

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO AEROMAGNÉTICO DE LA REGIÓN CENTRAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ, ESTADO ZULIA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Vargas, Carlos Antonio.

Caracas, Junio de 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO AEROMAGNÉTICO DE LA REGIÓN CENTRAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ, ESTADO ZULIA

TUTOR ACADÉMICO Prof: Inírida Rodríguez Millán

TUTOR INDUSTRIAL Ing: Octimio Gutiérrez

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Vargas, Carlos Antonio.

Caracas, Junio de 2002.

DEDICATORIA

A ese ser maravilloso que Dios me ha dado y ha inculcado en mi los valores para afrontar los retos pequeños y grandes que nos coloca la vida y sin dudar un segundo en ser mi padre y mi madre.

Máxima Vargas.

Gracias mamá.

AGRADECIMIENTOS.

INSTITUCIONAL

A la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Universidad Central de Venezuela, por permitirme realizar este Trabajo Especial de Grado para cumplir los requisitos exigidos, y de esta forma optar al título de Ingeniero Geofísico.

Quiero expresar mi agradecimiento al Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN), Departamento de Geofísica, adscrito al Ministerio de Energía y Minas (MEM) por darme la oportunidad de desarrollar mi Trabajo Especial de Grado.

ACADÉMICOS

Desde el terreno de lo personal un afectuoso y especial agradecimiento a mi tutora académica Prof. Inírida Rodríguez, por su asesoría y valiosos aportes en el desarrollo de este trabajo.

A mi tutor académico Prof. Ronny Meza, quien por compromisos personales no pudo continuar en el asesoramiento. Sus primeros pasos fueron un valioso aporte para marcar el rumbo de esta investigación.

Un reconocimiento al Prof. Ricardo Alezones por sus valiosas observaciones y sugerencias en la realización de este estudio.

Una nota de agradecimiento a la Prof. María Gabriela Castillo por sus importantes observaciones.

INDUSTRIAL

A mi tutor industrial Ing. Octímio Gutiérrez por aportar la idea e información necesaria, para llevar a cabo este trabajo y ofrecerme su sincera amistad.

Con gratitud mi agradecimiento al Ing. Alí Hernández por su aporte y sabias observaciones en este Trabajo Especial de Grado.

Mi reconocimiento y afecto por sus valiosos aportes en este estudio por parte de: Prof. Pedro León

Ing. Freddy Fernández

Lic. Nieves Nevado.

PERSONALES

A mi amigo y profesor Manuel García por su contribución y ayuda cuando más la necesité.

Con mucho aprecio y gratitud a la Lic. Morela de Castillo por su valiosa colaboración.

Debo reconocer con mucho agrado la deuda con mi compañera Yoasmali Barrios por su estímulo, confianza y ayuda.

Para mí colega Rosmari Usta un grato aprecio por su apoyo y ayudarme a dar los primeros pasos en este trabajo.

También debo mi reconocimiento al compañero Carlos Espinosa por su contribución en este trabajo, y muy especialmente a mis compañeros de tesis Ángel Erasmo y Franklin Tapias por sus observaciones y ayuda en el momento preciso.

Vargas, Carlos A.

ESTUDIO AEROMAGNÉTICO DE LA REGIÓN CENTRAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ, ESTADO ZULIA.

Tutor Académico: Prof. Inírida Rodríguez. Tutor Industrial: Ing. Octímio Gutiérrez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela Geología, Minas y Geofísica (Ingeniería Geofísica). Año 2002, 126 pag.

Palabras Claves.

Análisis espectral y geoestadístico, Perfiles Magnéticos, Modelado.

Resumen. El estudio que se presenta en este Trabajo Especial de Grado está orientado hacia la interpretación de datos aeromagnéticos del área ubicada en la parte central de la Sierra de Perijá, Estado Zulia, en una extensión aproximada a 4107 Km².

El objetivo principal es determinar las zonas potencialmente mineralizadas, integrando la información de datos aeromagnéticos, sísmica de pozos, geología de superficie y gravimetría, con el fin de proponer modelos geológicos consistentes con la información disponible y la evolución tectónica del área circundante. Para ello, se interpretaron tres perfiles magnéticos en sentido Noroeste – Sureste, con base en dos criterios fundamentales, la continuidad y el conjunto de cierres dipolares, y se determinaron de esa forma la orientación anisotrópica y la fuente anómala.

El modelaje gravimétrico y magnético se aplicó a los “tres perfiles” y con amarre al “perfil N° 1”. La interpretación integrada de los perfiles (“1”, “2” y “3”), permitió identificar y correlacionar las zonas exploratorias resaltantes en el área de Caño Tigre y la parte Oeste de Villa del Rosario, tal es el caso de evidencias de concentración de minerales en estas regiones.

El desarrollo de las zonas principales se determinó que está asociado a tres profundidades principales de la fuente anómala y de

orientación preferencial Noreste dentro de los cinturones de corrimiento de la Formación La Quinta que se encuentran asociado a la Falla Perijá y Cuibas. Se distinguen dos niveles profundos, uno perteneciente a corteza y otro al manto, encontrándose que la interfase de Mohorovicic se ubica en una profundidad promedio de 30 km.

El ajuste del modelaje gravimétrico y magnético muestra de manera consistente resultados relacionados con la repetición de la secuencia sedimentaria en las estructuras someras y profundas que aquí se proponen.

	Pag.
ÍNDICE	Pag.
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	vi
Índice	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de Tablas	xv
 CAPÍTULO I	 1
 1 INTRODUCCIÓN	 1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivo general	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Ubicación del área de estudio	4
1.5 Trabajos previos	5
1.5.1 Estudios realizados sobre mineralizaciones de cobre	5
1.5.2 Levantamiento aeromagnético en la zona de estudio	7
1.5.3 Líneas sísmicas en la zona de estudio	8
1.5.4 Mapa de anomalías de Bouguer del área de estudio	12
1.5.5 Estudios geoquímicos y petrográficos del área	13
1.6 Importancia del estudio	13
1.7 Evaluación del proyecto	14
 CAPÍTULO II	 15
 2 GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL	 15
2.1 Sierra de Perijá	16

2.2 Estratigrafía regional de la Sierra de Perijá	17
2.3 Terrenos del Paleozoico	17
2.3.1 Formación Los Guineos	19
2.3.2 Formación Caño Grande	19
2.3.3 Formación Caño del Oeste	19
2.3.4 Formación Campo Chico	19
2.3.5 Formación Río Palmar	20
2.3.6 Formación Palmarito	20
2.4 Terrenos Mesozoicos “Triásico – Jurásico”	20
2.4.1 Sistemas Triásico y Jurásico	21
2.4.2 Litofacies de Perijá Central en el Jurásico	22
2.5 El Cretácico	24
2.5.1 Litofacies de Perijá en el Cretácico	25
2.6 Terrenos del Cenozoico	27
2.6.1 Formación Guasare	28
2.6.2 Formación La Sierra	28
2.6.3 Grupo El Fausto	28
2.6.4 Formación Los Ranchos	28
2.6.5 Formación El Milagro	28
2.7 Evolución tectónica de la Sierra de Perijá	29
2.8 Aspectos más significativos de la geología local del área de estudio	31
CAPÍTULO III	33
3 MARCO TEÓRICO	33
3.1 Campo magnético	33
3.1.1 Elementos del campo magnético terrestre	35
3.1.2 Variaciones temporales del campo geomagnético	36
3.2 Prospección magnética	36
3.2.1 Adquisición de datos magnetométricos	37

3.3 Susceptibilidad magnética de las rocas	38
3.4 Anomalías magnéticas	40
3.4.1 Mapas magnéticos	40
3.4.2 Interpretación de Anomalías Magnéticas	41
3.4.3 Modelaje magnético	41
CAPÍTULO IV	43
4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO, GEOESTADÍSTICO Y ESPECTRAL DE LOS DATOS	43
4.1 Análisis estadísticos de los datos aeromagnéticos	43
4.1.1 Estimaciones	44
4.1.2 Fenómenos aleatorios	45
4.2 Análisis geoestadísticos de datos	46
4.3 Análisis espectral de datos geofísicos	47
4.3.1 Análisis de longitud de onda	48
4.3.2 Método de análisis	48
4.3.3 Descripción del algoritmo de WINograd de la transformada rápida de Fourier (FFT)	50
CAPÍTULO V	52
5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS	52
5.1 Fuente de los datos aeromagnéticos	52
5.2 Reprocesamiento de los datos aeromagnéticos	52
5.3 Análisis de la Estadística Descriptiva para la población total de los datos magnéticos	57
5.4 Análisis de la Estadística Descriptiva para una muestra aleatoria	

de los datos magnéticos	65
5.5 Análisis geoestadístico de los datos magnéticos	71
<u>CAPÍTULO VI</u>	76
6 RESULTADOS	76
6.1 Mapa aeromagnético de componente total con criterios geoestadísticos	76
6.2 Análisis espectral aplicado a cada uno de los perfiles	79
6.3 Modelaje magnético 2D	83
6.3.1 Restricciones para el modelaje magnético	83
CONCLUSIONES	95
RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	97
Apéndices	103
Apéndice A: Conceptos de estadística básica o descriptiva	104
Apéndice B: Consideraciones sobre geoestadística	109
Apéndice C: Tratamiento matemático del análisis espectral	120
Anexo	126
Nº 1: Mapa de anomalía magnética total	127

LISTA DE FIGURAS

Fig. Nº		Pag.
1.1	Mapa de ubicación de la zona de estudio	5
1.2	Mapa de mineralizaciones de Cobre. Sierra de Perijá	6
1.3	Ubicación de las cuatro hojas de contornos magnéticos	7
1.4	Líneas sísmicas de localización del pozo SNS – 1X	9
1.5	Columna estratigráfica del pozo SNS - 1X	10
1.6	Interpretación sección sísmica FNP-92-24 migrada en profundidad	11
1.7	Mapa de anomalías de Bouger. Sierra de Perijá	12
2.1	Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Sudamérica en los cuales hay rocas precámbricas	15
2.2	Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el Norte de Suramérica en los cuales hay rocas precámbricas	18
2.3	Distribución de las rocas jurásicas que afloran en la Sierra de Perijá, Venezuela	21
2.4	Cuadro de unidades litológicas del Triásico – Jurásico conocidas en Venezuela	21
2.5	Distribución de las facies sedimentarias durante el Nocomiense–Albiense (Cretácico) al norte del Cratón	

de Guayana	25
2.6 Relaciones tectónicas entre la Sierra de Perijá y la Sierra de Perijá meridional. Intervalo Machiques, al norte; Rio Lara	30
2.7 Mapa base de la geología local de la Sierra de Perijá, Edo. Zulia	32
3.1 Campo Magnético de la Tierra.	33
3.2 Líneas de fuerza en una barra imantada	34
3.3 Parámetros del Campo Magnético	35
4.1 Salida gráfica del programa Magmap	51
5.1 Gráfico de barras de los datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia	58
5.2 Diagrama de caja de los datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia	60
5.3 Gráfico Q – Q normal de la variable anomalía magnética. Datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia	63
5.4 Gráfico Q – Q normal sin tendencia de la variable anomalía magnética. Datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia	63
5.5 Histograma con curva normal, datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia	64
5.6 Diagrama de ubicación de los puntos seleccionados	

muestra aleatoria seleccionada	65
5.7 Gráfico de barras de los datos magnéticos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado Zulia	66
5.8 Diagrama de caja, datos magnéticos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado Zulia	67
5.9 Gráfico Q – Q normal de la variable anomalía magnética. Datos magnéticos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado Zulia	79
5.10 Gráfico Q – Q normal sin tendencia de la variable anomalía magnética. Datos magnéticos aleatorios	79
5.11 Histograma con curva normal. Datos magnéticos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado Zulia	70
5.12 Mapa de variograma de tendencia anisotrópica	72
5.13 Roseta de distribución espacial	72
5.14 Modelo de variograma en la dirección de anisotropía de 29° de la población de datos magnéticos	73
5.15 Modelo de variograma en la dirección de anisotropía de 60° de la población de datos magnéticos	73
5.16 Elipse de Anisotropía	74
5.17 Curva de ajuste del variograma exponencial	75

6.1 Mapa aeromagnético de componente total con criterios geoestadísticos de la Sierra de Perijá, Estado Zulia	77
6.2 Mapa de intensidad magnéticas regional	78
6.3 Gráfica de ajuste polinómico a la intensidad magnética regional	79
6.4 Resultado del análisis espectral para el perfil N° 1	80
6.5 Resultado del análisis espectral para el perfil N° 2	81
6.6 Resultado del análisis espectral para el perfil N° 3	82
6.7 Modelaje gravimétrico -magnético del perfil N° 1	91
6.8 Modelaje gravimétrico -magnético del perfil N° 2	92
6.9 Modelaje gravimétrico -magnético del perfil N° 3	93
6.10 Modelaje gravimétrico -magnético del perfil N° 1, que ilustra la Estructura profunda del área	94

LISTA DE TABLAS

Tabla N°.		Pag.
1.1 Coordenadas de las hojas de datos aeromagnéticos		07
1.2 Profundidades de los topes geológicos para los pozos 106 y 113		11
5.1 Coordenadas de ubicación de los tres perfiles magnéticos		54
5.2. Medidas de Tendencia Central. Datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia		58
5.3 Resumen del procesamiento de datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia		59
5.4 Resumen de la estadística descriptiva. Datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado Zulia		59
5.5 División de la población total a través de los Percentiles. Datos magnéticos totales , Sierra de Perijá, Estado. Zulia		61
5.6 Prueba de normalidad para la variable anomalía magnética (GAMMAS). Datos magnéticos totales, Sierra de Perijá, Estado. Zulia		62
5.7 Prueba de Kolmogorov – Smirnov de la anomalía Magnética. Datos magnéticos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado Zulia		62
5.8 Medidas de tendencia central de los datos magnéticos de la muestra aleatoria, Sierra de Perijá, Estado Zulia		66
5.9 Resumen del procesamiento para los datos aleatorios, Sierra		

de Perijá, Estado Zulia	66	
5.10	Resumen de la estadística descriptiva. Datos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado Zulia	67
5.11	División de la población aleatoria a través de los Percentiles. Datos magnéticos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado. Zulia	68
5.12	Prueba de normalidad para la variable anomalía magnética. Datos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado. Zulia	68
5.13	Prueba de Kolmogorov – Smirnov para la anomalía magnética. Datos aleatorios, Sierra de Perijá, Estado. Zulia	68
5.14	Ajuste de los modelos de variogramas	74
6.1	Topes geológicos de las diferentes formaciones en el pozo SNS-1X	80
6.2	Características de cada uno de los cuerpos presentes en los modelos propuestos	87

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

Son varias las regiones de Venezuela con ambientes geológicos y condiciones físico – químicas favorables para la formación y acumulación de posibles depósitos minerales en el subsuelo, que de alguna u otra manera son utilizados por el hombre para la extracción de la materia prima de aquellos yacimientos con gran potencial a escala industrial. Es aquí donde radica la importancia del Ingeniero Geofísico y Geólogo, quienes desempeñan un papel esencial en la determinación y ubicación de aquellas regiones o zonas que presenten cantidades de reservas considerables y que posteriormente puedan convertirse en productos útiles tanto para beneficio de la sociedad como para el país.

De lo anteriormente expuesto y para la realización de este estudio se seleccionó la región central de la Sierra de Perijá, Edo. Zulia (Figura N° 1.1) la cual por sus ambientes geológicos presenta indicios favorables para la localización de posibles yacimientos minerales. En este sentido y para el desarrollo de este proyecto se recurre a la Geofísica como una de las herramientas de las Ciencias de la Tierra, en virtud de que sus diferentes métodos permiten realizar estudios importantes para la exploración y ubicación de nuevos prospectos mineros o zonas mineralógicamente anómalas.

Uno de los métodos geofísicos más adecuado para este tipo de estudio es el aeromagnético, el cual se caracteriza por la cobertura de grandes áreas a un bajo costo y constituye un método de gran relevancia en la exploración de yacimientos minerales. En particular, este estudio se concentra en la aplicación de la geoestadística, el análisis espectral y la interpretación de anomalías magnéticas de la región central de la Sierra de

Perijá, Estado Zulia, área de interés del Ministerio de Energía y Minas (MEM) a través del Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN). El enfoque actual propuesto por INGEOMIN pretende utilizar datos aeromagnéticos previamente levantados con la finalidad de aplicarles las técnicas y herramientas antes mencionadas, para extraer de ellos la mejor información sobre posibles yacimientos minerales con perspectivas económicas rentables.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el país existe gran cantidad de datos aeromagnéticos que fueron adquiridos con fines de cubrir extensas zonas de interés para la prospección minera. Con la visión de lograr un aprovechamiento máximo de los productos disponibles, hoy día se requiere aplicar estrategias exploratorias con mayor detalle y realizar delimitaciones de las áreas de interés, por lo que es necesario y conveniente hacer uso de la información disponible, como son los mapas aeromagnéticos de componente total, y recurrir a la técnica de la digitalización mediante software especializado para lograr un manejo óptimo de los datos, a través del uso de nuevas herramientas matemáticas que sirvan de soporte en la interpretación global, ya que en la mayoría de estos casos se presentan problemas en la etapa de procesamiento de los datos, bien sea por la aparición de curvas con suavizado excesivo o por la presencia de un conjunto de cierres que dificultan el análisis.

Con base en lo expuesto anteriormente, se propone una metodología de trabajo que permite reprocesar los datos aeromagnéticos existentes de la región central de la Sierra de Perijá, Estado Zulia (Figura N° 1.1). El procesamiento de estos datos se orienta hacia la digitalización de las cuatro hojas de datos aeromagnéticos con el fin de establecer los puntos o “estaciones”, en el cual cada uno disponga de las coordenadas geográficas así como también la magnitud de la susceptibilidad magnética; dicho

procesamiento permitirá la creación de una base de datos en formato digital, lo cual es de gran utilidad ya que permite el manejo y optimización de los datos.

Entre las aplicaciones se contempla, la realización de un análisis geoestadístico y espectral de los datos, teniendo en cuenta que la presente investigación pretende determinar si es posible la utilización de mapas aeromagnéticos georeferenciados; y a través del proceso de la digitalización, obtener valores numéricos para crear las diferentes ventanas de trabajo en formato digital. Una vez aplicados los procesos anteriores, se elaborarán nuevos mapas magnéticos con una mejor calidad de información tanto en anomalías de interés como en orientaciones anisotrópicas bien definidas que muestren o den una mejor definición de las áreas fuertemente anómalas, con el propósito de que en un proceso posterior se produzca el modelo geológico de la región y se pueda predecir la existencia de posibles yacimientos en la zona de estudio.

1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general consiste en realizar una interpretación geológica - geofísica de la zona metálogénica de Perijá central, Estado Zulia, con fines de recomendar estudios detallados en tierra sobre las principales anomalías detectadas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1 Generar una base de datos aeromagnéticos del área de estudio en formato digital.

A través del proceso de extracción de datos aeromagnéticos mediante la digitalización de los cuatro mapas adquiridos en la zona de estudio.

2 Elaborar mapas aeromagnéticos con criterio geoestadístico.

Por medio de la aplicación de diversas herramientas de la estadística clásica entre las cuales se destacan análisis de la estadística descriptiva, pruebas de normalidad y análisis de conglomerados.

Una vez recabada la información anterior, mediante técnicas geoestadísticas, encontrar los parámetros espaciales de la variable anomalía magnética para generar los nuevos mapas magnéticos.

3..Construir perfiles de los datos aeromagnéticos.

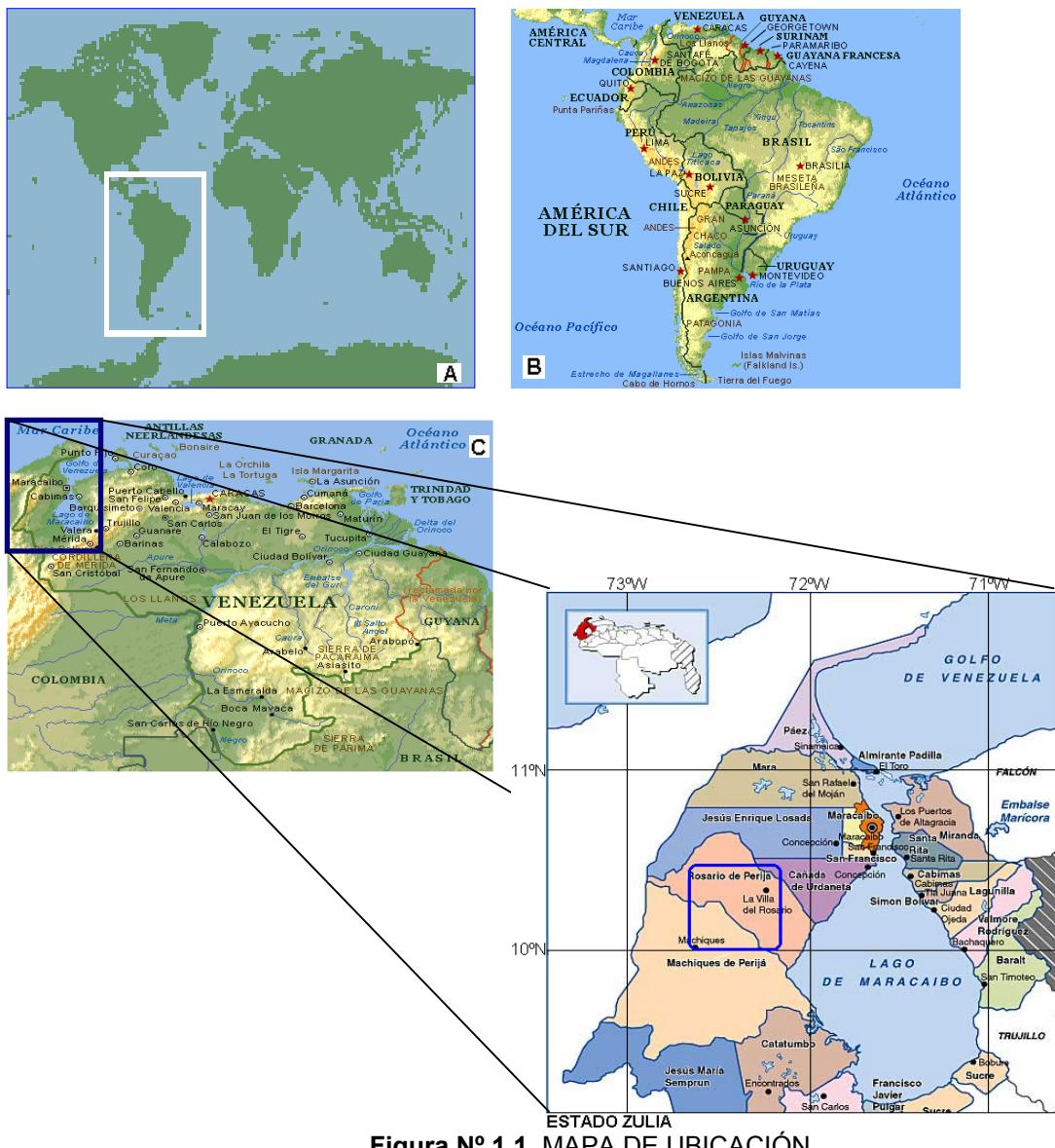
Sobre los mapas generados en el punto anterior, trazar cuatro perfiles perpendiculares al rumbo de las estructuras y realizar el análisis espectral de cada uno de dichos perfiles.

4 Modelar los perfiles aeromagnéticos.

Realizar el modelado de la geometría de los cuerpos que se encuentran en el subsuelo, utilizando el programa GM-SYS GEOSOFT (1995).

1.4 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El área geográfica correspondiente a este estudio se encuentra localizada en la región central de la Sierra de Perijá, Edo. Zulia. (Fig. N° 1.1), entre las coordenadas de longitud 72° 15'W y 72° 45'W y de latitud 10° 00'N y 10° 40'N. La zona alcanza una extensión de 4950 Km², y está cubierta con datos producto de un levantamiento aeromagnético realizado en el año 1976 por la compañía HUNTING GEOLOGY & GEOPHYSICS LTD, LONDRES, INGLATERRA, y graficado por TÉCNICA RORAIMA, C. A. “TECROCA” CARACAS, VENEZUELA.



1.5 TRABAJOS PREVIOS

1.5.1 Estudios realizados sobre geología regional

Las probabilidades de la presencia de mineralizaciones de cobre en la Sierra de Perijá cada día adquieren mayor importancia, ya que durante varios años se han realizado estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos

que indican la presencia de este metal en varias localidades de esta región (Figura N° 1.2).

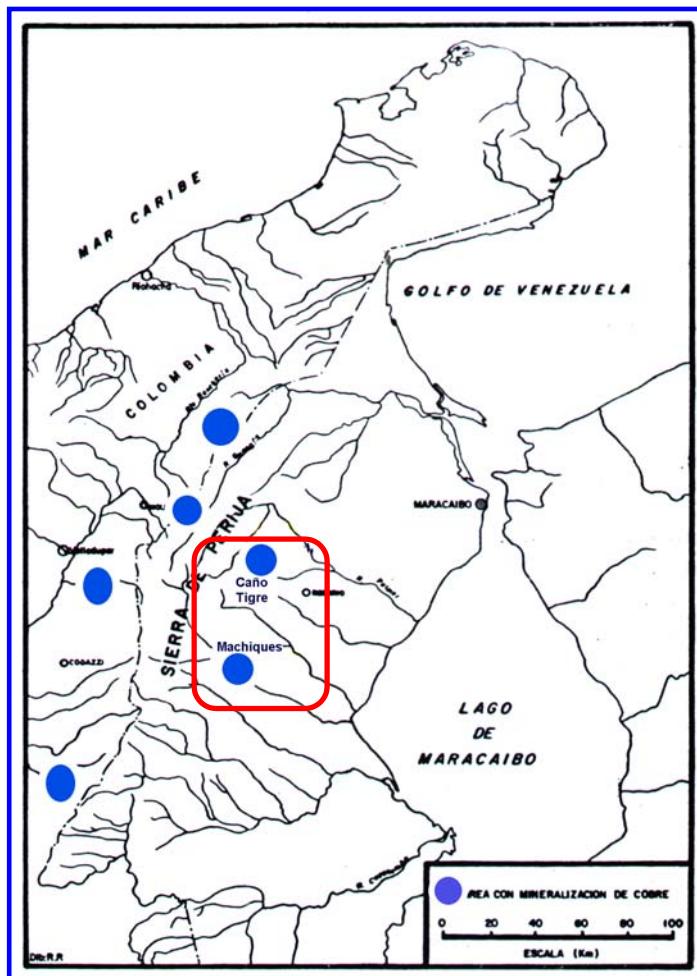


Figura N° 1.2. Mapas de mineralizaciones de Cobre. Sierra de Perijá. Modificado de Viteri (1978). **Area de estudio.**

En el sector venezolano de la Sierra de Perijá, Liddle (1946) reconoció manifestaciones de cobre en la región de El Totumo. Existen igualmente evidencias de este metal en un estrato volcánico de la Formación La Quinta, en la región de Caño Tigre (Figura N° 1.2) (Moya y Figueroa, 1973). Posteriormente, Viteri (1977) corrobora esta zona anómala ubicándola entre las coordenadas 72° 28' de longitud oeste y 10° 28' de latitud norte.

El cobre nativo se encuentra asociado a las rocas volcánicas básicas vesiculares intercaladas en areniscas de edad Jurásico Medio a Superior. La región de Caño Tigre, en donde la geología local ubica secuencias plegadas de capas rojas volcánicas de la Formación La Quinta, muestra evidencias de concentración de cobre nativo entre las coordenadas de longitud 72° 28'N y latitud 10° 28'N.

La Formación La Quinta ha mostrado mineralizaciones de cobre en diferentes áreas de la Sierra de Perijá, entre las que figura la región de Caño Tigre, la cual está asociada a una colada volcánica amigdaloides, cuyo espesor en la zona mineralizada varía de 1 a 2.8 metros (Rodríguez, 1986).

Se conoce también de una importante mineralización de cobre nativo asociado con rocas volcánicas básicas de la Formación La Quinta, de edad Triásico – Jurásico, ubicada al noroeste de Villa del Rosario, cuyas reservas se estiman con tenores de cobre entre 2% y 3%, y de potencia similar a la del complejo volcánico plutónico de El Totumo – Inciarte. (Moya y Figueroa, 1973).

1.5.2 Levantamiento aeromagnético en la zona de estudio

- Mapas aeromagnéticos de componente total.**

Dicha información fue recopilada en un levantamiento aeromagnético realizado en la zona de estudio en el año 1976 por la compañía HUNTING GEOLOGY & GEOPHYSICS LTD, LONDRES, INGLATERRA. El levantamiento fue realizado a una altura de vuelo promedio de 100 metros y posteriormente representados gráficamente en hojas, numeradas 8,9,12,y 13, a escala 1:50.000 con contornos a intervalos de 10 gammas.

En la Figura N° 1.3 se ilustra la ubicación de las referidas hojas de datos, cuyas coordenadas se indican en la Tabla N° 1.1.

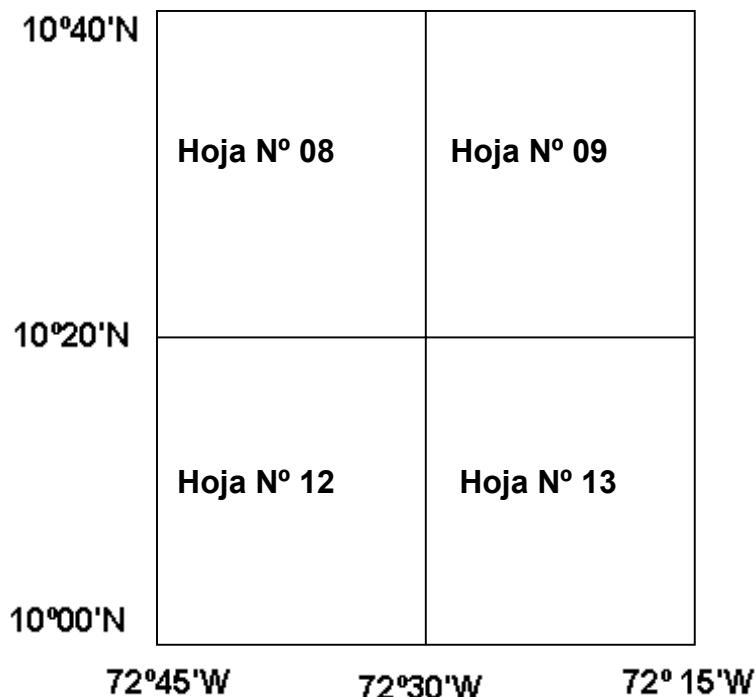


Figura N° 1.3. ubicación de las cuatro hojas de datos aeromagnéticos.

Hojas	Longitud oeste	Latitud norte
Hoja N° 08	72° 30' a 72° 45'	10° 20' a 10° 40'
Hoja N° 09	72° 15' a 72° 30'	10° 20' a 10° 40'
Hoja N° 12	72° 30' a 72° 45'	10° 00' a 10° 20'
Hoja N° 13	72° 15' a 72° 30'	10° 00' a 10° 20'

Tabla N° 1.1. Coordenadas de las hojas de datos aeromagnéticos.

1.5.3 Líneas sísmicas en la zona de estudio

Se dispuso de información sísmica aportada por las líneas interpretadas del área, las cuales vienen a ser de importancia para el control y conocimiento de las profundidades en las diferentes formaciones.

Dentro del área de estudio destaca la localización del pozo San Salvador – 1x, ubicado cerca de la intersección de las líneas FNP-92C-24 y FNP-92C-07 (Figura N° 1.4), que a su vez se ubican hacia la parte sur de dicha área.

