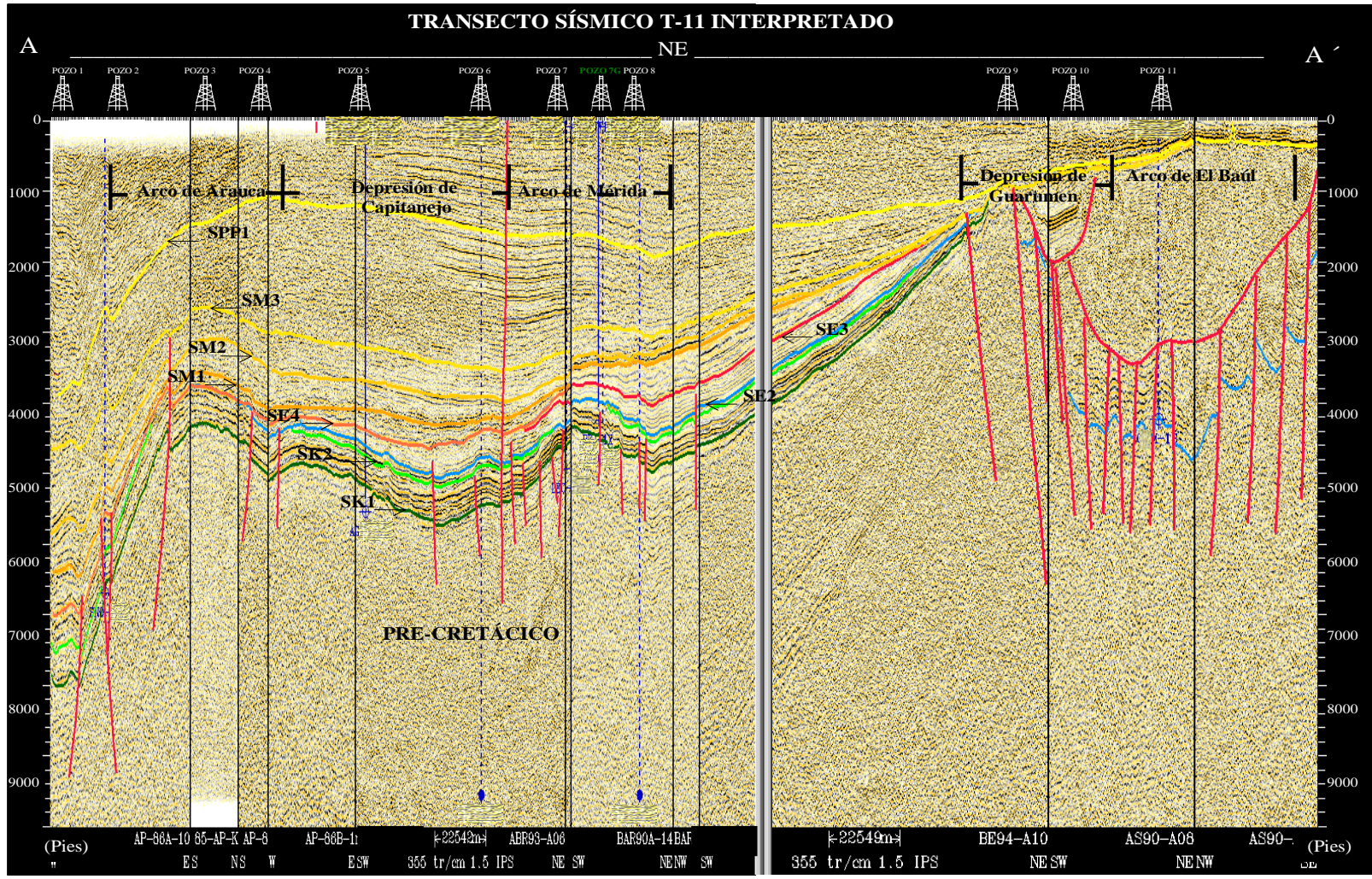


Figura 5.17 Transecto Sísmico Regional T-11 Interpretado en profundidad a partir de Tectonosecuencias del Proyecto VIPA PDVSA

