

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

MODELO GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL, LOCAL Y REGIONAL DEL SUBSUELO DE ISLA DE AVES, EMPLEANDO DATOS GRAVIMÉTRICOS.

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar el Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Tapias Silva Franklin Leonardo

Caracas, junio 2002

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GENERAR UN MODELO GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL, LOCAL Y REGIONAL DEL SUBSUELO DE ISLA DE AVES, EMPLEANDO DATOS GRAVIMÉTRICOS.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Inirida Rodriguez.

TUTOR INDUSTRIAL: Prof. Ángel Bongiovanni.

Presentado Ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar el Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Tapias Silva Franklin Leonardo

Caracas, junio 2002

DEDICATORÍA

A Dios, por que la vida es una delicia que se nos permite.....

La mejor manera que tiene Dios de bendecirte es dándote un hogar, a pesar de los pesares uno sabe que cuenta con alguien, es por ello que le agradezco a mi familia, donde mi pensamiento siempre esta dándome fuerzas para avanzar, gracias por estar.

AGRADECIMIENTOS

Mis sinceros agradecimientos a:

Universidad Central de Venezuela por haberme permitido lograr en su lecho una meta muy importante en mi formación profesional. Inmenso es el valor humano dentro de la misma.

Escuela de Geología, Minas y Geofísica donde pude culminar mi formación profesional.

Observatorio Cajigal por su contribución en la realización de este trabajo especial de grado

Biblioteca Virgil Winkler por el apoyo bibliográfico y humano, especialmente a la señora Morela Castillo.

Vigilancia de la Facultad de Ingeniería por ser mi tercer hogar, a ustedes muchas gracias.

Jesús Vale por haber confiado en mí y ofrecerme la oportunidad de realizar este trabajo, gracias pana.

Profesora Inirida Rodríguez en primer lugar por orientarme en la realización y desarrollo de este proyecto, y por haber sido receptiva en todo momento.

Profesor Ángel Bongiovani por su ayuda e larga paciencia.

Marcos Figueroa por la orientación y los conocimientos aportados y ante todo por ser más que un profesor, un amigo.

A José Cavada por su silencioso, pero acertado apoyo.

Angel Erasmo por hacer agradable el largo camino transitado para llegar a la meta, por su orientación y ayuda, por ser un gran pana.

A Carlos Vargas quien de una manera muy particular fue de gran ayuda para encaminar este trabajo, gracias pana.

A Javier Sánchez por su contribución en varias de las etapas de este trabajo, gracias por tu tiempo y tu amistad.

A Eduardo Castillo por su apoyo incondicional en todo momento, así no fuese necesario y en quien se puede depositar toda la confianza, por ser amigo. Para él sobran las palabras que puedan expresar mis agradecimientos.

Alex Gallardo por estar en siempre dispuesto a extender la mano, gracias pana.

Roberto y Lizcar por el valioso tiempo compartido.

Patricia, Angie, Alejandra mis amigas de siempre.

A mi familia, Nay, Cano, Sol, Sire, Alba, Teo, Paola, Pablo, Bladimir, Esperanza, Bianca, Jean Franco, Karen, Javier.

A mis panas Arikuma, Arturo, Karlo, Juan, Sandia, Harol.

A Maria Montañez, una linda persona que dios puso en mi camino en quien me he apoyado desde ese momento, gracias por existir.

A todos esas personas que de una forma u otra me tendieron su mano en algún momento, porque por pequeño que parezca un gesto es grande para quien lo requiere, gracias

Modelaje Geológico – Estructural Local y Regional de Isla de Aves, utilizando datos gravimétricos.

Tutor académico: Inirida Rodríguez Millán.

Tutor industrial: Ángel Bongiovani.

Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

Palabras Claves.

Levantamiento, Modelar, Arco Remanente, Locales, Isla de Aves

Resumen

Orientado hacia la inquietud de la forma que presenta el Levantamiento de Aves en el subsuelo, se realizó un estudio con datos gravimétricos y magnéticos en un área demarcada entre los 15°-16° latitud norte y 63°-64° longitud oeste, que permite modelar las estructuras del subsuelo de Isla de Aves. Para lo cual, se generaron mapas de Anomalía de Bouguer e Intensidad Magnética Total utilizando análisis geoestadísticos como herramienta de control. Se trazaron dos perfiles, sobre la base de los mapas citados anteriormente, de orientación N-S y O-E respectivamente, sobre los cuales se aproximaron profundidades de interés en función del espectro de potencia. A partir de ambos perfiles se generaron 2 modelos geológicos en profundidad presentando ocho cuerpos que modelan el Levantamiento de Aves, citado en trabajos anteriores como un Arco Remanente de edad comprendida entre Cretácico Superior – Paleoceno Inferior. Los ajustes finales de densidad (ρ), susceptibilidad magnética (κ), magnetización inducida (J) muestran un Modelo Geológico - Estructural del levantamiento de Aves limitado por la discontinuidad de Mohorovich. Adicionalmente, se llevó a cabo un levantamiento de datos gravimétricos sobre la superficie de Isla de Aves para identificar las estructuras locales, a partir de los mapas obtenidos de Anomalía de Bouguer y Aire Libre.

INDICE

DEDICATORIA.	iii
AGRADECIMIENTOS.	iv
RESUMEN.	vi
ÍNDICE.	vii
LISTA DE FIGURAS.	ix
LISTA DE TABLAS.	xiii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1.INTRODUCCIÓN.	1
1.2.OBJETIVOS:	1
1.2.1 OBJETIVOS GENERAL	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO.	
1.3 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.	
1.4 MÉTODO DE TRABAJO.	
1.5 ANTECEDENTES.	5
CAPÍTULO II. GEOLOGÍA.	7
2.1 GEOLOGÍA EN ISLA DE AVES	7
2.2 EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO.	15
2.3 ARCOS REMANENTES.	20
CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO.	22
3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	22
3.1.1 TEORÍA DEL CAMPO GRAVIMÉTRICO TERRESTRE.	22
3.1.2 TEORÍA DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE.	23
3.2 ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE EL PROCESAMIENTO DE LAS ESTACIONES GRAVIMÉTRICAS.	27
3.3 VARIOGRAMAS.	31

CAPÍTULO IV . ADQUISICIÓN DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS.	37
4.1 INSTRUMENTAL GEOFÍSICO.	37
4.2 CONTROL DE DERIVA.	39
4.3 LEVANTAMIENTO DEL PUNTO DE 3ER ORDEN LA DE AVES.	40
4.4 LEVANTAMIENTO DE ESTACIONES ORDINARIAS.	41
CAPÍTULO V . PROCESAMIENTO DE LOS DATOS GEOFÍSICOS.	45
5.1 FASE 1: GENERAR ARCHIVOS DE DATOS.	46
5.1.1 CALCULO DE ANOMALÍA DE AIRE LIBRE.	47
5.1.2 CALCULO DE ANOMALIA DE BOUGUER.	48
5.1.3 DIGITALIZACION DE MAPAS.	51
5.1.4 PRESENTACION DE LOS DATOS.	52
5.2 FASE 2: TRATAMIENTO GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS.	53
5.2.1 ANALISIS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.	53
5.2.2 ANALISIS DE VARIOGRAMAS.	81
CAPÍTULO IV. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.	91
6.1 MAPA DE ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE EN ISLA DE AVES.	93
6.2 MAPA DE ANOMALÍAS DE BOUGUER EN ISLA DE AVES.	95
6.3 Mapa de Intensidad Magnética Total.	97
6.3.1.MAPA REGIONAL DE ANOMALÍAS DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL	99
6.3.2 MAPA RESIDUAL DE ANOMALÍAS DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL.	101
6.3.3 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS MAPAS.	103
6.4 MAPA DE ANOMALÍAS DE BOUGUER.	104
6.4.1 MAPA REGIONAL DE ANOMALÍAS DE BOUGUER.	106
6.4.2 MAPA RESIDUAL DE ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE.	108
6.3.3 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LOS MAPAS.	110
6.5 ANALISIS ESPECTRAL	111
6.6 RESTRICCIONES DEL MODELO	112
6.6.1 DE LA GEOLOGÍA	112

6.6.2 DE LA INFORMACIÓN SÌSMICA	113
6.7 MODELO INTEGRADO 2D DE ISLA DE AVES	114
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	122
ANEXOS	125

LISTA DE FIGURAS.

1.1. Ubicación del Área de Estudio.	03
1-2. Resumen del Método General de trabajo.	04
2-1.- Mapa Geológico de Isla de Aves.	08
2-2.- Tectónica sobre la Placa Caribe.	16
2-3.- Reconstrucción de la región del Caribe en el Campaniense.	17
2-4.- Reconstrucción de la región del Caribe en el Paleoceno.	17
3-1. Representación de las componentes del Campo Magnético Terrestre.	24
3-2. Representación de un Dipolo Magnético.	25
3-3. Ubicación de la estación con respecto a sistemas de referencia.	30
4-1.- Resumen de el método utilizado para la adquisición de datos gravimétricos en isla de aves	37
4-2.- Curva de deriva Instrumental.	39
4-3.- Mapa de ubicación de las estaciones Gravimétricas, tomadas en Isla de Aves, Venezuela.	43
5-1. Resumen del método de procesamiento de datos gravimétricos.	45
5-2. Método utilizado para obtener anomalías de Aire Libre y Bouguer.	46
5-3. Pasos para calcular anomalía de aire libre en Isla de Aves.	47
5-4. Pasos para calcular anomalía de Bouguer en Isla de Aves.	48
5-5.- Ubicación de los puntos producto de la digitalización del Mapa de Anomalía de Intensidad Magnética Total	51
5-6.- Histograma de frecuencia de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	53
5-7.- Gráfico de Caja y bigotes. datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	54

5-8. Gráfico Normal P-P de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	56
5-9. Gráfico Normal P-P sin tendencia de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	56
5-10. Gráfico Normal Q-Q. de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	57
5-11. Gráfico Normal gráfico Q-Q sin tendencia de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	58
5-12. Histograma de frecuencia. de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	59
5-13. Diagrama de Caja y Bigotes. Datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	60
5-14. Gráfico P-P Normal de los Datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	62
5-15. Gráfico P-P Normal sin tendencia de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	63
5-16. Gráfico Q-Q Normal. de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	64
5-17. Gráfico Q-Q Normal. de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	64
5-18. Histograma de frecuencia de los datos topográficos, tomados en Isla de Aves.	66
5-19. Diagrama de Caja y Bigotes de los datos topográficos, tomados en Isla de Aves.	66
5-20. Gráfico P-P Normal de los datos topográficos, tomados en Isla de Aves.	68
5-21. Gráfico P-P Normal sin tendencia de los datos topográficos, tomados en Isla de Aves.	69
5-22. Gráfico Q-Q Normal. de los datos Topográficos, tomados en Isla de Aves.	69
5-23. Gráfico Q-Q Normal. de los datos topográficos, tomados en Isla de Aves.	70
5-24. Histograma de frecuencia de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	71

5-25. Diagrama de Caja y bigote de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	72
5-26. Gráfico P-P Normal. de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	74
5-27 Gráfico P-P Normal. sin tendencia de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	74
5-28. Gráfico Q-Q Normal. de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	75
5-29. Gráfico Q-Q Normal sin tendencia de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	75
5-30. Histograma de frecuencia de los datos de Intensidad Magnética Total.	76
5-31. Diagrama de Caja y Bigote de los datos de Intensidad Magnética Total.	77
5-32. Gráfico P-P Normal de los datos de Intensidad Magnética Total.	79
5-33. Gráfico Q-Q Normal. de los datos de Intensidad Magnética Total.	79
5-34. Variograma de Superficie de los datos de Anomalía de Aire Libre de Isla de Aves.	82
5-35. Modelo del Variograma en dirección 65° , de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves.	82
5-36. Modelo del Variograma en dirección 150° , de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves.	83
5-37. Roseta de Distribución Espacial de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves.	84
5-38. Variograma de Superficie de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves.	84
5-39. Modelo del Variograma en dirección 145° , de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves.	85
5-40. Modelo del Variograma en dirección 61° , de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves.	85
5-41. Variograma de Superficie de los datos de Anomalía de Bouguer en la zona de Estudio.	86
5-42. Modelo del Variograma en dirección 120° , de los datos de anomalía de Bouguer en Isla de Aves.	86

5-43. Modelo del Variograma en dirección 25°, de los datos de anomalía de Bouguer en el área de estudio.	87
5-44. Variograma de superficie de los datos de IMT en la zona de estudio.	88
5-45. Modelo de Variograma en la dirección 90° de los datos de IMT en la zona de estudio.	89
5-46. Modelo de Variograma en la dirección 0° de los datos de IMT en la zona de estudio.	89
5-54. Roseta de Distribución Áreal de los datos de IMT en la zona de estudio.	90
6.1 Resumen del método de trabajo en la interpretación de datos.	91
6.2 Mapa de Isoanomalía de Aire Libre en Isla de Aves.	93
6.3 Mapa de Isoanomalía de Bouguer en Isla de Aves.	95
6.4 Mapa de Intensidad Magnética Total.	97
6.5 Mapa 3D de Intensidad Magnética Total	98
6.6 Mapa Regional de Intensidad Magnética Total	99
6.7 Mapa 3D Regional de Intensidad Magnética Total	100
6.8 Mapa Residual de Intensidad Magnética Total	101
6.9 Mapa 3D Residual de Intensidad Magnética Total102
6.10 Mapa de Isoanomalía de Bouguer en la zona de estudio	104
6.11 Mapa 3D de Isoanomalía de Bouguer en la zona de estudio	105
6.12 Mapa Regional de Isoanomalía de Bouguer en la zona de estudio	106
6.13 Mapa 3D Regional de Isoanomalía de Bouguer en la zona de estudio	107
6.14 Mapa Residual de Isoanomalía de Bouguer en la zona de estudio	108
6.15 Mapa 3D Residual de Isoanomalía de Bouguer en la zona de estudio.....	109
6.16 Modelo geológico estructural gravimétrico en aves.	111
6.17 Modelo geológico estructural magnético en aves.	112

LISTA DE TABLAS

4-1. Ubicación de las estaciones Gravimétricas Santa Inés – Helipuerto.	40
4-2. Ubicación de las estaciones Gravimétricas Helipuerto – Aves.	40
5-1.- Datos generados para la elaboración del proyecto.	52
5-2. Valores Percentiles. de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	54
5-3. Medidas de Dispersión de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	55
5-4. Medidas de Tendencia Central de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	55
5-5. Prueba de Kolmogorov – Smirnov de los datos de Anomalía de Aire Libre, tomados en Isla de Aves.	56
5-6. Valores Percentiles de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	60
5-7. Medidas de Distribución de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	60
5-8. Medidas de Tendencia Central de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	61
5-9. Medidas de Dispersión de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	61
5-10. Prueba de Kolmogorov - Smirmov. Datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	65
5-11. Valores Percentiles de los datos Topográficos, tomados en Isla de Aves.	67
5-12. Medidas de Distribución de los datos Topográficos, tomados en Isla de Aves.	67
5-13 Medidas de tendencia central de los datos topográficos de Anomalía de Aire Libre.	68
5-14. Prueba de Kolmogorov – Smirmov de los datos de Anomalía de Bouguer, tomados en Isla de Aves.	70
5-15. Valores Percentiles de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	72

5-16. Medidas de distribución de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	73
5-17. Medidas de Tendencia Central de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio	73
6.1 Resultados del análisis espectral	111

CAPÍTULO I.

1.1.- INTRODUCCIÓN

En la parte más septentrional de Venezuela está la ubicada Isla de Aves, aproximadamente a unos 540 Km. al norte de la Península de Paria, es la única emersión de una extensa cordillera submarina denominada Prominencia de Aves; es de gran importancia geopolítica.

Se hace necesaria la obtención de datos en la Isla de Aves para investigar, tanto su estructura local como de la Promontorio de Aves, con miras a tomar futuras decisiones acerca de la estabilidad del sistema, debido a que se trata de un arco de isla extinto cuyo comportamiento isostático es de interés para la problemática que se plantea.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1.- OBJETIVO GENERAL.

Construir un modelo 2-D geológico estructural local y regional del subsuelo de Isla de Aves, empleando datos gravimétricos.

1.2.2. - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Adquirir una malla de datos gravimétricos en Isla de Aves.
2. Generar mapas de anomalías de Bouguer y Aire Libre con los datos tomados en Isla de Aves.
3. Generar mapas de Intensidad Magnética Total y Anomalía de Bouguer, de la zona de estudio.

4. Realizar un análisis espectral de los datos que permita establecer la profundidad de los cuerpos anómalos en el subsuelo.
5. Generar y luego integrar la respuesta de los modelos 2D, gravimétricos y magnéticos dentro del área de estudio.

1.3.- UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

Isla de Aves está ubicada a los $15^{\circ} 40' 18''$ de latitud Norte y $63^{\circ} 36' 59''$ de longitud Este, Es el último punto norte emergido del territorio nacional con 570 mts de longitud. 180 mts en su parte más ancha, 30 mts de ancho mínimo y 5 mts de cota máxima sobre el nivel del mar.

El estudio regional fue realizado en un área rectangular entre los $15^{\circ} - 16^{\circ}$ Latitud Norte y los $63^{\circ} - 64^{\circ}$ Longitud Este (Figura 1-1).

1.4.- MÉTODO DE TRABAJO.

En la Figura 1-2, se presenta el esquema del método seguido para la elaboración del proyecto hasta la obtención de los modelos geológicos – estructurales locales y regionales.

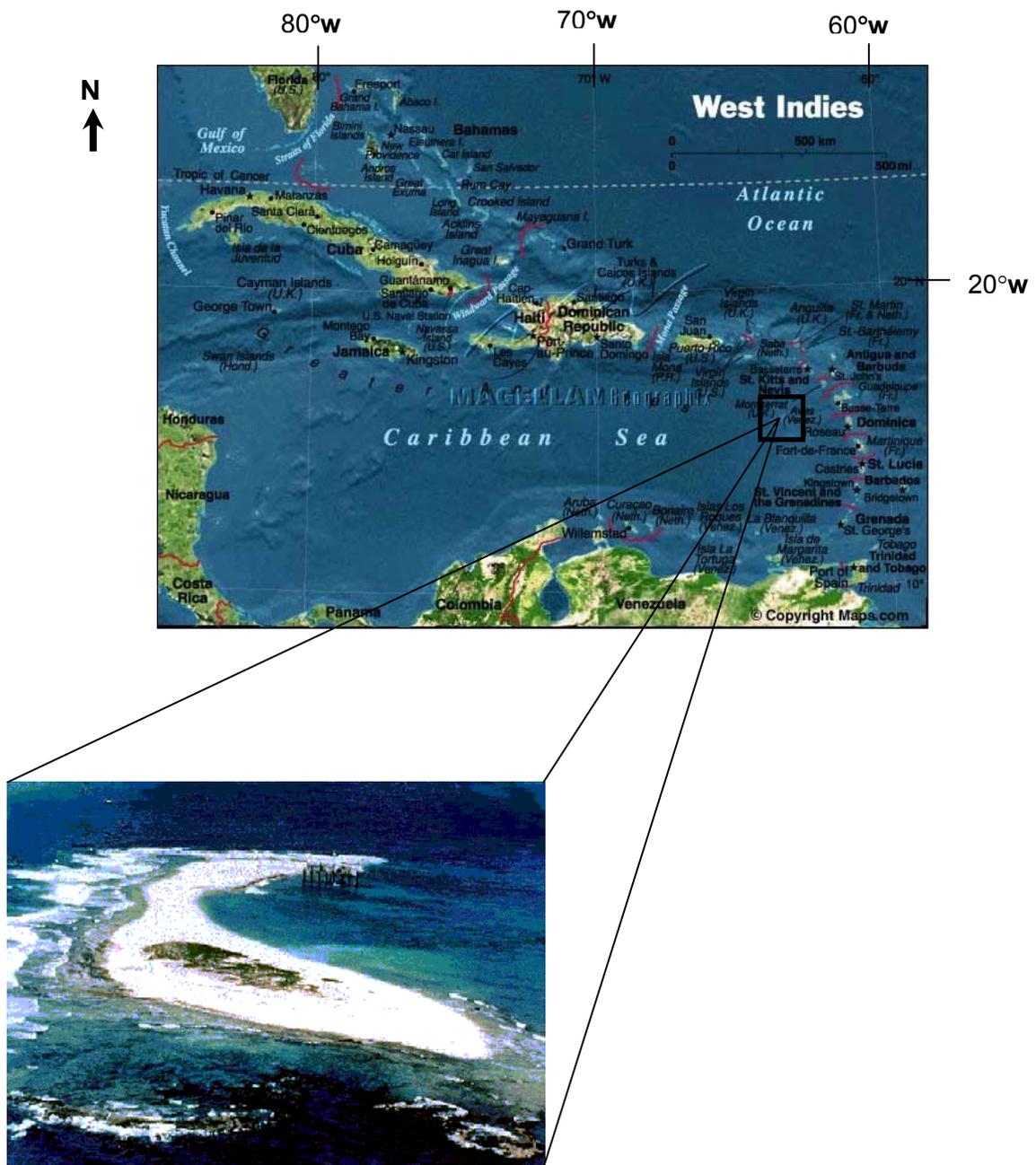


Figura N° 1.1.- Ubicación del Área de Estudio,
entre los 15° a 16° de latitud Norte
y los 63° y 64° de longitud Este.

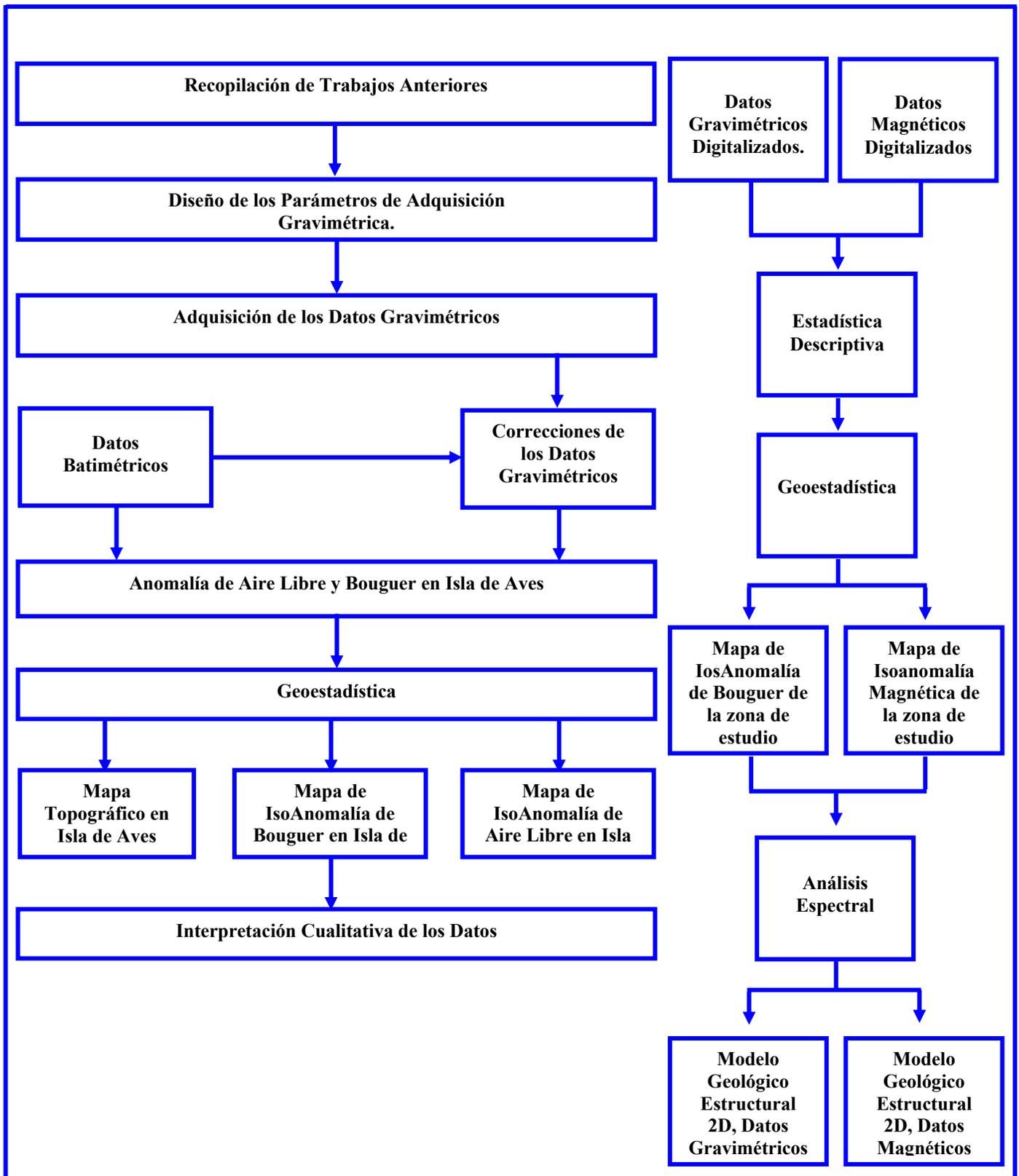


Figura 1-2. Método General de Trabajo.

1.5.- ANTECEDENTES

Las primeras descripciones de las rocas que afloran en Isla de Aves fueron hechas por Zuloaga en 1955. Posteriormente Maloney et al. 1966, describieron las unidades sedimentarias de la isla sin asignarles nombres formales. Aguilera y Gallovich (1970) efectuaron reconocimientos geofísicos utilizando sísmica de refracción en la isla. (Figura 2-1).

En 1972 Patín Herrera realizó un estudio geológico de los sedimentos calcáreos de la isla y utilizó los términos de "calcarenita de Isla Aves" y "Caliza de El Mástil" con una descripción litológica de los mismos.

La Fundación La Salle de Ciencias Naturales (1973) efectuó un Estudio Sísmico y Batimétrico de la Isla de Aves y estableció tres unidades litológicas en base a la respuesta de los perfiles derivados de la velocidad de las ondas de propagación, a saber: A) sedimentos calcáreos no consolidados; B) sedimentos calcáreos consolidados; C) sedimentos calcáreos muy compactados y litificados.

Aguilera y Gallovich (1970) describieron otra unidad que forma la base de la unidad "C" anterior, la cual parece corresponder al zócalo de rocas ígneas o metamórficas.

En estudios más recientes Méndez (1983) describe los procesos de acreción de carbonatos en la Prominencia de Aves desde el Sangamón, así como la formación del arrecife frangeante durante la trasgresión del Holoceno.

Finalmente Schubert y Laredo en (1984) publicaron una revisión de los aspectos geológicos de la isla y la prominencia de Aves y datos sísmicos acerca del subsuelo.

CAPÍTULO II. GEOLOGÍA.

2.1.- GEOLOGÍA LOCAL EN LA ISLA DE AVES.

Las unidades sedimentarias presentes en Isla de Aves son las siguientes (Fig.2-1).

- La Calcarenita de Isla de Aves, aflora en la costa norte y costa sur y suroeste de la isla, representando la única unidad litológica del Pleistoceno tardío que aflora en la isla.

- La Caliza de El Mástil en la parte norte-central de la isla. En la costa norte, este y sur de la isla se ubican los afloramientos correspondientes a la roca de playa y calizas que han desarrollado el arrecife frangeante, representando, junto a los sedimentos no consolidados de la superficie de la isla, el Holoceno.

- Las de las calizas del Pleistoceno, en dirección norte-sur a lo largo de la plataforma de Isla de Aves y al oeste de la isla de sedimentos moderadamente consolidados y litificados que corresponden a la unidad geosísmica 2 del estudio de la Fundación La Salle (1972), y la unidad de nivel intermedio de los perfiles de reflexión sísmica en González de Juana, et al. (1980). Esta unidad aflora también cerca de las playas del sotavento de la isla (parte oeste).

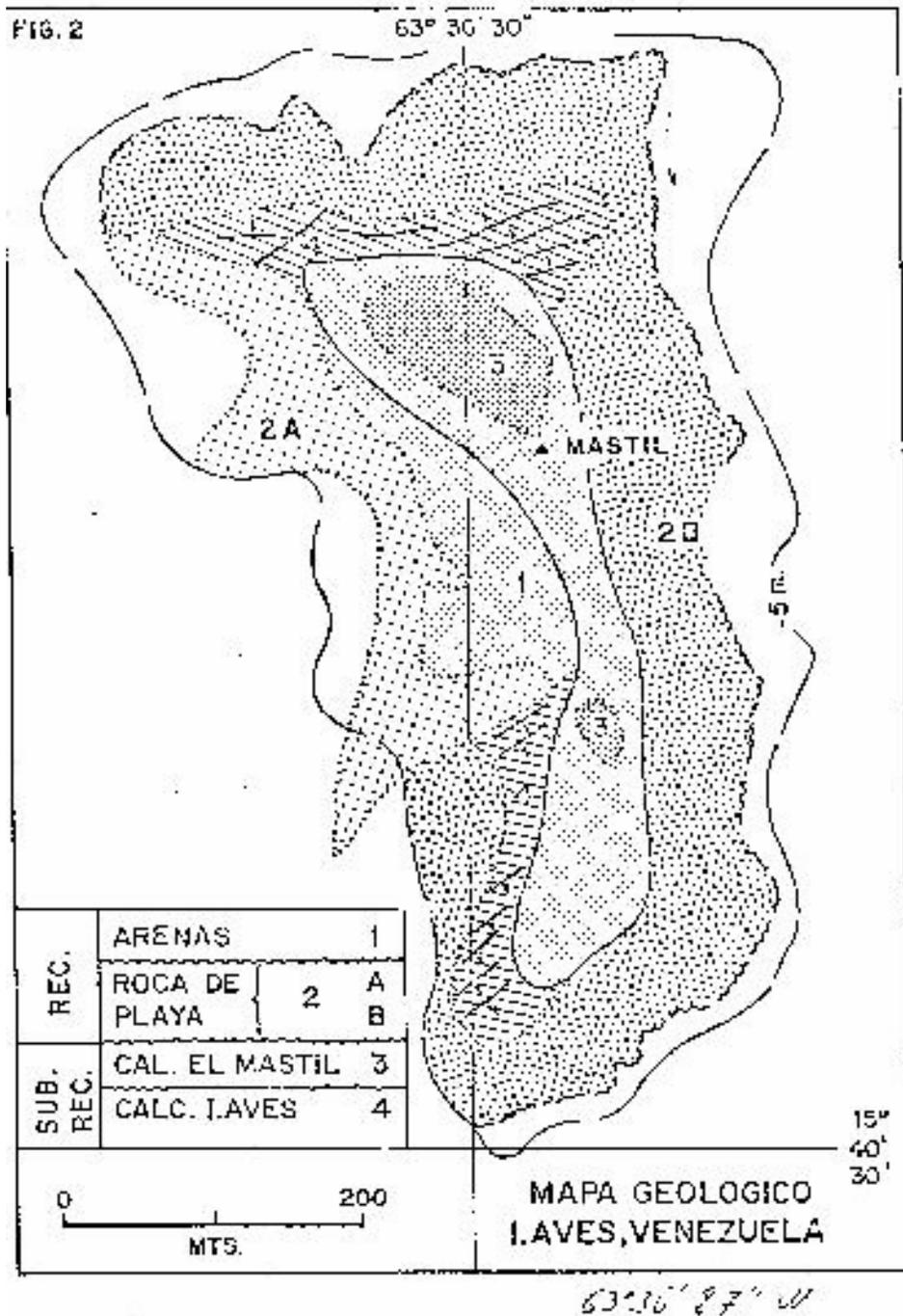


Figura 2-1.- Mapa Geológico de Isla de Aves, tomado de Pérez (1970).