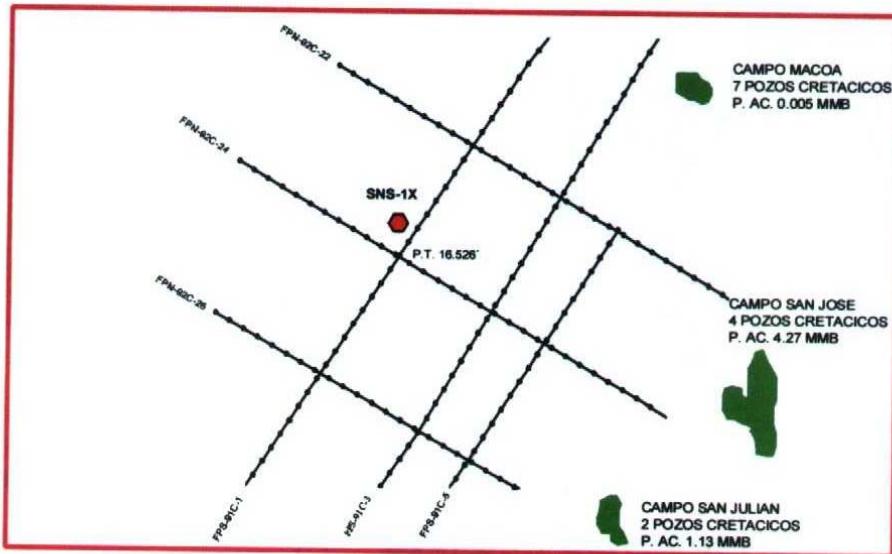


Figura N° 1.4. Localización de líneas sísmicas y del pozo SNS – 1X. Tomado de Araujo (1997).

En el procesamiento la sección sísmica FNP- 92C – 24 muestra la presencia de un “pull up” a nivel de las calizas cretácicas, el cual es generado por capas de alta velocidad en la superficie, pertenecientes a la Formación La Quinta (Araujo, 1977). Desde el punto de vista estructural se indica un sinclinal de rumbo NE – SO, por debajo de la franja de corrimientos de la Sierra de Perijá. Esta estructura genera en su flanco más oeste un cierre limitado por una falla de ángulo alto, alineada con el frente de montañas, localizado por el pozo SNS-1X a una profundidad total de 16526 pies.

La estratigrafía suministrada por el pozo en el análisis geológico de ripios, muestra la columna estratigráfica de la Figura N° 1.5. La localización del pozo San Salvador 1x estimó que por debajo de 14500 pies se encuentra una nueva porción de la parte basal con 645 pies de calizas de la Formación Apón, seguidamente y por contacto de falla se encontraron 1331 pies de la Formación La Quinta.

E	F	ESPESOR	LITOLOGIA
JURASSICO	LA QUINTA	7920'	
	LA SIERRA	560'	
CRETACEO	RIO NEGRO	1170'	
	MITO JUAN	330'	
	APON	540'	
	RIO NEGRO	1420'	
JUR	LA QUINTA	1450'	
CRE	APON	645'	
JUR	LA QUINTA	1331'	

Figura N° 1.5. Columna estratigráfica del pozo SNS - 1X. Tomado de Araujo (1997).

Se ha interpretado un contacto de falla en su parte inferior y superior. La falla, que en el nivel superior aflora en la superficie (Araujo, 1997), corresponde según el mapa de interpretaciones estructurales elaborado por interpretaciones de imágenes de radar, a la falla de Perijá.

Para tener un mejor control en el modelado de los dos perfiles ubicados hacia la parte norte (perfles 2 y 3) se recurrió a la información de los pozos 106 y 113 del campo La Paz ubicados hacia el noreste de la zona de estudio a una distancia aproximadamente de 20 km, teniendo interpretadas las líneas PO-82C-11 y MLP-62C-16, donde los reflectores sísmicos aportan información que se indica en la Tabla N° 1.2.

Pozo	Línea	Tope geológico	Profundidad (pies)
106	PO-82C-11	Eoceno erosionado	3032
		Paleoceno erosionado	4737
		Lutitas de La Paz	5844
		Calizas del Cretáceo	8184
		Basamento	NP
113	MLP-82C-16	Eoceno erosionado	2892
		Paleoceno erosionado	6664
		Lutitas de La Paz	7705
		Calizas del Cretáceo	9821
		Basamento	11150

Tabla N° 1.2. Profundidades de los topes geológicos para los pozos 106 y 113. (Tomado de López y Roquett, 1985).

- **Modelo geológico en el área de estudio mediante líneas sísmicas**

La interpretación de la línea sísmica FNP92C - 24 en el área de estudio permite tener un control en las profundidades de las diferentes litologías, tal como se destaca en la Figura N°.1.6, que muestra parte de las

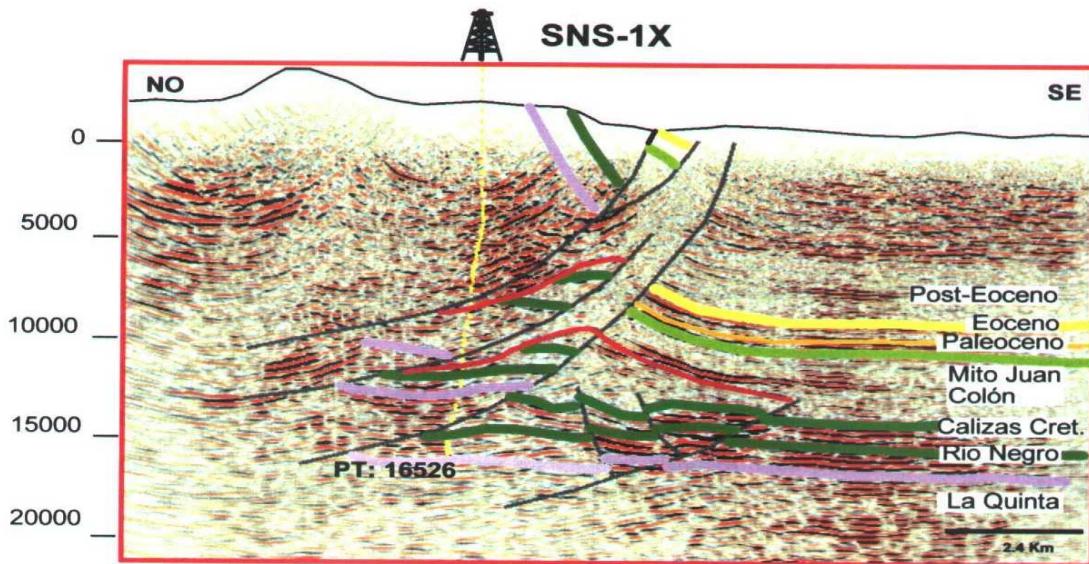


Figura N° 1.6. Interpretación sección sísmica FNP-92-24 migrada en profundidad. Tomada de Araujo, 1997).

calizas basales en la secuencia continua (Formación Apón, Río Negro/ Formación La Quinta). Suprayacente y por contacto de falla se encuentra la Formación Mito Juan Araujo, (1997).

1.5.4 Mapa de Anomalías de Bouguer

Es importante destacar que el mapa de anomalías de Bouguer (Figura N° 1.7), se ubica en la parte derecha de la orientación noreste – suroeste del flanco este de la Sierra de Perijá por lo que es de esperarse que las líneas isoanómicas incrementan su valor en dicha dirección, según la cual aumenta la profundidad del basamento, es decir hacia el depocentro.

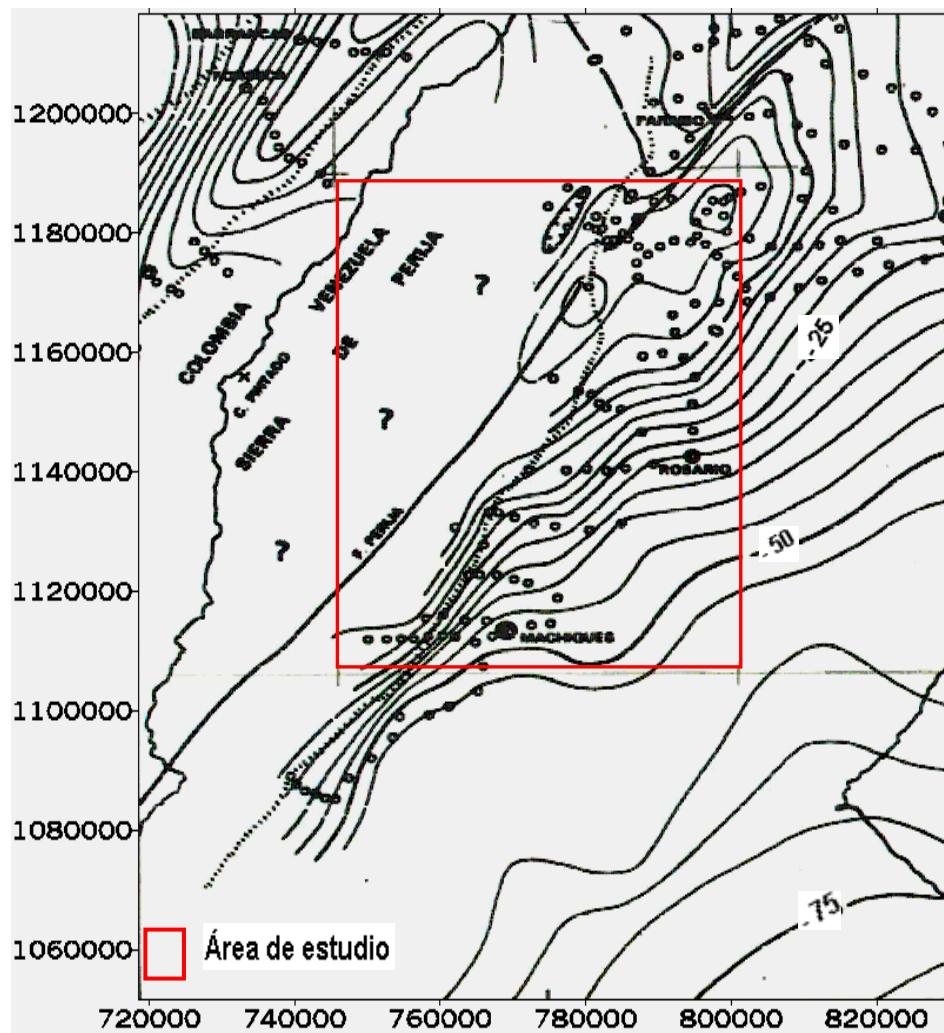


Figura N° 1.7. Mapa de anomalías de Bouguer. Sierra de Perijá. (Modificado de Kellogg, 1981)

En la parte noreste la anomalía de Bouguer pasa de valores negativos a positivos, lo cual indica un comportamiento somero del basamento, lo que se refleja también en el mapa aeromagnético (Anexo N° 1) que muestra la presencia de un conjunto de contornos dipolares. Hacia la parte centro – sur el gradiente es más suave y los contornos bastante uniformes.

1.5.5 Estudios geoquímicos y petrográficos en el área de estudio

Dentro del complejo plutónico volcánico del Totumo - Inciarte se han encontrado valores anómalos de cobre pertenecientes a litologías diferentes de la Formación La Quinta, causados por la presencia de altos contenidos de hierro (García, 1979).

Según los estudios petrográficos de muestra de rocas se localizaron mineralizaciones de barita en el marco geológico de la Formación Tinacoa, en el área comprendida entre los ríos Tianacoa, Piché y Arroyo seco (García, 1987).

1.6 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

La realización de este trabajo tiene dos aspectos fundamentales:

En primer lugar y en vista de que no se dispone de datos magnéticos originales de campo, se recurre al uso de la información que se encuentra en formato gráfico para digitalizarla y en este sentido recuperar los datos para la creación de las diferentes ventanas de trabajo en formato digital, lo cual representa una gran ventaja a la hora de aplicar procesos que fortalezcan la información en la elaboración de los mapas magnéticos.

El segundo aspecto está relacionado con el uso de procesos o herramientas que sirvan de refuerzo para interpretar los resultados del método aeromagnético, luego de aplicar el análisis geoestadístico y espectral de los datos, lo cual va a permitir tener un mejor control de los datos y brindar atención especial a la determinación de la concentración de minerales de interés.

- **Justificación del proyecto**

La Minería en Venezuela viene a constituir una actividad que se ha venido desarrollando a través de los años mediante estudios de geología de superficie para determinar las zonas que representen cantidades considerables de minerales. Es por ello que el Ministerio de Energía y Minas, a través de INGEOMIN, se propone como meta principal el refuerzo de los estudios previos en aquellas zonas geológicamente prospectivas para conocer la presencia de recursos minerales, con base en la integración de los estudios geológicos realizados con la información geofísica adquirida a través del método aeromagnético.

1.7 EVALUACIÓN DEL PROYECTO

La elaboración de este proyecto presenta algunas limitaciones en cuanto a la base de los datos aeromagnéticos, ya que no se dispone de los registros originales de los levantamientos de campo, razón por la cual se recurre a un método secundario como lo es la digitalización de los mapas aeromagnéticos ya elaborados, para construir una nueva base de datos.

Por otra parte cuando se realiza un estudio de exploración en la búsqueda de prospectos mineros en determinada área o zona, se incluyen todos los elementos geológicos y herramientas disponibles para generar un modelo que se corresponda con la geología, y es aquí donde aparece el riesgo geológico debido a que no existe un control total sobre las variables que están implícitas en el proceso.

CAPÍTULO II

2 GEOLOGÍA REGIONAL

En este capítulo se trata de dar una visión general sobre la evolución geológica del área de Perijá Central, mediante la revisión e integración de diversos trabajos, entre ellos Meza (1998), González de Juana et al. (1980), Vail (1977), Audemard (1991), Xavier y Espejo (1977) y Kellogg (1981).

La historia geológica se inicia en Venezuela con los terrenos precámbricos que afloran en todos los cinturones montañosos del país y en el Escudo de Guayana o Macizo Guayanés (Figura Nº 2.1)

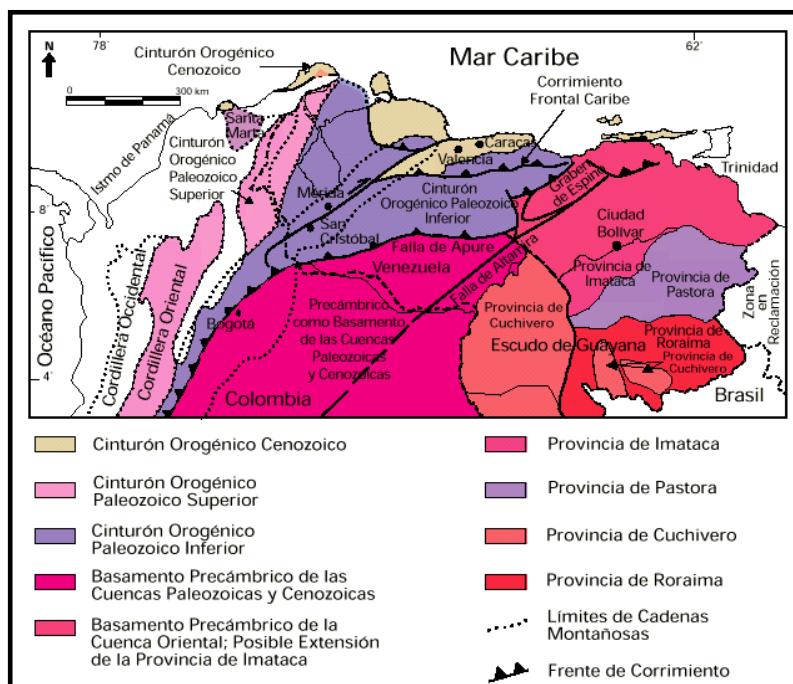


Figura. Nº 2.1. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el norte de Sudamérica en los cuales hay rocas precámbricas, los cuales fueron suturados secuencialmente durante el Ordovícico - Silúrico (Orogénesis Herciniana) desde finales del Mesozoico hasta el presente. (Tomado de Yoris y Ostos, 1997).

Debido a procesos ocurridos al norte de la Placa Suramericana a lo largo de su historia, los cuerpos rocosos precámbricos aquí presentes son de dos tipos: *alóctonos* y *autóctonos*; ellos se localizan en el Escudo de Guayana y forman el basamento de las cuencas paleozoicas a cenozoicas al sur de la falla de Apure. En el Escudo de Guayana los terrenos autóctonos se agrupan en cuatro provincias muy importantes: Imataca, Pastora,

Cuchivero y Roraima (Fig. Nº 2.1). Por otra parte los terrenos alóctonos se adhieren a la placa de Suramerica durante el Paleozoico temprano (Orogénesis Caledoniana, 570 – 385 Ma.), evidencia de lo cual son rocas que afloran en las ciudades de Mérida y San Cristóbal. Posteriormente ocurre la sutura del alóctono durante la Orogénesis Herciniana (385 a 245 Ma).

2.1 SIERRA DE PERIJÁ

La Sierra de Perijá constituye en el territorio venezolano un sistema montañoso que presenta una depresión designada por Miller (1960) como Desgarradura de Perijá, producida por la falla del mismo nombre y situada en las cabeceras del río Tucuco, a la cota de 1.800 m, sobre el nivel del mar. El segmento situado al sur de esta depresión se conoce como Sierra de los Motilones y representa una cadena simple, divisoria entre el Valle del río César al oeste y la cuenca del Lago de Maracaibo hacia el este.

Al norte de la Desgarradura de Perijá la Sierra está formada por una serie de fallas NNE de la cadena montañosa. Su cresta constituye la Serranía de Valledupar que se extiende al oeste de las cabeceras de los ríos Negro y Apón, hasta las cabeceras del río Guasare. En este sector la culminación de la Sierra está representada por el Cerro Pintado, con 3.600 m sobre el nivel del mar (González de Juana et al, 1980).

La mayoría de rocas presentes en la Sierra de Perijá son estratiformes y contienen intervalos resistentes a la erosión, lo que conjugado con los sistemas de fallas viene a determinar las características más destacadas de la red de drenaje, en la cual los ríos siguen parcialmente el rumbo de las capas, cortando las filas a través de cañones.

2.2 ESTRATIGRAFÍA REGIONAL DE LA SIERRA DE PERIJÁ

La estratigrafía de Perijá consiste en una unidad metamórfica conocida como Serie de Perijá y referidas por varios autores al Precámbrico, al Paleozoico inferior o ambos periodos, a causa de la ausencia de fósiles diagnósticos y las escasas determinaciones radiométricas en territorio Venezolano (González de Juana et al., 1980). Incluye además tres secuencias. Una que comprende sedimentación no metamorfizada, atribuida por sus faunas al Devónico; otra de carácter sedimentario que corresponde al Triásico – Jurásico y está formada por rocas volcánicas de las formaciones Tinacoa, Macoita y La Quinta, y la última que incluye la sedimentación del Cretácico y del Cenozoico.

Desde el Eoceno superior hasta el Plioceno, se desarrolló el evento tectónico que estructuró a la Sierra de Perijá. Durante el Plioceno se produjeron movimientos epirogénicos importantes que elevaron a la Sierra hasta su posición actual, iniciándose luego un intenso proceso erosivo (Viteri, 1978).

Adicionalmente, en la Sierra de Perijá se han reconocido varios cuerpos graníticos que afloran en la parte central y en el extremo sur. Los mismos están asociados a rocas volcánicas ácidas e intermedias dentro de una secuencia sedimentaria devónica y metamórfica pre – devónica (Espejo et al, 1977).

2.3 TERRENOS DEL PALEOZOICO

Las rocas paleozoicas se encuentran en varias regiones que se agrupan geológicamente tanto en terrenos *autóctonos* como *alóctonos* a Suramerica (Figura 2.2). Los terrenos *autóctonos* se encuentran ubicados en el subsuelo de la Cuenca Oriental y en la Cuenca de Barinas – Apure al sur de la falla de Apure. Los terrenos *alóctonos* se pueden diferenciar por la edad en la que fueron adosados tectónicamente a la parte norte de

Suramérica, teniendo en cuenta que algunos de ellos se suturaron durante el Paleozoico Inferior, otros en el Paleozoico Superior y los últimos a finales del Mesozoico.

Las rocas más representativas del terreno alóctono se ubican en Los Andes, donde afloran rocas ígneas graníticas y rocas sedimentarias (Ordovícico - Silúrico) de ambientes platformales y marinos profundos. A su vez estos ambientes se encuentran en el Lago de Maracaibo representados por las rocas metasedimentarias ordovícicas que también afloran en Los Andes. Los terrenos alóctonos de edad Devónica, que se adosaron a Suramérica durante el Paleozoico Superior aflorando en la Sierra de Perijá. (Yoris y Ostos, 1997).

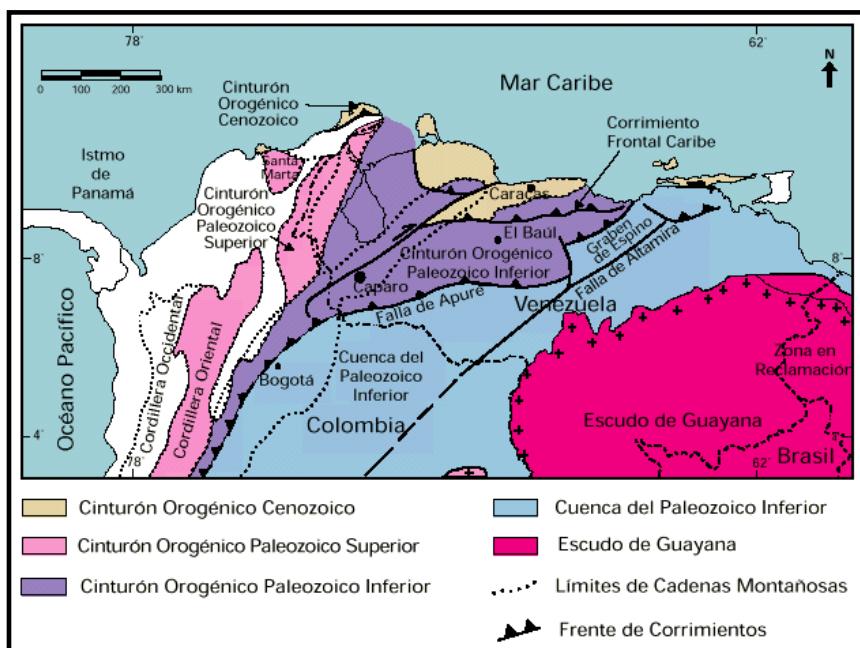


Figura N° 2.2. Mapa de distribución de terrenos alóctonos en el Norte de Suramérica en los cuales hay rocas precámbricas. Dichos terrenos fueron suturados secuencialmente en el Ordovícico – Silúrico, durante el Carbonífero, y desde finales del Mesozoico hasta el presente. (Tomado de Yoris y Ostos, 1997).

Las rocas paleozoicas de la Sierra de Perijá están definidas por un conjunto de cuerpos sedimentarios de edad Devónico Pérmico. Dicho

conjunto está representado por el Grupo Cachirí de edad devónica, que a su vez está caracterizado por una secuencia espesa de sedimentos con un espesor aproximado de 2500 metros. Este grupo está integrado por las formaciones Los Guineos, Caño Grande, Caño del Oeste y Campo Chico del periodo Devónico.

2.3.1 Formación Los Guineos

Corresponde a una secuencia caracterizada por la alternancia de conglomerado finos a gruesos con fragmentos subangulares, areniscas cuarzosas con estratificación cruzada, muy bien cementadas, lutitas filíticas micáceas.

2.3.2 Formación Caño Grande

Está representada por espesores de lutitas micáceas, calcáreas alternadas con calizas margozas fosilíferas y arenisca de grano fino.

2.3.3 Formación Caño del Oeste

Consiste en una sucesión espesa de lutitas finamente micáceas, baja cantidad de pirita, no fosilífera, intercalándose en capas delgadas a lenticulares de limolitas silíceas y areniscas finas.

2.3.4 Formación Campo Chico

Está compuesta por arenisca de grano fino, medio y grueso en capas delgadas a gruesas. Las areniscas son generalmente cuarzosas y gradan a areniscas feldespáticas.

2.3.5 Formación Río Palmar

Esta formación consta de calizas macizas en gran predominancia en toda la unidad, calizas margosas, limolitas y areniscas de grano fino. También son distintivas las calizas olíticas en la parte basal de esta formación.

2.3.6 Formación Palmarito

Consta de areniscas y grauvacas de grano fino a medio delgadamente estratificadas que se intercalan en delgados horizontes conglomeráticos, calizas grises a rojas fosilíferas con abundantes venas blancas de calcita.

2.4 TERRENOS MESOZOICOS “Triásico – Jurásico”

La presencia del Triásico en Venezuela carece de evidencias concretas de la parte más antigua del Jurásico (208 – 181 Ma.). La única evidencia que se tiene es en las rocas volcánicas de La Gé en Perijá y en las rocas volcánicas de Guacamayas en la región de El Baúl que antecedieron a la sedimentación de las capas rojas de la Formación La Quinta (Figura 2.3). Las capas rojas que no tienen productos volcánicos y se encuentran encima de las anteriores se conocen como rocas volcánicas de El Totumo en Perijá.

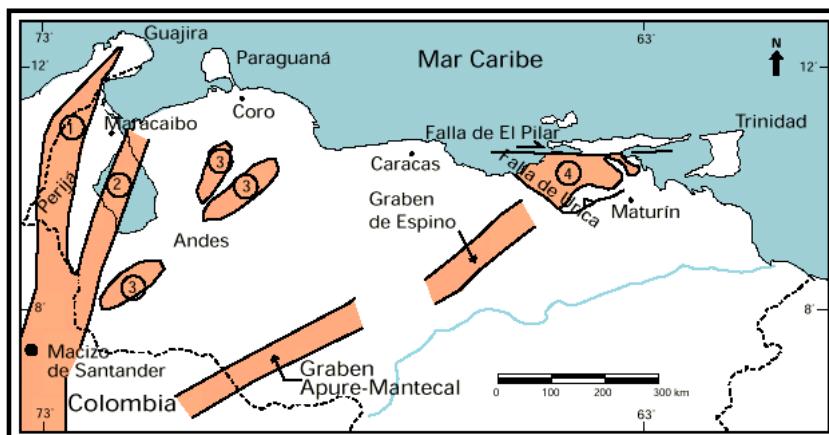


Figura N° 2.3. Distribución de las rocas jurásicas en Venezuela, que afloran en la Sierra de Perijá, Graben de Espino Y Apure-Mantecal etc. (Tomado de Yoris y Ostos, 1997).

La Formación La Quinta de Perijá, a finales del “Triásico - Jurásico” presentó un margen continental activo (Audemard, 1991). Posteriormente se da una erosión asociada al tectonismo, lo cual fue seguido de la deposición de los surcos de una secuencia de origen fluvial conocida como Formación Río Negro (Perijá) (Navarro et al., 1998).

2.4.1 SISTEMAS TRIÁSICO Y JURÁSICO

El volcanismo desarrollado durante el Triásico – Jurásico tuvo dos centros separados: uno en la región de El Totumo, Sierra de Perijá, donde las coladas de lavas y piroclásticas se intercalan con sedimentos continentales y otro en El Baúl, donde esta intercalación no es evidente (González de Juana et al., 1980).

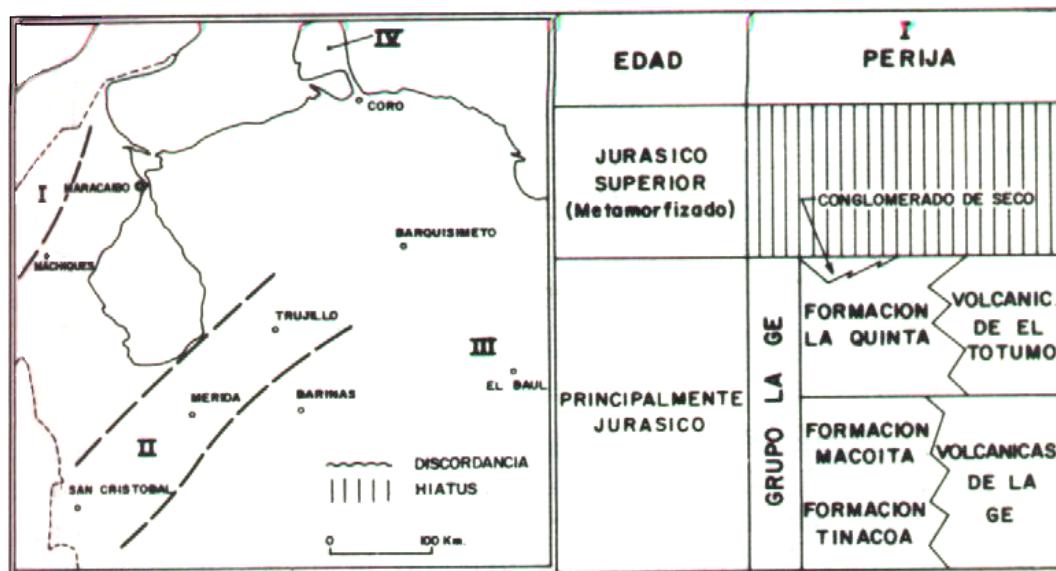


Figura N° 2.4. Cuadro de unidades litológicas del Triásico – Jurásico conocidas en Venezuela. (Tomado de González de Juana et al., 1980).

La sedimentación del ciclo Triásico - Jurásico parece haber comenzado primero en Perijá y luego en Los Andes Venezolanos con la sedimentación del Grupo La Gé, caracterizado por una secuencia de sedimentos continentales y a su vez comprende las formaciones La Quinta, Tinacoa y Macoita, las cuales forman una asociación litológica de carácter provincial, caracterizada por tener abundantes productos volcánicos en sus sedimentos, como se ilustra en la Figura 2.4.

2.4.2 LITOFACIES DE PERIJÁ CENTRAL EN EL JURÁSICO

Esta sección comprende la descripción del Jurásico de las diferentes formaciones (Figura Nº 2.4). El Grupo La Gé en la Sierra de Perijá está conformado por:

- **Formación la Quinta**

En la Sierra de Perijá, VITERI (1978) indica que la litología predominante para esta formación es de areniscas, arcosas y limolitas rojas-rosadas, conglomerados rojos, tobas líticas con cristales de composición riolítica a andesítica, lavas y escasos basaltos. En la región de Caño Tigre comprendida entre la Quebrada La Gé y el Río Palmar afloran rocas sedimentarias, principalmente arcosas, y rocas volcánicas piroclásticas y lavas (Hea y Whitman, 1960).

La Formación La Quinta se hace distintiva por la intercalación de arcosas, grauvacas, conglomerados y areniscas cuarzosas de color rojo. Tobas, brechas y lavas andesíticas están presentes en toda la secuencia (Espejo y Xavier, 1977). En Caño Tigre afloran las siguientes rocas:

Rocas sedimentarias: En las quebradas La Gé y La Quebrada afloran potentes estratos de arcosas con intercalaciones menores de limolitas y conglomerados de clastos finos a grueso.

Rocas volcánicas: Las volcánicas de El Totumo forman una secuencia en el área de las quebradas Caña Brava y El Totumo. Hacia el sur se intercalan con las sedimentarias y luego desaparecen en la Quebrada La Gé.

Rocas intrusivas: Una franja discontinua de rocas graníticas con rumbo N30°E que aflora a lo largo de la región La Gé – El Palmar

- **Formación Macoita**

Esta Formación está compuesta por un miembro inferior de arcosas volcánicas, de grano grueso a conglomeráticas, color gris, en capas de espesor mediano, muy calcáreas, interestratificadas con lutitas, limolitas y calizas y con un conglomerado basal (Hea y Whitman, 1960). La litología de esta unidad se caracteriza por la presencia de areniscas feldespáticas, calizas gris claro a oscuro intercaladas con capas delgadas de conglomerados y cuarzo. También rocas volcánicas ácidas a intermedias.

- **Formación Tinacoa**

Esta dividida en miembro inferior y superior. El inferior con un espesor de 1.070 m, consiste en calizas duras astilosas de capas uniformes delgadas. El Miembro Superior tiene un espesor de 580 m, con capas medianas, de grano fino a conglomeráticos, muy dura y gruesa. Esta unidad se caracteriza por la alternancia de lutitas y tobas delgadamente estratificadas. Las lutitas son de predominancia calcárea de fina laminación, calizas de grano fino y en menor proporción la intercalación de areniscas feldespáticas (Espejo y Xavier, 1977).

- **Volcánicas de El Totumo**

Las rocas volcánicas de El Totumo se distinguen por una gruesa intercalación de rocas volcánicas efusivas y diques de composición intermedia a básica. (González de Juana et al., 1980).