## MARCO TECTÓNO-ESTRATIGRÁFICO

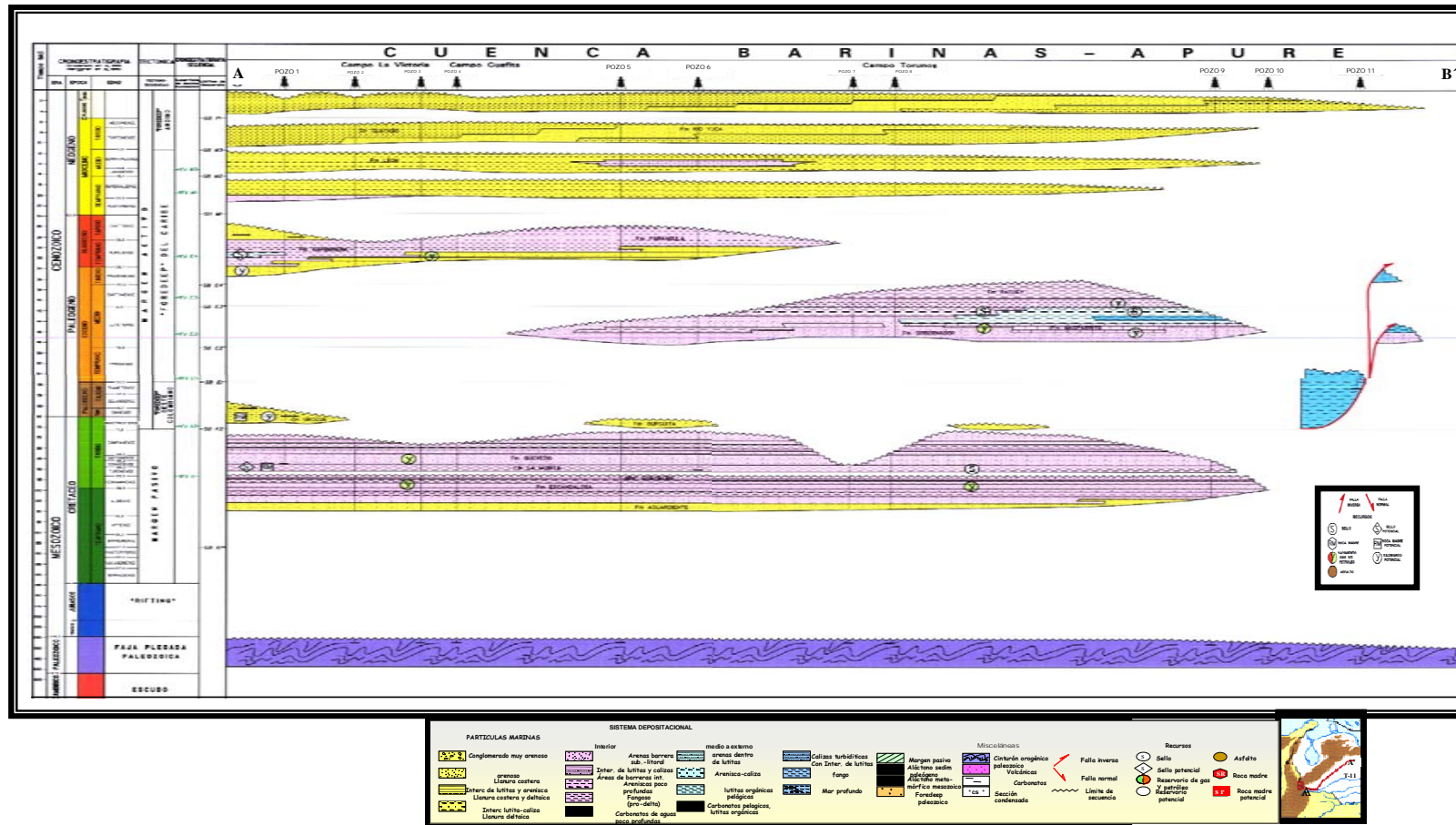


Figura N° 4.7 Marco Tectónico- Estratigráfico del T-11. Elementos claves del sistema petrolífero de las cuencas venezolanas para una mejor construcción chronoestratigráfica. Tomado de Di Croce (2000).