2.1.1 UNIDADES LITOLÓGICAS:

Aguilera y Gallovich (1970) y La Fundación La Salle (1972) realizaron estudios geofísicos sobre toda la Prominencia de Isla de Aves, indicando tres unidades litológicas diferenciadas.

La Unidad Geosísmica 1, presentó velocidades de propagación entre 1.500-1.600 m/s, con resistividades superiores o iguales a 5 ohmios-metro. Esta unidad representa los sedimentos no consolidados de carbonatos que se encuentran sobre la isla y en la superficie de la plataforma de Isla de Aves. Los espesores fueron del orden de 1 a 25 m. Sobre la superficie de la isla los espesores varían de 5 a 10 m.

La Unidad Geosísmica 2, con velocidad de propagación de 2.500 m/s, indica sedimentos más o menos compactados y litificados que se formaron durante los interglaciales (máximos ascensos del nivel del mar) del Pleistoceno medio y tardío. Los espesores varían de 20 a 50 m.

Por debajo de éstos sedimentos la velocidad de propagación varió de 2.500 a 3.400 m/s. Se interpretó como sedimentos bien compactados y litificados. El espesor fue de 18 m.

La Unidad Geosísmica 3 indicó velocidades de propagación de 4.000 a 4.500 m/s. y se interpretó como rocas ígneas y metamórficas del zócalo.

Basamento Calcáreo.

Origen: Isla de Aves representa solamente el aspecto morfológico superficial que formado por sedimentos consolidados (arrecifes frangeantes, rocas de playa, Calcarenita de Isla de Aves, Caliza de El Mástil) y sedimentos no consolidados (arenas no consolidadas formadas por *fragmentos de corales, moluscos, algas calcáreas, foraminíferos*, etc), desarrollaron una amplia sedimentación calcárea sobre un basamento o zócalo ígneo metamórfico y que en conjunto se conoce como la Plataforma de Isla de Aves. Durante el Pleistoceno los interglaciales

indicaron el máximo nivel mar, por consiguiente la zona más alta de sedimentación. Durante los períodos de glaciación se evidenció el máximo descenso del nivel del mar, por lo tanto las zonas que habían desarrollado carbonatos marinos, sufrieron los procesos de erosión y desgaste de las calizas formadas. El proceso de subsidencia más la erosión, implicará, que durante el siguiente estado transgresivo marino, derivado de un nuevo interglaciar, los nuevos sedimentos se formarán sobre las calizas preexistentes del interglaciar anterior. Si por efecto de los dos últimos interglaciales se produjo un ascenso del nivel del mar de 106 m a 107 m como ocurrió durante el interglacial Yarmouth e interglacial Sangamon (400.000-300.000 y 130.000 años A.P. respectivamente), la subsidencia que ocurrió entre el tiempo de los dos interglaciales para que las calizas del Sangamon se sitúen a un nivel superior en la superficie. Por lo tanto, las calizas derivadas de la sedimentación de los primeros interglaciales se encontraran a un nivel de superficie más abajo que las derivadas de los últimos interglaciales. Como ejemplo, en las áreas donde ocurre levantamiento, se da el proceso contrario. Las calizas derivadas de los primeros interglaciales estarán en la superficie a niveles más altos que las formadas por los últimos interglaciales.

2.1.2 DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

La Formación Isla de Aves, se puede dividir en dos unidades:

Una unidad representada por la **Calcarenita de Isla de Aves** la cual puede corresponder a el afloramiento de los sedimentos moderadamente consolidados de la unidad geosísmica 2 (Aguilera y Gallovich) o unidad de nivel intermedio (en esta unidad de calizas se encuentra la correspondiente al Sangamon). Otra unidad representada por la **Caliza de El Mástil y el arrecife frangeante y rocas de playa** que bordean a la isla, así como los sedimentos no consolidados, formados por las arenas calcáreas, que se encuentran en la superficie de la isla. Esta última

unidad es del Holoceno.

La Calcarenita de Isla de Aves aflora principalmente en el noroeste de la isla donde forma una pequeña plataforma de calizas erosionadas y se extiende desde el nivel del mar hasta 1 m de altitud. Según Patín (1972), consiste de calcarenita de color crema a gris en las superficies meteorizadas, de grano fino y medio. La calcarenita contiene *fragmentos de corales, algas coralinas, gasterópodos, pelecípodos, foraminíferos bentónicos*. La roca es de textura semiapretada y bastante porosa.

La otra unidad está representada por la Caliza de El Mástil la cual está formada por arena calcárea sin estratificación o pobre estratificación con abundantes cantos y bloques de coral (*Acropora palmata*, fragmentos de *Acropora cervicornis, Diplorias, Sideratreas, Montastreas*). La Caliza de El Mástil descansa sobre la superficie erosionada de la Calcarenita de Isla de Aves Patín (1972).

La roca de playa formada entre el arrecife frangeante y las arenas no consolidadas en la superficie de la isla está formada por calcarenita litificada con algas coralinas principalmente *Lithothamnium* y pequeños fragmentos de *corales briozoarios*, moluscos (principalmente de los géneros *Littorina* y *Nerita*) y foraminíferos bentónicos. Como toda roca de playa, presenta un ligero buzamiento en dirección al mar de 10 a 15 grados. Las áreas calcáreas no consolidadas sobre la superficie de la isla y en la plataforma, están compuestas por fragmentos de los organismos recientes, corales, algas, moluscos, foraminíferos bentónicos, equinoides, etc.

El arrecife frangeante que bordea la isla es un desarrollo coralino. Las algas coralinas rojas como el *Lithothamnium* desarrollaron un armazón sumamente compacto con los corales hexacorarios, típico de los arrecifes expuestos a un régimen de energía de oleaje muy fuerte. Algunas colonias de corales presentan desarrollos importantes como la *Acropora palmata* al noroeste de la isla y grandes colonias aisladas de *Diploria, Montastrea, Porites, Siderastrea, hidrozoarios como la Millepora, equinodermos como Diadema antillarum, algas*

calcáreas como la *Halimeda*, etc., pero en términos generales, no hay un desarrollo masivo de corales hermatípicos como se observa en otras zonas coralinas de Venezuela (Los Roques, La Orchila, La Blanquilla), ya que las algas coralinas incrustantes y cementantes son parte fundamental del arrecife. Almeida y Goddard (1974) realizaron un estudio detallado de la zonación coralina en el arrecife frangeante, de acuerdo a la profundidad y los organismos predominantes.

2.1.3 ESPESOR

No se conoce el espesor de la Calcarenita de isla de Aves ya que no aflora el contacto con las unidades del subsuelo. Asumiendo que la calcarenita sea el afloramiento en isla de Aves de la unidad geosísmica 2, ésta presenta en la plataforma submarina de isla de Aves de 0 a 45 m de espesor. Según Patín (1972), el espesor de la Caliza de El Mástil es de 2 m aproximadamente. Los arrecifes frangentes fueron analizados hasta la base o fundación (descansan sobre calizas del Pleistoceno de la unidad geosísmica 2) indicando un espesor mínimo de 12 m. La extensión geográfica de La caliza pleistocena de la unidad geosísmica 2, aflora de norte a sur en la prominencia de Aves y al oeste de la isla. Aflora como Calcarenita de Isla de Aves en el noroeste de la isla.

2.1.4 CONTACTOS.

El tope de la caliza de la unidad geosísmica 2 (unidad estratigráfica sísmica 2) indica la caliza más joven del Pleistoceno tardío y la base de las calizas del Holoceno. La base de esta caliza pleistocena no aflora. Asumiendo que la base de la Isla de Aves está representada por la unidad geosísmica 2 (calizas litificadas) cuya superficie más alta está representada en la isla por la calcarenita de Isla de Aves, suprayacente y discordantemente se encuentran la Caliza de El Mástil, los arrecifes

frangeantes y la roca de playa.

2.1.5 FÓSILES.

Varias especies de corales hexacorarios: *Acropora palmata*, *A. cervicornis*, *Diploria sp.*, *Montastrea cavernosa*, *Siderastrea sp.*, *Agaricia sp.* Algas calcáreas: Como *Lithothamnium*, *Halimeda sp.* Foraminíferos como *Amphistegina lessoni* y *Archais angulatus*, así como fragmentos de moluscos, *equinoides*, *briozoarios*.

2.1.6 EDAD.

- Los sedimentos calcáreos litificados que forman la unidad geosísmica 2 son del Pleistoceno tardío. Estas calizas forman el basamento de la Isla dAves. Estas calizas, a su vez descansan sobre un zócalo ígneo metamórfico que forma la montaña submarina que conocemos como la Prominencia de Aves. Las calizas que se fueron desarrollando en torno al zócalo ígneo metamórfico se originaron durante los estados de máxima transgresión marino o interglaciares ocurridos en el pleistoceno. El desarrollo sucesivo de sedimentos de carbonatos y arrecifes frangeantes sobre el zócalo ígneo metamórfico inicial, y sobre los carbonatos depositados por las contínuas transgresiones, contrarrestó la subsidencia de la Prominencia de Aves.

- El último gran estado transgresivo o nivel máximo del mar se produjo durante la interglaciación Sangamon, donde el nivel máximo alcanzó de 6 a 7 m sobre el nivel actual. Los sedimentos que se fueron depositando y los arrecifes que se fueron desarrollando lo hicieron sobre las calizas pre-existentes de los anteriores interglaciares, por lo tanto el nivel más alto de las calizas en un área dominada por la subsidencia es alcanzado por el último interglacial o Sangamon. De esta forma el nivel más alto o superficial de los sedimentos calcáreos o calizas de la unidad

geosísmica 2, corresponde al Sangamon.

- Los afloramientos submarinos que aparecen indicados en González de Juana et al. (1980), que se ubican en la Prominencia de Aves de norte a sur y que corresponden a la unidad geosísmica 2, son de edad Sangamon. La Calcarenita de Isla de Aves corresponde a esta unidad. La plataforma de Isla de Aves presenta entre los 30 y 50 m de profundidad una terraza característica formada por las transgresiones posteriores al interglaciar Sangamon (entre 105.000, 84.000, 60.000 a A.P.) en forma similar a la morfología submarina que se encuentra en Los Roques, Las Aves y La Blanquilla (Méndez, 1985).

- Los arrecifes frangeantes que bordean a isla de Aves, la roca de playa, la Caliza El Mástil, y las arenas calcáreas no consolidadas, son de edad Holoceno.

2.1.7 CORRELACIÓN.

Considerando que la caliza sobre la cual se desarrollaron los arrecifes frangeantes, roca de playa y arenas no consolidadas es Sangamon, se puede efectuar una correlación cronoestratigráfica con aquellos niveles de edad similar:

Miembro Falucho de la Formación La Blanquilla, Formación La Orchila, Miembro Punta de Piedras de la Formación Tortuga, Formación Castillo de Araya, Formación El Manglillo, Terraza Inferior de la Península de Macanao, Terraza Inferior (Lower Terrace) de Curazao, Aruba y Bonaire, Terraza III de Barbados, Terraza I de Jamaica, etc.

2.1.8 PALEOAMBIENTES.

Isla de Aves es un típico desarrollo coralino sobre un zócalo ígneo-metamórfico, donde la subsidencia es contrarrestada por el volumen de

sedimentos producido por los organismos constructores de arrecifes y productores de sedimentos calcáreos. Los arrecifes se van desarrollando en torno a un basamento, originando un crecimiento que se denomina acreción vertical y lateral. Con las transgresiones originadas por los interglaciares del Pleistoceno, los arrecifes van progradando verticalmente y lateralmente con la transgresión, por lo tanto se van originando arrecifes de barrera o arrecifes frangeantes con facies de calcarenítas detrás de los arrecifes en ambientes de plataforma.

2.2.- EVOLUCIÓN GEOLÓGICA DEL ÁREA DE ESTUDIO

La Isla de Aves representa el pináculo del extremo norte del Levantamiento de Aves, esta cordillera submarina alcanza unos 500 Km. de longitud y está unida topográficamente a Venezuela. Este Levantamiento es paralelo al arco insular de las Antillas Menores y separa las cuencas de Granada y Venezuela al este y al oeste, respectivamente. Su cresta yace a una profundidad media de 900 Mts., lo cual representa una altura mínima de unos 2000 metros sobre el fondo del mar.

Dicha cordillera se encuentra inmersa dentro de la Placa Caribe donde los elementos tectónicos son críticos. Los modelos de el Caribe son realmente resumidos en: Arcos Magmáticos relacionados con subducción, fragmentos de litosfera oceánica y zonas de colisión orogénica (Pindell y Barrett,1990).

Según Meschede M.; Frisch W (1998), existen nueve arcos magmáticos separados algunos de ellos son parte de otros arcos (Figura 2-2). Entre esos arcos magmáticos se encuentra el **Ridge de Aves**, arco desarrollado durante el **Cretácico Superior** hasta el **Paleoceno inferior**, el cual interpretado como una continuación submarina en la dirección este de el arco de las Antillas Mayores durante el Cretácico Superior – Eoceno.

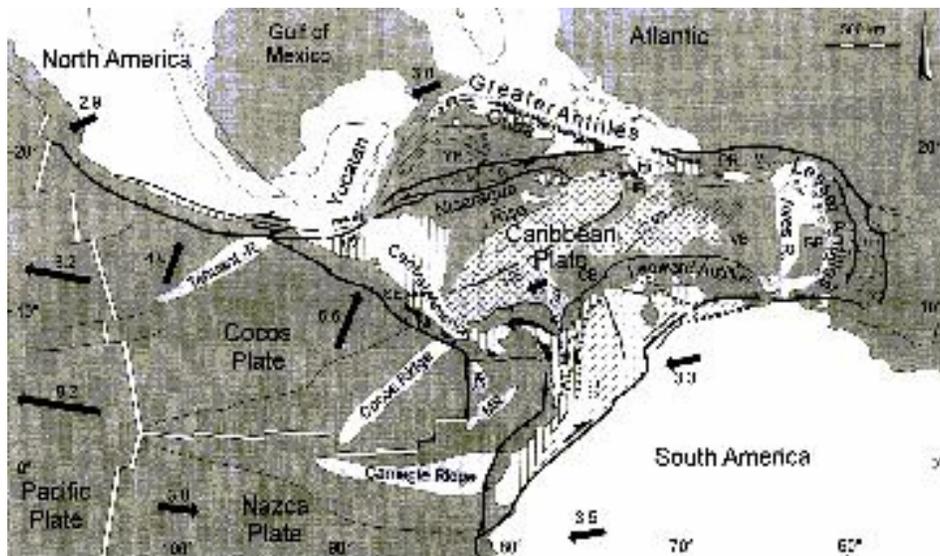


Figura 2-2.- Tectónica de la Placa Caribe, Meschede y Frisch (1998).

Meschede y Frisch (1998), presentan un modelo de la evolución tectónica de la Placa Caribe mediante una secuencia reconstruida por 8 grupos de análisis de esporas empezando en la edad Jurásica. Durante el **Caloviense / Oxfordiense** (aproximadamente hace 160 Ma. (Figura 6), época de fractura de la **Pangea**, los bloques continentales de Norte y Sur América y África están aun muy próximos.

Toda la estructura involucrada en el proceso de rifting entre el Norte y Sur América está indicada por la línea o eje de expansión, el cual continua entre el Atlántico Central y Sur, al Océano Penninico de los Alpes (Frisch,1981) hacia el este y dentro del eje de expansión entre la Placa Farallón y la Placa Fénix al oeste (Duncan y Hargraves, 1984). El modelo Pacífico asume un origen de el Complejo Nicoya, el cual era parte de la Placa Caribe, las direcciones paleomagnéticas para el complejo Nicoya también contiene la paleo-posición del Caribe.

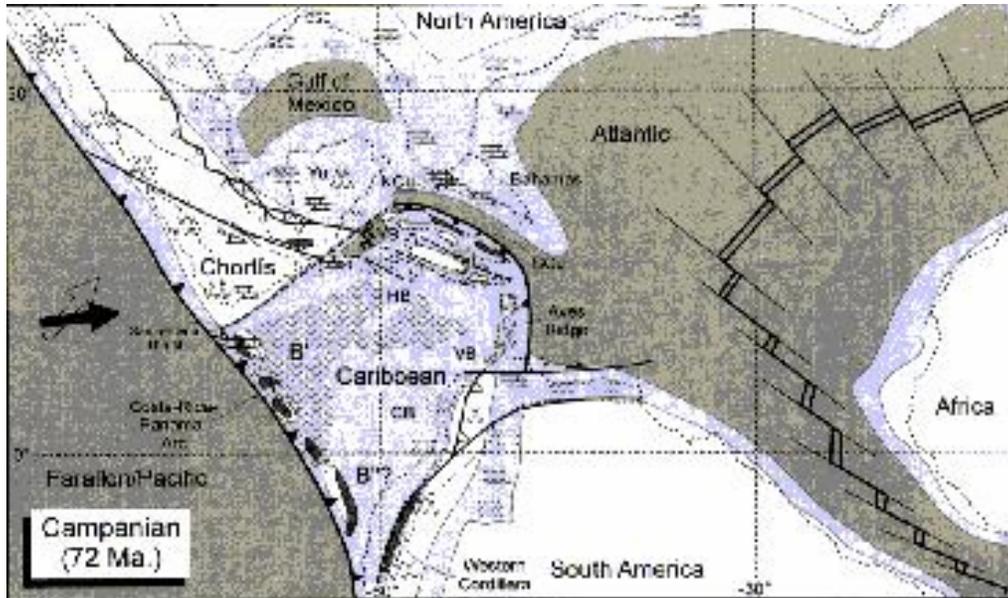


Figura 2-3.- Reconstrucción de la región del Caribe en el Campaniense. Meschede y Frisch (1998)

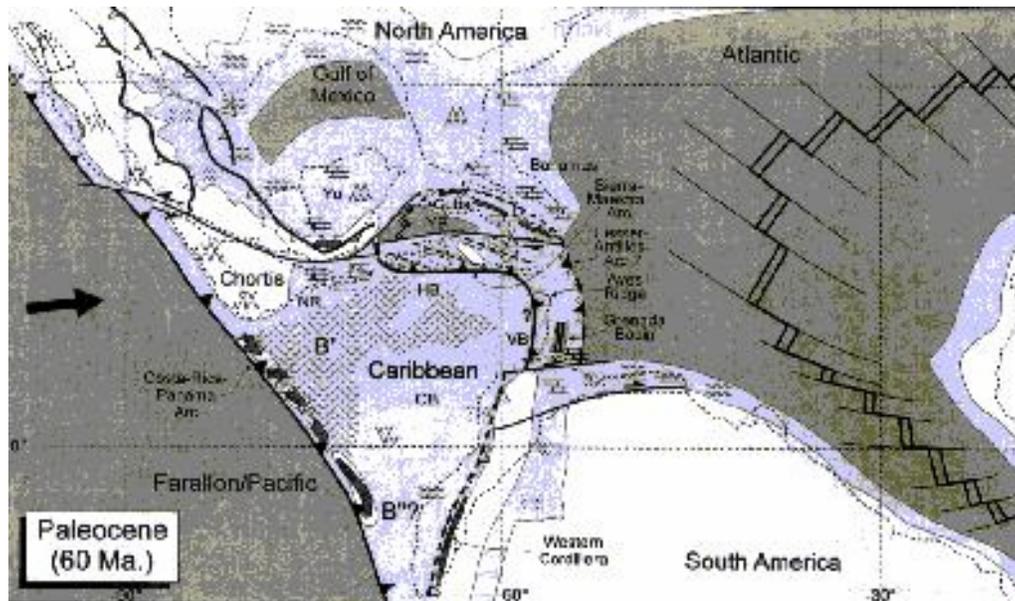


Figura 2-4.- Reconstrucción de la región del Caribe en el Paleoceno. Meschede y Frisch (1998).

Hay evidencias geológicas, geocronológicas y paleomagnéticas que indican que la corteza del Caribe se formó originalmente en una posición adyacente al margen noreste de Sur América. El bloque Chortis que actualmente pertenece a la Placa del Caribe, fue parte del bloque Mexicano, mientras que el Bloque Cubano se formó como parte de la Placa Proto-Caribe y transferido a la Placa Norte América durante el Cretácico Tardío.

Los datos de inclinación paleo-magnética de las rocas ofiolíticas del Jurasico en el limite suroeste de la Placa del Caribe indican claramente una ubicación ecuatorial original y, datos sedimentarios indican la presencia de un arco volcánico Albiense con producción de material andesítico. Además, las pequeñas subducciones en tiempo y espacio son necesarias para explicar la compleja situación que se presenta con la Placa del Caribe entre las dos Américas. Está generalmente aceptado que las Américas migran actualmente hacia el oeste en relación a la formación del punto caliente (Gripp y Gordon, 1990; De Mets et al., 1990; Rosso y Silver, 1996). El movimiento comenzó en el Cretácico Medio a Tardío con la terminación de la expansión en el océano Proto-Caribe (Meschede, 1998), con la

traslación relativa hacia el este de la Placa Caribe en el extremo norte de la América del Sur y la Placa Escocia en el extremo sur. Un desplazamiento muy lento hacia el oeste de la Placa Norte y Sur Americana con respecto a la Placa Caribe, han sido ocultados por la historia compleja del límite transformante - transcurrente a lo largo de los límites hacia el norte y sur de la Placa del Caribe.

La extrapolación del movimiento actual de las Placas del Caribe, Sur y Norte América implican en el pasado un desplazamiento lateral de 1000 Km., de la Placa del Caribe con respecto a la Placa Norteamericana en el Cenozoico. Además, es deducida una distancia de 1050 a 1100 Km., a partir de una razón de variación de las anomalías magnéticas de la Depresión Caimán en la zona de subducción de las Antillas Menores (e.g., Pindell y Berrett, 1990) y es corroborado por datación radiométrica en el sur de México (Herrmann et al., 1994).

La reconstrucción hecha por Meschede y Frisch (1998), en función de los análisis de esporas para el Hauteriviense basada en determinaciones recientes de las posiciones de bloques y placas, muestra que hubo espacio disponible suficiente para formar corteza oceánica. Desde entonces el Caribe se expande lentamente a una razón de 0,4 a 0,5 cm., lo cual produce sólo una cuenca oceánica angosta cercana a los 120 - 150 Km. de ancho sobre un tiempo breve de 30 millones de años.

Meschede y Frisch (1998) propusieron un origen cercano al Inter-Americano de la corteza del Caribe y reconocen las siguientes fases de evolución:

- 1.- Cerca del Jurásico Medio: Rifting en el océano Proto-Caribe y separación inicial entre Norte y Sur América.
- 2.- Desde el Jurásico Tardío al Cretácico Medio: ensanchamiento del océano Proto-Caribe.
- 3.- Del Cretácico Medio al Tardío: engrosamiento de la corteza Proto Caribe.

4.- Del cretácico Medio al Tardío: subducción en el Ridge de Cuba y Ridge de Aves, seguido por la colisión de la zona sur de Cuba con la Placa Norte Americana.

5.- En el Cretácico Medio al Tardío: abertura del océano Sur Atlántico e inicio del desplazamiento hacia el oeste de la Placa Sur Americana con relación a la Placa del Caribe, la cual se convirtió con el tiempo en una Placa independiente.

6.- Del Cretácico Tardío al Reciente: movimiento relativo hacia el este de la Placa del Caribe con respecto a la Placa Americana provocando subducción en el arco de las Antillas Menores. En el Paleoceno / Eoceno Reciente, desarrollo de una zona límite compleja asociada a una falla transformante, hacia el norte y el sur de Caribe.

7.- Del Mioceno al Reciente: deformación de la región entera del Caribe como resultado de la interacción entre las Placas Americanas y del Caribe; esta etapa es descrita en detalle por Pindell y Barrett (1990).

2.3.- ARCOS REMANENTES

Zona de Subducción

Cuando litosfera oceánica es subducida por debajo litosfera oceánica, se forma un sistema de arco de islas. Estas son consecuencias típicas de los márgenes oceánicos como el Pacífico, donde están localizados la mayoría de los arcos de islas.

Arcos Remanentes

Los arcos remanentes son cordilleras submarinas, las cuales están situadas detrás de sistemas de arcos de islas activos. Simplemente la forma de arcos remanentes son cordilleras remanentes de arcos frontales y están en la parte

trasera izquierda como cuencas entre arcos ensanchados. Estas cordilleras están ligadas por sistemas escarpados en ambos flancos existe una barrera volcanoclástica y su composición tiene un comportamiento similar a la de los arcos frontales, la morfología simple de algunos arcos remanentes está oculta por sedimentación, por el ajuste isostático, y por reactivación tectónica.

Estas cordilleras submarinas forman una frontera individual de la cuenca marginal.

Un Arco Remanente Simple consiste de una línea compuesta comúnmente de basamento, ubicado por debajo del borde de la cordillera donde ambos flancos estarían constituidos por sistemas escarpados.

Términos para un Arco Remanente

- Arco Remanente(Karig 1972).
- Ridge asísmico.
- Anticlinales compresionales sumergidos.

Arcos Remanentes Simples

Simple Arcos Remanentes consisten de líneas, comúnmente basamento por debajo del borde de la cordillera constituido en ambos flancos por sistemas escarpados.

CAPÍTULO III. MARCO TEÓRICO

3.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1.1.- TEORÍA DEL CAMPO GRAVIMÉTRICO TERRESTRE

El campo de gravitación terrestre, refleja el carácter de distribución de las masas en el interior de la Tierra y está ligado estrechamente con la forma de nuestro planeta.

La gravimetría como ciencia nace con la Ley de Gravitación Universal, Newton (1687) en la tercera parte de “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” expone la teoría de la figura de la Tierra fundada en la Ley de Gravitación Universal.

En 1743, el francés Clairaut publica “Teoría de la figura de la Tierra basada en los principios de la hidrostática”, según la cual mostró estrictamente que la aceleración de la fuerza de la gravedad en la superficie del esferoide terrestre varía según una ley muy simple:

$$g = g_e (1 + \beta \text{sen}^2 \varphi),$$

donde g_e es la aceleración de la fuerza de la gravedad en el Ecuador ; φ es la latitud del lugar ; $\beta = 5/2 q - \alpha$ (α , el achatamiento ; $q = \omega^2 a / g_e$, la relación de la fuerza centrífuga a la fuerza de gravedad en el Ecuador; ω la velocidad angular de la rotación de la Tierra a su semieje mayor).

Si toda la Tierra estuviera cubierta por el océano y su superficie no se agitara por ondas de viento y de las mareas, la forma de la Tierra coincidiría con la figura del esferoide terrestre.

La superficie de la Tierra es una equipotencial, conformada por un elipsoide de revolución con una elipticidad (radio ecuatorial menos el polar, dividido por el

ecuatorial) de $1/297$. El gradiente de potencial gravitatorio es perpendicular a la superficie en todos los puntos y que por definición es la fuerza de gravedad (g).

Más que el conocimiento de la gravedad absoluta, en geofísica aplicada, el interés se basa especialmente en las mediciones relativas. La gravedad observada es sometida a una serie de reducciones con el objeto de calcular anomalías, las cuales proporcionan información acerca de los cambios de densidad en el interior de la Tierra.

El miligal es la unidad de medida utilizada más frecuentemente para expresar las anomalías de gravedad, el cual es la milésima de un gal. que es la unidad c.g.s. de aceleración ($1 \text{ cm} / \text{seg}^2$) y se llama así en honor a Galileo.

3.1.2.- TEORÍA DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

Debido a las numerosas mediciones de la intensidad del campo magnético realizadas en la superficie del globo terrestre, se puede considerar en una primera aproximación, al **campo magnético de la Tierra** como el generado por una esfera magnetizada según un eje inclinado 11.5° respecto al eje de rotación. Los datos experimentales sobre la intensidad del campo permiten calcular el momento magnético de la Tierra (M) que según las cifras actuales se considera igual a $8,3 * 10^{25}$ c.g.s.

El campo magnético terrestre puede ser representado por H que es la **componente horizontal** del vector campo magnético terrestre T y V su **componente vertical**. Donde existirá la relación $T^2 = H^2 + V^2$. Además de I , que es la **inclinación** con respecto al plano horizontal y D a su **declinación** o ángulo que forma la dirección de la componente H con el meridiano geográfico del lugar.