- **Volcánicas de La Gé**

Se utiliza este nombre para designar las tobas y aglomerados macizos y muy bien cementadas con poca o ninguna estratificación, que pasan lateralmente a las formaciones Tinacoa y Macoita. En los aglomerados, además de fragmentos de toba, son comunes los fragmentos de rocas sedimentarios diversas.

2.5 EL CRETÁCICO

La depositación de conglomerados y areniscas con intercalaciones de lutitas y con escasas calizas arenosas fosilíferas ocupa la mayor parte de la cuenca y se conoce como Formación Río Negro, la cual marca el inicio de la sedimentación cretácica (Figura N° 2.5) con espesores de hasta 1000 m cerca de San Cristóbal que se van adelgazando hasta 17 m en el Lago de Maracaibo, por lo que se admite un origen continental para esta formación.

En el Cretácico inferior ocurre una transgresión causada por la subsidencia gradual en el borde de Guayana, que por la subida del nivel del mar a escala mundial continuó hasta el Santoniense (Vail et al., 1977). Mediante esta transgresión las condiciones ambientales y sedimentarias durante el Aptiense y el Albiense (ambiente marino somero estable), favorecieron la formación de una plataforma de sedimentos carbonáticos que constituyen el Grupo Cogollo en Perijá.

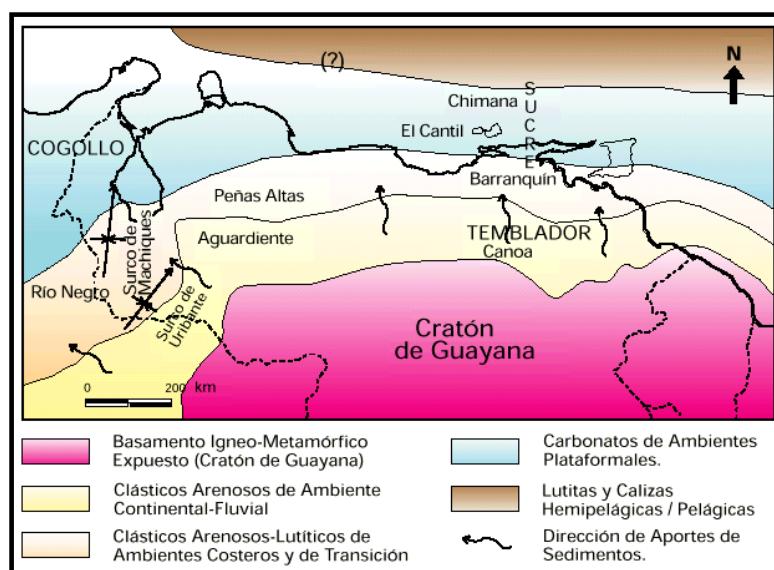


Figura. N° 2.5. Distribución de las facies sedimentarias durante el Neocomiense – Albiense (Cretácico Temprano) al norte del Cratón de Guayana, indicándose unidades típicas asociadas a las facies (Tomado de Yoris y Ostos, 1997).

Los espesores del Grupo Cogollo varían entre 270 m al este de Maracaibo y 400 m al oeste de la plataforma llegando a alcanzar hasta 670

m en los bajos estructurales. Este grupo se caracteriza por la presencia de calizas duras con buena estratificación en capas mayores a un metro y espesores de areniscas de grano fino a medio con algunas intercalaciones de lutitas.

2.5.1 LITOFAZIES DE PERIJÁ EN EL CRETÁCICO

Las rocas del Cretácico se encuentran identificadas por las siguientes formaciones: Río Negro, Apón, Lisure, Maraca y La Luna.

- **FORMACIÓN RÍO NEGRO**

La Formación Río Negro está compuesta de areniscas cuarzosas y feldespáticas, así como areniscas conglomeráticas con estratificación cruzada. Dentro de la secuencia se intercalan lutitas grises a marrón. La Formación Río Negro en la región de Machiques – Río Negro, se caracteriza por “areniscas líticas” conglomerados y ortocuarцитas, lutitas y tobas (González Padilla y Ortiz, 1976).

- **FORMACIÓN APÓN**

Esta formación se caracteriza por la presencia de calizas compactas en la parte inferior de Grupo Cogollo pudiéndose distinguir caliza gris y azulosa, densa en capas gruesas, generalmente fosilíferas, con intervalos menores de lutitas que varían de calcáreas a arenosas.

Los afloramientos de la Formación Apón forman un cinturón más o menos continuo en el flanco oriental de la Sierra de Perijá, con un espesor aproximado de 650 m que disminuye hacia el norte. En la plataforma de Maracaibo alcanza sólo 250 m y aflora en varias estructuras de la Sierra de Perijá y a su vez está compuesta por tres miembros en forma ascendente: Tibú, Machiques y Piché (Renz, 1956).

- **MIEMBRO TIBÚ**

En Perijá el miembro Tibú es notablemente uniforme, 360 m, y su tope está marcado por las primeras calizas negras del miembro Machiques; hacia el sur y Lago de Maracaibo el tope está definido por el contraste de calizas y las lutitas del Miembro Guáimaro (González de Juana, et al., 1980).

- **MIEMBRO MACHIQUES**

El miembro Machiques tiene su máximo desarrollo en el surco de Machiques, con aproximadamente 205 m de espesor en el río Negro que disminuye notablemente en la dirección norte – sur. La litología típica consta de calizas laminares negras piríticas y bituminosas, intercaladas con lutitas negras. El miembro es esencialmente el producto de dos condiciones ambientales intercambiantes, una facies de lutitas negras y otra de calizas (Maync, 1950).

- **MIEMBRO PICHÉ**

Contiene significativas porciones de caliza bioclástica de alta energía alternando con calizas. La base de este Miembro está conformada por un nivel masivo de dolomitas, que constituyen el mayor reservorio (petróleo) del Grupo Cogollo en la región de Perijá.

- **Formación Lisure**

La litología de esta formación se distingue por la presencia de areniscas glauconíticas, calizas silíceas, calizas glauconíticas y lutitas limosas.

- **Formación Maraca**

Contiene capas de gran espesor de calizas grises con delgadas intercalaciones de margas.

- **Formación La Luna**

Está caracterizada por la presencia de calizas negras en láminas delgadas, bituminosas, con lutitas calcáreas.

2.6 TERRENOS DEL CENOZOICO

Hacia finales del Cretácico y comienzos del Paleoceno, Venezuela Occidental sufrió finalmente el efecto de la colisión entre la Placa de Nazca (Océano Pacífico) y el Occidente Colombiano; existen evidencias de que la sedimentación del Grupo Orocué (y posiblemente las formaciones Guasare y Marcelina) estuviesen controladas por los frentes de deformación de la citada colisión; éstos generaron sucesivos depocentros de edades cada vez más jóvenes hacia el este de lo que hoy día es la Sierra de Perijá.

Los terrenos del Cenozoico están compuestos por las formaciones Guasare, La Sierra, Grupo El Fausto, Los Ranchos y el Milagro.

2.6.1 Formación Guasare

Está compuesta por calizas arenáceas en capas gruesas, areniscas de grano fino a medio y en menor proporción lutitas calcáreas con material orgánico.

2.6.2 Formación La Sierra

Esta litología incluye areniscas cuarcíticas y feldespáticas de grano fino a medio con estratificación cruzada, lutitas grises a marrón, eventualmente carbonosas (Quebrada La Gé), así como delgados horizontes de conglomerado intercalados a lo largo de toda la sección.

2.6.3 Grupo El Fausto

Su litología está caracterizada por una secuencia de lutitas, arcilitas y limolitas abigarradas con escasas areniscas en capas delgadas.

2.6.4 Formación Los Ranchos

Consta de areniscas grano medio a conglomerático, ferruginosas, de color marrón, en capas delgadas interestratificadas con conglomerados de grano medio y limolitas.

2.6.5 Formación El Milagro

En el Pleistoceno se deposita la Formación El Milagro, la cual se encuentra en relación de discordancia angular con los sedimentos más antiguos. Esta secuencia se caracteriza por arenas friables de grano fino a grueso, muy micáceas, las cuales se encuentran interestratificadas con arcillas arenosas y lentes lateríticos bien cementados; presenta dos capas de arcillas arenosas y limosas con fragmentos y troncos de madera silicificada. Dichas capas cubren horizontes caracterizados por abundantes nódulos de hierro y formación laterítica.

2.7 EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LA SIERRA DE PERIJÁ

Miller (1960) considera que existen evidencias para postular en Perijá una estructura de “graben”, así como también la presencia de una hendidura axial provocada por la falla de Perijá, que separa dos elevaciones principales, una con levantamiento hacia el noroeste de la región central, y el otro hacia el norte-noreste contra la falla de Oca, la cual intercepta casi perpendicularmente a la Sierra.

Por otra parte Xavier y Espejo (1977) coinciden con Miller (op. cit.), e identifican tres directrices estructurales longitudinales con rumbos aproximadamente N35°E, u orientación transversal entre N50°E hasta E-O, y meridional de dirección norte – sur Figura 2.6.

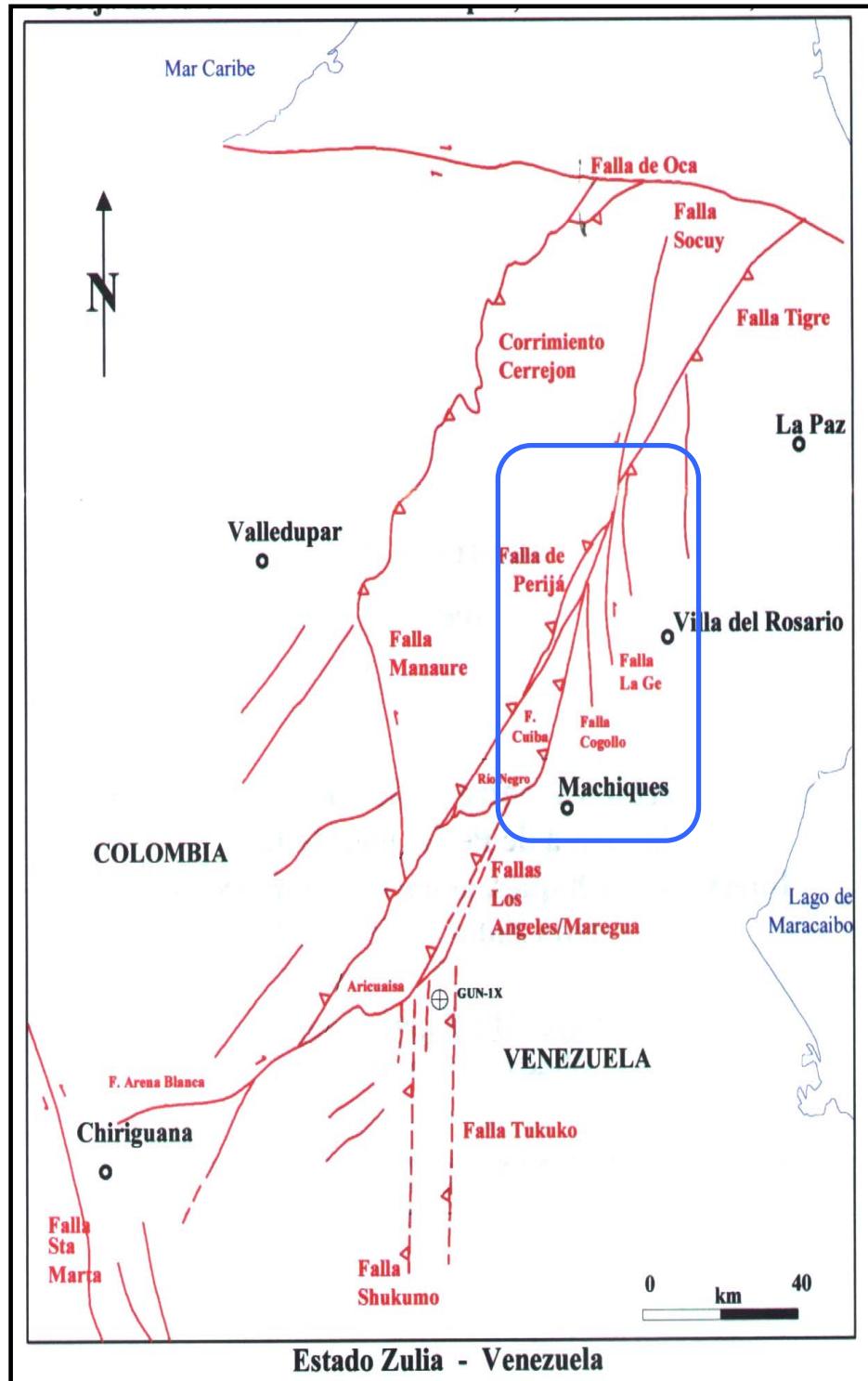


Figura N° 2.6. Relaciones tectónicas entre la Sierra de Perijá y la Sierra de Perijá meridional. Intervalo Machiques, al norte; Río Lara, al sur. (Tomado de Chaplet, 1999).

La estructura más importante de estas directrices es la denominada longitudinal, cuya mejor expresión es el alineamiento de la falla de Perijá en el sector sur y la de El Tigre en el sector norte. Esta directriz N30°E es ligeramente oblicua a la culminación o fila maestra, que se desarrolla en la parte norte de Venezuela.

En el flanco este de la Sierra de Perijá los rangos estructurales más importantes son estructuras de bloques (horst y graben), los cuales están delimitados por fallas con dirección N30°E, seguidos de otras estructuras importantes como lo son la falla de Perijá - El Tigre y Cuiba, y el sinclinal de Manuelote (Ujueta y Llinás, 1990).

En la parte Norte la falla de Oca se define como una falla dextral transcurrente con dirección este – oeste, con edad Mioceno hasta Plioceno en el movimiento principal y con terminaciones abruptas en el norte de la Sierra de Perijá. Otra estructura importante está ubicada en el flanco este de la sierra, conocida como la falla El Tigre con una dirección N35°E, la cual ha sido considerada activa desde el Paleozoico medio (Kellog, 1981).

La Falla de Perijá - El Tigre es inversa en el noroeste, aunque ha sido interpretada también como sinestral, de movimiento notable en el Mioceno con actividad previa desde el Oligoceno Tardío; presenta siete grados de buzamiento al sureste en el Río Cachirí (Kellog, 1981).

La Falla de Perijá es un sistemas de desplazamientos ramificados y paralelos que atraviesa a la Sierra en dirección preferencial suroeste. A lo largo de esta falla existe un sinclinal y una depresión estructural. Dicha falla culmina bruscamente en la dirección suroeste y es desplazada por la falla transversal de Arena Blanca (Guerra, 1999). También es importante destacar que la falla Aricuaisá entra a la Sierra a partir de la zona de falla de Cuiba caracterizada por una desalineación parcial de calizas de la Formación Cogollo.

2.8 ASPECTOS MÁS SIGNIFICATIVOS DE LA GEOLOGÍA LOCAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

La geología local para el área de estudio está enmarcada por la clara definición del rumbo de las estructuras geológicas (Figura N° 2.7), las cuales tienen una dirección aproximada en su diagonal principal de N45°E, observándose en toda su extensión rocas de diferentes edades, entre ellas el afloramiento de rocas ígneas alóctonas.

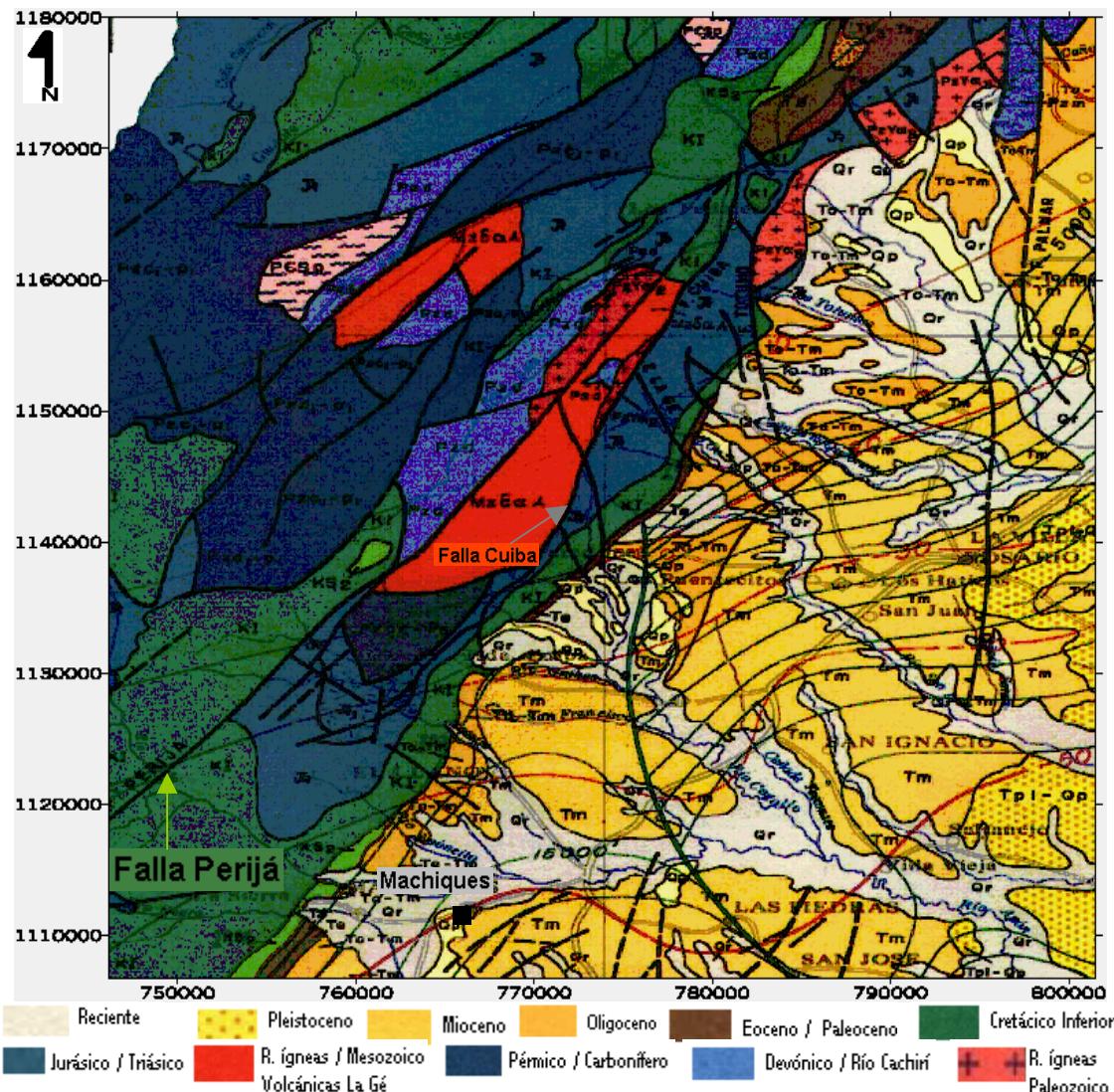


Figura N° 2.7. Mapa de la geología local del área de estudio. (Modificado de mapa geológico estructural de Venezuela (1976).

La parte superior de la diagonal consta de rocas más antiguas, de los periodos Mesozoico y Paleozoico, que marcan el límite de contacto con rocas de edad más joven (parte inferior de la diagonal) pertenecientes al periodo Cenozoico, lo cual constituye un conjunto de formaciones en su mayoría de rocas sedimentarias pertenecientes a la cuenca de Maracaibo.

Las alineaciones que presenta la zona están determinados por la Falla principal denominada Falla de Perijá (Figura 2.6) con rumbo aproximado de N45°E, encontrándose asociada a otras fallas de rumbo aproximado N-S. Se puede decir que es una región estructuralmente compleja debido a los diferentes eventos geológicos que se han presentan en la zona.

CAPÍTULO III

3 MARCO TEÓRICO

3.1 CAMPO MAGNÉTICO

En todo punto ó cualquier punto de la Tierra el campo geomagnético tiene dirección y magnitud determinadas. Es por ello que se puede representar como un vector, siendo su longitud la intensidad del campo y su dirección la que toma el campo para ese mismo punto. En otras palabras es un campo vectorial que tiene una componente significativa que es radial. La unidad de campo magnético, en el sistema c.g.s, es el Oersted que a su vez se define como el campo creado por un polo magnético de intensidad unitaria a 1cm de distancia. En Geofísica se utiliza el Gamma que equivale a 10^{-9} Tesla ó 10^{-5} Oersteds, como unidad de medición. (Figura 3.1)

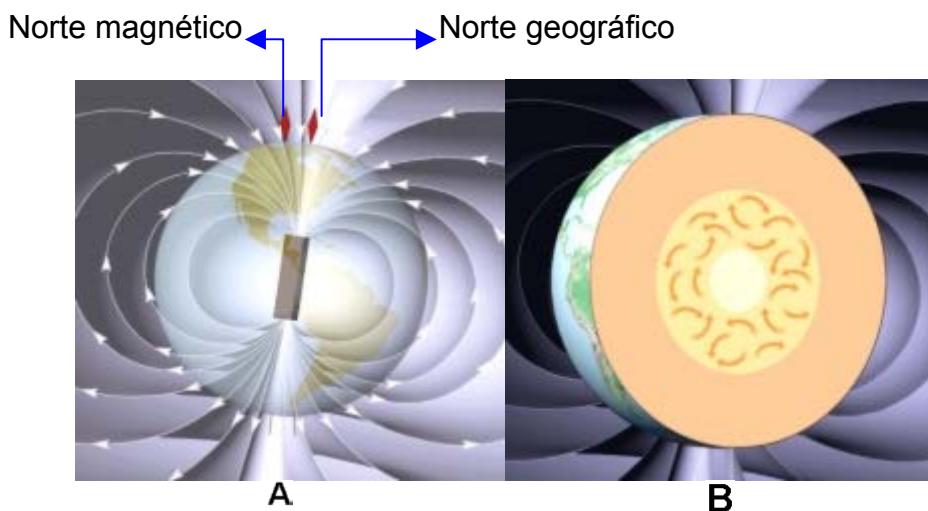


Figura Nº 3.1.A Líneas de fuerza del campo Magnético de la Tierra.

Figura Nº 3.1.B Campo Magnético de la Tierra generado por corrientes de convección

• FUERZA MAGNÉTICA

La fuerza magnética la constituyen las líneas que siguen la dirección del vector del campo magnético en cada punto del campo (Figura 3.2), en donde los polos magnéticos, que a su vez es uno de los puntos sobre la

superficie de la Tierra donde las líneas del campo geomagnético se orientan y concentran. El vector del campo geomagnético es vertical (Figura 3.2)

La Fuerza magnética está dada para los polos a través de ley de Coulomb.

Donde:

$$F = (1/n) * (M_A * M_B) / R^2$$

F: Fuerza magnética.

n: permeabilidad magnética, propiedad del medio.

M_A, M_B : polos magnéticos.

R: distancia entre los polos.

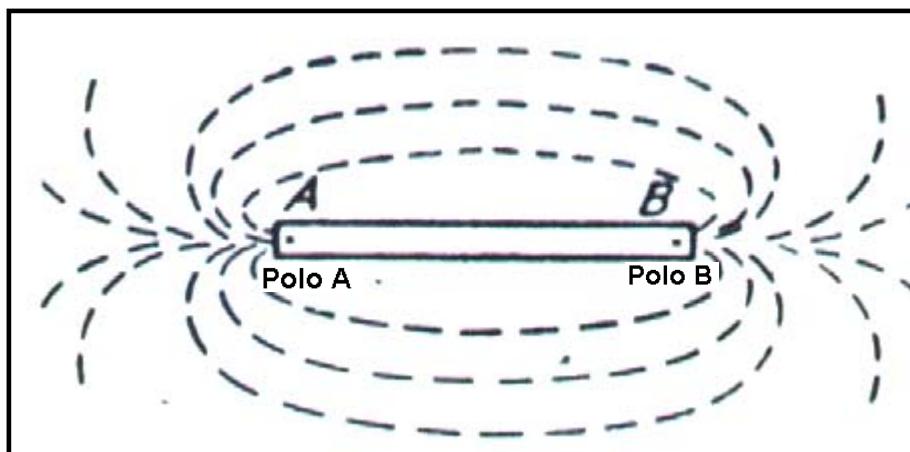


Figura N° 3.2. Líneas de fuerza en una barra imantada (Tomado de Dobrin, 1961).

3.1.1 Elementos del campo magnético terrestre

Entre estos elementos se tienen la componente horizontal (h) y la componente vertical (z) que dan como resultante el Campo Magnético Terrestre Total (T), que se expresa por $T^2 = h^2 + z^2$. Así mismo I será la inclinación con respecto al plano horizontal y la declinación D es el ángulo que forma la componente horizontal (h) con el meridiano geográfico del lugar. (Figura N° 3.3)

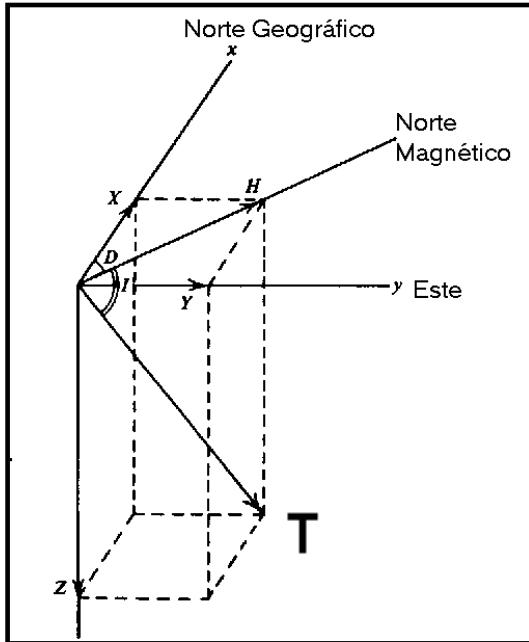


Figura N° 3.3 Parámetros del Campo Magnético. (Tomado del Telford et al., 1976)

3.1.2 Variaciones temporales del Campo Geomagnético

El Campo Geomagnético se caracteriza por la presencia de variaciones de corto periodo que están relacionadas a los cambios periódicos de los elementos magnéticos de la Tierra durante el día y la noche, entre las cuales se tienen:

- Micropulsaciones
- Pulsaciones
- Variaciones diurnas (duración de días)
- Tormentas magnéticas (duración de meses)

Las micropulsaciones y las pulsaciones son muy rápidas y de altas frecuencias (segundos), mientras que las variaciones diurnas tienen una duración de 23 a 24 horas y se deben a la interacción de la magnetósfera terrestre con la magnetosfera del sol y la luna.

Las tormentas magnéticas son grandes oscilaciones originadas de la interacción brusca de la magnetosfera terrestre con la solar durante fulgoradas solares.

Entre las variaciones de largo periodo, se distinguen:

- Variaciones de campo dipolar
- Variaciones de campo no dipolar
- Inversiones magnéticas

Las variaciones de largo periodo se asocian a fuentes internas, al contrario de las de periodo corto que no provienen del subsuelo. Los valores más bajos se dan en invierno en latitudes altas, y los valores más altos se dan en verano en el trópico. Estas variaciones están determinadas por el cambio del valor de cualquier elemento promedio anual para muchos años (durante un siglo). Se observan por las pequeñas desviaciones en la declinación, la inclinación y en los distintos componentes de la intensidad del campo. Las inversiones del campo geomagnético no tienen una periodicidad definida. Mientras el campo se mantenga dipolar, las inversiones afectan sólo en una variación de signo.

3.2 PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

El método magnético en la prospección geofísica consiste en medir con precisión el campo magnético terrestre en la región de interés y a partir de este, inferir la fracción aportada en la respuesta por los materiales rocosos del área de estudio. Se utiliza para detectar formaciones mineralizadas y accidentes geológicos tales como fallas, contactos, intrusiones, etc. Las mediciones magnéticas se efectúan por medio del magnetómetro y el campo resultante es el vector suma del magnetismo inducido y el remanente presente en las rocas.

3.2.1 ADQUISICIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS

Es un método que ha sido diseñado para ser usado en la modalidad aerotransportada. El trabajo desde el avión presenta algunas ventajas. En primer lugar, por causa de la velocidad de la prospección aérea se reduce el tiempo de adquisición lo que se traduce en bajos costos, contrario al hecho de si el levantamiento se hiciera desde el suelo, siempre y cuando la zona sea lo suficientemente extensa. En un segundo lugar, las mediciones se pueden realizar en zonas montañosas y cualquier otro accidente que resulte difícil o inaccesible para los equipos terrestres.

En los levantamientos aéreos la profundidad y el tamaño del área son determinantes. Si se prospecta a una altura de vuelo baja es para detectar estructuras superficiales. En este sentido la altura de vuelo actúa como un filtro para el ruido (filtro espacial) y se usa para la prospección de cuerpos profundos. Por otra parte es necesario tomar en cuenta que si no se conoce el rumbo de las estructuras que se desea, se hace necesario hacer el vuelo norte – sur, este – oeste. Teniendo en cuenta que lo deseable es moverse en dirección perpendicular al rumbo de las estructuras.

Entre las principales ventajas del método aeromagnético se cuentan: rapidez, proporción de perfiles continuos y eliminación de las perturbaciones debidas a causas superficiales. El principal inconveniente del método es la atenuación de la señal en el ensanchamiento de las anomalías con la altitud del detector, lo que origina que anomalías de distintos orígenes se confundan en una sola.

3.3 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LAS ROCAS

Se puede prospectar con métodos magnéticos porque el campo magnético terrestre afecta a los cuerpos y se asocia al hecho de que la roca tiene capacidad para magnetizarse, aunque en el medio donde se encuentra

no está magnetizada. Ello implica una diferencia intrínseca para ser prospectadas.

Para métodos magnéticos se requiere la presencia de variaciones de la susceptibilidad magnética. La respuesta del subsuelo de una región depende de esta propiedad. Por lo tanto se hace necesario hablar de magnetización (\vec{J}) de las rocas, la cual es un vector. Si la capacidad depende sólo de la propiedad física, entonces se tendría un solo tipo de respuesta, de allí que la magnetización (\vec{J}) se define como:

$$\vec{J} = \vec{J}_R + \vec{J}_I$$

Donde:

J_R : Magnetización remanente.

J_I : Magnetización inducida.

La susceptibilidad magnética es la medida de la capacidad que tiene un cuerpo de adquirir magnetización inducida (carece de unidades) en presencia de un campo magnético externo inductor. Cuya ecuación es:

$$\vec{J}_I = K \vec{T} ; \quad \vec{J}_I >>> \vec{J}_R$$

Donde:

\vec{T} : Campo magnético.

K: constante de proporcionalidad que para los materiales paramagnéticos está en la banda de 10^{-2} a 10^{-6} .

Las rocas ígneas (10^{-2}) tienen mayor valor de "k" que las sedimentarias (10^{-6}).

La susceptibilidad magnética de las rocas depende de las susceptibilidades de sus minerales constituyentes y está influenciada por factores tales como la forma y la anisotropía magnetocristalina en tales

minerales, el porcentaje de los mismos por unidad de volumen y la interacción magnética entre minerales vecinos. Cuando se habla de susceptibilidad magnética se distinguen los siguientes materiales:

Paramagnéticos.

Ferromagnéticos.

Antiferrimagnéticos.

Diamagnéticos.

Una roca se compone de minerales que en su mayoría identifican la capacidad magnética de dicha roca. Los minerales opacos generalmente tienen en su estructura cristalina componentes magnéticos. Los dominios magnéticos se orientan paralelamente al campo inductor. Los paramagnéticos están en un 95% de las rocas, el vector (\vec{J}_I) es paralelo al vector del campo magnético (\vec{T}) controlado en magnitud por "K". Si es diamagnético (cuarzo) el dominio magnético se coloca en posición no paralela.

Adicionalmente, las rocas o sedimentos al ser sometidos a un campo magnético externo débil muestran un magnetismo inducido, el cual desaparece al remover el campo. El cociente de la magnitud del Magnetismo Inducido (MI) y de la Intensidad del Campo Externo (ICE) también definen la susceptibilidad magnética, cuyo parámetro es una función ascendente de la concentración de minerales magnéticos.