TECTONOSECUENCIA	Cuerpo N°	UNIDAD LITOLÓGICA	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Susceptibilidad Magnética (c.g.s)
<b>SPP1</b>	12	FM RIO YUCA (areniscas)	2.3	-
		FM PARANGULA (areniscas de grano fino)		
<b>SM3</b>	10	FM GUAYABO areniscas	2.35	-
<b>SM2</b>	9	FM LEÓN lutitas grises a negras	2.40	-
<b>SE4</b>	8	FM PAGUEY lutitas marinas	2.45	-
<b>SE3</b>	7	FM PAGUEY areniscas de grano fino	2.5	-
<b>SE2</b>	6	FM MASPARRITO Caliza arrecifal	2.55	-
		FM GOBERNADOR areniscas cuarzosas		
<b>SK2</b>	5	G... OROCUE lutitas	2.60	-
		FM BURGUITA areniscas micáceas		
<b>SK1</b>	4	FM. QU EVEDO areniscas	2.68	-
		FM LAMORITA lutitas de color gris oscuro		
		FM ESCANDALOSA areniscas macizas cuarzosas		
		FM AGUARDIENTE areniscas calcáreas duras		
<b>BASAMENTO</b>	3	BASAMENTO PALEOZOICO (IGNEOMETAMÓRFICO) Sienitas, granito	2.7	0.003
	a			.00008
	b			.003
	c			.00025
	d			.025
	e			.054
	f			.000025
	g			.035
h	.000014			
<b>Corteza inferior</b>	2	Corteza inferior	2.9	0.001
<b>Manto</b>	1	Mnto	3.1	0.006

Figura 5.19 Característica de cada una de las tectonosecuencias utilizadas en el modelo sin modificar.

### 5.8.7 Análisis del Modelo

Debido a que, para el ajuste del modelo se contó con un transecto sísmico de la misma orientación del perfil, las secuencias sedimentarias no se modificaron, sólo se le asignaron las densidades anteriormente señaladas.

En cuanto a la respuesta gravimétrica, está ajustó bastante en la parte central del perfil, específicamente en la Depresión de Capitanejo y Arco de Mérida, el problema estuvo en los extremos del perfil, donde la curva calculada se disparó por el orden de los 40 mgales de más, específicamente en la zona influenciada por los granitos rosados del Arco de El Baúl, el otro defasaje ocurrió hacia el flanco SO del Arco de Arauca precisamente donde comienza la depresión de Arauca, aquí la diferencia fue de -10 mgales aproximadamente, en cuanto a las crestas del Arco de Mérida y Arauca estas ajustaron muy bien.

En lo que respecta a la curva calculada en el IMT, el error fue mayor, puesto que con la sísmica suministrada no se tenía detalle de lo que acontecía en el basamento (poca resolución), sólo se tenía control del tope más no de la configuración interna al cual se le asigno una susceptibilidad de 0,003 unidades c.g.s, por referencias de muestras tomadas del grupo Iglesias. Es de acotar entre el Arco de Mérida y el Baúl la curva presentó un aumento que corresponde con la geometría digitaliza del tope del basamento.

Para tratar de ajustar la curva magnética se modeló la corteza inferior y el manto, con valores de 0.001 y 0.006 unidades c.g.s respectivamente. Para esta respuesta se contó con espesores promedios de 15 km y 20 km.

