

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS GEOFÍSICO INTEGRADO EN LA REGIÓN DE
GUARENTO AL NORESTE DEL ESTADO BOLÍVAR**

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Ingeniero Geofísico
Por la Br. Pérez Mendoza, Maxlyn

Caracas, Junio 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS GEOFÍSICO INTEGRADO EN LA REGIÓN DE
GUARENTO AL NORESTE DEL ESTADO BOLÍVAR**

Tutor académico: Prof. Inirida Rodríguez
Cotutor académico: Prof. Sebastián Grande
Tutor industrial: Ing. Octimio Gutierrez

Trabajo Especial de Grado
Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela para
optar al título de Ingeniero Geofísico
Por la Br. Pérez Mendoza, Maxlyn

Caracas, Junio 2004

Este trabajo va dedicado a mis padres
por las enseñanzas que me han dado en el transcurso de mi vida.
“ Sin ustedes no seria nadie
Gracias, Padres”

AGRADECIMIENTOS

Agradezco.....

A Dios por haberme dado la oportunidad de realizar una hermosa carrera universitaria, y por haberme dotado de las herramientas necesarias para poder culminarla

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por alojarme en su seno durante estos años de estudio.

A mi padre por ser el tutor de mi vida, por haberme dado las bases y muchas de las herramientas necesarias durante mi estudio. A mi madre por toda la paciencia que me tuvo, por estar a mi lado en todos los malos momentos. En fin le agradezco a los dos por la formación que me dieron y por haber dado lo mejor de ustedes para que yo pudiese hoy culminar mis estudios. LOS AMO....

A la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, por mi formación profesional y por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de grado.

Al Prof. Inirida por su valiosa colaboración, su asesoría y paciencia durante la realización de mi Trabajo de Especial de Grado.

Al Instituto Nacional de Geología y Minería (INGEOMIN) y al Ing. Octimio Gutiérrez por haberme suministrado los datos aeromagnéticos necesarios para la realización de este proyecto

Al Profesor Sebastián Grande por su constante dedicación a lo largo de todo el estudio, muchísimas gracias por todos sus conocimientos transmitidos

A la Lic. Nieves Nevado por los aportes suministrados para lograr la culminación de este proyecto.

Por la ayuda, apoyo, paciencia y colaboración prestada por mis compañeros de tesis: Engelberth Vargas, Natalia Adrian, Nanvir Escorijuela, Liz Lozano Alexander Días, Leonardo Morgado y Rafael Azuaje.

A todos mis comapañeros que de una u otra forma siempre estuvieron a mi lado y muy en especial a Marianela Méndez, Laura Torres, Francisco Moreno, Pedro Camacho, Luis Moro y José F, Suniaga, Harold Castillo por toda la ayuda prestada durante mi carrera y la elaboración de este trabajo

A mi hermana por brindarme su apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

A mis amigas Yaisvid y Jackeline Fernández, por haber estado a mi lado en mis caídas y en mis triunfos vividos a lo largo de toda mi carrera.

A mis amigos y familiares que siempre estuvieron pendientes y de alguna u otra forma me prestaron su contribución en la elaboración del presente trabajo

En fin gracias a todas aquellas personas que aportaron su granito para lograr este trabajo que hoy con orgullo presento

Gracias.

Pérez M. Maxlyn

**ANÁLISIS GEOFÍSICO INTEGRADO EN LA REGIÓN DE
GUARENTO AL NORESTE DEL ESTADO BOLÍVAR**

**Prof. Inírida Rodríguez Tutor Académico, Prof. Sebastián Grande Cotutor
Académico. Ing. Octimio Gutiérrez Tutor Industrial. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geofísica. 2004, n° pag. 111**

El Escudo de Guyana ocupa todo el estado Bolívar, el Territorio Federal Amazona y parte del estado Delta Amacuro; el presente estudio se ubica en la zona sur del Escudo de Guayana, entre $62^{\circ} 30' W - 63^{\circ} 15' W$ y $6^{\circ}30' N - 7^{\circ} N$, la cual cubre un área de $4.620,375 \text{ Km.}^2$.

Los objetivos principales del presente trabajo son: en primer lugar, generar tres modelos geológicos, los cuales darán a conocer como se encuentran distribuidas las estructuras en profundidad. Estos modelos se amarrarán a información sísmica, gravimétrica, valores de susceptibilidad y densidad, tanto del área de estudio como de zonas circundantes. Como segundo objetivo se busca conocer si el área es apta para la explotación minera.

Para obtener resultados satisfactorio en lo que respecta al conocimiento geológico, se realizó una salida de campo, con el fin de conocer de manera más detallada la geología presente en la zona y tomar muestra de los diferentes afloramientos, las cuales posteriormente se les realizara un estudio mineralógico, cálculos de de densidad y susceptibilidad.

La base de datos aeromagnético utilizada para la construcción del mapa de intensidad magnética total (IMT), fue extraída de mapas de IMT, los cuales fueron realizados en los años de 1959 y 1961. A esta base de datos se le aplico tanto un estudio estadístico, para conocer el comportamiento de los datos, como un estudio geoestadístico, con el cual se

busca conocer la anisotropía de los datos, y de esta manera generar un mapa de IMT más confiable.

Para la realización de los modelos, se seleccionaron 3 perfiles en las zonas de interés tanto geofísico como geológico, a estos perfiles se le realizaron un análisis espectral, con el fin de conocer a que profundidades se ubican los cuerpos causantes de las anomalías.

Realizados los modelo se interpreta que el Escudo de Guayana por ser originado por numerosos procesos tectónico, termales e intrusivos ocurridos hace millones de años presenta una geología muy compleja, la cual debería ser estudiada con mayor precisión.

Por otro lado el mapa de intensidad magnética total, muestra altas respuestas magnéticas al norte de la zona de estudio, la cual da información acerca de un alto contenido de hierro en el área, pero al observar los modelos propuestos, este alto contenido de hierro, que se encuentra ubicado en la Provincia de Imataca, se presenta a profundidades no rentables para la explotación minera.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	v
Índice General	vii
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xiii
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Localización del área de estudio	3
1.4 Método de trabajo	4
1.5 Trabajos previos	6
Capítulo 2: Geología de la zona de estudio	
2.1 Evolución geológica de la región	10
2.2 Geología regional	13
2.2.1. Provincia de Imataca	14
2.2.2. Provincia de Pastora	17
2.2.3. Provincia de Cuchivero	19
2.2.4. Provincia de Roraima	21
2.3 Geología local	22
2.4. Reconocimiento geológico de la zona	26
Capítulo 3: Fundamentos teóricos	
3.1 Método Magnético	34
3.1.1 Campo magnético de la Tierra y sus componentes	34
3.1.2 Objetivo del método magnético	36
3.1.3 Susceptibilidad magnética	36
3.1.4 Prospección aeromagnética	39
3.2 Método Gravimétrico	42

Capítulo 4: Estudio estadístico y geoestadístico de los datos aereomagnéticos y gravimétricos	
4.1 Método Magnético	45
4.1.1 Datos aeromagnéticos	45
4.1.2 Proceso de digitalización de los datos aeromagnéticos	46
4.1.3 Susceptibilidad magnética, densidad, y mineralogía de las muestras tomadas en campo	46
4.1.4 Aplicación de la estadística a los datos aeromagnéticos	51
4.1.5 Aplicación de la geoestadística a los datos aeromagnéticos	57
4.2 Método Gravimétrico.	59
4.2.1 Datos Gravimétricos	59
4.2.2 Cálculo de la anomalía de Bouguer	59
4.2.3 Aplicación de la estadística a los datos gravimétricos	61
Capitulo 5: Resultados y análisis de los mapas magnético y gravimétricos	
5.1 Método Magnético	63
5.1.1. Mapa de IMT bajo criterio geoestadístico	63
5.1.2. Mapa de Reducción al polo	65
5.1.3 Análisis Espectral del Mapa de IMT	65
5.1.4 Bondad de Ajuste aplicada a los datos aeromagnéticos	68
5.2 Método Gravimétrico	73
5.2.1 Mapa de anomalía de Bouguer bajo criterio Geoestadístico	73
5.3. Modelos geológicos	75
5.3.1 Selección de los Perfiles	75
5.3.2 Análisis espectral de los perfiles propuestos	77
5.3.3 Elaboración de los modelos geológicos	79
5.3.4 Análisis de cada uno modelos geológicos propuestos	84
Conclusiones y Recomendaciones	86
Conclusiones Generales	88
Bibliografía y referencias citadas	90
Apéndices	96
Apéndice A: Estadística y Geoestadística	96

Apéndice B: Transformación de coordenadas relativas a coordenadas Absolutas	102
Apéndice C: Cálculo de la susceptibilidad de las muestras tomadas en campo	104
Apéndice D: Estaciones gravimétricas ubicadas dentro del área de estudio	108
Apéndice E: Transformada de Fourier utilizada en el análisis espectral	109

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Pag:
1. Ubicación geográfica relativa de la zona de estudio. Mapa base tomado de la Enciclopedia Encarta 2003	3
2. Diagrama de la metodología de trabajo	5
3. Ubicación de los 9 tendidos sísmicos realizados en la zona norte del Escudo de Guayana durante el proyecto ECOGUAY. (Chalbaud 2000)	7
4. Modelo geológico N-S correspondiente a los perfiles 500, 700 y 200, del proyecto ECOGUAY. (Chalbaud, 2000)	8
5. Mapa geológico del área de estudio. (Wynn et al. ,1993)	9
6. Ubicación de las provincias geológicas del Escudo de Guayana. Tomado de González de Juana et al., (1980)	13
7. Mapa geológico esquemático del Complejo de Imataca al oeste del río Caroní en la región de Los Indios–El Pilar. (Dougan, 1972).	16
8. Columna estratigráfica del oeste del Escudo de Guayana. Tomado del mapa de geológico estructural de Venezuela realizado por el Ministerio de Energía y Minas en 1976.	24
9. Mapa geológico estructural de la zona de estudio. Tomado del mapa geológico estructural de Venezuela realizados por el Ministerio de Energía y Minas en 1976.	25
10. Recorrido llevado a cabo durante la salida de campo	26
11. Foto del afloramiento de la estación N° 1. Rumbo N70° W	27
12. Afloramiento de la estación N° 2. Rumbo: E–W y Buzamiento 84° S	28
13. Foto del afloramiento de la estación N° 3 Rumbo N40° E	28
14. Afloramiento de la estación N° 4. Rumbo N 60° E	29
15. Afloramiento de la estación N° 5. Rumbo N7° E	29
16. Pliegues recurrentes presentes en el afloramiento de la estación N°5 Rumbo N20° E	30
17. Intercalaciones de tobas con metapelíticos presentes en el afloramiento de la estación N° 6	30
18. Afloramiento de la estación N° 6, Rumbo S65° E	31

19. Afloramiento de la estación 7 .Rumbo N20° E	31
20. Afloramiento de la estación N° 8	32
21. Milonita de la falla Gurí, separación entre las provincias de Imataca y Pastora, Rumbo N80° E	32
22. Afloramiento de la estación N° 10	33
23. Componentes del campo magnético bajo un sistema cartesiano de coordenadas XYZ	34
24. Ubicación de los polos magnéticos en relación con los polos geográficos	35
25. Modelaje bidimensional	44
26. Ubicación y códigos de cada uno de los mapas aeromagnéticos	45
27. Histograma de frecuencia calculado con la base de datos aeromagnético	52
28. Diagrama de caja de datos aeromagnéticos	56
29. Q – Q con curva normal de datos aeromagnéticos	56
30. Q – Q sin tendencia normal de datos aeromagnético	57
31. Roseta de distribución	58
32. Elipse de anisotropía	59
33. Histograma de frecuencia calculado con la base de datos gravimétricos	61
34. Mapa de IMT bajo criterio geoestadístico	64
35. Mapa de reducción al polo	66
36. Análisis espectral de los datos de intensidad magnética	68
37. Gráfica de bondad de ajuste de los datos aeromagnéticos	69
38. Mapa regional grado 2 de IMT	71
39. Mapa residual grado 2 de IMT	72
40. Mapa de anomalía de Bouguer bajo criterio geoestadístico	74
41. Mapa de IMT con la ubicación de los perfiles seleccionados	76
42. Análisis espectral del perfil N° 1	78
43. Análisis espectral del perfil N° 2	78
44. Análisis espectral del perfil N° 3	79
45. Modelo geológico del perfil N° 1	81
46. Modelo geológico del perfil N° 2	82
47. Modelo geológico del perfil N° 3	83

48. Mapa Magnetico General del àrea	89
49. Ubicación de los valores necesarios para el cálculo de las coordenadas absolutas en el eje x	102
50. Ubicación de los valores necesarios para el cálculo de las coordenadas absolutas en el eje y	103

LISTA DE TABLAS

Tabla N°:	Pag.
1. Promedios de porcentaje de volumen de magnetita e ilmenita y susceptibilidades magnéticas en varios tipos de rocas.	37
2. Resultados de susceptibilidad magnética, densidad, y composición mineralógica de las muestras tomadas en el reconocimiento geológico.	48
3. Valores estadísticos calculados con la base de datos aeromagnéticos.	53
4. Resumen del procesamiento de los casos.	53
5. Percentiles calculados a los datos aeromagnéticos.	54
6. Estimadores – M aplicados a los datos aeromagnéticos.	54
7. Valores extremos de los datos aeromagnéticos.	55
8. Pruebas de normalidad aplicadas a los datos aeromagnéticos.	55
9. Valores estadísticos calculados con la base de datos gravimétricos.	62
10. Valores de la bondad de ajuste para cada grado del polinomio	69
11. Información de los perfiles, ubicación en coordenadas geográficas, UTM, extensión de cada perfil y su orientación	77
12. Unidades geológicas, densidad y susceptibilidad magnética utilizada para la realización de los modelos geológicos	80
13. Mediciones realizadas con el susceptibilímetro, promedio, peso inicial y final de los envases	105
14. Estaciones gravimétricas ubicadas dentro del área de estudio	108

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La Geofísica comprende un conjunto de métodos de prospección que se basan en el estudio de las propiedades físicas de los materiales para caracterizar el comportamiento del suelo, su litología y estructura, estudiando la respuesta de los mismos. Estos métodos son muy ventajosos ya que a través de ellos se pueden investigar áreas o perfiles en menor tiempo, pero a su vez presentan desventajas debido a que siempre va a existir un grado de incertidumbre en sus resultados, para lo cual es necesario integrar información de los diferentes métodos, ya que unos servirán para distinguir los distintos tipos de suelos, otros pueden ser empleados para conocer las diversas estructuras.

En el caso de la prospección minera los métodos geofísicos más utilizados son la gravimetría y la magnetometría, debido a que la prospección gravimétrica es capaz de detectar anomalías de gravedad que se traducen en diferencias de densidad del terreno, mientras que la magnetometría se encarga de estudiar el campo magnético natural de la Tierra, con el fin de buscar anomalías originadas por cambios de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. Al integrar estos dos métodos junto con el conocimiento geológico de la zona, se reduce el grado de incertidumbre y puede determinarse el tipo de roca o estructuras que se encuentra en el subsuelo, tanto por las variaciones laterales de la susceptibilidad como por los cambios de densidades, dependiendo del tipo de material que se encuentre.

En Venezuela una de las zonas de mayor interés minero se encuentra ubicada en el Escudo de Guayana, el cual está constituido por rocas ígneas y metamórficas. Su origen se debe a numerosos procesos tectónicos, termales e intrusivos. Por ser esta zona importante para el desarrollo de la minería y tan compleja en el aspecto

geológico, se han realizados estudios gravimétricos, magnéticos y sísmicos, los cuales disminuirán el riesgo exploratorio.

Durante los años 1959 y 1961 se realizaron levantamientos aeromagnéticos en la región del Escudo de Guyana, con el fin de generar mapas de intensidad magnética total (IMT), los cuales no tuvieron un procesamiento adecuado, generando así estructuras ficticias. Por esta razón el Departamento de Geofísica de la Universidad Central de Venezuela junto con INGEOMIN, desarrollan una serie de proyectos dentro del cual se encuentra el presente trabajo; con este proyecto se busca construir nuevamente los mapas bajo un criterio geoestadístico. Una vez obtenidos los mapas de IMT, se correlacionan con la información gravimétrica y sísmica existente en la zona, para de esta forma conocer con mayor precisión y objetividad las estructuras de la zona de estudio.

1.2 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

Objetivo general:

Los objetivos generales del presente trabajo son:

- 1) Elaborar un mapa de IMT y un mapa de anomalía de Bouguer del área a estudiar, con criterio geoestadístico.
- 2) Generar e interpretar modelos del subsuelo a partir de datos aeromagnéticos y gravimétricos

Para lograr estos dos puntos se plantean los siguientes objetivos específicos:

- 1) Generar una base de datos aeromagnéticos, en formato digital.
- 2) Realizar el análisis geoestadístico de los datos.
- 3) Construir perfiles de datos aeromagnéticos.
- 4) Realizar un análisis espectral de los perfiles seleccionados.
- 5) Ubicar nuevas zonas prospectivas para la exploración minera.

1.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

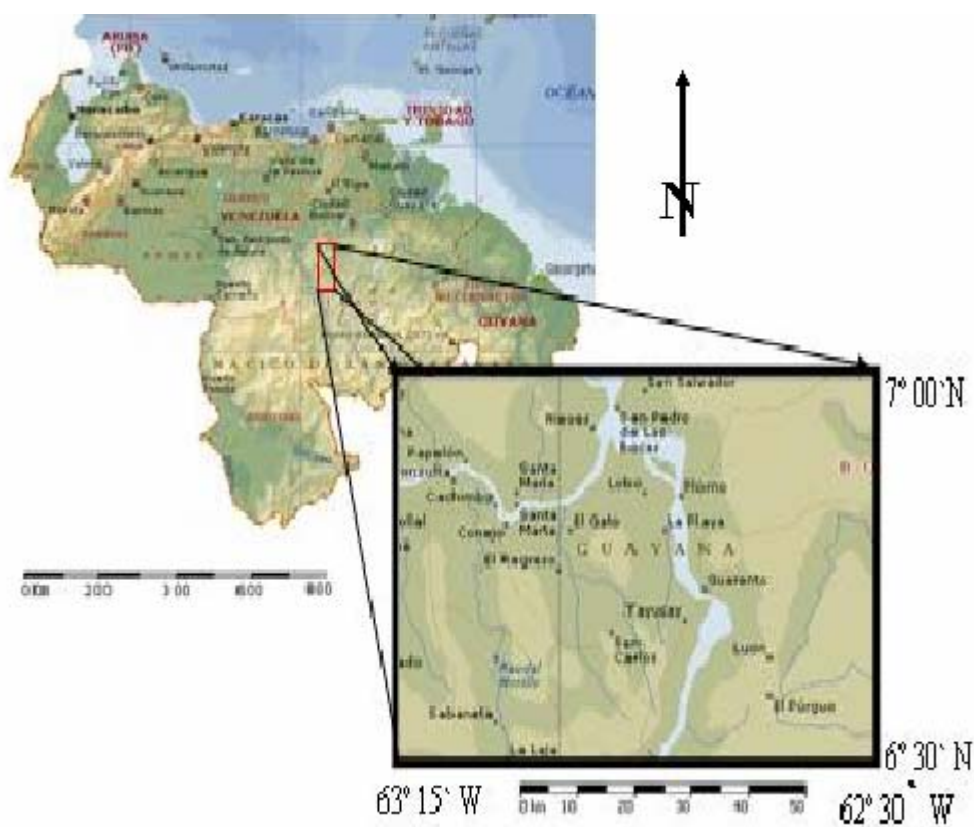


Figura N° 1: Ubicación geográfica relativa de la zona de estudio. Mapa base tomado de la Enciclopedia Encarta 2003

La ubicación del área de estudio se encuentra al Sur de Venezuela en el Estado Bolívar en la región del Escudo de Guayana. La zona de estudio cubre un área de 4620.375 Km.², limitada entre 62 grados 30 minutos - 63 grados 15 minutos de longitud oeste y 6 grados 30 minutos - 7 grados de latitud norte, observa en la figura. N° 1

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Este trabajo se enfoca en delimitar zonas prospectivas para la exploración y explotación minera en la región de Guayana. Con el fin de lograr los objetivos antes propuestos, se inicia el desarrollo del proyecto con una revisión bibliográfica y un estudio detallado de la geología de la zona, basado en un reconocimiento geológico de la zona de estudio, incluida la toma de muestras de rocas de diferentes afloramientos, con el fin de realizar un estudio mineralógico, cálculo del valor de densidad y susceptibilidad magnética por cada muestra, valores que serán utilizados en la construcción de los modelos geológicos

Seguidamente se generó una base de datos aeromagnéticos, a través del proceso de digitalización, que se basa en la extracción de los valores de la intensidad total del campo magnético, de los mapas adquiridos en los años 1959-1961. Paralelo a esto se calculó la anomalía de Bouguer a partir de la base de datos gravimétricos del área de estudio, la cual pertenece a la Red Gravimétrica Nacional.

Se aplicó la estadística clásica a los datos gravimétricos y magnéticos, la cual consiste en el estudio de la tendencia central y las medidas de dispersión, con el fin de conocer como se encuentran distribuidos los datos. Una vez obtenido este resultado se realizó un estudio geoestadístico, que permitió obtener un modelo de semivariograma teórico, el cual es esencial para generar los mapas de intensidad magnética total y de anomalía de Bouguer.

Los mapas generados fueron correlacionados con información geológica, para conocer las causas de las anomalías y ubicar los perfiles en las zonas de interés. Sobre éstos se construyeron los modelos del subsuelo, con una interpretación mediante el ajuste de las anomalías gravimétrica y de intensidad magnética total. Culmina el estudio con el análisis de riesgo exploratorio, para proponer áreas de mayor o menor riesgo de acuerdo al grado de incertidumbre que exista en los resultados obtenidos en las áreas de interés investigadas

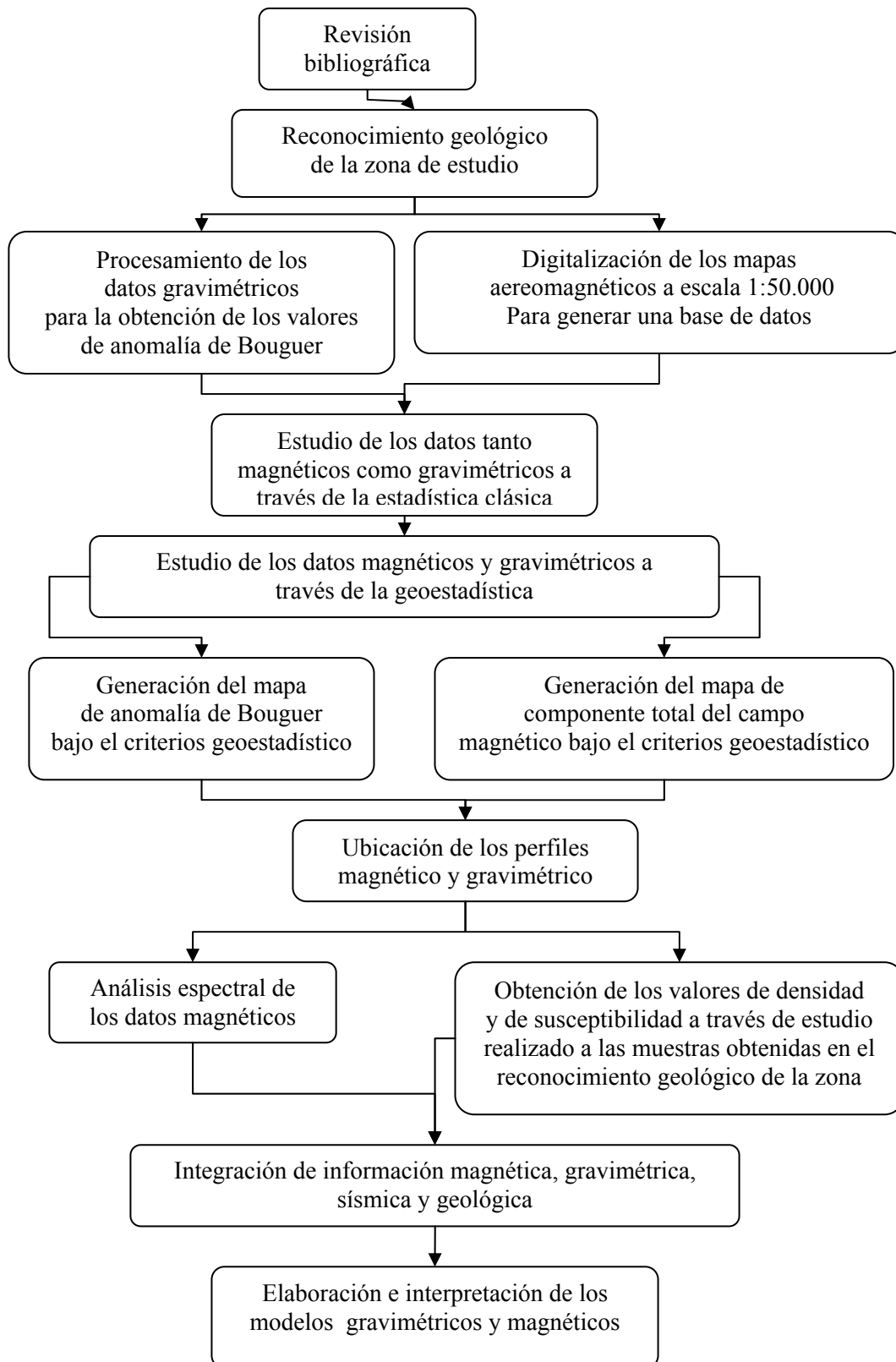


Figura N° 2: Diagrama de la metodología de trabajo

1.5 TRABAJOS PREVIOS

La “Internacional Air Service Corporation of Pennsylvania” realizó en 1950 una exploración aeromagnética en el Escudo de Guayana en las zonas ferruginosas más importantes como El Pao, La Grulla, Arimagua, Cerró Bolívar, San Isidro y otras. Este reconocimiento abarcó una superficie de 2790 Km.², y su objetivo era determinar la geología general y estructural, y descubrir los yacimientos de menas de hierro en la región precámbrica al sur del Orinoco. La interpretación de las mediciones reveló la presencia de numerosas zonas enriquecidas y señaló las características estructurales y los diferentes miembros de las formaciones geológicas. De este trabajo se concluyó que todos los yacimientos de hierro están relacionados con magnetita, anticipándose que el contenido de la misma aumenta con la profundidad; se establecieron altos valores de susceptibilidad magnética, probablemente causados por el magnetismo residual de la magnetita.

Schmitz et al. (1998) interpretaron un estudio integrado de sísmica de refracción, gravimetría y datos magnéticos, en el margen norte del Escudo de Guayana, con el fin de determinar el espesor de la corteza de la región. Para esto utilizaron 9 tendidos sísmicos de 320 Km. de longitud los cuales pueden ser observados en la figura N° 3. Se obtuvo como resultado que el espesor de la corteza va de 45 a 48 Km., con una velocidad en el manto superior de 8.2 Km. /s y para la corteza media de 6.6 Km. /s. En lo que respecta a los datos gravimétricos se tomaron 300 nuevas estaciones para completar los datos ya existentes de la base de datos de la Universidad Simón Bolívar.