Otro punto a considerar es el paleomagnetismo en las rocas, las cuales adquieren un Magnetismo Remanente Natural (MRN) en la misma dirección del campo geomagnético, durante su formación y/o evolución geológica posterior, debido a los cambios físicos y químicos que experimentan los minerales cuando se exponen a la presencia de dicho campo. De acuerdo a su origen el magnetismo remanente puede ser: térmico, detrítico, químico, viscoso e isotermal, en donde varias de estas

magnetizaciones pueden estar presentes simultáneamente en una misma roca.

Una roca puede portar un magnetismo remanente natural resultado de varias componentes adquiridas en tiempos geológicos diferentes como resultado de recalentamientos, cambios de presión durante reactivaciones tectónicas, flujos de aguas hidrotermales, etc.

3.4 ANOMALÍAS MAGNÉTICAS

Son el resultado de comparar los valores magnéticos observados con los valores magnéticos teóricamente calculados, para cualquier desviación del campo magnético normal de la Tierra. Las anomalías magnéticas características tienen presentes muchos niveles de ruido cultural, y sus magnitudes van desde algunas gammas hasta decenas y cientos de gammas, por lo tanto la depuración del ruido es muy importante.

3.4.1 Mapas Magnéticos

Son aquellos mapas donde está contenida toda la información de los valores numéricos de las variaciones del campo magnético (gammas) representadas en contornos de mayor o menor gradiente, y su interpretación se fundamenta en la forma de las curvas de anomalías magnéticas dependiendo no sólo de la susceptibilidad magnética y de las formas, volumen y profundidad a que se encuentra la causa geológica, sino también de la orientación de esta última y de las características locales del campo magnético.

3.4.2 Interpretación de anomalías magnéticas

- Interpretación cualitativa:** Es la fase de la interpretación geológica del campo anómalo, en la cual se establecen relaciones entre las características del campo magnético y su vinculación con la geología de la región. En esta etapa o fase se dejan establecidos:

- a) Los probables modelos geológicos que determinan el carácter del campo magnético anómalo.
- b) La relación de los elementos geo-estructurales, relacionándolos entre si para una interpretación global de la zona.

- **Interpretación cuantitativa de anomalías magnéticas**

Una vez conocido el modelo físico del área en estudio, es necesario conocer los parámetros físicos (susceptibilidad, imantación etc.), los parámetros geométricos (volumen, profundidad, buzamiento, tope superior e inferior etc.) y todo parámetro que sea necesario para definir geométricamente el modelo en estudio

3.4.3 Modelaje magnetométrico

Para la elaboración del modelado magnético se toma como punto de partida el mapa aeromagnético y perpendicular a las líneas de tendencia se trazan los perfiles magnéticos. El modelado consiste en suponer un cuerpo con una determinada forma, profundidad y propiedades magnéticas, para luego calcular el valor de la anomalía magnética producida por dicho cuerpo, que posteriormente es comparada con los valores observados.

La interpretación se fundamenta en el solapamiento de las curvas de Intensidad Magnética observada y calculada, las cuales van a depender no sólo de la susceptibilidad magnética sino también de la forma, volumen y profundidad a que se encuentra la fuente geológica, aunque también de la orientación de ésta última y de las características locales del campo magnético.

El objetivo final de la interpretación magnética es la deducción de la geometría de los cuerpos, los cuales representan una distorsión o perturbación local del campo geomagnético, producido por los cambios locales en la magnetización de las rocas. La solución de este problema radica en que una vez que se conoce la respuesta magnética del subsuelo

se propone una reconstrucción geométrica de éste, capaz de responder a la respuesta experimental. Esto se realiza a través del programa GM- SYS (GEOSOFT, 1995), programa que permite calcular la respuesta gravimétrica y magnética a partir de un modelo geológico, mediante polígonos caracterizados por las propiedades magnéticas de los cuerpos.

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO, GEOESTADÍSTICO Y ESPECTRAL DE LOS DATOS

4.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

Con la finalidad de resumir la información que contiene la población global sobre su comportamiento natural, ésta puede ser analizada desde dos puntos de vistas, en primer lugar un análisis estadístico mediante el uso de la estadística descriptiva que aborda el problema de sintetizar la información revelada por los datos geofísicos, cuyo objetivo principal va a ser la inferencia estadística acerca del comportamiento de la población global. En segundo lugar se trata de explorar los resultados de la población con la finalidad de hacer un análisis coherente. Por ello se utiliza la inferencia estadística, dentro de la que puede distinguirse la prueba paramétrica, cuya justificación teórica se apoya en hipótesis específicas relativas al tipo de distribución de la población, usualmente la distribución normal.

Uno de los problemas fundamentales que afronta un análisis estadístico consiste en buscar el valor más representativo de una serie de valores, es decir, que si se tiene una cantidad que varía, ya sea en el tiempo o en el espacio, se necesita tener su grado o nivel generalmente predominante, el cual va a estar basado en el promedio.

De acuerdo a lo anteriormente expuesto los valores de anomalía magnética fueron analizados mediante las pruebas estadísticas que producen:

- Los parámetros para medir el grado de centralización de los datos, a saber: media, moda y mediana.
- Los parámetros para medir el grado de dispersión existente, es decir: Variancia, desviación y desviación típica.

Adicionalmente se aplican las pruebas de Kolmogorov – Smirnov para deducir si la población de datos geofísicos proviene de una distribución normal.

4.1.1 Estimaciones

La estimación es una de las operaciones fundamentales de la estadística inductiva o inferencia estadística que es aplicable cuando se conoce completamente la población que se desea estudiar. (Gómez, 1983).

Es bastante usual encontrarse con poblaciones muy grandes, de las cuales es muy difícil o imposible obtener todos los datos. Cuando se está en una situación como ésta y se desea conocer alguna característica de la población total, la única solución consiste en estimarla, es decir, buscar un valor lo más aproximado posible al valor real. Por tal razón se recurre a la selección de muestras que a su vez van a representar a la población total de los datos, y una vez obtenida esa muestra, realizar las operaciones pertinentes que lleven a un resultado estimado. Evidentemente, siempre que se realice una estimación, se tendrá la duda si existe acierto o no, pero la estadística va a proporcionar no sólo la estimación, sino la garantía de acertar.

4.1.2 Fenómenos Aleatorios

La posición científica ha concebido que los fenómenos aleatorios o de azar, constituyen ya un campo propio y natural del estudio científico, el cual se hace con los métodos de la estadística (Ríos, 1972). En específico es importante conocer los conceptos de población y muestra, siendo la población un conjunto bien definido de elementos, sea finito o infinito. En Geofísica estos elementos son comúnmente mediciones efectuadas sobre determinada variable, que corresponde a puntos bien ubicados sobre la

superficie terrestre a un nivel de referencia arbitrario, pero perfectamente determinada, mientras que una muestra se define como un subconjunto de elementos tomados de una población.

- Para ver las características de los fenómenos aleatorios es preciso destacar lo siguiente:

1. Cada elemento de la población tiene la misma probabilidad de ser elegido.
2. Las observaciones se realizan con reemplazamiento, es decir que la población es idéntica en todos los casos.

En estas circunstancias de los fenómenos aleatorios, la idea fundamental es que para aumentar la exactitud, el único camino posible es tener más información sobre la población total. Para conseguir mayor información, evidentemente una posibilidad es tomar más datos. Sin embargo, en determinados casos se puede conseguir mayor información sin tener que recurrir a un aumento de la muestra, sino tomando la muestra de manera diferente.

Es por ello que cuando se tiene una población de algún parámetro o propiedad de interés en la cual se requiere hacer un estudio o análisis estadístico, es muy importante tomar en cuenta las siguientes condiciones:

1. Conocer los datos para analizar su comportamiento y esto se logra por medio de la estadística descriptiva (análisis univariado).
2. Analizar el comportamiento de la variabilidad espacial para ver si existen patrones de distribución o posibles anomalías.
3. Utilizar métodos de estimación y modelos probabilísticos.

4.2 ANALISIS GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

Los orígenes de la geoestadística están en la minería y se remontan hacia los trabajos de Sichel (1947, 1949), quien, observando la naturaleza asimétrica de la distribución del contenido de oro en las minas sudafricanas, la equiparó a una distribución logarítmica–normal desarrollando fórmulas básicas para dicha distribución (Trujillo, 1999). Desde la Minería, las técnicas geoestadísticas se han exportado a diversos campos, tales como la geología, la hidrología etc. Siendo en la actualidad una herramienta de gran utilidad en la ingeniería de petróleo para lograr la captación de distribuciones espaciales de las propiedades de los yacimientos con la idea de cuantificar el valor de la incertidumbre.

En el caso específico de los datos, la variación espacial fue tratada mediante una análisis geoestadístico, el cual consiste en una aplicación de diversos métodos estadísticos que permiten describir la autocorrelación espacial de los datos de la muestra mediante una variedad de modelos espaciales (Apéndice B). Este análisis se llevó a cabo mediante la utilización del programa GRIDSTAPRO (GRIDSTAPRO Inc., 1999), y el programa VARIOWIN 2.21. (1998), los cuales proporcionan variogramas, elipses de anisotropía, mapas y modelos tridimensionales para la muestra estudiada.

La secuencia del estudio realizado comenzó con la elaboración del mapa de tendencia para ubicar los modelos de mayor y menor tendencia anisotrópica. Posteriormente se hizo la verificación con el software GRIDSTAPRO, el cual aporta una tabla de ajuste de datos con los modelos de variogramas fractales, exponencial, gausiano, semigausiano y esférico.

Se ilustra igualmente la roseta de distribución (Figura 6.13) y la elipse de anisotropía (Figura N° 6.14), que sirven de base para determinar la continuidad espacial de los datos. En la elipse de anisotropía el eje mayor corresponde a la dirección de mayor continuidad de los datos y el eje menor a la mayor variación de los mismos.

Una vez conocido el modelo teórico de distribución espacial de mejor ajuste para los datos, se tomaron los parámetros anisotrópicos (efecto pepita, rango, meseta y modelo), y se construyó el mapa de anomalías magnéticas aplicando el método de Kriging. Éste asigna un valor estimado a una localización determinada o a un bloque, cuya estimación viene a ser una combinación cargada de los valores de la muestra alrededor del punto que se estimará, reduciendo al mínimo la variación de los errores en la valoración.

4.3 ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS DATOS GEOFÍSICOS

En el método de análisis espectral, las características de las anomalías observadas son estudiadas mediante la primera transformación de los datos desde el dominio del espacio al dominio del número de onda. Bhattacharyya (1966) y Treites, et al., (1971) han establecido que en el análisis espectral, la amplitud del espectro de potencia dado en una escala logarítmica contra una escala lineal de número de onda, permite mostrar intervalos del mismo, en los cuales los logaritmos de la amplitud pueden ser representados por una función de frecuencia, observándose que la amplitud decrece con el incremento del número onda. La inclinación de la línea recta (pendiente) tangente a la curva del logaritmo del espectro de potencia (Figura 4.1) va a ser proporcional a la profundidad del tope de los cuerpos anómalos.

4.3.1 Análisis de longitudes de onda

El análisis de las longitudes de onda para las anomalías magnéticas del área de estudio permite una mejor compresión de las fuentes profundas con respecto a las someras, aunque ésta no es la forma única de caracterizar estos efectos.

El análisis de longitud de onda para datos bidimensionales es mejor realizarlo por la transformada de Fourier del conjunto de datos de entrada desde el dominio espacial (o tiempo) al dominio del número de onda (o frecuencia). Una vez que los datos de gravimetría y magnetometría han sido transformados en el dominio de Fourier, ellos pueden ser analizados por su contenido de longitudes de onda (frecuencia) con lo cual se trata de evaluar como se distribuye el comportamiento de la anomalía magnética en función del número de onda o frecuencia. De igual manera, estudios cuidadosos de las componentes de las longitudes de onda en anomalías de interés usualmente llevan a importantes inferencias en cuanto a las fuentes anómalas (profundidad, extensión lateral y espesor).

4.3.2 Método de análisis

El primer paso para la interpretación de datos potenciales es transferir la información desde un mapa o perfil a una cuadrícula digital. Con la finalidad de ser tratados con la computadora. Como el software donde vienen incluidos los programas de procesamiento, requiere que los parámetros de la cuadrícula NxM (N =número de filas, M =número de columnas) con todos lados de la matriz sean continuos, como si fueran doblados de derecha a izquierda y de arriba hacia abajo, lo cual se logra rellenando mediante extrapolación de los datos de la matriz hasta alcanzar un rectángulo, cuyas dimensiones sean potencias de dos.

Una vez colocados los datos de anomalía magnética en la cuadricula de NxM se transforman desde el dominio espacial al dominio del número de onda por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT) en dos dimensiones. El conjunto de datos en el dominio del número de onda es comúnmente llamado una transformada. Una transformación de una cuadrícula está compuesta de números de onda, los cuales tiene unidades de ciclos/m y con su respectiva componente real e imaginaria. Una función potencial de campo en el dominio espacial tiene una función de dominio de número de onda simple, única y viceversa. La adición de dos funciones (anomalías) en el dominio espacial es equivalente a la adición de sus transformadas.

El espectro de energía promediado radialmente, es una función de sólo el número de onda y es calculada mediante un promedio de la energía en todas las direcciones para el mismo número de onda. De la transformada de Fourier de estos datos resulta un conjunto de amplitudes reales $P(\mu, v)$ e imaginarios $iQ(\mu, v)$, por lo cual los valores dados por o en la cuadrícula (x,y) pueden ser representados mediante una función $f(x,y)$, definida por la integral doble. (El desarrollo de esta integral se presenta en el Apéndice C)

$$f(x, y) = 1 / 4\pi^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mu, v) e^{j(\mu x + v y)} d\mu dv \quad (1)$$

y su forma recíproca:

$$F(\mu, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j(\mu x + v y)} dx dy \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) representan la Transformada de Fourier

bidimensional, donde μ, v , son las frecuencias angulares en las direcciones de x e y respectivamente.

$F(\mu, v)$ es en general compleja, y contiene información de las fases y amplitudes con respecto a todos los números de onda o frecuencias que se ajustan a una función bidimensional $f(x, y)$.

Luego se separa la función $F(\mu, v)$ en su parte real e imaginaria dadas por:

$$F(\mu, v) = P(\mu, v) + jQ(\mu, v)$$

La amplitud de densidad espectral, o simplemente el espectro de amplitud de $F(\mu, v)$ es:

$$A(\mu, v) = |f(\mu, v)| = [P^2 + Q^2]^{1/2}$$

Su espectro de densidad de fase, o simplemente espectro de fase, es:
 $\theta(\mu, v) = \arctan(Q / P)$.

La densidad espectral de energía, o simplemente el espectro de energía viene dado por:

$$E(\mu, v) = |f(\mu, v)|^2 = [P^2 + Q^2]$$

4.3.3 Descripción del algoritmo de WINOGRAD de la Transformada Rápida de Fourier (FFT)

En el programa Magmap (GEOSOFT, 1994), la FFT es usada para convertir datos de una cuadrícula al dominio de Fourier. El sistema aplica una FFT a una cuadrícula en el dominio espacial para producir como salida una transformada bidimensional. Como parte del proceso, el Magmap también calcula y salva el espectro de energía promediado radialmente de la

transformada. El sistema crea una cuadrícula en el dominio de Fourier denominada transformada, la cual tiene el mismo nombre de la cuadrícula de entrada, pero con extensión .trn. La transformada de la cuadrícula contiene o encierra una FFT discreta de la cuadrícula de entrada, y contiene la componente real e imaginaria de un número complejo.

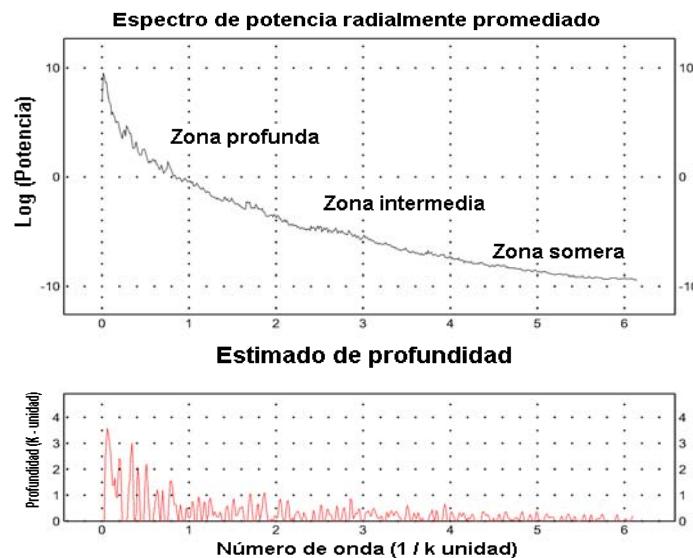


Figura N° 4.1. Salida gráfica del programa Magmap, GEOSOFT (1994).

La salida suministrada por el programa Magmap GEOSOFT (1994) es de tipo gráfico como se puede ver en la Figura N° 4.1, en la cual se pueden distinguir tres zonas de profundidad mediante el trazado de segmentos de recta tangentes a la curva, logrando identificar las zonas profunda, intermedia y somera empleando la siguiente fórmula:

Profundidad = $m / 4\pi$, que permite obtener la profundidad a la que se encuentra la fuente.

Donde

m : pendiente del segmento de recta ajustada a la curva.

CAPÍTULO V

5 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

5.1 FUENTES DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

De acuerdo a la información existente, para la zona en estudio es fundamental destacar la importancia que tiene la variable en estudio como lo es la anomalía magnética, como eje principal en la realización de este trabajo, la cual fue medida en la modalidad aerotransportada a 100 metros de altura tomando las mediciones puntuales por estaciones a lo largo de trayectos de orientación preferencial con la finalidad de tener un buen control en la recopilación de los datos aeromagnéticos.

El levantamiento aeromagnético se realizó en el año 1976, en direcciones perpendiculares a las orientaciones de las estructuras geológicas presentes en la Sierra de Perijá, Edo. Zulia, con una separación entre líneas de vuelo de 1 kilómetro, y en dirección paralela cada 10 kilómetros para generar un mallado del área de estudio (curvas de conteo total). Posteriormente fueron elaborados los mapas aeromagnéticos de componente total, los cuales fueron tomados como base para la realización del proceso de digitalización en este estudio.

5.2 REPROCESAMIENTO DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

Concluida la digitalización de los cuatro mapas de componente total de escala 1: 50.000, se guardaron en formato digital con extensión punto tif (mejor resolución de la imagen), y por medio de software AutoCAD 2000 (1999) se procedió al “ajuste” de cada imagen, con la finalidad de reducir o cometer el menor error posible a la hora de ir seleccionando los puntos de muestreo sobre las curvas de contorno, dependiendo del mayor o menor gradiente. Para ambos casos, el muestreo de digitalización fue aproximadamente de 200 m entre punto y punto para cada una de las curvas.

Una vez seleccionados todos los puntos de una determinada curva, se le asignó el valor de la anomalía magnética, que en un proceso posterior da un origen a un archivo de salida, el cual consta de los valores de las coordenadas “x”, e “y”, y el valor de la anomalía para cada una de las curvas y así sucesivamente para todos los mapas. Posteriormente, estos resultados se depuraron con el objetivo de crear las diferentes ventanas de trabajo en formato digital, las cuales constan de tres columnas: Longitud oeste y Latitud norte (en coordenadas UTM) y el valor de la anomalía magnética.

Se aplicó entonces a los datos en formato digital la estadística descriptiva la cual aporta información sobre que tan homogéneo o heterogéneo es el comportamiento de la población total representada por la variable anomalía magnética (en GAMMAS) de la población total de datos. Este tratamiento incluyó:

- Gráficos de barras.
- Medidas de tendencia central: Media, Moda y Mediana.
- Histogramas con curva normal.
- Pruebas no paramétricas.
- Diagramas de caja.
- Análisis de conglomerado.
- Medidas de asimetría.
- Medidas de Kurtosis.
- Pruebas de Kolmogorov - Smirnov

Estas herramientas permiten encontrar los valores o gráficos que resumen la información del comportamiento de la población global. Una vez culminada esta parte se realizó un muestreo aleatorio para elegir una población representativa con la finalidad de aplicarle el mismo tratamiento que a la población total para comparar resultados (estadística población total contra la estadística de la muestra aleatoria) y de esta forma analizar la

coherencia existente, previo al uso de la segunda herramienta, como lo es la geoestadística.

En primer lugar se elaboró un mapa de tendencia (Figura N° 5.12) de la anomalía magnética para analizar su correspondencia con el mapa geológico. Una vez comprobada la dirección de tendencia aproximada de N29°E, se eligió ésta con un ángulo de tolerancia de 22.5° por encima y por debajo de dicha dirección con el propósito de obtener el variograma experimental. Posteriormente se ajustaron sus elementos para tener como resultado el modelo de variograma, que aporta información sobre mayor y menor rango de alcance, en otras palabras la mayor y menor tendencia anisotrópica, y sobre los elementos o parámetros que conforman el modelo (efecto pepita o nugget, modelo, meseta o sill y el rango). Estos parámetros son los requeridos por el método Kriging para elaborar el mapa aeromagnético con criterios geoestadísticos

Para verificar la información obtenida en el punto anterior, se hizo uso del software GRIDSTAT (GRIDSTATPRO Inc., 1999), y usando la población de datos de la muestra aleatoria se elaboraron la roseta y elipse de anisotropía (Figuras 5.13 y 5.16). Con esta información se procedió a la elaboración del mapa aeromagnético con criterios geoestadísticos y para ser analizado se trazaron tres perfiles paralelos entre ellos y en dirección Noroeste – Sureste, como se indica en la siguiente tabla.

Perfil N°	Punto A (Noroeste)	Punto A' (Sureste)
1	Longitud 754599 Latitud 1146320	Longitud 779864 Latitud 1121640
2	Longitud 746177 Latitud 1176680	Longitud 796707 Latitud 1138730
3	Longitud 751791 Latitud 1180480	Longitud 799514 Latitud 1150110

Tabla N° 5.1. Coordenadas de ubicación de los tres perfiles magnéticos.

Conocida la ubicación de los perfiles (Figura N° 6.1) se procedió a su graficación (figuras 6.19 a 6.21), y se realizó posteriormente el análisis espectral de cada uno de ellos mediante el software GEOSOFF (1994). Los datos requeridos para el análisis espectral son las coordenadas en UTM y el valor de la anomalía magnética (Tabla N° 5.1) de cada perfil. Como resultado se obtiene una gráfica para cada perfil (Figuras 6.4 a 6.6).

Conocida la salida gráfica para cada perfil, el cálculo del segmento de recta (pendiente) tangente a la curva de logaritmo del espectro de energía contra el número de onda estima la profundidad a la que se encuentra la fuente anómala, y viene expresada por:

$$h = m / 4\pi$$

Donde:

$$m = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1) = (\log(\text{espectro})_1 - \log(\text{espectro})_2) / (k_2 - k_1)$$

h: profundidad estimada

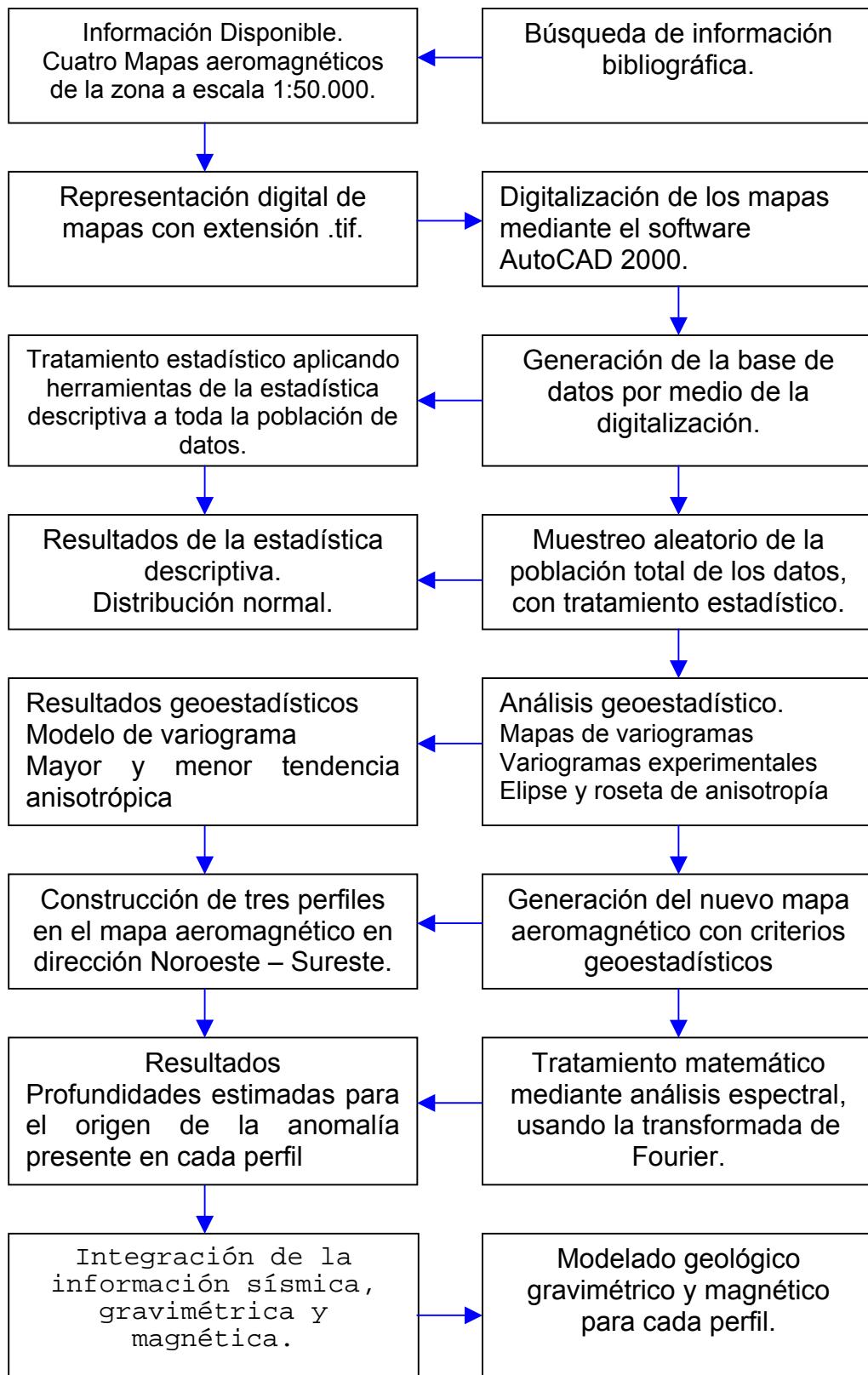
m : pendiente de la recta

x : número de onda

y : logaritmo del espectro de potencia

En el siguiente esquema se ilustra el procedimiento metodológico empleado en el desarrollo de este trabajo de investigación aplicado en cada una de sus etapas, indicando los pasos seguidos en el manejo de la información, tanto de tipo cualitativa como cuantitativa y la secuencia de procesamiento.

ESQUEMA DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO



En esta sección se describen los resultados del análisis estadístico y geoestadístico de los datos magnéticos obtenidos mediante la digitalización de los mapas aeromagnéticos existentes para la zona de estudio. Cabe destacar que el análisis estadístico de dichos mapas aeromagnéticos fue realizado para una población total de 38.242 datos magnéticos, así como también para una muestra aleatoria de 1000 datos (resecciones del programa) sobre la cual se realizó el análisis geoestadístico. Los datos e información recabada se obtuvieron mediante el análisis estadístico descriptivo y a través del empleo de herramientas de geoestadística para estudiar la variación de los datos.

5.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA POBLACIÓN TOTAL DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS.

La representación gráfica de los datos cuantitativos, mediante su histograma de frecuencia (Figura N° 5.1) muestra el comportamiento general de la distribución, donde el eje horizontal, contiene los datos magnéticos separados a intervalos de 10 gammas. El punto medio de cada intervalo, denominado marca de clase, facilitará la información del grupo de valores dentro de cada intervalo. También se pueden apreciar los límites superior e inferior, los cuales corresponden a los valores 3770 y 3300 gammas respectivamente.

En la parte central de la Figura N° 5.1, concretamente entre los valores de anomalías 3480 y 3570 Gammas, tiende a concentrar la mayor cantidad de valores. Dicho valor a su vez es proporcional a la frecuencia del valor correspondiente tomando en cuenta que no existen valores suficientes en su entorno para la separación de poblaciones para una distribución bimodal.

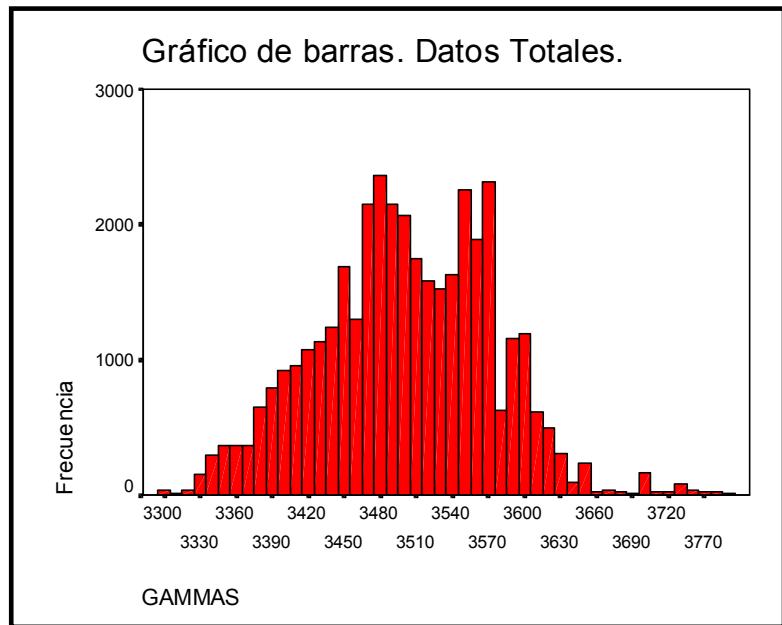


FIGURA N° 5.1.Datos magnéticos totales (variable magnética medida en gammas). Sierra de Perijá. Estado Zulia.

Se realizó el cálculo de la mediana y de la media como medidas de tendencia central más utilizadas. Los resultados se pueden observar en la Tabla N° 5.1, en los que se observa los valores de la media y la mediana (3501.17) y (3500) gammas respectivamente. Ambas medidas son representativas de la población de los datos magnéticos y esto se debe a que en la población de datos no hay valores extremos, que tiendan a alejar la media de los valores centrales, caso contrario de la mediana que engloba todos los valores que tiene a su alrededor sin importar los extremos, razón por la cual la población de datos estudiada posee un comportamiento homogéneo.

Estadísticos

	N		Media	Mediana	Moda
	Válidos	Perdidos			
GAMMAS	38243	0	3501.17	3500.00	3480

Tabla N° 5.2
Medidas de Tendencia Central.
Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado. Zulia.

Del estudio de la Tabla Nº 5.4, se observa que la desviación típica 72.85, valor que mide la heterogeneidad o inhomogeneidad que existe entre los datos. Este valor es pequeño en comparación con los valores de la media, mediana, moda y varianza, y aún con el rango (500 Gammas) de los datos. En forma concreta se puede decir que el comportamiento de los datos es homogéneo con una variación mínima, que puede estar atribuida al proceso de muestreo o tal vez al comportamiento de las fuentes anómalas causantes de la anomalía.

El recorrido intercuartil.(RIC) muestra que el 50% de los valores centrales de la distribución están comprendidos en un intervalo de 100 Gammas (Tabla Nº 5.4) que se encuentran entre 3450 y 3550; luego se observan dos grupos con un 25% de valores inferiores a los 3450 Gammas y el otro superior a los 3550 Gammas.

Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
GAMMAS	38243	100.0%	0	.0%	38243	100.0%

Tabla Nº 5.3. Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado. Zulia.

