



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
FACULTAD DE CIENCIAS

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS
MAESTRIA EN CIENCIAS - GEOFISICA**

**MODELO DE LA FALLA DE SOAPAGA A PARTIR DE CORRELACION
ESPECTRAL DE CAMPOS POTENCIALES**

Diana Marcela Rodríguez

TESIS DE MAESTRIA

Director: Orlando Hernández Pardo

Bogotá, Junio de 2009

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-----------|--|----------|
| 1. | CAPITULO 1 | 1 |
| | 1.1 Introducción | 1 |
| | 1.2 Localización área de estudio | 2 |
| | 1.3 Condiciones climáticas | 6 |
| | 1.4 Planteamiento del problema | 6 |
| | 1.5 Justificación | 7 |
| | 1.6 Objetivos | 8 |
| | 1.6.1 General | 8 |
| | 1.6.2 Específicos | 8 |
| | 1.7 Antecedentes | 9 |
| | 1.8 Marco Teórico | 10 |
| | 1.8.1 Fallas Con Desplazamiento Vertical | 11 |
| | 1.8.2 Fallas Normales | 11 |
| | 1.8.3 Fallas Inversas Y Cabalgamientos | 12 |
| | 1.9 Metodología | 13 |
| | 1.9.1 Fase De Compilación | 13 |
| | 1.9.2 Fase De Análisis | 14 |
| | 1.9.3 Fase De Integración | 14 |
| | 1.9.4 Fase De Procesamiento De La Información Geofísica Regional Existente | 14 |
| | 1.9.5 Fase De Diseño De La Campaña Geofísica | 15 |
| | 1.9.6 Fase De Adquisición | 15 |
| | 1.9.7 Fase De Procesamiento | 15 |
| | 1.9.8 Fase De Interpretación | 16 |
| | 1.9.9 Fase De Elaboración Del Informe Final | 16 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2. | MARCO GEOLOGICO | 18 |
| 2.1 | Geología Estructural | 19 |
| 2.1.1 | Observaciones De Los Datos Existentes | 19 |
| 2.2 | Estratigrafía | 21 |
| 2.2.1 | Precámbrico | 22 |
| 2.2.2 | Paleozoico | 22 |
| 2.2.3 | Mesozoico | 24 |
| 2.2.4 | Cretácico Inferior y Superior | 24 |
| 2.2.5 | Cenozoico | 24 |
| 2.2.6 | Depósitos Cuaternarios | 25 |
| 2.2.6.1 | Coluviales (Qc) | 25 |
| 2.2.6.2 | Aluviales (Qal) | 25 |
| 3. | MODELAMIENTO DIRECTO – GRAVIMETRÍA Y MAGNETOMETRÍA | 25 |
| 3.1 | Introducción | 26 |
| 3.2 | Fundamento Físico-Matemático | 26 |
| 3.2.1 | Anomalía Gravimétrica Debida A Un Polígono | 27 |
| 3.2.2 | Anomalía Magnética Debido A Un Polígono | 30 |
| 3.3 | Modelos Generales | 35 |