Al realizar el análisis de la anomalía de Bouguer obtuvieron: un máximo de 30 mGales en el oeste y un mínimo de -20 mGales en el este. Propusieron la presencia de Moho como una discontinuidad de primer orden ubicada a 45-48 Km. de profundidad aproximadamente, esto puede ser observado en la figura 4.



Figura N° 3: Ubicación de los 9 tendidos realizados en la zona norte del Escudo de Guayana durante el proyecto ECOGUAY . Chalbaud (2000)

De esta manera, plantean la existencia una corteza superior de edad Arqueana (Provincia de Imataca) hacia el sur, la cual profundiza en dirección norte por debajo de los sedimentos de la Cuenca Oriental de Venezuela

Para enero y mayo de 1961 la Aereo Service Corporation junto con la Hunting Survey Corporation Ltd realizaron un levantamiento aeromagnético en la zona sur del Escudo de Guayana, con una altura de vuelo de 152 metros, una separación entre las líneas de vuelo de 500 metros y una orientación de N 22° W, luego generaron mapas de componente total de campo magnético a escala 1:50.000 con intervalos entre las curvas magnéticas de 20 Gammas.

CAPÍTULO 2: GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DE LA REGIÓN

La historia geológica del Escudo de Guyana revela cuatro de los cinco ciclos tecto-termales de significación mundial (Salop, 1972): 1) La orogénesis Guriense (3600-2700 m.a.), durante la cual se desarrolló un cinturón tectónico granulítico sin “rocas verdes” (Provincia Imataca). 2) La orogénesis pre-Transamazónica (2600-2100 m.a.), cuando se desarrolla un cinturón móvil “ofiolítico-turbidítico” 3) La orogénesis Transamazónica (2000-1700 m.a), que representa un evento de magmatismo ácido con escaso tectonismo asociado. 4) La orogénesis Orinoquense o Nickerian (1200-800 m.a.), que representa un evento de reajuste isostático. El quinto evento, el Brasiliano o Panafricano (600-800 m.a.), no se ha observado en el Escudo de Guayana, excepto en Brasil y Alto Paraguay.

A continuación se resume la evolución geo-histórica del Precámbrico en el Escudo de Guayana:

≥ 3600 m.a. Desarrollo de la corteza terrestre primitiva.

≥ 3400 m.a. **Provincia Imataca:** un cinturón móvil no ofiolítico.

OROGÉNESIS GURIENSE: Cherts, formaciones de hierro ± carbonatos, grauvacas y calco-alcalinas, formados en ambiente eugeoclinal.

3400-3100 m.a. **Apogeo de la orogénesis Guriense:** Metamorfismo regional y politermal (granulitas) con deformación por flujo plástico (migmatitas, pliegues de flujo).

3400-3100 m.a. Final de la Orogénesis Guriense: Levantamiento, fallamiento (Gurí y Kanuku) y erosión.

Gran discordancia regional y continental

2600-2400 m.a. **Provincia de Pastora:** un cinturón móvil “ofiolítico”.

OROGENESIS PRE - TRANSAMAZÓNICA: Intrusión y extrusión de rocas máficas y ultramáficas ± depositación de sedimentos pelágicos en una cuenca oceánica eugeoclinal.

2400-2200 m.a. Apogeo de la orogénesis pre-Transamazónica: Sedimentación, flysch, hundimiento y metamorfismo regional (esquistos verdes-anfibolitas). Plutonismo, emplazamiento de granitos sódicos; metamorfismo de contacto y migmatitas. Domos y antiforres graníticos contra sinforres de rocas verdes. Fallas arqueadas y fallamiento posterior transcurrente.

2200-2100 m.a. Final de la orogénesis pre-Transamazónica: Levantamiento del bloque Pastora, fallamiento y sedimentación de una facies próxima a molasas (parte superior del grupo Botanamo).

Discordancia intrusiva y tectónica

2000 m.a. **Provincia Cuchivero:** Un bloque magmático ácido poco tectónizado.

OROGÉNESIS TRANSAMAZÓNICA: Levantamiento del bloque continental Imataca - Pastora y hundimiento de cratón erosionados de edad pre-Imataca y composición granodiorítica.

2000-1900 m.a. Apogeo de la orogénesis transamazónica: Fallamiento del bloque continental Imataca - Pastora contra la corteza en proceso de subcorrimiento. Emplazamiento sintectónico de granitos altos en potasio a través de zonas de debilidad, precedidos por flujos ignimbríticos y lávicos de composición riolítica.

1900-1700 m.a. Final de la orogénesis Transamazónica: Levantamiento, fallamiento normal y emplazamiento boyante de granitos “anhídros” ricos en potasio, tipo Granito La Paragua.

Discordancia Regional

- 1700-1600 m.a. **Provincia Roraima:** Bloque atectónico de sedimentos deltaicos-continuales; sedimentación del Grupo Roraima en cuencas separadas, seguida de escaso levantamiento y fallamiento con intrusiones de composición basáltica.
- 1650-1500 m.a. Magnetismo máfico (ultramáfico) atectónico.
- 1500-1450 m.a. Evento termal atectónico El Manteco: Emplazamiento de granitos ricos en potasio desde pequeños plutones (Provincia Pastora) a grandes batolitos (Granito Rapakivi del Parguaza en la provincia Cuchivero).

Discordancias locales

- 1450-1300 m.a. Sedimentación deltáico-continental: se originan formaciones atectónicas de areniscas que no han sido bien estudiadas y definidas, siendo confundidas y correlacionadas con “Roraima”.

Discordancias locales intrusivas o de reactivación

- 1200-800 m.a. **OROGÉNESIS ORINOQUENSE O NICKERIAN:**
Recristalización, fallamiento e intrusiones menores de aplitas y pegmatitas graníticas.

Gran discordancia regional.

- 800 m.a. Reciente. Levantamiento y erosión.

Intrusiones de basaltos paleozoicos; las partes erosionadas, peniplanadas y deprimidas son cubiertas mayormente por sedimentos cuaternarios (Formación Mesa) y recientes, de carácter aluvial y coluvial.

2.2 GEOLOGÍA REGIONAL

En Sudamérica las rocas pertenecientes al sistema Precámbrico se encuentran primordialmente concentradas en los escudos de Brasil y de Guayana, separados entre sí por la Cuenca del Amazonas, expresión de una gran geofractura profunda que se proyecta a más de 700 Km. en la corteza.

El Escudo de Guayana tiene forma oval y su expresión septentrional se encuentra en Venezuela al sur del curso del río Orinoco, mientras que su parte meridional se encuentra en Colombia, Brasil, Guayana, Surinam y Guayana Francesa. En la parte de Venezuela comprende las rocas más antiguas, las cuales presentan diversas litologías

En base a caracteres petrológicos y tectónicos, el Escudo ha sido dividido en Venezuela en cuatro provincias conocidas como: Imataca, Pastora, Cuchivero y Roraima, las cuales se pueden observar en la figura N° 6.

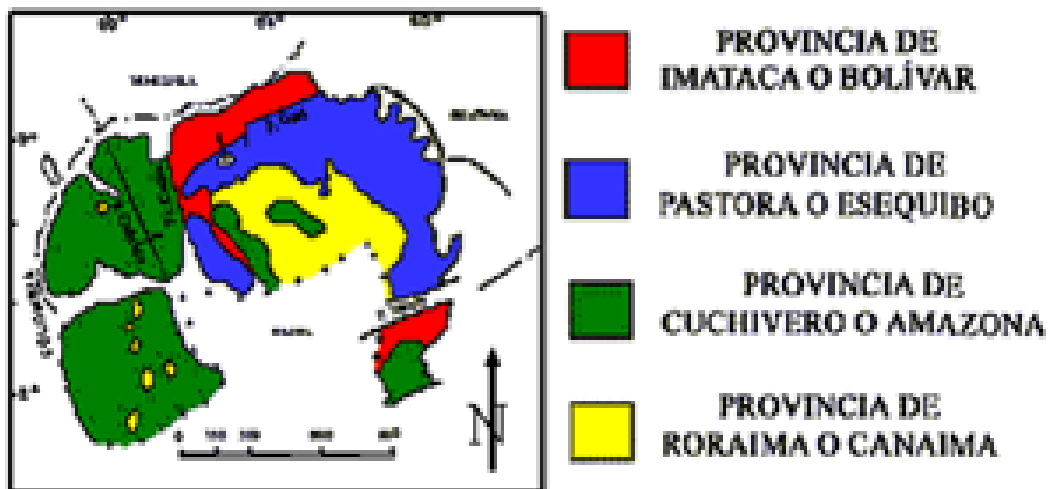


Figura N° 6: Ubicación de las Provincias geológicas del Escudo de Guayana. Tomado de González de Juana et al. (1980)

2.2.1 PROVINCIA DE IMATACA

La Provincia de Imataca, según la define Méndez (1968), está situada en el extremo norte de la Guayana venezolana y ocupa una faja de unos 500 Km. de longitud y de una anchura variable entre 55 y 130 Km. que puede ser observada en la figura N° 6, comprendida entre las proximidades del río Caura al oeste y el Territorio Delta Amacuro al este. Las unidades litológicas que predominan en esta provincia constituyen el denominado Complejo de Imataca.

Se considera que esta provincia es de edad Arqueano, y contiene, además, remanentes de cinturones de rocas verdes de edad Proterozoico temprano; está representada en la actualidad por un conjunto de metasedimentos y gneises graníticos plegados en formas complejas, e intrusiones de granitos posteriores. Según Montgomery et al.(1977), la edad del protolito es 3500 a 3600 m.a..

Las rocas de la Provincia de Imataca son consideradas como un conjunto original de rocas silíceas de composición calcoalcalina, con algunos episodios máficos y asociaciones menores de sedimentos y formaciones de hierro. Dougan (1977) en la región cercana a Cerro Bolívar, indica que la composición de los elementos mayoritarios y trazas de las granulitas, gneises graníticos y anfibolitas, rocas representativas de la secuencia original, así como las relaciones de composición en los piroxenos y óxido de titanio y hierro, indican un protolito ígneo. Las relaciones de concentraciones de los elementos indican un carácter calco-alcalino, particularmente de series de tipo continental, en especial cuando se refiere a las rocas silíceas, otras rocas como granulitas máficas y anfibolitas presentan asociaciones de tipo tholeítico

Las rocas de la Provincia de Imataca han sufrido metamorfismo de grado alto, alcanzando la facies de la granulita, lo cual ha logrado afectar significativamente la textura, granulometría, mineralogía, dureza y color de las rocas de la zona. Esto, en la mayoría de los casos, se evidencia a través de la exótica belleza

observable en las bandas de diferentes colores que presentan los minerales constituyentes de las masas graníticas, gneises y migmatitas

COMPLEJO DE IMATAKA

Según Méndez (1968), el Complejo de Imataka ocupa una faja de rumbo noreste al norte del Escudo; ocupa una faja angosta entre el río Caura al oeste desde ahí se extiende por unos 400 Km. de longitud, con una anchura de unos 200 Km., hasta el Territorio Delta Amacuro al este; donde aparece bajo los sedimentos del Delta y hasta la fecha representan las rocas más antiguas conocidas en la parte norte del Escudo. El área mencionada de afloramiento forma un cinturón en sentido NE-SO de unos 510 Km. de longitud, cuya ubicación se puede observar en la figura N° 6.

Las litologías características del Complejo de Imataka son gneis félsicos y máficos intercalados con capas de cuarcitas ferruginosas, granulitas y cuerpos delgados de rocas graníticas. En el área entre Upata y El Palmar, existen desarrollos delgados de mármol, en todo el complejo predominan las rocas leucocráticas y constituyen aproximadamente el 80% de la unidad, los gneis máficos constituyen el 10% de la secuencia y el resto lo componen los gneis graníticos y escasas anfibolitas.

Dougan (1972), en la región de Los Indios- El Pilar, divide el Complejo de Imataka en dos partes de acuerdo a la presencia o no de ortopiroxeno y delimita una isograda metamórfica entre ambas como puede ser observado en la figura N° 7. Los gneis máficos y félsicos con ortopiroxeno los clasifica como granulitas máficas y félsicas respectivamente, y las rocas que no contienen ortopiroxeno, como gneis graníticos y anfibolitas.

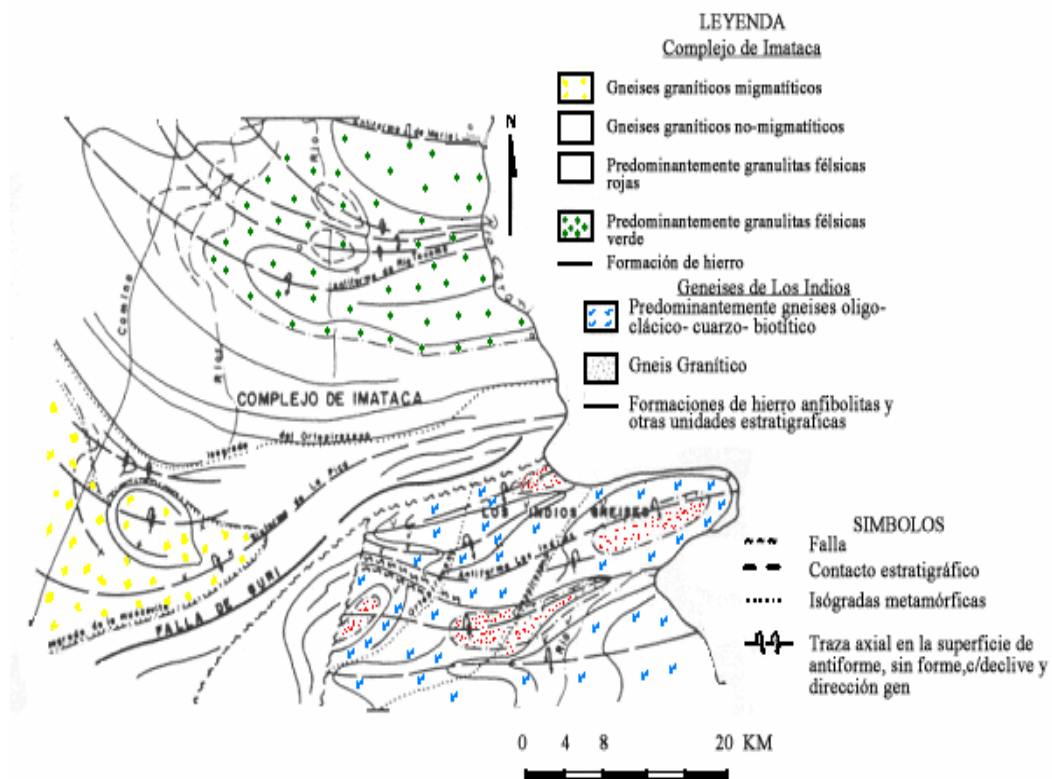


Figura N° 7: Mapa geológico esquemático del Complejo de Imataca al oeste del río Caroní en la región de Los Indios–El Pilar, represa del Guri. Tomado de Dougan (1972).

Otras litologías presentes incluyen formaciones de hierro laminadas o bandeadas, con cuarzo-magnetita y cuarzo-magnetita-ortopiroxeno; cuarcitas calco-silicatadas laminadas y granulitas máficas con ortopiroxenos, clinopiroxeno y hornablenda o biotita. Las dos secuencias principales formadas por las granulitas félsicas y máficas por una parte, y los gneis graníticos y anfíbolitas por otra, están separadas por la falla de Guri-Ciudad Piar de rumbo SO-NE. Dougan (1972) considera que aunque la composición química de las rocas y las asociaciones litológicas sugieren que en la región de Los Indios-El Pilar el complejo es principalmente de origen ígneo, de tipo calco-alcalino silíceo, en otras regiones las rocas pueden tener diferentes orígenes.

Montgomery et al. (1977) proponen que la edad del protolito de Imataca ha sido estimada mediante determinaciones radiométricas por los métodos Rb/Sr y U/Pb roca total, como correspondiente a 3500-3600 m.a.. El Complejo Imataca ha

sufrido varios períodos orogénicos, definidos mediante determinaciones radiométricas en diversas muestras a diferentes niveles de la secuencia. Los principales eventos están marcados en las rocas de Imataca en alrededor de 2700 m.a., como ha sido determinado por Hurley et al. (1973, 1977) en gneis y migmatitas de tipo La Ceiba y alrededor de 2100 m.a. en un conjunto de pequeños plutones graníticos expuestos principalmente a lo largo del borde norte de la región de afloramiento de Imataca.

2.2.2 PROVINCIA DE PASTORA

Menéndez (1968) definió esta provincia al sur de la provincia de Imataca, separada de ésta en su parte oriental por la Falla de Guri y en la parte occidental por la falla de Santa Bárbara como se muestra en la figura N° 6; al sur está limitada por la Provincia de Roraima. Indica además que la Provincia de Pastora se caracteriza litológicamente por una secuencia de tobas volcánicas ácidas y básicas, y rocas sedimentarias asociadas que han sufrido un metamorfismo de grado bajo, el cual alcanza localmente la facies de la anfibolita. La estratigrafía en esta provincia aún no se ha determinado con precisión y persisten desacuerdos fundamentales en su interpretación; también está constituida por cinturones de rocas verdes de edad Proterozoico temprano.

Se considera que esta provincia está formada por una secuencia supracortical de rocas verdes ubicadas en las zonas sinclinoideas separadas por extensas áreas graníticas (Complejo de Supamo). La secuencia de rocas verdes se identifica con los cinturones de rocas verdes, en los cuales, según Menéndez (1973), se reconocen dos ciclos estratigráficos separados por una discordancia angular, a saber: Cinturón de Pastora, el más antiguo, constituido principalmente por anfibolitas y lavas de composición basáltico-andesítica y esquistos anfibólicos y, el Cinturón de Botanamo, el más joven, representado litológicamente por metatobas básicas a intermedias, brechas, metalimolitas, metagrauvas, filitas, metareniscas y conglomerados polimícticos. Mendoza (1973,1977) analiza los

posibles basamentos que se pueden presentar en esta provincia y considera que fue un basamento oceánico de composición máfica, con extremos continentales actualmente aflorantes: Complejos de Imataca al norte y Kanukú en Guyana, y granitos sódicos de los Complejos de Supamo y Bártica en Venezuela y Guayana, respectivamente.

La Provincia de Pastora comprende rocas cuya edad se estima entre los 2700 m.a. y 2000 m.a.. Martin B. (1974) considera la parte inferior de esta provincia, en la región Caroní-Aro-Paragua, como perteneciente a su denominado Cinturón Anfibolítico, es decir la sección correspondiente a Carichapo, Pastora y Botanamo.

Complejo Supamo: Se dice que el Complejo Supamo es del Precámbrico Arqueano debido a que su edad está alrededor de 2817 ± 57 m.a – 2595 ± 50 m.a. El complejo consiste en rocas ígneas ácidas de carácter sódico, paragneis, cuarzo feldespático y zonas de migmatitas, entre las rocas ígneas se han descrito granodioritas, cuarzo dioritas, tonalitas y trondhjemitas, esencialmente. Estas rocas constituyen cuerpos dómicos. Las zonas de migmatita consisten en paragneis biotíticos, gneis hornabléndicos y anfibolitas que alternan con sills de trondhjemita y granodiorita; por disminución del material granítico, las zonas de migmatita pasan gradualmente a las unidades gnéicas, entre las cuales han sido diferenciados localmente los gneis de Las Cosoibas, Oronato y Santa Cruz. Las trondhjemitas constituyen las rocas ígneas más abundantes en la parte norte del complejo, en la región del Alto Supamo, y están estrechamente relacionadas con las tonalitas, de las cuales aparentemente forman la facies de borde

Super Grupo Pastora: Constituido por la Formación Yuruari y el Grupo Carichapo, el cual se subdivide en orden estratigráfico en las formaciones El Callao en su base y Cicapra en su parte superior

Grupo Carichapo: Litológicamente está constituido por anfibolitas de color gris verdoso oscuro a negro, grano fino, densas a finamente foliadas. Estas rocas representan lavas básicas, tobas y brechas tobáceas afectadas por un metamorfismo regional de la facies de la anfibolita almandínica

2.2.3 PROVINCIA DE CUCHIVERO:

Esta provincia geológica tiene su mayor desarrollo hacia la parte occidental del Estado Bolívar, al este del río Caura, como se puede observar en la figura N° 6. La litología de esta provincia está constituida fundamentalmente de rocas ígneas ácidas, extrusivas e intrusivas, presenta rocas volcánicas ácidas e intermedias, lavas, tobas e ignimbritas (riolíticas, riodacíticas y dacíticas) con numerosos diques de ígneas básicas, las cuales muestran un metamorfismo de bajo grado. Estas rocas volcánicas han sido intrusionadas por rocas graníticas del conjunto, entre las que se distinguen desde microgranitos hasta granitos de grano grueso a muy grueso.

Rios (1974) subdivide esta provincia en tres unidades litológicas que, de más antigua a más joven, se denominan: Formación Caicara (volcánicas), Granito de Guaniamito y Granito de Santa Rosalía. Por otro lado, Mendoza (1973) usó el nombre de grupo en vez de asociación e introdujo el nombre de Supergrupo Cedeño para incluir dos conjuntos de rocas ígneas ácidas no comagmáticas: el Grupo Cuchivero (más antiguo) y el Grupo Suapure (más joven), constituido este último por los granitos de Pijiguaos y El Parguaza

Grupo Cuchivero: McCandless (1965), designa con el nombre de serie ígnea de Cuchivero a un conjunto de rocas predominantemente ígneas, intrusivas y extrusivas probablemente co-magmáticas, de la región noroccidental del Estado Bolívar. Dentro de las rocas que componen este grupo se encuentran diques de rocas básicas con dirección principal noroeste.

Formación Caicara: Esta formación está constituida por lavas tobáceas y brechas ácidas de color gris oscuro y granito fino, micro y macroporfídicas, moderada a

extremadamente foliadas, plegadas y falladas. A pesar de tal deformación las estructuras de flujo y la estratificación ígnea originales se reconocen fácilmente.

Granito de Santa Rosalía: De acuerdo a Rios (1972), el Granito de Santa Rosalía es masivo a semi-foliado, plutónico de grano medio a muy grueso, generalmente equigranular, constituido esencialmente por cuarzo (29% por volumen), feldespato potásico-pertita (35%), plagioclasa: oligoclasa (26%), biotita marrón pleocroica (2%); escasa, hornblenda (4%), accesorios y secundarios (titanita, apatito, epidoto, clorita, opacos y otros)

Granito de San Pedro: Son rocas graníticas, leucocráticas, macizas a moderadamente foliadas, de aspecto subvolcánico, granos finos, equigranulares. Petrográficamente el Granito de San Pedro es hipidiomórfico, con textura gráfica muy frecuente. Esencialmente está constituido por cuarzo cataclástico (25%), feldespastos potásico y pertita (50%), plagioclasa Na (20%) y accesorios secundarios tales como biotita (0-2%), apatito (2%), opacos (1-2%), clorita (0-1%); y epidoto (1%).

Metabasitas: Son rocas macizas de grano fino a medio y textura variable de ofítica a sub-ofítica a intersertal. Mineralógicamente consiste en anfíbol verde oscuro a claro (40-60%), plagioclasas (labradorita-andesina) más o menos alteradas, epidoto, clorita, escaso cuarzo (0-5%), biotita rojiza a marrón (0-10%) y opacos; no se observan piroxenos.

Granito de Guaniamito: Según Rios (1972), este granito gnéisico, porfídico, de grano grueso, está constituido por cuarzo (10-30%), biotita (1-8%), feldespato alcalino (65%) y hornblenda (0-4%), ± esfena circón ± apatita y minerales opacos

Grupo Suapure: El grupo Suapure está constituido por los granitos de Pijiguao y El Parguaza; este último ocupa 90% del área de afloramiento del grupo y representa el “núcleo” de este “batolito zonado”; el granito de Pijiguao ocupa la cubierta exterior o borde del mismo.

Granito Pijiguao: Mineralógicamente consiste en un feldespato potásico ± pertita (30-35%), plagioclasa albitica (25-30%), cuarzo (25-30%) y biotita marrón (1-

3%) con apatito (0-4%) y opacos (1-3%) como accesorios más frecuentes, y epidoto y clorita como secundarios.

Granito Parguacenses (1500 m.a.): McCandless (1965) propuso este nombre para designar un granito de grano muy grueso, masivo, con textura rapakivi y rico en feldespatos potásicos, biotita y hornablenda.

El Granito del Parguaza constituye un batolito de composición homogénea en la Provincia Estructural de Cuchivero ubicada en la parte Nor-Oriental del Escudo de Guayana, y representa una de las más grandes intrusiones graníticas anorogénicas del mundo y parece representar un gran evento termal de extensión continental denominado Parguacensis. Este evento probablemente sea de extensión transcontinental debido a las grandes similitudes geológicas con los granitos rapakivis de Finlandia.

Petrográficamente el granito Rapakivi es una roca holocristalina hipidiomórfica granular de grano muy grueso, inequigranular a porfirítica con textura rapakivi (y antirapakivi) del tipo "wiborgita. La roca es masiva sin indicios de metamorfismo.

2.2.4 PROVINCIA RORAIMA

Grupo Roraima e Intrusivas Básicas Asociadas.: El Grupo Roraima incluye la mayoría de los sedimentos del Proterozoico Medio, y yace con discordancia angular sobre las rocas meta-volcánicas de los Grupos Burro-Burro, Cuchivero, Pacaraima y el Súper Grupo Uatuma. Esta formación alcanza espesores superiores a los 2.500 metros, aflora ampliamente en el Escudo de Guayana; la mayor zona de afloramiento se encuentra en las Montañas de Pacaraima, Gran Sabana y Brasil. Sus afloramientos se caracterizan por formar imponentes mesetas o "tepuys" que alcanzan alturas superiores a los 2.500 metros.

El Grupo Roraima incluye orto-cuarzitas, conglomerados, lutitas y tobas de cenizas intercalados esencialmente en la parte media de la secuencia.

Las variaciones laterales y verticales observadas en las diferentes asociaciones sedimentarias del Grupo Roraima reflejan un ambiente deltaico-fluvial complejo; de allí que es difícil extender estos nombres formacionales descritos en Venezuela, a todos los afloramientos del Grupo Roraima en Guyana, Suriname y demás regiones de Venezuela.

El Grupo Roraima desde el punto de vista económico, constituye una provincia distributiva para oro y diamantes. La meteorización de las intrusiones básicas en el Grupo Roraima ha originado la formación de extensos mantos de lateritas bauxíticas, especialmente en Venezuela y parte de Guyana. También es frecuente, especialmente en Venezuela, la presencia de vetas de cuarzo, pegmatitas de cuarzo y feldespatos.

2.3 GEOLOGÍA LOCAL

En la zona oeste o Caroní-Aro-Paragua del Escudo de Guayana las principales formaciones de rocas verdes vienen representadas por Sta. Bárbara, Caroní y el Grupo Chiguao (figura N° 9), las cuales presentan una correlación aproximada con el Super Grupo Pastora y el Grupo Botanamo.