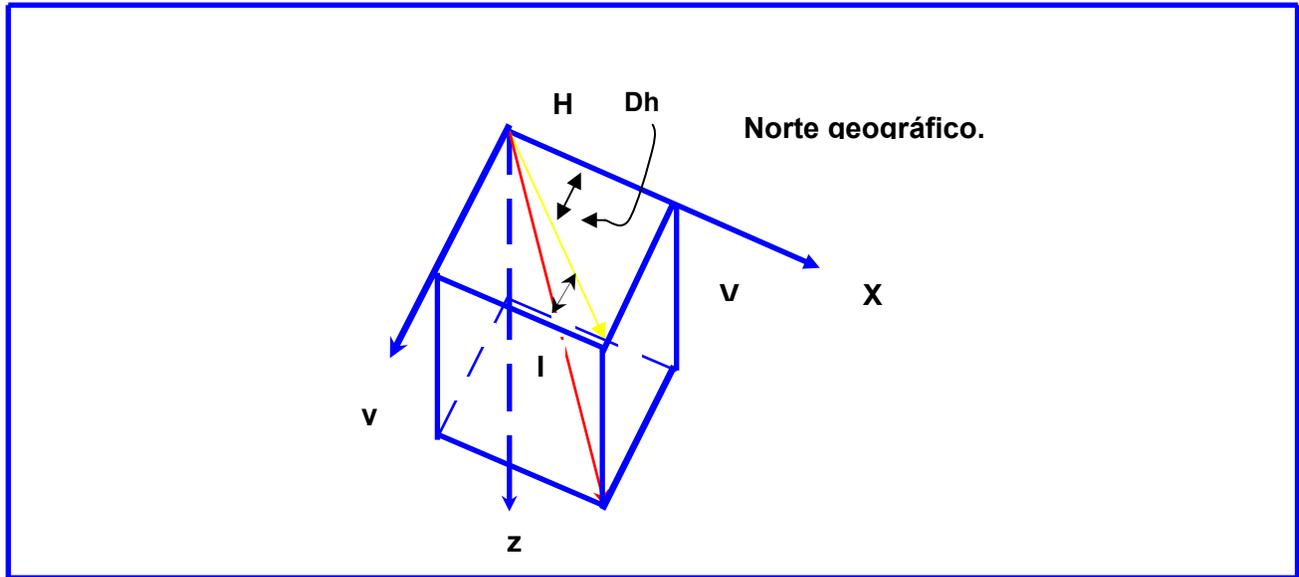


Figura 3-1.- Representación de las componentes del Campo Magnético Terrestre.

Si se observa el campo magnético en un punto de la superficie terrestre, resulta que éste varía con el tiempo. Esta variación se presenta periódicamente y para su estudio es necesario analizar el campo magnético terrestre en su conjunto.

El campo magnético T, creado por un polo magnético, puede darse por la expresión:

$$T = -\text{grad } V; \text{ siendo } V = p/r. \text{ Donde } \underline{H} = -\text{grad } (p/r) = -p \text{ grad } (1/r) = -p (\underline{r}/r^3) = p(\underline{r}/r^3)$$

Esta última expresión sirve para definir el campo magnético T. Siendo V el potencial magnético.

Los polos magnéticos no se encuentran libres, se encuentran formando dobletes o dipolos. Se define como momento magnético de un dipolo, el vector $\underline{M} = p \underline{r}$. Siendo \underline{r} el vector de posición del polo magnético positivo respecto al negativo.

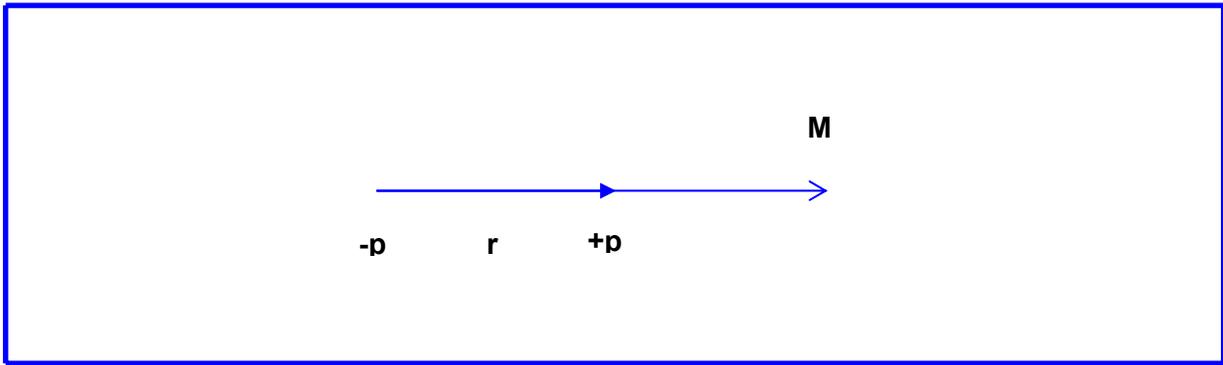


Figura 3-2.- Representación de un Dipolo Magnético.

Un dipolo elemental tendrá un momento magnético también elemental $d\mathbf{M} = p * d\mathbf{l} = p * d\mathbf{r}$. l = Distancia entre polos = r .

Considerando la materia como continua se consideran elementos de volumen dv . A cada volumen le corresponderá un momento magnético elemental $d\mathbf{M}$.

Hay tres factores aparte de los geométricos, que determinan las respuestas magnéticas de las rocas en una localidad en particular:

- a.- La intensidad del campo magnético.
- b.- La magnetización inducida.
- c.- El magnetismo remanente de las rocas.

La intensidad de magnetización inducida en las rocas por el campo geomagnético \mathbf{T} viene dada por:

$$\mathbf{J} = k * \mathbf{T}.$$

\mathbf{J} = Magnetización inducida en unidades c.g.s.

k = Susceptibilidad magnética.

\mathbf{T} = Intensidad del campo magnético.

La magnetización inducida es siempre paralela (o excepcionalmente anti-paralela) a la dirección del campo geomagnético, mientras que la magnetización remanente puede no tener relación alguna con la dirección e intensidad del campo magnético terrestre existente en el momento en que las rocas se forman. Así la magnetización resultante “**M**” de una roca viene dada por:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_n + k * \mathbf{T}.$$

M_n = Magnetización natural remanente: M_{nr}

La magnetización es una magnitud vectorial y viene dada como el momento magnético por unidad de volumen de materia. En el Sistema Internacional se expresa en amperios por metro (a/m): $SI = (4\pi)^2 * 10^3$ c.g.s. La capacidad de magnetización bajo la acción de un campo externo (Susceptibilidad Magnética, k) es adimensional ($SI = 4\pi$ c.g.s).

Al someter a un campo exterior la materia, se presentan tres fenómenos magnéticos:

- Diamagnetismo: tiene su origen en el movimiento de un electrón alrededor de un núcleo. Una corriente en miniatura cuyo momento magnético es un vector que en presencia de un campo magnético externo, toma un movimiento de precesión alrededor de éste, de acuerdo con el teorema de Larmor. Este aparece si los momentos magnéticos de los átomos son nulos en ausencia de un campo exterior.
- Paramagnetismo: Cuando los átomos o moléculas de una sustancia poseen un momento magnético en ausencia de campo exterior y además la interacción magnética de los átomos es débil.
- Ferromagnetismo: El momento magnético 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 campo exterior.

La falta de heterogeneidad en las rocas y su impregnación por minerales ferrimagnéticos, producen anomalías magnéticas distribuidas al azar, que constituyen el ruido geológico.

3.2 .- ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE EL PROCESAMIENTO DE LAS ESTACIONES GRAVIMÉTRICAS

Mareas Terrestres: La rotación de la Tierra en los campos gravitacionales de la Luna y el Sol impone periodicidades al potencial gravitacional en cualquier punto sobre la superficie terrestre. El efecto más obvio es la marea marina, pero ocurren también deformaciones de la tierra sólida que constituyen lo que se denominan mareas terrestres.

Heiland (1940), ha deducido la fórmula de la componente vertical de la fuerza de marea, Δg , causada por el Sol (Masa M_s , distancia a la Tierra D_s), y por la Luna (masa M_l , distancia a la Tierra D_l), en cualquier punto de una Tierra perfectamente rígida de radio r , cuando los cuerpos celestes respectivos forman ángulos geocéntricos.

El valor de la intensidad de la gravedad en cualquier punto varía cíclicamente a lo largo del día, dentro de un intervalo de hasta 3 mgal, a causa de las mareas solares y lunares(Dobrin 1961).

CORRECCIÓN POR LATITUD

La fórmula internacional para calcular la variación de la gravedad total sobre el geoide en función de la latitud θ es:

$$GT = 978,031846 * [1+0.005278895 \text{ sen}^2 (\theta)+0.000023462\text{sen}^4 (\theta)].$$

La aceleración de gravedad en el ecuador ($\theta = 0^\circ$) es unos 5000 mgal menor que en los polos ($\theta = 90^\circ$).

La intensidad de la gravedad aumenta con la latitud geográfica.

Diferenciando la ecuación anterior se obtiene:

$$dg / d\theta = 5,1723 \text{ sen}2\theta \text{ gal/ rad.}$$

Si la diferencia de latitud entre dos estaciones es pequeña, la corrección es:

$$\sigma = 0.81 \text{sen}2\theta \text{ u.g cada 100 mts. (N-S).}$$

Para poder expresar en mgal, los coeficientes deben dividirse por 10.

Esta cantidad debe restarse o sumarse a la diferencia de gravedad observada según que la estación esté situada a una latitud mayor o menor que la base.

CORRECCIÓN DE AIRE LIBRE O ALTITUD

La intensidad de gravedad fuera de la Tierra varía en relación inversa al cuadrado de la distancia al centro de la Tierra. Si g_1 es un valor en el nivel de referencia, a la altura h sobre el valdrá:

$$g = g_1 * (R^2 / (R + h)^2) = g_1 * (1 - (2h / R)).$$

Si se desprecian las potencias de h / R superiores a la primera y $R = 6.367 \text{ Km.}$ (Radio de la Tierra):

$$g = (2g_1 / R) * h = 0.3086 \text{ mgal por mts.}$$

La cantidad 0.3086 mgal. debe añadirse a la diferencia de gravedad medida si la estación esta sobre el nivel de referencia, y restada si esta por debajo de el.

CORRECCIÓN DE BOUGUER

Esta corrección elimina el efecto de la lámina indefinida de terreno que hay entre cada estación y el nivel de referencia.

La gravedad o atracción ejercida en una cantidad $dg = 2\pi G\rho h$, sobre una unidad de masa, por un bloque de material rocoso de densidad ρ , espesor h y longitud infinita, se llama corrección de Bouguer (Figura 3-3), donde:

$$dg = 0.04191 \rho \text{ mgal. por mts. (de altura).}$$

Esta corrección se resta del valor observado cuando la estación esta a una altura mayor que la base, y se suma cuando está por debajo.

CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA

Las elevaciones o depresiones cercanas a la estación originan una componente vertical de la atracción gravitatoria que contrarresta o modifica en parte la atracción hacia el interior del resto de la Tierra. Por lo que es necesario corregir este efecto.

La corrección topográfica elimina el efecto del montículo sumando su atracción hacia arriba en la estación y compensa la del valle sumando la atracción que ejercería en la estación si tuviera rellenos.

Entre los métodos utilizados para realizar la corrección topográfica esta la retícula de Hammer (Dobrin, 19,

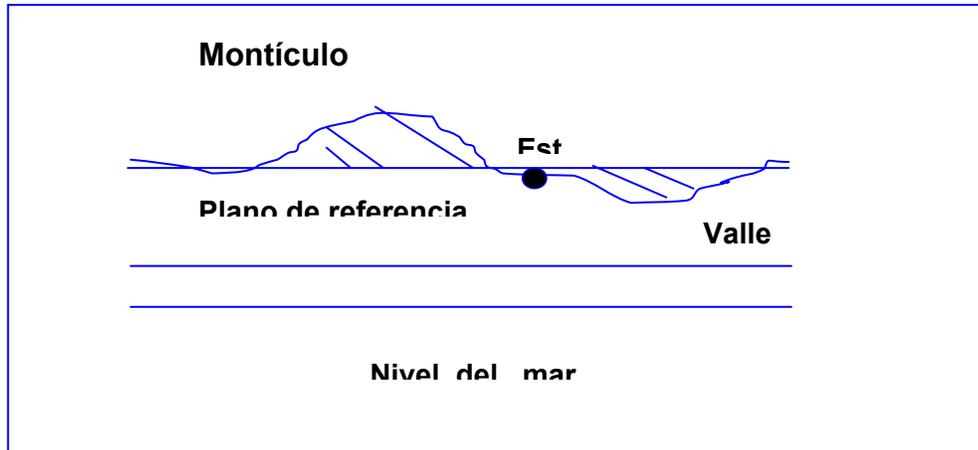


Figura 3-3.- Ubicación de la estación con respecto a sistemas de referencia.

CAPÍTULO IV. ADQUISICIÓN DE DATOS GRAVIMÉTRICOS

En la adquisición de datos gravimétricos es necesario considerar una variedad de aspectos de tipo logístico, instrumental y técnicos que permitan realizar una adquisición que cumpla con los objetivos propuestos y también disminuir el mayor número de errores posibles al realizar la toma de datos, o en su defecto tener conocimiento real de los mismos.

En la adquisición de los datos gravimétricos se realizan una serie de pasos previos como se observa en la Figura 4-1.

4. 1 .- INSTRUMENTAL GEOFÍSICO

La adquisición de datos gravimétricos requirió de los siguientes equipos:

- Gravímetro Lacoste & Romber.
- Gravímetro Scintrex – GM3.
- Equipo GPS.
- Brújula.
- Mesas con base circular, de aproximadamente 50 cm de alto.
- Equipo Corta – Viento (Estructuras de madera, que permitan disminuir el flujo de aire, en la dirección del aparato de medida).

Las especificaciones de cada uno de los equipos se encuentran en Apéndice A.

4.2.- CONTROL DE DERIVA

Todos los equipos de medición presentan una variación de la medida al transcurrir intervalos de tiempos constantes producto, en el caso específico del Gravímetro Scintrex – GM3.

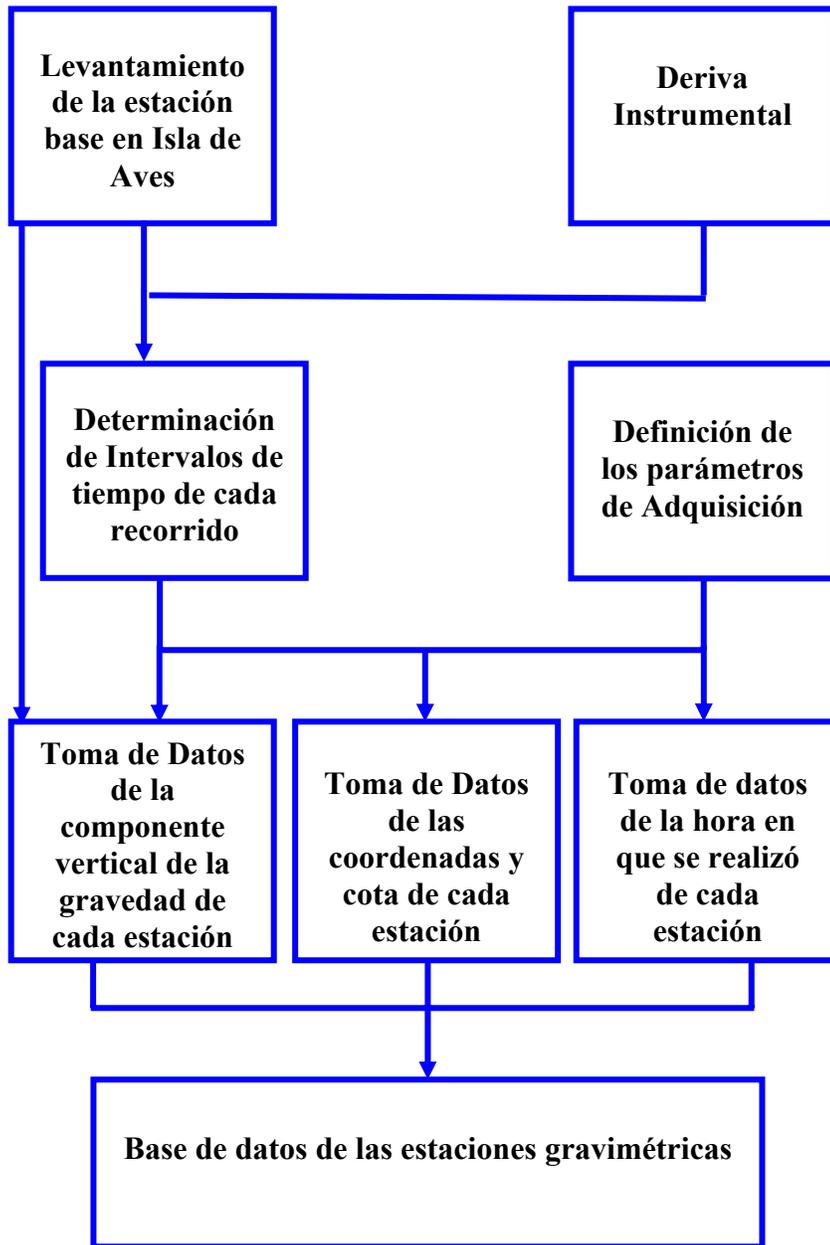


Figura 4-1.- Método utilizado para la adquisición de datos gravimétricos en Isla de Aves.

Esto hace necesario establecer los intervalos de tiempo en los cuales la deriva tiene un comportamiento aproximadamente lineal, para así fijar los espacios de tiempo en los que se pueden realizar cada recorrido de apertura – cierre durante la adquisición de datos gravimétricos.

Es por ello que, se realizó el día 03-12-2000 una secuencia de medidas durante un periodo de 10 horas consecutivas, en intervalos de 5 minutos c/u. Posteriormente, se hizo la corrección por mareas con la intención de que éste fenómeno no afectara los valores reales de la medida.

Estos datos se representaron en un gráfico de Gravedad Relativa (mgal) Vs. Tiempo(min.) (Figura 4-2), ajustados por el método de mínimos cuadrados a una curva, sobre la cual fueron establecidos los intervalos de tiempo en los cuales se puede realizar la adquisición de los datos gravimétricos . Siendo estos los siguientes:

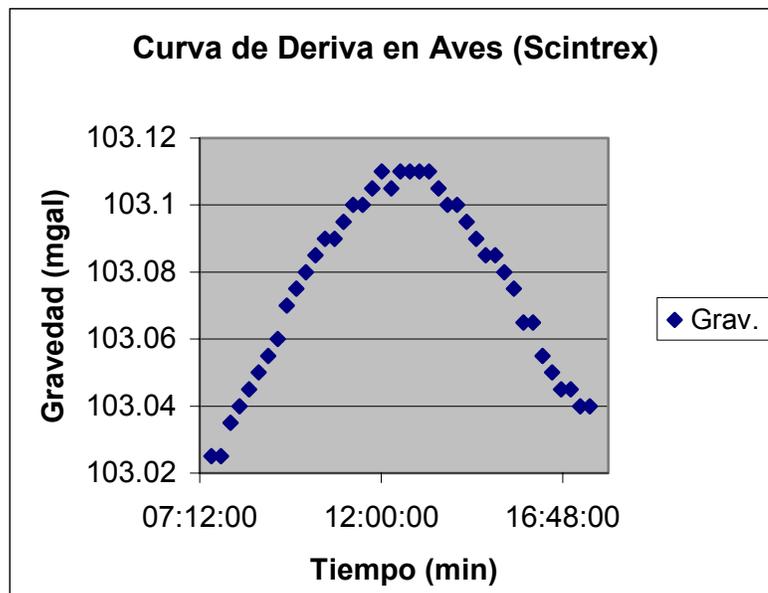


Figura 4–2.- Curva de deriva instrumental del día 03/12/2000.

- Intervalo de 7:15 a 11:15 A.M.
- Intervalo de 1:15 a 6:00 P.M.

4.3.- LEVANTAMIENTO DEL PUNTO DE TERCER ORDEN “AVES”, UBICADO EN ISLA DE AVES

El 22/10/2000 se realizó un amarre a la Red Gravimétrica Nacional entre las estaciones Santa Inés – Helipuerto. Este levantamiento fue realizado por el Ingeniero Jesús Vale y el Dr. Angel Bongiovani.

Posteriormente entre los días 04/12/2000 – 15/12/2000 se realizó el amarre a la Red Gravimétrica Nacional entre el Helipuerto – Aves.

Estación	Latitud	Longitud	Nº Orden
Aves	15°40'18''	63°36'59''	Tercer Orden

Tabla 4-1.- Ubicación de las estaciones Gravimétricas Helipuerto – Aves.

La estación gravimétrica AVES, fue tomada como estación base para el levantamiento de la malla gravimétrica realizada sobre la Isla de Aves.

4.4.- LEVANTAMIENTO DE ESTACIONES ORDINARIAS

Teniendo como base los datos de control de Deriva y levantamiento de la estación base AVES y adicionalmente una idea de la superficie, topografía, geología local, condiciones climáticas, se realizó un diseño previo a la adquisición de los datos gravimétricos, con las siguientes especificaciones:

1.- Desarrollo del estudio gravimétrico de Isla de Aves sobre un mapa base a escala 1:1.000. Esta condición establece tanto el espaciamiento entre estaciones como la precisión en la toma de datos de posicionamiento y cota.

2.- Las estaciones se encuentran enlazadas entre sí, conformando una red que tiene como línea base, para control horizontal como vertical, la definida por el vértice de tercer orden llamado AVES.

3.- Especificaciones del funcionamiento del gravímetro durante la adquisición:

- Tiempo de toma de datos por estación: 3 Minutos.
- Número de datos por estación: 180 medidas a razón de 3 medidas por segundo (mgal).
- Valor asignado a cada estación: Media aritmética del total del número de datos por estación (de esta manera arroje los datos el gravímetro).
- Modo de uso: Modo de campo.
- Filtros: Negativo.

4.- Debido a que se trata de suelos arenosos no segmentados en su mayoría, se construyó en el Observatorio Cagigal una mesa o base, que se introdujo en la superficie del suelo para aumentar la estabilidad en la estación a medir y sobre la cual se colocó el gravímetro. Se controlaba además, otros factores como altura de la mesa de adquisición al suelo, horizontalidad de la mesa, etc.

5.- Ubicación de las medidas:

A.- Líneas en dirección Este – Oeste, con separación de 20 mts. entre líneas.

B.- Una separación entre estaciones de 20 mts. sobre cada una de las líneas.

C.- Una alternancia en la dirección de la toma de datos con el objeto de minimizar problemas de borde. Es decir, primero se tomaban datos en dirección Este – Oeste desde el borde de la isla y luego en dirección contraria Oeste – Este.

6.- La estimación de la cota y coordenadas de las estaciones se realizó empleando receptores GPS geodésicos en modo diferencial, la triangulación tuvo como base los dos puntos de control geodésicos ya existentes y la precisión requerida fue del orden del milímetro.

Con todas las consideraciones anteriores y tomando en cuenta el factor tiempo establecido, se realizó la adquisición de los datos gravimétricos (Figura 4-3).

El resultado de la adquisición de datos fue un total de 76 estaciones gravimétricas, en un lapso de 2 días durante los cuales se efectuaron 8 recorridos apertura – cierre, tomando como estación base, la estación AVES con un orden 3, amarrado a la Red Gravimétrica Nacional.

En la figura 4-3, se puede observar la orientación de las líneas de la malla de adquisición.

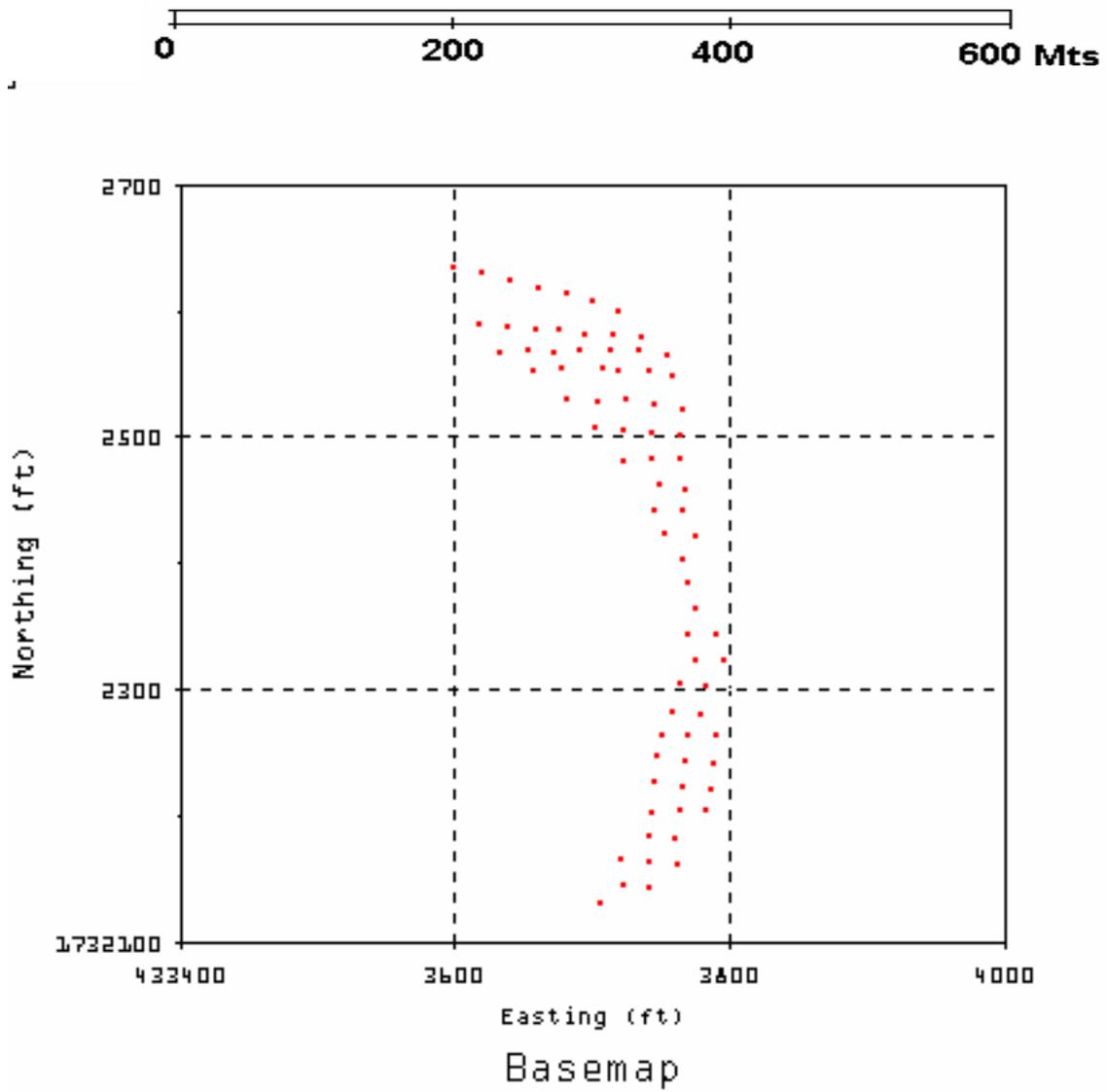


Figura 4-3.- Mapa de ubicación de las estaciones gravimétricas, tomadas en Isla de Aves, Venezuela.

CAPÍTULO V. PROCESAMIENTO DE DATOS GEOFÍSICOS

El procesamiento de los datos gravimétricos tomados en Isla de Aves se realizó considerando que la gravedad observada es el resultado de la sumatoria de un conjunto de fenómenos que afectan la lectura del gravímetro en el momento de la adquisición. El procesamiento de los datos gravimétricos fue ejecutado en dos fases (Figura 5-1), en la fase uno se generaron los archivos de datos y en la fase dos se aplicó un análisis geoestadístico a los datos.

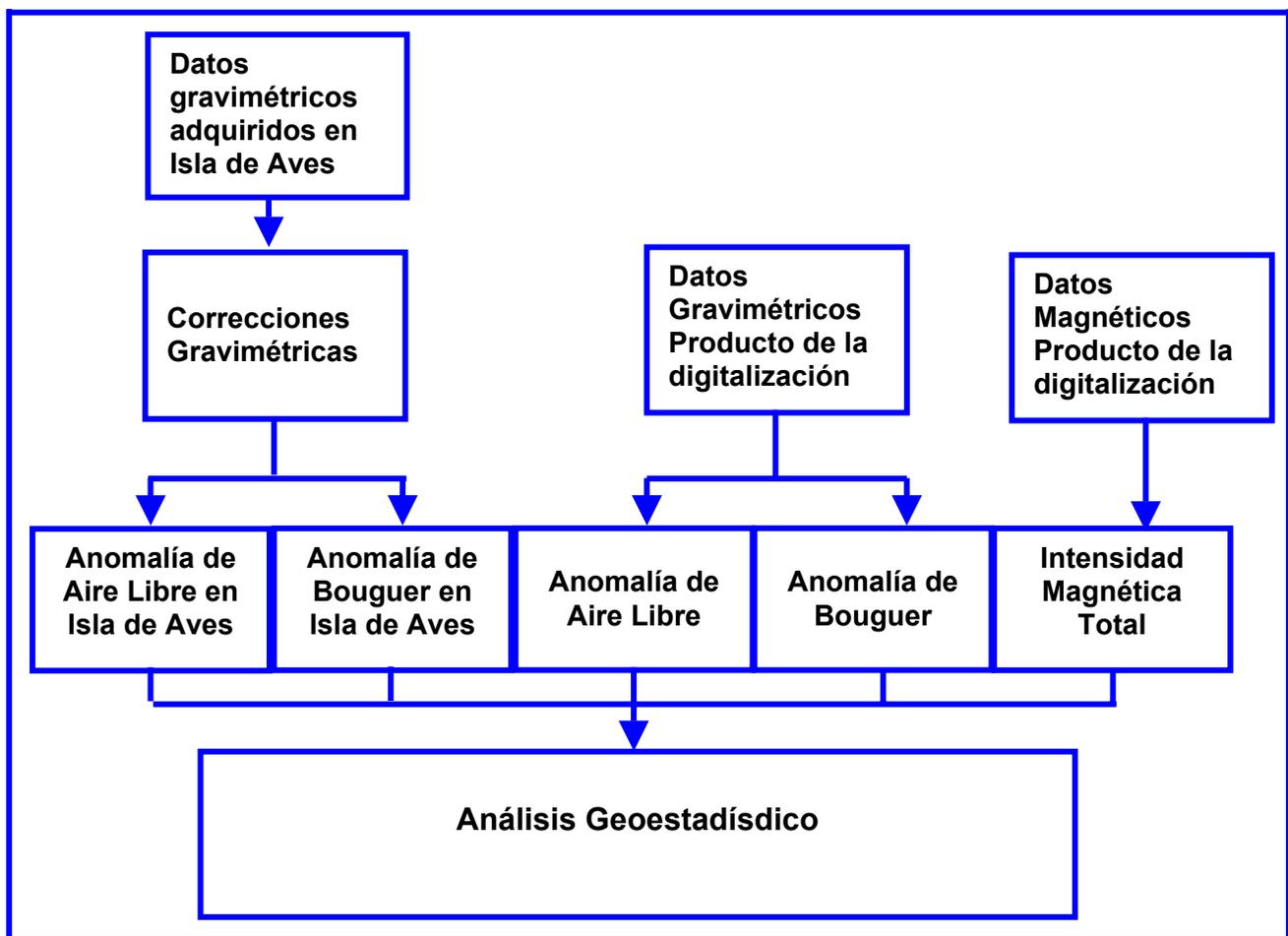


Figura 5-1.-Secuencia de procesamiento de datos gravimétricos.