| 3.3.1 | Fallas Con Diferente Angulo Y Dirección De Buzamiento | 35 |
| 3.4 | Modelos Teóricos A Partir De Cortes Geológicos | 40 |
| 3.4.1 | Líneas Sísmicas Sobre El Área De Estudio | 45 |
| 3.4.2 | Perfiles Geológicos De Las Líneas Sísmicas | 50 |
| 3.4.2.1 | Sección Vertical Sobre Las Líneas ANH-05-24 Y SOA-94-106 | 51 |
| 3.4.2.2 | Sección Vertical Sobre Las Líneas ANH-05-22 Y PDR-89-16 | 51 |
| 3.4.2.3 | Sección Vertical Por Las Líneas ANH-05-18 Y SOA-94-102 | 52 |
| 3.4.2.4 | Sección Vertical Por Las Líneas ANH-05-14 Y PDR-89-06 | 53 |
| 3.4.3 | Modelamiento Directo De Las Secciones Geológicas | 53 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4. | MODELAMIENTO INVERSO-ADQUISICIÓN GEOFISICA | 61 |
| 4.1 | Introducción | 61 |
| 4.2 | Caracterización Geológica | 62 |
| 4.2.1 | Geomorfología | 62 |
| 4.2.2 | Condiciones Climáticas | 63 |
| 4.2.3 | Geología | 65 |
| 4.3 | Caracterización Geofísica | 65 |
| 4.3.1 | Diseño De Adquisición | 65 |
| 4.3.1.1 | Reconocimiento de la zona | 67 |
| 4.3.2 | Magnetometría | 71 |
| 4.3.2.1 | Adquisición en campo | 71 |
| 4.3.2.2 | Estaciones Base de referencia | 73 |
| 4.3.2.3 | Reducción de datos de campo | 74 |
| 4.3.2.4 | Variación Diurna | 75 |
| 4.3.3 | Procesamiento | 75 |
| 4.3.3.1 | Teorema de Poisson | 76 |
| 4.3.3.2 | Filtros | 80 |
| 4.3.3.3 | Derivada Vertical (FFTDRV GX) | 81 |
| 4.3.3.4 | Reducción De Polo Magnético | 81 |
| 4.3.3.5 | Geoestadística | 84 |
| 4.3.3.6 | Correlación espectral | 85 |
| 4.3.3.7 | Normalización | 86 |
| 4.4 | Análisis De Resultados Coeficientes De Correlación | 97 |
| 4.5 | Análisis De Resultados Índices De Favorabilidad | 100 |
| 4.6 | Modelamiento Inverso | 111 |
| 5. | CONCLUSIONES | 118 |
| 6. | RECOMENDACIONES | 122 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7. | BIBLIOGRAFIA | 124 |
| 8. | ANEXOS | 127 |
| | ANEXO 1. Convenciones Tabla De Correlaciones Espectrales | 127 |
| | ANEXO 2. Procedimiento Para La Determinación De Puntos Óptimos De Muestreo. | 128 |
| | ANEXO 3. Flujo En Matlab Para La Determinación De Coeficientes De Correlación E Índices De Favorabilidad | 132 |