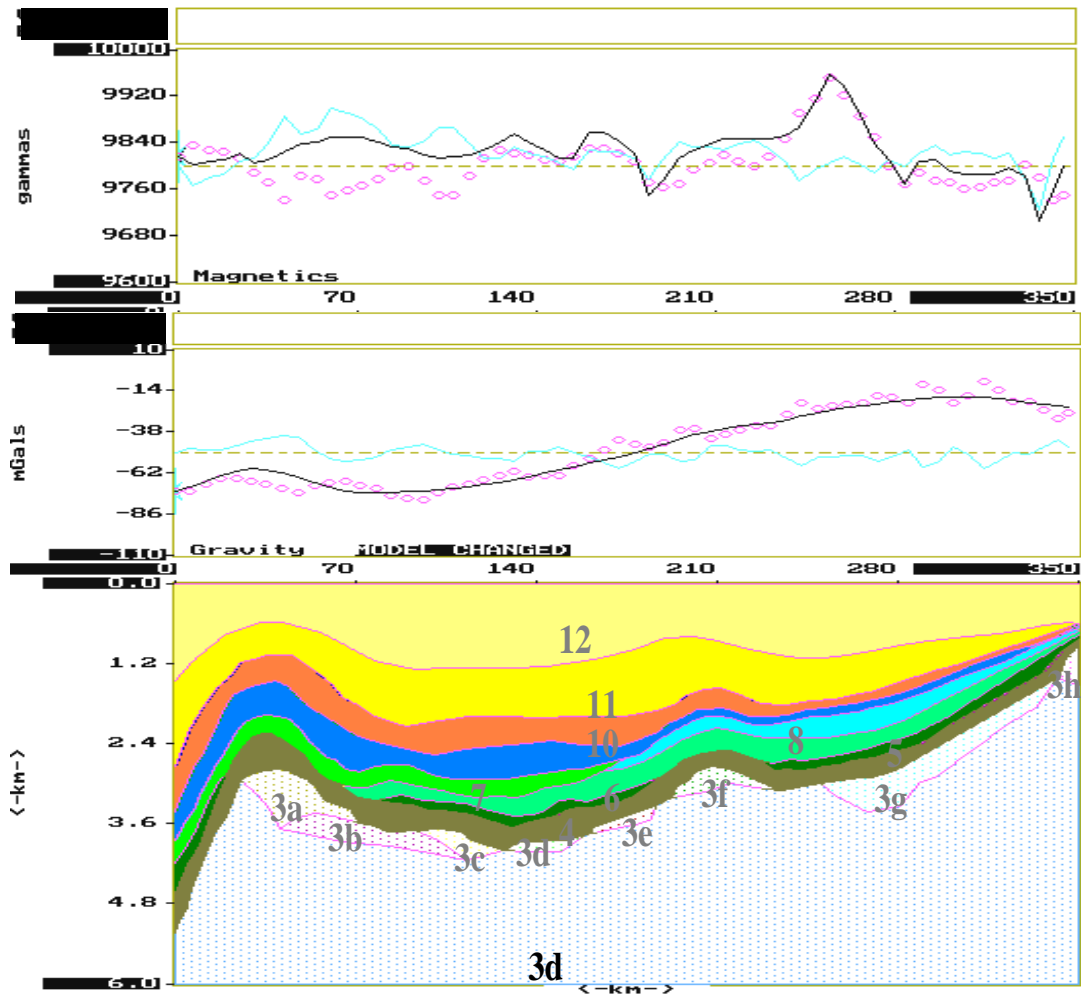


Figura 5.12 Modelo de la Anomalia de Bouguer y del IMT del perfil NE (t-11).