		Estadístico	Error típ.
GAMMAS	Media	3501.17	.37
	Intervalo de confianza para la media al 95%	3500.44	
	Límite inferior	3501.90	
	Límite superior		
	Media recortada al 5%	3501.07	
	Mediana	3500.00	
	Varianza	5306.730	
	Desv. típ.	72.85	
	Mínimo	3300	
	Máximo	3800	
	Rango	500	
	Amplitud intercuartil	100.00	
	Asimetría	.073	.013
	Curtosis	.160	.025

Tabla Nº 5.4. Resumen de la estadística descriptiva. Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

La Figura N° 5.2 representa el gráfico de caja, el cual ofrece un resumen en cuanto a la información más relevante de la distribución de frecuencias de la variable anomalía magnética. La parte central, llamada caja, donde están comprendidos el 50% de los datos centrales de dicha distribución y en ella se encuentran la mediana o percentil 50 representado por una línea horizontal, cuyo valor es 3501.17 gammas que corresponde a la mediana. La parte inferior y superior corresponden a los percentiles 25 y 75 respectivamente, como se puede observar en la Tabla 5.5.

Los valores comprendidos entre el menor valor y el percentil 25 (3450 Gammas) corresponden a los valores más pequeños de la población y los valores entre el percentil 75 (3550 Gammas) y el mayor valor son los valores más altos de la población. Cabe destacar que la mediana divide en forma simétrica a la caja, razón por la cual es un buen indicativo del comportamiento normal de la distribución.

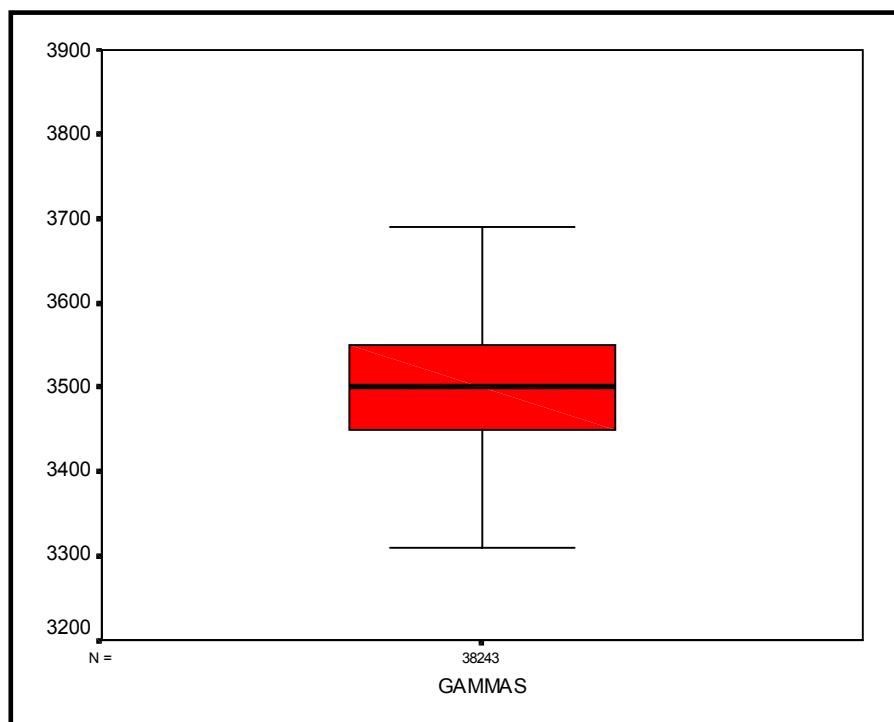


Figura N° 5.2. Diagrama de caja. Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado. Zulia.

	N	Percentiles		
		25	50 (Mediana)	75
GAMMAS	38243	3450.00	3500.00	3550.00

Tabla Nº 5.5

División de la población total a través de los **Percentiles**.
Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

En la Tabla Nº 5.4. Se encuentran registrados los valores de otras dos medidas de la distribución como lo son el coeficiente de curtosis y el de asimetría. El primero de ellos es una medida de concentración en torno a la media, que para variables que siguen un comportamiento normal tiene un valor igual a cero. Para este caso en particular tiene un valor de 0.16, muy próximo a cero.

Por otro lado el coeficiente de asimetría, como su nombre lo indica es la medida de simetría de la distribución de los valores respecto a la media. Si la distribución de dicha variable es simétrica, entonces su valor será igual a cero. El valor reportado por la Tabla Nº 5.4 es de 0.073. En forma resumida se puede decir que la variable en estudio tiende a seguir el comportamiento de una distribución normal ya que sus valores de coeficiente de curtosis y el de asimetría son muy cercanos a cero.

En la Tabla Nº 5.6, la corrección de la significación de Lilliefors da una significancia igual a cero, lo que indica que la variable en estudio proviene de una distribución normal. Y también los resultados de las pruebas no paramétricas que muestran los valores de distribución de probabilidad teóricos contra los prácticos para medir la dispersión entre ambas distribuciones, se reflejan en la Tabla Nº 5.7 de Kolmogorov – Smirnov, la cual muestra que la distribución de contraste es la normal

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		GAMMAS
N		38243
Parámetros normales ^{a,b}	Media	3501.17
	Desviación típica	72.85
Diferencias más extremas	Absoluta	.053
	Positiva	.037
	Negativa	-.053
Z de Kolmogorov-Smirnov		10.445
Sig. asintót. (bilateral)		.000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla Nº 5.6. Prueba de normalidad para la variable anomalía magnética (GAMMAS)

Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico	gl	Sig.
GAMMAS	.053	38243	.000

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Tabla Nº 5.7. Prueba de Kolmogorov – Smirnov para la variable anomalía magnética.

Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado. Zulia.

En el gráfico de probabilidad normal Gráfico Q-Q, Figura Nº 5.3, están representados los valores de la variable anomalía magnética (Gammas) en el eje horizontal, frente a los esperados bajo la hipótesis de distribución normal en el vertical. Si la muestra procediera de una distribución normal, dichos valores deberían ser aproximadamente iguales y en consecuencia los puntos del gráfico deberían estar situados sobre la recta que pasa por el origen con pendiente igual a 1, la cual se centra en el intervalo (-2, 2).

Otra alternativa gráfica para corroborar lo antes expuesto, se logra con el gráfico de probabilidad normal sin tendencia, representado por la

Figura N° 5.4. En el eje horizontal se encuentran los valores de anomalía magnética (Gammas), frente a las desviaciones a la recta del gráfico de probabilidad normal en el eje vertical, cuyos valores para una distribución normal deben ser menores que uno. Los puntos se sitúan alrededor de la línea horizontal. Al igual que el caso anterior se cumple para el intervalo (-2, 2), por lo que demuestra que el comportamiento de la distribución es normal.

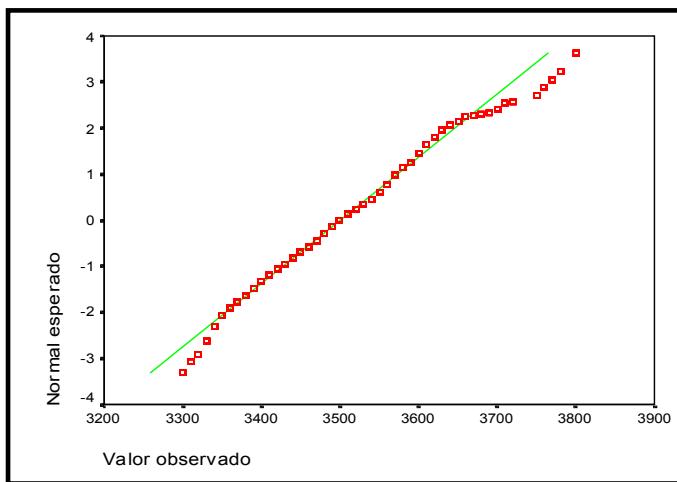


Figura N° 5.3. GRÁFICO Q – Q NORMAL DE LA VARIABLE ANOMALÍA MAGNÉTICA.
Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado. Zulia.

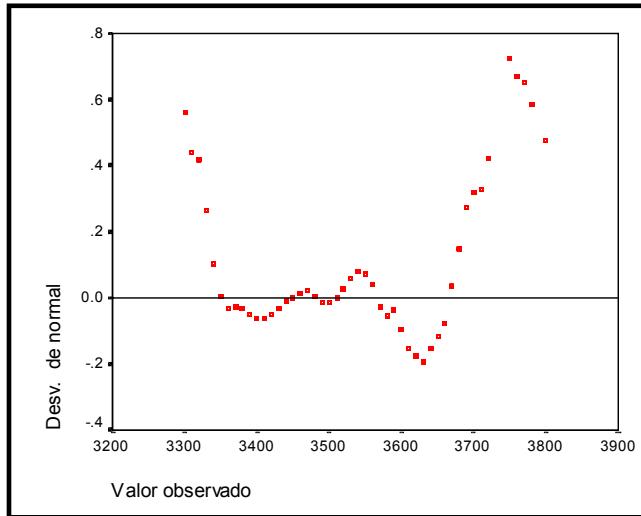


Figura N° 5.4. GRÁFICO Q – Q NORMAL SIN TENDENCIA DE LA VARIABLE ANOMALIA MAGNÉTICA. Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

En la Figura N° 5.5 se presenta el histograma de frecuencia que coincidentemente da una distribución normal de los datos, lo cual está corroborada tanto por el coeficiente de curtosis como el de simetría (Tabla N° 5.4), cuyos valores son próximos a cero, y de esta forma se comprueba que todos los valores se concentran en torno a la media (media = 3501). A la izquierda de ésta se encuentran los valores menores de la población que representan un grupo de cierres importantes ubicados en la parte norte del mapa de anomalías magnéticas, y otro conjunto de datos con valores superiores a la media, que representan cierres y direcciones de tendencia con orientación de N25°E aproximadamente. Por otra parte, teniendo en cuenta que la variable magnética medida en gammas tiene media = 3501 y desviación típica de 72.85 en el intervalo de 3400 a 3600, se concentraría aproximadamente el 85% de la distribución total.

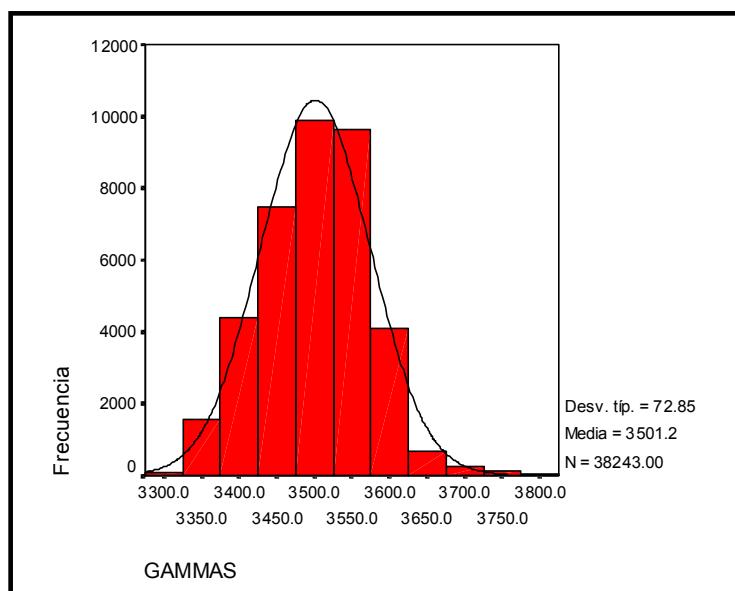


Figura N° 5.5. Histograma con Curva Normal

Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado. Zulia.

5.4 RESULTADOS DE LA ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA UNA MUESTRA ALEATORIA DE LOS DATOS MAGNÉTICOS.

En esta sección se comparan los resultados del estudio de la población total de los datos aeromagnéticos digitalizados con los de una muestra aleatoria de los mismos (Figura N° 5.6). La muestra seleccionada presenta un comportamiento de igual similitud al reportado por la población total, debido a que todos los valores tienen igual probabilidad, razón por la cual la estadística descriptiva aplicada en el muestreo aleatorio viene a ser una información comprobable y confiable para estudios posteriores como lo es el análisis geoestadístico. A continuación se presentan los resultados en igual secuencia que el apartado anterior.

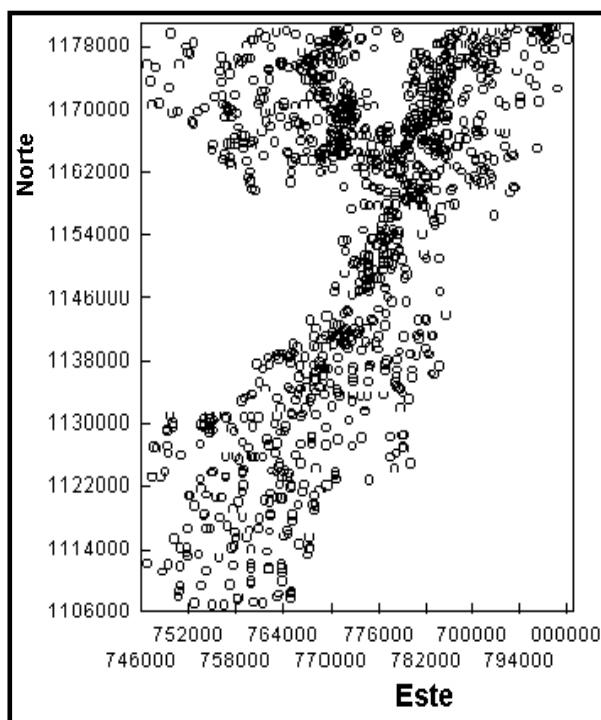


Figura N° 5.6 Datos de localización de los puntos (coordenadas norte y este) de la muestra aleatoria seleccionada.

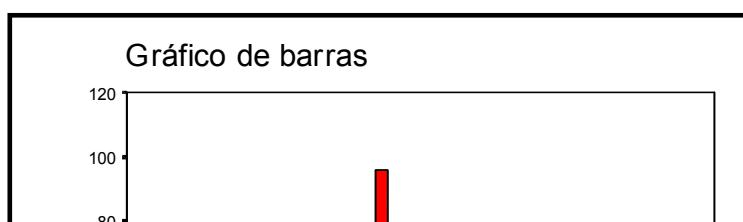


Figura N° 5.7. Datos magnéticos muestra aleatoria.

Estadísticos

	N		Media	Mediana	Moda
	Válidos	Perdidos			
GAMMAS	1162	0	3503.49	3500.00	3480

Tabla N° 5.8. Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

RESUMEN TOTAL DEL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS ALEATORIOS

Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
GAMMAS	1162	100.0%	0	.0%	1162	100.0%

Tabla N° 5.9. Datos magnéticos Totales. Sierra de Perijá. Estado Zulia

Descriptivos

			Estadístico	Error típ.
GAMMAS	Media		3503.49	
	Intervalo de confianza para la media al 95%	Límite inferior	3499.29	
		Límite superior	3507.68	
	Media recortada al 5%		3503.46	
	Mediana		3500.00	
	Varianza		5313.337	
	Desv. típ.		72.89	
	Mínimo		3300	
	Máximo		3770	
	Rango		470	
	Amplitud intercuartil		110.00	
	Asimetría		.039	.072
	Curtosis		.129	.143

Tabla N° 5.10. Resumen de la estadística descriptiva.
Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia

ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA VARIABLE ANOMALÍA MAGNÉTICA (MEDIDA EN GAMMAS)

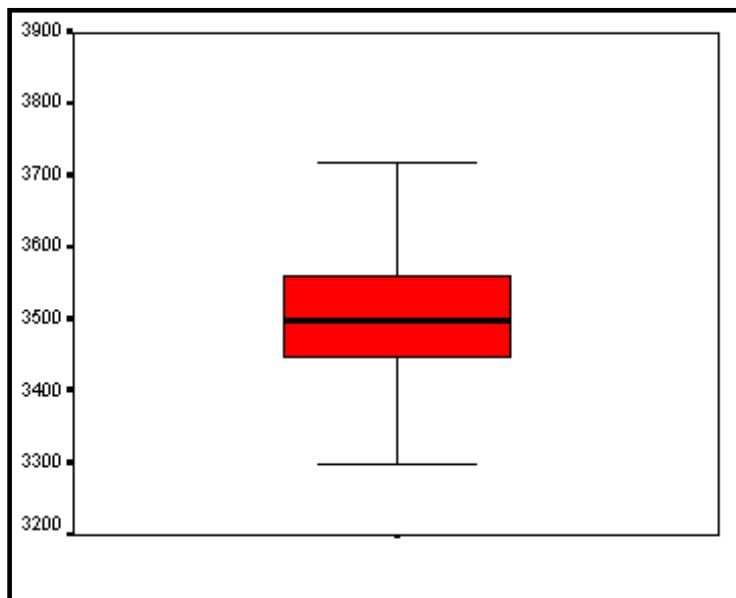


Figura N° 5.8. Diagrama de caja. Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia

Estadísticos

	N		Percentiles		
	Válidos	Perdidos	25	50	75
GAMMAS	1162	0	3450.00	3500.00	3560.00

Tabla N° 5.11. División de la población aleatoria a través de los percentiles.
Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS.

Pruebas de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico	gl	Sig.
GAMMAS	.062	1162	.000

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Tabla N° 5.12.

Prueba de normalidad para la variable anomalía magnética.
Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		GAMMAS
N		1162
Parámetros normales ^{a,b}	Media	3503.49
	Desviación típica	72.89
Diferencias más extremas	Absoluta	.062
	Positiva	.045
	Negativa	-.062
Z de Kolmogorov-Smirnov		2.110
Sig. asintót. (bilateral)		.000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 5.13. Prueba de Kolmogorov – Smirnov para la variable anomalía magnética.
Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

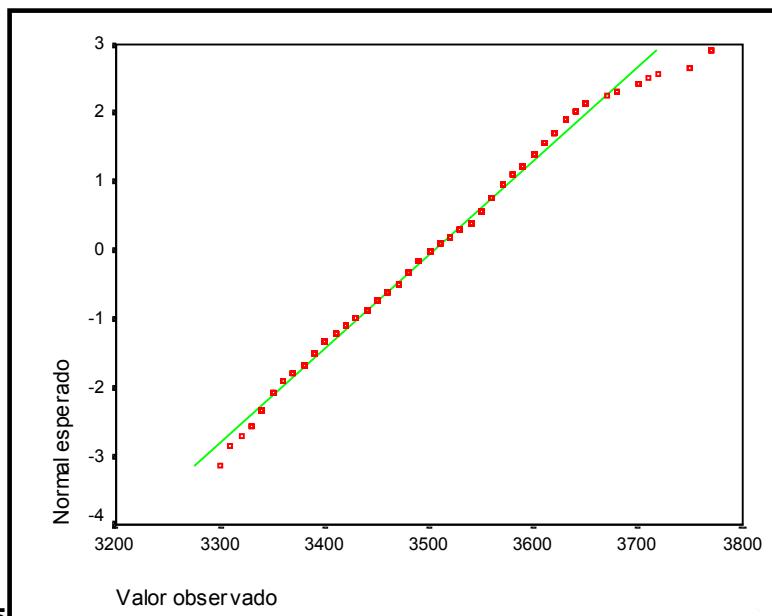


Figura N° 5. GRÁFICO Q – Q NORMAL SIN TENDENCIA DE LA VARIABLE ANOMALÍA MAGNÉTICA.
Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia

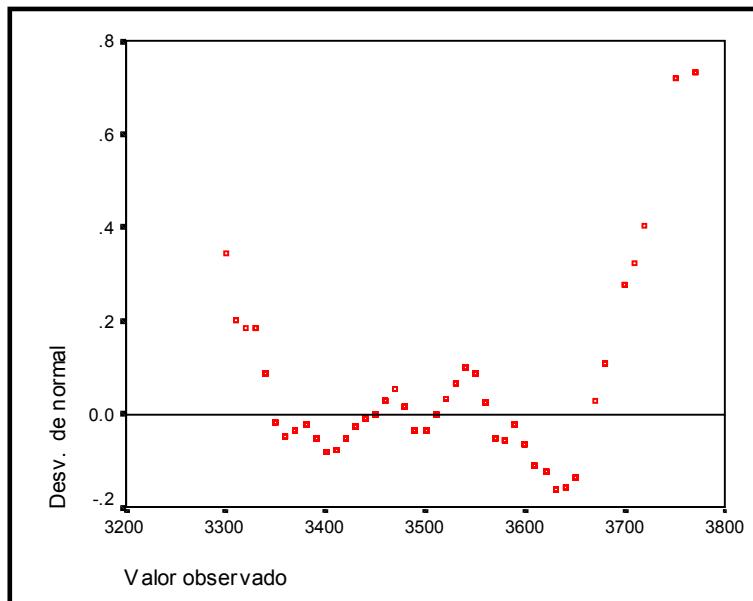


Figura N° 5.10. GRÁFICO Q – Q NORMAL SIN TENDENCIA DE LA VARIABLE ANOMALÍA MAGNÉTICA.
Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

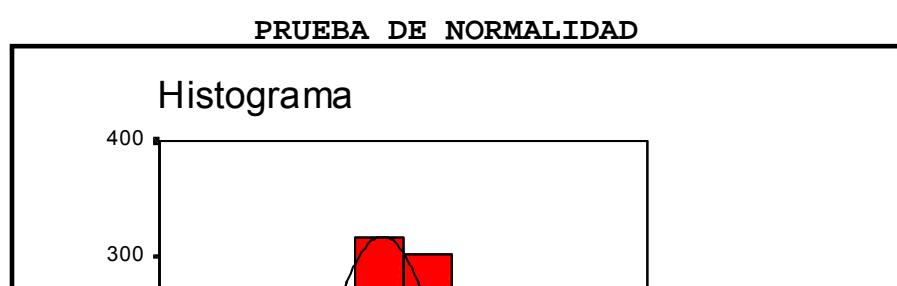


Figura N° 5.11. Histograma con Curva Normal.
Datos magnéticos de la muestra aleatoria. Sierra de Perijá. Estado Zulia.

En el diagrama de caja y las pruebas de normalidad Q – Q, tanto para la población total de los datos como para la muestra aleatoria, se puede observar un comportamiento simétrico con respecto a la mediana y que los valores adquiridos mediante la digitalización se encuentran bastante simétricos con respecto a la tendencia central. En forma concreta el comportamiento de los parámetros estadísticos analizados para la variable anomalía magnética permite establecer que los datos magnéticos tienen una distribución normal y son confiables.

5.5 RESULTADOS DE LA GEOESTADÍSTICA PARA LOS DATOS MAGNÉTICOS.

Con el fin de reconocer la variabilidad espacial de los datos, se realizó un estudio geoestadístico de los mismos. La geoestadística es una colección de métodos estadísticos que describe la autocorrelación espacial existente entre datos de la muestra proveniente de una población total, ajustándolos a varios tipos de modelos espaciales.

En vista de las limitaciones que posee el programa de análisis geoestadístico (GRIDSTAPRO Inc., 1999) y en función del volumen de datos se seleccionó una muestra aleatoria, la cual fue tratada con los mismos criterios estadísticos de la población total de los datos aeromagnéticos con la finalidad de procesar la información bajo criterios geoestadísticos.

El mapa de varianza realizado por el software VARIOWIN (1998) muestra una tendencia de anisotropía en la dirección suroeste - noreste (Figura 5.12), la cual se asocia a un conjunto de cierres bien definidos en el mapa magnético de componente total, correlacionable con el mapa geológico estructural (Figura N° 2.7); ésta es también la dirección de cambio litológico de rocas ígneas a rocas sedimentarias. Por otra parte la roseta de anisotropía confirma dicha tendencia (Figura N° 5.13), la cual muestra que la zona de mayor continuidad espacial tiene un ángulo de 29° con respecto al norte, manteniendo un rango de anisotropía correspondiente a la dirección del eje mayor de la elipse de 15275 metros. Esta dirección de tendencia anisotrópica fue verificada con el modelo de variograma (manteniendo la misma dirección), como se ilustra en la Figura 5.14.

Es importante destacar que la dirección de tendencia (eje mayor) tiene un comportamiento casi paralelo a las estructuras de fallamiento, entre ellas la Falla de Perijá, falla Cuiba etc. (Figura N° 2.6). La dirección de menor

anisotropía, perpendicular al eje mayor posee un valor de rango igual a 2120 metros, aunque el modelo de variograma de la Figura 5.15 da un rango de 4000 metros. Esta diferencia puede ser causada por la falta de información en las partes este-oeste y sur-este del área.

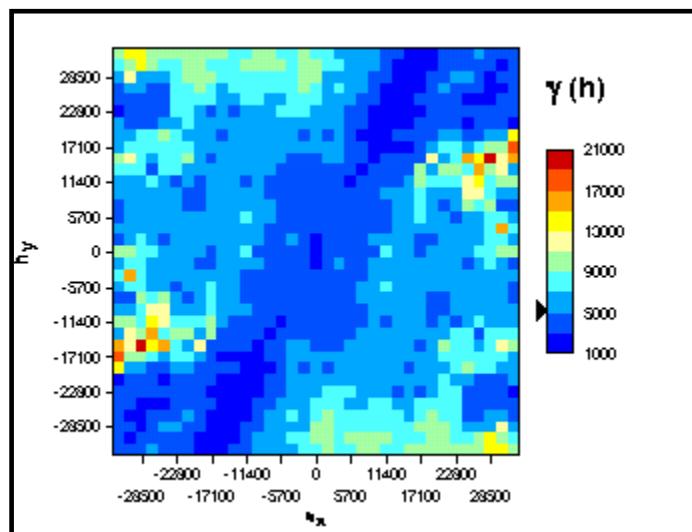


Figura N° 5.12. Mapa de variograma en el que se aprecia una tendencia en dirección noreste–Suroeste.

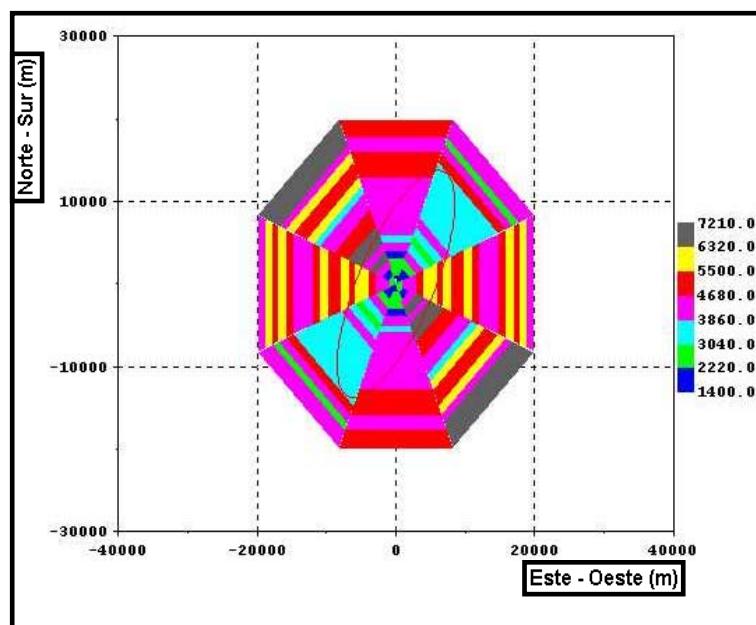


Figura N° 5.13. Roseta de distribución espacial.

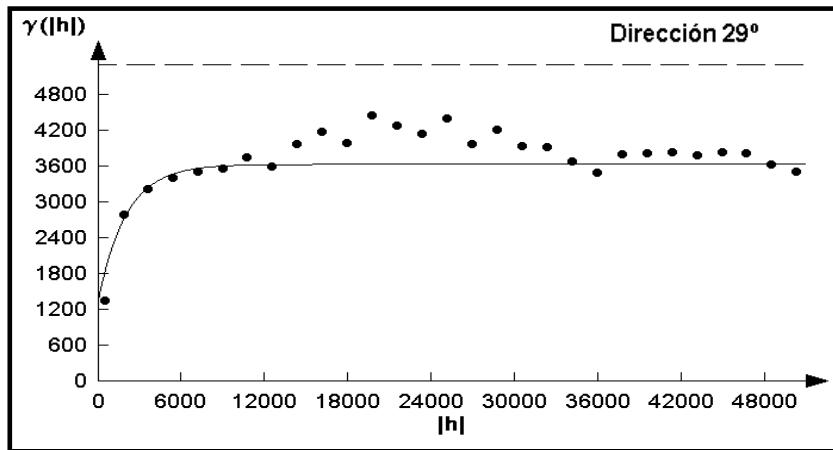


Figura N° 5.14. Modelo de variograma en la dirección de anisotropía de 29° de la población de datos magnéticos.

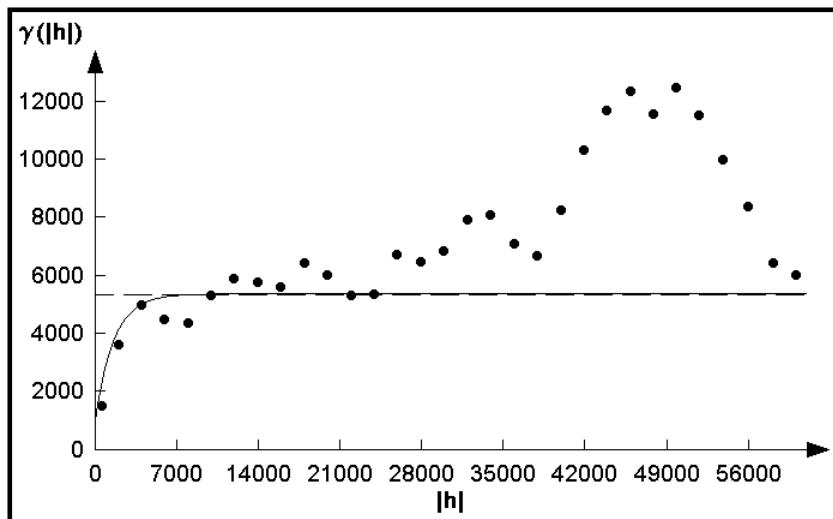


Figura N° 5.15. Modelo de variograma en la dirección de anisotropía de 60° de la población de datos magnéticos.

Tanto la roseta como el ajuste de variograma teórico se realizaron con el software GRIDSTAT (GRIDSTATPRO Inc., 1999). En forma concreta se puede apreciar la elipse de anisotropía (Figura 5.16) bien definida e igual a la reportada por las figuras 5.14 y 5.15, cuyo modelo de variograma teórico de mejor ajuste para los datos y con menor error fue el variograma exponencial (Figura 5.17)

La Tabla 5.14 muestra los resultados del ajuste de los datos con los variogramas: Esférico, Gausiano, Exponencial y Fractales etc. En la figuras 5.13, 5.15 y 5.16, la curva de mejor ajuste fue el variograma exponencial, el cual presentó el menor valor de error de los datos (9.44%) con la elipse de anisotropía visible, razón por la cual se tomó para la elaboración de la roseta de anisotropía de distribución espacial, como se ilustra en la Figura 5.13.

Modelo	Eje menor	Eje mayor	Azimut	Error
Esférico	2856	11151	22°	10.33%
Exponencial	2.857	15275	28°	9.44%
Gausiano	1.684	9090	20°	11.32%
Halfgaus	2.851	9713	20°	11.05%
0.2 Fractal	2.856	13233	22°	11.16%
0.4 Fractal	2.853	77577	30°	11.26%
0.6 Fractal	2.857	16673	30°	12.36%
1.0 Fractal	2.856	10690	24°	11.05%

Tabla Nº 5.14. Ajuste de los modelos de variogramas.

Como etapa final del proceso se tomaron los parámetros aceptados para la dirección de 29° y se utilizaron en la herramienta de Kriging, debido a que la población de datos tienen una variación mínima. Esto hizo posible la generación del nuevo mapa de anomalías magnética con criterios geoestadísticos.