TABLA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapa de Colombia dónde se resalta el departamento de Boyacá y el área de estudio. | 3 |
| Figura 2. Mapa del área de estudio dónde se resalta su ubicación dentro de las planchas 152 y 172 a escala 1:100000 del IGAC. | 4 |
| Figura 3. Mapa del departamento de Boyacá, dónde se resalta el área de estudio, la reserva natural y las capitales cercanas. | 5 |
| Figura 4. Modelos de Fallas con desplazamiento vertical. (Tomado de Tarbuck, 2005). | 12 |
| Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio. Bloque Soapaga. Cordillera oriental. Tomado de www.rondacolombia2008/img/secciones/cuenca/cordillera/marco_1.jpg | 18 |
| Figura 6. Columna Estratigráfica generalizada del Bloque Soapaga, Cordillera Oriental. Tomada de www.rondacolombia2008/img/secciones/cuencas/cordillera/marco_2.jpg . | 23 |
| Figura 7. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 15°, con buzamiento hacia el Oeste. | 36 |
| Figure 8. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 30° | 36 |
| Figura 9. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 45° | 37 |
| Figura 10. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 60°. | 37 |
| Figura 11. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 40° buzando hacia el Este. | 38 |
| Figura 12. Familia de curvas de respuesta gravimétrica para el modelo de falla a diferentes ángulos. | 39 |
| Figura 13. Familia de curvas de respuesta magnética para el modelo de falla a diferentes ángulos. | 39 |
| Figure 14. Mapa de perfiles utilizados en el modelamiento directo y en la adquisición en campo, sobre el mapa geológico de la zona. | 43 |
| Figure 15. Mapa de perfiles utilizados en el modelamiento directo y en la adquisición en campo, se muestra el lugar exacto en el que cruzan la falla de Soapaga. | 44 |
| Figura 16. Interpretación línea Sísmica ANH-2005-24 en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo al lado izquierdo de la imagen. | 46 |
| Figure 17. Interpretación línea Sísmica SOA-94-106, en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo. | 47 |
| Figura 18. Interpretación línea Sísmica PDR-88-16, en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo. | 48 |
| Figura 19. Interpretación línea Sísmica ANH-2005-14, en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo. | 49 |
| Figura 20. Perfil estructural Sativa. | 51 |
| Figura 21. Perfil estructural Socotá | 52 |
| Figura 22. Perfil estructural Divaquia. | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 23. Perfil estructural Buntia. | 53 |
| Figure 24. Modelo Directo Del perfil Sativa, en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, ubicada al lado derecho de la imagen. | 54 |
| Figura 25. Modelo Directo Del perfil Socota, en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, ubicada al lado derecho de la imagen. | 55 |
| Figura 26. Modelo Directo Del perfil Divaquia, en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, segunda de derecha a izquierda. | 56 |
| Figura 27. Modelo Directo Del perfil Buntia, en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, ubicada al lado derecho de la imagen. | 57 |
| Figura 28. Perfiles de anomalía de Bouguer completa a partir del Modelamiento directo. Se observa el contraste de anomalías sobre el corredor de influencia de la falla. | 58 |
| Figura 29. Mapa magnético de Campo total a partir del Modelamiento directo. Al igual que en el mapa gravimétrico, se observa el contraste sobre el corredor de influencia de la falla. | 59 |
| Figura 30. Foto del Cañón del Chicamocha, tomada durante la etapa de scouting. | 63 |
| Figure 31. Precipitaciones registradas durante el 2007 en la zona de estudio en cuatro diferentes estaciones A, B, C, D. | 64 |
| Figura 32. Mapa de rutas plateadas para la adquisición geofísica en campo. | 66 |
| Figura 33. Puente sobre el Río Chicamocha en el Municipio de Paz del Río. | 68 |
| Figura 34. Rocas y escombros llevados por el Río hacia las casas periféricas del Río. | 68 |
| Figura 35. Río Chicamocha en su cauce normal, 10 horas después del incidente. | 69 |
| Figura 36. Ubicación de los perfiles adquiridos en campo con respecto a la Falla de Soapaga. | 70 |
| Figura 37. Topografía adquirida en campo, por medio del GPS Garmin 650X, de cada uno de los perfiles de la adquisición. | 73 |
| Figura 38. Perfiles de campo magnético Total, adquirido en campo, (IGRF 2005 = 32073.07nT). | 78 |
| Figura 39. Perfiles de campo magnético reducido al Polo. (Inclinación magnética = 31.24° y Declinación magnética = -7.33°). | 79 |
| Figura 40. Perfiles de adquisición en campo y puntos de gravedad regional (IGAC, 1998). (Mapa de anomalía de aire libre). Corregida con $\varphi=978,032681\text{Gal} (1+0,0052789704 \text{sen}^2\Phi + 0,0000234611 \text{sen}^4\Phi)$. | 83 |
| Figura 41. Grilla cuadrada de Anomalía de campo magnético total, adquirido en campo, (IGRF 2005 = 32073.07nT). En la figura se resalta la posición de 4 de los perfiles adquiridos en campo, sobre los cuales se hizo el modelamiento inverso. | 88 |
| Figura 42. Reducción al Polo de los datos de campo. ($I = 31.24^\circ$ y $D = -7.33^\circ$). Se observa el contraste de anomalía en la mayor parte del corredor de la Falla de Soapaga. | 89 |
| Figura 43. Pseudo gravedad obtenidos a partir de los datos de campo magnético reducidos al polo, utilizando el software Magpick ® y los parámetros de inclinación y declinación magnética para la zona. | 90 |