Martín C. (1985) describe la columna estratigráfica de la región Caroní-Aro-Paragua (figura N° 8), constituida por las siguientes unidades, en orden cronológico ascendente de más antigua a más joven: Complejo de Imataca (3400 m.a.) (facies de la granulita), la cual está constituida por granulitas ácidas y básicas de composiciones diversas; se desconoce su contacto inferior e infrayace, con contacto discordante o de falla al Gneis de El Cedral (facies de la anfibolita) (2700 m.a.). A éste siguen, en contacto estructural y metamórfico generalmente concordante, la secuencia anfibolítica asociada con el Grupo Santa Bárbara, la cual se encuentra constituida por rocas básicas y ultra-básicas, dividida en las

formaciones Carapo y Manamundo; este grupo muestra una equivalencia con el Grupo Carichapo, el cual está constituido por las Formaciones El Callao y Cicapra. Estos infrayacen, con contacto estructural y metamórfico discordante, a las rocas metavolcánicas ácidas a intermedias y piroclásticas asociadas (facies del esquisto verde) del Grupo Caroní, el cual incluye las formaciones Caruto, Aza y Cachimbo (Transamazónico, aprox. 2.200-1800 m.a.). Estas formaciones muestran una amplia relación con la Formación Yuruarí. Seguido a esto se encuentra un contacto parcialmente discordante, con la secuencia sedimentario-volcánica metamorfizada (facies de los esquisto verdes) del Grupo Chiguao (Transamazónico), que a su vez infrayace discordantemente a los metasedimentos pelíticos oxidados (facies baja del esquisto verde) con flujo ácido y básico asociados del Grupo Maracapra (cierre del Transamazónico, 1800 m.a.). El grupo Chigua incluye las Formaciones Maracapra y Chara, y presenta mucha similitud con el Grupo Botanamo.

El Grupo Roraima (1750 – 1600 m.a.) de sedimentos molásicos reposa con gran discordancia angular sobre las unidades descritas, tanto plataformales como de surco; dentro del mismo se arman sills de diabasas que lo intrusionaron en diferentes periodos y hacia su tope los flujos tobáceos vítricos (1600 m.a.) que marcan el comienzo de la cratonización del Escudo .

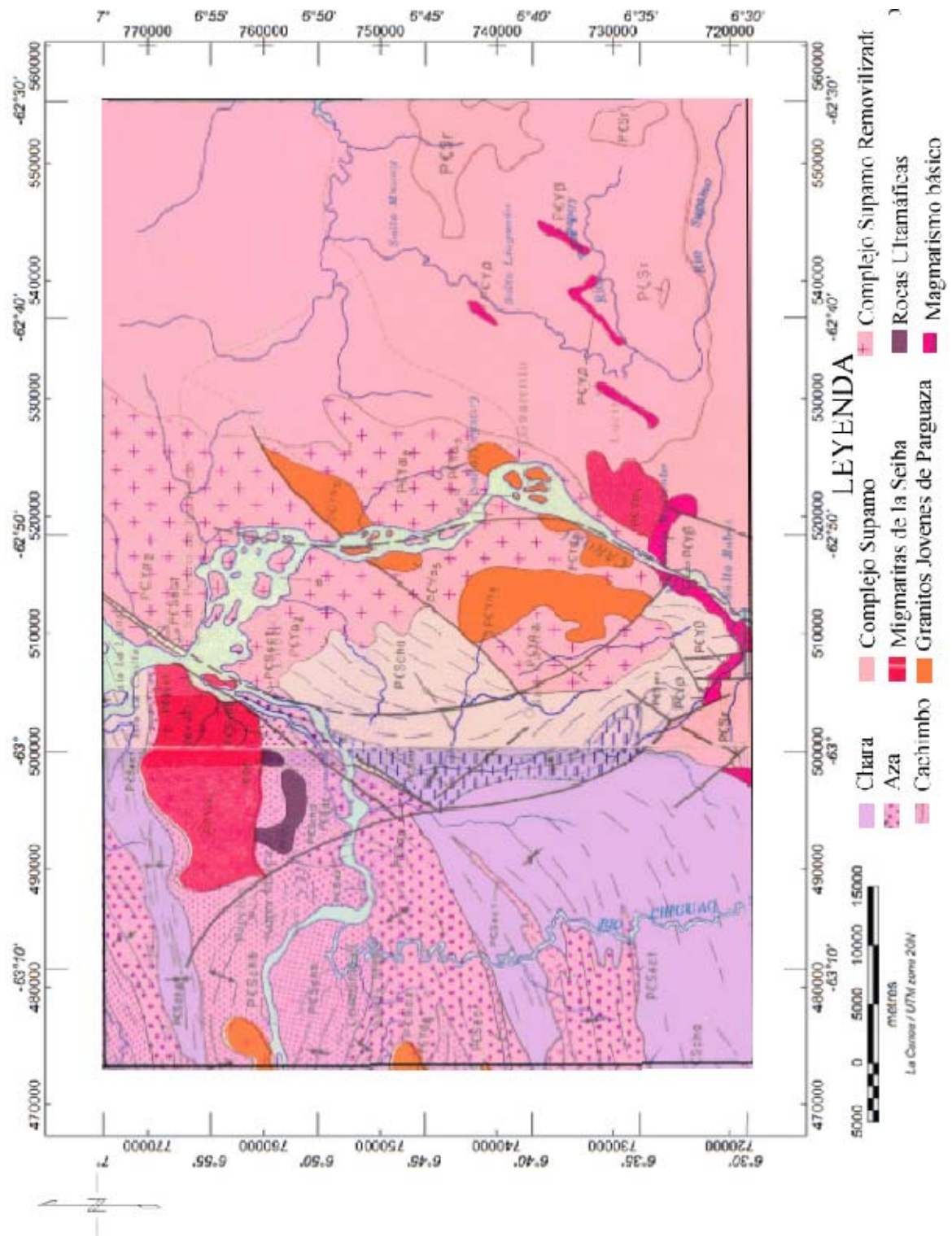


Figura N°9 : Mapa geológico estructural de la zona de estudio. Ministerio de Enegá y Minas (1976)

2.4 RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO

Durante este reconocimiento geológico se observó el cruce de las provincias de Imataca y Pastora; de la Provincia Pastora se estudiará con más detalle el Grupo Supamo, en donde hay presencia de rocas que han sido meteorizadas, granitizadas y fuertemente plegadas. El reconocimiento geológico se realizó en un periodo de 3 días, el primer día (23/10/2003), se estudió la Vía Guasipati – El Callao – Tumeremo, para el segundo día (24/10/2003), se realizó una visita a Ciudad Piar (Ferrominera) y a la represa del Guri, y para culminar el reconocimiento el tercer día (25/10/2003) se recorrió la vía Upata - El Manteco –El Callao; este recorrido puede ser apreciado en la figura 10. Para iniciar el reconocimiento se partió del Hotel Andrea que se encuentra en Upata ubicado en las siguientes coordenadas 8°00' 27.4'' N y 62°23'11.7'' W.

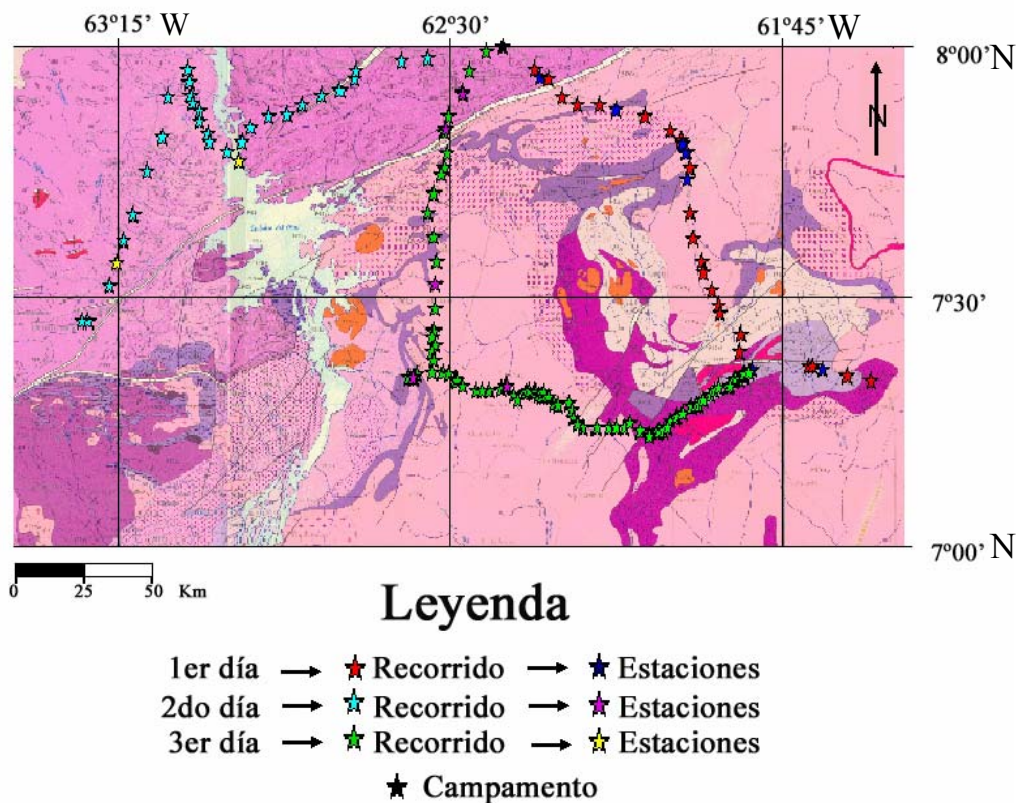


Figura N° 10: Recorrido llevado a cabo durante la salida de campo

1er Día 23 de octubre del 2003

Estación 1

Está ubicada en $7^{\circ} 56' 21.5''N$ y $62^{\circ}17'54.3''W$, aproximadamente en la carretera Upata a Manteco. Se observaron unas anfibolitas o granulitas máficas del Complejo de Imataca, con un grado alto de meteorización y presencia de óxidos. Por otro lado, se encontraron carbonatos en pequeñas diaclasas debido a procesos hidrotermales posteriores, estas diaclasas presentan un rumbo E-W y un buzamiento de $51^{\circ} N$, lo cual puede ser observado en la figura N° 8. En esta zona se encuentran posiblemente siete juegos de diaclasas



Figura N° 11: Foto del afloramiento de la estación N°1. Rumbo $N 70^{\circ} W$. (Por Maxlyn Pérez, 23 de octubre del 2003)

Estación 2

Esta estación se realizó en la Cantera Pedeca, ubicada a $7^{\circ} 52.47' N$ y $62^{\circ} 7.671' W$. Aquí se encontró un afloramiento de regolito, presencia de metalava o metatoba andesítica (probablemente); las cuales son rocas volcánicas, también se observaron metagrauvascas con lentes o budines de metachert. Estas litologías pertenecen al Grupo Carichapo sin diferenciar, el cual se asocia a un posible arco volcánico; esta zona se encuentra probablemente en la parte de atrás del arco, por lo que se tiene aporte volcánico.

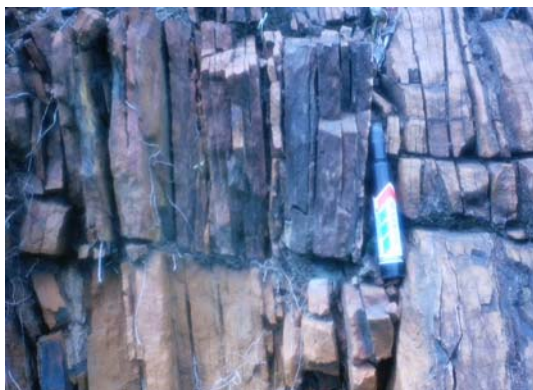


Figura N° 12: Afloramiento de la estación N° 2 .Rumbo: E – W y Buzamiento 84° S. (Por Natalia Adrián, 23 del octubre 2003)

Estación 3

Esta estación se ubicó en las coordenadas $7^{\circ} 48,391' N$ y $61^{\circ}58.641' W$, el afloramiento presentó un alto grado de meteorización, todo el material esta muy pulverizado. Se observaron una tronjemitas con alto grado de meteorización, de color blanco y otras de color naranja, cuyo color puede ser debido a la presencia de óxidos; las rocas pertenecientes a este afloramiento son del Complejo de Supamo.



Figura N° 13: Foto del afloramiento de la estación N° 3. Rumbo N 40°E (Por Maxlyn Pérez, 23 de Octubre del 2003)

Estación 4

Ubicadas en las coordenadas $7^{\circ} 47' 13.5'' N$ y $61^{\circ} 58' 15.0'' W$. Aquí encontramos domos de tronjemitas de color crema; la roca en el afloramiento se

encontró fresca, algo caolínizada y con una apariencia bandeada, contiene muchas plagioclasas y cuarzo en un 10%.



Figura N° 14: Afloramiento de la estación N° 4. Rumbo N60° E (Por Maxlyn Pérez, 23 de octubre del 2003)

Estación 5

Se ubicó en las coordenadas 7° 44.156' N y 61° 58.201' W, (figura N° 15), el afloramiento presenta un rumbo N60°E, también se distingue foliación con un rumbo de N20° E y un buzamiento de 30° N, con gneises tonalíticos del Complejo Supamo, ricos en plagioclasas y cuarzo. Este último tiene un aspecto lechoso debido a múltiples inclusiones fluidas, por tal razón es de brillo grasoso. Se observó también un pliegue recurrente con rumbo N20° E y buzamiento 22° N (figura N°16).



Figura N°15: Afloramiento de la estación N° 5. Rumbo N60° E, tomada de sur a norte (Por Maxlyn Pérez, 23 de octubre del 2003).

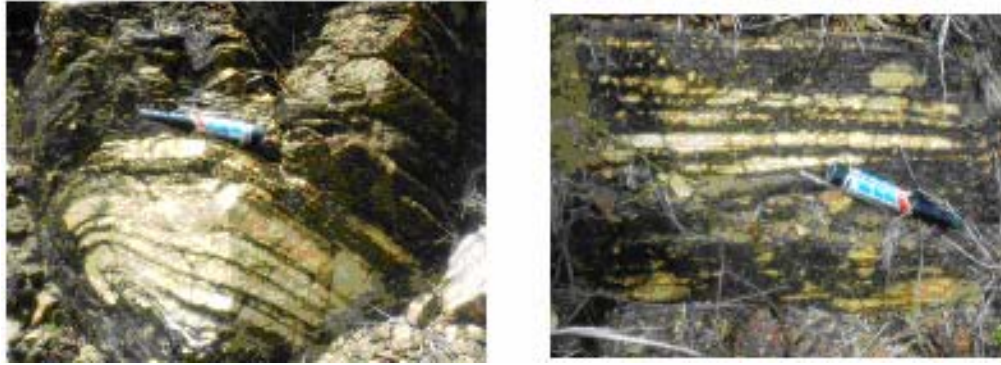


Figura N° 16: Pliegues recurrentes presentes en el afloramiento de la estación N° 5. Rumbo N20°E.
(Por Natalia Adrián, 23 de octubre del 2003)

Estacion 6

Esta estación se ubicó en las coordenadas $7^{\circ} 21,264' N$ y $61^{\circ}49,482' W$. Allí se observaron intercalaciones de tobas con metapelitas (figura N° 17).



Figura N° 17: Intercalaciones de tobas con metapelíticos presentes en el afloramiento de la estación N°6 (Por Natalia Adrián, 23 de octubre del 2003)

Se observó un afloramiento de la Formación Yuruari con alto grado de meteorización (figura N° 18), la parte oscura del afloramiento son intercalaciones de metatobas andesíticas, se distinguen también metalavas andesíticas con mica, rocas metasedimentarias, metavolcanicas, metaareniscas y metacherts. Parte de este afloramiento es arenoso.



Figura N° 18: Afloramiento de la estación N°6, Rumbo S65° E (Por Maxlyn Pérez, 23 de octubre del 2003)

Estación 7

Localizada en las coordenadas $7^{\circ} 21,330'N$ y $61^{\circ} 39,937'W$ en la zona del Hato La Nomenda, con rocas características del Complejo de Supamo, que se presentan como pequeñas crestas muy meteorizadas



Figura N° 19: Afloramiento de la estación N° 7 .Rumbo N20° E. (Por Natalia Adrián, 23 de octubre del 2003)

2do Día: 24 de octubre del 2003

Estación 8

La primera estación del segundo día del reconocimiento geológico estuvo ubicada en las coordenadas $7^{\circ} 34' 7'' N$ y $63^{\circ} 15' 16'' W$. Se observaron domos, bolones o cantos de meteorización esferoidales, los cuales se conservan muy bien; cada uno de éstos representaban una fuente termal submarina. Son bolones y

cantos de charnoquita o granulitas máfica, litología que caracteriza al Complejo de Imataca



Figura N° 20: Afloramiento de la estación N° 8. (Por Maxlyn Pérez, 24 octubre del 2003).

Estación 9

Este afloramiento se ubicó en $7^{\circ}46'13''$ N y $62^{\circ}58'43''$ W, aquí se pudo observar la gruesa milonita de color blanquecino de la falla del Gurí, que no es más que un contacto entre las provincias de Pastora e Imataca; este contacto se encuentra localizado al norte de la represa del Gurí y presenta una orientación en $N85^{\circ}E$



Figura N° 21: Milonita de la falla Gurí, separación entre las Provincias de Imataca y Pastora, Rumbo $N80^{\circ} E$. (Por Maxlyn Pérez, 24 octubre del 2003)

3er Día: 25 de octubre del 2003

Estación 10

La primera estación del tercer día se ubicó en las coordenadas $7^{\circ} 54' 28''$ N y $62^{\circ} 28' 35''$ W, se observaron afloramientos de bolones de charnoquita o granulita máficas.



Figura N° 22: Afloramiento de la estación N° 10. (Por Natalia Adrian en octubre del 2003)

Estación 11

Ubicada en las coordenadas $7^{\circ} 20' 17''$ N y $62^{\circ} 35' 22''$ W. Se identificó la Formación Carichapo la cual contiene esquistos cloríticos verdes pelíticos de origen volcánico, pertenecientes al cinturón de rocas verdes de Pastora

Estación 12

Se ubicó en las coordenadas $7^{\circ} 50' 07''$ N y $62^{\circ} 30' 55''$ W; ésta zona pertenece al Complejo Supamo en donde afloran rocas ígneas metamorfizadas, entre ellas metatrongemita

Estación 13

Se ubicó en las coordenadas $7^{\circ} 19' 23''$ N y $62^{\circ} 22' 40''$ W, en donde se observaron gneiss tonalítico, moco de hierro y pisolitas de goethita.

CAPITULO 3: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 MÉTODO MAGNÉTICO

3.1.1 CAMPO MAGNÉTICO DE LA TIERRA Y SUS COMPONENTES

El rápido movimiento giratorio y el núcleo de hierro y níquel de nuestro planeta generan un campo magnético extenso. El estudio de la intensidad del campo magnético de la Tierra es valioso, desde el punto de vista de la ciencia pura, de la ingeniería y también para la prospección geológica de minerales, y las mediciones de su intensidad se hacen con instrumentos llamados magnetómetros.

Según Parasnis (1970), el campo magnético queda completamente especificado por las componentes horizontal (H) y vertical (Z) de la densidad de flujo, y por la declinación (D) al este o al oeste del Norte verdadero. Z se considera positiva si está dirigida hacia abajo, como suele ocurrir en el hemisferio Norte, y negativa si apunta hacia arriba, como en el hemisferio Sur, la inclinación (I) tiene importancia en la interpretación de anomalías magnéticas, debido a que es el ángulo formado por el campo magnético total y la componente horizontal; estas componentes pueden ser observadas en la figura N° 23

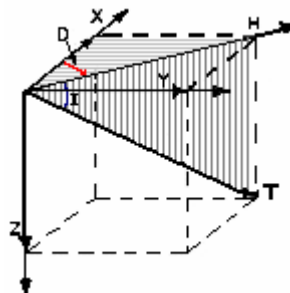


Figura. N° 23: Componentes del campo magnético bajo un sistema cartesiano de coordenadas XYZ.

Debido a esto se tiene que los elementos magnéticos están relacionados:

$$H = T \cos I = (X^2 + Y^2)^{1/2} \quad (3.1)$$

$$T = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2} \quad (3.2)$$

$$X = H \cdot \cos D \quad (3.3)$$

$$Y = H \cdot \sin D \quad (3.4)$$

$$Z = H \cdot \tan I \quad (3.5)$$

$$\text{Tg } I = (Z/H) \quad (3.6)$$

$$\text{Tg } D = (Y/X) \quad (3.7)$$

El campo magnético total de la Tierra tiene una densidad de flujo (en superficie) de alrededor de 0.6 gauss. El campo puede ser representado formalmente, con mucha aproximación, por el campo de un dipolo situado en el centro de la Tierra, con su momento magnético apuntando hacia el Sur geográfico, de tal modo en el hemisferio Norte cerca del polo geográfico norte está situado un polo Sur magnético y en el hemisferio Sur cerca del hemisferio Sur geográfico se ubica un polo Norte magnético como se puede observar en la figura N° 24.

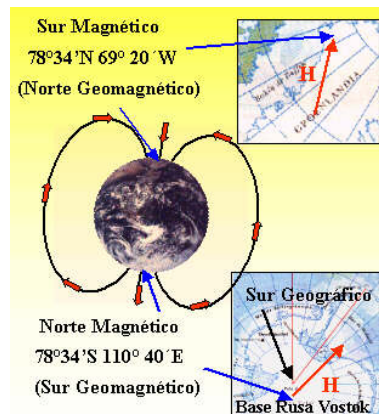


Figura N° 24: Ubicación de los polos magnéticos en relación con los polos geográficos

Las posiciones de los polos magnéticos no son constantes y muestran notables cambios de año en año. Las variaciones en el campo magnético de la Tierra incluyen una variación secular, el cambio en la dirección del campo provocado por el desplazamiento de los polos; también existe una variación anual más pequeña, al igual que se da una variación diurna, o diaria, que sólo es detectable con instrumentos especiales. Recientes estudios de magnetismo remanente (residual) en rocas y de las anomalías magnéticas de las cuencas de los océanos

han demostrado que el campo magnético de la Tierra ha invertido su polaridad por lo menos 170 veces en los pasados 100 millones de años.

El campo terrestre no es constante en ningún punto de la superficie, sino que sufre variaciones de distintos períodos. Desde el punto de vista de la Geofísica aplicada, las más importantes de estas variaciones son la variación diurna y las tormentas magnéticas. Sus efectos perturbadores pueden ser eliminados satisfactoriamente de las observaciones magnéticas de campo.

3.1.2 OBJETIVO DEL MÉTODO MAGNÉTICO

El método magnético es el método geofísico de prospección más antiguo aplicable en la prospección petrolífera, en las exploraciones mineras y de artefactos arqueológicos. En las exploraciones mineras se aplica el método magnético en la búsqueda directa de minerales magnéticos y en la búsqueda de minerales no magnéticos cuando las estructuras que determinan su acumulación pueden ser cartografiadas por estar asociadas a materiales magnéticos, (Dobrin, 1988).

El método magnético estudia los cambios laterales del campo magnético terrestre producidos por variaciones en la intensidad de imanación de las rocas, la cual se debe en parte a la inducción del campo terrestre y en parte a su imanación permanente o remanente. La intensidad inducida depende, sobre todo, de la susceptibilidad magnética y del campo imanador, mientras que la intensidad permanente es función de la historia geológica de la roca.

3.1.3 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

La susceptibilidad magnética depende principalmente del porcentaje de magnetita presente en la roca. En rocas ígneas o metamórficas su proporción es mayor que en las rocas sedimentarias. Las rocas básicas tienen generalmente mayor

susceptibilidad magnética que las ácidas, ya que el contenido de materiales magnéticos es mayor.

El magnetismo de la mayoría de las rocas se debe a su contenido en magnetita, Slitcher (1929) propuso calcular la susceptibilidad magnética de una roca multiplicando el porcentaje de volumen de la magnetita en la roca por la susceptibilidad magnética de magnetita ($k = 0,3$ en unidades cgs). Staern (1929) publicó el contenido en magnetita e ilmenita en porcentaje de varios tipos de rocas y sus susceptibilidades magnéticas aportadas por magnetita e ilmenita y calculadas según el método aportado por Slitcher (1929). Los promedios de porcentaje de volumen en magnetita e ilmenita y de las susceptibilidades magnéticas de varios tipos de rocas se muestran en la tabla N° 1

Tabla N° 1: Promedios de porcentaje de volumen de magnetita e ilmenita y susceptibilidades magnéticas en varios tipos de rocas. Tomado de Dobrin (1988).

Tipo de roca	Promedio de % de volumen en magnetita	kappa x 10⁶	Promedio de % de volumen en ilmenita	kappa x 10⁶
Riolitas	1,00	3000	0,45	610
Granitos	0,90	2700	0,7	1000
Piroxenitas	3,51	10500	0,40	5400
Gabros	2,40	7200	1,76	2400
Diorita dacítica de cuarzo	3,48	10400	1,94	2600
Andesita	4,50	13500	1,16	1600
Dioritas	3,45	10400	2,44	4200
Peridotitas	4,60	13800	1,31	1800

Basaltos	4,76	14300	1,91	2600
Diabasas	4,35	13100	2,70	3600

En esta tabla se aprecia claramente el aporte de la magnetita a la susceptibilidad magnética de una roca.

Comportamiento de distintos materiales situados en un campo externo

Parasnis (1970) distingue los materiales siguientes según su comportamiento al colocarlo en presencia de un campo externo:

1. Los materiales diamagnéticos se caracterizan por susceptibilidades magnéticas negativas, lo que significa, que la imantación inducida en ellos está orientada en sentido opuesto con respecto al campo externo aplicado. Las susceptibilidades magnéticas de la mayoría de los materiales diamagnéticos no dependen de la temperatura. Sólo las susceptibilidades magnéticas de antimonio y bismuto varían a $T = -180^{\circ}\text{C}$. Materiales diamagnéticos son entre otros las sales, anhidrita, cuarzo, feldespato y grafito. El diamagnetismo se basa en el movimiento de un electrón alrededor de su núcleo generando una corriente de poca intensidad.

2. Los materiales paramagnéticos son ligeramente magnéticos, caracterizados por susceptibilidades magnéticas pequeñas positivas. En los materiales paramagnéticos la susceptibilidad magnética es inversamente proporcional a la temperatura absoluta según la Ley de Curie. Los átomos o las moléculas de los materiales paramagnéticos están caracterizados por un momento magnético en ausencia de un campo externo y por una interacción magnética débil pasando entre sus átomos. Normalmente sus átomos están distribuidos al azar, pero aplicando un campo externo tienden a alinearse paralelamente a la dirección del campo. Esta alineación es una tendencia, que se opone a su agitación térmica. Minerales paramagnéticos son olivino, piroxeno, anfíbol, granate y biotita

3. Los materiales ferromagnéticos tienen susceptibilidades positivas y relativamente altas. Los átomos de los materiales ferromagnéticos poseen

momentos magnéticos y la interacción entre átomos vecinos es tan fuerte que los momentos de todos los átomos de cada región llamada dominio, se orientan hacia la misma dirección, aunque no exista un campo exterior. El ferromagnetismo desaparece por encima de una temperatura denominada punto de Curie. No existen rocas, ni minerales constituyentes, que sean verdaderamente ferromagnéticos.