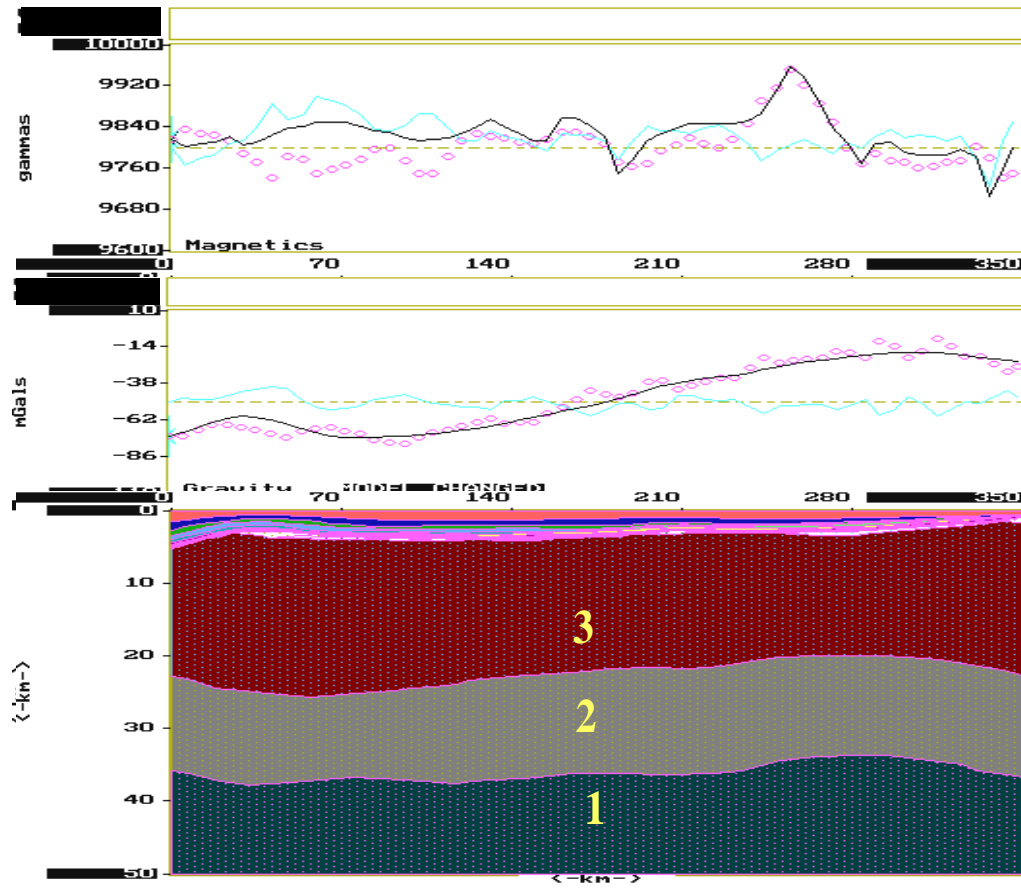


Figura 5.12 Modelo de la Anomalía de Bouguer y del IMT del perfil NE (t-11), representando a la corteza inferior, corteza superior y el Manto.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones determinadas a partir del análisis de los resultados:

1. La orientación preferencial en el mapa de anomalía de Bouguer, Residual y RTP es NE, en concordancia con la orientación del mayor evento geológico de la zona, cordillera andina, a la cual se le atribuye la formación de ambas cuencas producto de la flexión de la litosfera.
2. En el mapa de RTP aparecen curvas de gradiente muy suave, con baja respuesta magnética, que limitan la geometría de la Cuenca de Barinas-Apure. Cortando a la cuenca aparecen curvas perpendiculares al orógeno, del orden de los 9900 gammas, los cuales contrastan con los de la cuenca de unos 9000 gammas. Estos cambios están asociados a la presencia de los Arcos.
3. Siendo el objetivo del Trabajo Especial de Grado la definición de las estructuras a nivel de basamento (Arco de Arauca y Mérida), se interpreto el mapa de anomalía residual, en el que fueron removidos los efectos regionales producidos por la Cuenca de Maracaibo y la depresión de los llanos colombianos.
4. Existe una distribución asimétrica de espesores sedimentarios en el subsuelo, la cual se encuentra desplazada del eje de la cordillera Andina hacia el Nor-Oeste.
5. El mapa de anomalía residual deja al descubierto la influencia de la estructura denominada Graben de Nutrias con valores del orden de 12 mgales; esta estructura está asociada también a la subcuenca de Apure, la cual no se apreciaba en el mapa de anomalía de Bouguer.
6. En lo que respecta a la información suministrada por el mapa de basamento reconstruido del levantamiento de GEOTERREXM, se concluye que la estructura más profunda del área es la subcuenca de Apure con 20.000 pies y no la fosa de Barinas que alcanza los 15.000 pies.



7. El mapa de RTP aportó información sobre la presencia de la cocina Eocena, la cual se sitúa entre los Arcos de Arauca y Mérida, y está representada por un alto valor magnético y un mínimo en la profundidad del basamento.

Como recomendación se sugiere, realizar una campaña de adquisición con el fin de rellenar las grandes áreas ausentes de estaciones gravimétricas, específicamente al norte del río Arauca. Igualmente se propone un estudio integrado de detalle sobre el Graben de Nutrias y el de San Fernando, puesto que se cuenta con datos sísmicos pero no se ha realizado un estudio gravimétrico que permita ver la configuración interna.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

Alberdi, M., R. Tocco y F. Parnaud. (1994). Análisis geológico integrado de las cuencas de Barinas y Maracaibo. Síntesis Geoquímica de Rocas. INT-02829, 94. INTVEP, S.A., Los Teques, 34-46.

Audemard J, D.(1991). Tectonics of Western Venezuela.. PhD Thesis. Rice University, Houston, USA, 78p.

Bhattacharyya, B. (1966). Continuous spectrum for the Total-Magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. Geophysics.