| | |
|--|-----|
| Figura 44. Anomalía de completa de Bouguer graficada a partir de los puntos del IGAC. (Densidad representativa de la corteza terrestre $2,67\text{g/cm}^3$). | 91 |
| Figura 45. Modelo de elevaciones generado a partir de los puntos de elevación adquiridos en campo, con el GPS de altímetro barométrico Garminmap 60CSX. | 92 |
| Figura 46. Primera derivada en la vertical de la anomalía completa de Bouguer. (Densidad representativa de la corteza terrestre $2,67\text{g/cm}^3$). | 93 |
| Figura 47. Anomalía Completa de Bouguer modelamiento directo. Se observa la variación a lo largo de la Falla. | 94 |
| Figura 48. Anomalía de campo magnético, obtenida por medio del modelamiento directo de los perfiles. De igual forma que en la anomalía de campo gravitacional, se puede observar el contraste de anomalías paralelo a la Falla. | 95 |
| Figura 49. Mapas de anomalía de Bouguer y campo magnético total, en sus dimensiones normales y normalizados, para determinar los índices de favorabilidad y sus correlaciones directas e inversas. Se puede observar que el comportamiento no cambia, solo la escala en la que se miden las anomalías. | 101 |
| Figura 50. Mapas de los índices de favorabilidad de correlación directa e inversamente para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Se puede observar las gráficas SLFI y DLFI, donde se enmarcan algunos lugares donde se tienen altas correlaciones directa e inversa. | 102 |
| Figura 51. Coeficientes $\text{DLFI} \leq 17.2979$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético Total. Mostrando la correlación inversa, valle con valle. | 103 |
| Figura 52. Coeficientes $\text{DLFI} \geq 17.2979$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Mostrando la correlación inversa, cresta con cresta. | 103 |
| Figura 53. Coeficientes $\text{SLFI} \leq 10.0391$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con valle. | 104 |
| Figura 54. Coeficientes $\text{SLFI} \geq 10.0391$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta. | 104 |
| Figura 55. Mapas de la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total, en sus dimensiones normales y normalizados. | 106 |
| Figura 56. Mapas de los índices de favorabilidad de correlación directa e inversamente para la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total. | 107 |
| Figura 57. Coeficientes $\text{SLFI} \leq 13.4856$. Para primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con valle. | 108 |
| Figura 58. Coeficientes $\text{SLFI} \geq 13.5856$. Para la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta. | 108 |
| Figura 59. Coeficientes $\text{DLFI} \leq 14.7695$. Para primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con valle. | 109 |
| Figura 60. Coeficientes $\text{DLFI} \geq 14.7695$. Para la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta. | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figura 61. Coeficientes $DLFI \geq 17.1538$. Para el Pseudo campo gravimétrico y la anomalía de Bouguer. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta. | 110 |
| Figura 62. Coeficientes $DLFI \leq 13.0339$. Para la anomalía gravitacional del modelamiento directo y la anomalía de Bouguer. Mostrando la correlación directa, valle con valle. | 111 |
| Figura 63. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Corrales. Perfil 1. | 113 |
| Figura 64. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Tasco. Perfil 2. | 114 |
| Figura 65. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Paz del Río. Perfil 3. | 115 |
| Figura 66. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Sativa Viejo. Perfil 4. | 116 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----------|
| TABLA 1. COORDENADAS DEL POLIGONO | 4 |
| TABLA 2. VALORES DE SUSCEPTIBILIDAD Y DENSIDAD ADOPTADOS PARA EL MODELAMIENTO DIRECTO | 41 |
| TABLA 3. COORDENADAS PERFILES GEOLOGICOS | 50 |
| TABLA 4. ESPECIFICACIONES DE ADQUISICIÓN MAGNÉTICA | 71 |
| TABLA 5. TIPOS DE PREDICCIÓN KRIGING | 84 |
| TABLA 6. COEFICIENTES DE CORRELACION OBTENIDOS ENTRE TODOS LOS DATOS. | 96 |