3.1.4 PROSPECCIÓN AEROMAGNÉTICA

El método de prospección aeromagnético da la posibilidad de eliminar los efectos magnéticos perturbadores debidos a las irregularidades próximas a la superficie que dificultan el reconocimiento de las anomalías de bajo gradiente, que son originadas por las estructuras geológicas profundas, y también permite obtener datos sobre regiones pantanosas, junglas y otros terrenos inaccesibles a los equipos de prospección terrestre.

Por medio de estudios aeromagnéticos se pueden localizar zonas de fallas, de cizallamiento y de fracturas, que pueden albergar una variedad grande de minerales y dirigir a una mineralización epigenética, relacionada con estrés de las rocas adyacentes, (Dobrin, 1961)

Parámetros esenciales para el levantamiento aereomagnético.

Para el diseño de un levantamiento aereomagnético debemos tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- **Altura de Vuelo** : la altura elegida para una exploración dada depende de lo que se va a cartografiar, de la naturaleza del terreno, y de las perturbaciones que se espera encontrar, debidas a fuentes superficiales del campo magnético y justo por debajo de la superficie del suelo. Cuando la elevación es constante sobre el nivel del mar, permite cartografiar basamento, como si se estuviesen tomando las medidas sobre la superficie terrestre. Para vuelos a grandes alturas se eliminan las turbulencias y las interferencias industriales. A

mayores alturas el efecto de cualquier cuerpo magnético se atenúa en amplitud y se distribuye sobre un área más extensa.

- Patrón de líneas de vuelo : La geometría del plan de vuelo depende de la magnitud y extensión en superficie de la anomalía buscada, de la variación diurna esperada, de la precisión exigida por el mapa final y de la ubicación de las estaciones transmisoras necesarias para la localización electrónica de las posiciones. Para esto se tienen en consideración varios aspectos, como lo son: el espaciamiento entre líneas; éste es muy difícil a causa de los factores económicos implicados, cuando menor sea el espaciamiento, la probabilidad de descubrir todas las anomalías importantes será mayor. Otro aspecto que se toma en cuenta es la orientación de las líneas de vuelo, la cual se escoge en base al conocimiento de la orientación o rumbo de las estructuras geológicas; el objetivo es volar transversalmente al rumbo de los cuerpos magnetizados. Y como punto final se tiene la estación base, que va a ser utilizada para el control de la deriva y se tiene que encontrar cerca del área de vuelo.

Para el caso de la exploración minera el espaciamiento es de $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ Km., en ciertas ocasiones puede ser de 1 Km.

- Precisión en la localización: Esto no se debe confundir con mapas de vuelo teórico. Se refiere a que las líneas de vuelo puedan ser cartografiadas con precisión de más o menos X metros sobre un mapa.

Esta precisión está relacionada directamente con: la calidad de las fotos aéreas empleadas, determinación de intersecciones entre líneas, representación de un mapa de buena calidad. Todo esto es difícil de lograr en áreas donde no existe buen control topográfico y geodésico. El margen de error en posicionamiento puede ser de unas pocas decenas de metros, lo cual en condiciones normales de trabajo representa un posible error de 0.15 a 0.30 γ

Ventajas y limitaciones de la exploración magnética.

Según Balsley (1946), las ventajas que tiene la prospección aeromagnética sobre la terrestre pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- La más evidente del magnetómetro aéreo es su velocidad.
- Debido a esta ventaja en la velocidad, el costo de una prospección aérea es menor que el de una terrestre equivalente, si el área que se va a explorar es lo suficientemente extensa como para justificar los elevados gastos fijos
- La prospección aérea puede ser empleada sobre el agua o terrenos inaccesibles a las operaciones en tierra, lo que representa una gran ventaja en lugares remotos donde las facilidades de transporte son muy escasas
- El efecto de la variación diurna queda, en general, reducido al mínimo, debido a la velocidad con que se realiza la exploración
- Debido a la altura de vuelo, los materiales magnéticos que se encuentran sobre la superficie del suelo, tales como tuberías, carriles, edificios, etc., no afectan al registro, mientras que estas fuentes extrañas de magnetismo interfieren continuamente con el grado de utilización de los datos magnéticos obtenidos en tierra
- Análogamente, los efectos debidos a rocas, arenas y diques magnéticos extraños que se encuentren en la superficie del suelo o a poca profundidad, no interfieren en el reconocimiento de las anomalías debidas a cuerpos subterráneos profundos, pudiendo ser variada la altura de vuelo para lograr una discriminación máxima.
- La regularidad de los datos permite un mejor empleo de los métodos analíticos.

Deben, asimismo, ser tenidas en cuenta las siguientes desventajas y limitaciones de los métodos aéreos.

- La precisión de los resultados de los trabajos aéreos está siempre limitada por la exactitud del mapa en que se transcriben los datos magnéticos. Los mapas de que se dispone en algunas zonas son demasiado incompletos o

inexactos para poder situar debidamente las características magnéticas. Cuando la altitud de vuelo es de 300 metros, se cometen por lo general errores de 15 metros en la localización, aún contando con buenos mapas.

- El costo mínimo de una exploración aeromagnética es elevado debido a la inversión básica en los aviones utilizados. Si la superficie a explorar es pequeña, este tipo de exploración se hace prohibitiva debido al costo por kilómetro.

3.2 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

El método gravimétrico hace uso de campos de potencial natural igual que el método magnético algunos métodos eléctricos. Se componen de los contribuyentes de las formaciones geológicas, que conforman la corteza terrestre hasta cierta profundidad determinada por el alcance del método.

El conocimiento de la gravedad absoluta es una medición relativa, la cual no presenta interés inmediato. Éstas dan la diferencia Δg entre la gravedad en el punto de observación y en otro tomado como base. A las diferencias observadas se le aplican correcciones adecuadas con objeto de reducirlas a ciertas condiciones normales. Los valores corregidos de Δg , llamados anomalías, proporcionan información acerca de los cambios de densidad en el interior de la Tierra así como sobre las superficies que limitan regiones de densidad diferente (Parasnis, 1970).

El método por gravedad descubre y mide las variaciones laterales de la atracción gravitatoria del suelo, que están asociadas a cambios de la densidad próxima a la superficie. El valor de la gravedad en un punto cualquiera de la superficie terrestre depende de la latitud, de la altitud, de los efectos de marea, de la topografía de los territorios circundantes, y de la distribución de la densidad por debajo de la superficie, Dobrin (1961).

Las anomalías de la gravedad suelen expresarse en miligales o en unidades gravimétricas. El miligal es la milésima del gal., es la unidad c.g.s. de aceleración (1cm/s^2) y recibe este nombre en honor a Galileo. Las mayores anomalías de la gravedad (en la superficie) son producidas por estructuras ocultas tales como cúpulas salinas, estructuras petrolíferas, yacimientos mineros, ondulaciones de los estratos geológicos, etc..

Determinación de las densidades

Es de suma importancia en la prospección gravimétrica eliminar en el mayor grado posible el efecto de los accidentes superficiales y para ello se debe emplear el valor verdadero de su densidad.

La densidad puede estimarse mediante mediciones de laboratorio sobre muestras de las rocas aflorantes en la zona investigada; pero estas estimaciones están afectadas por el hecho de que las muestras pudieran no ser representativas, por estar meteorizadas o por otras causas. Además, la densidad de las rocas en profundidad puede ser distinta de la presentada por las muestras de superficie, por causa de su variación en humedad, y en el caso de rocas “sueltas” como arcillas, margas, morrenas, etc., debido al aumento de la compacidad, que pueden ser importantes aún a profundidades moderadas. Por lo tanto se han propuesto varios métodos “de campo” para la determinación de la densidad

Interpretación

Para la interpretación de las anomalías de la gravedad en términos de la distribución de densidades en el subsuelo, se supone una distribución de masas que corresponda a algunas estructuras sencillas y los parámetros de estas estructuras se van ajustando hasta que la anomalía calculada concuerde satisfactoriamente con la gravedad. Para lograr este objetivo, es necesario conocer las anomalías gravimétricas producidas por diferentes estructuras tipo. Las anomalías de la gravedad provienen de diferencias (δ) relativamente pequeñas

entre las formaciones rocosas, y la interpretación es, naturalmente muy sensible a los valores de densidad que se utilicen.

Modelaje Bidimensional

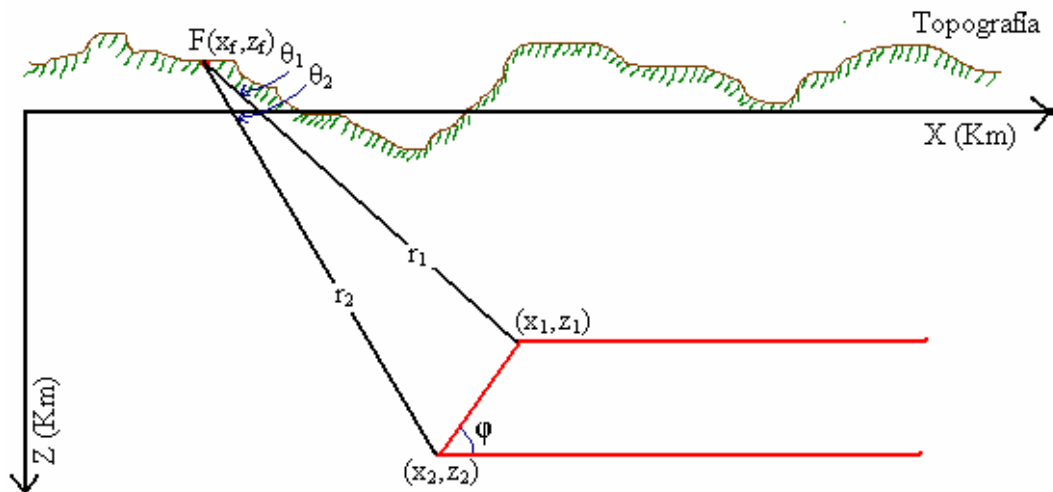


figura N° 25: Modelaje bidimensional

El efecto gravimétrico (mGals) en el punto F, será:

$$\Delta g = 13.34 \rho \left[\begin{array}{l} \theta_2(z_2 - z_f) - \theta_1(z_1 - z_f) - \left\{ (x_1 - x_f) \text{sen} \phi + (z_1 - z_f) \text{cos} \phi \right\}^* \\ \left\{ \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \text{sen} \phi + (\theta_2 - \theta_1) \text{cos} \phi \right\} \end{array} \right] * \rho \left(\frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} \right)$$

CAPÍTULO 4: ESTUDIO ESTADÍSTICO Y GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS Y GRAVIMÉTRICOS

Para el análisis del estudio estadístico de los datos aeromagnéticos y gravimétricos se estudiaron las medidas de tendencia central, medidas de dispersión, histograma de frecuencia, diagrama de caja y gráfico normal Q-Q (apéndice A), a través del paquete *Statistical Package for Social Science* (SPSS) versión 10.0, herramienta computacional que permite la manipulación de grandes volúmenes de datos, de toda índole.

4.1 MÉTODO MAGNÉTICO

4.1.1 DATOS AEROMAGNÉTICOS

Los datos aeromagnéticos utilizados en el presente trabajo, fueron extraídos de mapas de intensidad magnética total (IMT), que fueron adquiridos por la Aereo Service Corporation de Venezuela C.A. junto con la subcontratista Hunting Survey Corporation al sur del Escudo de Guyana. Estas fueron aportados por INGEOMIN y presentan los siguientes códigos de identificación: NW 42, NX 42, NW 43, NX 43, NW 44, NX 44, (figura 26). Los mapas NW 42 y el NW 43 tuvieron dos etapas de elaboración, la primera se realizó entre enero y abril del 1959 y la segunda etapa entre enero y abril de 1961, en la cual también fueron elaborado el resto de los mapas.

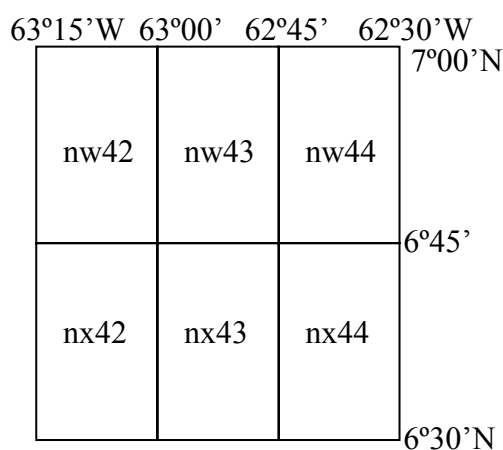


Figura N° 26: Ubicación y códigos de cada uno de los mapas aeromagnéticos aportados por Ingeomin

La adquisición de los datos magnéticos se realizó por vía aérea, con una altura de vuelo de 152 metros en dirección N°20 W y una separación entre las líneas de vuelo de 500 metros.

4.1.2 PROCESO DE DIGITALIZACIÓN DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

Para el proceso de digitalización de los mapas, el primer paso que se realizó fue escanear cada uno de ellos, y sobre las imágenes en formato digital se aplicó el proceso de digitalización en el programa AUTOCAD2002. A partir de allí se generó una base de 150554 datos, los cuales presentan coordenadas x,y,z , donde x es el valor de longitud, y el valor de la latitud y z el valor de la intensidad total del campo magnético. Las coordenadas x,y fueron transformadas a coordenadas geográficas, con valores de latitud y longitud por medio de la siguiente fórmula (apéndice B).

$$x = \frac{b - a + (a * K_2)}{K_2} \quad (4.1)$$

$$y = \frac{d - e + (e * K_2)}{K_2} \quad (4.2)$$

Aplicadas estas fórmulas, los valores de x,y se transformaron en coordenadas absolutas de latitud y longitud

4.1.3 SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA, DENSIDAD Y COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN CAMPO

Para conocer la susceptibilidad magnética, la densidad y la composición mineralógica de los diferentes tipos de rocas expuestos a lo largo del área de estudio, se recolectaron 21 muestras correspondientes a las unidades litológicas que afloran en el área norte del Escudo de Guayana (figura N° 10).

El cálculo de la susceptibilidad magnética de cada una de las muestras se realizó en el Laboratorio de Electroscopio Mössbauer de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela. Para obtener los valores de susceptibilidad magnética se aplicó el siguiente procedimiento: se pulverizaron las muestras y se introdujeron en envases cilíndricos, de dimensiones: 1 cm. de diámetro y 2,5 cm. de largo. Obtenidos estos valores se procedió a calcular el volumen (apéndice C) del envase. Por otro lado, se obtuvo el peso de la muestra mediante una balanza, para esto se tomó primero el peso del envase sin contenido y luego se repitió el mismo proceso una vez introducida la muestra (tabla N° 13 en el apéndice C). Posteriormente se tomaron las lecturas del susceptibilímetro, para cada muestra y se procedió al cálculo de los valores de susceptibilidad magnética (apéndice C en la tabla 13); los valores de susceptibilidad se listan en la tabla N° 2

En lo que respecta al cálculo de la densidad se inició con el secado de cada una de las muestras, lo cual se realizó con una estufa a 100° C por un periodo de 10 horas. Secadas las muestras, se colocaron sobre un vidrio de reloj, para luego ser pesadas en una balanza digital semi-analítica marca OHAUS, modelo S200; obtenido el peso de las muestras se le restó el peso del vidrio de reloj y se obtuvo el peso exacto de cada muestra. Luego se procedió a realizar la calibración del cilindro mediante una bureta, para así obtener una precisión de 2 decimales (esta precisión se obtuvo realizando la medición del volumen del cilindro cada un milímetro de la bureta, hasta llegar a los 25 milímetros). Al obtener estos datos se generó la curva de calibración, la cual arrojó una pendiente que indica el factor de corrección. Para obtener el volumen de la muestra se calculó la diferencia entre el volumen inicial de agua destilada en el cilindro graduado y el volumen desplazado cuando la muestra es sumergida, una vez obtenido este valor se multiplica por el factor de corrección para el cilindro. En el caso de que la muestra presentara porosidad fue necesario emplear un embudo y papel absorbente, con el fin de no perder masa de la muestra por disgregación. Los valores de densidad para cada una de las muestras pueden ser observados en la tabla N° 2

Tabla N°2: Valores de susceptibilidad magnética, densidad, y mineralogía de las muestras tomadas en campo





Nombre de la roca	Provincia Unidad	Facies Grado Metamórfico	Composición mineralógica	Densidad (g/cm ³)	Susceptibilidad	Muestra
Anfibolita	Pastora - Caballape	Grado medio	Cuarzo, plagioclasa, hornblenda, apatito, epidoto. La sección tiene una veta de cuarzo intercalada	2,90	2,31076E-04	
Anfibolita	Provincia de Pastora - Grupo Carichapo	Esquisto verde Bajo Grado - Bajo grado	Actinolita, cuarzo, plagioclasa y epidoto. La muestra es de grano Grueso	3,01	3,62134E-05	
Anfibolita	Provincia de Pastora - Grupo Carichapo	Esquisto verde Bajo grado	Actinolita, epidoto, presencia de minerales opacos y esfena	2,90	6,38046E-05	
Anfibol Verde-azul	Pastora. - Grupo Carichapo	Anfibolita Epidótica - Bajo – medio grado	Anfibol verde-azul, plagioclasa, poco cuarzo y epidoto	2,90	3,10401E-05	

Tabla N°2: Valores de susceptibilidad magnética, densidad, y mineralogía de las muestras tomadas en campo






Nombre de la roca	Provincia Unidad	Facies Grado Metamórfico	Composición mineralógica	Densidad (g/cm ³)	Susceptibilidad (emu)	Muestra
Metatronhemita	Pastora - Complejo Suparno	Anfibolita Alto grado	Cuarzo, microclino, plagioclasa, biotita, y algo de hornblenda	2,65	1,06916E-04	
Gneis Plagioclásico	Pastora - Complejo Suparno	Anfibolita - Grado medio	Plagioclasa, presencia de anfíbol, hornblenda, epidoto y esfenas grandes	2,75	3,4489E-05	
Metatronhemita muy foliada	Pastora - Complejo Suparno	Bajo grado	Cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y apatito. Muestra con cristales muy grandes	2.70-2.65	1,032945E-03	
Granodiorita	Pastora - Complejo Suparno	Alto grado	Feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, biotita, clorita. Presencia de esfena	2.80	1,12089E-04	
Metalava (roca volcánica)	Pastora - Fm. El Callao	Esquistos Verdes Bajo grado	Anfibolita, plagioclasa, y esqueletos de piroxeno alterado a esfena	3,09	4,48357E-05	

Tabla N°2: Valores de susceptibilidad magnética, densidad, y mineralogía de las muestras tomadas en campo

Nombre de la roca	Provincia Unidad	Facies Grado Metamórfico	Composición mineralógica	Densidad (g/cm ³)	Susceptibilidad (emu)	Muestra
Metatoba	Pastora Fm. El Callao	Bajo grado	Cuarzo, feldespato, biotita (un poco alterada) y epidoto en poca cantidad, está bastante foliada	2,70	2,41423E-05	
Cuarcita Magnetítica	Imataca Complejo Imataca	Granulita alto grado	Anfiboles, piroxenos, mucho cuarzo, magnetita.	3,43	2,505625E-03	
Anfibolita (foliación casi perfecta)	Imataca	Anfibolita Grado medio	Horblenda, feldespato, cuarzo, epidoto (poco), presencia de minerales opacos; óxido de hierro.	3,03	5,69068E-05	
Charnockita Félsica (Roca Granítica)	Imataca	Alto grado	Feldespato, biotita (prod de la alteración del ortopiroxeno), plagioclasa, microclino, bastante cuarzo. Presencia de Hipersteno.	2,74	4,08695E-04	

4.1.4 APLICACIÓN DE LA ESTADÍSTICA A LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

La aplicación de la estadística en los datos aeromagnéticos se basó principalmente en el estudio de las medidas de tendencia central (media, moda y mediana) las cuales son conocidas como medidas de posición, y el estudio de las medidas de dispersión que posibilitan retratar la distancia de los valores de la variable a un cierto valor central, o que permiten identificar la concentración de los datos en un cierto sector del recorrido de la variable (apéndice A). Este estudio arrojó los siguientes resultados: un histograma de frecuencias, valores estadísticos, un diagrama de caja y dos gráficos Q-Q uno con curva normal y otro sin tendencia normal. (figuras 27, 28, 29 y 30).

Estudio de los resultados estadísticos de los datos aeromagnéticos

En la figura 27 se presenta un histograma de frecuencias generado con la base de datos aeromagnéticos, que muestra en el eje horizontal los valores de IMT, los cuales oscilan entre 6000 a 8600 y separadas cada 200 γ , se observa que en el intervalo de anomalía magnética 6200 y 7400 γ , se concentra la mayor población, por otra parte el histograma arroja una medida que se encuentra ubicada en este mismo intervalo. Las frecuencias más significativas de los datos aeromagnéticos están ubicadas en las magnitudes entre 6900 y 7000 γ .

En la tabla 3, se observa un valor máximo 8640 γ el cual representa el 100 % (tabla N°4) del porcentaje acumulado y un mínimo de 6040 γ , que refleja el menor valor de la población y cuyo porcentaje acumulado es 0%. Se puede apreciar una varianza de 50233; en lo que respecta a la desviación típica presenta un valor de 224,12, el cual, al ser menor que la media, mediana, moda y varianza, se puede concluir que el comportamiento de los datos es homogéneo.

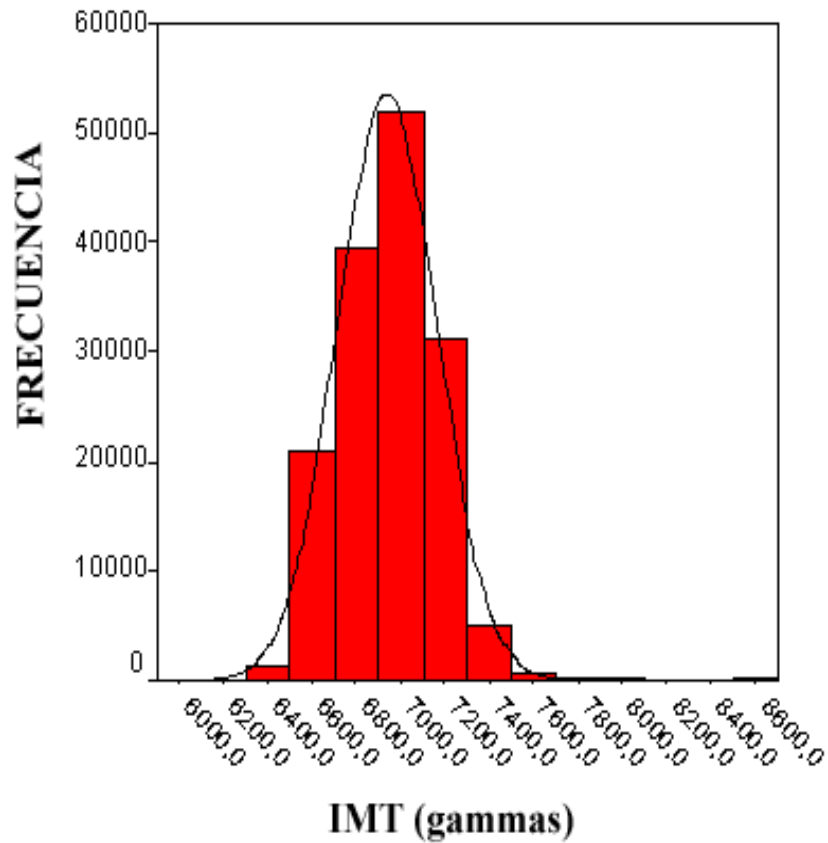


Figura N° 27: Histograma de frecuencia calculado con la base de datos aeromagnéticos

Por ser el valor de curtosis 0.013, indica que las observaciones se concentran más y las colas son más largas que las de una distribución normal. Los valores de la media, moda y mediana son muy semejantes entre si, lo cual ratifica que el comportamiento de la población es normal.

Tabla N° 3: Valores estadísticos calculados con la base de datos aeromagnéticos

N° de muestras	Válidos	150554
	Perdidos	1
Media		6938.1383
	Error típico	0.5776
Intervalos de confianza a 95%		
	Límite inferior	6937.0062
	Límite superior	6939.3705
Media recortada al 5%		6935.1873
Mediana		6940
Moda		7000
Desviación Típica		224.1272
Varianza		50233
Asimetría		0.511
	Error típico	0.006
Curtosis		2.773
	Error típico	0.013
Rango		2600
Mínimo		6040
Máximo		8640
Rango		2600
Suma		$1 \cdot 10^9$
Amplitud intercuartil		300

Tabla N° 4: Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	Porcentaje	N	Porcentaje	N	Porcentaje
IMT	150554	100%	1	0%	150555	100%

La distribución que presentan los datos es normal. En cuanto el valor de la asimetría 0,511 indica que el comportamiento de los datos es simétrico, debido a que dicho valor es muy próximo a cero.

Tabla N° 5: Percentiles calculados a los datos aeromagnéticos

Percentiles	Weighted average (IMT)	Bisagra de Tukey (IMT)
5	6580	
10	6640	
25	6780	6780
50	6940	6940
75	7080	7080
90	7220	
95	7260	

Los valores comprendidos entre el menor valor y el percentil 25 (6780 γ) (tabla N°5) corresponden a los valores más pequeños de la población, y los valores entre el percentil 75 (7080 γ) y el máximo valor representan los valores más altos de la población. Es importante señalar que la mediana y el percentil 50 coinciden en cuanto a su valor (6940 γ) y dividen a la población en forma simétrica, lo cual resulta ser buen indicativo del comportamiento normal de la población.

Tabla N° 6: Estimadores – M aplicados a los datos aeromagnéticos

	Estimador-M de Huber ^a	Biponderado de Turkey ^b	Estimador-M De Hampel ^c	Onda de Andrews ^d
IMT	6937,9048	6936,6719	6936,2251	6936,6226

- a. La constante de ponderación es 1.339
- b. La constante de ponderación es de 4.685
- c. Las constantes de ponderación son 1.7, 3.4, y 8,5
- d. La constante de ponderación es $1.34 \cdot \pi$

Tabla N° 7: Valores extremos de los datos aeromagnéticos.

IMT			Número del caso	Valor
	Mayores	1	54753	8640
2		55506	8640	
3		55198	8640	
4		55322	8640	
5		55161		
Menores		1	55	6040
		2	18	6040
		3	47	6040
		4	17	6040
		5	58	6040

Los valores extremos (8640 γ) son aquellos valores que efectivamente están en el estudio y que tendrán un probable impacto sobre las estimaciones, mientras que los valores menores o marginales (6040 γ) tendrán efecto moderado o en muchos de los casos no serán relevantes para alcanzar las metas del estudio. La distinción entre valores extremos y los valores menores o marginales aportan necesariamente información cualitativa adicional que no está contenida en el conjunto de los datos por si mismo, representada en muchos casos por la geología de la zona o características físicas de la población que no viene representada en el estudio.

Tabla N° 8: Pruebas de normalidad aplicadas a los datos aeromagnéticos.