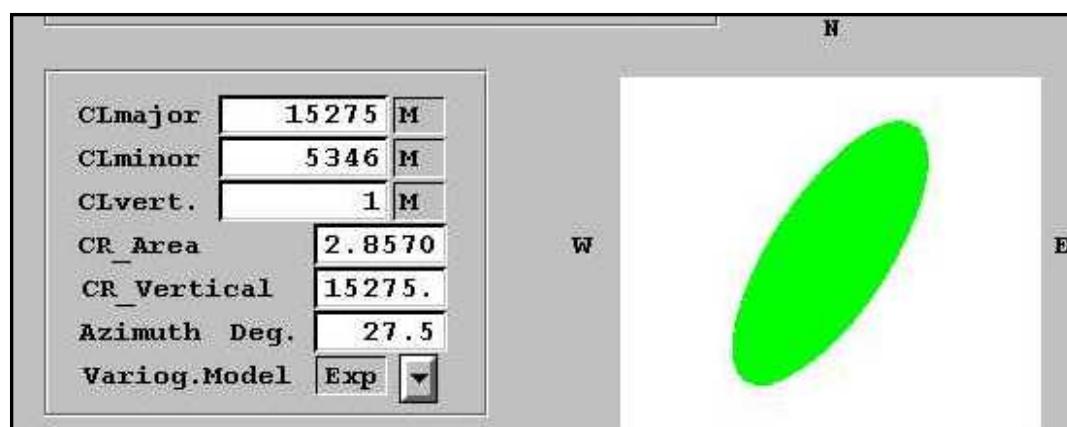


Figura Nº 5.16. Elipse de Anisotropía.

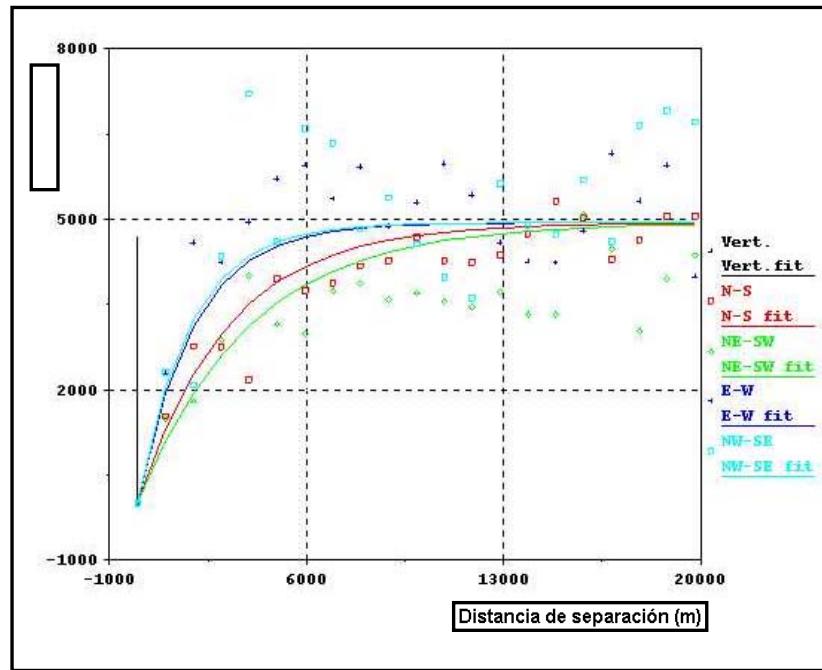


Figura N° 5.17. Curva de ajuste del variograma exponencial.

CAPÍTULO VI

6 RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS GENERAL DEL MAPA AEROMAGNÉTICO DE COMPONENTE TOTAL CON CRITERIOS GEOSTADÍSTICOS

En el área de estudio se realizó un mapa de intensidad magnética total con una base de datos de 38242 puntos o estaciones obtenidas mediante el uso de la digitalización de los datos, producto del levantamiento aeromagnético en el año 1976 con intervalos de 10 Gammas en sus contornos. El área que comprende este mapa (Figura N° 6.1), cubre parcialmente la zona de Machiques, Villa del Rosario y Caño Tigre del Estado Zulia.

Entre las principales características del mapa de anomalías magnéticas cabe destacar las siguientes:

1.- El rumbo u orientaciones de las curvas isomagnéticas observadas en toda la extensión tiene una dirección preferencial Noreste – Suroeste.

En la región centro – noreste del mapa los contornos magnéticos presentan espaciamiento irregular, con una orientación aproximada de N45°E, fuertes gradientes ($60\gamma / \text{km}$).

Los rumbos de las anomalías antes mencionadas se corresponden con la geología de la zona de estudio, ya que reflejan las estructuras y orientación (Figura N° 2.6 y 2.7) preferencial del mapa de fallas que incluye la Falla Perijá – El Tigre. El mapa de geología de superficie (Figura N° 2.7) muestra este contacto, debido a que el material rocoso de mayor densidad perteneciente en gran parte al Mesozoico (parte superior de la diagonal) contra otra de menor densidad perteneciente al Cenozoico a lo largo de la diagonal del área de estudio direccionado por el fallamiento principal de la región.

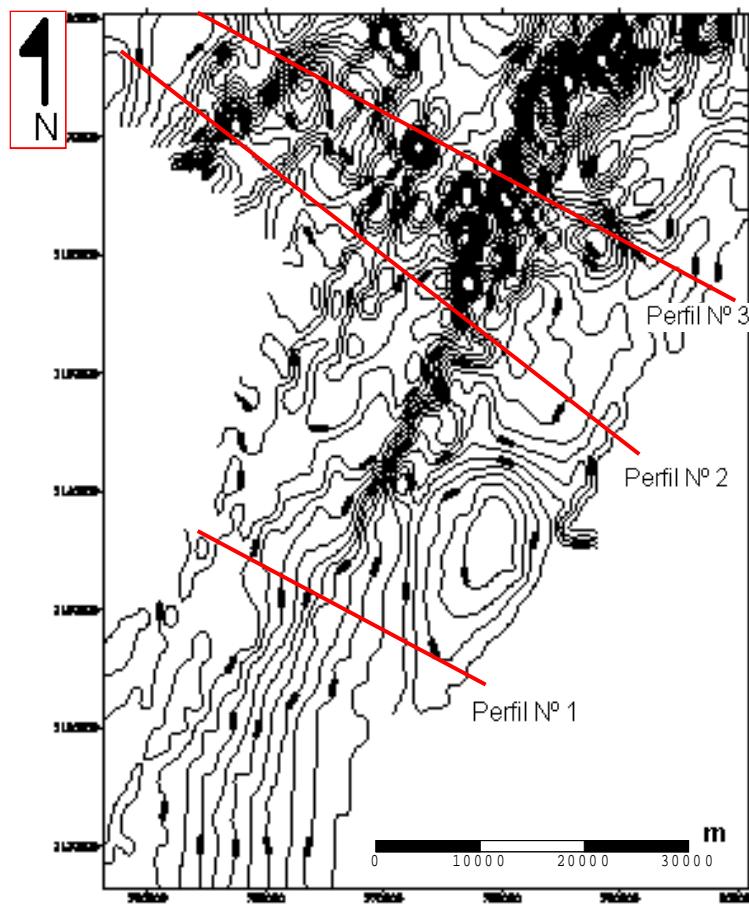


Figura N° 6.1. Mapa aeromagnético de componente total con criterio geoestadístico.

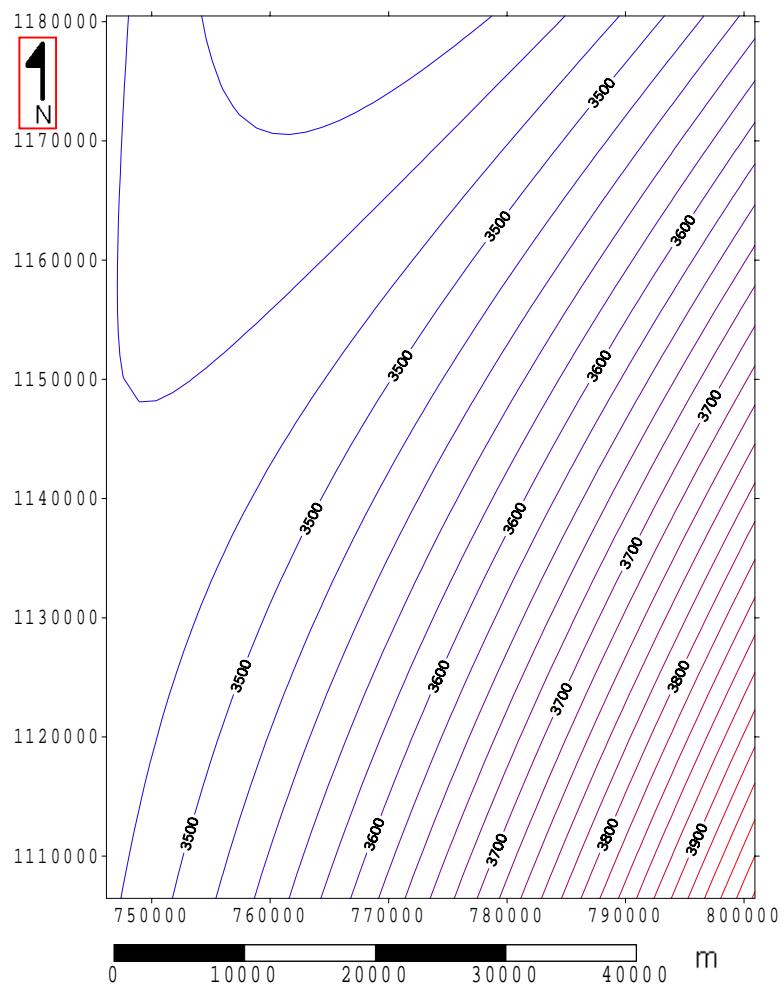
2.- El gradiente regional del área de estudio es de aproximadamente 30 gammas / km para la parte Centro Sur. Distinguiéndose dos zonas que por las características litológicas corresponden a:

- Una zona de baja susceptibilidad magnética perteneciente básicamente al Mesozoico.
- La zona intermedia incluye rocas de una alta susceptibilidad magnética caracterizada por la presencia de rocas ígneas del Mesozoico (Volcánicas La Gé y El Totumo).

Para tener un mejor conocimiento del comportamiento de las anomalías se elaboró el mapa de anomalías magnéticas regional (Fig N° 6.2) construido con regresiones polinómicas de segundo orden (Fig. N° 6.3), reflejando así una variación uniforme de los datos magnéticos del área, a los que se desataca, la presencia de líneas isoanómalias de rumbo aproximado

Noreste – Suroeste, y en los que persiste la orientación preferencial del mapa de Intensidad Magnética Total, corroborada con el mapa geológico de la zona de estudio.

Figura N° 6.2. Mapa de anomalía magnética regional.



La Figura N° 6.3 está referida a las diferentes superficies de ajuste polinómico para encontrar la mejor tendencia de la anomalía magnética regional, luego de analizar varias superficie se determinó que la de mejor ajuste corresponde a la de segundo orden, ya que para éste grado la curva polinómica alcanza su horizontalidad y se mantiene constante.

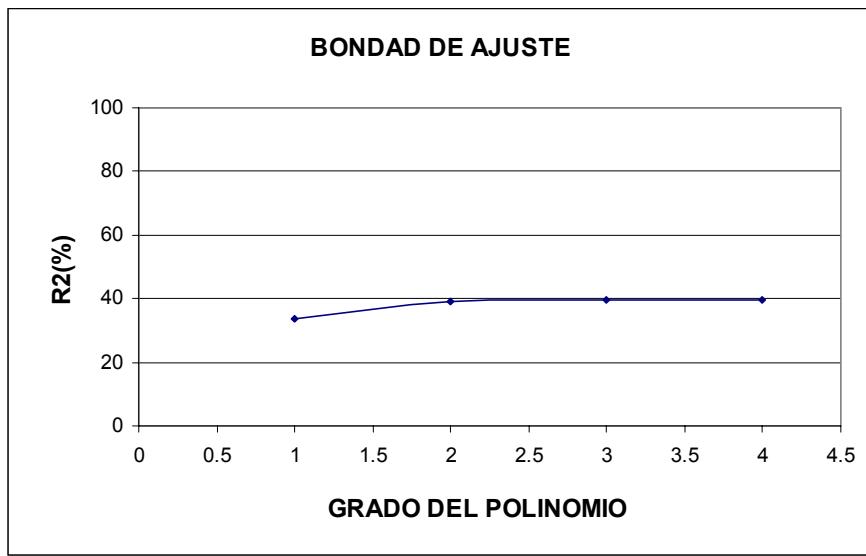


Figura N° 6.3. Gráfica de la bondad de ajuste para el mapa de anomalía magnética regional.

6.2 RESULTADO DE ANÁLISIS ESPECTRAL APLICADO A CADA UNO DE LOS PERFILES MAGNÉTICOS

El análisis espectral de los datos aplicado a cada uno de los perfiles contribuye a estimar la profundidad a la que se encuentra la fuente de las anomalías magnéticas.

El perfil N°1 contiene información sobre los diferentes topes litológicos que atraviesa el pozo San Salvador (SNS 1X), el cual alcanzó una profundidad total de 16.526 pies, a través de los topes de formaciones que se indican en la Tabla N° 6.1. El pozo antes mencionado se ubica en la parte Sur del área de estudio, donde se tiene un modelo geológico producto de la sísmica 2D en dirección Noreste, Sureste. En esta misma dirección en el mapa de anomalías magnéticas se trazó el perfil N° 1, al cual se le realizó un análisis espectral (Figura N° 6.4) para la estimación de la profundidad de la fuente, y se observó que la máxima profundidad anómala es de 3.3 km, la cual corresponde según los datos sísmicos (Tabla N° 6.1) a la Formación Río Negro y las calizas del Cretácico. En la zona intermedia y somera las

profundidades oscilan entre 0.4 y 0.08 km respectivamente que a su vez se corresponden con el complejo formacional de edad Mioceno.

Formación / Litología	Profundidades (pies)
Sobrecorrimiento de La Quinta	5400
Formación Mito Juan	5500
Formación Colón	5500
Formación Río Negro	6000
Calizas del Cretácico	10000
Formación Río Negro	11000
Formación La Quinta	12000
Calizas del Cretácico	14000
Formación Río Negro	15000

Tabla N° 6.1. Topes geológicos de las diferentes formaciones del pozo SNS 1X, (Tomado de Araujo, 1997).

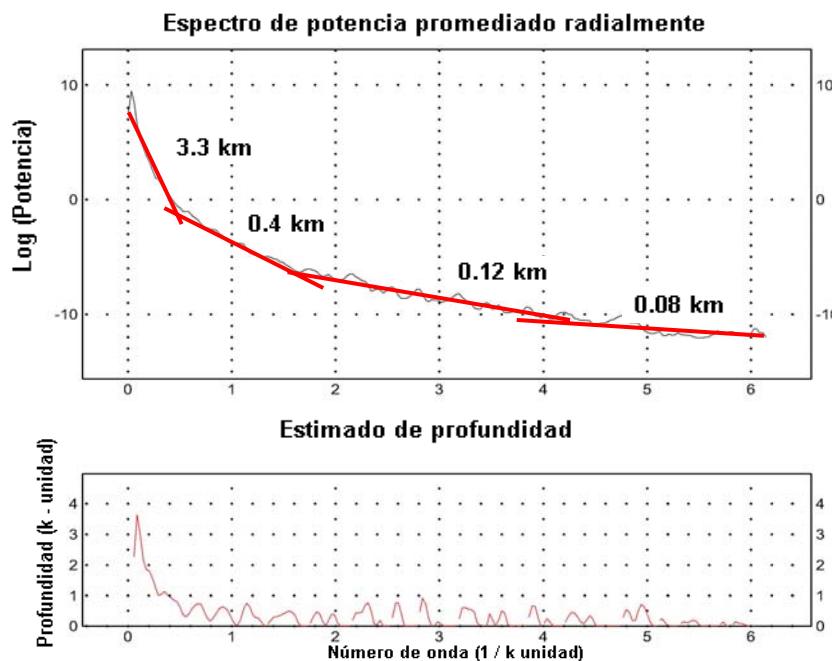


Figura N° 6.4. Análisis del espectro de energía para el perfil magnético N° 1.

El análisis espectral del perfil N° 2 (Figura N° 6.5) correspondiente en gran parte a la región de Caño Tigre muestra una profundidad máxima que se ubica en 2.3 km. Las formaciones aquí presentes en gran parte corresponden al Paleozoico y en la zona intermedia y somera tiene una profundidad de 0.2 a 0.05 km respectivamente. Es una zona anómala compleja estructuralmente y el mapa de anomalías magnéticas refleja gran cantidad de contornos dipolares, lo cual parece coherente con las profundidades dadas por el análisis espectral que vienen a ser más someras que las del perfil N° 1. Tomando en cuenta que tanto estudios de geología de superficie como análisis de geoquímica en esta zona (Caño Tigre) reflejan evidencias de mineralizaciones de cobre nativo en toda esta región (Figura N° 1.1).

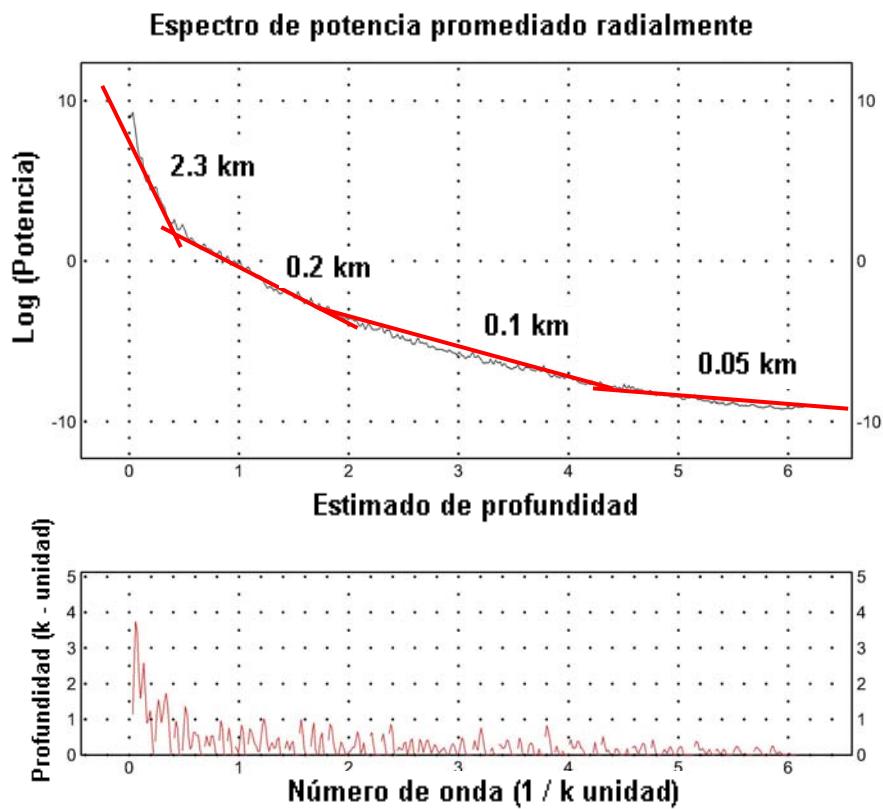


Figura N° 6.5. Análisis del espectro de energía para el perfil magnético N° 2.

En el análisis espectral para el perfil N° 3 (Figura N°6.6) la anomalía de la fuente más profunda corresponde a un valor de 2.0 km que al compararla con los dos anteriores muestra una magnitud menor, lo que indica que la profundidad de la fuente anómala hacia la parte Norte central se hace más somera y se mantienen en toda su extensión. Los sedimentos de las diferentes formaciones corresponden en gran parte también al Paleozoico con algunos afloramientos de rocas ígneas.

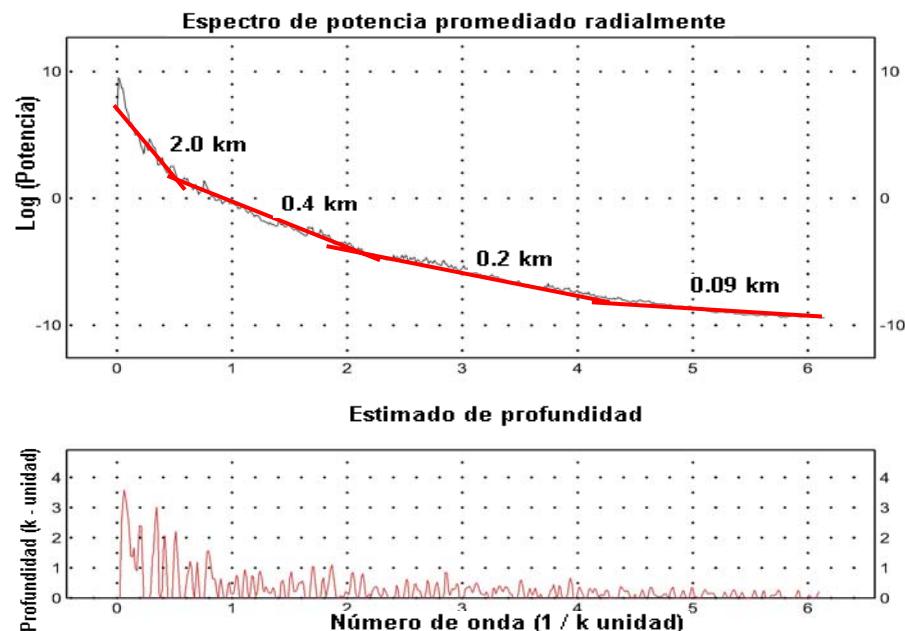


Figura N° 6.6. Análisis del espectro de energía para el perfil magnético N° 3.

De manera general es importante destacar que las anomalías de interés y con fines mineros la constituyen aquellas, cuya pendiente de la recta tangente a la curva del logaritmo del espectro es relativamente suave, las cuales la conforman la zona intermedia y somera. Cabe resaltar que las profundidades de la tendencia anómala desde la parte Sur del mapa aeromagnético se van haciendo más someras hasta la parte norte manteniendo un promedio la profundidad de la zona intermedia y somera, exceptuando la profunda en el espectro de energía N° 1 (Figura N° 6.4) de 3.3 km pasa en el espectro N° 3 (Figura N° 6.6) a 2 km.

6.3 MODELAJE MAGNÉTICO 2D

El modelado magnético tomó como punto de partida la información geológica del área, así como también los datos sísmicos y de pozos. La construcción geométrica de los cuerpos se realizó basándose en la información del modelo sísmico interpretado e ilustrado de la Figura N° 1.6, que sirvió de referencia para los perfiles 2 y 3 junto con la información de topes geológicos de los pozos 106 y 103 ubicados hacia el Noreste de la zona de estudio. A partir de la información de los pozos y el análisis espectral se determinó la profundidad de las diferentes unidades litológicas y la fuente de las anomalías.

Es importante destacar que los parámetros de cada una de las formaciones presentes han sido controlados por el pozo SNS – 1X.

6.3.1 Restricciones para el modelaje magnético

- Información geológica de superficie**

La información geológica para este trabajo proviene del Mapa Geológico Estructural de Venezuela 1976, el cual consta de rasgos estructurales bien definidos entre los que destacan la Falla Perijá y Cuibas (Figura N° 2.7) que también fueron interpretadas en estudios recientes mediante imágenes de radar (Figura N° 2.6).

- Mapa de anomalías de Bouguer**

Para controlar el comportamiento del basamento del área, se recurrió al mapa gravimétrico (Figura N° 1.7), cuyos datos cubren sólo la parte inferior de la diagonal principal, mostrando que a partir del perfil N° 3 (ubicado en el Norte) contiene magnitudes de 0 mgal y a medida que se avanza hacia el Sureste las anomalías se hacen más negativas lo que indica mayor profundidad del basamento.

- **Modelado mediante líneas sísmicas**

Para la definición del tope basamento y los diferentes complejos formacionales se dispuso de las secciones sísmicas interpretadas del área (Figura Nº 1.6). En primer lugar se realizó el modelaje gravimétrico del perfil Nº 1 que sirvió como control, tomando como punto de partida las secciones estructurales interpretada para el pozo SNS – 1X y los topes geológicos existentes. Se estimaron los valores de densidades para cada uno de los cuerpos presentes en el perfil y a partir de éste se elaboró el modelado magnético con sus respectivas susceptibilidades en cada cuerpo, luego se llevó esta información a los otros perfiles, cuyos resultados se muestran en la (Tabla Nº 6.2).

- **Modelaje magnético del perfil Nº 1**

Este perfil de orientación Noroeste – Sureste y 26 km de longitud presenta rasgos estructurales resaltantes, entre los cuales se destaca una estructura anticlinal perteneciente a la secuencia cretácea, ubicado por debajo del corrimiento de la Formación La Quinta. Por otra parte el fallamiento inverso principal provocado por las fallas Perijá y Cuibas que atraviesa diagonalmente el área.

Cuerpo 1: Representa el manto terrestre y está conformado por rocas ultramáficas (olivino y peridotita). Se localiza su tope a una profundidad aproximada de 20 km en el extremo Noroeste y 32 km en el Sureste.

Cuerpo 2: Conformado por la corteza inferior y su composición consta de rocas ígneas del tipo diorita y granodiorita. Alcanza una profundidad aproximada de 8 km en el extremo Noroeste y de 15.5 km en la parte Sureste.

Cuerpo 3: Integrado por rocas meta – sedimentarias y meta – ígneas, específicamente representa al basamento o corteza superior de edad

Devónico inferior a Precámbrico y se encuentra a una profundidad promedio de 5.0 km.

Cuerpo 4: Se caracteriza por la presencia de rocas ígneas en su mayoría granito de edad Paleozoico, que se encuentran separadas de las del Mesozoico por la Falla de Perijá y afloran en superficie; alcanza un espesor de 0.21 km.

Cuerpo 5: Constituido por rocas sedimentarias areniscas, lutitas y calizas pertenecientes al Grupo Río Cachirí de edad devónica, y espesor cerca de 0.19 km.

Cuerpo 6: Conformado por rocas sedimentarias, areniscas y calizas de las formaciones Río Palmar y Palmarito de edad Carbonífero – Pérmico, que afloran en gran extensión a lo largo del perfil con un espesor variable de 0.05 a 0.21 km.

Cuerpo 7: Representado por el Grupo La Gé, compuesto de areniscas, lutitas y calizas de edad principalmente Jurásico con un espesor de unos 0.8 km.

Cuerpo 8: Constituido por rocas ígneas (riolita) pertenecientes a las volcánicas La Gé de edad mesozoica, que aflora en dos zonas diferentes a lo largo del perfil manteniendo un espesor de 0.28 km aproximadamente.

Cuerpo 9: Contiene rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación La Quinta de edad Jurásico, con espesor del orden de 6.5 km.

Cuerpo 10: Conformado por rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Río Negro de edad cretácica, de profundidad variable y espesor de unos 0.9 km.

Cuerpo 11: Integrado por rocas sedimentarias del Grupo Cogollo, específicamente la Formación Apón, conformada por calizas compactas del Cretácico, variando la profundidad y manteniendo un espesor de 0.77 km.

Cuerpo 12: Constituido por lutitas y calizas de las formaciones Colón y Mito Juan también de edad Cretácica, con espesor promedio de 0.92 km.

Cuerpo 13: Contiene sedimentos de las formaciones Guasare y Maraca, de edad paleocena, cuyo promedio de espesor se ubica en 0.42 km.

Cuerpo 14: Caracterizado por la presencia de lutitas y areniscas de la Formación La Sierra de edad Eoceno con un espesor variable de 0.54 km.

Cuerpo 15: Representado por arcilitas, areniscas y limolitas del Grupo El Fausto de edad Mioceno – Oligoceno, conformado por una gruesa capa de sedimentos con espesor uniforme de 2.7 km.

Símbolo	Grupo	Formación	LITOLOGÍA	EDAD		ρ (gr/cc)	K (c.g.s)	J (c.g.s)
	Cuerpo/Nº			O	CENOZOICO	MESOZOICO	TERCARIO	
	EL FAUSTO		Arcilitas, Arenisca y limolitas	CENOZOICO	Mioceno			
	15		Lutitas y Areniscas		Oligoceno	2.25	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$
	14	La Sierra	Lutitas y Calizas arenosas		Eoceno	2.30	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$
	13	Maraca	Areniscas, Calizas y Lutitas Carbonáceas		Paleoceno	2.35	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
	12	Guasare	Lutitas y Calizas Negras	MESOZOICO	Cretácico	2.40	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$
	11	Colon - Mito Juan	Calizas compactas			2.45	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
	10	Apón	Arenisca Conglomerática			2.35	$5 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$
	9	Río Negro	Lutitas con Areniscas Conglomeráticas	MESOZOICO	Jurásico	2.53	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$

Tabla N° 6.2. Características de cada uno de los cuerpos presentes en los modelos propuestos.

Símbolo	Grupo	Cuerpo/Nº	Formación.	LITOLOGÍA	EDAD	ρ (gr/cc)	K (c.g.s)	J (c.g.s)
	La Gé	7	Macoita	Areniscas y calizas	Jurásico	2.49	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$
				Lutitas, areniscas, calizas y tobas				
		8	Tinacoa	Volcánicas La Gé	Mesozoico	2.52	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-4}$
		6	Río Palmar	Calizas mazisas y arenisca de grano fino	Pérmico	2.50	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
				Arenisca de grano fino y calizas				
	Río Cachirí	5	Palmarito	Areniscas en capas delgadas a gruesas	Carbonífero	2.48	$4 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$
				Lutitas carbonáceas				
	Caño Grande	Caño Oeste	Campo Chico	Areniscas, lutitas y calizas	Devónico	2.48	$4 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$
	4			Rocas volcánicas	Paleozoico	2.60	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$
		3		Basamento (Gneisses y esquistos con intrusiones graníticas)	Precámbrico ?	2.70	$8.5 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
		2		Corteza (Diorita y granodiorita)		2.75	0.010	$3 \cdot 10^{-3}$
	1			Manto (Peridotita y olivino)		3.2	0.013	$4 \cdot 10^{-3}$

Tabla N° 6.2. Características de cada uno de los cuerpos presentes en los modelos propuestos.

En la Figura N° 6.7 se muestra el modelaje gravimétrico y magnético realizado para el perfil N° 1, en que se pueden observar las curvas de anomalías gravimétricas y magnéticas observadas y calculadas; las cuales ajustaron con errores de 0.3 mgal y 8.17 gammas respectivamente.

- **Modelaje magnético del perfil N° 2**

Este perfil posee un rumbo Noroeste – Sureste aproximadamente paralelo al anterior y una longitud de 54 km. Atraviesa gran parte de la región Caño Tigre, En su extremo Noroeste se ubica el límite entre Venezuela y Colombia y en el extremo Este parcialmente la región Villa del Rosario. Los rasgos estructurales en cuanto a la Falla de Perijá y Cuibas se mantienen.

El modelo geológico propuesto (Figura N° 6.8) se componen de la misma litología del perfil N° 1, excepto los cuerpos del 4 al 8 que también fueron descritos en la Tabla N° 6.2. El modelo estructural de este perfil es complejo, sin embargo el modelaje gravimétrico ajusta con un error de 0.3 mgal lo que valida la interpretación estructural para realizar el modelaje magnético. Mientras que el magnético ajustó con error de 17.6γ / km debido a que existen anomalías de alta frecuencia, locales y muy puntuales.

- **Modelaje magnético del perfil N° 3**

Este perfil se ubica en la parte Norte y tiene una orientación aproximadamente paralela a los dos anteriores con una longitud de 47 km. En este perfil se aprecia que las fallas Perijá y Cuibas se integran en una sola estructura que es la Falla Tigre.

La descripción de los cuerpos es la misma del perfil N° 2.

De igual manera, el modelaje realizado para este perfil (Fig. N° 6.9) refleja una ajuste entre la anomalía observada y calculada con un error de 0.35 mgal, lo cual queda validado estructuralmente el modelo, mientras que

en el modelado magnético se logró el solape o ajuste bastante aproximado entre la anomalía magnética calculada y observada, que está causada entre otros factores por la alta frecuencia de la zona en la que se encuentra éste perfil.

Cabe destacar que en el modelaje magnético fue necesario introducir algunas modificaciones en las características magnéticas que no implican cambios en los valores de la densidad (ρ) en las unidades interpretadas para lograr un mejor ajuste entre las curvas observada y calculada.