5.1.- FASE 1: GENERACIÓN DE ARCHIVOS DE DATOS

En esta fase se realizan los cálculos necesarios para obtener anomalías de Aire Libre y anomalías de Bouguer de los datos adquiridos en Isla de Aves (Figura 5-2).

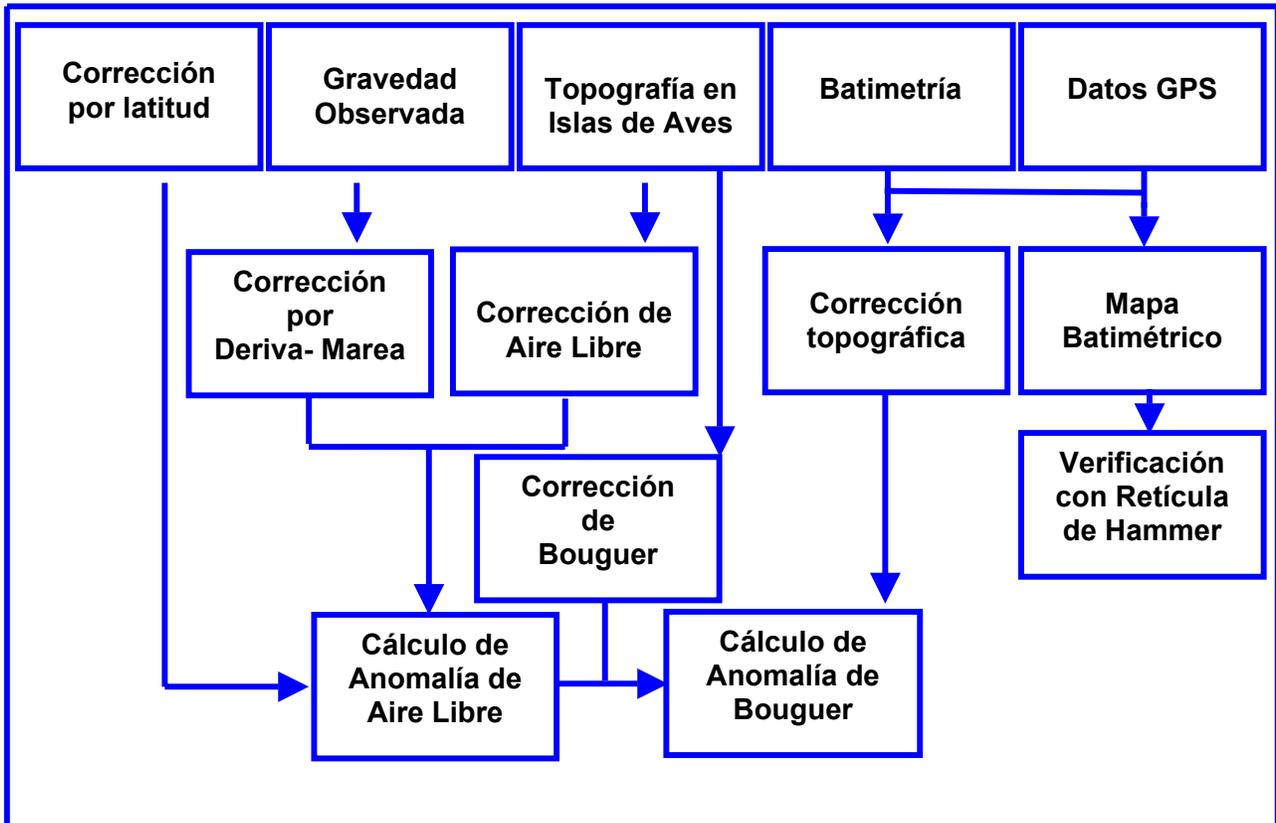


Figura 5-2.- Método utilizado para obtener las anomalías de Aire Libre y anomalías de Bouguer.

5.1.1.- CÁLCULO DE LA ANOMALÍA DE AIRE LIBRE.

Para obtener la anomalía de aire libre se requiere aplicar a los valores de gravedad observados de cada estación (en miligales), ciertas correcciones con el objetivo de reducirlos a un nivel de referencia común (Figura 5-3).



Figura 5-3.- Pasos para calcular anomalía de aire libre en Isla de Aves

Para la **corrección por marea** se utilizó el programa MAREAS, del Departamento de Geofísica de la U.C.V., el cual generó el archivo de salida **CORRECCIÓN DE MAREAS. dat**.

La **corrección por deriva** se realizó con los tiempos de apertura y cierre, distribuyendo la deriva de acuerdo a la variación diferencial en mgal. en cada una de las estaciones. Luego cada una de las estaciones fue amarrada a la estación **base** (Aves), la cual era un punto de gravedad absoluta de orden 3 (amarrada a la R.G.I).

La **corrección por latitud** se aplica mediante el cálculo de la Gravedad Teórica, se usó la fórmula de 1967, Congreso Mundial de Geofísica:

$$GT = 978,031846 * [1+0.005278895 \text{ sen}^2(\theta)+0.000023462\text{sen}^4(\theta)].$$

GT= Gravedad teórica en mgal; θ = Latitud de la estación.

La **corrección de Aire Libre** se calcula como: $CAL = 0.3086 h$ (mgal/m), siendo h la altura de la estación.

Una vez que todas estas correcciones han sido aplicadas a los datos gravimétricos, se obtiene la **Anomalía de Aire Libre** en cada estación calculada mediante la relación:

$$AAL = Gobs \pm Cal - Gteo$$

5.1.2.- CÁLCULO DE LA ANOMALÍA DE BOUGUER

Para obtener la anomalía de Bouguer se requiere aplicar a los valores de gravedad observados de cada estación (en miligales) ciertas correcciones como se especifica en la Figura 5-4.

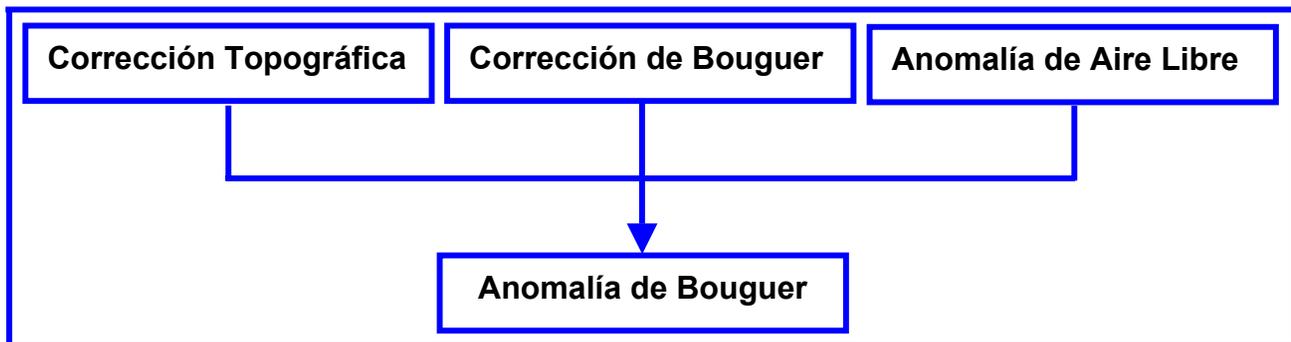


Figura 5-4.- Pasos para calcular anomalía de Bouguer en Isla de Aves Batimetría.

Los datos batimétricos son el producto de 3 conjuntos de datos, con una ventana máxima cuadrada de un grado (1°), con coordenadas 63° - 64° longitud Oeste, y 15° - 16° latitud Norte.

B₁: Datos producto de la Digitalización del Mapa Cubano.

B₂: Datos tomados por FAN.

T₁: También se incluyeron los datos de la topografía de Isla de Aves.

Con todos estos datos se construyó un archivo **BATIAVES. XYZ**.

La **Corrección Topográfica** se realizó con el programa TERRAIN del paquete GEOSOFT perteneciente a las F.A.N.(OCHINA).

Se utilizaron dos **archivos de entrada** :

1.- Datos con tres columnas X _{longitud}, Y _{latitud}, Z _{cota}. Con nombre: **BATIAVES. XYZ**.

2.- Datos con tres columnas X _{longitud}, Y _{latitud}, N° de estación. Con nombre: **TOPOAVES. XYZ**.

Obteniéndose dos **archivos de salida**:

1.- **BATISAL. DAT** con tres columnas X _{longitud}, Y _{latitud}, Z _{cota} .

2.- **TOPOSAL. DAT** es un archivo con la corrección topográfica de cada estación, consta de 4 columnas X _{longitud}, Y _{latitud}, N° de estación, Corrección Topográfica.

Para lo cual, se empleó una ventana cuadrada de 1° un grado de longitud, de coordenadas de 63° - 64° longitud oeste, y 15° - 16° latitud norte.

Estos valores fueron corroborados realizando la corrección topográfica, por el método de la retícula de Hammer (Dobrin 1961) a un total de 8 estaciones correspondientes aproximadamente un 10% del total de las estaciones.

La diferencia de los valores calculados por ambos métodos es menor a los 0.05 mgal que es la máxima precisión del equipo.

Para realizar la **corrección de Bouguer** se aplicó la ecuación:

$$C_b = 0.0419088 * \rho * h$$

donde:

ρ es la densidad más representativa de las rocas subyacentes al punto de observación dada en gr / cm^3 .

h es la **cota**, tomada de los datos de G.P.S. para cada estación de gravedad observada.

5.1.3.- DIGITALIZACIÓN DE MAPAS.

En la **digitalización** de los mapas, se utilizó el programa Auto CAD 2000 para generar la base de datos de los Archivos 3, 4 y 5. En la figura 5-5 se puede observar los puntos utilizados en la digitalización del mapa de Intensidad Magnética Total.

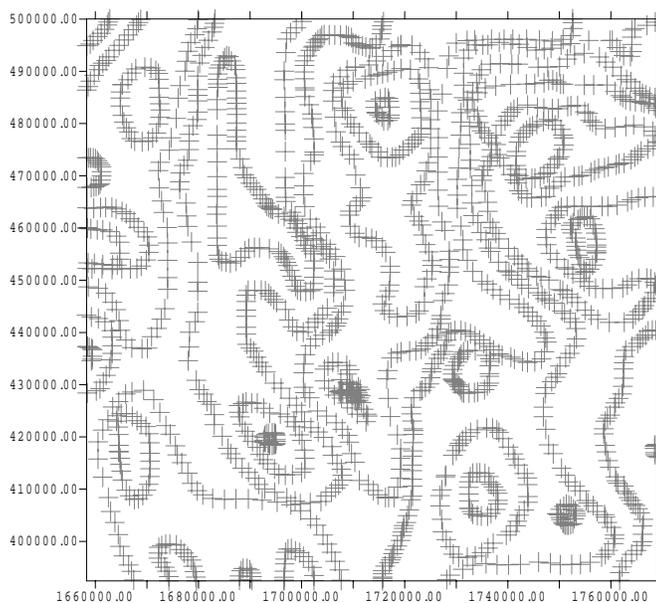


Figura 5-5.- Ubicación de los puntos producto de la digitalización del Mapa de Anomalía de Intensidad Magnética Total

5.1.4. PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

A continuación se presenta una tabla con las especificaciones del contenido de cada uno de los archivos generados (Tabla 5-1).

Archivo	Tipo de dato	Tamaño	Forma de obtener los datos	Ubicación de los datos
1	Anomalía de Aire Libre	76 Estaciones	Reducción de los datos hasta Obtener Anomalía de Aire Libre	Isla de Aves
2	Anomalía de Bouguer	76 Estaciones	Reducción de los datos hasta obtener Anomalía de Bouguer	Isla de Aves
3	Anomalía de Bouguer	1547 Puntos	Digitalización de mapa publicado por Geophys J.R. astr Soc. (1974) 38,435-448	15°-16° Latitud Norte, 63°-64° Longitud Este
4	Intensidad Magnética Total	2437 Puntos	Digitalización de Mapa publicado por The Geology of North América.	15°-16° Latitud Norte, 63°-64° Longitud Este
5	Datos Batimétricos	1246 cotas	Digitalización de Mapa Cubano, y Datos donados por la Armada	22 Km. alrededor de Isla de Aves
6	Datos de Topografía	76 cotas	Datos GPS	Isla de Aves

Tabla 5-1.- Datos generados para la elaboración del proyecto.

5.2.- FASE II: TRATAMIENTO GEOESTADÍSTICO DE LOS DATOS.

La **Estadística Descriptiva** va a permitir saber como está distribuida la población y cual es su comportamiento en función de los estadísticos, con el objetivo de verificar la calidad de las bases de datos utilizadas para la realización del proyecto. Para ello se utilizó el programa SPSS versión 7, el cual fue aplicado a los archivos de datos especificados (Tabla 5-1) .

Anomalía de Bouguer en Isla de Aves: Es muy importante verificar la calidad de estos datos ya que es con la anomalía de Bouguer con la que se hace el modelo final

El histograma presenta una distribución de frecuencia con una asimetría positiva, lo que se aprecia en el grafico de caja y bigotes (Figura 5-13), y en la tabla de valores percentiles (Tabla 5-6), donde los datos presentan una mayor dispersión a partir de la mediana,

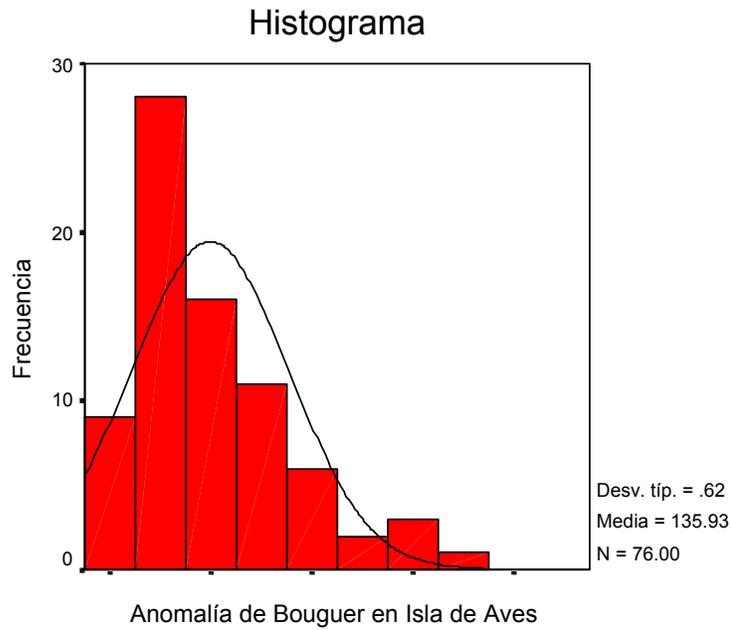


Figura 5-12. Histograma de frecuencia de los datos de Anomalía de Bouguer, en Isla de Aves

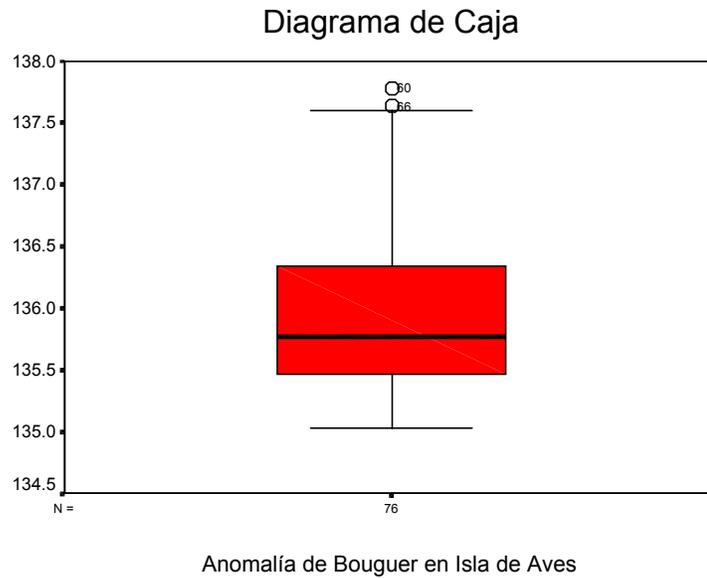


Figura 5-13. Diagrama de caja y bigote de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

	N		Percentiles		
	Válidos	Perdidos	25	50	75
ABL	76	0	135.4658	135.7730	136.3395

Tabla 5-6. Valores Percentiles de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

lo que se corrobora con el coeficiente de asimetría (Tabla 5-7), ya que presenta un valor mayor a cero,

	N		Asimetría		Curtosis	
	Válidos	Perdidos	Estadístico	Error típ.	Estadístico	Error típ.
	Estadístico	Estadístico				
ABL	76	0	1.144	.276	1.026	.545

Tabla 5-7. Medidas de Distribución de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

Se puede ver que la media y la mediana (Tabla 5-8) presentan una diferencia mínima 0.1502, considerando que el rango es de 2.76 y que la varianza es de 0,38 (Tabla 5-9) lo que indica que en el área de estudio los valores de Anomalía de Bouguer reflejan una zona “con pocos cambios litológicos laterales y estructuralmente simple”, debido a que el histograma presenta una curva de distribución normal pronunciada(Figura 5-12).

	N		Media	Mediana	Moda	Suma
	Válidos	Perdidos				
ABL	76	0	135.9302	135.7730	135.03	10330.69

Tabla 5-8. Medidas de Tendencia Central de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

	N		Desv. típ.	Varianza	Mínimo	Máximo
	Válidos	Perdidos				
ABL	76	0	.6228	.3878	135.03	137.79

Tabla 5-9. Medidas de Dispersión de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

En el gráfico P-P con tendencia (Figura 5-14), los valores centrales presentan una lejanía de la linealidad con respecto a la curva de distribución normal probablemente asociada a valores centrales con una moda muy alta, lo que habla de una zona homogénea, en el caso en particular con cuerpos anómalos bien identificados por el conjunto de datos.

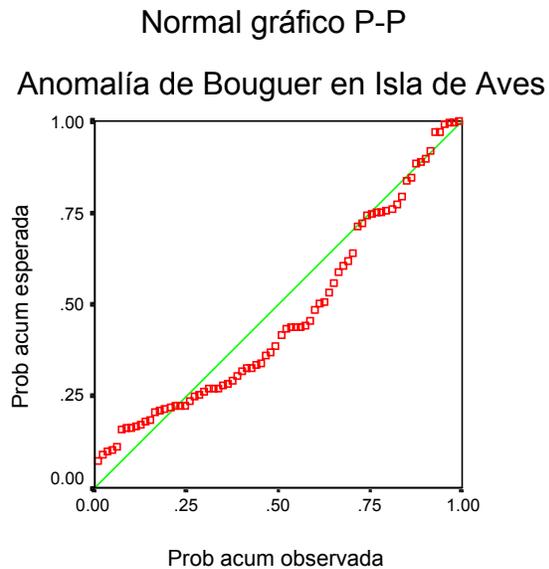


Figura 5.14. Gráfico normal P-P de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

Sin embargo, al observar el gráfico normal P-P sin tendencia (Figura 5-15), los valores están entre -0.1 y 0.1 por lo que la curva de distribución normal se ajusta al conjunto de datos.

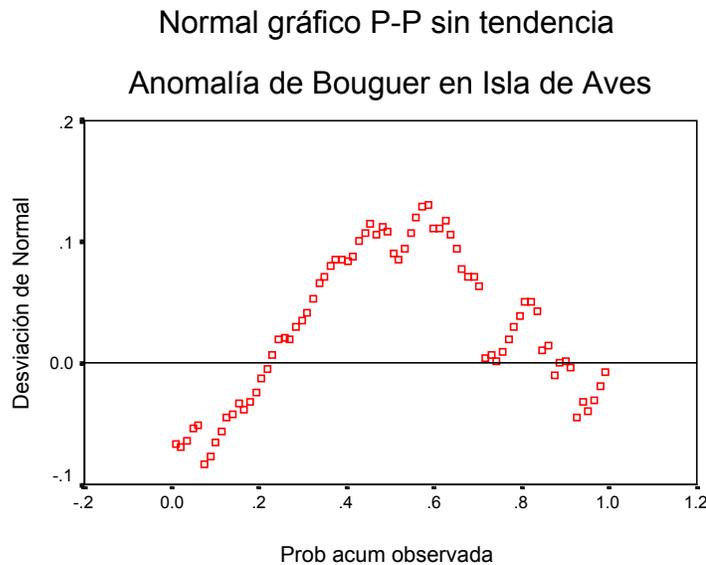


Figura 5-15. Gráfico de Normal P-P Sin tendencia de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

En el gráfico Normal Q-Q (Figura 5-16), se nota que el valor normal esperado en los extremos se aleja de la linealidad, lo que indica que los valores extremos sugieren la presencia de cuerpos anómalos muy localizados en el conjunto de datos,

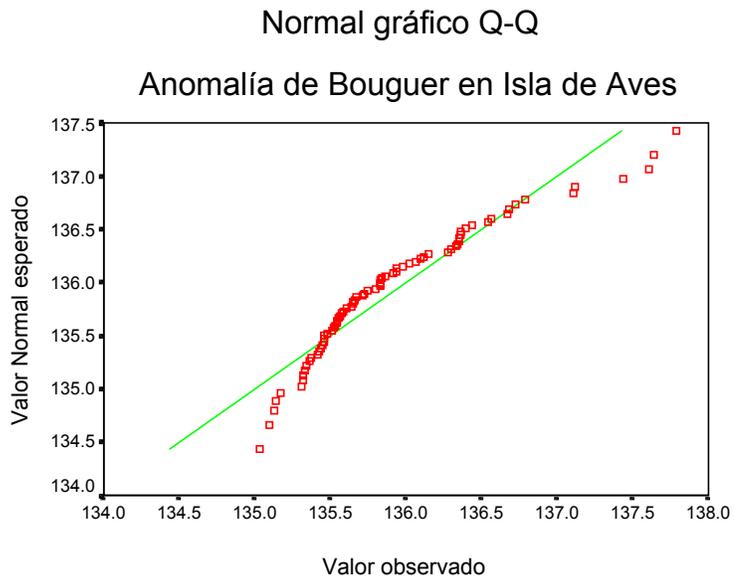


Figura 5-16. Gráfico Normal Q-Q de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

Al observar el gráfico Normal Q-Q sin tendencia (Figura 5-17) se aprecian valores entre -0.2 y 0.6 , lo que indica que los valores normales esperados están en un rango de normalidad permitido por la prueba (-1 y 1).

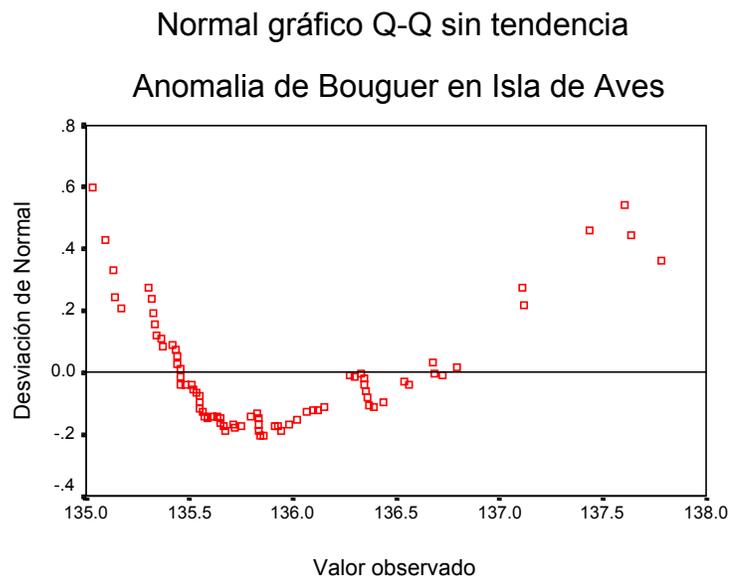


Figura 5-17. Gráfico Normal Q-Q sin tendencia de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		ABL
N		76
Parámetros normales ^{a,b}	Media	135.9302
	Desviación típica	.6228
Diferencias más extremas	Absoluta	.137
	Positiva	.137
	Negativa	-.092
Z de Kolmogorov-Smirnov		1.194
Sig. asintót. (bilateral)		.115

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 5-10. Prueba de Kolmogorov – Smirnov de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves

Anomalía de Bouguer: El histograma representa una distribución de frecuencia sesgada hacia la derecha, lo que indica valores de anomalía de Bouguer positiva superiores aprox. a 100 mgal, en un pequeño grupo de datos, lo que estaría representando probablemente el pináculo en estudio.

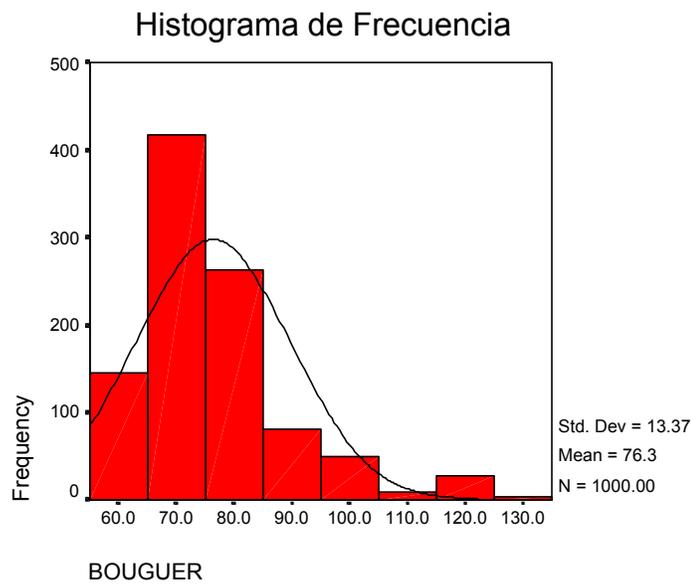


Figura 5-24 . Histograma de frecuencia de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio.

En el diagrama de caja y bigotes (Figura 5-25), se puede observar como hay un vacío de datos entre el percentil 1 y 2 (Tabla 5-25), lo que corrobora el sesgamiento en el histograma de frecuencia.

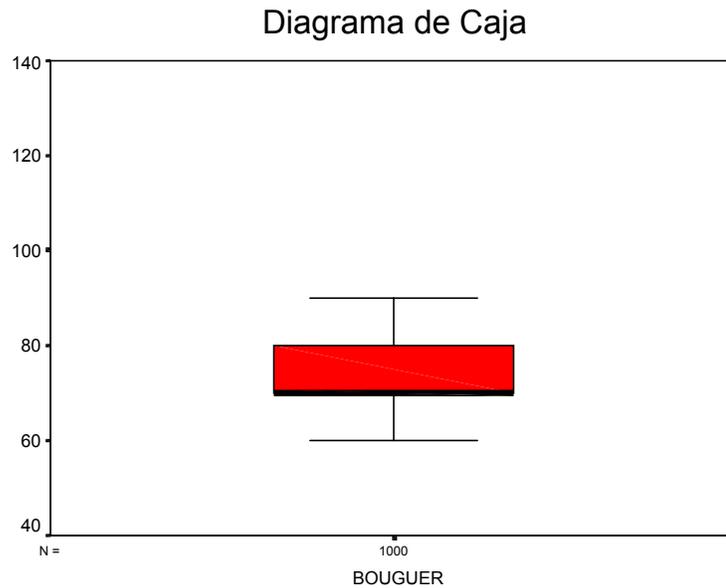


Figura 5-25. Gráfico de Caja y Bigote de los datos de Anomalía de Bouguer en el àrea de estudio.

Valores Percentiles

BOUGUER

N	Valid	1000
	Missing	0
Percentiles	25	70.0000
	50	70.0000
	75	80.0000

Tabla 5-25. Valores percentiles de los datos de Anomalía de Bouguer en el àrea de estudio

En el gráfico de Medidas de Distribución, se puede apreciar que el valor de 1.457 de asimetría indica una mayor dispersión a partir de la media, como se observa en el histograma de frecuencia.

Medidas de Distribución

BOUGUER

N	Valid	1000
	Missing	0
Skewness		1.457
Std. Error of Skewness		.077
Kurtosis		2.582
Std. Error of Kurtosis		.155

Tabla 5-26. Medidas de Distribución datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio.

Medidas de Tendencia Central

BOUGUER

N	Valid	1000
	Missing	0
Mean		76.3300
Median		70.0000
Mode		70.00

Tabla 5-27. Medidas de tendencia central de los datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio.

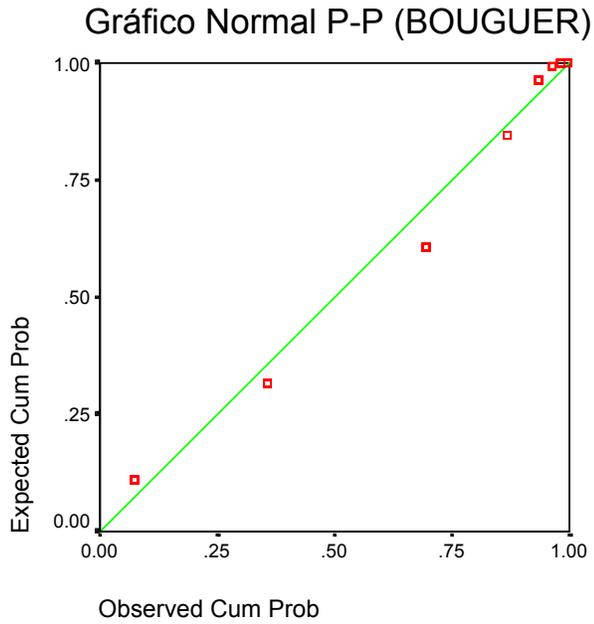


Figura 5-26. Gráfico Normal P-P de los datos de Anomalía de Bouguer en el àrea de estudio.