IMT	Kolmogorov-Sminov ^a		
	Estadístico	gl	Sig
	0.037	150554	0

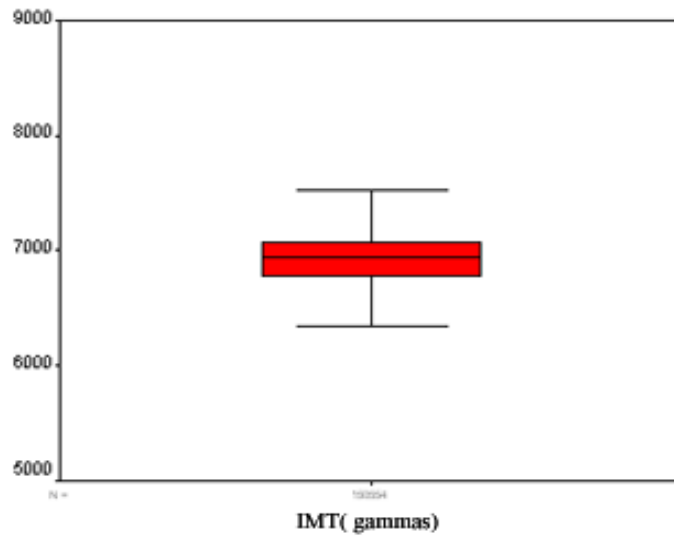


Figura N° 28: Diagrama de Caja de datos aeromagnético

El diagrama de caja (figura N° 28) presenta un resumen de la información más notable de la distribución de las intensidades magnéticas, la parte central presenta el 50 % de la población (mediana o percentil 50), la cual es representada por una línea recta. En cuanto a la parte superior, representa el percentil 25 y el percentil 75 respectivamente.

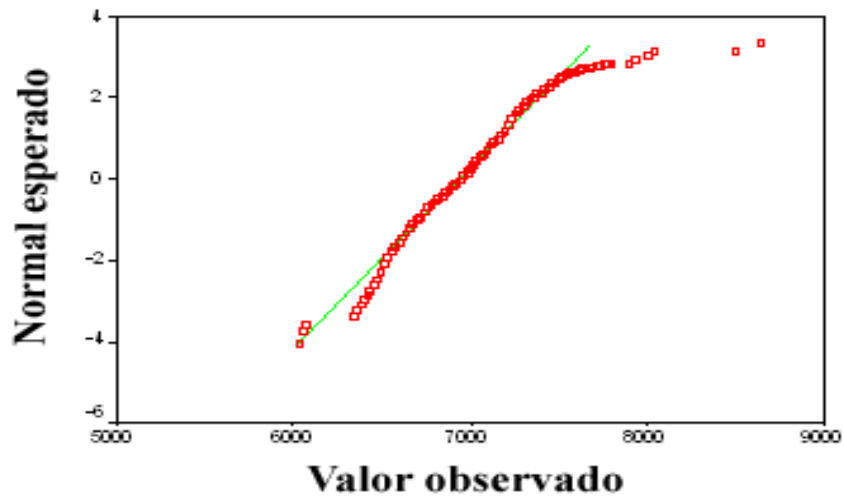


Figura N° 29: Q – Q con curva normal de datos aeromagnético

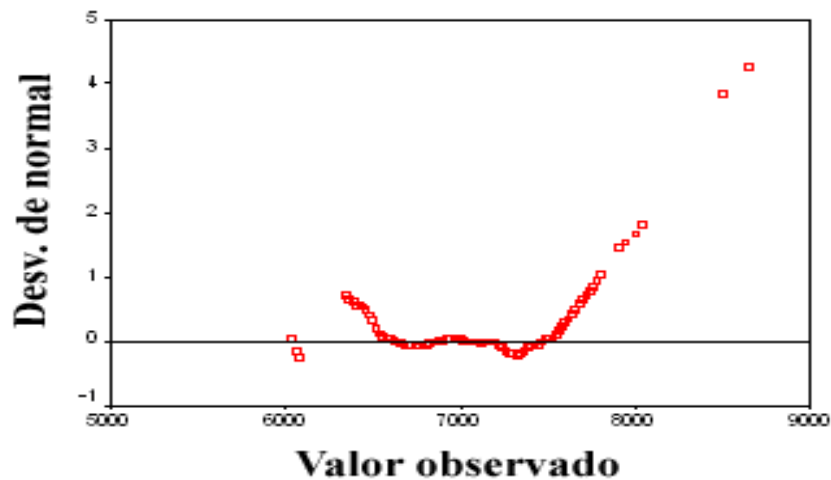


Figura N° 30: Q – Q sin tendencia normal de datos aeromagnético

Aplicadas las pruebas de normalidad y observado el ajuste de la distribución de los datos en cuanto a la línea recta (valores teóricos esperados) en la gráfica Q – Q normal con tendencia y el ajuste de la Q – Q sin tendencia (figuras N° 29 y 30), se puede decir que la población se ajusta al comportamiento de una distribución normal. Sin embargo, es importante señalar que aunque cuando la distribución observada sigue un comportamiento normal, la geología de la zona presenta cierta diferenciación mineralógica que posiblemente posee respuestas físicas similares y que pueden ser observadas en los análisis anteriores.

4.1.5 APLICACIÓN DE LA GEOESTADÍSTICA A LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

Luego de la validación estadística de los datos se procedió a realizar el análisis geoestadístico de los mismos con el fin de conocer la distribución espacial que presentan dichos datos, así como también determinar las direcciones de tendencia de las variables en estudio. Para dicho análisis se utilizó el GRIDSTRAPRO Inc. 1999.

Resultados obtenidos en la aplicación de la geoestadística de los datos aeromagnéticos

Se determinó la elipse de anisotropía y la roseta de distribución (figura N° 30), mas sin embargo, es importante señalar que la aplicación del variograma experimental en este caso no resultó de gran utilidad debido a que los datos poseen alta variabilidad en cuanto a litología y mineralizaciones ocurridas en la zona en estudio.

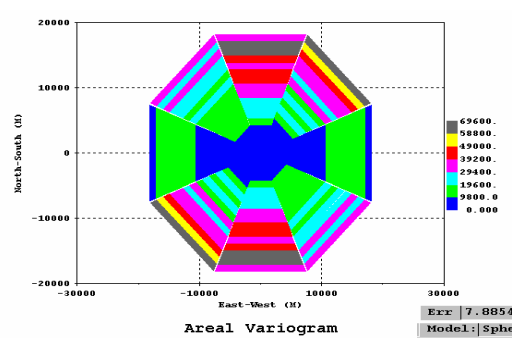


Figura N° 31: Roseta de distribución

A través de la elipse de anisotropía (figura N° 31), se puede observar que la zona de mayor variación espacial posee un azimut de 97.18° y la dirección de variación es NE-SW. La dirección de menor variación se encuentra estrechamente relacionada con la dirección en la que se encuentran los máximos valores en el Mapa de IMT. La dispersión de los valores se debe principalmente a la complejidad geológica del área desde el punto de vista litológico.

Los valores de los ejes menor y mayor de la elipse son 34982 y 99917, respectivamente (figura N° 31).

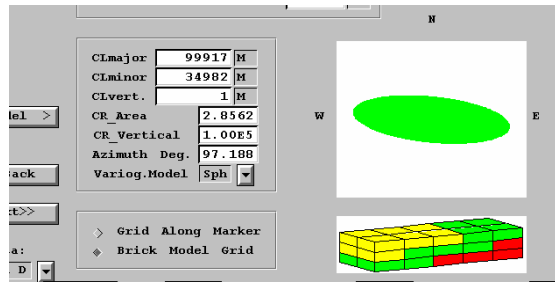


Figura N° 32: Elipse de anisotropía

4.2. MÉTODO GRAVIMÉTRICO

4.2.1 DATOS GRAVIMÉTRICOS

Los datos gravimétricos fueron obtenidos de la base de datos de la Red Gravimétrica Nacional, la cual posee datos suministrados por la Universidad Central de Venezuela y la Universidad Simón Bolívar. Los datos del área de este estudio y de las zonas circundantes incluyen 1884 estaciones, ubicadas entre las coordenadas $60^{\circ} 00' W$ y $63^{\circ} 15' W$ y $6^{\circ} N$ a $8^{\circ} N$; de la cual se tomaron específicamente 30 estaciones ya que son las que se encuentran dentro del área de interés (apéndice D).

Estas estaciones contienen sus respectivos valores de latitud, longitud, cota, gravedad observada y corrección topográfica, los cuales fueron utilizados para el cálculo de la Anomalía de Bouguer

4.2.2 CÁLCULO DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER

Como ya se tienen los valores de gravedad de cada estación (en miligales) se requiere aplicar a los mismos ciertas correcciones con el fin de reducirlos a un nivel de referencia común, y de esta manera poder calcular la anomalía de Bouguer de cada una de estas estaciones. El cálculo de la anomalía de Bouguer se realiza mediante la aplicación de la siguiente fórmula, para el nivel de referencia igual al nivel medio del mar

$$AB = Gobs + Cal + Ct - CB - GT \quad (4.3)$$

En donde: *Gobs.* es la gravedad observada de cada una de las estaciones en miligales, *Cal.* la corrección de altura, la cual toma en consideración el efecto de la altura de la estación medida en la observación gravimétrica; ésta se calcula mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$Cal = 0.3086 * h \text{ (mGal/m)} \quad (4.4)$$

$h \rightarrow$ altura de la estación

Por otro lado se tiene la corrección de Bouguer (CB), la cual toma en cuenta el efecto de la masa situada entre el nivel de referencia y la estación; el valor de la CB se obtiene aplicando la siguiente relación:

$$CB = 0.04191 * \rho_b * h \text{ (mGal)} \quad (4.5)$$

En donde h = Altura de la estación

ρ_b = Densidad de Bouguer

La densidad de Bouguer utilizada para el cálculo de la AB fue de 2.65g/ml. Esta corrección se aplica en el sentido contrario a la corrección de aire libre. El último término necesario para obtener la anomalía de Bouguer es la gravedad teórica (*GT*), la cual se calcula bajo el uso de la siguiente fórmula:

$$GT = 978031.846 * (1 + 0.005278895 * \text{sen}^2 \theta + 0.00023462 * \text{sen}^4 \theta) \quad (4.6)$$

Siendo θ = la latitud de la estación

Ésta se aplica con el objeto de eliminar el efecto que en la medida gravimétrica tiene el incremento de la gravedad terrestre del ecuador a los polos, debido principalmente a la rotación de la Tierra y a la diferencia de los radios ecuatoriales y polares en la misma.

4.2.3 APLICACIÓN DE LA ESTADÍSTICA A LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS

Para realizar la validación estadística de los datos gravimétricos, primero se realizó un estudio a la base de datos, el cual es semejante al efectuado a los datos aeromagnéticos, que no es más que el cálculo de las medidas centrales y las medidas de dispersión. Como resultado de la aplicación de la estadística a la base de datos gravimétricos se obtuvo un histograma de frecuencia (Figura N° 32) y valores estadísticos.

Estudio de los resultados estadísticos de los datos gravimétricos

En el histograma de frecuencias (Figura N° 30) se puede observar claramente una distribución asimétrica hacia la derecha; el rango dentro del cual se ubica el mayor porcentaje de la población va desde -50 a -20 mGals, dentro de este mismo rango se encuentra ubicada la media con un valor de -30. La frecuencia de mayor valor está ubicada dentro del rango -30 y -40. La mayor concentración de la población se encuentra en las anomalías gravimétricas de mayor valor.

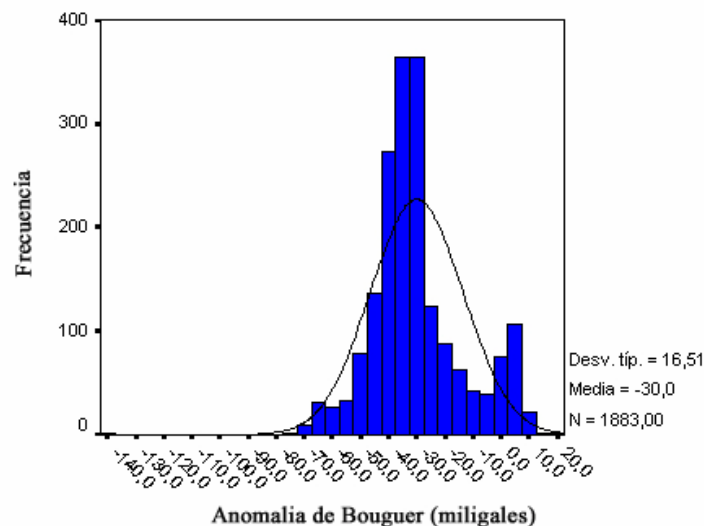


Figura N° 33: Histograma de frecuencias calculado con la base de datos gravimétricos

En lo que respecta a la tabla de los valores estadísticos calculados (Tabla N° 9), muestra una base de datos homogénea, debido a que el valor de la desviación típica es de 16.51 y se encuentra por debajo de los valores de la media, moda y mediana.

Tabla N° 9: Valores estadísticos calculados con la base de datos gravimétricos

N° de Valores	1883
Media	-29,9571
Error típ. de la media	0,3804
Mediana	-32,6812
Moda	-53,53
Desv. típ.	16,5079
Varianza	272,5119
Rango	156,71
Mínimo	-138,52
Máximo	18,19
Suma	-56409,27

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MAPAS MAGNÉTICOS Y GRAVIMÉTRICOS

5.1 MÉTODO MAGNÉTICO

5.1.1. MAPA DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL BAJO CRITERIO GEOESTADÍSTICO

En la figura N° 34 se muestra el mapa de intensidad magnética total (IMT) realizado con la base de datos aeromagnéticos digitalizados bajo criterio geoestadístico. En dicho mapa las líneas isomagnéticas mantienen un rumbo E-W, con un máximo de 7312 gammas en la zona norte del mapa y un mínimo de 6520 gammas hacia el sur. El máximo está asociado a la Provincia de Imataca, mientras que el mínimo se ubica en la zona en la que aflora la Provincia de Roraima.

La alta respuesta magnética observada al norte del mapa pareciera estar relacionada con la presencia de rocas del cerro Los Barrancos, que pertenece al Cinturón de Rocas Verdes Caroní – Paragua, y que afloran en las cercanías de la zona de estudio. Aún cuando no se encuentre estrictamente dentro de la zona puede estar causando un efecto a profundidad y su alta respuesta magnética opaca cualquier otro evento que pudiese estar ocurriendo a un nivel más superficial.

Es importante señalar que la tendencia del mapa de IMT describe la dirección regional de las estructuras, debido los altos niveles de susceptibilidad y magnetización de las rocas presentes en el subsuelo. En éste se observa un gradiente de aproximadamente 30 γ/Km . al norte y 25 γ/Km . al sur del valor máximo de intensidad magnética total

Por otra parte se observa que a nivel local los metagrabros presentan un máximo de 7100 γ en la parte noroeste del área, más hacia la zona central, aproximadamente a 63° se encuentra una cupla magnética posiblemente asociada

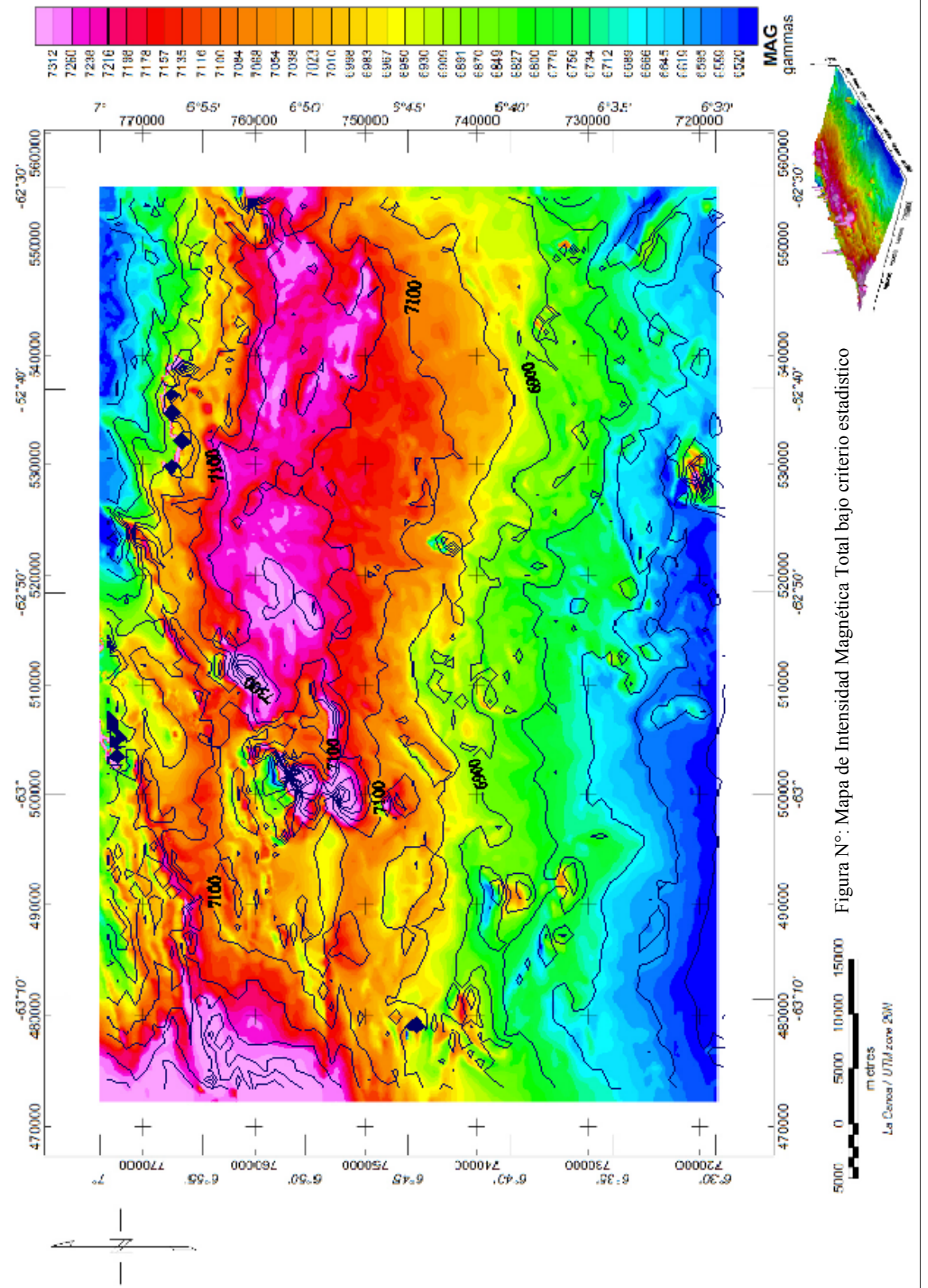


Figura N°: Mapa de Intensidad Magnética Total bajo criterio estadístico

a la presencia de los mismos metagabros ubicados debajo de las unidades de metatobas y metalavas.

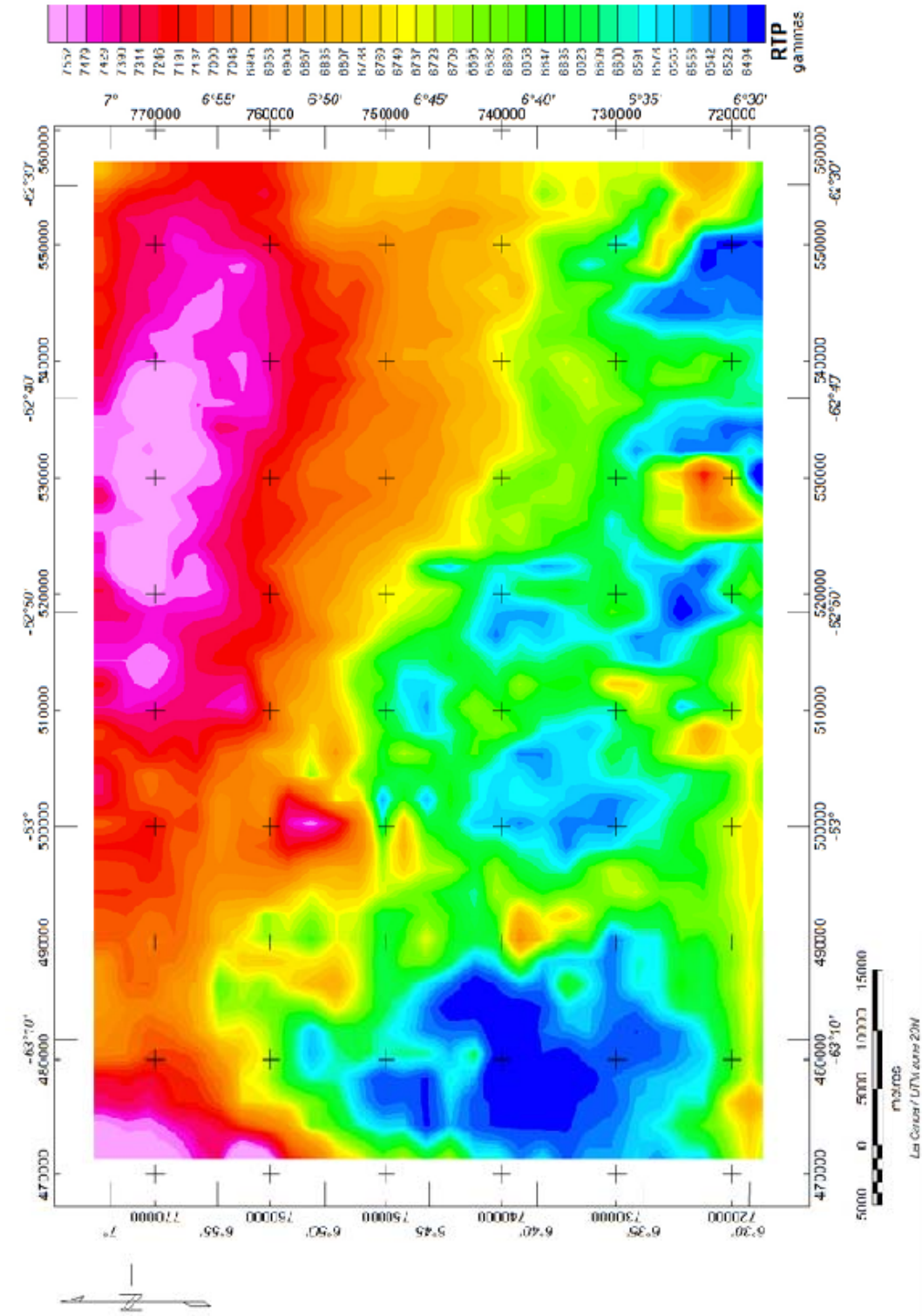
5.1.2. MAPA DE REDUCCIÓN AL POLO

La reducción al polo (RTP) es un filtro que se aplica para eliminar los efectos que causan distorsión en la inclinación y declinación, y de este modo restaurar las fuentes de anomalía magnética. Según Baranov (1975), esta operación es realizada con el propósito de transformar el mapa de intensidad magnética total, caracterizado por ser de aspecto bipolar, en uno más fácil de interpretar, en donde la fuente causante de la anomalía pueda ser identificada.

En el mapa de reducción al polo que se muestra en la figura N° 35, se puede observar que las fuentes de mayor anomalía se encuentran a lo largo de la zona norte del área de estudio, reforzando la presencia de una fuente magnética de gran extensión en profundidad en esta zona. En lo que respecta a las bajas respuestas ubicadas al sur y al suroeste del área, éstas pueden ser causadas por la presencia de rocas meta-sedimentarias y sedimentarias pertenecientes al Cinturón de Rocas Verdes Caroní – Paragua y a la Provincia de Pastora. Se aprecia igualmente cierta tendencia de las anomalías orientadas en dirección N-S, principalmente asociadas a fuentes locales, situación que con frecuencia ocurre al aplicar este método en regiones ecuatoriales.

5.1.2 ANÁLISIS ESPECTRAL DEL MAPA DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL

El método del análisis espectral se utiliza para la interpretación de anomalías magnéticas y gravimétricas. Este método se encarga de transformar las anomalías, las cuales se encuentran en el dominio del espacio, al espectro de potencia que depende de la frecuencia espacial, para entonces analizar su comportamiento. El



espectro de potencia es el resultado de los cálculos realizados por medio de la transformada directa de Fourier (apéndice E) de los datos.

Para aplicar la FFT con el fin de convertir los datos de una cuadrícula al dominio de Fourier, se utiliza el programa Magmap (GEOSOFT), el cual permite crear una vista del espectro promediado radialmente y una curva de profundidad estimada, la cual se obtiene utilizando 5 puntos del archivo de espectro para calcular la pendiente de cada punto que conforma la curva del espectro de energía.

Bhattacharya (1966) expone que cuando se grafica en una escala lineal la frecuencia contra el algoritmo de la energía, se distinguen intervalos de frecuencia donde la variación logarítmica de la energía con la frecuencia puede ser representada por una función lineal, con amplitudes decrecientes cuando se incrementa la frecuencia. Por lo que la pendiente de la función lineal es proporcional a la profundidad del tope del cuerpo que origina la anomalía; la cual puede ser estimada mediante la siguiente fórmula.

$$h = \frac{m}{4 * \pi} \quad (5.1)$$

La pendiente de la recta se obtiene a través de $m = \text{arctg}(\varphi)$ donde φ es el ángulo que forma la recta con el eje x..

El resultado obtenido de la aplicación del análisis espectral sobre el mapa de intensidad magnética total puede ser visto en la figura N° 36, en la que se puede observar que la fuente causante de la anomalía más profunda se ubica a 7.9 Km., la cual puede ser atribuida al tope de la Provincia de Imataca o equivalente. También se determinan otras fuentes a menor profundidad en el orden de 500 a 700 mts. que pueden estar asociadas a intrusiones graníticas.

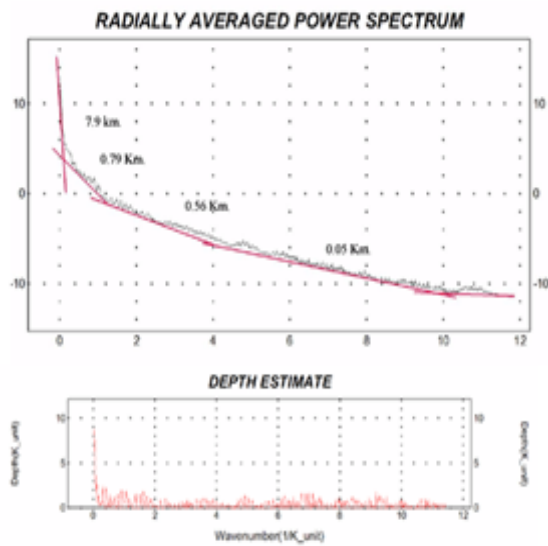


Figura N° 36: Análisis espectral de los datos de IMT

5.1.2 BONDAD DE AJUSTE APLICADA A LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

La selección de superficie de tendencia que mejor representa las anomalías regionales se sustenta en el estudio estadístico de la bondad de ajuste por mínimos cuadrados, así como en el conocimiento geológico de la zona. Entre los métodos de separación regional-residual, se encuentra el método de la superficie polinómica, el cual permite aproximar el mapa de anomalías regionales mediante superficies polinómicas de grado n a través de la operación:

$$Z = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4x^2 + A_5xy + \dots + A_nx^n y^n \quad (5.2)$$

En donde n es el grado del polinomio que se desea aplicar, x, y son las coordenadas de las estaciones, y A_0, A_1, A_2 los coeficientes que satisfacen la ecuación.