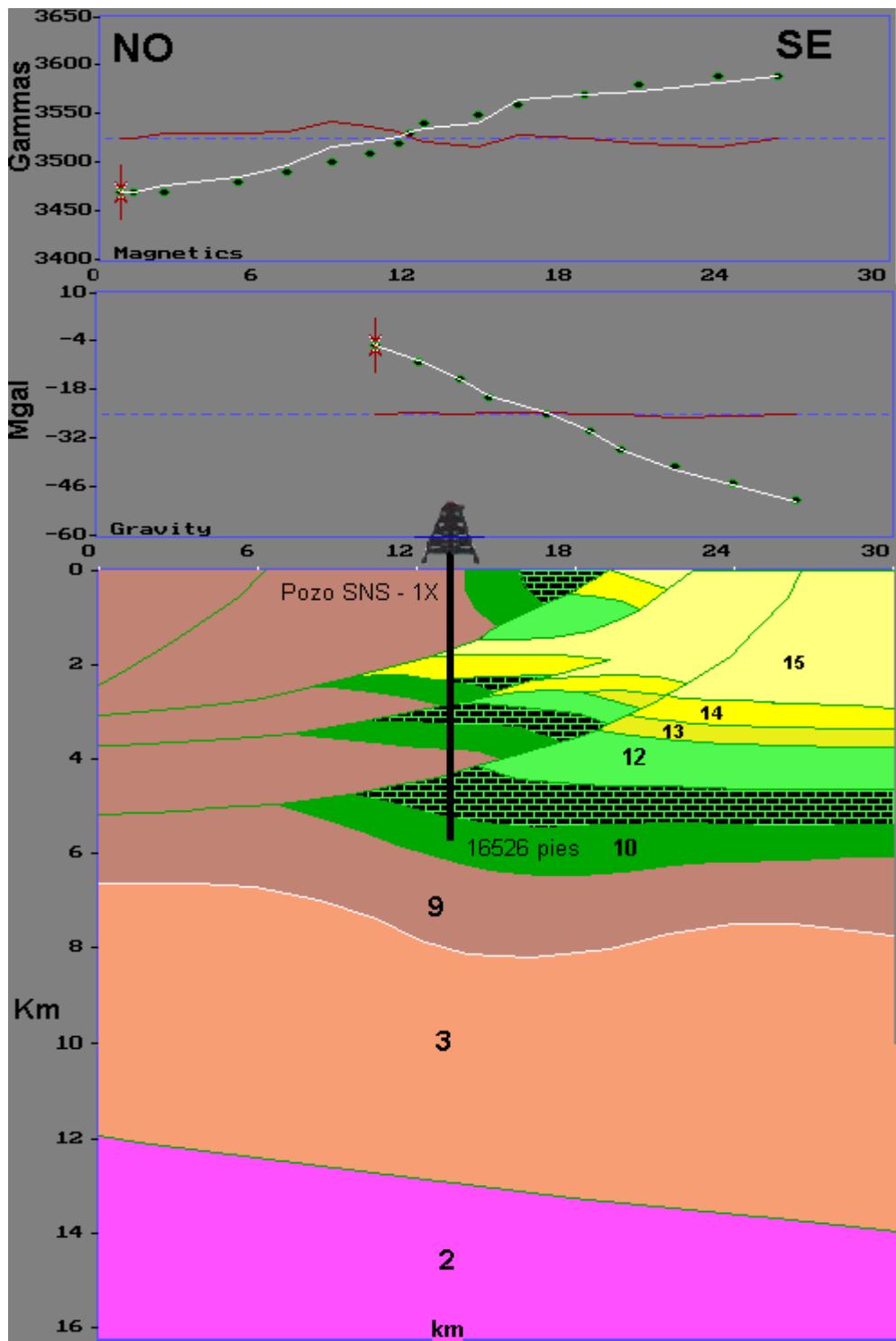


Figura N° 6.7. Modelaje Gravimétrico-Magnético del perfil N° 1. (la leyenda se muestra en la Tabla N° 6.2 y en la interpretación del perfil).

Curva blanca: anomalía calculada

Puntos de color verde: anomalía observada

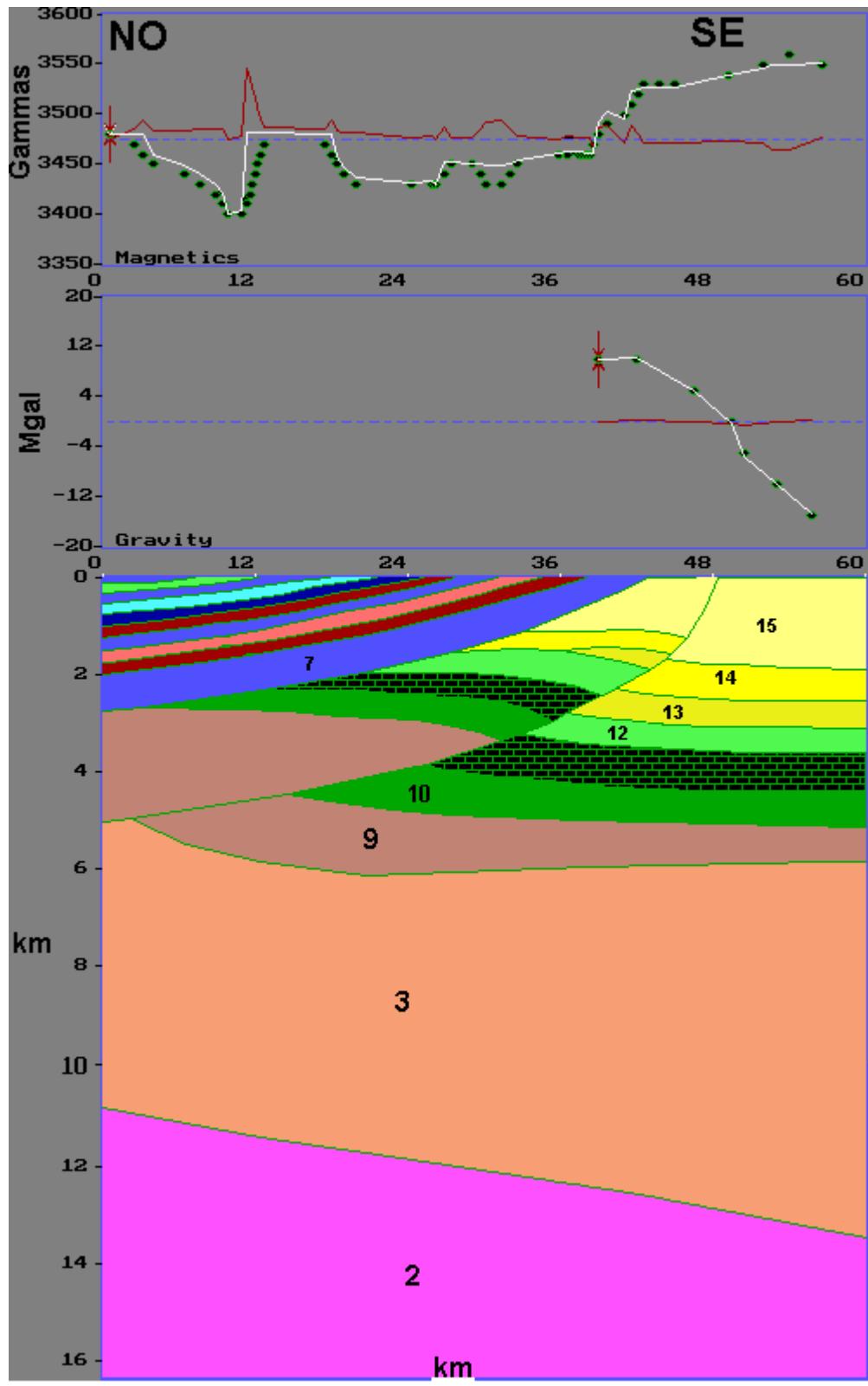


Figura N° 6.8. Modelaje gravimétrico – magnético del perfil N° 2.

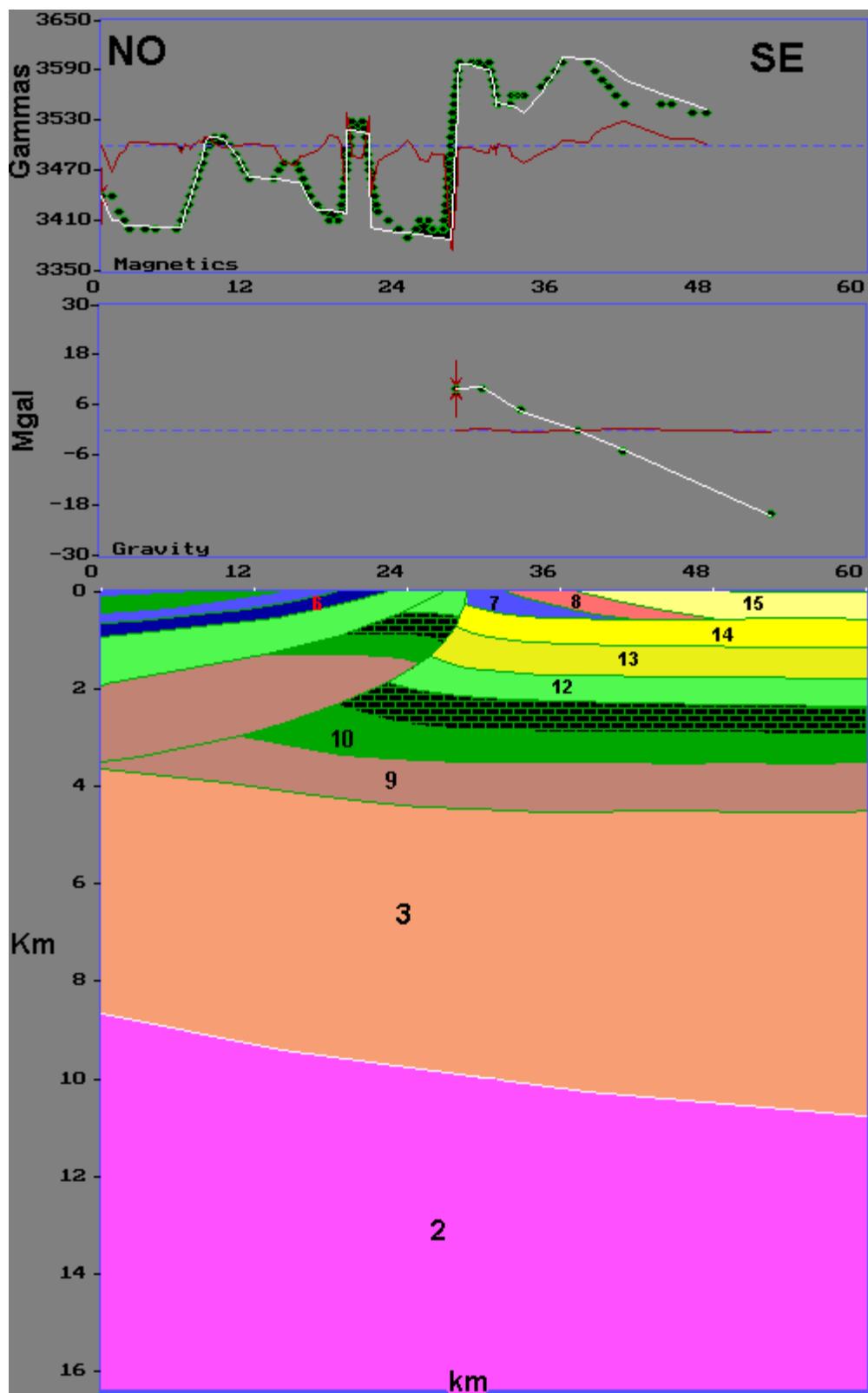


Figura N° 6.9. Modelaje gravimétrico – magnético del perfil N° 3.

En la Figura Nº 6.10 se muestra el modelado gravimétrico – magnético del perfil Nº 1 de control, que incluyen la estructura profunda (corteza y manto superior), elaborados sobre la base de estudios en sísmica profunda ubicada en la Costa Oriental del Lago (Castejón. et al., 1986). Este trabajo que incluyó disparos en la zona de Altagracia - Misoa en un perfil Norte – Sur modeló estas estructuras a partir de las velocidades sísmicas.

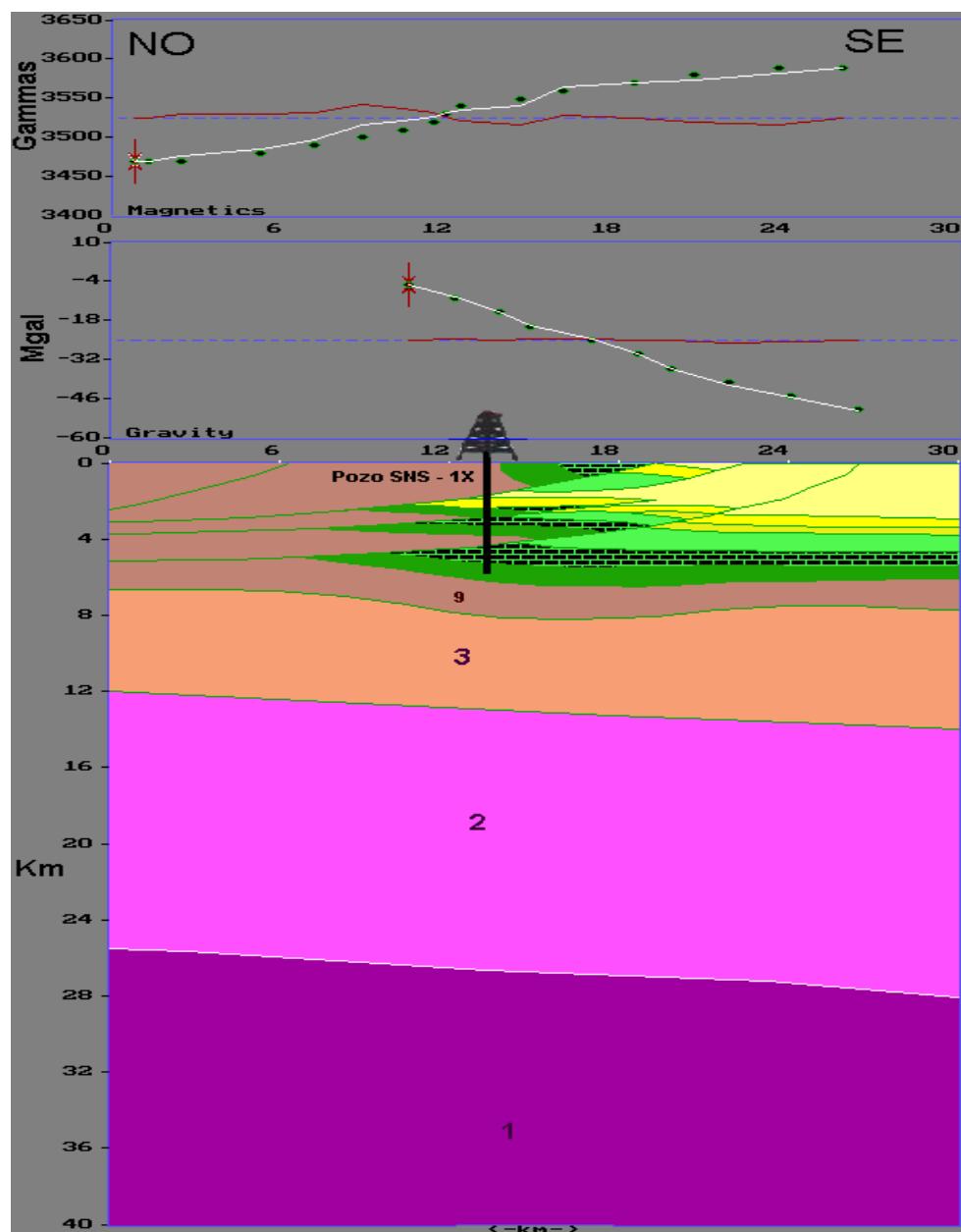


Figura Nº 6.10. Modelaje gravimétrico – magnético del perfil Nº 1, que ilustra las estructura profunda en el área de estudio.

CONCLUSIONES.

Como resultado de la interpretación de datos aeromagnéticos realizado en la zona de Perijá central se concluye que la utilización de datos aeromagnéticos en formato digital permite efectuar interpretaciones tanto regionales como locales del área de interés en forma rápida y a un bajo costo.

El análisis estadístico de los datos de anomalías aeromagnéticas realizado garantiza el comportamiento normal de los datos en toda el área de estudio. El análisis geoestadístico muestra un alto grado de continuidad anisotrópica en la dirección de las estructuras principales, como lo es la Falla de Perijá con rumbo Noreste - Suroeste y perpendicular a esta dirección una máxima variabilidad de los datos.

El comportamiento del mapa de anomalías magnéticas elaborado para la zona de estudio muestra una clara tendencia a seguir la alineación de las estructuras geológicas con dirección Noreste - Suroeste, el cual presenta los valores mínimos alineados en la parte Noroeste y Suroeste de la cadena montañosa de la Sierra de Perijá.

El basamento rocoso de la Cuenca de Maracaibo en el flanco Suroriental de la Sierra de Perijá, presenta hacia el Norte una profundidad somera, mientras que en la parte baja del alineamiento principal da un fuerte buzamiento hacia el Sureste, alcanzando el tope del basamento a partir de los 5 Km.

A través de un análisis espectral de los datos de anomalías magnéticas que permitió la estimación de profundidades de origen de las anomalías se determinó que el basamento profundiza hacia el Sur y que en dirección centro Norte, mantiene una profundidad somera.

El ajuste del modelaje gravimétrico muestra de manera consistente resultados coherentes con la repetición de secuencias sedimentarias y la profundización del basamento, e interfase corteza y manto con profundidad promedio de 30 km en dirección Sureste. El error obtenido para los perfiles es de 0.4, 0.3 y 0.35 mgals respectivamente. Mientras que en el magnético el ajuste de la susceptibilidad magnética (K) presentes en las diferentes unidades litológicas sigue el comportamiento de la anomalía magnética calculada hacia la observada.

Con la finalidad de delimitar la prospección de posibles yacimientos de minerales se recomienda:

- 1 Realizar un levantamiento magnético terrestre a partir de la región de Caño Tigre y hacia el Norte del área de estudio con el fin de elaborar un mallado uniforme, para un mejor detalle del comportamiento del basamento y la aplicación de análisis espectral para estimar profundidades locales de origen de las anomalías.
- 2 Prácticar estudios de Polarización Inducida para determinar la presencia de los minerales ferromagnéticos.
- 3 Recolectar núcleos de rocas para elaborar el mapa de susceptibilidades magnéticas que permita dar un mejor detalle de las anomalías en la zona.
- 4 Ejecutar un levantamiento gravimétrico de detalle en el área para integrar con la información magnética.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Araujo, M.** (1997). "Experiencias en la exploración del frente de montaña de la Sierra de Perijá". Informe técnico N° MAR.EP.165,97 IT. Maraven, SA. Exploración y producción. Caracas. 11 P.
- Astier, J.** (1982). "Geofísica aplicada a la Hidrología". Paraninfo, 2^{da} edición. Madrid, España 343 p.
- Audemar, F.** (1991). "Tectonic of western Venezuela". Rice University, Houston. Tesis PHD. Inédito 245p.
- AutoCAD, 2000.** (1999). U.S and international copyringht laws. Autodesk. Inc. [programa].
- Bhattacharyya, B.** (1966). "Continuous spectrum for the Total – Magnetic – field anomaly due to a rectangular prismatic body". Geophysics, 31(1): 97 – 124.
- Bock, J. y P Morel,** (1972). "Curso de Física Mecánica Ondas". Ediciones Omega. Barcelona. 318 p.
- BYTE DE VENEZUELA.** (1999). "Mapas de Venezuela". [en línea]. Disponible en: www.a-mapasdevenezuela.com Consulta: 2001, Mayo 25].
- Cantos, F.** (1974). "Tratado de Geofísica Aplicada". Madrid, España. 520 pp.
- Castejón, B., C. Márquez y M. Urbáez.** (1986). "Modelo de corteza en la costa oriental del Lago de Maracaibo". Trabajo Especial de Grado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.

Chaplet, M. (1999). “*Relaciones Tectónicas entre la Sierra de Perijá Central y la Sierra de Perijá Meridional. Intervalo de Machiques, al Norte – Río Lara, al Sur. Estado Zulia, Venezuela*”. Informe Técnico. Parte I: *Interpretaciones*. Parte II: *Estructural*”. PDVSA. Exploración y Producción. Centro de Información Técnica. CITEP.

Dobrin, M. (1961). “*Introducción a la Prospección Geofísica*”. Ediciones Omega S.A. 2^{da} edición. Barcelona, España 483 p.

Espejo A., H. Etchart., U. Cordan.y K. Kaweshita. (1980). “*Cronología de rocas intrusivas ácidas en la Sierra de Perijá*”. Ministerio de Energía y Minas Boletín de geología (MEM). Volumen XIV. 14(26).

Espejo, A. y Jean, X. (1977). “*Algunas ideas sobre las estructuras de la parte media de la Sierra de Perijá, Edo. Zulia*”. Ministerio de Energía y Minas (MEM), Maracaibo. V Congreso Geológico Venezolano. Tomo II. Sociedad Venezolana de Geólogos.

Ferrán, M. (1996). “*SPSS Para Windows. Programación y Análisis Estadístico*”. McGraw – Hill. 1^{era} edición 649 p.

García, V. (1979). “*Exploraciones de la geoquímica exploratoria en la delimitación y ubicación de áreas cupríferas. Sierra de Perijá, Edo. Zulia*”. Ministerio de Energía y Minas (MEM). División de Geología. Informe Técnico.

García, V. (1987). “*Ubicación de mineralizaciones de Barita mediante exploración geoquímica, Sierra de Perijá. Estado Zulia*”. Ministerio de Energía y Minas (MEM). División de Geología Económica. Departamento de Prospección Geoquímica. Informe Técnico. Segunda parte. 21 p.

GEOSOFT (1994) GM – SYS.,. *Gravity and Magnetics modeling system*. Versión Nº 3.70.09G. Manual del software por: Mike Genperle, Gerry Connard, Miltsagen, and Myungmun Bae.Northwest Geophysical Associates, Inc. [Programa].

Gerra, D. (1999). “*Interpretación y balanceo de un transecto estructural regional, flanco sur oriental de Perijá, costa sur occidental del Lago de Maracaibo*”. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito. 115p.

Gridstatpro Inc., (1999). GRIDSTAPRO. Versión 99.015, Geostatistical Modeling [programa].

Gómez, F. (1983). “*Como utilizar e interpretar la Estadística*”. Ibérico Europea de Ediciones. Madrid, España. 272 p.

González de Juana, C., J. Iturralde y X. Picard, (1980). “*Geología de Venezuela y sus cuencas petrolíferas*”. Foninves. Tomos I y II. Caracas.

González, P., J. Ortiz, (1973). “*Geología de la región de Machiques – Río Negro, distrito Perijá, estado Zulia*”. Congreso latinoamericano geológico, 2. Caracas.

Hwei, H. (1998). “*Análisis de Fourier*”. Fondo Educativo Interamericano. 1^{era} Edición. México. 274 p.

Hea, J. y A. Whitman. (1960). “*Estratigrafía y Petrología de los sedimentos Pre – Cretácicos de la parte norte central de la Sierra de Perijá, Edo. Zulia*”. Boletín de Geología (Publicación Especial Nº 3). Memorias III Congreso Geológico Venezolano. Tomo I. Editorial Sucre.

Kellogg, J. (1981). “*The Cenozoic basament tectonics of the Sierra de Perijá, Venezuela and Colombia*”. Princeton University. Department of Geological and Geophysical Sciences. Tesis de Doctorado.

Maync, W. (1950). “*The foraminiferal genus choffatella Slumberger in the lower Cretaceous urgonian of the Caribbean region Venezuela, Cuba, Mexico and Florida*”. Eclog. Geol Helv. 42(2).

Meza, R. (1998). “*Estudio del sistema petrolífero del Cretácico en el área de Perijá Central, Cuenca de Maracaibo, Estado Zulia*”. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.

Miller, J. (1959). “*Tectonismo y Sedimentación*”. Boletín de Geología (Publicación Especial N° 3). Memorias III Congreso Geológico Venezolano. Tomo II. Editorial Sucre.

Moya, E. y Figueroa, C. (1976). *Mineralizaciones cupríferas en la Sierra de Perijá, Edo. Zulia, Venezuela*. Ministerio de Minas e Hidrocarburos, Dirección de geología, Caracas.

Navarro, A. y F. Alonso, (1998). “*Interpretación Geofísica – Geológica del Cretáceo en los campos Alpuf – Alturitas, Costa Occidental del Lago de Maracaibo, Estado Zulia*” Trabajo Especial de Grado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.

Liddle, A. (1946). “*The geology of Venezuela and Trinidad*”. 2^{da} edición. Palconto. Ithaca N.Y. 890 p.

López, M. y M. Roquett, (1985). “*Detección de fracturas en las calizas del cretáceo por medio del estudio de trazas sísmicas Campo La Paz, Edo.*

Zulia" Trabajo Especial de Grado. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.

Peña, D. (1986). "Estadística modelos y métodos". Alianza editorial. Madrid España. Volumen N° 1. 400 p.

Renz, O. (1956). "Cretaceus in western Venezuela and the Guajira (Colombia)". 20th International Geol. Cong., Mexico City.

Ríos, S. (1972). "Análisis Estadística Aplicado". Madrid. España. 410 p.

Rodríguez, S. (1986). "Recursos Minerales de Venezuela". Ministerio de Energía y Minas (MEM). Dirección General y Sectorial de Minas y Geología. *Boletín de Geología*. Caracas. 15(27).

Sánchez, J. (1999). "Manual de análisis estadístico de los datos". 2^{da} edición. Alianza editorial. 649 p.

Telford, M. y L. Geldart. (1976). "Applied geophysics". London. Syndics of the Cambridge University Press, 860 p.

Toranzos, F. (1971). "Teoría estadística y aplicaciones". Editorial Kapelusz. 3^{era} edición. Buenos Aires. Argentina. 448 p.

Trujillo, M. (1999). "Descripción del yacimiento del campo Guafita, mediante técnicas estadísticas". Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.

Ujueta, G. y R. Llinas, (1990). “*Reconocimiento Geológico de la parte más septentrional de la Sierra de Perijá*”. Universidad Nacional de Colombia. Geología Colombiana N° 17. Bogotá. Colombia.

Vail, P., R. Mitchum y S. Trompson. (1977). “*Seismic stratigraphy – applications to hidrocarbon exploration* ”. C.E. Payton. AAPG Mem. 26.

Valencio, D. (1980). “*El magnetismo de las rocas*”. Editorial Eudeba. Buenos Aires. Argentina. 351 p.

Variowin (1999). *A program for comparing a 2D pair comparison file from a Geo – EAS data file*. Versión 2.4. Borland C++ 5.01 compile – included in Variowin 2.21. Institute of Mineralogy. University of Lausanne.

Venezuela, Ministerio de Energía y Minas e Hidrocarburos (M.E.M). (1976). *Mapa Geológico Estructural*. Caracas. Hoja Machiques, ESC. 1:50000.

Viera, A. (1999). “*Descripción de yacimientos del miembro O en el Campo Mamporal. Técnicas Geoestadísticas*”. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Universidad Central de Venezuela, Caracas. Inédito.

Viteri, E. (1978). “*Génesis del cobre nativo asociado a rocas de la Formación La Quinta en la Sierra de Perijá, Venezuela*”. República de Venezuela. Ministerio de Energía y Minas (MEM). Dirección General de Minas y Geología. Agosto, 1978. Boletín de Geología. Ed. Sucre. Venezuela. 13(24): 300 p.

Yoris, F. y M. Ostos, (1997). “*Geología de Venezuela*.” Wec 1997. Evaluación de pozos. Caracas, Venezuela.

APÉNDICES

APÉNDICE A

CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA BÁSICA O DESCRÍPTIVA

Son herramientas básicas que indican la localización de la distribución para un análisis completo de un grupo de datos, entre las cuales se tienen:

- Medidas de tendencia central.
- Medidas de dispersión.
- Medidas de asimetría.
- Medidas de Kurtosis.

Medidas de Tendencia Central.

- Media Aritmética se define como:

$$Md = \frac{1}{n} \sum X_i$$

Md : Media Aritmética.

X_i : Valores medidos.

n : Número total de la población.

Mediana: Es una medida de posición, cuyo valor va a dividir a una distribución de tal manera que quede a cada lado un número igual de términos.

$$M = \frac{(N+1)}{2}. \quad N: \text{numero de datos (caso impar)}$$

$$M = \frac{N}{2} \quad \text{o} \quad M = \frac{N}{2} + 1 \quad (\text{caso par})$$

M : mediana.

N : número total de la población.

La moda es el dato correspondiente a la mayor frecuencia dentro de la población y se denota por M₀.

Medidas de dispersión.

Es otra herramienta básica de la estadística descriptiva, cuya función es mostrar la disimilaridad de los valores; éstos incluyen errores típicos, varianza, desviación típica, mínimo, máximo, amplitud. Los estadísticos descriptivos también toman en cuenta las medidas de la forma que adopta la distribución; donde la asimetría y la curtosis se muestran con sus errores típicos, dando un intervalo de confianza a un nivel del 95%.

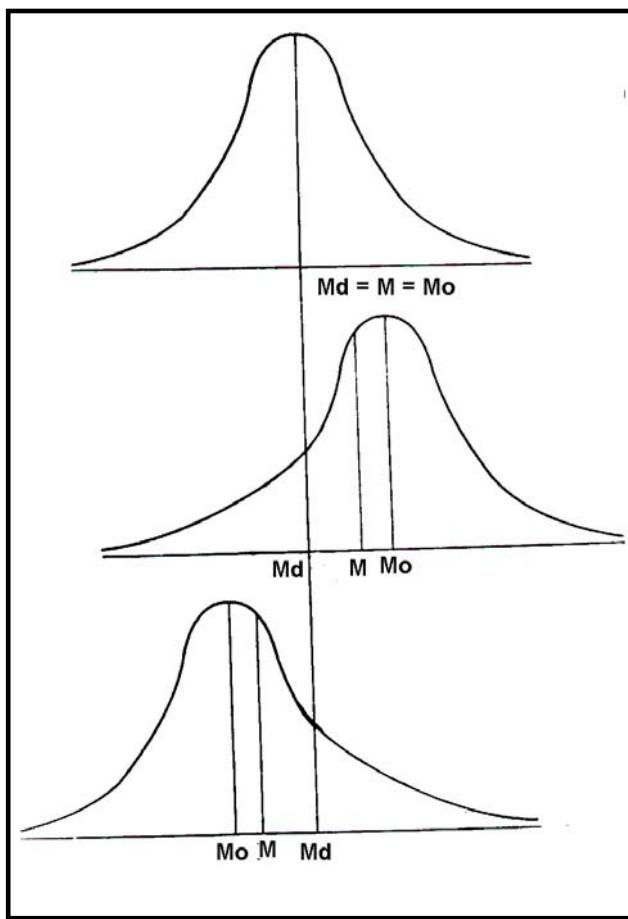


Figura N° A.1. Medidas de Tendencia Central: Media (Md), Mediana (M), Moda (Mo). (Tomado de Gómez, 1983).

Cuartiles, deciles y percentiles.

Son medidas similares a la mediana, pero en vez de dividir a la muestra en dos partes iguales, la dividen en cuatro, diez y cien partes.

Recorrido

Se define como el resultado del dato mayor menos el menor. Aporta información acerca del campo de variación de la variable del conjunto analizado.

Desviación Típica (σ)

Es la medida más usada para conocer la dispersión de la población de datos a estudiar. Consiste en la media cuadrática de las desviaciones de los datos (desviaciones respecto al promedio) y se representa por la letra S.

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N (x_i - Md)^2 / N$$

σ^2 : Variancia

N : Número de datos.

x_i : Cada uno de los datos.

Md : Media.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - Md)^2 / N}$$

σ : Desviación típica

Un valor pequeño en la desviación típica indicará que las observaciones están bastante concentradas alrededor de un valor central. Por el contrario, un valor grande indica que hay gran dispersión en los datos y que la tendencia de los valores de las observaciones es agruparse en torno a un valor central es mínima.

Medidas de asimetría.

Cuando los valores aportados por esta medida dan cero, se dice que la gráfica es simétrica, si son positivas se habla de simetría con cola a la derecha, y si es negativa la cola será a la izquierda.

Medidas de Kurtosis o Curtosis.

Hace referencia al mayor o menor estiramiento o encogimiento que está presente en la distribución. Como se ve en la siguiente figura.