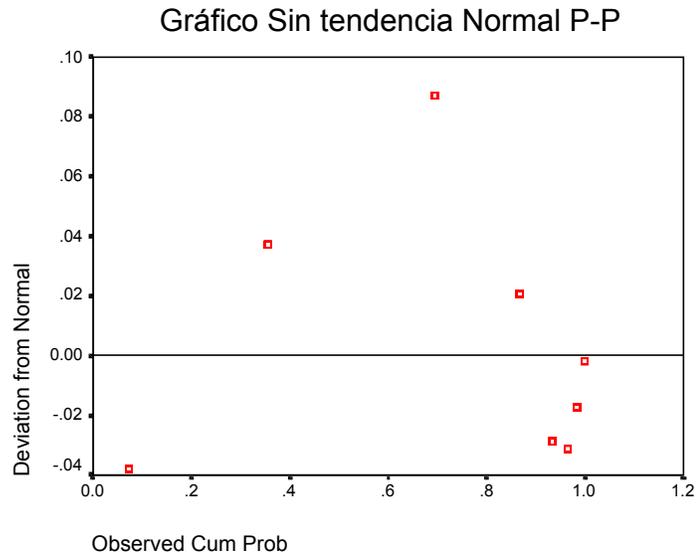


Figura 5-27. Gráfico Normal P-P sin tendencia de los datos de Anomalía de Bouguer en el àrea de estudio.

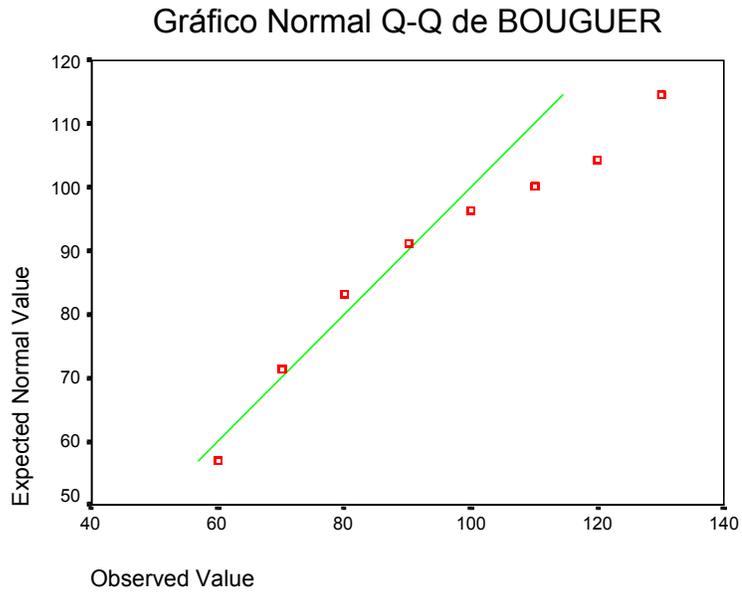


Figura 5-28. Gráfico Normal Q-Q de los datos de Anomalía de Bouguer en el àrea de estudio.

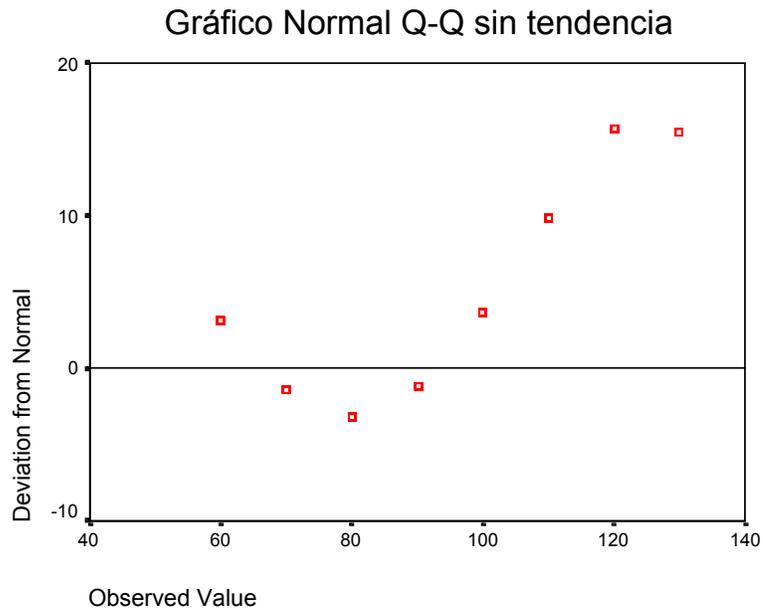


Figura 5-29. Gráfico Normal Q-Q sin tendencia de los datos de Anomalía de Bouguer en el àrea de estudio.

Anomalía de Intensidad Magnética Total: En el área de estudio.

En el Histograma de Frecuencia (Figura 5-20), de los datos de Intensidad Magnética Total se puede observar como la curva de distribución esta centrada,

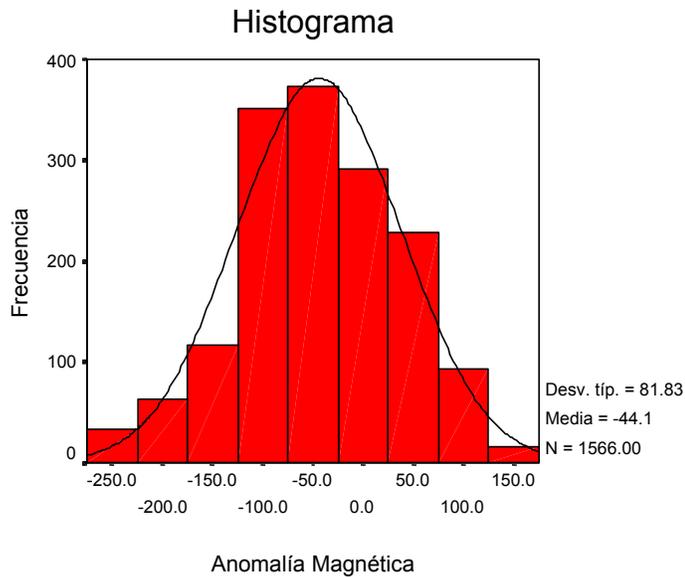


Figura 5-30. Histograma de frecuencia de los datos de intensidad magnética total en el área de estudio.

por lo que se observa que la media (Figura 5-21), presenta una diferencia de tan solo 5,9387 con la moda y la mediana en un rango de valores de 400,

	N		Media	Mediana	Moda	Suma
	Válidos	Perdidos				
AMAGNETI	1566	0	-44.0613	-50.0000	-50.00	-69000.00

Tabla 5-21. Medidas de tendencia central de los datos de intensidad magnética total en la zona de estudio.

El gráfico de caja y bigotes (Figura 5-21), sirve para representar como los datos presentan una distribución centrada y distribuida equitativamente a lo largo de los 4 percentiles.

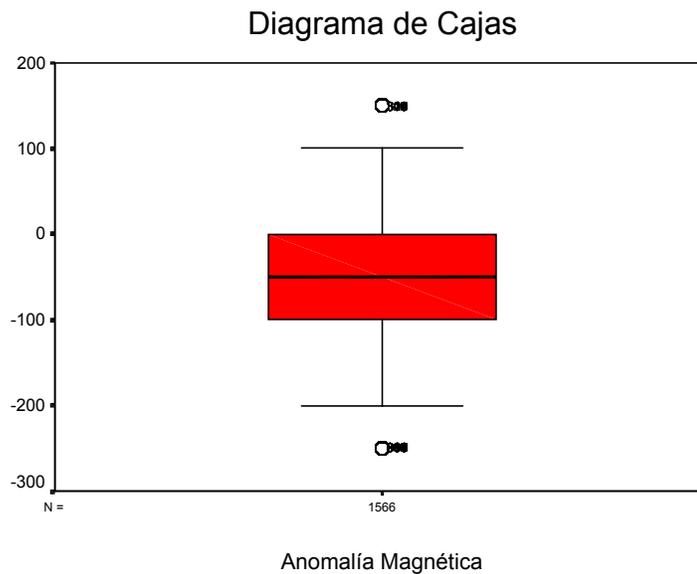


Figura 5-31. Grafico de Caja de los de intensidad magnética total en la zona de estudio.

la mayoría de los datos presentan valores negativos como se muestra en la tabla de valores percentiles (Figura 5-22) donde el 75% de los datos es igual o menor que cero.

	N		Percentiles		
	Válidos	Perdidos	25	50	75
AMAGNETI	1566	0	-100.0000	-50.0000	.0000

Tabla 5-22. Valores percentiles de los datos de intensidad magnética total en la zona de estudio.

Además el coeficiente de asimetría es -0.137 (Tabla), lo que indica un sesgo positivo que corrobora lo antes expuesto.

	N		Asimetría		Curtosis	
	Válidos	Perdidos	Estadístico	Error típ.	Estadístico	Error típ.
	Estadístico	Estadístico				
AMAGNETI	1566	0	-.137	.062	-.194	.124

Tabla 5-23. Medidas de distribución de los datos de intensidad magnética total en la zona de estudio.

	N		Desv. típ.	Varianza	Mínimo	Máximo
	Válidos	Perdidos				
AMAGNETI	1566	0	81.8312	6696.3387	-250.00	150.00

Tabla 5-24. Medidas de Dispersión de los datos de Intensidad Magnética total en la zona de estudio.

En el Gráfico de Normal P-P (Figura 5-22), se observa como la curva de distribución de frecuencia teórica se ajusta a la curva de distribución de frecuencia observada, debido a que todos los datos están sobre la línea

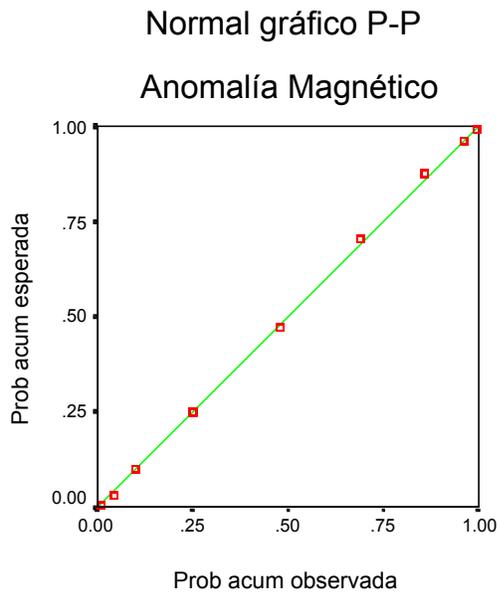


Figura 5-32. Gráfico Normal P-P de Intensidad Magnética Total en el área de estudio.

Lo que se corrobora al observar el gráfico Q-Q. Donde todos los valores presentan linealidad, lo que indica que coinciden los valores normales esperados o teóricos y los observados.

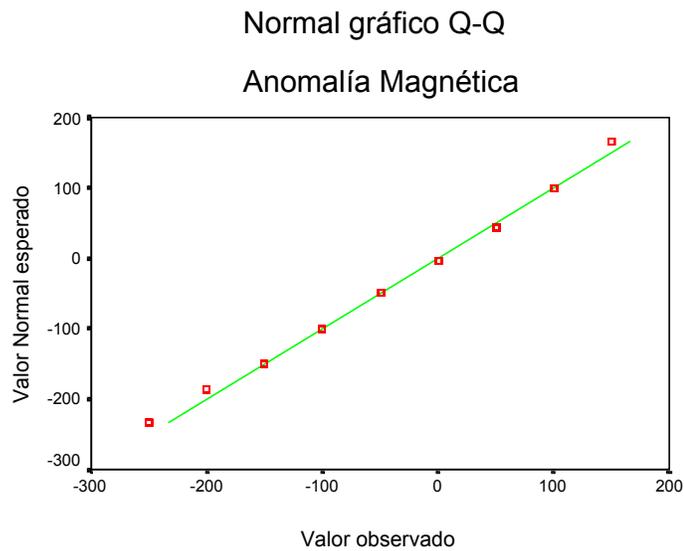


Figura 5-33. Gráfico Normal Q-Q de Intensidad Magnética Total en el área de estudio.

por lo que los datos pueden ser representados por una curva de distribución normal. Lo que se afirma en los resultados obtenidos en la prueba de Kolmogorov – Smirnov, donde la singularidad presenta un valor de 0.000 lo que indica un grado de ajuste de los datos con una distribución normal.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		AMAGNETI
N		1566
Parámetros normales ^{a,b}	Media	-44.0613
	Desviación típica	81.8312
Diferencias más extremas	Absoluta	.127
	Positiva	.127
	Negativa	-.111
Z de Kolmogorov-Smirnov		5.036
Sig. asintót. (bilateral)		.000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla 5-24. Gráfico de Kolmogorov – Smirnov de los datos de Intensidad Magnética total en la zona de estudio.

5.2.2 ANÁLISIS DE VARIOGRAMAS

El análisis de los **variogramas** permite estudiar el comportamiento espacial de los datos en la zona de estudio, de manera tal de obtener una mejor representación espacial de las estructuras que originan las anomalías, por lo que se realizó un estudio para detectar las direcciones de anisotropía, utilizando como herramienta el cálculo de variogramas.

Para ajustar el mejor modelo se tomó aquel con el menor error de aproximación utilizando el programa **GRIDSTATPRO versión 99.01s** (GRIDSTATPRO Inc., 1999), cuyos datos sirven de entrada al programa **Variowin versión 2.2** (VARIOWIN, N.Y., 1996) con el que se termina de ajustar el variograma variando los valores de sill y rango.

El programa Gridstat muestra la elipse de anisotropía, una roseta de distribución espacial de los datos y un variograma de superficie. A continuación se muestra el estudio para los archivos de datos.

Análisis de variogramas de Las Anomalías de Aire Libre en Isla De Aves. En la figura 5-36 se puede apreciar la tendencia de la distribución espacial de los datos de anomalía de aire libre en la Isla de Aves, donde se perciben las direcciones de mayor y menor tendencia de variación espacial con un azimut de 150° y 65° respectivamente, lo que se ve reflejado en los variogramas (Figura 5-37 y 5-38),

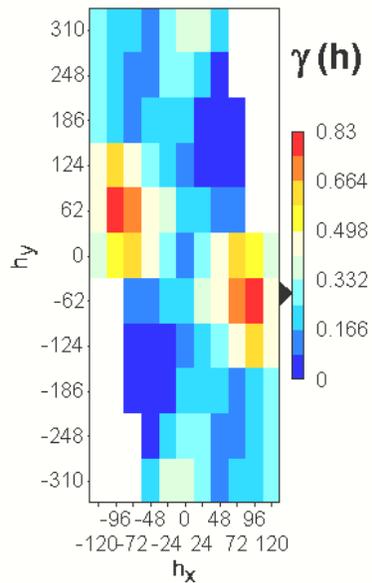


Figura 5-36. Variograma de superficie de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves.

En el variograma con azimut 65°, el efecto pepita se atribuye a la heterogeneidad de la grilla debido a la forma de la isla.

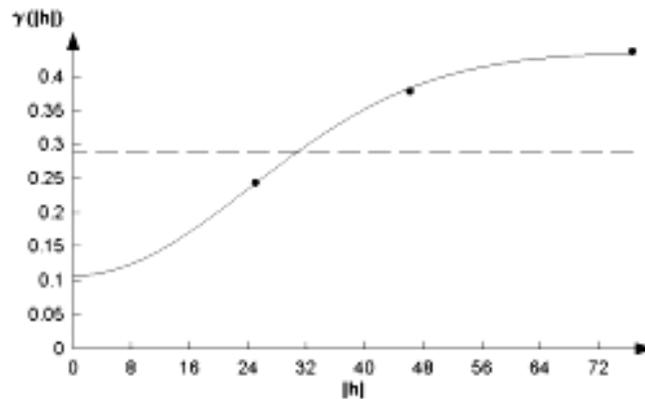


Figura 5-37. Modelo del Variograma en dirección 65°, de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves.

La mayor variabilidad para un azimut de 150° se atribuye a los cambios litológicos laterales presentes en la isla (Figura 5-38), entre la caliza El Mástil y las arenas de playa.

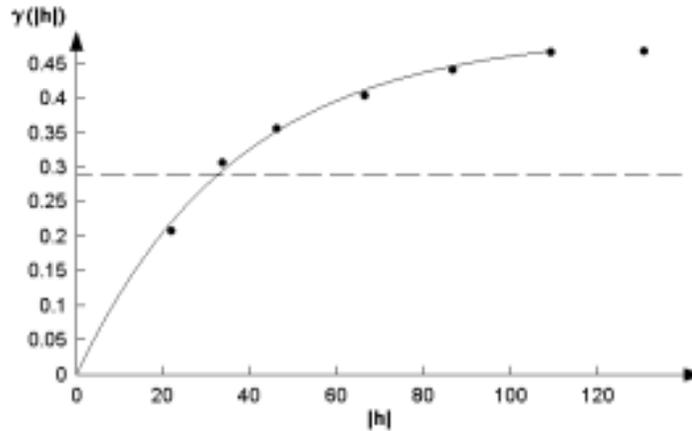


Figura 5-38. Modelo del Variograma en dirección 150°, de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves.

En la roseta de distribución espacial (Figura 5-39), se observa que la dirección de menor variación espacial es aproximadamente 65° como se ajusta en el variograma (Figura 5-37), tomándose éste como el eje mayor de la elipse de anisotropía.

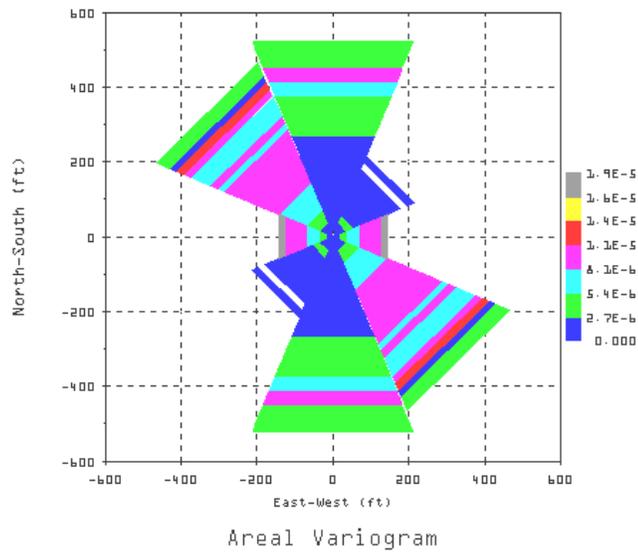


Figura 5-39. Roseta de Distribución Espacial de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves.

Análisis Geoestadístico de la Anomalía Bouguer en Isla de Aves. Al igual que en los datos de anomalía de Aire Libre, se observa como el variograma de superficie (Figura 5-40), se correlaciona con los resultados obtenidos al ajustar los modelos de variograma (Figura 5-41 y 5-42) con los azimut correspondientes.

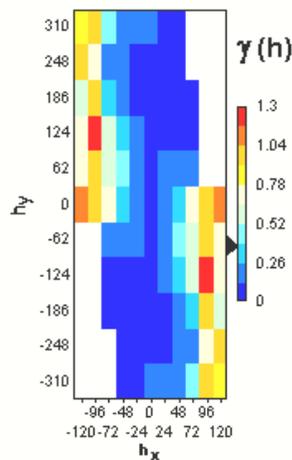


Figura 5-40. Variograma de Superficie de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves.

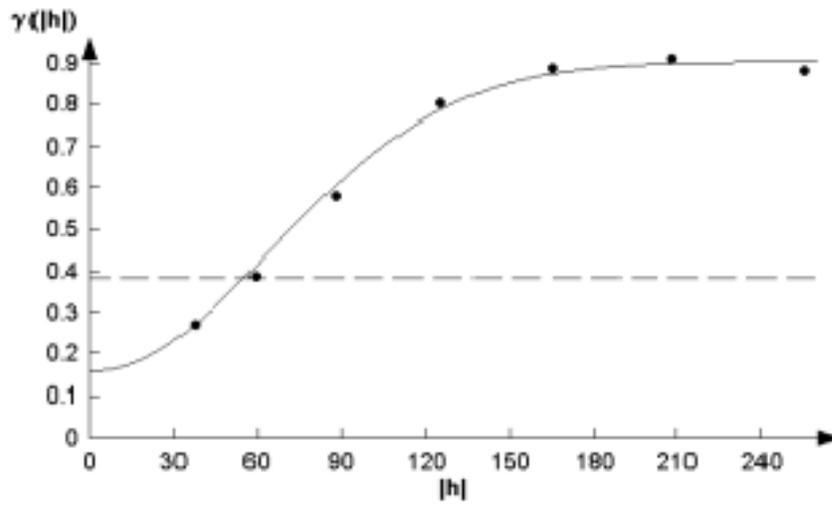


Figura 5-41. Modelo del Variograma en dirección 145°, de los datos de Anomalía de Bouguer en Isla de Aves.

La falta de ajuste en el modelo de variogramas indica los problemas de borde, debido a que los datos están limitados a la superficie de la isla y a la forma alargada en dirección norte-sur.

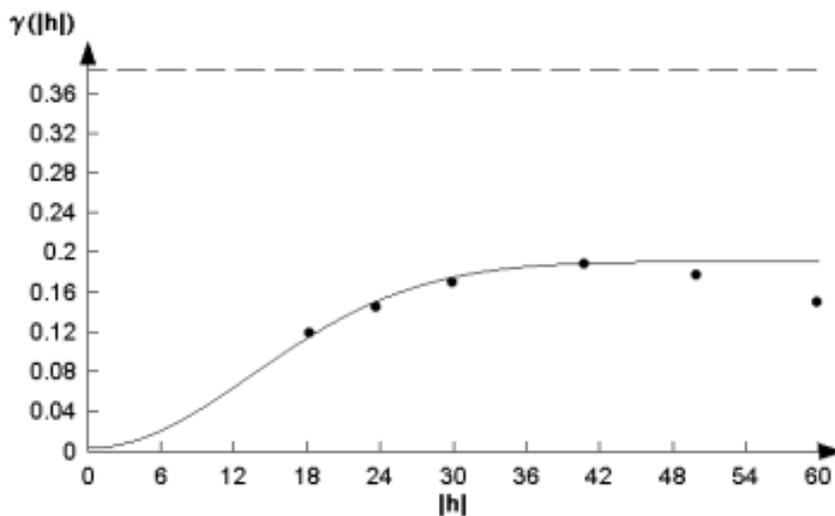


Figura 5-42. Modelo del Variograma en dirección 61°, de los datos en Isla de Aves.

Análisis de variogramas de las Anomalías de Bouguer. El variograma de superficie de la Anomalia de Bouguer (Figura 5-43), muestra la orientación del promontorio de Aves, con 25° de rumbo como se observa en el variograma de superficie (Figura 5-45).

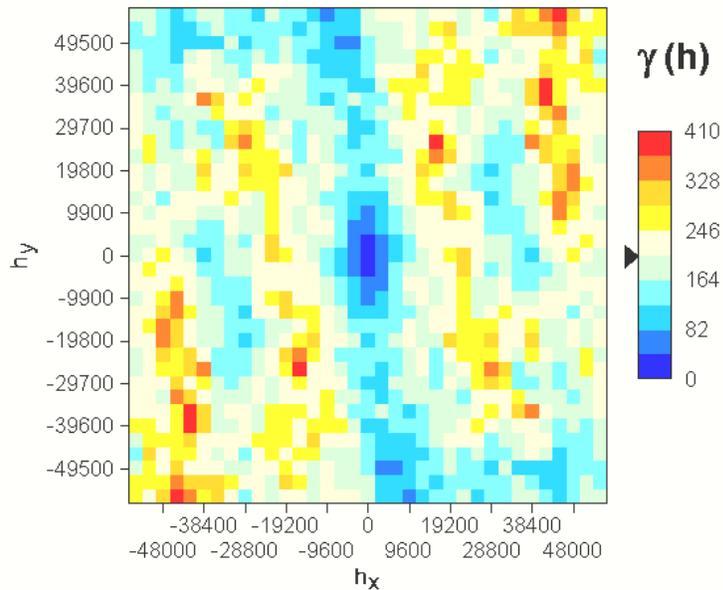


Figura 5-43. Variograma de Superficie de los datos de anomalía de Bouguer en el área de estudio.

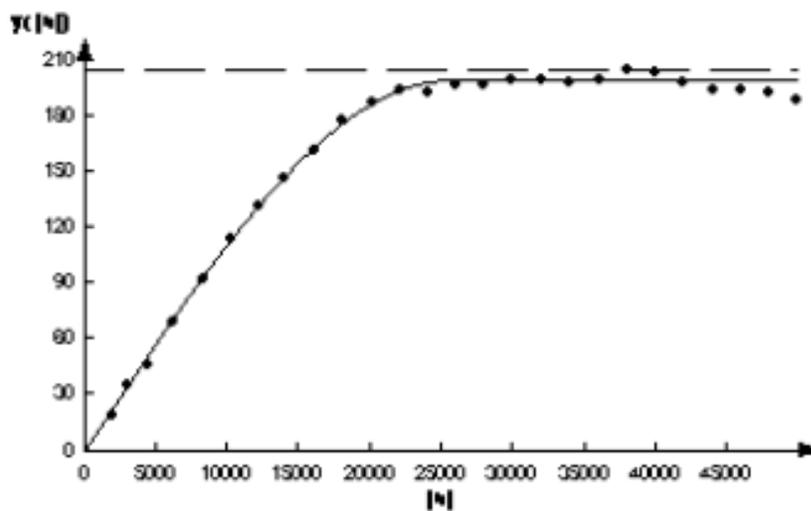


Figura 5-44. Modelo del Variograma en dirección 120°, de los datos de anomalía de Bouguer en el área de estudio.

En ambos variogramas (figuras 5-44 y 5-45), se observan desviaciones asociadas a problemas de borde, además la variación de los datos se ve reflejada en la diferencia que presentan el rango y sill.

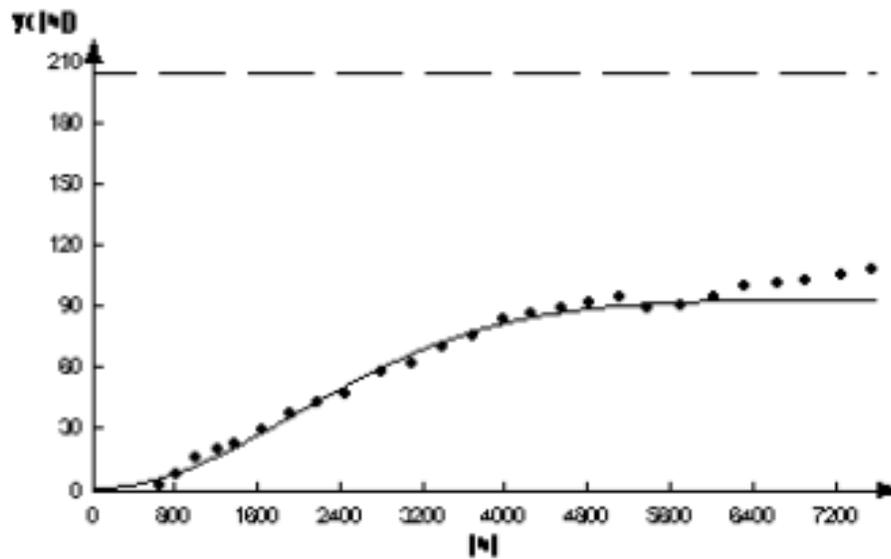


Figura 5-45. Modelo del Variograma en dirección 25°, de los datos de anomalía de Bouguer en el área de estudio.

Análisis Geoestadístico de los Datos de Intensidad Magnética Total.

Los datos de intensidad magnética total muestran nuevamente la orientación de menor variación de los datos en la parte central de la zona (Figura 5-46),

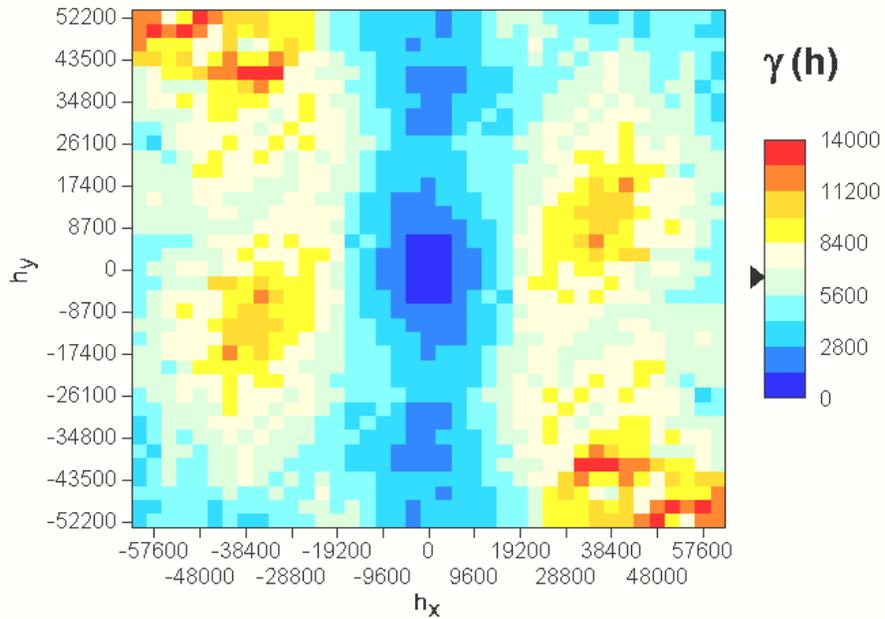


Figura 5-46. Variograma de superficie de los datos de IMT en la zona de estudio.

con un azimut de 90° (Figura 5-47), que indica en este caso la dirección de la estructura.

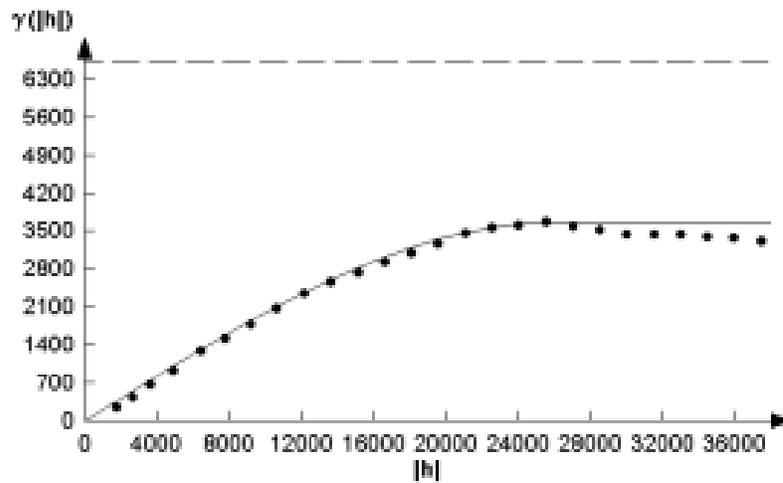


Figura 5-47. Modelo de Variograma en la dirección 90° de los datos de IMT en la zona de estudio.