Bellizzia, A y N. Pimentel. (1993). Terreno Mérida: Un bloque alóctono Herciniano de la Cordillera de Los Andes de Venezuela, Memorias, II Jornadas Científicas, 55 Aniversario Escuela de Geología, Minas y Geofísica, 228-241.

Canavos G, (1988). Probabilidad y estadística. Aplicaciones y Métodos. Edit McGraw-Hill, México, 450p.

Cantos F, J. (1974). Tratado de Geofísica Aplicada. Edit. Litoprint, España, 520 p.

Chaplet, M., y J. Stephan. (1998). Proyecto Análisis de Cuenca / Flanco Surandino Reinterpretación Radar y Sísmica del mapa geológico. Interferencia tectónica entre Andes meridionales (Estados Táchira-Apure-Barinas-Venezuela) y Cordillera Oriental (Departamento Norte de Santander- Colombia). Informe Interno Aguasuelos para PDVSA. 42 pp.

Chigné N., (1996). Proyecto EPAB. Evaluación Petrolera de Barinas-Apure. Gerencia General de Geología. Gerencia de Exploración. Corpoven S.A. Informe 007701. 95p.

Chuvieco, E. (1990) Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp, S.A. Madrid, España. 350p.

De Toni, B., D. Lourerio, C. Márquez y B. Colletta. (1994). Eventos tectónicos en la Cuenca de Barinas – Apure. Memoria del V Simposio Bolivariano de Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Puerto La Cruz. Marzo 1994. 311 – 313 pp.

Dobrin, M.B. (1960). Introducción a la Prospección Geofísica. Edit. McGraw Hill, New York, 630 p.

Drury, S.A. (1993). Image Interpretation in geology. Segunda edición. Editorial Chapman & Hall. Londres. Pp 29, 69-109.

Erdas Imagine Inc. (1999). v8.5 (Erdas). (Programa)

Fernández, F., J. Penott y H. Passalacqua (1994). Análisis Geológico integrado de las cuencas de Barinas – Maracaibo. Estudio gravimétrico y magnetométrico. NTEVEP, S.A. Departamento de Ciencias de la tierra. Caracas. 10-69 pp.

Feo-Codecico G., (1972). Contribución a la Estratigrafía de la Cuenca de Barinas-Apure. Cuarto Congreso Geológico Venezolano. Tomo II. Bol-Geol. Pub. Esp. N° 5, 773-795.

Figueroa, L., E. Gil, A. Daal y H. Peraza (1996). Análisis Estructural- Estratigráfico del Área de Barinas Norte (Cuenca de Barinas) y su importancia en la exploración de hidrocarburos. V Simposio Bolivariano, Exploración Petrolera en la Cuenca Subandina. Pto la Cruz, Venezuela. 73-84 pp.

Funes, D., M. Vivas y M. Morales (1996). Posibilidades exploratorias en el área Sur Occidental del Estado Táchira y Apure Noroccidental. Gerencia General de Geología. Gerencia de Exploración. Corpoven S.A. 86 pp

Funes, D., P. López, F. Castillo, J. Mijares y A. Finno (1997). Estudio Geológico Geofísico Integrado de la región Táchira Sur Oriental-Apure Occidental.

Fierro, I. S (1979). Geología de la región del Caparo, Estados Barinas y Mérida. Ministerio Energía y Minas; Dirección Geología: División Exploración Geológica, Zona Occidental: Memoria, 71 pp.

García, J. (1980). Correlación estratigráfica y síntesis paleoambiental del Cretáceo de los Andes Venezolanos. Bol. Geol., Caracas, XIV (26):3-88.

Garza, T. (1998). Probabilidad y estadística. Un enfoque intuitivo con apoyo en Matemática. Universidad Nacional Autónoma de México. 305p.

GEOSOFT (1996) Manual del usuario. MAGMAP y GM -SYS.

González de Juana, C., J. Arozena y X. Picard-Cadillat. (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas; Foninves Ediciones., Caracas, 2 vol., 1051 p.

GRIDSTATPRO Inc. (2004). GRIDSTADPRO v.2004, Geoestatistical Modeling. (Programa).

Instituto de Ingeniería CETEC. (1995). Aplicación de Procesamiento Digital de Imágenes Radar-Satélite en Geología, Geomorfología, Uso de la Tierra y Vegetación. Informe.

Kiser, G. D. (1966). Geología de la cuenca de Barinas. Informe técnico CORPOVEN.2-15.