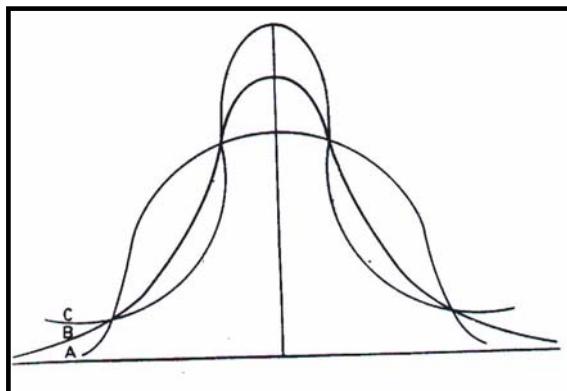


Figura Nº A.2. Comportamiento de las distribuciones. (Tomado de Gómez, 1983).

Suponiendo que las tres curvas tienen igual magnitud de desviación típica.

- A) Va por debajo de las demás en el centro y en los extremos. (Poca curtosis y achata).
- B) Va por encima que la anterior en el centro y en los extremos. (leptocúrtica). Mucha curtosis, apuntada.
- C) Tiene curtosis media (Mesocúrtica).

PRUEBAS ESTADÍSTICAS PARA UNA MUESTRA.

Prueba de Kolmogorov – Smirnov.

La prueba de Kolmogorov – Smirnov consiste en comparar, para cada valor de la variable, la proporción de los casos observados con el valor inferior o igual a dicho valor con la proporción de los casos esperados. El estadístico de contraste se construirá a partir de la máxima diferencia entre la media y la desviación estándar. En forma concreta la prueba de Kolmogorov – Smirnov para una muestra se utiliza para comprobar que una variable se distribuya normalmente.

ESTUDIO DESCRIPTIVO DE NORMALIDAD PARA UNA VARIABLE CUANTITATIVA.

El modelo de distribución de probabilidad más importante para variables continuas es la distribución normal, cuya función de densidad viene dada por:

$$F(X) = [1/S * (2\pi)^{1/2}] * \exp^{-[1/2 * (X_i - M_d) / S]^2}$$

F(X): Función de densidad.

S: Desviación típica.

π : Constante 3.1416 rad.

X_i : Cada uno de los datos.

Md: Media aritmética.

La distribución normal se caracteriza por:

- La función de densidad es simétrica y con forma de campana.
- La distribución de casos en torno a la media tiene siempre la misma forma, dependiendo sólo de la desviación típica.

APÉNDICE B

CONSIDERACIONES SOBRE GEOESTADÍSTICA

Cuando se hace uso de la geoestadística se debe tener como propósito fundamental la aceptación de existencia de continuidad en el espacio del atributo que se desea modelar; de allí la importancia de la familiarización e interpretación de la respuesta gráfica, la cual viene representada a través de variogramas, mapas de tendencia, elipses de anisotropía etc. El variograma por su parte es una herramienta geoestadística que se utiliza para visualizar, modelar y describir la auto correlación espacial en una determinada variable distribuida en el espacio, por tanto se considera una herramienta útil para medir la dispersión en poblaciones de datos.

El variograma se define como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \text{varianza}[Z(x) - Z(x+h)]$$

Donde:

$\gamma(h)$: Variograma.

$Z(x)$ y $Z(x+h)$: representan la propiedad o variable en estudio en el punto x y $x+h$ respectivamente.

h : Distancia de separación entre los puntos.

X, h : Puntos o vectores en el espacio.

Nótese que “ h ” es un vector en el espacio que posee módulo y dirección, por lo que el variograma no es más que el promedio del cuadrado de la diferencia entre dos valores de la variable o propiedad en estudio, en diferentes puntos del espacio separados por una distancia “ h ”. En consecuencia el variograma es una función positiva que depende del módulo del vector “ h ” y de su dirección. También es importante destacar que el variograma depende de la distancia y de la dirección entre los puntos donde se observa la variable y no de la propia ubicación de éstos.

Entre las propiedades del variograma se tienen

Sea $\gamma(h) = 0$ si $h = 0$

$\gamma(-h) = \gamma(h)$; para cualquier h .

La primera propiedad radica directamente en la definición de variograma, ya que $Z(x) = Z(x + h)$, si $h = 0$.

La segunda refleja que el variograma es una función par, es decir, tendrá el mismo valor si se calcula en la dirección de “ h ” o en la dirección de “ $-h$ ”.

El Comportamiento del variograma a grandes distancias indica que si dos valores de una misma propiedad se encuentran separados por una misma distancia mayor al rango del variograma, entonces no existe correlación entre ellos. Por lo tanto es a través de los elementos del variograma (Figura B.1) y en particular el rango de éste, que se pueden definir las “zonas de influencia” y tener idea de la extensión de ésta, ya que para valores superiores a ésta no son correlacionados.

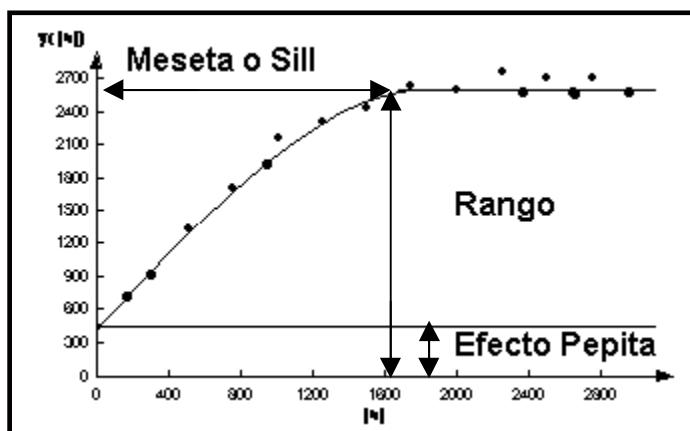


Fig. N° B.1 Elementos del Variograma.

Es importante destacar que las herramientas aportadas por la geoestadística están orientadas hacia la detección de anisotropías y como se ha mencionado anteriormente, el variograma va a ser una función que va a depender de la distancia y de la dirección en que se calcula, por tal razón permite detectar direcciones de anisotropía de la variable en estudio. No

obstante, dicha información contenida en el variograma es transmitida al método de estimación por Kriging, obteniéndose de esta forma estimaciones que toman en cuenta la dirección de anisotropía.

TIPOS DE ANISOTROPIA.

- **Anisotropía Geométrica**

Se presenta cuando el variograma calculado para dos direcciones diferentes tienen aproximadamente la misma meseta o “sill”, pero rangos diferentes, lo cual indica que en la dirección de menor pendiente la propiedad varía en forma más suave (la de mayor rango) que en la otra de menor rango, pero en general la varianza de la propiedad es la misma. Fig. N° B.2.

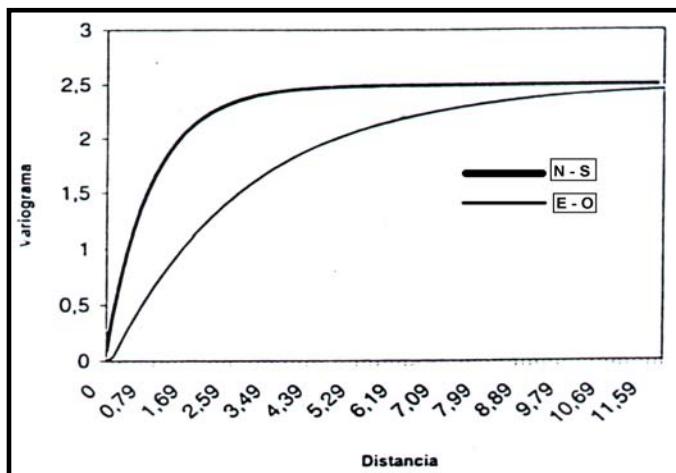


Figura N° B.2. Comportamiento anisotrópico de una variable en estudio, caso Anisotropía Geométrica.

- **Anisotropía Zonal**

Es aquella donde el variograma calculado en direcciones diferentes, tiene aproximadamente el mismo rango, pero diferente meseta o “sill”. Como se puede ver en la Figura B.3.

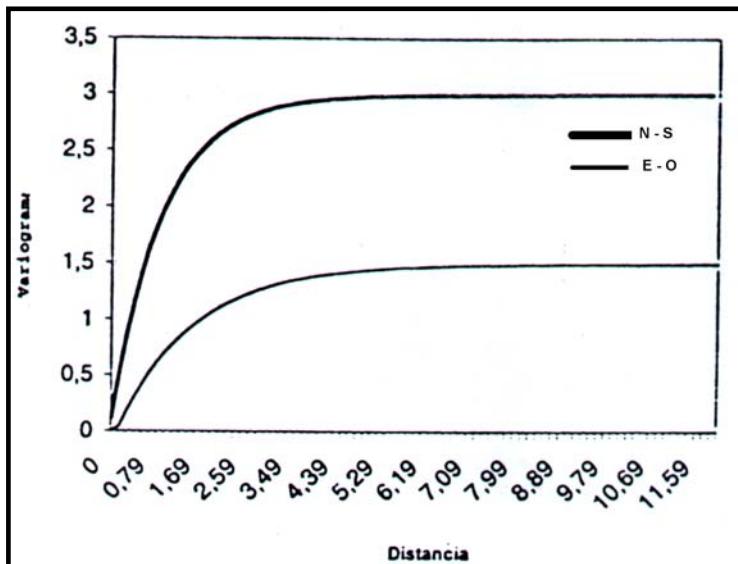


Figura Nº B.3. Comportamiento anisotrópico de una variable en estudio caso anisotropía Zonal.

TIPOS DE MODELOS DE VARIOGRAMAS

Modelo lineal.

- **Modelos sin meseta** Modelo potencial.
 Modelo logarítmico.

Efecto Pepita.

- **Modelos con meseta** Modelo Esférico.
 Modelo exponencial.
 Modelo Gausiano.

Modelos sin meseta: Son aquellos que representan fenómenos con mucha dispersión, sin o muy poca correlación entre los datos, dando como resultado un variograma que no alcanza un valor constante dentro del área de interés, y vienen a ser menos frecuentes que los modelos con meseta.

Modelo lineal: Es el modelo más simple de los modelos sin meseta.

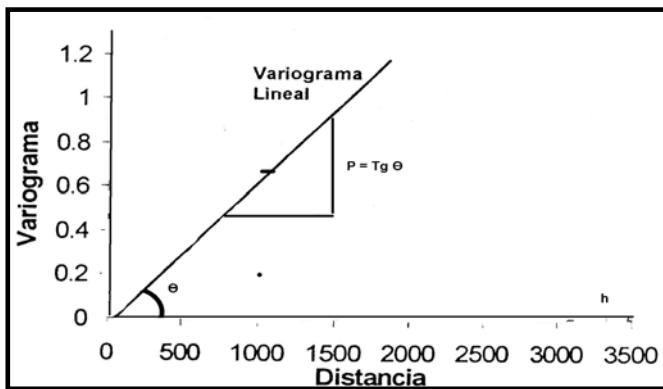


Figura N° B.4. Modelo Lineal.

Donde:

P: Pendiente de la recta.

h: Distancia.

Modelo Potencial o Logarítmico: En este tipo de variograma el comportamiento en el origen depende del parámetro “ α ” en el rango $0 \leq \alpha < 2$ y no posee meseta, por lo cual representa fenómenos no estacionarios o intrínsecos. Figura N° B.5.

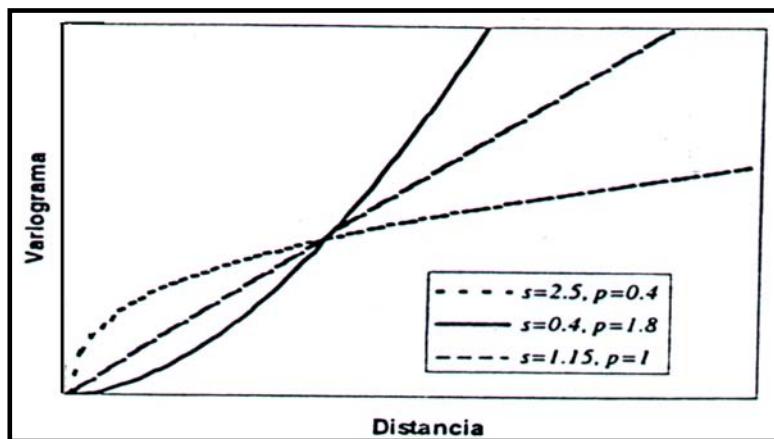


Figura N° B.5. Modelo Potencial.

El modelo potencial está definido por:

$$\gamma(h) = p_* h^\alpha$$

P: constante positiva.

α : parámetro de estacionaridad variando en el intervalo $0 \leq p < 2$

Modelos con meseta: Estos modelos se caracterizan por presentar un valor constante en el variograma después de una cierta distancia. La distancia en

que el variograma alcanza un valor constante se denomina rango. Y el valor donde la pendiente se hace constante se denomina la meseta. También se puede ver que el valor de la meseta es ligeramente cercano a la varianza de los datos de la muestra.

Efecto Pepita.

Es un modelo muy importante para describir cuando se tiene poca información con respecto a la relación espacial y no se puede obtener el variograma experimental debido a la escasez de información (Figura N° B.6). Este modelo vale cero a una distancia cero y aumenta a un valor constante para cualquier distancia mayor que cero y se define como:

$$\gamma(h) = 0; \text{ si } |h| = 0$$

$$\gamma(h) = S; \text{ si } |h| \neq 0$$

Donde:

$\gamma(h)$: variograma; S: meseta o “sill”.

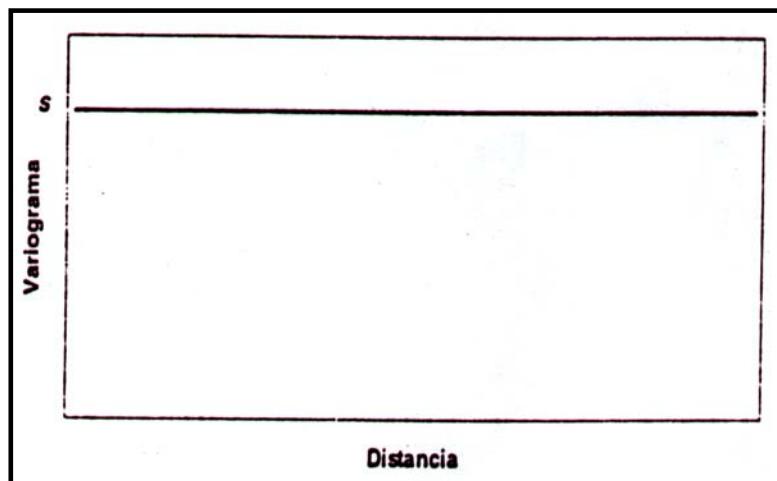


Figura N° B.6. Variograma efecto pepita o “nugget”.

Modelo Esférico:

El modelo esférico viene definido por:

$$\gamma(h) = S \left(\frac{2}{3} * \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} * \frac{|h|^3}{a^3} \right) \quad \text{Si } |h| \leq a.$$

$$\gamma(h) = S \quad \text{Si } |h| > a.$$

Donde:

S : Meseta o “sill” del variograma.

a : Alcance o rango. (Figura N° B.7)

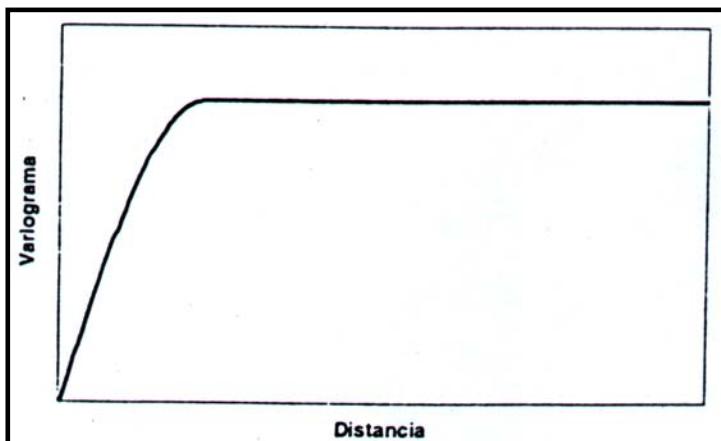


Figura N° B.7. Modelo de variograma esférico.

Modelo exponencial.

El modelo exponencial está definido por:

$$\gamma(h) = S * [1 - \exp^{(-|h|/a)}]$$

Donde:

s : valor de la meseta o sill.

a : rango aparente.

Para este modelo “a” recibe este nombre debido a que para esta distancia no se estabiliza el variograma, sino cuando “a” tiende al infinito, por lo cual se calcula el rango experimental que a su vez va a ser la distancia a la cual el variograma alcanza el 95% del valor de la meseta o sill; en el variograma experimental el rango experimental es 3a.

Una forma equivalente para este modelo es la siguiente:

$$\gamma(h) = S * [1 - \exp^{(-3|h|/b)}]$$

donde el rango experimental es b = 3a

Para esta ecuación el variograma experimental tiene un comportamiento lineal en el origen con pendiente 3s. Figura N° B.8.

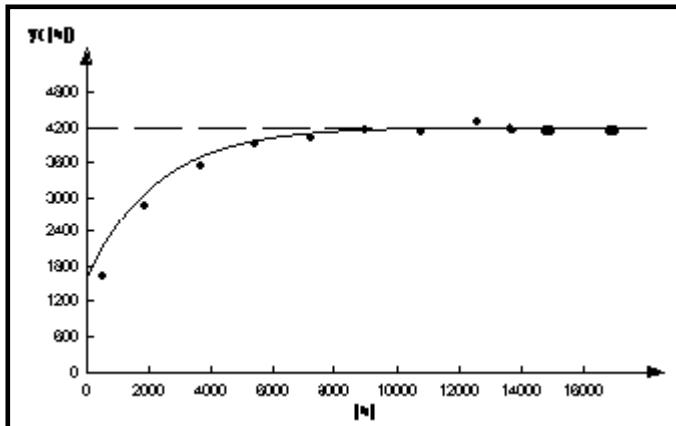


Figura N° B.8. Modelo Exponencial.

Modelo Gausiano

El modelo gausiano se define como:

$$\gamma(h) = S * [1 - \exp(-|h|^2 / a^2)]$$

Donde:

s : Meseta o sill.

a : Rango aparente.

Este tipo de variograma tiene un comportamiento parabólico en el origen, motivo por el cual se utiliza para modelar variables extremadamente continuas, alcanzando la meseta para un valor de “a” tendiendo a infinito y su rango experimental es igual a: $3^{1/2a}$. Figura N° B.9.

Cuando se utiliza la estimación por Kriging es de vital importancia considerar el modelo Gausiano acompañado de un modelo de efecto pepita puro, para evitar las inestabilidades numéricas.

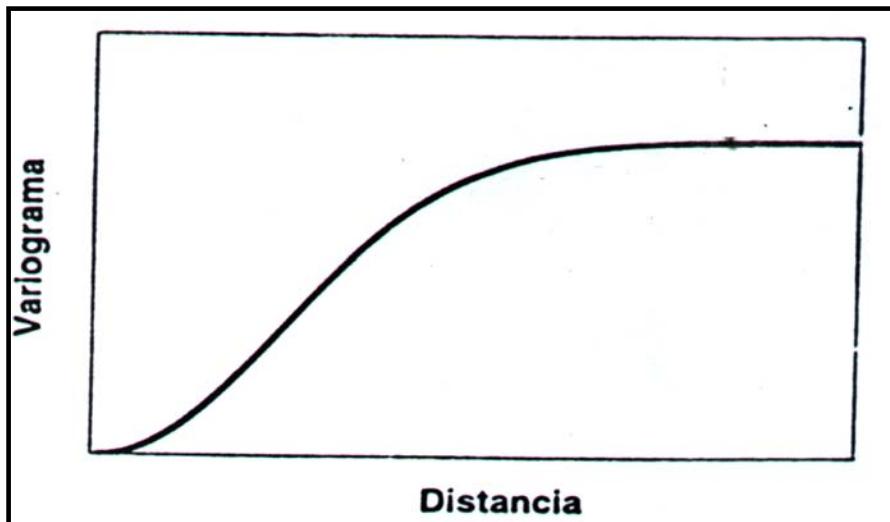


Figura N° B.9. Modelo de variograma gausiano

EL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL

En un estudio que involucre a la geoestadística es necesario determinar el modelo de variograma que mejor se ajuste a la estimulación o simulación de la variable en estudio. Evidentemente éste es un trabajo difícil de realizar y exige precaución, ya que se debe tener el mayor conocimiento del comportamiento de los datos y de las diferentes áreas que puedan aportar toda la información posible, para que en procesos posteriores el estudio geoestadístico esté representado por el mejor variograma experimental, que para el caso de una variable viene dado por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} * N(h) * \sum_p [Z(x_i) - Z(x_j)]^2$$

Donde $p = |x_i - x_j| = |h|$

$N(h)$: Pares de puntos que se encuentran a una distancia $|h|$

$Z(x_i)$: Propiedad medida en el punto x.

Nota: La sumatoria considera todos los pares de puntos que están separados una distancia $|h|$ en la dirección del vector h.

- **Cálculo del variograma experimental**

En un primer lugar se calcula el variograma experimental en distintas direcciones y distancias con el propósito de detectar el comportamiento espacial de la variable sometida a estudio. El resultado se muestra como un conjunto de puntos en cada dirección utilizada, lo cual representa el valor del variograma experimental.

En la graficación de estos puntos, se obtiene una representación discreta (se cuenta con un numero finito de muestras de la variable o propiedad en estudio) de la forma que varía el variograma experimental en una determinada dirección, en función de la variación de la distancia. Figura Nº B.10.

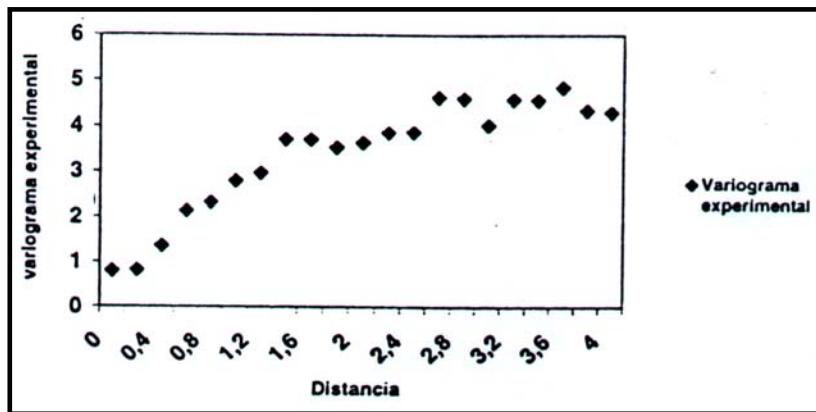


Figura Nº B.10. Variograma Experimental.

Es importante destacar que a la hora de seleccionar el variograma experimental se escojan aquellos que representan mayor o menor continuidad espacial de la variable, ya que a partir de éstos se define el elipsoide de anisotropía en cualquier dirección.

- **Ajustes del modelo de variograma.**

Una vez seleccionados los variogramas experimentales se les ajusta un modelo de variograma (con meseta o sin meseta), variando los parámetros o elementos. El ajuste generalmente se realiza buscando que el

modelo pase cerca de todos los puntos del variograma experimental o siga la tendencia de éstos, como se muestra en la Figura N° B.11.

Es importante hacer notar que el modelo de variograma proporciona los valores de distancia que en el variograma experimental se desconocen, donde estos valores son fundamentales para la simulación o estimación por Kriging de la variable en estudio. Ahora bien, aunque podrían obtenerse valores en distancias intermedias a través de una interpolación entre los puntos del variograma experimental, los valores así obtenidos no pueden ser usados en los sistemas de Kriging, debido a que no garantizan la existencia y unicidad de la solución. Esto sólo se consigue cuando se utilizan valores provenientes de un modelo de variograma.

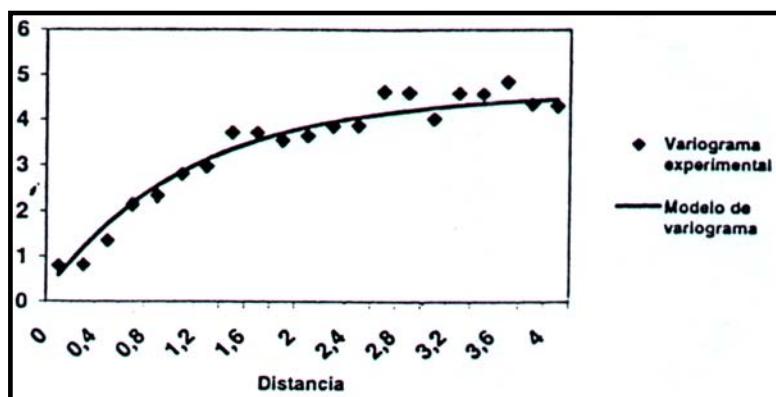


Figura N° B.11. Ajuste de un modelo de variograma.

Métodos de estimación

El método de Kriging es un método de estimación puntual que usa la geoestadística para dar una aproximación de un valor desconocido de un atributo ubicado en un punto específico, que se apoya con la ayuda de los datos reales con localizaciones vecinas.

APÉNDICE C

APLICACIÓN MATEMÁTICA MEDIANTE ANÁLISIS ESPECTRAL.

Tomando como punto de partida la ecuación de Fourier periódica y continua, donde x es la variable independiente, la función $f(x)$ puede ser expresada a través de la serie trigonométrica de Fourier (**Hwei, 1987; Bhattacharyya, 1966**)

$$f(x) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \omega x + b_n \sin n \omega x) \quad (1)$$

Donde:

a₀: Término independiente.

a_n, b_n: Coeficientes de Fourier, los cuales se definen por:

$$a_n = 2 / X \int_{-X/2}^{X/2} f(x) \cos n \omega x dx; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$b_n = 2 / X \int_{-X/2}^{X/2} f(x) \sin n \omega x dx; \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

El carácter de las funciones trigonométricas implica, para toda onda senoidal, la existencia de dos períodos diferentes, uno en el dominio el tiempo (T) y otro en el espacio (λ). Al periodo λ se le llama longitud de onda (Bock y Morrel, 1972). Por conveniencia matemática se utiliza:

$$\omega = 2 \pi / X$$

ω : frecuencia angular

X : longitud total de "x"

Sea $f(x)$ una función periódica de periodo X ; donde $F(n)$ es el espectro de la línea compleja de $f(x)$. Cuando el periodo $X \rightarrow \infty$, $f(x)$ se

aproxima a una función NO PERIÓDICA o función transitoria, la cual contiene todas las frecuencias posibles. Ahora el objetivo principal es encontrar la representación de Fourier para esta función no periódica.

Comenzando por la forma exponencial de la serie de Fourier, se tiene que:

$$f(x) = \sum_{-\infty}^{\infty} F(n) e^{j n w x} \quad (2)$$

Esta ecuación representa la forma compleja de la Serie de Fourier.

donde $F(n)$ se define como:

$$F(n) = 1/X \int_{-X/2}^{X/2} f(x) e^{-j n w x} dx \quad (3)$$

donde

$$w = 2\pi / X \quad (4)$$

Sustituyendo (3) en (2) se obtiene

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[1/X \int_{-X/2}^{X/2} f(\sigma) e^{-j n w \sigma} d\sigma \right] e^{j n w x} \quad (5)$$

Se utiliza la variable σ de la integral para evitar confusiones con la variable x . Puesto que $1/X = w/2\pi$; la ecuación anterior se puede expresar como:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[1/2\pi \int_{-X/2}^{X/2} f(\sigma) e^{-j n w \sigma} d\sigma \right] w e^{j n w x} \quad (6)$$

Si se considera que $X \rightarrow \infty$, entonces por (4), w se anula.

Sea $w = \Delta w$; entonces la frecuencia de cualquier armónico $n w$ corresponde a la variable general de frecuencia que describe el espectro

continuo. Concretamente, $n \rightarrow \infty$ a medida que $w = \Delta w \rightarrow 0$, tal que el producto es infinito; esto es: $n w = n \Delta w \rightarrow w$.

Reescribiendo (6)

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[1/2\pi \int_{-X/2}^{X/2} f(\sigma) e^{-jn\Delta w \sigma} d\sigma \right] e^{j(n\Delta w)x} \Delta w$$

Si $X \rightarrow \infty$; $\Delta w \rightarrow dw$ y la sumatoria se convierte en la integral sobre w ; es decir, una función **no periódica** de $f(x)$; por lo que:

$$f(x) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(\sigma) e^{-jw\sigma} d\sigma \right] e^{jwx} dw \quad (7)$$

Si se define:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-jwx} dx \quad (8)$$

Entonces (7) se transforma en:

$$f(x) = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{jwx} dw \quad (9)$$

Las ecuaciones (8) y (9) son la representación de Fourier de la función NO PERIÓDICA.

La ecuación (9) muestra que la función no periódica $f(x)$ puede ser como una síntesis de un agregado infinito de senosoides e^{jwx} de todas las frecuencias angulares w en un rango continuo e infinito $(-\infty, \infty)$, con una amplitud compleja $F(w)$, que a su vez es el espectro continuo complejo de la función no periódica $f(x)$. Las relaciones (8) y (9) son conocidas como las transformadas de Fourier. Cuando la transformada de Fourier es ampliada al

caso bidimensional, en (8) $F(w)$ se pueden escribir como $F(\mu, \nu)$, de una función bidimensional $f(x, y)$; definida por la integral doble de la ecuación (10).

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j(\mu x + \nu y)} dx dy \quad (10)$$

entonces $f(x, y)$ se puede hallar por la forma recíproca de la transformada.

Sea $G(\mu, y)$ la Transformada de Fourier de la función $f(x, y)$, donde esta se toma con respecto a x ; es decir:

$$G(\mu, y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j\mu x} dx \quad (11)$$

Del mismo modo, utilizando la fórmula de transformada inversa unidimensional, se tiene:

$$f(t) = \tau^{-1}[F(w)] = 1 / 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{jw t} dw ; \text{ por lo que:}$$

$$f(x, y) = 1 / 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} G(\mu, y) e^{j\mu x} d\mu \quad (12)$$

Luego se toma la Transformada de Fourier $F(\mu, \nu)$ de $G(\mu, y)$ con respecto a “y”, considerando a “x” como parámetro; vale decir que:

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\mu, y) e^{-j\nu y} dy \quad (13)$$

Aplicando la Transformada Inversa de Fourier se tiene que:

$$G(\mu, y) = 1 / 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} (\mu, \nu) e^{j\nu x} d\nu$$

y sustituyendo $G(\mu, y)$ en (12)

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mu, \nu) e^{j\nu y} d\nu e^{-j\mu x} d\mu$$

$$f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\mu, \nu) e^{j(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu \quad (14)$$

Esta ecuación representa la **Transformada Inversa de Fourier** para el caso bidimensional, y su relación reciproca se obtiene sustituyendo (11) en (13):

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\mu, y) e^{-j\nu y} dy \quad (13)$$

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j\mu x} dx e^{-j\nu y} dy$$

luego reagrupando los términos se obtiene:

$$F(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j(\mu x + \nu y)} dx dy \quad (15)$$

Ésta representa la Transformada de Fourier Bidimensional, donde μ, ν , son las frecuencias angulares en la direcciones de x e y respectivamente.

$F(\mu, \nu)$ es en general compleja y contiene información de las fases y amplitudes de las relaciones con respecto a todas las frecuencias que se ajustan a una función bidimensional $f(x, y)$.

Luego se separa la función $F(\mu, \nu)$ en su parte real e imaginaria dadas por:

$$F(\mu, \nu) = P(\mu, \nu) + jQ(\mu, \nu) \quad (16)$$

La **amplitud** de densidad espectral, o simplemente el espectro de amplitud de $F(\mu, \nu)$ es:

$$A(\mu, \nu) = |f(\mu, \nu)| = [P^2 + Q^2]^{1/2} \quad (17)$$

Su espectro de densidad de fase, o simplemente espectro de fase, es:
 $\theta(\mu, \nu) = \arctan(Q / P)$.

La densidad espectral de energía, o simplemente el espectro de energía es dado por:

$$E(\mu, \nu) = |f(\mu, \nu)|^2 = [P^2 + Q^2] \quad (18)$$

ANEXO