Las anomalías residuales se calculan:

$$AM = A_{Reg} + A_{Res} \quad (5.3)$$

Donde

AM = Anomalía Magnética

A_{Reg} = Anomalía Regional

A_{Res} = Anomalía Residual

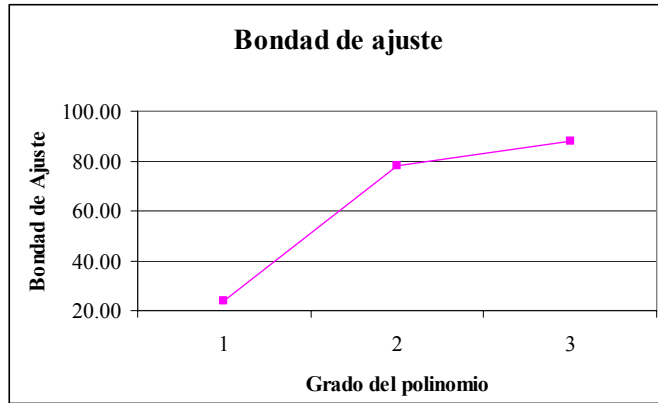


Figura N° 37: Gráfica de la bondad de ajuste de los datos aeromagnéticos

Tabla N° 10: Valor de la bondad de ajuste para cada grado polinómico

Grado del Polinomio	Bondad de ajuste (%)
1	24,0275192
2	78,1504154
3	88,1906539

De acuerdo a los resultados arrojados por el ajuste polinómico, se tiene que el grado del polinomio que mejor se ajusta a la estructura regional es el de grado 2, a partir del cual no incrementa significativamente el porcentaje de ajuste al aumentar el grado del polinomio.

Para tener un mejor conocimiento del comportamiento de la anomalía a nivel regional se elaboró el mapa regional de los datos aeromagnéticos, que se observa en la figura N° 38, construido con la respuesta polinómica de segundo orden. Las líneas isoanómalas presentan una orientación preferencial aproximadamente E-W,

las cuales mantienen concordancia con el mapa de intensidad magnética total. La mayor respuesta magnética a nivel regional se encuentra situada entre $6^{\circ} 42''$ N y 7° N, mientras que hacia el sur ésta decrece.

En lo que respecta al mapa de anomalía magnética residual (figura N° 39), se observa que los valores de las isogammas se ubican en un rango de -100 a $+200 \gamma$; observándose una cupla magnética ubicada entre las coordenadas $6^{\circ} 48' \text{ N} - 6^{\circ} 54' \text{ N}$ y $63^{\circ} \text{ W} - 62^{\circ} 57' \text{ W}$, producida posiblemente por la presencia de metagabros ubicados a profundidad, los cuales pueden ser fuente de altas respuestas magnéticas. Resaltan igualmente valores anómalos de IMT del orden de 200γ , con orientación E-W en la latitud $6^{\circ} 50'$ que refuerzan la presencia de unidades litológicas de alta magnetización en la región.

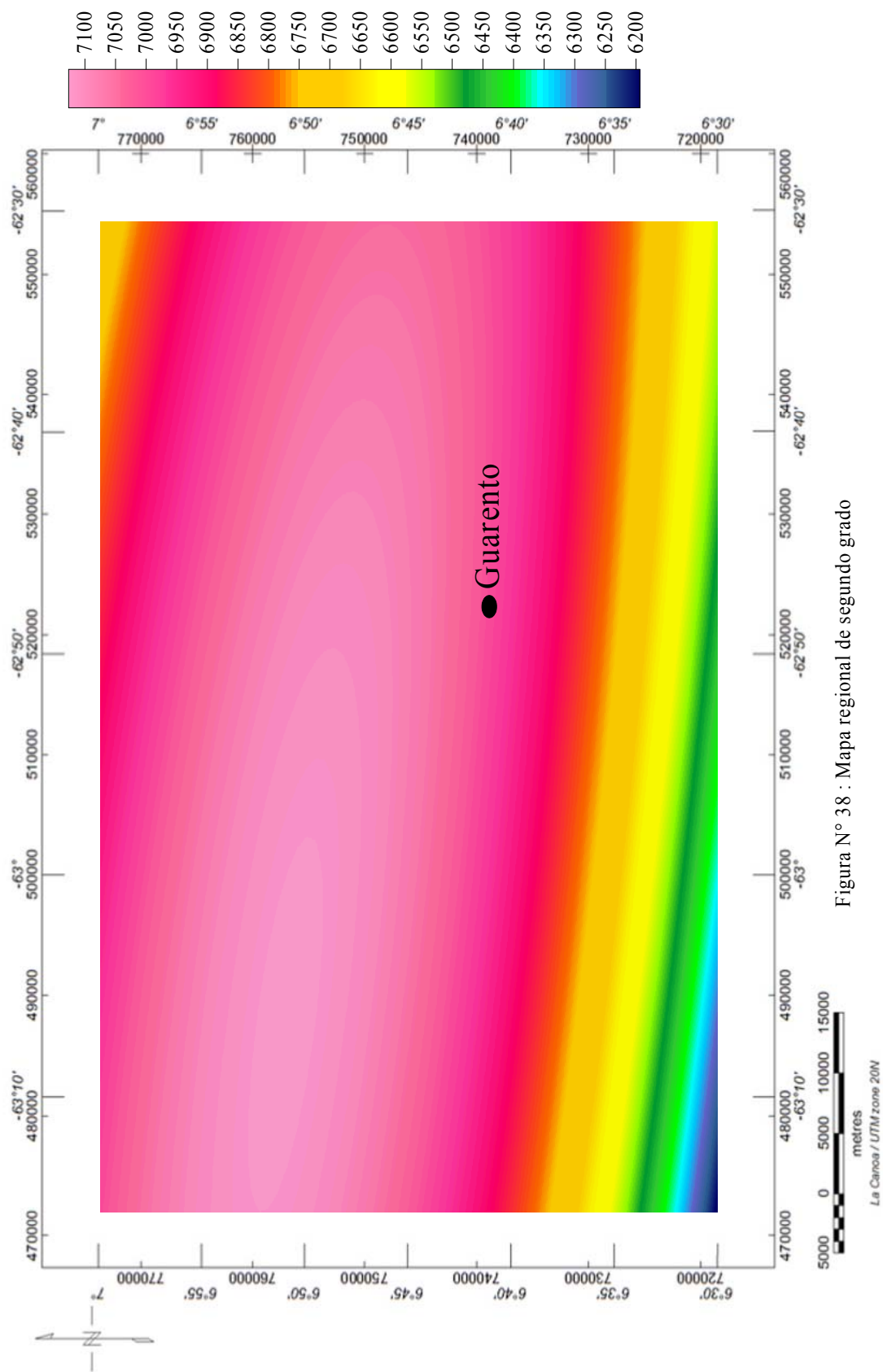


Figura N° 38 : Mapa regional de segundo grado

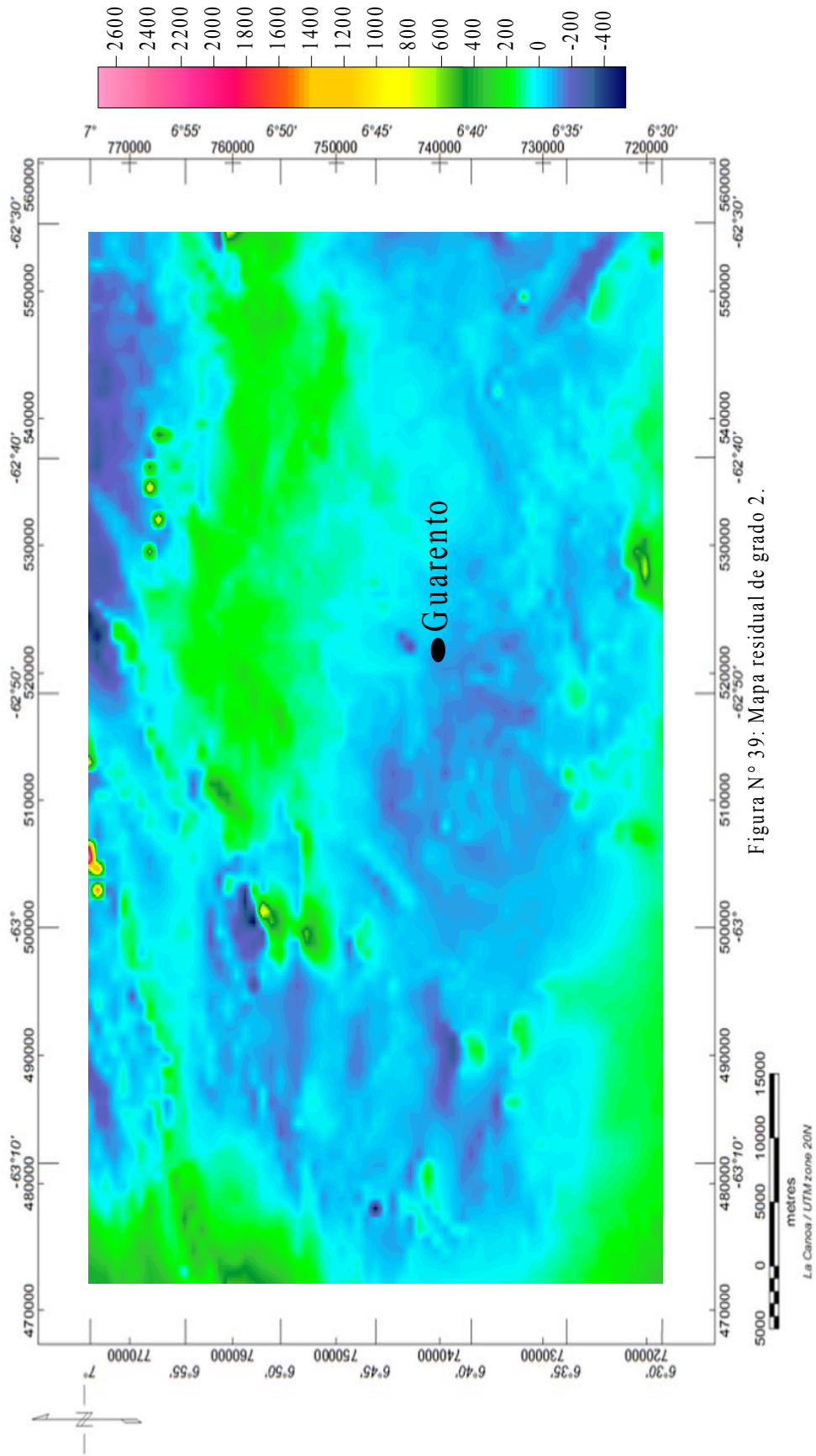


Figura N° 39: Mapa residual de grado 2.

5.2 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

5.2.1 MAPA DE ANOMALÍA DE BOUGUER BAJO CRITERIO GEOESTADÍSTICO

El mapa de Anomalía de Bouguer de la zona de estudio (Figura N° 40), fue construido a partir de 30 estaciones gravimétricas (apéndice D) y 1800 estaciones en zonas circundantes, tomadas de la Red Gravimétrica Nacional. Aunque este mapa presenta cierta limitación en cuanto a la definición de los contornos debido a las pocas estaciones ubicadas en la zona y la desigual distribución que presentan la ubicación de las mismas, fue utilizado como restricción para el modelaje, con el fin de ayudar a establecer la geometría del subsuelo.

Las líneas isoanómalas gravimétricas presentan una orientación preferencial N40°E. Se observa que la menor magnitud se ubica en la zona norte del mapa, con un mínimo de -64 mGals. Hacia el sur se observa otro mínimo con un valor aproximado de -62 mGals cuyo gradiente es de 0.53 mGals/Km. Todos ellos muestran concordancia con la tendencia de IMT en esas zonas. En el extremo sureste del mapa se ubica un máximo absoluto de aproximadamente -20 mGals con un gradiente de 0,76 mGals/Km, el cual pudiera ser debido a la presencia de metalavas y metatobas; también se apreciaron máximos relativos de aproximadamente -36 mGals al suroeste, noreste y en la parte central de la zona, posiblemente asociados a intrusiones graníticas de metagabros presentes en profundidad.

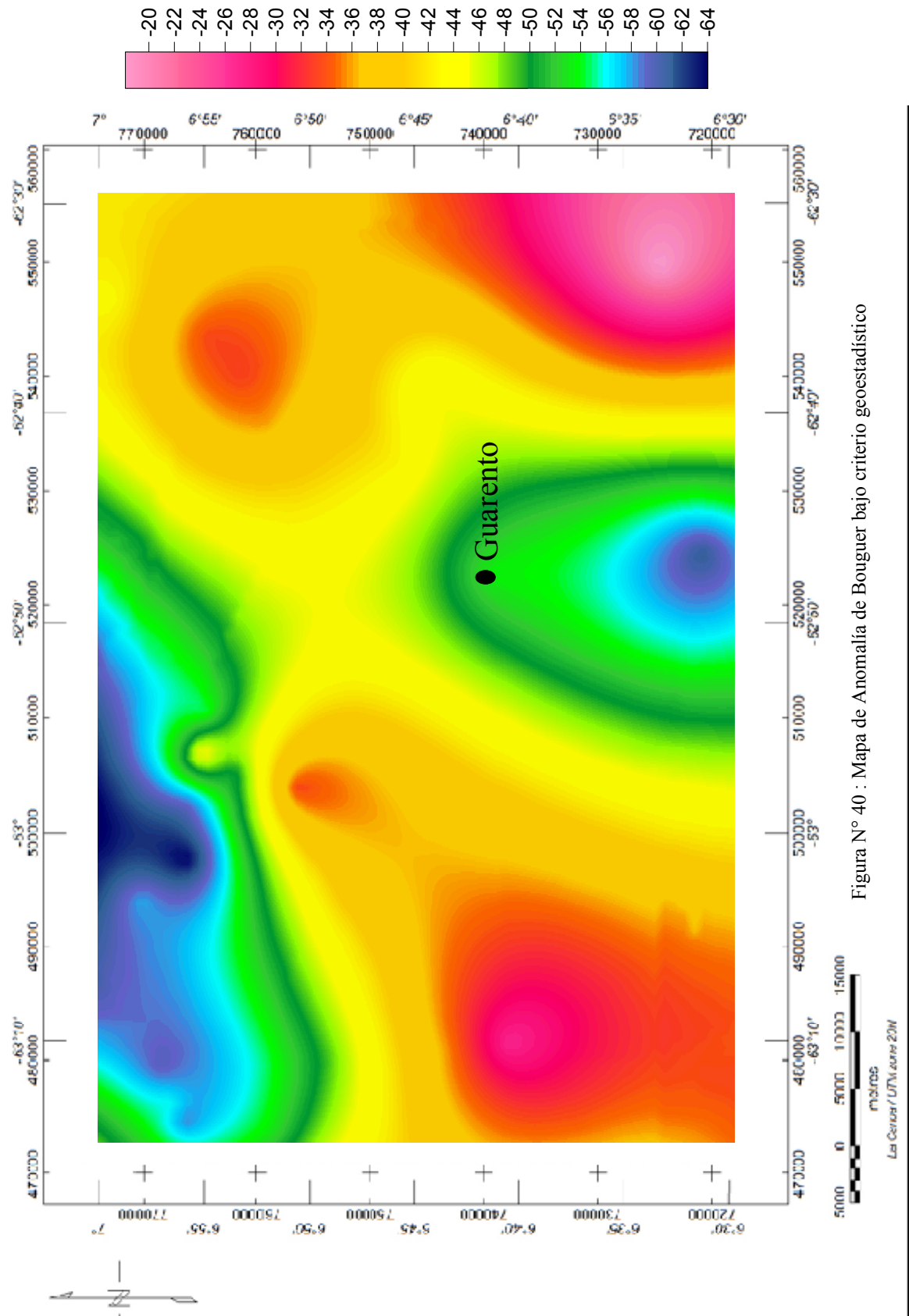


Figura N° 40 : Mapa de Anomalia de Bouguer bajo criterio geostatístico

5.3. MODELOS GEOLÓGICOS

5.3.1 SELECCIÓN DE LOS PERFILES

Con el fin de conocer la distribución de las estructuras presentes en profundidad, se construyeron tres modelos geológicos, los cuales dan una representación del subsuelo. Esta representación de las estructuras en profundidad se construye correlacionando datos geológicos y geofísicos; dentro de los datos geológicos que se tomaron en cuenta en este trabajo están: el mapa geológico-estructural generado en 1976 por Alirio Bellizzia y el mapa geológico producido por la U.S Geological Survey en 1993. En lo que respecta a los datos geofísicos los perfiles fueron amarrados a la línea sísmica N-S tomada de Schmitz (1998) (figura N° 10) y apoyados en el mapa de anomalías de Bouguer (figura N° 40), La ubicación de los perfiles seleccionados bajo las restricciones nombradas anteriormente puede ser observada en la figura N° 41

El perfil N° 1 presenta una orientación N-S y está ubicado en la parte occidental de la zona. Éste atraviesa las unidades Cachimbo, Aza y Caruto pertenecientes al Grupo Caroní y la Formación Chara que compone al Grupo Chiguao, todas estas forman parte del Cinturón de Rocas Verdes. El perfil N° 2 sigue la orientación N30° W y corta las unidades mencionadas anteriormente, adicional a éstas, corta los metagabros, metatobas, metalavas e intrusiones graníticas post-Supamo. En lo que respecta al perfil N° 3 con rumbo N15° E, se ubica en la parte oriental del área de estudio, pasa por intrusiones graníticas post- Supamo pre –Roraima.

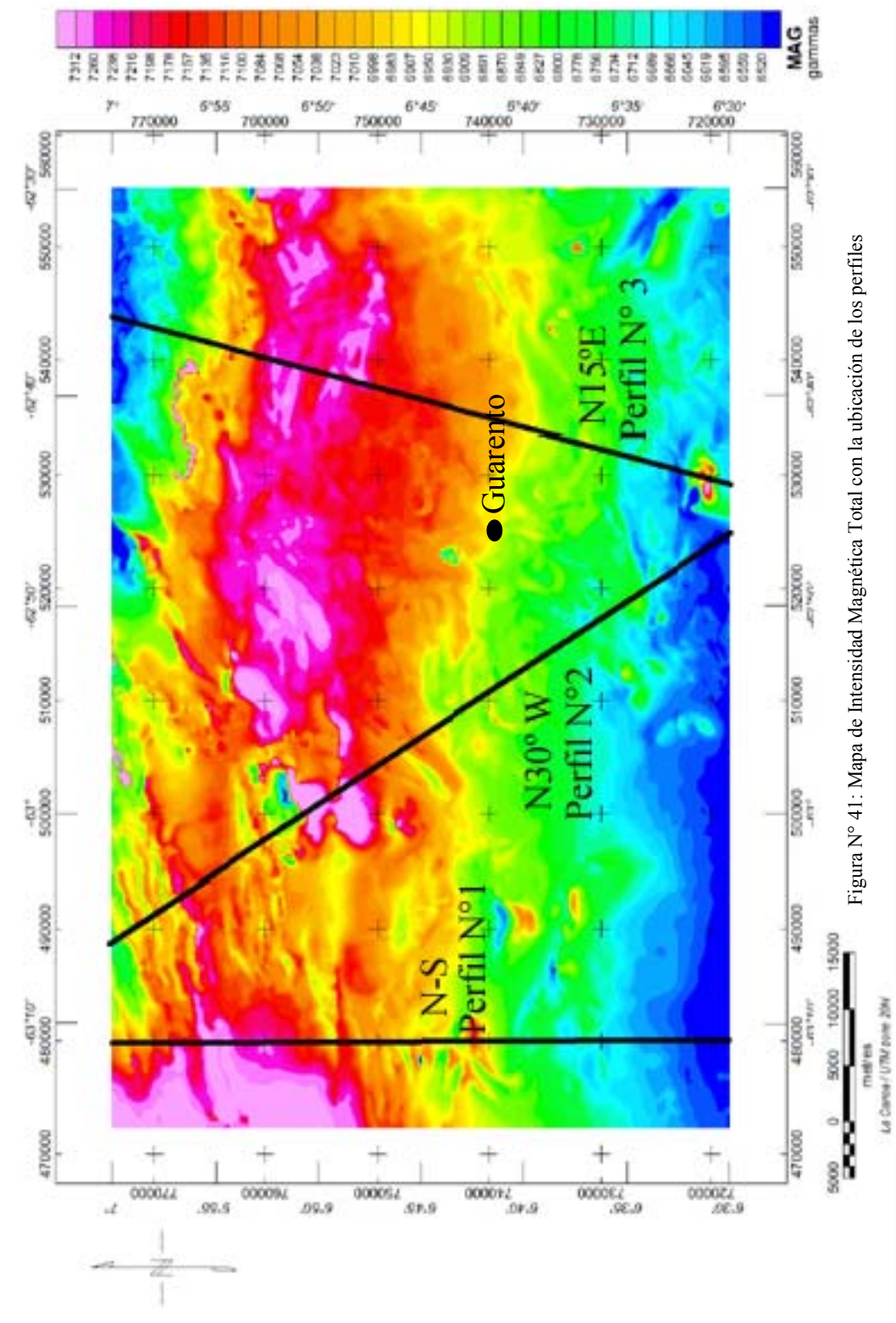


Figura N° 41: Mapa de Intensidad Magnética Total con la ubicación de los perfiles

En la tabla N° 11, se presentan las características de los perfiles interpretados.

Tabla N° 11: Información de los perfiles, ubicación en coordenadas geográficas y UTM, extensión de cada perfil y su orientación

Perfil 1

	Latitud Geografica (grado,min,seg)	Longitud Geografica (grado,min,seg)	Norte UTM (mts)	Este UTM (mts)	Extenc. (Km)	Rumbo
1A	7° 00' 00''	63° 11' 6''	773750.04	480000	55.5	N-S
1B	6° 30' 00''	63° 11' 6''	718481.70	480000		

Perfi 2

2A	7° 00' 00''	63° 6' 00''	773750.04	488954.8	66.19	N30°W
2B	6° 30' 00''	62°46'30''	718481.70	524877		

Perfi 3

3A	7° 00' 00''	62°36'00''	773750.04	544180.76	57.48	N15°E
3B	6° 30' 00''	62°44'7''	718481.70	529299.67		

5.3.2 ANÁLISIS ESPECTRAL DE LOS PERFILES PROPUESTOS

A continuación se presenta el análisis espectral de cada uno de los perfiles, los cuales se realizan con el fin de conocer las profundidades de las fuentes anómalas.

En la figura N° 42 se muestra el análisis espectral del perfil N°1, en el cual se puede observar que la fuente anómala más profunda se ubica a 4.3 Km, geológicamente puede ser atribuida al tope del Complejo Supamo. A 2.42 Km también se identifica la presencia de una fuente anómala, posiblemente asociada a intrusiones graníticas post-tectónicas pertenecientes al Complejo Supamo.

En el análisis espectral del perfil N° 2, la fuente anómala de mayor profundidad se ubica a 4.37 Km; de forma similar al perfil N° 1 ésta se asocia con el tope del Complejo Supamo. En cuanto a las zonas más someras ubicadas a 3 Km. de

profundidad aproximadamente, se puede inferir que la fuente anómala es causada por la presencia de intrusiones graníticas.

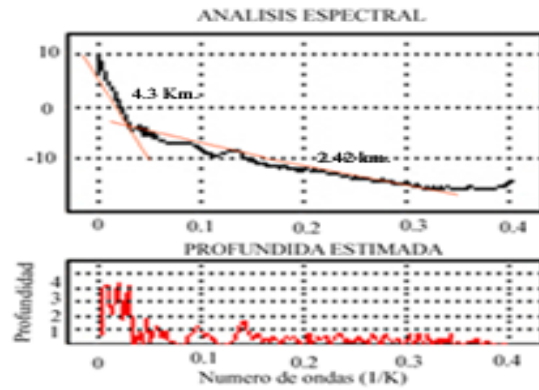


Figura N° 42: Análisis espectral del perfil N° 1

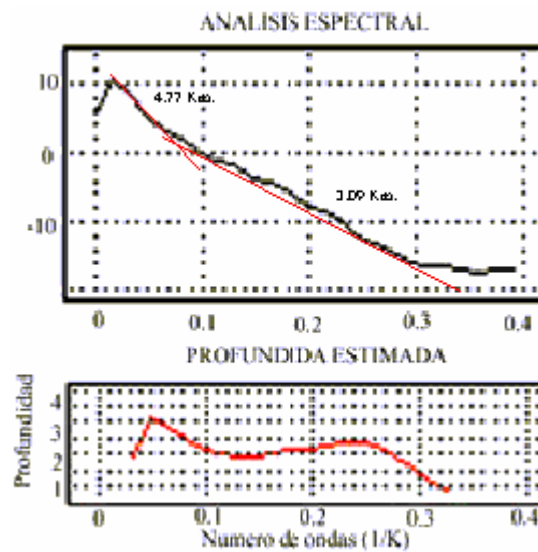


Figura N° 43: Análisis espectral del perfil N° 2

En lo que respecta al análisis espectral del perfil N° 3 la anomalía de mayor profundidad esta ubicada a 3 Km. de profundidad, y pudiera ser causada por la intrusión granítica post-Supamo.

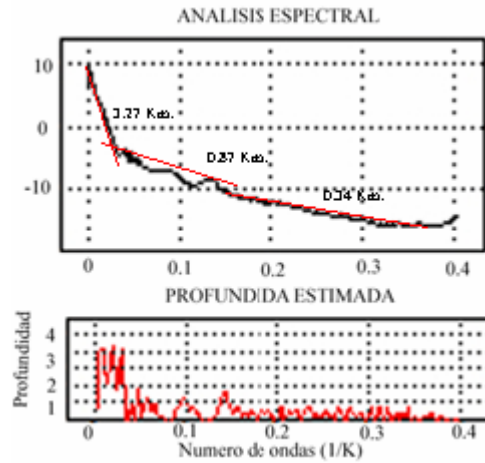


Figura N° 44: Análisis espectral del perfil N° 3

5.3.3 ELABORACIÓN DE LOS MODELOS GEOLÓGICOS

Una vez analizados y correlacionados los datos geológicos y geofísicos, se procede a realizar un modelo preliminar, para cada perfil, tomando en cuenta las respuestas magnéticas y gravimétricas. Estos modelos son utilizados para empezar el modelado gravimétrico y magnético, a través del GM-SYS del paquete Geosoft Inc..

Se caracterizan los cuerpos que constituyen el modelo mediante los valores de densidad y susceptibilidad magnética que mejor correspondan a las unidades geológicas propuestas (Tabla N° 12), para luego comenzar a iterar hasta que las curvas de anomalías gravimétrica y magnética calculadas, presenten un error del orden de 0.25 mGals y 10 γ respectivamente con respecto a la curva de anomalía observada. Los modelos finalizados se pueden observar en las figuras N° 43, 44, 45.