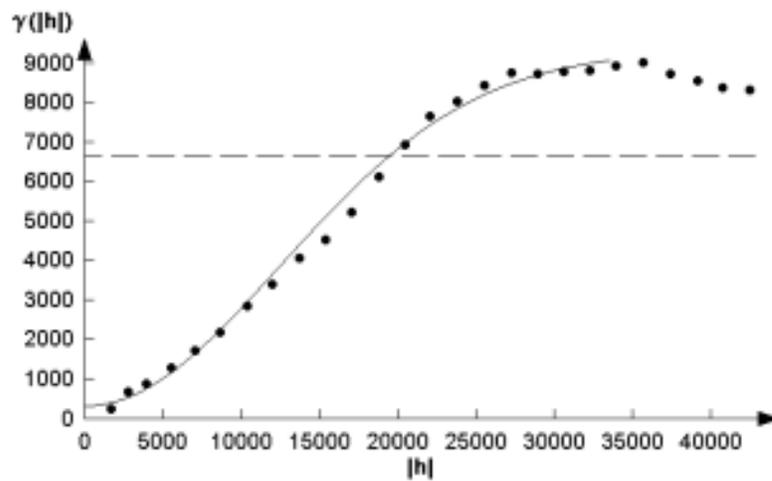


Figura 5-48. Modelo de Variograma en la dirección 0° de los datos de IMT en la zona de estudio.

La roseta de distribución (Figura 5-49), corrobora la dirección del promontorio de Aves.

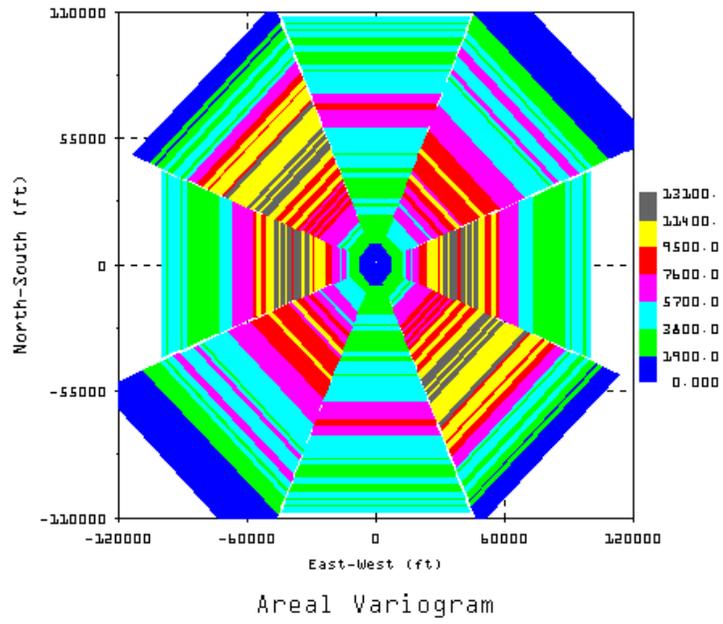


Figura 5-49. Roseta de Distribución Áreal de los datos de IMT en la zona de estudio.

CAPÍTULO VI. INTERPRETACIÓN DE DATOS

La interpretación de los datos permite conocer como las respuestas gravimétrica y magnética son capaces de identificar las estructuras en el subsuelo, ubicar espacialmente los eventos responsables de las anomalías y realizar un modelo 2D en profundidad integrando la respuesta de ambos métodos. La Figura 6-1, presenta un resumen del método de trabajo en el que se aprecian los pasos para la elaboración del modelo.

La realización de los mapas de Anomalías de Bouguer e Intensidad Magnética Total, reflejan el comportamiento en superficie de las anomalías estudiadas, a partir de las cuales se pretende inferir las características que causan los cuerpos en el subsuelo.

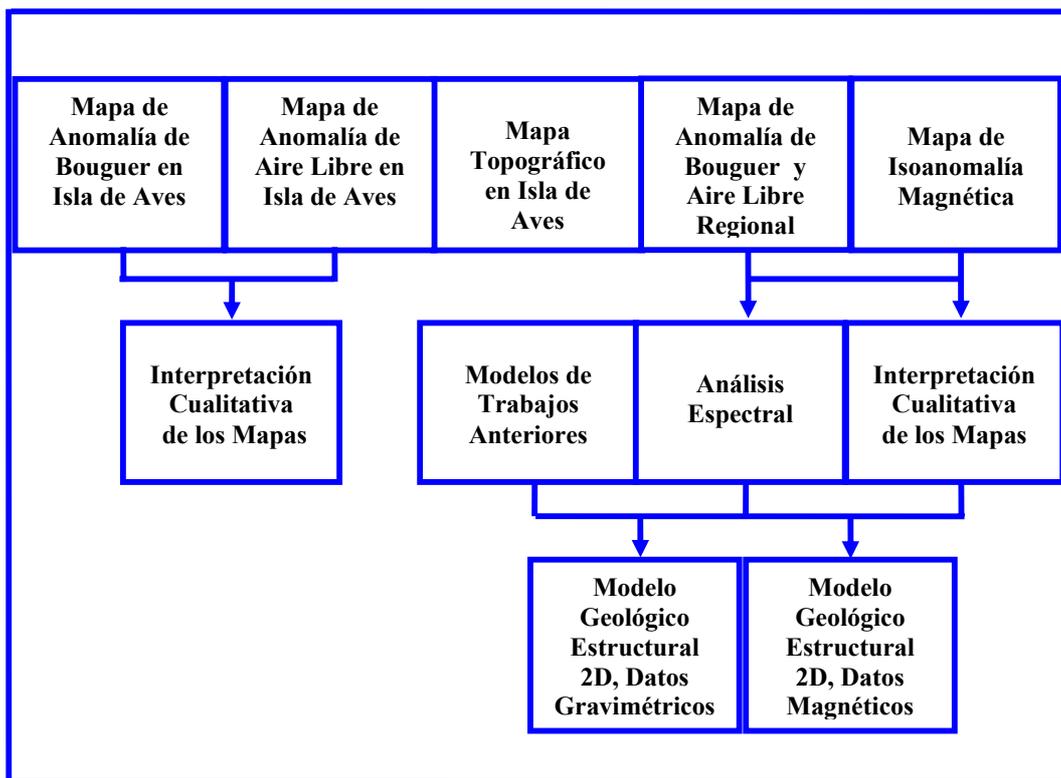


Figura 6-1.- Método de trabajo en la interpretación de los Datos.

Los mapas fueron elaborados mediante la utilización del programa Surfer 6.1, donde se usó el estimador Kriging, el cual requiere de una serie de parámetros obtenidos a partir de estudios geoestadísticos (Capítulo V), con el fin de realizar la mejor estimación de los valores medidos $Z(X_0)$ en un punto (X_0) , como una combinación lineal de los valores $Z(X_i)$ en los puntos de observación (X_i) .

6.1.- MAPAS DE ISOANOMALÍAS DE AIRE LIBRE EN ISLA DE AVES

En el Mapa de Isoanomalía de Aire Libre (Figura 6-2) se observó que :

a.- Las curvas se encuentran en un rango de 122,20 – 123 mgal, con un intervalo de interpolación de 0.2 mgal.

b.- El mapa de anomalía de Aire Libre modela la topografía de la isla.

c.- En la parte norte central se encuentran dos máximos gravimétricos de 122.60 a 123 mgal. correspondientes a las zonas de mayor cota, con un gradiente en dirección noreste de 0.04 mgal / mts., asociado a las estructuras de mayor densidad en la superficie de la isla.

d.- En la parte sur y central de la Isla de Aves se encuentran dos mínimos gravimétricos de 122,20 mgal., con un gradiente de 0.008 y 0.01 mgal / mts.

6.2.- MAPAS DE ISOANOMALÍAS DE BOUGUER EN ISLA DE AVES

En el mapa de Isoanomalías de Bouguer (Figura 6-3) se pudo observar:

a.- Que las curvas presentan un rango de 135 – 137 mgal., con un intervalo de interpolación de las curvas de 0.20 mgal.

b.- Un máximo gravimétrico por encima de los 136 mgal. ubicado en la parte norte de la Isla, con un gradiente de aproximadamente 0.02 mgal / mts. en dirección Este – Oeste, el cual es atribuido a las calizas de El Mástil, unidad litológica de edad Pleistoceno, con velocidades de propagación entre 2500 a 3500 m / s (Gallovich y Aguilera, 1970).

c.- Se observan, en la parte central y sur del mapa, dos mínimos por debajo de los 135,60 mgal. con un gradiente de 0.008 mgal / mt. asociados a los mayores espesores de arena poco consolidada de la isla, según lo descrito por Pérez (1970).

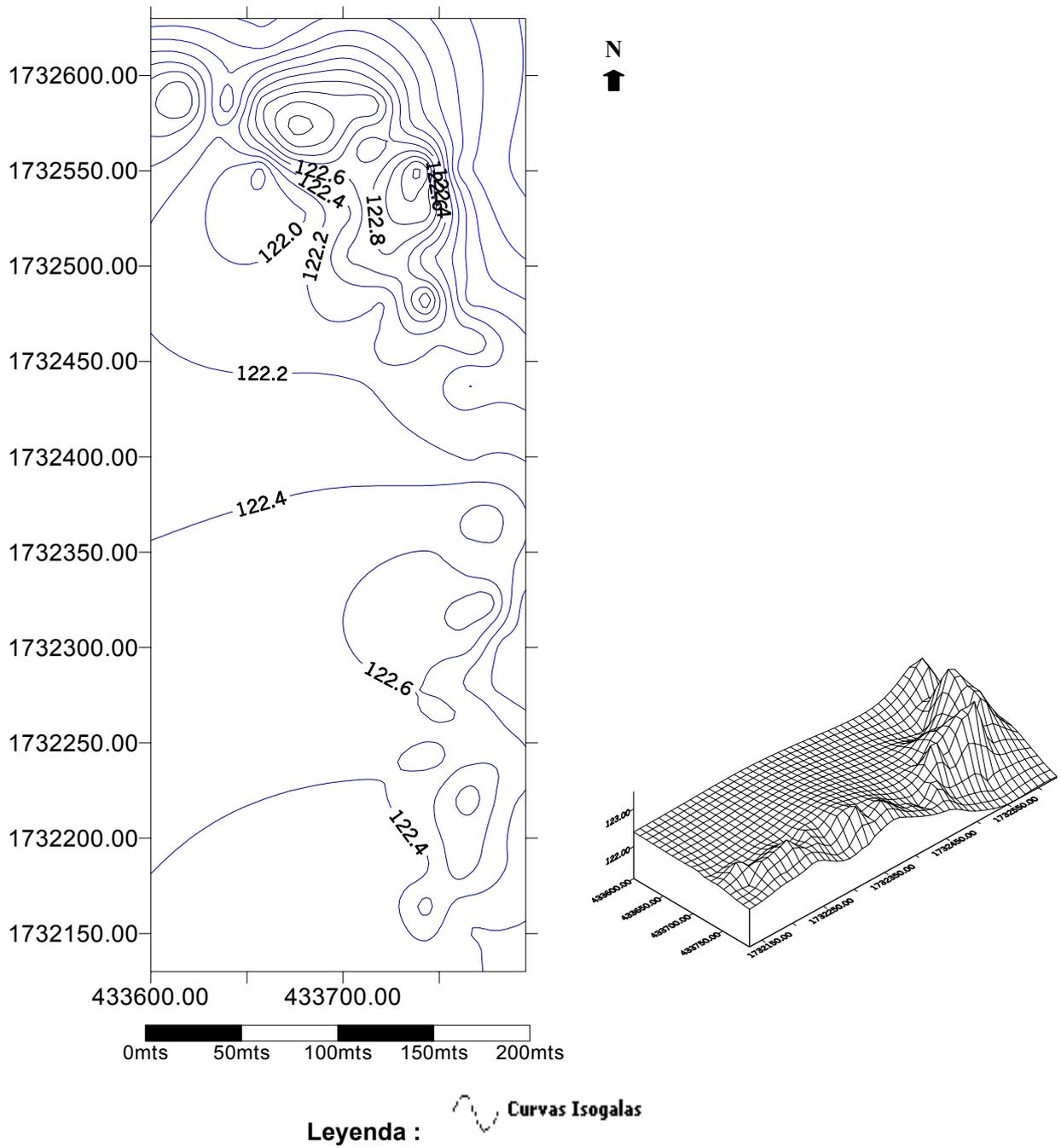
6.3.- MAPA DE ISOANOMALÍA DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

En el mapa de isoanomalías magnéticas (Figura 6-4) las curvas presentan un rango de –250 a 150 nT, con un intervalo de interpolación de las curvas de 20 nT.

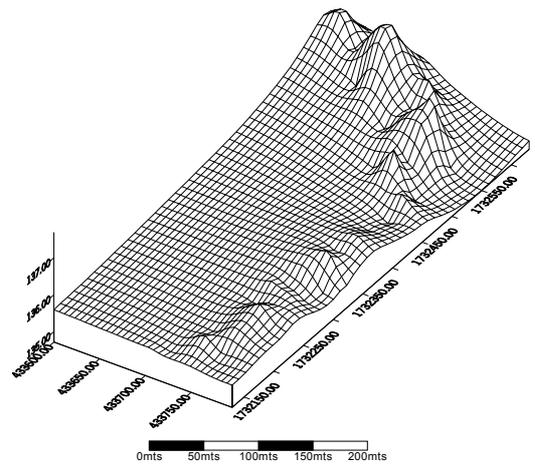
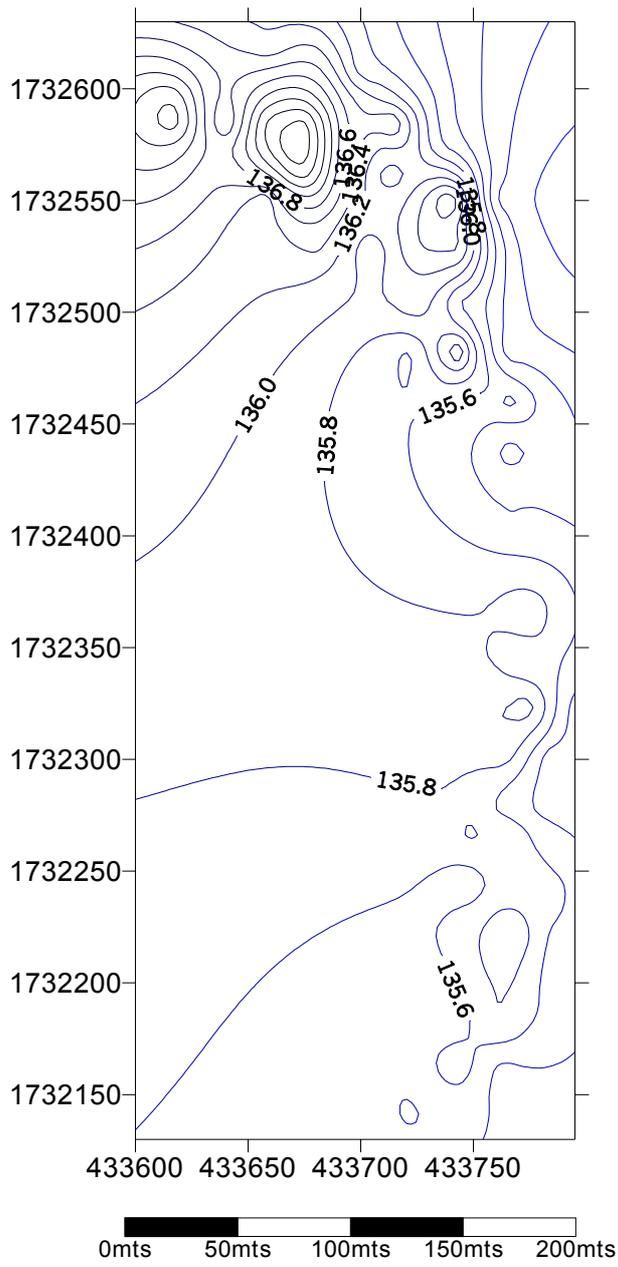
El mapa está marcado por dos parejas magnéticas, una en la parte norte central del mapa, con un gradiente en dirección noroeste de 4.4 nT / Km., y otra en la parte sur central del mapa con un gradiente en dirección este-oeste de 10,6 nT / Km., ambos asociados a la estructura del Levantamiento de Aves.

Para realizar el mapa regional de Isoanomalía de Intensidad Magnética Total, se ajustó el mejor polinomio mediante el cálculo de la bondad de ajuste. El polinomio que mejor ajustó fue el de grado 2, a partir del cual la curva presentó un comportamiento similar.

En el mapa regional de isoanomalías magnéticas las curvas presentan un rango de –150 a 20 nT, con un intervalo de interpolación de las curvas de 10 nT.



**Figura 6-2. Mapa de Isoanomalía de Aire Libre en Isla de Aves.
Contorno a intervalos de 0.2 mgal.**



Legenda :  **Curvas Isogalas**

**Figura 6.3. Mapa de Isoanomalía de Bouguer en Isla de Aves
Contorno a intervalos de 0.2 mgal.**

En él se puede observar una tendencia de las curvas en dirección norte-sur, con un gradiente de 2 nT / Km. disminuyendo en dirección oeste – este aproximadamente, esto se asocia a la forma que toma el levantamiento en profundidad en dirección norte – sur a lo largo del eje de la estructura correspondiente al engrosamiento de la corteza, producto de la actividad del Ridge de Aves o Arco de Isla Remanente. Al oeste del mapa se aprecia un cambio en la orientación de las curvas en dirección noreste y suroeste, con un gradiente de 1 nT / Km.

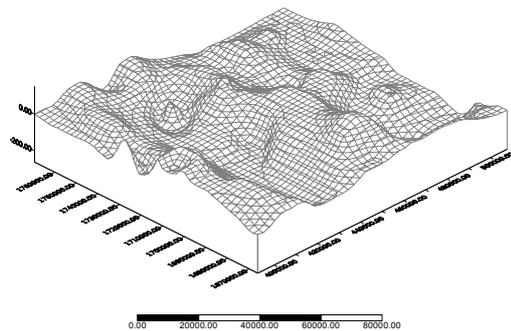
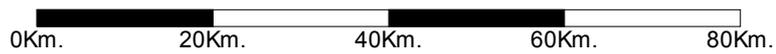
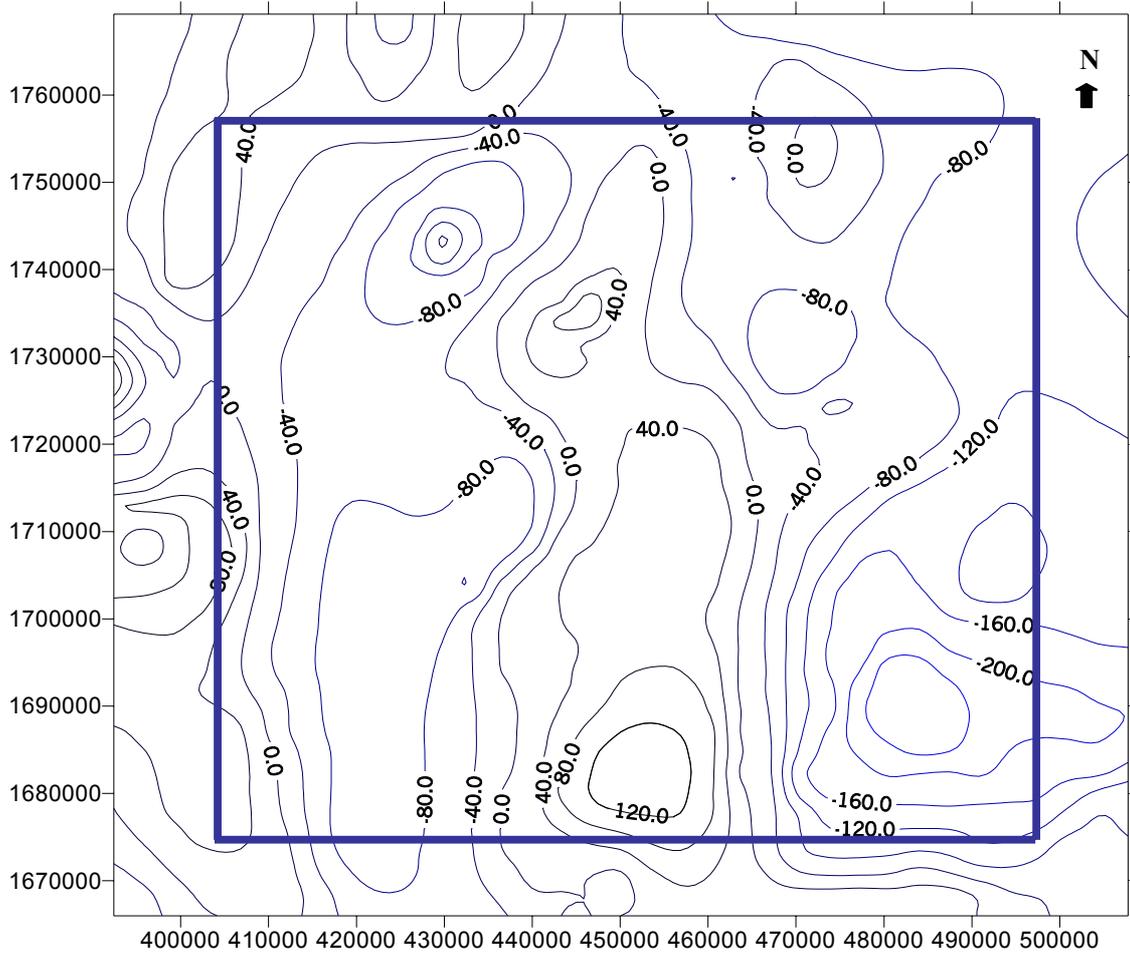
En el mapa residual de isoanomalías magnéticas las curvas presentan un rango de –100 a 150 nT, con un intervalo de interpolación de las curvas de 20 nT. En éste aprecia la similitud con el mapa de isoanomalía magnética (Figura 6-4), lo que indica que el Levantamiento de Isla de Aves es una anomalía que corta la corteza oceánica, considerando que el estudio se realiza a una escala regional de 100 Km. aproximadamente.

6.4.- MAPA DE ISOANOMALÍA DE BOUGUER DE LA ZONA DE ESTUDIO.

En el mapa de isoanomalías de Bouguer (Figura 6.7), las curvas oscilan en un rango de 60 a 130 mgal., con un intervalo de interpolación de las curvas de 3 mgal.

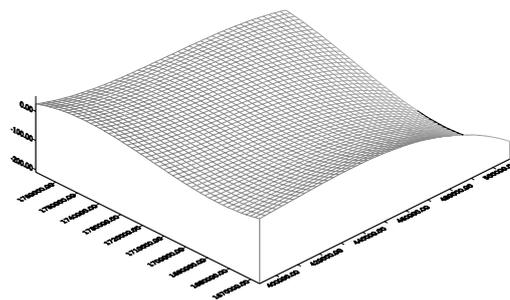
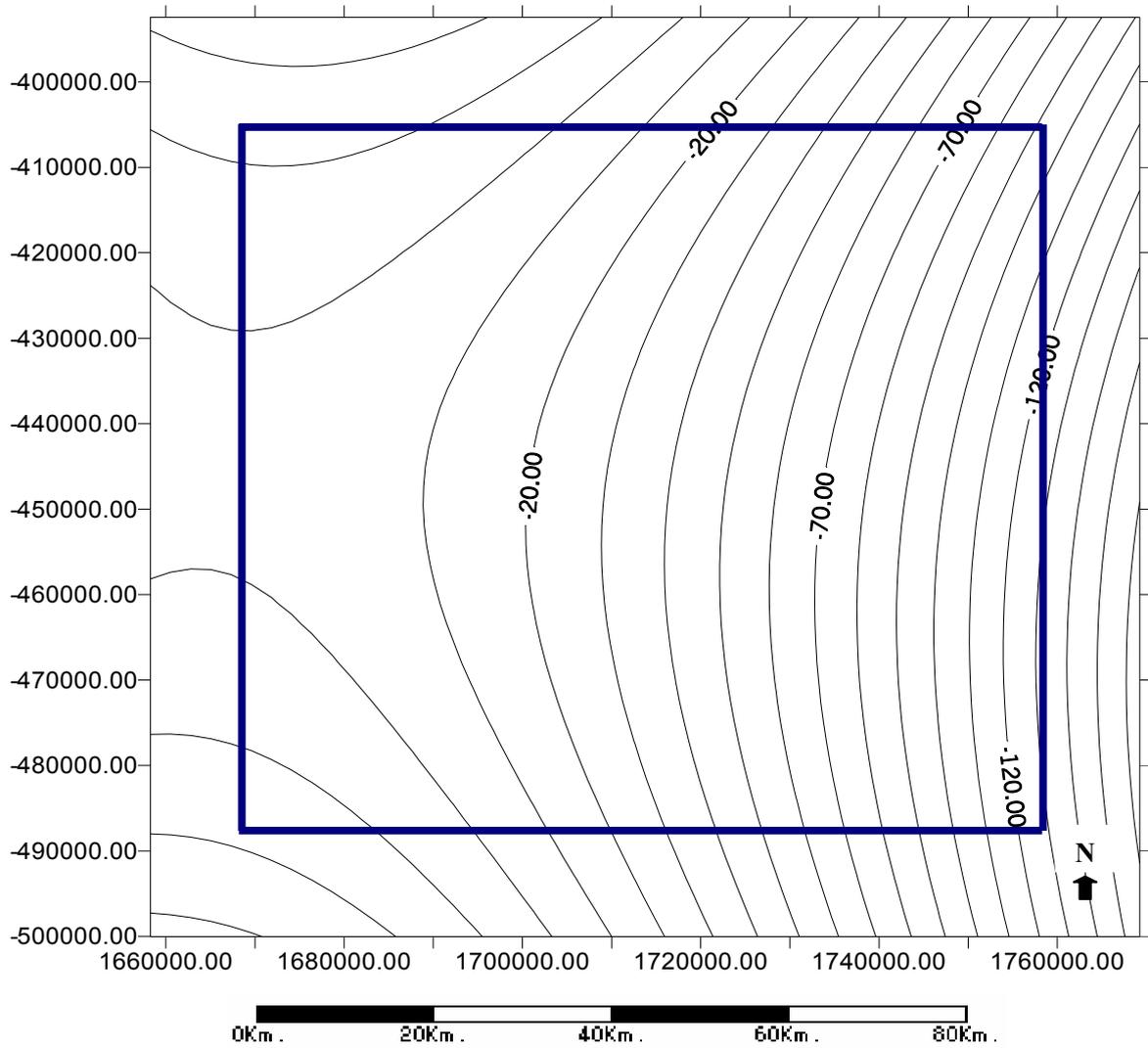
En la parte oeste del mapa se observó un máximo gravimétrico de aproximadamente 60 Km. de longitud que se prolonga en dirección norte- sur, con un gradiente de 1.42 mgal./Km. en dirección este - oeste, el cual se asocia a la Cordillera Submarina o levantamiento de Aves.

Para realizar el mapa regional de Isoanomalía de Bouguer se ajustó el mejor polinomio calculando la bondad de ajuste .El polinomio que mejor se ajustó fue el de grado 2 ,a partir del cual la curva presentó un comportamiento similar.



Leyenda:  Curvas Isogamas

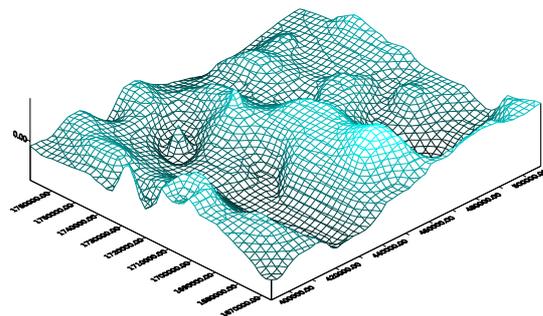
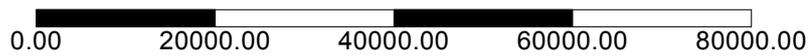
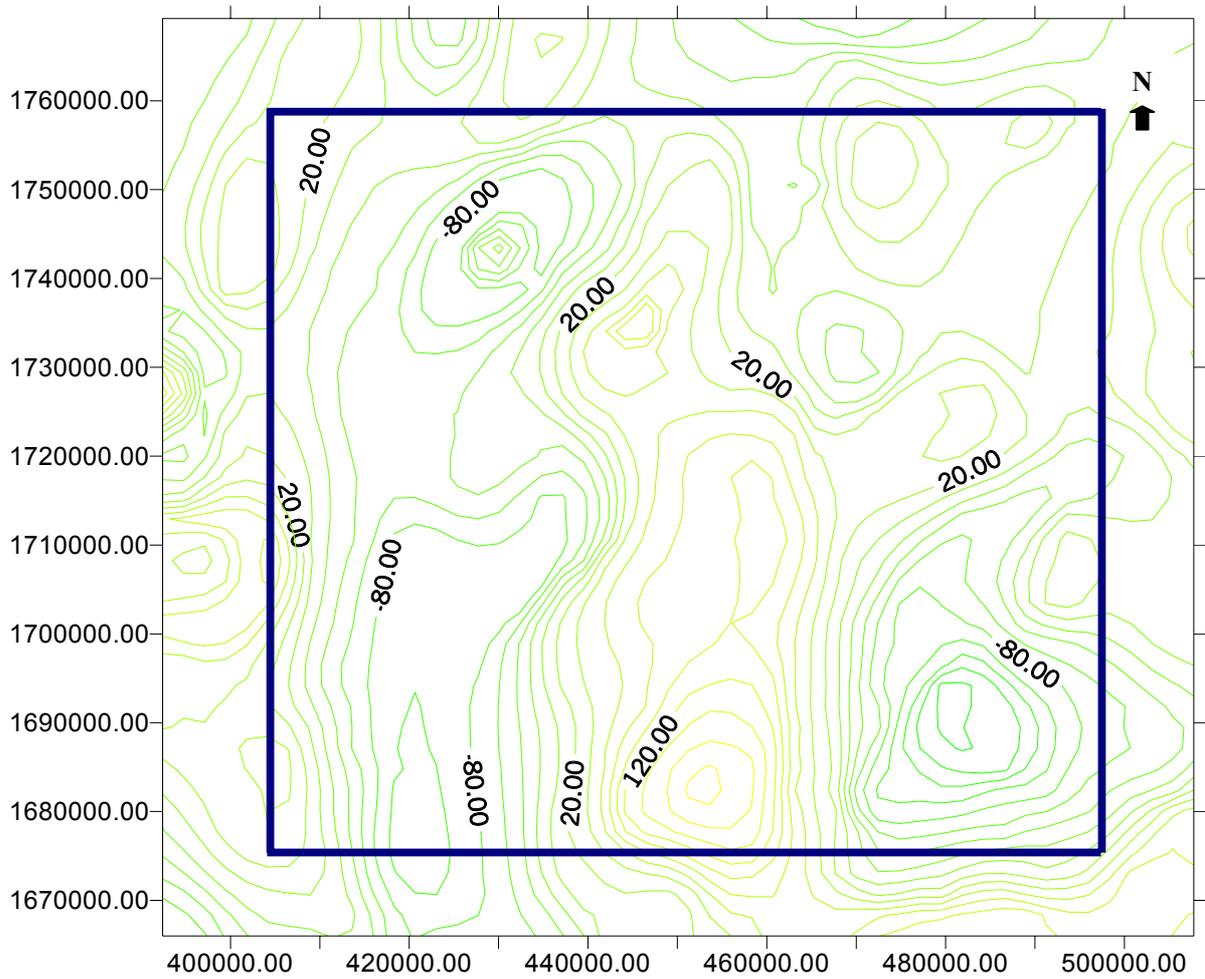
**Figura 6-4. Mapa de Intensidad Magnética Total de la zona de estudio.
Contorno a intervalos de 40 mgal.**



Leyenda:  **Curvas Isogamas**



Figura 6.5. Mapa Regional de Intensidad Magnética Total de la zona de estudio Contorno a intervalos de 20 mgal.