Kiser, G. D. (1989). Relaciones Estratigráficas de la Cuenca Apure / Llanos con áreas adyacentes. Venezuela Suroeste y Colombia Oriental. Sociedad Venezolana de Geólogos. N° 1. Monografías SVG. Editorial Dialit, C.A, 5-71.

Kunding, E. (1938). Las rocas precretáceas de Los Andes Centrales de Venezuela, con algunas observaciones sobre su tectónica. Bol. Geol. Min. Caracas, T.2: 21-43.

Léxico Estratigráfico (1996) Electrónico de Venezuela. Documento patrocinado por Petróleos de Venezuela, S.A.

Lugo, J. (1994). Arco de Mérida, Control tectónico sobre la sedimentación desde el Mesozoico tardío hasta el Cenozoico temprano en el Occidente de Venezuela. V Simposio Bolivariano. Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas. Memoria. 291-310.

Meneven S. A. (1981-1982). Interpretación aeromagnética del Basamento de la Cuenca Barinas-Apure. Mapas inéditos. Escala 1: 100.000.

Mironov, E. (1977). Prospección Gravimétrica. London University. 320 p.

Nettleton, L. (1976). Gravity and Magnetics in oil prospecting. Edit. McGraw Hill, New York, 448 p.

Neuron Data Inc. (1999) ArcView Gis v3.2 (Programa)

Orihuela, N.(1990). Estudio Gravimétrico de la zona nor-central de la cordillera de la Costa. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela, 124 p.

Ortega J. F., A. Van Erve y Z. Monroy (1987). Formación Guafita, nueva unidad litoestratigráfica del Terciario en el subsuelo de la Cuenca de Barinas-Apure. Venezuela Suroccidental. Soc. Venezolana Geol., Bol. 31: 9-35.

Osuna, S., y C. Giraldo (1993). Excursión Geológica al Flanco Sur- Andino. Barinas-Guanare. Gerencia General de Geología. Gerencia de Exploración. Evaluación de Áreas centro-Occidental, 37-42.

Parasnis, D. S. (1970). Principios de Geofísica Aplicada. Edit. Paraninfo. Madrid. 367 p.

Pierce, G.(1950). Geología de la Cuenca de Barinas. Bol. Geol. Publ. Esp. 3, 1: 214-276.

Portilla (1988). Relaciones estructurales y estratigráficas de la Cuenca Barinas-Apure. IV Congreso Venezolano de Geofísica, Memoria, 143-150.

Ruíz, F. (1989). Modelaje Gravimétrico de un perfil desde Altagracia de Orituco hasta el Distrito Federal. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela, Caracas,32-47.

Sabins, J. (1997). Remote Sensing Principles and Interpretation. Segunda Edición. Estados Unidos. 220-235.

Sánchez, H., D. Lourerio, C. Urbina, Z. Monroy, R. Arntein, L.E Rojas y C. López. (1995). Evaluación petrolera del Piedemonte Andino y áreas adyacentes en los Llanos Colombo-Venezolanos. Corpoven S.A. y Ecopetrol. Informe CDG N°007158, v.1.

Sistema de Información Geográfica. Manual Base, PDVSA 1999. 220 p.

Telford, W., M. Geldart, R. Sherrir y D. Keys. (1976). Applied Geophysics. London. Syndics of the Cambrige. University Press, 860 p.

Useche, A. (1977). Geología de las regiones San Cristóbal- Río Uribante-Río Caparo, estados Táchira, Barinas y Apure. II Congreso Latinoamericano de Geología; Tomo III, Caracas, 1769-1782.

Yoris, F., y M. Ostos. (1997). Geología de Venezuela. Wec, Evaluación de Pozos. Schulumberger. Cap I. 46 p.

Young, G. A. (1988). La Tectónica de la Cuenca Barinas-Apure, Venezuela. Interpretación Magnética detallada. III Simposio Bolivariano. Exploración Petrolera de las Cuencas Subandinas, Caracas, 963-990.

Young, A., A. Bellizia, H. Renz, F. W Johnson, R. H Robie y J. Max Vall (1956).  
Geología de las cuencas sedimentarias de Venezuela y de sus campos petrolíferos.  
Boletín de Geología; Publicación Especial; N° 2. Venezuela, 34-45.