Tabla N° 12: Unidades geológicas, densidad y susceptibilidad magnética utilizada para la realización de los modelos geológicos

Unidad Geológica	Densidad (gr/cm ³)	Susceptibilidad Magnética (emu)
Manto Superior	3.2	0.036
Complejo Imataca	2.74	0.025
Grupo Supamo	2.0	0.00010
Granito post-Supamo	2.60	0.056
Metatobas y Metalavas máficas	2.97	0.000024
Matagabros	3.1	0.06
Grupo Santa Bárbara	2.64	0.001
Formación Aza	2.6	0.00005
Formación Chara	2.62	0.00003
Formación Cachimbo	2.67	0.000034
Granito Transamazónico	2.64	0.0002
Granito Parguacense	2.54	0.00002
Granito pre-Roraima	2.61	0.0003

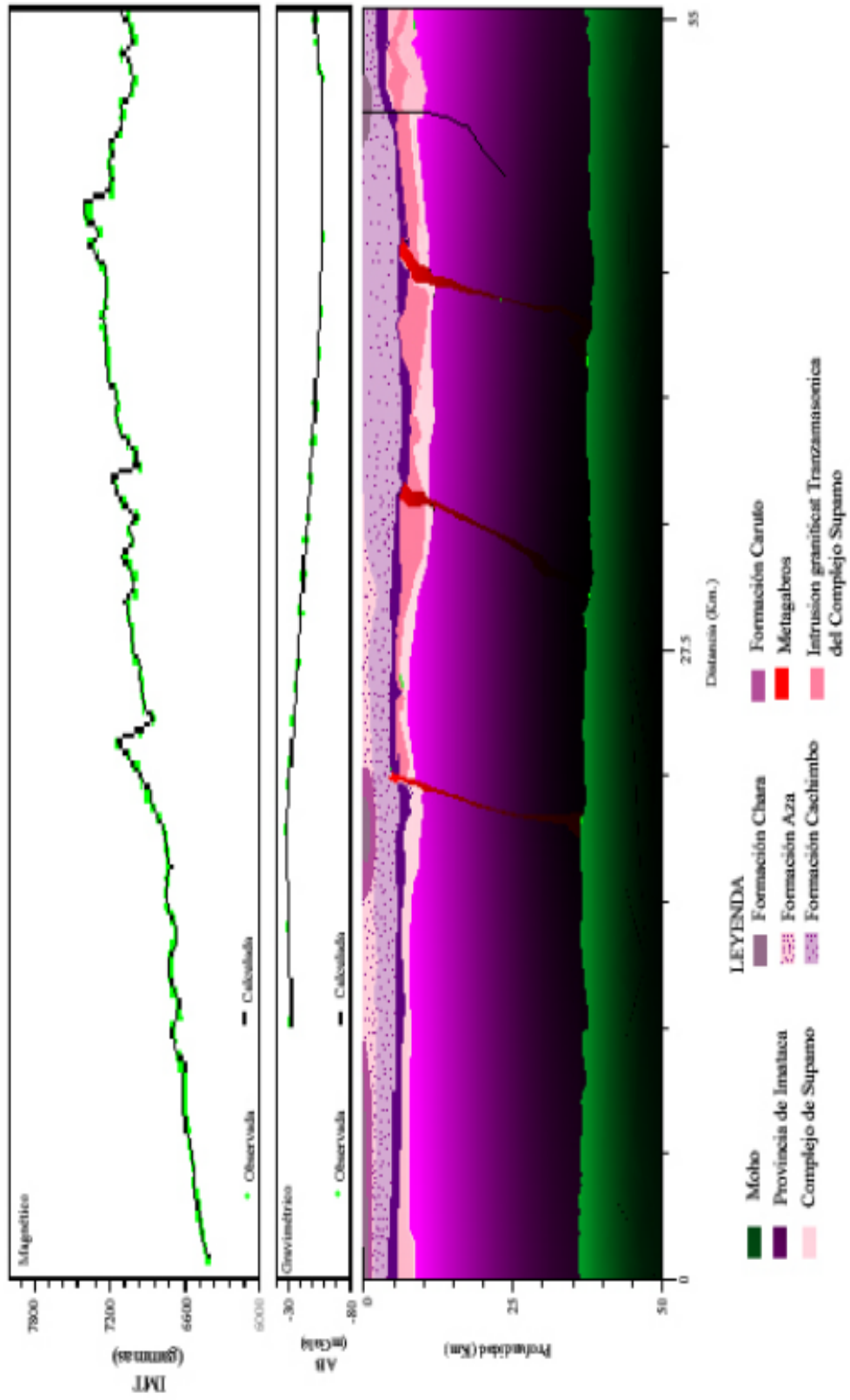


Figura N° 45: Modelo geológico propuesto N° 1

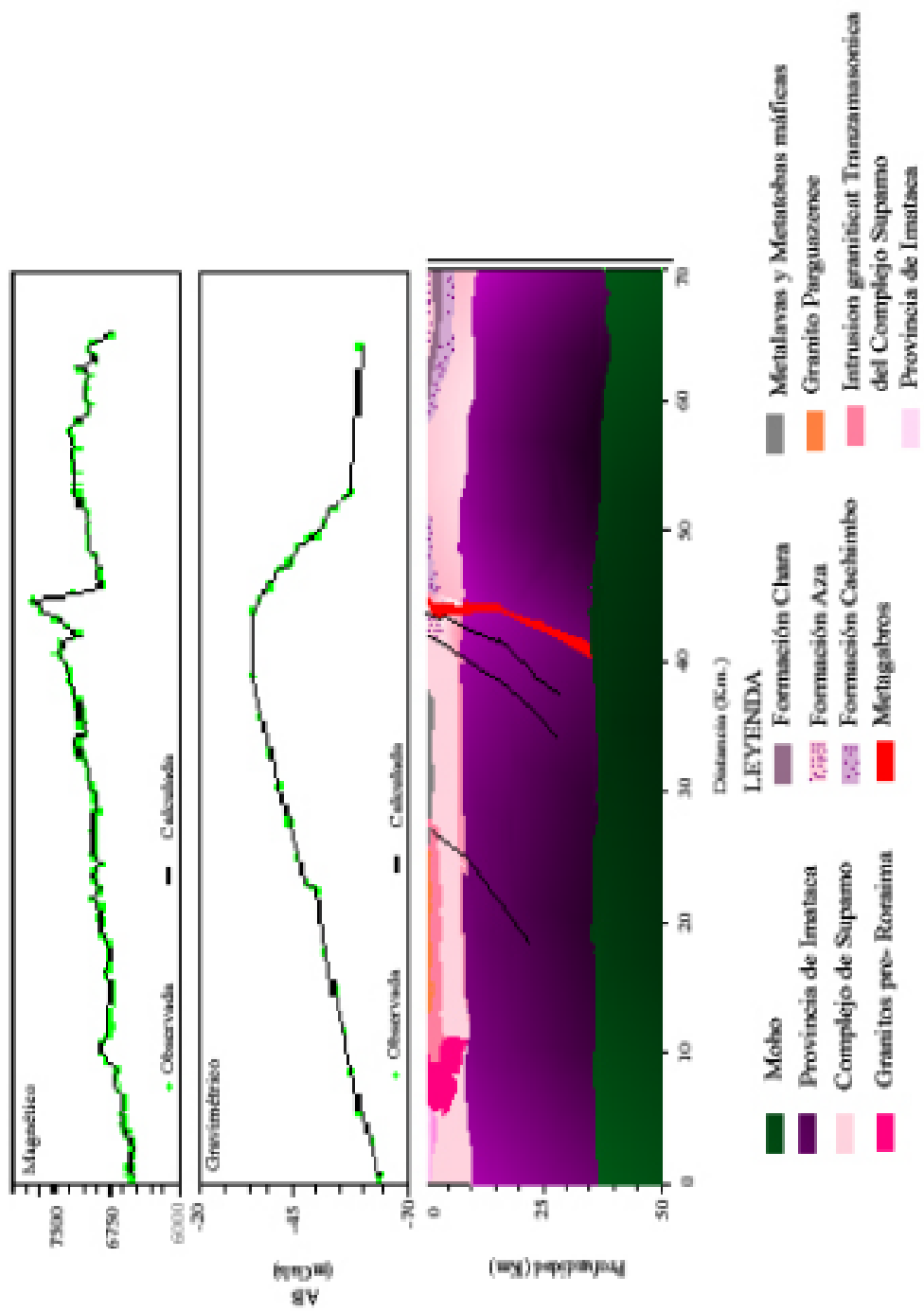


Figura N°46: Modelo geológico propuesto N° 2

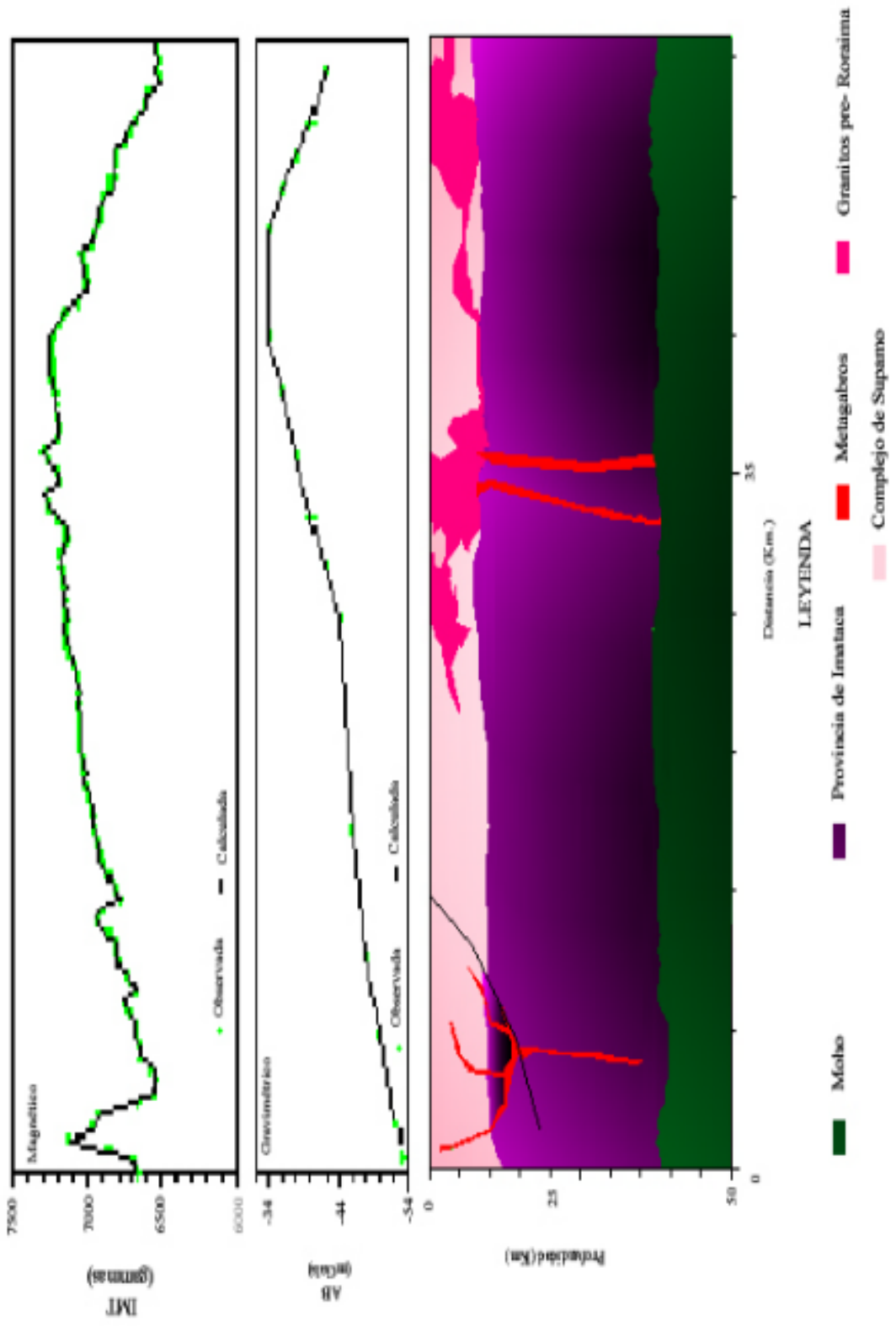


Figura N°47: Modelo geológico propuesto N° 3

5.3.4 ANÁLISIS DE LOS MODELOS GEOLÓGICOS PROPUESTOS

Previo al modelaje se determinó a través del IGRF el valor de inclinación magnética (36°) y declinación magnética (-7°), valores que fueron utilizados para la realización de los mismos

Las valores de densidad y susceptibilidad magnética que presentan las unidades geológicas propuestas para los tres modelos (tabla N° 12), varían en un rango de 2.6 a 3.3 gr/cm^3 respectivamente, y 0.06 a 0.00002 emus. La mayor respuesta de intensidad magnética se encontró en el modelo N° 2, con un valor de 7600 gammas. En el caso de la respuesta gravimétrica, la mayor anomalía es de -30 miligales y se presenta tanto en el modelo N° 1 como en el N° 2.

A lo largo de los tres perfiles, se presenta la interfase Moho – Imataca entre 35 - 37 Km. de profundidad, interpretado a partir del modelo sísmico de Chalbaud (2000). Mientras que el tope de Imataca se encuentra a 8 y 9 Km., según estimaciones de profundidad de fuentes anómalas (figura N° 35) realizada con la totalidad de los datos

En el caso del modelo N° 1, la profundidad estimada a partir del análisis espectral para el tope del Complejo Supamo se ubicó a aproximadamente 5 Km., éste se mantiene con un espesor entre 3 y 4 Km., dentro del cual se ubican intrusiones graníticas transamazónicas, que no son más que el mismo Complejo Supamo removilizado. Se aprecian tres unidades independientes de metagabros, las cuales, se encuentran intrusionando todas las unidades infrayacentes al Grupo Santa Bárbara hasta llegar al Moho. Estos metagabros son los responsables de las altas respuestas magnéticas locales, las cuales presentan magnitudes de IMT entre 200 y 400 gammas sobre el fondo regional.

En el caso del modelo N° 2 el máximo gravimétrico de carácter regional, es controlado por la elevación del Complejo de Imataca en la parte central del perfil,

tendencia que se presenta en el perfil de IMT. Hacia el sur, se aprecian granitos transamazónicos del Complejo Supamo intrusionados a su vez por granitos jóvenes de Parguaza, a la manera de un manto delgado supracortical.

En cuanto al modelo N° 3, se observan intrusiones graníticas post-Supamo- pre Roraima, las cuales afloran en el área y ocupan una gran parte del Complejo Supamo. Semejante a los modelos anteriores, se observa la unidad de metagabros intrusionando a través de la Provincia de Imataca cuyas respuestas son máximos locales en las respuestas magnéticas. También puede ser observada la falla del Río Supamo, la cual es posterior al Complejo Supamo, tiene un rumbo aproximado N35° E. Y se modela buzando al SW en el extremo SW al perfil.

Para finalizar, ya realizados los modelos magnéticos y gravimétricos se iteró hasta alcanzar que la curva de intensidad magnética calculada presentara un error menor a 10 gammas con respecto a la observada, mientras que la iteración, en el caso gravimétrico, se llevó a cabo hasta lograr un error de la curva de anomalía gravimétrica calculada con relación a la observada de 0.04 mGals.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La base de datos aeromagnéticos generada, a través del proceso de digitalización, fue útil para el desarrollo de un estudio magnético en la zona de estudio, permitiendo así obtener, de forma rápida y efectiva, interpretaciones tanto a nivel regional, como a nivel local.
- El estudio estadístico realizado arrojó que la base de datos aeromagnéticos, presenta un comportamiento homogéneo y los valores de la media, moda y mediana son muy semejantes entre si, lo cual esta ratificando que el comportamiento de la población es normal
- Al aplicar la geoestadística se observó un alto grado de continuidad anisotrópica en las direcciones de las curvas de intensidad magnética total
- La tendencia E-W del mapa de intensidad magnética total describe la dirección regional de las estructuras, esto se debe a los altos niveles de susceptibilidad y magnetización de las rocas presentes en el subsuelo.
- El análisis espectral se determinó que la fuente anómala más profunda se ubica a más de 7.9 Km., la cual se le atribuye el cambio litológico entre la Provincia de Imataca y el Complejo Supamo. También se encontraron anomalías entre 3 y 4 Km. de profundidad, asociadas a las intrusiones graníticas que se ubican entre el Complejo Supamo y La Provincia de Pastora
- El ajuste de las curvas de anomalías calculada y observada, se alcanzó con errores del orden de 10γ gammas en un rango de 7600 y 6000 γ para el

modelado magnético y 0.04 mGals para el modelado gravimétrico, en el rango de -20 y -64 mGals

- En los tres modelos se estableció la interfase Manto Superior-Imataca a una profundidad aproximada de 35 Km. El tope del Complejo Supamo se ubicó en 5 Km., mientras que en zonas más someras se observan una serie de intrusiones graníticas Post-Supamo que presentan respuestas de densidad de importancia. Las intrusiones de metagabros presentes en todos los modelos generan respuestas magnéticas de importancia.
- El contenido de hierro presente en la zona es alto, pero las posibilidades mineras de explotarlo son difíciles debido a la alta profundidad en la cual está situado.

RECOMENDACIONES

1.- Realizar un estudio geológico más detallado en campo, para de ésta manera conocer de forma más precisa la ubicación de las unidades litológicas que afloran y donde se ubican los cambios de unidades. Así como también recolectar mayor número de muestras de las unidades para poseer datos más certeros acerca de los valores de susceptibilidad magnética y densidad de las rocas presentes en la zona.

2.- Realizar adquisición de estaciones gravimétricas dentro del área, con una mejor distribución, para de esta forma poder generar un mapa de anomalía de Bouguer más detallado.

CONCLUSIONES GENERALES

- Base de datos de IMT unificada de toda la zona estudiada.
- Mapa de IMT de la zona investigada en los 6 TEG:
- Identificación de Unidades Litológicas y Estructurales, valores máximos extremos asociados a la Provincia de Imataca al NW y a la presencia de ultrabásicas en otras regiones, mínimos extremos asociados a la Provincia de Roraima.
- Identificación de estructuras hasta ahora no reportadas en la literatura geológica.
- Ubicación del depocentro de Roraima
- Proposición de zonas mineras prospectivas asociadas a los Cinturones de Rocas Verdes de Guasipati, Caroní, tanto en afloramiento como a nivel del subsuelo

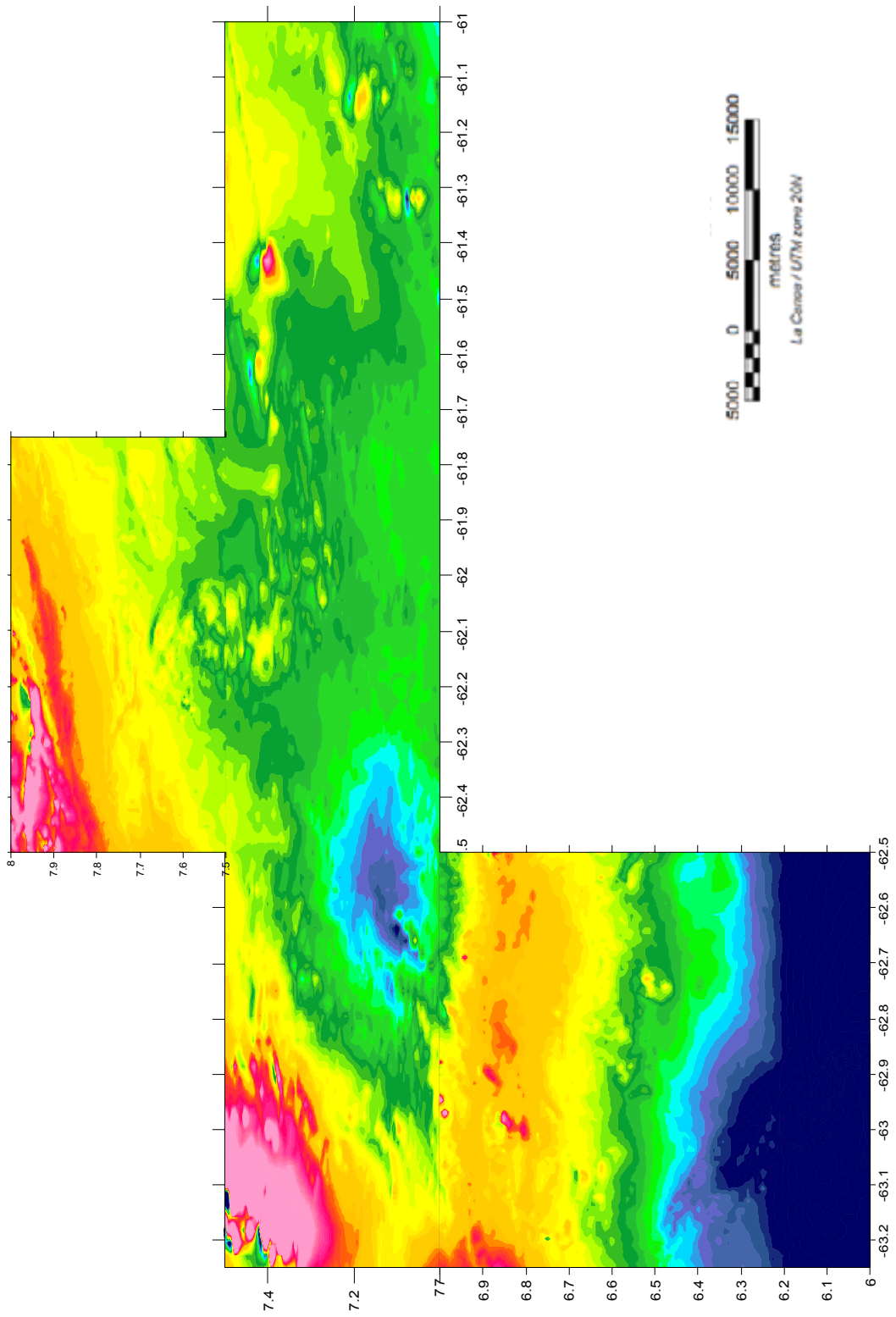


Figura N° 48: Mapa Magnético General del área

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- ASCANIO T,G. (1975). El complejo de Imataca en los alrededores de Cerro Bolívar , estado Bolívar , Venezuela . Conf. Geol. . Inter. –Guyana X, Belen – Pará .Brasil , Noviembre , 1975. Memoria: 181-179
- ANGEL, Erasmo. (2002) Análisis geoestadístico y espectral de datos aeromagnéticos de la zona centroccidental del Estado Bolívar. Trabajo Especial de Grado, departamento de Geofísica . Universidad Central de Venezuela. Caracas. 79p.
- BALSLEY, J. R., JR. (1946). The Airborne Magnetometer, *USGS Geophysical Investigation, Preliminary Report 3*
- BELLIZZIA. G. (1976). Mapa Geológico Estructural de Venezuela. Ministerio de Energía y Minas. Caracas. Escala 1:500000. Mapa geológico.
- DIXON WILFRID J., Y HASSEY JR FRANK J. (1966). Introducción al análisis estadístico. Editorial McGraw-Hill. España. 489p
- DOBRIN, Milton B. (1961) Introducción a la Prospección Geofísica. . Ediciones Omega. España 483p.
- DOBRIN, M.B. Y SAVIT, C.H. (1988). Introduction to Geophysical Prospecting. Editorial McGraw-Hill. 4th ed. New York. 867p;
- DOUGAN T.W. (1972) . Origen y metamorfismo de los gneis de Imataca y los Indios, rocas precámbricas de la región de los Indios – El Pilar. Estado Bolívar. Venezuela. Cong Geol Venez IV, Caracas , Noviembre 1969, Memorias Bol. Geol, Caracas , Publ. Esp.5, III: 137-1548.
- DOUGAN. (1977). The Imataca Complex near Cerro Bolívar Venezuela. A calcalkaline Archean protolith, *Precambrian Research*, 4 (3): 237-268.

- ESTUARDO G., Jorge. (1979) Modelo geoestadístico en la estimación de recursos y reservas de los Yacimientos del Estado Bolívar, Tesis del departamento de Geofísica. Universidad Central de Venezuela. 141p.
- FREUND JOHN E. Y SIMON GARY A. (1992). Estadística elemental. Editorial Pearson Educación. México 566p
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., J. ITURRALDE DE AROZENA y X. PICARD (1980) Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Caracas, Edit. Foninves, 1 tomos. 1021 p.
- GOOVAERTS, P. (1997). Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford Univ. Press, New York, USA. 349p.
- HURLEY, H. FAIRBAIRN, H. GOUDETTE, V. MENDOZA, C MARTIN BELLIZZIA Y A. ESPEJO. (1973-1977). Progress report on age dating in the Northern Guayana Shield. Cong. Latinoamericano local II, Caracas, Noviembre 1973, Resumen (1973); Memoria (1977); Bol., Geol., Caracas, Publi. Español. IV: 3035-3044.
- LIDDICOAT, W. J. RUCKMICK Y S. LUCHSINGER. (1970) Guía de la excursión A-1, Cerro Bolívar. Mem., VII Congr. Geol. Venezolano, Caracas, 1:55-58
- MARTIN, B. (1974). Paleotectónica del Escudo de Guayana Conf. Geol. Inter. – Guayanas IX. Ciudad Guayana, Venezuela. Mayo 1972, Memoria, Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 7, I: 371-388.
- McCANDLESS, G.L. (1961). Reconocimiento geológico de la Región Noroccidental del Estado Bolívar (Resumen) Asoc. Ven. Geol., Min. y Pet., Bol. Inform., 4 (10): 328

- MÉNDEZ (1968). Revisión de la estratigrafía de la Provincia de Pastora según el estudio de la región de Guasipati, Guayana Venezolana .Bol, Geol., Caracas, 9 (19): 309-338
- MENDOZA, V. (1973).Evolución tectónica del Escudo de Guayana (Resumen). Cong. Latinoamericano de Geología II, Caracas, Noviembre 1973, Resúmenes: 75.
- MENDOZA, L. MARINO, F. BARRIOS, D. RIVAS, J. MARTINEZ, P. LIRA, G SORDI Y S. GHOSH. (1977) Geología de la parte norte del Territorio Federal Amazonas, Venezuela (Informe de Progreso). Cong. Geol. Venez. V, Caracas, Noviembre 1977, Memori, A. Espejo et at., Editores. Min. Energía y Minas. Soc. Venez. Geol., I: 363-404.
- MONTGOMERY. CW, P. HURLEY, H. FAIRBAIR Y H. GOUDETTE. (1977). Equilibrated domain`s and combined Rb-Sr and U-Pb systematics in the history of a granulite. 21st Progress Report for 1974 -1976, Mass. Inst. Technol Geocronology Lab. RM 54-1122, Massachussets, USA.
- PARASNIS, D.S. (1970). Principios de Geofísica Aplicada. Paraninfo. Madrid-España. 208p.
- RÍOS, F. J. H. (1972). Geología de la región de Caicara, Estado Bolivar. Cong. Geol. Venez. IV. Caracas, Noviembre 1969, Memoria, Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 5, III:1759-1782
- RÍOS, F. J. H. (1974). Geología de la región Upata-El Palmar – Villa Lola. Conf. Geol. InterGuayana IX, Ciudad Guayana, Venezuela, Mayo 1972, Memoria. Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 6:354-371.
- ROMERO SANZ, A. (1995).Prospección magnética en áreas de intenso ruido como herramienta de análisis a la ingeniería civil. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona.