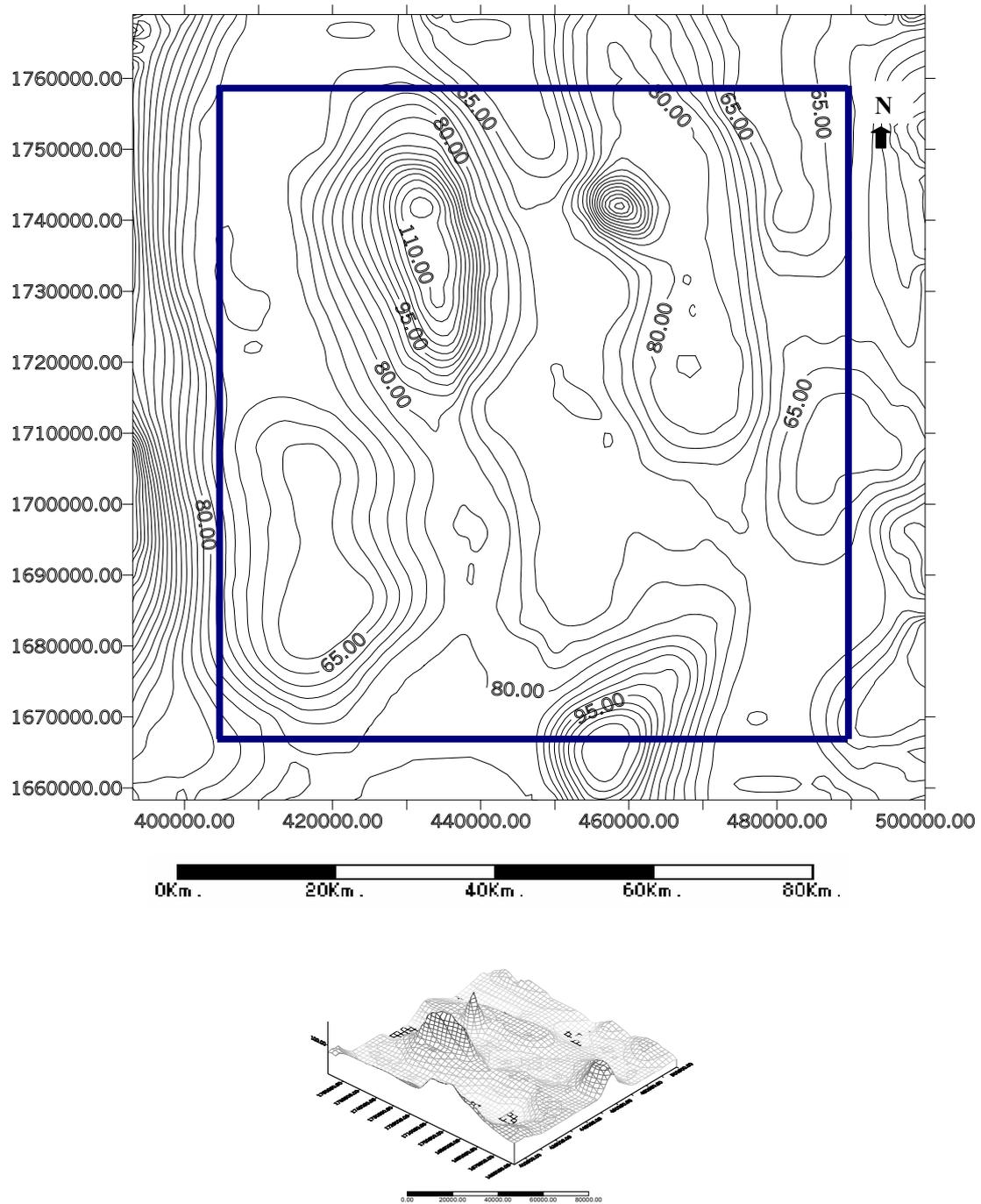
Leyenda:  **Curvas Isogamas**

Figura 6-6. Mapa Residual de Intensidad Magnética Total de la zona de estudio Contorno a intervalos de 20 mgal.

En el mapa regional de Isoanomalías de Bouguer las curvas presentan una tendencia en dirección noroeste en un rango de 60 a 85 mgal., con un intervalo de interpolación de las curvas de 5 mgal. Estas van descendiendo en dirección noreste con un gradiente de 0.23 mgal. / Km., lo que se asocia a un buzamiento en esa dirección producto de la subsidencia del Arco de Islas Activo de las Antillas Menores.

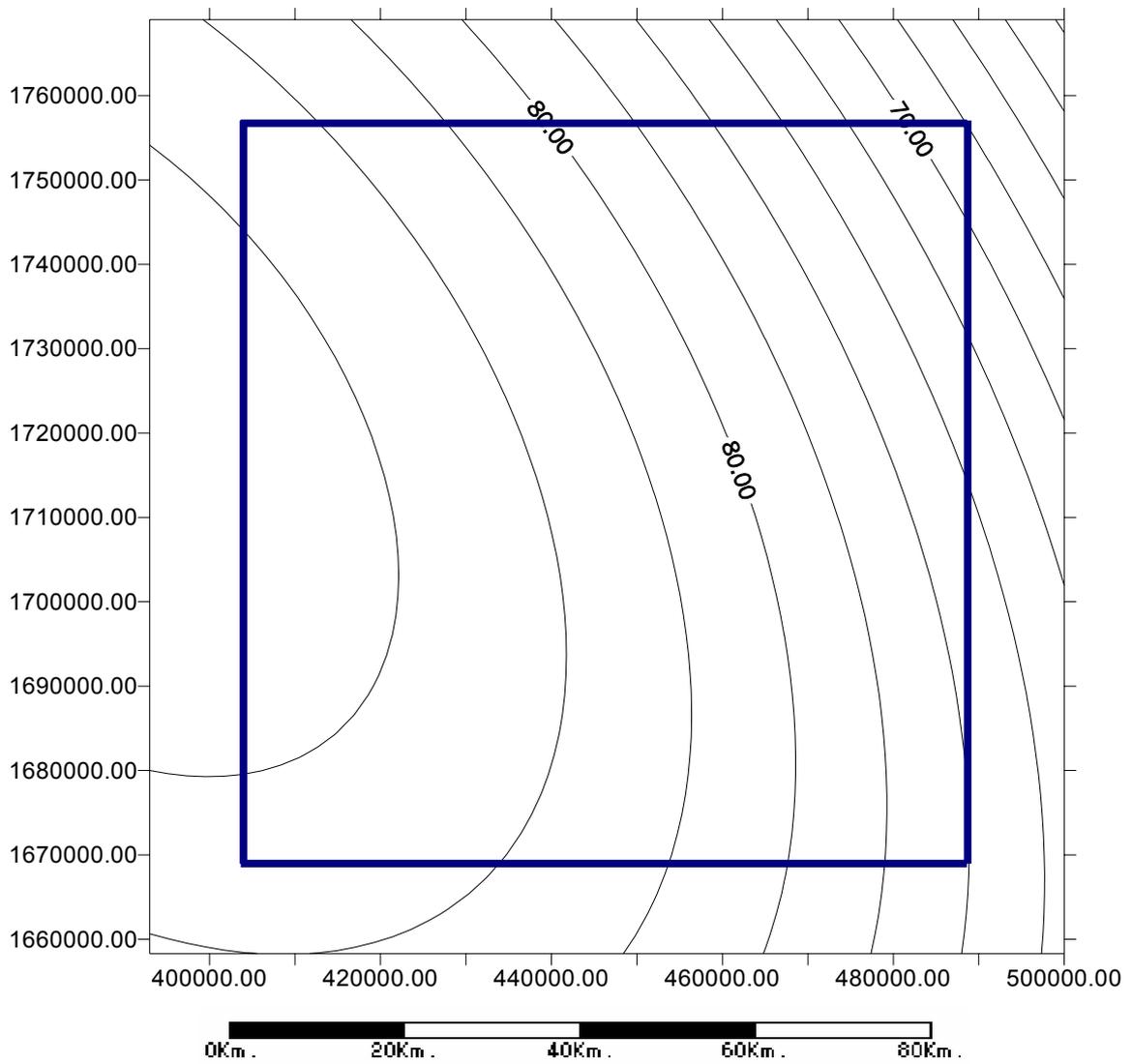
En el mapa residual de Isoanomalías de Bouguer las curvas presentan un rango de -30 a 50 mgal., con un intervalo de interpolación de las curvas de 5 mgal. Este presenta en la parte noroeste del mapa, un máximo gravimétrico de aproximadamente 25 Km. en dirección norte – sur, con un gradiente de 4,4 mgal./ Km asociado a la estructura del Levantamiento de Aves ,el cual se extiende hacia la parte sur del mapa en dirección norte – sur.

Se observó otro máximo gravimétrico de 10 Km. aproximadamente de longitud, en la parte noreste del mapa, con un gradiente en dirección este - oeste de 5,7 mgal / Km.



leyenda:  Curvas Isogalas

**Figura 6.7. Mapa de Isoanomalía de Bouguer de la zona de estudio
Contorno a intervalos de 3 mgal.**



Curvas Isogalas

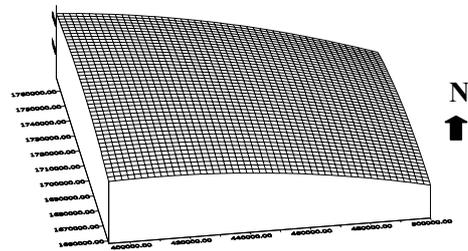
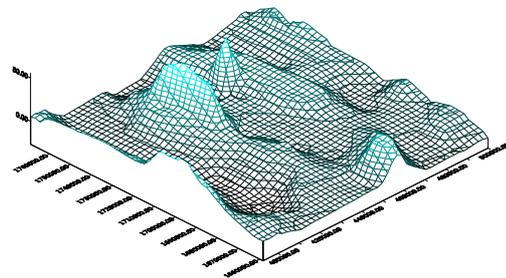
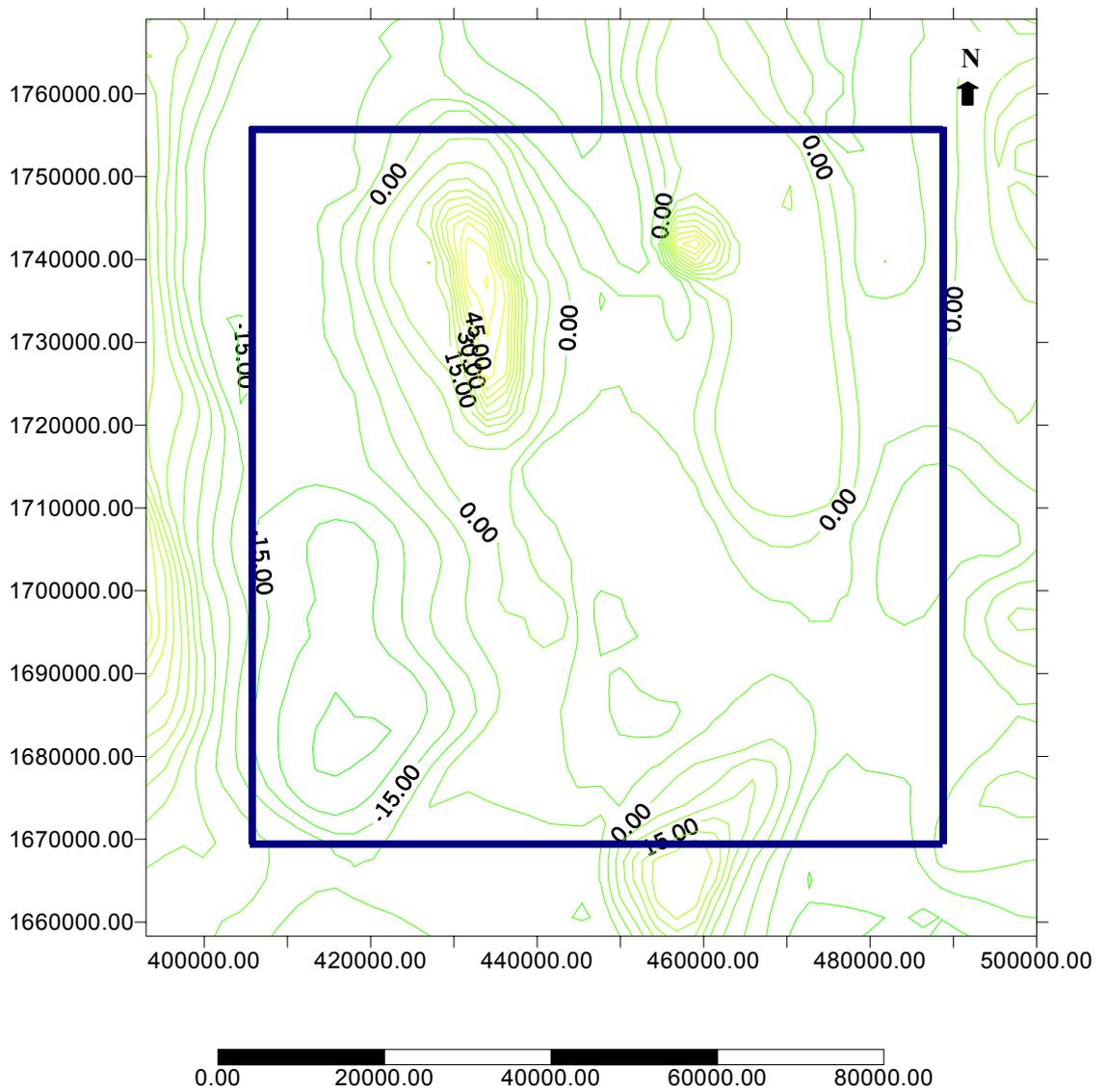


Figura 6.8. Mapa Regional de Isoanomalía de Bouguer de la zona de estudio Contorno a intervalos de 20 mgal.



Leyenda:  Curvas Isogalas

**Figura 6.9. Mapa Residual de Isoanomalia de Bouguer de la zona de estudio
Contorno a intervalos de 5 mgal.**

6.5.- MODELAJE GRAVIMÉTRICO

6.5.1.-ELECCIÓN DE LOS PERFILES

Para realizar el modelo del subsuelo de Isla de Aves, se trazó un **perfil** en dirección **oeste – este**, de 100 Kilómetros de longitud, de manera tal que coincidiera con la ubicación de la isla y cortase perpendicularmente al rumbo de la estructura o Levantamiento de Aves.

Luego se trazó un **perfil** en dirección **sur – norte** de 100 Kilómetros de longitud, el cual coincide con la ubicación de la Isla de Aves, paralelo al rumbo de la estructura del Levantamiento de Aves, con lo que se busca conseguir irregularidades en el subsuelo del levantamiento que arroje información sobre la forma y comportamiento del sistema.

Para lo cual se tomó como referencia:

- La orientación de la estructura marcada por el máximo gravimétrico (descrito en la página 95).
- Mapa geomorfológico (GNA-H, 1990) y mapa batimétrico generado (Capítulo 5) que permite corroborar el rumbo de la estructura en estudio.

6.5.2 ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE POTENCIA DE LOS DATOS DE ANOMALÍA DE BOUGUER E INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

Al realizar el análisis del espectro de potencia se hace necesario pasar del dominio de la frecuencia al dominio de K, para lo cual el programa aplica FFT (Primera Transformada de Fourier). La salida que se obtiene es de modo gráfico, dividiéndose

de manera general de acuerdo al interés de cada estudio en tres zonas principales: somera, intermedia y profunda.

Para ello se utilizó el programa Magmap (GEOSOFT, 1994) , el cual requiere de una base de datos de entrada de la zona, y los datos del perfil al que se le pretende realizar el análisis de profundidades.

A continuación se presenta una tabla que resume los valores promedios obtenidos, en el Apéndice D se encuentran los gráficos de la salida.

Perfil	Profundidad 1	Profundidad 2	Profundidad 3	Profundidad 4	Profundidad 5
General	9.25 Km.	4.022 Km.	2.11 Km.	1.283 Km.	0.44 Km.
1	0.91 Km.	0.73 Km.	0.39 Km.		
2	6.87 Km.	0.39 Km.	0.33 Km.		

Tabla 6-9.- Resumen de los resultados del Análisis del Espectro de Potencia, para datos de Intensidad Magnética Total en el área de estudio.

Perfil	Profundidad 1	Profundidad 2
1	1.034 Km.	0.42 Km.
2	0.106 Km.	
General	11 Km.	

Tabla 6.10.- Resumen de los resultados del Análisis del Espectro de Potencia, para datos de Anomalía de Bouguer en el área de estudio.

6.5.3.- RESTRICCIONES DEL MODELO

En función de los aportes establecidos en publicaciones anteriores se establecen un número de restricciones que debe cumplir el modelo planteado, las cuales pueden sufrir ciertas modificaciones como aporte del trabajo realizado.

Geológicas

- Los modelos geológicos de la evolución del Caribe (Meschede, et al. 1998), sugieren que el Levantamiento de Aves es un arco remanente, activo durante el Cretácico – Paleoceno Inferior.

Geofísicas

- Pinet y otros (1985), menciona al Arco de Aves como un arco remanente.
- Kearey (1974), estima una profundidad del Moho entre 28 a 31 Km., combinando la data sísmica con el modelo gravimétrico.

La refracción profunda da información sobre:

- Profundidad de la Discontinuidad de Mohorovic. The Geology of North America, Case and MacDonald, (1990), establece un rango de profundidades entre 25 y 35 Km. de profundidad para el Levantamiento de Aves en la zona de estudio.
- Algunos reflectores sísmicos u horizontes que ayudan a modelar el arco extinto, (Volumen H, et al).

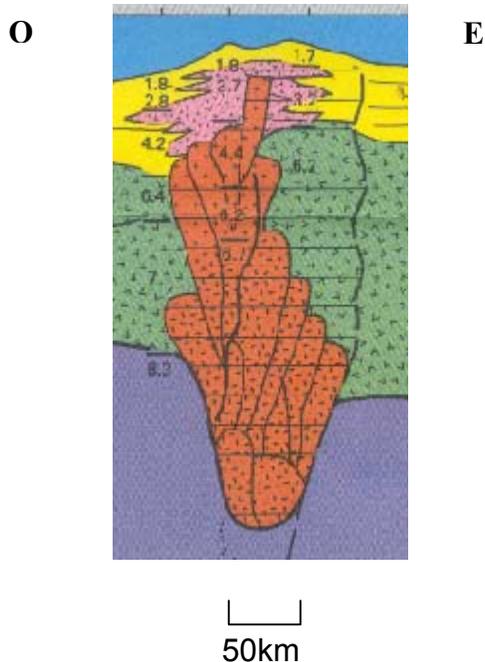


Figura 6-17.- Corte geológico del Arco Remanente Aves. Case and MacDonald (1990)

Los datos de reflexión(vp) aportan la siguiente información:

- Profundidad hasta 5 Km. aproximadamente (Pinet B., 1971)

6.5.4.- MODELO GEOLÓGICO – ESTRUCTURAL, GRAVIMÉTRICO – MAGNÉTICO DEL LEVANTAMIENTO DE ISLA DE AVES

Desde el punto de vista gravimétrico - magnético, el modelo consta de un conjunto de cuerpos rocosos que forman la estructura de un arco remanente, los cuales se describen a continuación:

Cuerpo N° 1: Constituido por una capa de agua, la cual representa al Mar Caribe con un espesor máximo de 2 Km. de profundidad. Cuyos valores son marcados por el mapa batimétrico del área.

Cuerpo N° 2: Sedimentos Bio-Clásticos Estratificados, de aproximadamente 1,5 Km. de espesor.

Cuerpo N° 3: Sedimentos volcanoclasticos ± tobas riolticas 5 Km. de profundidad.

Cuerpo N° 4: meta-trondjemita de aproximadamente 12 Km. de espesor.

Cuerpo N° 5: metagranitos, gneis, metalavas ± metatobas 11 Km. de espesor

Cuerpo N° 6: Intrusiones graníticas y tonalíticas .

Cuerpo N° 7: Manto metasomatizado.

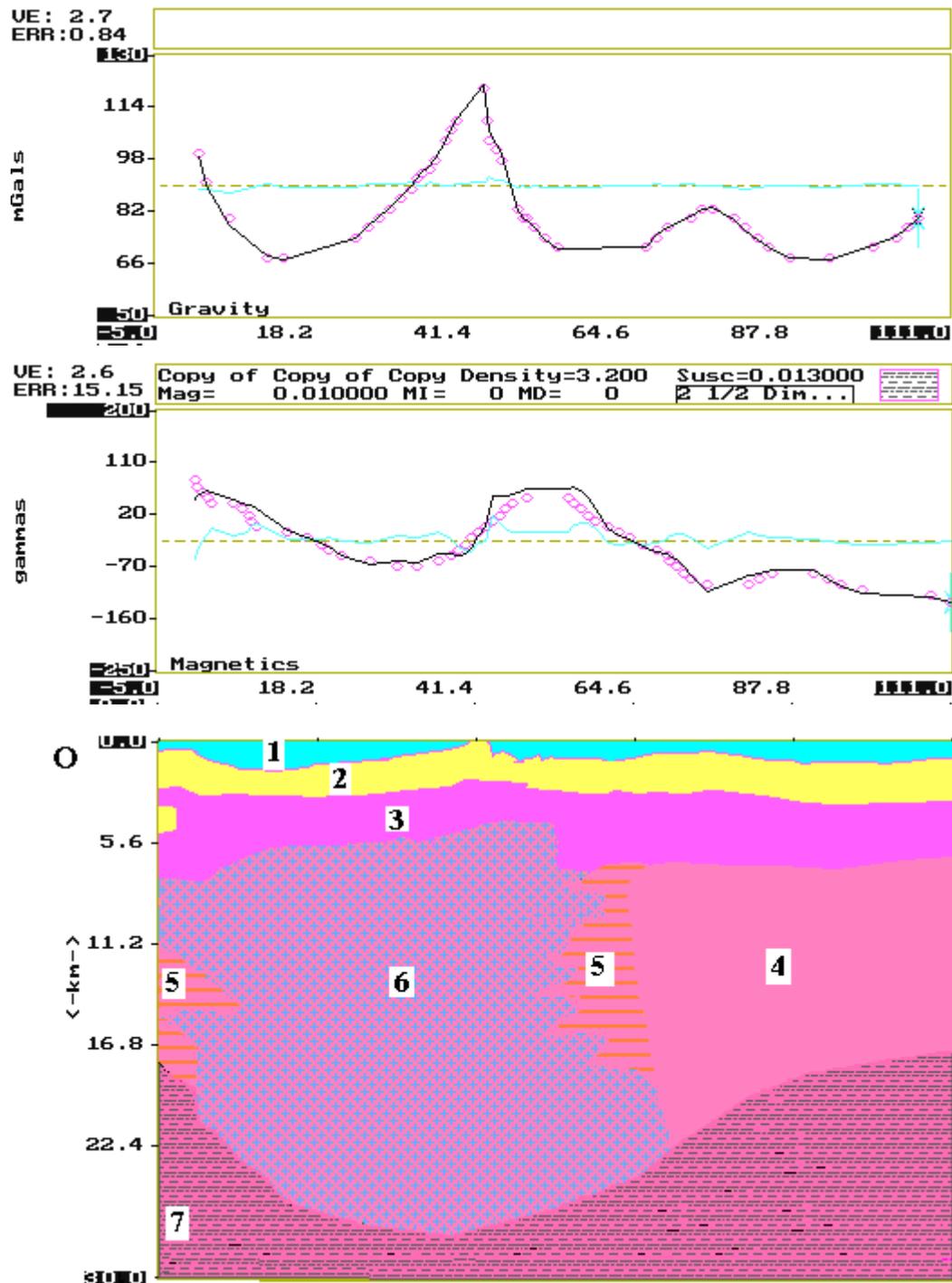


Figura 6-19 Modelo geológico – estructural,
gravimétrico – magnético
del promontorio de isla de aves.
Dirección sur - norte

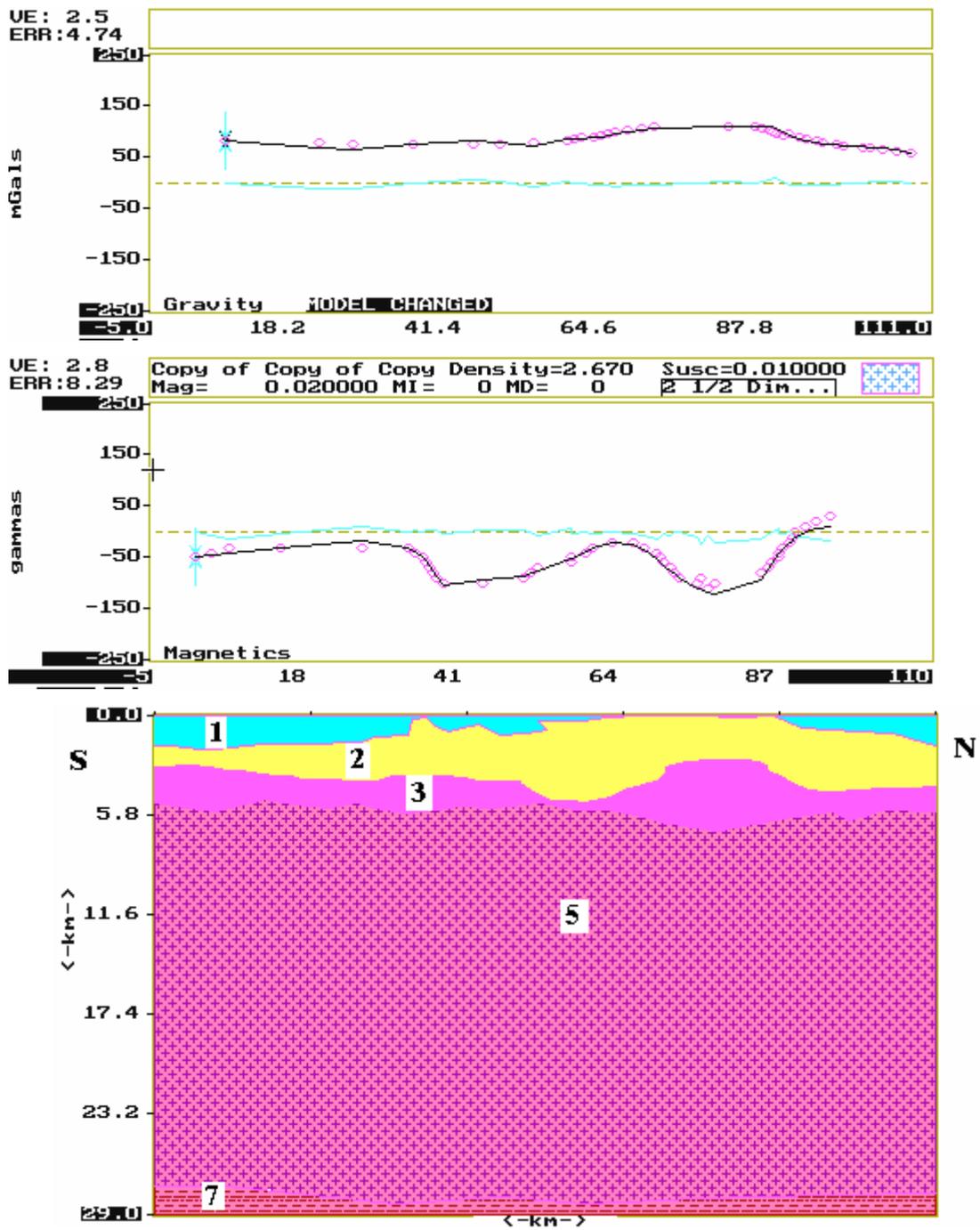


Figura 6-18 Modelo Geológico – Estructural,
Gravimétrico – Magnético
del Promontorio de isla de Aves.
Dirección sur – norte

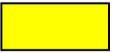
SIMBOLO	CUERPO	LITOLOGÍA	ρ (gr/cc)	K (c.g.s)	J (c.g.s)
	1	Agua	1	0	0
	2	Sedimentos bio-clásticos estratificados	2	0.0001	0.00009
	3	Sedimentos Volcanoclasticos ± Tobas riolíticas	2.6	0.0065	0.006
	4	Meta-trondmjemita	2.62	0.0125	0.0085
	5	Metagranitos gneis, metalavas ± metatovas	2.65	0.01	0.0065
	6	Intrusiones graníticas y trondmjemíticas	2.7	0.012	0.010
	7	Manto metasomatizado	3.2	0.013	0.010

Figura 6-20. Características de las rocas del modelo planteado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los análisis estadísticos indican que la población de datos de Anomalía de Bouguer de la zona de estudio presentan una distribución normal y muestran condiciones de varianza mínima.