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a la Virgencita y mis hijos, Ana Sofía, Camilo Andrés y a mi Esposo Carlos Junca, porque sin su paciencia no hubiese sido posible alcanzar este sueño. A mi Director Orlando Hernández, porque no hubo una conversación con él, en la que no aprendiera algo nuevo. A los Jurados que con sus consejos y recomendaciones iluminaron el desarrollo de este trabajo. A la Agencia Nacional de Hidrocarburos por su apoyo técnico y financiero en proyectos de extensión en los que participe en condición de estudiante de la maestría en geofísica del departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia y a todos aquellos amigos y cercanos que siempre me brindaron su apoyo incondicional. Y por supuesto a mi Madre santa que siempre estuvo a mi lado.

RESUMEN

En este trabajo se analiza la correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría utilizadas para modelar contrastes de densidad y susceptibilidad magnética asociadas a la presencia de discontinuidades estructurales. Específicamente, se estudian los aspectos estructurales de la Falla de Soapaga y su incidencia en el control del espesor de sedimentos y profundidad del basamento cristalino. El tramo estudiado de esta falla se ubica desde Susacón, al norte, hasta Corrales, al sur, Departamento de Boyacá, Colombia. La metodología de análisis incluye la aplicación de procesos de correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría, procesos de normalización, índices de favorabilidad y teorema de Poisson. A partir de los resultados obtenidos se realizó la validación de los modelos geofísicos mediante la integración con datos geológicos y otros métodos geofísicos. Las aplicaciones de los resultados de este trabajo pretenden optimizar la aplicación de programas integrados de campos potenciales orientados a evaluar programas de exploración de recursos minerales y energéticos.

Adicional a esto permitió tener un concepto cuantitativo de la relación existente entre las anomalías de campo gravimétrico y las anomalías de campo magnético, brindándole más rigurosidad matemática a los resultados obtenidos por medio del estudio de campos potenciales de una estructura en particular.

ABSTRACT

The aim of this research is to apply spectral correlation, local favorability indexes and Poisson's theorem as numerical methods for data processing and interpretation of potential field data associated with structural features; these techniques are applied to theoretical and real gravity and magnetic data of the Soapaga fault, located in the Boyacá Department, in the eastern Andean Mountains. Theoretical data of the Soapaga fault was obtained by forward modeling of geological and structural sections. Real data of the Soapaga fault included compiled gravity data and acquired magnetic data along four profiles oriented perpendicular to the fault. As a result, the geometry of the fault and its structural characteristics were obtained by interactive forward and inverse modeling. This methodology allows highlighting anomaly trends associated with density and magnetic susceptibility contrast that occur along the Soapaga fault zone. Additionally, this work provides a quantitative approach to establish the relationship between gravity and magnetic anomalies, supported by a rigorous mathematical methodology rather than isolated data interpretation to better understand the gravity and magnetic signatures of outcropping and hidden structural features.

Keyword: spectral correlation, gravity, magnetic, Soapaga Fault

1. CAPITULO 1

1.1 Introducción

En este trabajo se analiza la correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría utilizadas para modelar contrastes de densidad y susceptibilidad magnética asociadas a la presencia de discontinuidades estructurales. Específicamente, se estudian los aspectos estructurales de la Falla de Soapaga y su incidencia en el control del espesor de sedimentos y profundidad del basamento cristalino. El tramo estudiado de esta falla se ubica desde Susacón, al norte, hasta Corrales, al sur, Departamento de Boyacá, Colombia. La metodología de análisis incluye la aplicación de procesos de correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría, procesos de normalización, índices de favorabilidad y teorema de Poisson. A partir de los resultados obtenidos se realizó la validación de los modelos geofísicos mediante la integración con datos geológicos y otros métodos geofísicos. Las aplicaciones de los resultados de este trabajo pretenden optimizar la aplicación de programas integrados de campos potenciales orientados a evaluar programas de exploración de recursos minerales y energéticos. En éste Capítulo se describe las características generales del área de estudio, su ubicación geográfica, condiciones climáticas, planteamiento del problema, justificación, objetivos, antecedentes, marco teórico, y metodología de trabajo.

1.2 Localización área de estudio

El área de estudio corresponde a la Cordillera Oriental, ubicada en los Andes Colombianos al noroeste de Suramérica, dentro del Departamento de Boyacá, Sector Soapaga. Con respecto a los municipios cercanos, se encuentra aproximadamente a 48Km al SE de la población de Tunja y a 200Km al NW de Bogotá D.C. Limita al norte con la población de Susacón, al Sur con la población de Firavitoba, al occidente con las poblaciones de Duitama y Tibasosa y al oriente con el municipio de Jericó y el Páramo de Pisba. Figura 1.