- SIERRA, Roger J. (2002) Procesamiento y Reinterpretación de datos aeromagnéticos del sur de Puerto Ayacucho. Tesis del departamento de Geofísica . Universidad Central de Venezuela. 106 p.
- SHORT K. (1670). Guía de la excursión A-2 carretera Ciudad Piar – Ciudad Bolívar, Venezuela. Mem., VII Congr. Geol. Venezolano, Caracas. 1:59-62
- TEPEDINO, V., 1985-a. Geología de la región del Bajo Caura, Estado Bolívar, Bol. Geol., Pub. Esp. 10, p. 151-162.
- TEPEDINO, V., 1985-b. Geología de la región del medio y Alto Caura. Estado Bolívar, *Bol. Geol.*, Pub. Esp. 10. p. 140-150.
- UDIAS VALLINA, A. J MEZCUA RODRÍGUEZ. (1997). Fundamentos de Geofísica. Alianza Editorial. Madrid. 419p
- WYNN JEFFREY C. Y K BOND. (1993). Simple Bouguer Gravity Anomaly Mapa of the Venezuelan Guayana Shield. Boletín 2062. Caracas. Escala 1:100.000. Mapa gravimétrico
- WYNN JEFFREY C. PENNIS P. COX, FLOYEL GRAY, Y PAUL G. SCHRUBEN (1993). Geologic and tectonic map of the Venezuelan Guayana .Boletín 2062. Caracas. Escala 1:100.000. Mapa geológico.

Consultas electrónicas

- BERTORELLI, José L. Rocas industriales ígneas y metamórficas Disponible: <http://www.fundacite.org.gov.ve/rocas/capitulo07.html>. [Consulta: 2004 Enero 20].
- BLASCO SANJOSÉ, ANDRADA B. ANTONIO, LÓPEZ G AURORA “Mapping interactivo “Disponible:

http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=147.
[Consulta 2004 Febrero]

CATALDI Aldo. TRX Engineering & Herat Sciences. Disponible:
http://www.trxconsulting.com/M_magnetismo_carpeta.htm. [Consulta 2003,
noviembre 20]

DERAISME Jacques, José Terrones. Técnicas geoestadísticas no-lineales para la
estimación de reservas recuperables Estudio de un caso práctico. Disponible:
http://www.geovariances.fr/publications/article15/Estudio_Infomina2002.pdf
[Consulta 2004, abril 22]

GALLETTI Jonatan. Todo sobre el planeta. Disponible:
<http://www.todoelsistemasolar.com.ar/tierra.htm>. [Consulta: 2003, noviembre
20]

GRIEM-KLEE. SUSSANE. Métodos Magnéticos “Universidad de Atacama:
Servicios” Disponible:
“[http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/
TEXT/05001magnet.html#5.%20Método%20magnético](http://plata.uda.cl/minas/apuntes/Geologia/EXPLORAC/TEXT/05001magnet.html#5.%20Método%20magnético). [Consulta: 2003,
diciembre 10]

MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS. “Dirección General Sectorial de
SERVIGEOMIN. Dirección de Geología.”.Disponible:
<http://www.ingeomin.gov.ve/Geologia%20vzla/sinopsis.htm>’ 1997 [Consulta
2003 noviembre 23]

MINISTERIOS DE RELACIONES EXTERIORES DE LA
REPUBLICABOLIVARIANA DE VENEZUELA Disponible:
<http://www.mre.gov.ve/esequibo/capituloIII-c.htm> [Consulta 2003 noviembre
23]

MORAL, F.J. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales.
Ecosistemas 2004/1 Disponible:
<http://www.aet.org/ecosistemas/041/revision3.htm>. [Consulta: 2004, abril 22]

TANNURE, Claudia L., Mazza Silvia M. Geoestadística: Disponible:
<http://www1.unne.edu.ar/cyt/2003/comunicaciones/05-Agrarias/A-005.pdf> .
[Consulta 2004, abril 22]

APÉNDICE A

ESTADÍSTICA

La estadística es una colección de métodos para planificar y realizar experimentos, obtener datos y luego analizar, interpretar, y formular una conclusión basada en esos datos. Es la ciencia encargada de recopilar, organizar, analizar e interpretar información numérica o cualitativa, de manera que pueda llevar a conclusiones válidas.

La estadística se puede definir como la ciencia que recopila, organiza, analiza e interpreta la información numérica o cualitativa, mejor conocida como datos, de manera que pueda llevar a conclusiones válidas. La estadística puede clasificarse como:

La estadística descriptiva es la técnica que se va a encargar de la recopilación, presentación, tratamiento y análisis de los datos, con el objeto de resumir, describir las características de un conjunto de datos y por lo general toman forma de tablas y gráficas.

La estadística inferencial es la técnica mediante la cual se sacan conclusiones o generalizaciones acerca de parámetros de una población basándose en el estadígrafo o estadígrafos de una muestra de población.

MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL

Las medidas de tendencia central tienen como objetivo:

- Mostrar en qué lugar se ubica la persona promedio o típica del grupo.
- Sirve como un método para comparar o interpretar cualquier puntaje en relación con el puntaje central o típico.
- Sirve como un método para comparar el puntaje obtenido por una misma persona en dos diferentes ocasiones.
- Sirve como un método para comparar los resultados medios obtenidos por dos o más grupos.

Las medidas de tendencia central más comunes son: la media aritmética, la mediana y la moda

La media aritmética: Es una medida totalmente numérica la cual sólo puede calcularse en datos de características cuantitativas, para este cálculo se toman en cuenta todos los valores de la variable. La media aritmética es altamente afectada por valores extremos, no puede ser calculada en distribuciones de frecuencia que tengan clases abiertas, a su vez ella es única, o sea, un conjunto de datos numéricos tiene una y solo una media aritmética. La media aritmética se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$X = \frac{\sum x}{n}$$

En donde: \sum : suma de todos los datos

x: todos y cada uno de los datos

n: número total de datos

La mediana Se define como aquel valor que no es superado ni supera a más de la mitad de la n observaciones, arregladas en orden de magnitud creciente o decreciente, en su cálculo no se incluyen todos los valores de la variable, esta no es afectada por valores extremos. Para determinar la mediana de un conjunto de datos, el conjunto tiene que estar ordenado de forma ascendente o descendente. En un conjunto con un número impar de datos, la mediana es el dato en el medio de la distribución ordenada.

$$Mediana = X_{\left(\frac{n+1}{2}\right)}$$

La parte de $[n/2 + 1/2]$ representa la posición.

La moda: La moda es una medida muy natural para describir un conjunto de datos; su concepto se adquiere fácilmente: es la altura más corriente, es la velocidad más común, etc. Además tiene la ventaja de que no se ve afectada por la presencia de valores altos o bajos.

La principal limitación está en el hecho de que requiere un número suficiente de observaciones para que se manifieste o se defina claramente.

Otros inconvenientes son que puede darse el caso de que una determinada serie no tenga moda o que tenga varias modas.

De estas tres medidas de tendencia central, la media es reconocida como la mejor y más útil de las medidas de tendencia central, por las siguientes razones:

- Los puntajes contribuyen de manera proporcional al hacer el cómputo de la media.
- Es la medida de tendencia central más conocida y utilizada.
- Las medias de dos o más distribuciones pueden ser fácilmente promediadas mientras que las medianas y las modas de las distribuciones no se promedian.
- La media se utiliza en procesos y técnicas estadísticas más complejas mientras que la mediana y la moda en muy pocos casos.

Sin embargo, cuando en una distribución se presentan casos cuyos puntajes son muy bajos o muy altos respecto al resto del grupo, es recomendable utilizar la mediana o la moda. (Porque dada las características de la media, esta es afectada por los valores extremos. Se puede optar por no tomar en cuenta tales valores extremos y excluirlos de la observación, si se considera indispensable utilizar la media).

MEDIDAS DE DISPERSION

Se llaman medidas de dispersión aquellas que permiten retratar la distancia de los valores de la variable a un cierto valor central, o que permiten identificar la concentración de los datos en un cierto sector del recorrido de la variable. Se trata de coeficiente para variables cuantitativas

Recorrido, rango o amplitud: se obtiene como la diferencia de los valores del dato mayor menos el dato menor. Realmente no es una medida muy significativa en la mayoría de los casos y viene dado por la siguiente formula

$$R = X_{\max} - X_{\min}$$

Un valor pequeño del recorrido indica poca dispersión, puesto que la variable toma valores en un intervalo pequeño. Sin embargo, un valor grande puede indicar mucha dispersión o la existencia de valores extremos. Su principal propiedad es su facilidad de

cálculo y que sus unidades son las mismas que las de la variable, sin embargo, posee varios inconvenientes: Sólo considera los valores extremos de la distribución, no hace referencia a ninguna medida de tendencia central, no tiene en cuenta la forma de la distribución.

Recorrido intercuartílico es la diferencia entre tercer y primer cuartiles. Un valor pequeño del recorrido intercuartílico indica poca dispersión. Sin embargo, un valor grande puede indicar mucha dispersión o la existencia de valores extremos. Como los cuartiles están poco afectados por la existencia de valores extremos, un recorrido intercuartílico pequeño frente a un recorrido grande indicará la existencia de valores extremos. Si ambos son grandes, podemos asegurar que existe dispersión.

Varianza: La varianza de una muestra X_1, X_2, \dots, X_n de una variable o característica X , se define como la media del cuadrado de las desviaciones de las observaciones con respecto al promedio de esos datos. La varianza muestral entonces queda definida como:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]$$

El inconveniente de la varianza es que por efecto del cuadrado de la definición no se mide en las mismas unidades que los datos por tanto, es difícil de interpretar. La solución consiste en definir la **desviación típica** o **desviación estándar** como la raíz cuadrada de la varianza.

Desviación típica o estándar: La desviación estándar es la medida de dispersión más usada en estadística, tanto en aspectos descriptivos como analíticos. Se define por la raíz cuadrada positiva de la varianza

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right]}$$

Este estadístico se mide en la misma unidad que la variable por lo que se puede interpretar mejor,

El histograma o el diagrama de barras, nos permitirán determinar la existencia o no de dispersión y la posible existencia de valores atípicos, es decir, Un histograma es una representación gráfica de las frecuencias observadas de distintos sucesos de un experimento. Cada suceso se representa en el histograma mediante una barra cuya área representa la frecuencia relativa del suceso que representa. A la vista de un histograma podemos saber que sucesos ocurrieron más y menos a menudo en un experimento dado.

Diagramas de Caja

El diagrama de caja (*Boxplot*) es una representación gráfica de los datos que permite analizar conjuntamente una serie de medidas numéricas, tales como el mínimo, el máximo, la mediana y los cuartiles. En este gráfico es posible observar características de los datos como simetría y posibles observaciones atípicas.

GEOESTADÍSTICA

La geoestadística se desarrolló en la década de los 60, siendo el resultado de las necesidades de la evaluación de una metodología para reservas recuperables en depósitos mineros, más tarde en 1980, la geoestadística fue considerada esencialmente como una medida que describen modelos espaciales e interpolación de valores de atributos de interés en submuestras de localidades, (Goovaerts,1997).

La Geoestadística es la ciencia que se encarga del estudio de las variables numéricas distribuidas en el espacio y de la adecuada interpretación y evaluación de dichas variables. Las funciones esenciales de la Geoestadística en la cual tiene más desarrollo son, particularmente: en el contorno de mapas y el modelaje, y en la simulación de heterogeneidad interna de las reservas naturales.

Técnica del kriging.

Los orígenes de la geostatística están en la estimación de un atributo en las situaciones no muestreadas. La técnica del kriging proporciona una estimación lineal como una función de los valores de la variable en las localizaciones cercanas. El kriging tiene dos ventajas principales con respecto a otros estimadores lineales: a) los pesos usados en la estimación son determinados como una función entre la distancia estructural (el variograma) del valor y la localización a ser estimada y la distancia estructural (el variograma) de cualquier otro par de datos, y b) la estimación se acompaña por una cuantificación de incertidumbre, es decir la varianza del kriging.

No sólo se consigue una estimación que tiene en cuenta la posible anisotropía de la continuidad espacial del atributo, considerando para la redundancia de los datos y con una medida de la confianza que puede ser depositado en la estimación.

Variograma:

El variograma es una herramienta poderosa para analizar los modelos de variabilidad espaciales de un fenómeno. Interpretándolo como una medida vectorial de distancia estructural, es posible usarlo para descubrir direcciones de máxima y mínima continuidad. También permite descubrir la conducta del fractal potencial, o hacer una estimación cuantitativa sobre el grado de suavidad desplegada por la variable.

APÉNDICE B

TRANSFORMACIÓN DE COORDENADAS RELATIVAS A COORDENADAS ABSOLUTAS

Para la transformación de las coordenadas relativas (obtenidas en AUTOCAD2002) en coordenadas absolutas, se utilizó la siguiente relación:

Para el eje de las x:

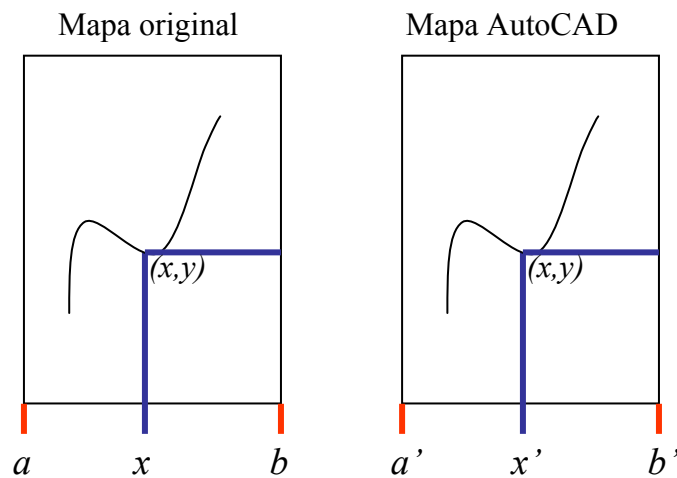


Figura N° 46: Ubicación de los valores necesarios para el cálculo de las coordenadas absolutas en el eje x

Tenemos que las coordenadas relativas vienen dadas por a' , b' y x' , y las coordenadas absolutas son a , b y x , como se puede visualizar en la figura N° 46, Por lo q se cumple

la siguiente relación:

$$\frac{b-a}{x-a} = K_1 \quad (\text{B.1})$$

$$\frac{b'-a'}{x'-a'} = K_2 \quad (\text{B.2})$$

$$K_1 = K_2$$

$$\begin{aligned}
 b - a &= (x - a) * \frac{b' - a'}{x' - a'} \\
 b - a &= (x - a) * K_2 \\
 b - a &= xK_2 - aK_2 \\
 b - a + aK_2 &= xK_2
 \end{aligned}$$

$$\frac{b - a + (a * K_2)}{K_2} = x \tag{B.3}$$

Ahora para el eje y

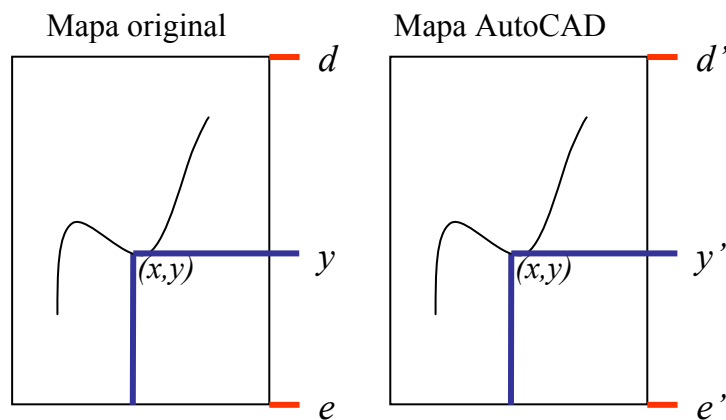


Figura N°47: Ubicación de los valores necesarios para el cálculo de las coordenadas absolutas en el eje y

Tenemos que las coordenadas relativas vienen dadas por d' , e' y y' , y las coordenadas absolutas son d , e y y , como se puede visualizar en la figura N° 47, Por lo q se cumple la siguiente relación:

$$\frac{d - e}{y - e} = K_1 \tag{B.4} \quad \frac{d' - e'}{y' - e'} = K_2 \tag{B.5}$$

$$K_1 = K_2$$

$$\begin{aligned}
 d - e &= (y - e) * \frac{d' - e'}{y' - e'} \\
 d - e &= (y - e) * K_2 \\
 d - e &= yK_2 - eK_2 \\
 d - e + eK_2 &= yK_2 \\
 \frac{d - e + (e * K_2)}{K_2} &= y
 \end{aligned}$$

$$\tag{B.6}$$

APÉNDICE C

CÁLCULO DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN CAMPO

Cálculo del volumen del envase:

Diámetro del envase: 1 cm

Longitud: 2,5 cm

$$V = \Pi * r^2 * h \quad (C.1)$$

En donde r^2 = el radio del frasco

h = la longitud del frasco

Al introducir los valores tenemos el siguiente:

$$V = 3.14 * (0.5cm)^2 * 2.5cm = 1.9625cm^3$$

Cálculo de susceptibilidad:

Para el cálculo de la susceptibilidad se procedió de la siguiente forma: primero se tomaron cinco valores de en el susceptibilímetro por cada muestra, una vez obtenidos estos valores, se realizó un promedio de los mismos (tabla Nª13) y a este promedio se le aplicó la fórmula que se muestra a continuación

$$X = k * \frac{\Delta E}{V * E_0} \quad (C.2)$$

En donde: $X \rightarrow$ Susceptibilidad por unidad de volumen en cgs.

$k \rightarrow$ Constante $3.5 * 10^2 \text{ cm}^3$

$\Delta E \rightarrow$ Voltaje de la parte real eje X en mv.

$V \rightarrow$ Volumen de la muestra en cm^3

$E \rightarrow$ Voltaje alimentador del puente 10.26 V (Rms)

Aplicada esta formula se obtienen los valores de susceptibilidad en c.g.s estos se pueden observar en la Tabla N°13

Tabla N° 13: Mediciones realizadas con el susceptibilímetro, promedio, peso inicial y final de los envases

Muestra	Mediciones (mv)	Promedio en mv	Promedio en V	Perso inic	Peso final
M - 1	0,004 0,001 0,002 0,001 0	0,0016	0,0000016	3,5308	6,2969
M - 2	0,005 0,008 0,006 0,005 0,002	0,0052	0,0000052	3,57	7,376
M - 3	0,049 0,048 0,045 0,047 0,048	0,0474	0,0000474	3,5167	6,86
M - 4	0,012 0,014 0,013 0,013 0,01	0,0124	0,0000124	3,5113	6,5751
M - 5	0,006 0,008 0,006 0,007 0,006	0,0066	0,0000066	3,52	7,4672
M - 6	0,044 0,047 0,044 0,048 0,043	0,0452	0,0000452	3,53	7,5
M - 7	0,004 0,005 0,005 0,003 0,003	0,004	0,000004	3,5508	6,377
M - 8	0,289 0,29 0,29 0,294 0,29	0,2906	0,0002906	3,5216	7,7845

Muestra	Mediciones (mv)	Promedio en mv	Promedio en V	Perso inic	Peso final
M - 9	0,013 0,01 0,012 0,013 0,012	0,012	0,000012	3,5314	8,7761
M - 10	0,01 0,008 0,008 0,008 0,1	0,0268	0,0000268	3,6454	7,8122
M - 11	0,004 0,003 0,004 0,004 0,003	0,0036	0,0000036	3,6185	5,8974
M - 12	0,013 0,013 0,012 0,013 0,014	0,013	0,000013	3,565	6,5945
M - 13	0,004 0,004 0,003 0,003 0,002	0,0032	0,0000032	3,5838	7,47
M - 14	0,003 0,004 0,003 0,005 0,004	0,0038	0,0000038	3,5785	5,9727
M - 15	0,006 0,004 0,003 0,004 0,004	0,0042	0,0000042	3,59	7,4619
M - 16	0,005 0,001 0,002 0,003 0,003	0,0028	0,0000028	3,64	5,7141
M - 17	0,005 0,003 0,002 0,004 0,004	0,0036	0,0000036	3,6022	7,29

Muestra	Mediciones (mv)	Promedio en mv	Promedio en V	Perso inic	Peso final
M - 18	0,119 0,12 0,12 0,119 0,121	0,1198	0,0001198	3,5944	7,06
M - 19	0,003 0,003 0,003 0,003 0,003	0,003	0,000003	3,5505	6,6057
M - 20	0,002 0,001 0,004 0,003 0,002	0,0024	0,0000024	3,482	6,1269
M - 21	0,009 0,007 0,007 0,007 0,007	0,0074	0,0000074	3,5234	6,6758

APÉNDICE D

ESTACIONES GRAVIMÉTRICAS UBICADAS DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO

Tabla N° 14: Estaciones gravimétricas ubicadas dentro del área de estudio

Latitud	Longitud	AB (miligales)
63.026944	6.929444	-64.022595
62.783333	6.525000	-61.402645
63.191944	6.951667	-59.657867
62.981944	6.928611	-59.110340
63.233333	6.932500	-58.710522
63.057778	6.966111	-57.833931
63.219444	6.942500	-55.811968
63.186667	6.870278	-55.085738
62.909167	6.916111	-54.960369
62.800000	6.691667	-53.562707
63.241667	6.862500	-53.042286
62.958333	6.892500	-50.596241
62.935833	6.929167	-50.188070
63.184444	6.819167	-48.928829
62.711944	6.720556	-46.568981
62.648611	6.738611	-45.332191
62.942500	6.919444	-43.492012
62.583333	6.990833	-43.246775
62.709444	6.765556	-42.307333
63.057500	6.807500	-40.021857
62.678056	6.793611	-39.864500
62.678056	6.830833	-39.171906
62.596667	6.954722	-38.870309
63.177500	6.727500	-35.977770
62.680278	6.869444	-35.590892
62.612778	6.914444	-33.291187
62.970833	6.843611	-33.113282
62.644167	6.887222	-33.007244
63.171944	6.677500	-26.692074
62.558333	6.558333	-17.712075

APÉNDICE E

TRANSFORMADA DE FOURIER UTILIZADA EN EL ANÁLISIS ESPECTRAL

La ecuación general de Fourier viene dada:

$$f(x) = \sum_{n=1}^N A_n f_n(x) \quad (D.1)$$

Cuando se toma $f_i(x)$ como base ortogonal de senos y cosenos, la ecuación anterior se convierte en:

$$f(x) = (a_0/2) + \sum_{n=1}^N \{a_n \cos(nx) + b_n \operatorname{sen}(nx)\} \quad (D.2)$$

A la ecuación (D.2) la multiplicamos por $\cos(nx)$ e integramos entre π y $-\pi$ y se tiene como resultado lo siguiente :

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} \cos(nx) dx + \sum_{n=1}^N \left\{ a_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) \cos(nx) dx + b_n \int_{-\pi}^{\pi} \operatorname{sen}(nx) \cos(nx) dx \right\} \quad (D.3)$$

El primer término de la ecuación (D.3) cumple la siguiente igualdad:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} \cos(nx) dx = \frac{a_0}{2n} [\operatorname{sen}(nx)] \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0 \quad (D.3.1)$$

Mientras que para el segundo termino de la ecuación (D.3) se tiene lo siguiente:

$$\sum_{n=1}^N a_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) \operatorname{con}(nx) dx = \sum_{n=1}^N a_n \int_{-\pi}^{\pi} \frac{1}{2} (1 + \cos 2(nx)) dx = \sum_{n=1}^N a_n \frac{1}{2n} \operatorname{sen} 2(nx) \Big|_{-\pi}^{\pi} - \frac{1}{2n} \operatorname{sen} 2(nx) \Big|_{-\pi}^{\pi} = \sum_{n=1}^N a_n 2\pi \quad (D.3.2)$$

En el caso del tercer término de la ecuación (D.3) se cumple lo siguiente:

$$\sum_{n=1}^N b_n \int_{-\pi}^{\pi} \text{sen}(nx) \cos(nx) dx = \sum_{n=1}^N b_n \frac{1}{2n} \text{sen}^2(nx) \Big|_{-\pi}^{\pi} \quad (\text{D.3.3})$$

Tomando en cuenta la siguiente igualdad: $\text{sen}(n\pi) = \text{seno}(-n\pi) = 0$

Por lo que la ecuación (D.3.3) es igual a 0

Al colocar las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 dentro de la ecuación (D.3) se obtiene:

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = \sum_{n=1}^N a_n 2\pi \quad (\text{D.4})$$

Si se sustituye π por λ en la ecuación (D.4) resulta:

$$\int_{-\lambda}^{\lambda} f(x) \cos(nx) dx = \sum_{n=1}^N a_n 2\lambda \quad (\text{D.4.1})$$

Para cuando se tiene el valor discreto, queda:

$$\sum_{i=1}^M f(x_i) \cos(nx_i) \Delta x_i = \sum_{n=1}^N a_n 2\lambda \quad (\text{D.5})$$

A la ecuación (D.2) la multiplicamos por $\text{sen}(nx)$ e integramos entre π y $-\pi$ se tiene:

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \text{sen}(nx) dx = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{a_0}{2} \text{sen}(nx) dx + \sum_{n=1}^N \left\{ a_n \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) \text{sen}(nx) dx + b_n \int_{-\pi}^{\pi} \text{sen}(nx) \text{sen}(nx) dx \right\} \quad (\text{D.6})$$

Si resolvemos todas las integrales de la ecuación (D.6) resulta lo siguiente:

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x) \text{sen}(nx) dx = \sum_{n=1}^N b_n 2\pi \quad (\text{D.7})$$

Se realiza el cambio de π a λ en la ecuación (D.7) queda:

$$\int_{-\lambda}^{\lambda} f(x) \text{sen}(nx) dx = \sum_{n=1}^N b_n 2\lambda \quad (\text{D.7.1})$$

Para los valores discretos se tiene:

$$\sum_{i=1}^M f(x_i) \text{sen}(nx_i) \Delta x_i = \sum_{n=1}^N b_n 2\lambda \quad (\text{D.8})$$

Los coeficientes a_n y b_n son los coeficientes de Fourier.

Por otro lado se conoce que la Transformada de Fourier de una función viene dada por:

$$F(k) = \frac{1}{\sqrt{2\lambda}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-kx} dx \quad (\text{D.9})$$

La ecuación que representa la función magnética respecto a la posición es:

$$g(x, y) = \sum_K \sum_M C_m^k \cos \left\{ \left(\frac{2\pi}{D * N} Kx + my \right) - P_m^k \right\} \quad (\text{D.10})$$

En donde:

$P \rightarrow$ es el ángulo de fase apropiado y

$$C_m^k = \left[(x_R^k)^2 + (x_I^k)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Con el fin de calcular la distancia espectral, por medio de la energía en dos dimensiones:

$$E(i, j) = XR(i, j)^2 + XI(i, j)^2 \quad (\text{D.11})$$

Dónde XR es la parte real y XI es la parte imaginaria.