Los resultados obtenidos en el análisis del espectro de potencia concuerdan con los topes de la estructura en estudio donde los datos gravimétricos y magnéticos dieron una profundidad comprendida entre los 9 – 11 Km. aproximadamente, asociada a un aumento de espesor en la estructura del Arco de Aves, pudiendo ser corroborado por la presencia de un cambio de velocidad de 6,2 Km/seg (Kearey). Adicionalmente, se relacionan las profundidades menores a 4 Km. con los sedimentos Bio-clásticos estratificados, en función de los datos gravimétricos y magnéticos.

Dentro de este orden de ideas, los sedimentos volcanoclasticos ± tobas riolíticas se encuentran asociadas a profundidades entre 4 – 6,8 Km. aportadas por los datos de Intensidad Magnética Total.

El comportamiento de la anomalía magnética presentó una frecuencia mayor que la anomalía gravimétrica, reflejando un contraste de las propiedades magnéticas permitiendo modelar la estructura y la profundidad de las rocas volcánicas en función de la variabilidad de sus propiedades, presentando gran cantidad de cambios laterales.

La integración de los perfiles gravimétrico – magnético permitió generar un modelo geológico que describe la forma del Promontorio de Aves, donde los cuerpos que influyen principalmente en el comportamiento de las Anomalías de Bouguer son los correspondientes al cuerpo 5 y 3 (descritos en la figura 6-20).

Los ajustes finales de densidad (ρ), susceptibilidad magnética (κ), magnetización inducida (J) señalaron un Modelo Geológico – Estructural del levantamiento de Aves limitado por la discontinuidad de Mohorovic.

Para darle continuidad al presente trabajo, se recomienda:

Realizar mapas de anomalías isostáticas que proporcionen información acerca de la estabilidad del sistema.

Realizar toma de muestras geológicas que aporten información sobre las edades de las rocas en la zona.

REFERENCIAS CITADAS

Dobrin M, 1961. Introducción a la Prospección Geofísica. Ediciones Omega, S. A. Barcelona.

Gallovich E; Aguilera L, (1971). Ensayos sísmicos de refracción efectuados en Isla de Aves. Memoria de la Sociedad de Ciencias Naturales de la Salle.

Karig D, 1972. Remanant Arcs. Geological Society of Bolletin, 83: 1057 – 1068.

Kearey P, (1974). Gravity and Seismic Reflection Invesgations into the Crustal Structure of the Aves Ridge, Eastern Caribbean. Geophys, J. R. Astr. Soc., 38: 435 – 448.

Meschede; Frisch, (1988). A plate-tectinic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Carbbean plate. Tectonophysics Pag 269 - 291.

Méndez B, (1983). Terrazas submarinas del frente arrecifal en el archipiélago Los roques, Aves de Barlovento, Aves de Sotavento y la Blanquilla. Memoria VI Congreso Geológico Venezolano, 8: 5549 – 5569.

Patín H, (1972). Nuevas observaciones geológicas acerca de la Isla de Aves, Venezuela: Memoria VI Conferencia Geológica del Caribe, Pag 74-78.

Patin H, (1983). Isla de Aves y su ambito geológico (resumen). Comisión Nacional de Oceanografía.

Pérez Nieto, H (1970). Información general sobre los resultados de la expedición científica a la Isla de Aves. INTERCMAR de la Universidad Simón Bolívar y Ministerio de Minas e Hidrocarburo. Caracas-Venezuela.

Pérez Hernán, (1970). Información general sobre los resultados de la expedición científica a la Isla de Aves. Instituto de tecnología y ciencias marinas (INTERMAR) de la Universidad Simón Bolívar y Dirección de Geología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Pag 8 –13.

Pinet B., Lajat D., Structure of Aves ridge and Grenada basin from multichannel seismic data, (1985).

Schubert C. y Moticska P, (1973). Reconocimiento geológico de las islas venezolanas en el Caribe, entre los Roques y los Testigos (Dependencias Federales). Boletín de la Sociedad Venezolana de Geología, 8: (1-42).

APÉNDICE A

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Nombre: Lacoste & Romber.

Tipo: C.

Precisión: 0.05 mgal.

Peso: 10.5 kg.

Accesorios: Pilas de 12 Vol.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Nombre: Scintrex

Tipo: CX-3

Precisión: 0.05 mgal.

Peso: 15 kg.

Forma de salida de los datos: Digital.

Accesorios: Pilas de 12 Vol, Silla para transportar el equipo en la espalda,

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Nombre: Brújula.

Tipo: Brunton.

Precisión: 1 Grado.

Peso: 0.3 kg.

APÉNDICE B

VARIOGRAMAS.

Permite analizar el comportamiento espacial de la propiedad o variable bajo estudio sobre la zona dada. En este se puede observar la dirección de mayor o menor continuidad espacial de la variable.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [Z(x) - Z(x + h)]^2 = \frac{1}{2} \text{Var} [Z(x) - Z(x + h)]^2 .$$

Cuando el variograma solo depende del modulo del vector h y no de la dirección en que se calcula se dice que es isotrópico y cuando depende de ambos se dice que es anisotrópico.

El variograma depende de la distancia y la dirección entre los puntos donde se observa la variable y no de la propia localización de estos.

PROPIEDADES DEL VARIOGRAMA.

- 1.- $\gamma(h) = 0$ si $h = 0$ y $\gamma(-h) = \gamma(h)$ para cualquier h .
- 2.- Todo variograma es una función definida positiva condicional.
- 3.- En el caso de funciones aleatorias estacionarias, el variograma y la covarianza son equivalentes. (Existen variogramas que no tienen covarianza equivalente).

4.- Si a partir de una distancia d , $Z(x)$ y $Z(x + h)$ no están correlacionadas entonces $C(h) = 0$, para todo h tal que $h \geq d$.

El variograma se estabiliza a partir de dicha distancia tomando el valor constante $C(0)$.

La distancia se llama rango o alcance del variograma.

El valor constante que toma se llama meseta o sill (Corresponde a la varianza de la función aleatoria Z).

Si dos (2) valores de una misma propiedad se encuentra separados a una distancia mayor al rango del variograma, entonces no hay correlación entre ambos.

Se cumple que $\lim_{h \rightarrow \infty} \gamma(h)/h^2 = 0$ (Para distancias grandes un variograma no puede crecer más rápido que la función cuadrática), si el variograma crece mas rápido que la función cuadrática la variable tiene que ser tratada como una función no estacionaria.

COMPORTAMIENTO A PEQUEÑAS DISTANCIAS:

El comportamiento del variograma a pequeñas distancias se encuentra ligado a la variabilidad espacial de la propiedad o variable bajo estudio.

Si para valores pequeños de h : $Z(x)$ y $Z(x + h)$ son muy diferentes, $\gamma(h)$ crece muy rápido, lo que indica que la propiedad varia muy rápido entre puntos poco separados.

EFFECTO NUGGET (DISCONTINUIDAD EN EL ORIGEN).

Aunque $\gamma(0)=0$, puede ocurrir que el variograma presente una discontinuidad en el origen. Es decir, para valores de la distancia h sumamente pequeños, $\gamma(h)$ no se aproxima a $\gamma(0)$.

Esto puede indicar:

- La variable es extremadamente irregular a distancias cortas.
- Errores de medida.
- Presencia de estructuras de tamaño inferior a la distancia a la cual se tomaron las muestras.
- etc.
-

DETECCIÓN DE ANISOTROPÍAS.

Al ser una función dependiente de la distancia y de la dirección en que se calcula, permite detectar direcciones de anisotropía en la variable bajo estudio, observando la forma que tiene el variograma en distintas direcciones (de acuerdo a la pendiente, etc.).

Esta información contenida en el variograma es transmitida al método de estimación por Kriging y a las simulaciones estocásticas, obteniéndose estimaciones y simulaciones que toman en cuenta la dirección de anisotropía.

TIPOS DE ANISOTROPÍA.

Anisotropía geométrica: El variograma calculado en direcciones diferentes, presenta aproximadamente el mismo sill pero rangos diferentes. Este tipo de anisotropía indica que la propiedad varía en forma más suave en una dirección (la

de mayor rango), que en otra (la de menor rango), pero en general la varianza de la propiedad es la misma.

Anisotropía Zonal: Variograma calculado en direcciones diferentes, tiene aproximadamente el mismo rango pero diferente sill.

COMBINACIÓN LINEAL DE VARIOGRAMAS.

Si $\gamma_1(h)$, $\gamma_2(h)$, $\gamma_3(h)$, $\gamma_4(h)$, $\gamma_5(h)$ $\gamma_n(h)$ son distintos variogramas y $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ α_n , son números positivos entonces $\gamma_{\alpha_1}(h) = \sum_{i=1} \alpha_i \gamma_i(h)$ es un variograma. Esta propiedad es fundamental para estudiar variables que puedan presentar variaciones a distintas escalas.(pendientes). Al variograma de la combinación lineal de variogramas con diversos parámetros (rango y sill) se le denomina variograma imbricado.

EL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.

En un estudio geoestadístico es necesario determinar el modelo de variograma que será usado para la estimación o simulación de la variable en estudio. Debe ser obtenido de la propia información que aportan los datos o variable en estudio.

Para ello se utilizó el variograma experimental que en el caso de una sola variable, se define por:

$N(h)$ es el número de pares de puntos que se encuentran a una distancia h .

$Z(x)$ es el valor de la propiedad medida en un punto x en la dirección h .

PROCEDIMIENTO PARA HALLAR EL MODELO DE VARIOGRAMA.

a) Cálculo del variograma experimental.

Se calcula primero el variograma experimental en diversas direcciones y distancias, con la finalidad de detectar el comportamiento espacial de la variable.

Se obtiene en cada dirección utilizada, un conjunto de puntos que representa el valor del variograma experimental calculado para distintos valores de la distancia en dicha dirección. Donde se pretende escoger aquellos variogramas que representan las direcciones de mayor y menor continuidad espacial de la variable, ya que a partir de estas se puede definir un elipsoide de anisotropía en cualquier dirección.

b) Ajuste a un modelo de variograma.

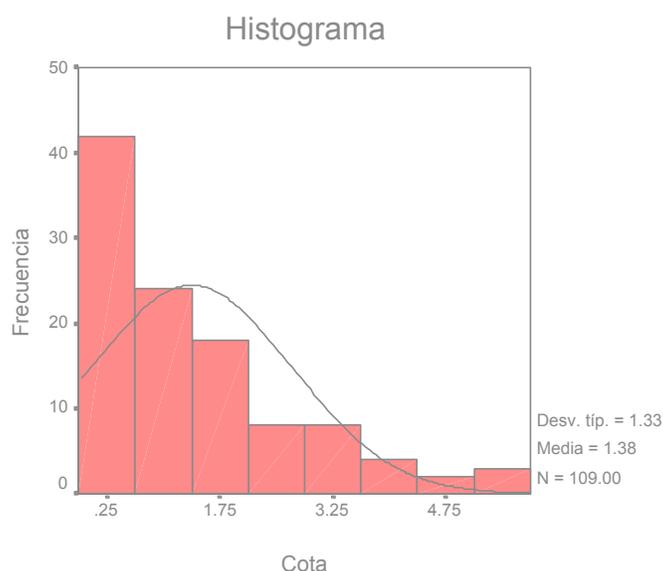
Se ajusta un modelo de variograma, utilizando alguno de los modelos de variograma y variando para ello los parámetros que definen el modelo del variograma (Sill y Rango). El modelo del variograma proporciona un valor en distancias donde el valor del variograma experimental se desconoce.

APÉNDICE C

TOPOGRAFÍA EN ISLA DE AVES.

Para realizar un mapa topográfico de la Isla de Aves, así como para realizar las respectivas correcciones, es necesario ver si los datos topográficos son de buena calidad, por lo que se presenta un estudio estadístico.

En el histograma de frecuencias (Figura 5-18), se observa una distribución de frecuencia sesgada a la derecha. Los valores mas altos (por encima del percentil 3), representarían la parte norte de la Isla donde se consiguen los mayores valores de cota.



**Figura C-1. Histograma de frecuencia de los datos
Topográficos en Isla de Aves**

En el gráfico de caja y bigote (Figura 5-19), se puede observar una mayor dispersión a partir de la mediana o segundo percentil (Tabla 5-11), y aumenta considerablemente a partir del percentil 3.

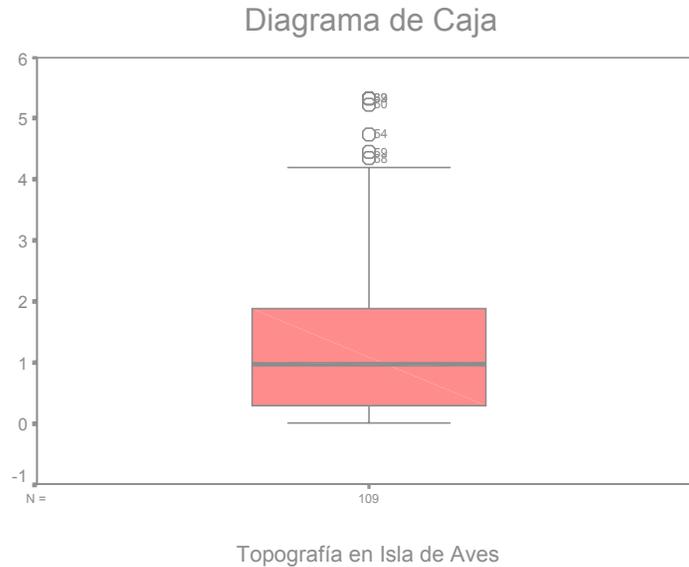


Figura C-2. Grafico de Caja de los datos Topográficos en Isla de Aves

	N		Percentiles		
	Válidos	Perdidos	25	50	75
COTA	109	0	.2745	.9750	1.9105

Tabla C-1. Valores percentiles de los datos topográficos en Isla de Aves

Esto se sustenta al mostrar en la tabla de medidas distribución (Tabla 5-12) un valor de asimetría de 1.268.

	N		Asimetría		Curtosis	
	Válidos	Perdidos	Estadístico	Error típ.	Estadístico	Error típ.
	Estadístico	Estadístico				
COTA	109	0	1.268	.231	1.015	.459

Tabla C-2. Medidas de distribución de los datos Topográficos en Isla de Aves

En el gráfico de medidas de dispersión (Tabla 5-13) se puede observar que la varianza tiene un valor de 1.76, donde el rango es apenas de 5.34 metros. Lo que indica una superficie casi homogénea, donde al menos el 75% de los datos no supera los dos metros de altura (Tabla 5-11).

	N		Desv. típ.	Varianza	Mínimo	Máximo
	Válidos	Perdidos				
COTA	109	0	1.3297	1.7680	.00	5.34

Tabla C-3. Medidas de dispersión de los datos Topográficos en Isla de Aves

Al revisar el valor de la moda 0.19 (Tabla 5-14) y el histograma de frecuencia nuevamente, se puede apreciar que la mayoría de los datos están por debajo de 2 metros, lo que indica que la diferencia de cota no debería contribuir mayoritariamente en la corrección de terreno, al menos sobre la Isla.

	N		Media	Mediana	Moda	Suma
	Válidos	Perdidos				
COTA	109	0	1.3773	.9750	.19	150.12

Tabla C-4. Medidas de tendencia central de los datos Topográficos en Isla de Aves

Los valores en el gráfico normal P-P (Figura 5-20) se notan separados de la linealidad debido al sesgo tan pronunciado producido por los datos observados,

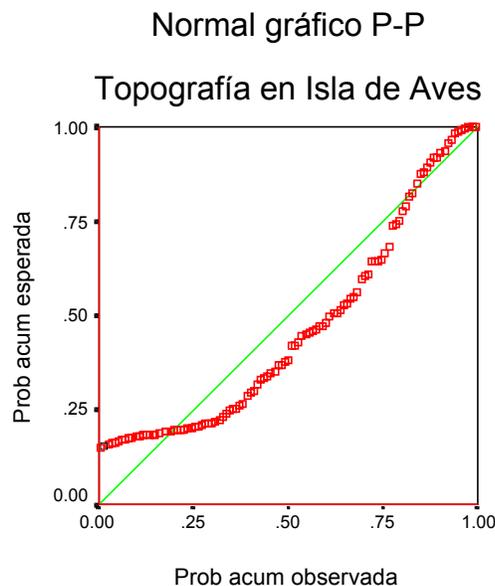
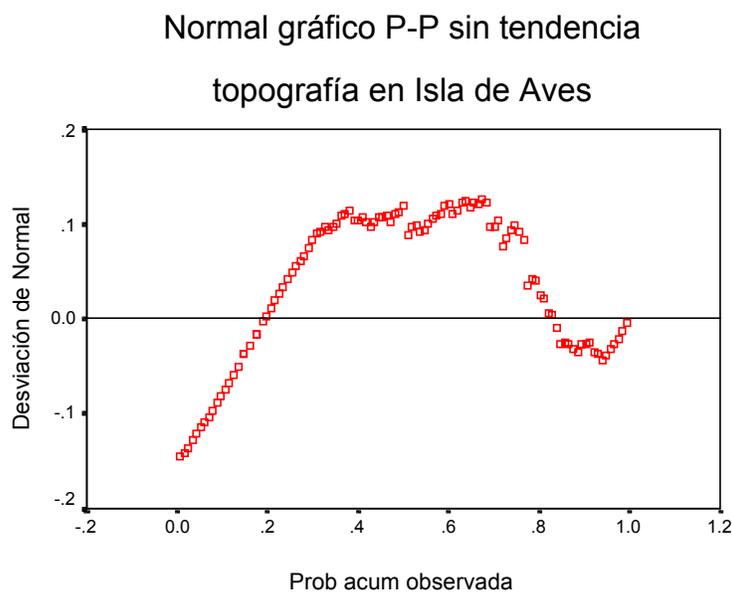
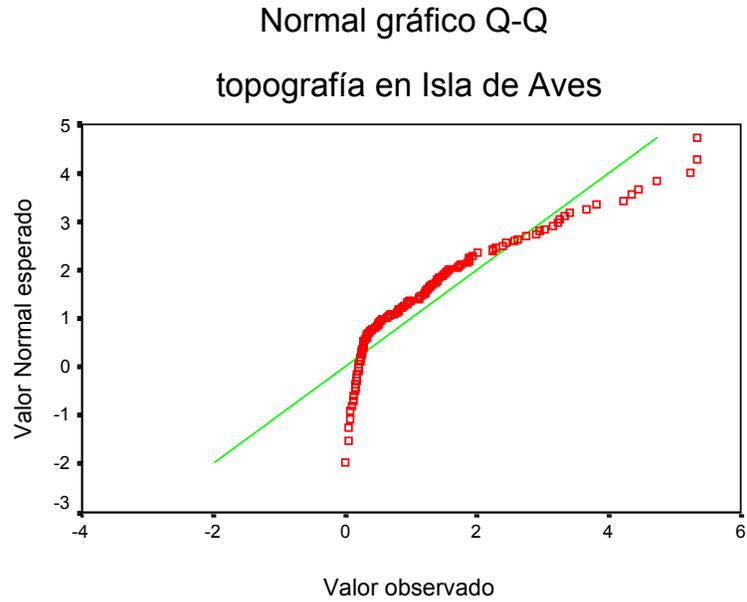


Figura 5-20. Gráfico Normal P-P de los datos Topográficos en Isla de Aves

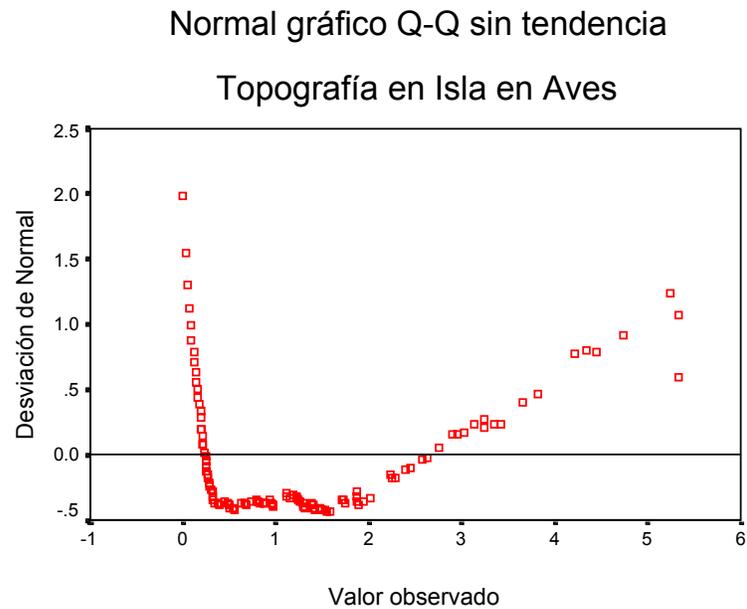
Sin embargo, al observar el Gráfico Normal P-P sin tendencia (Figura 5-21) los valores están entre -0.2 y 0.2 . Considerando que esta prueba permite valores de probabilidad esperada entre 1 y -1 , se puede decir que la curva de distribución normal representa los datos observados.



**Figura C-3. Gráfico Normal PP sin tendencia de los datos
Topográficos en Isla de Aves**



**Figura C-4. Gráfico Normal Q-Q de los datos
Topográficos en Isla de Aves**



**Figura C-5. Gráfico Normal Q-Q sin tendencia de los datos
Topográficos en Isla de Aves**

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		COTA
N		109
Parámetros normales ^{a,b}	Media	1.3773
	Desviación típica	1.3297
Diferencias más extremas	Absoluta	.150
	Positiva	.131
	Negativa	-.150
Z de Kolmogorov-Smirnov		1.568
Sig. asintót. (bilateral)		.015

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla C-5. Grafico de Kolmogorov – Smirnov de los datos de Anomalía de Aire Libre en Isla de Aves

ANOMALÍA DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL: En el área de estudio.

En el Histograma de Frecuencia (Figura 5-20), de los datos de Intensidad Magnética Total se puede observar como la curva de distribución esta centrada,

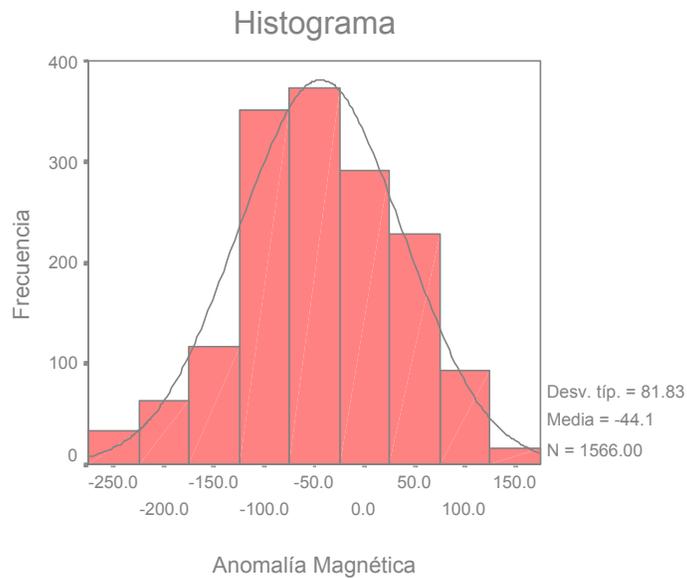


Figura D-1. Histograma de frecuencia de los datos de intensidad magnética total en el área de estudio.

por lo que se observa que la media (Figura 5-21), presenta una diferencia de tan solo 5,9387 con la moda y la mediana en un rango de valores de 400,

	N		Media	Mediana	Moda	Suma
	Válidos	Perdidos				
AMAGNETI	1566	0	-44.0613	-50.0000	-50.00	-69000.00

Tabla D-1. Medidas de tendencia central de los datos de intensidad magnética total en la zona de estudio.

El gráfico de caja y bigotes (Figura 5-21), sirve para representar como los datos presentan una distribución centrada y distribuida equitativamente a lo largo de los 4 percentiles.

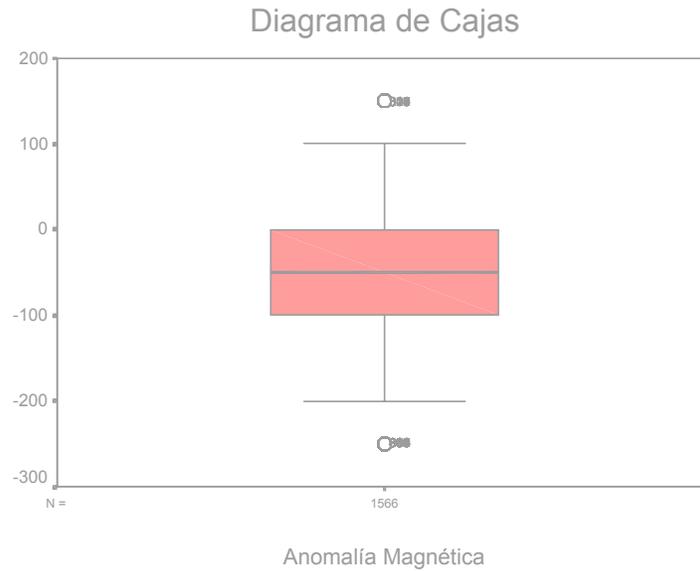


Figura D-2. Grafico de Caja de los de intensidad magnética total en la zona de estudio.

la mayoría de los datos presentan valores negativos como se muestra en la tabla de valores percentiles (Figura 5-22) donde el 75% de los datos es igual o menor que cero.

	N		Percentiles		
	Válidos	Perdidos	25	50	75
AMAGNETI	1566	0	-100.0000	-50.0000	.0000

Tabla D-2. Valores percentiles de los datos de intensidad magnética total en la zona de estudio.

Además el coeficiente de asimetría es -0.137 (Tabla), lo que indica un sesgo positivo que corrobora lo antes expuesto.

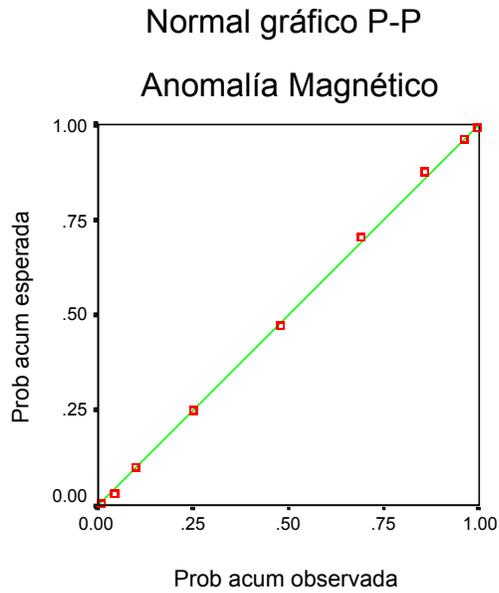
	N		Asimetría		Curtosis	
	Válidos	Perdidos	Estadístico	Error típ.	Estadístico	Error típ.
	Estadístico	Estadístico				
AMAGNETI	1566	0	-.137	.062	-.194	.124

Tabla D-3. Medidas de distribución de los datos de intensidad magnética total en la zona de estudio.

	N		Desv. típ.	Varianza	Mínimo	Máximo
	Válidos	Perdidos				
AMAGNETI	1566	0	81.8312	6696.3387	-250.00	150.00

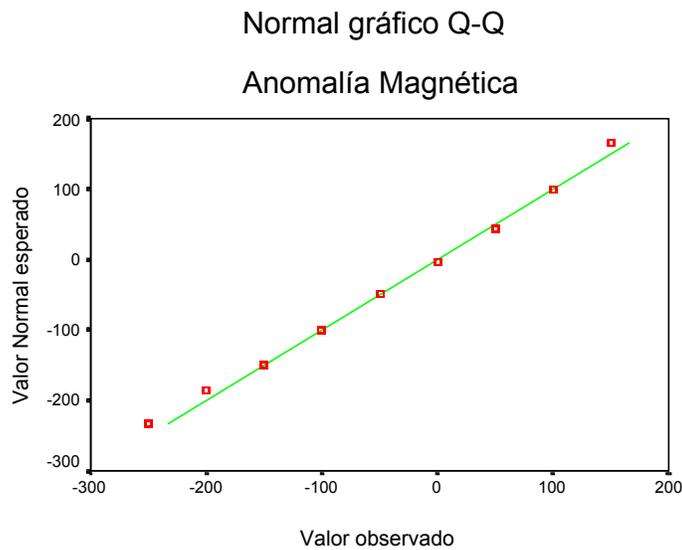
Tabla D-4. Medidas de Dispersión de los datos de Intensidad Magnética total en la zona de estudio.

En el Gráfico de Normal P-P (Figura 5-22), se observa como la curva de distribución de frecuencia teórica se ajusta a la curva de distribución de frecuencia observada, debido a que todos los datos están sobre la línea



**Figura D-3. Gráfico Normal P-P de
Intensidad Magnética Total en el àrea de estudio.**

Lo que se corrobora al observar el gráfico Q-Q. Donde todos los valores presentan linealidad, lo que indica que coinciden los valores normales esperados o teóricos y los observados.



**Figura D-4. Gráfico Normal Q-Q de
Intensidad Magnética Total en el àrea de estudio.**

por lo que los datos pueden ser representados por una curva de distribución normal. Lo que se afirma en los resultados obtenidos en la prueba de Kolmogorov – Smirnov, donde la singularidad indica un grado de ajuste de los datos con una distribución normal.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		AMAGNETI
N		1566
Parámetros normales ^{a,b}	Media	-44.0613
	Desviación típica	81.8312
Diferencias más extremas	Absoluta	.127
	Positiva	.127
	Negativa	-.111
Z de Kolmogorov-Smirnov		5.036
Sig. asintót. (bilateral)		.000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Tabla D-4. Gráfico de Kolmogorov – Smirnov de los datos de Intensidad Magnética total en la zona de estudio.