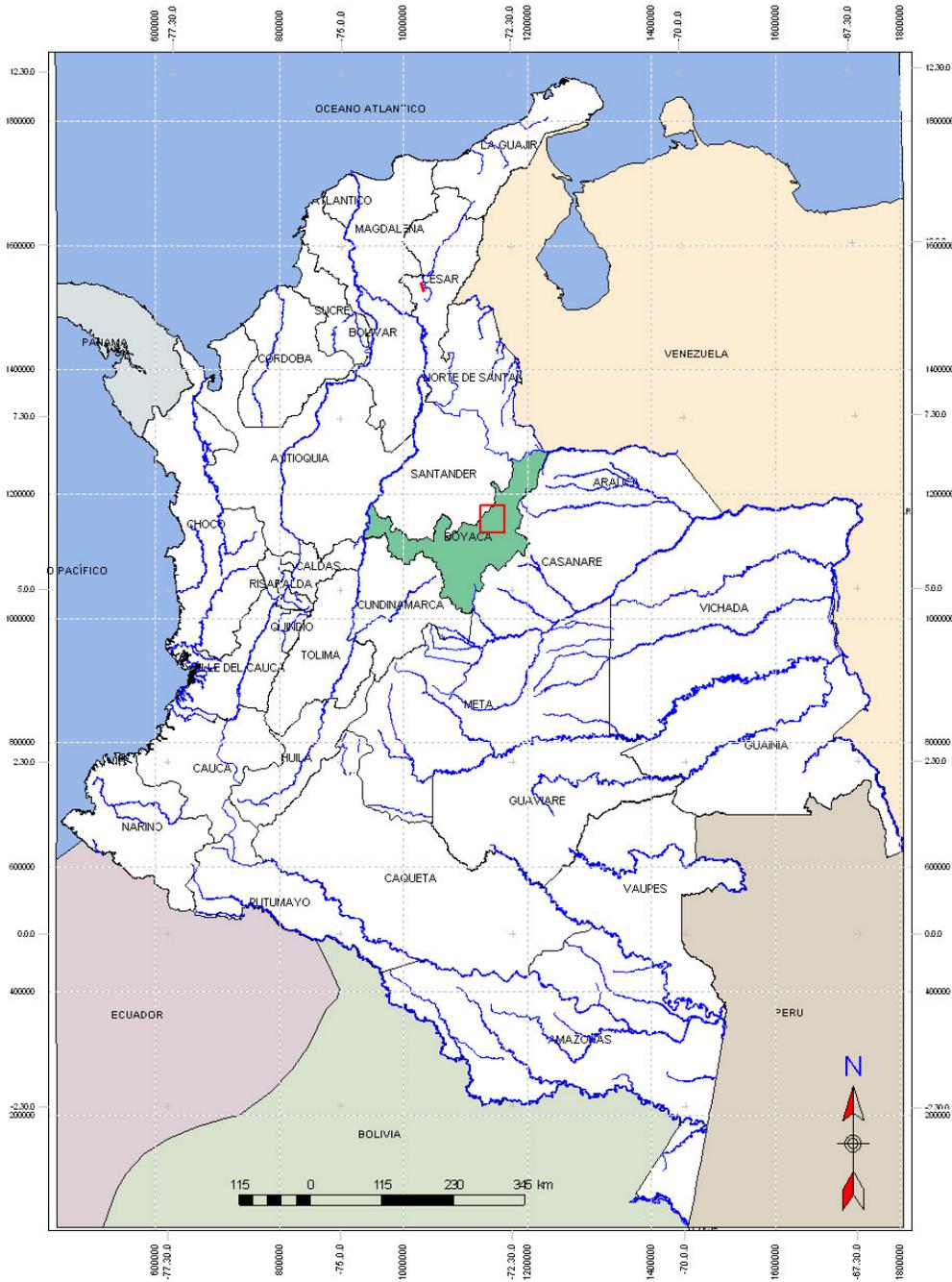


Figura 1. Mapa de Colombia dónde se resalta el departamento de Boyacá y el área de estudio.

Corresponde a un polígono que cubre un área de 1226.085 Km² comprendido en parte a las planchas topográficas 152 y 172 (Figura 2) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi a escala 1:100000. En la siguiente tabla se registran las coordenadas de cada punto del polígono, con origen Bogotá (1.000.000, 1.000.000).

TABLA 1. COORDENADAS DEL POLIGONO

| PUNTO | COORDENADA X | COORDENADA Y |
|-------|--------------|--------------|
| A | 1125000 | 1180000 |
| B | 1165000 | 1180000 |
| C | 1165000 | 1130000 |
| D | 1125000 | 1130000 |

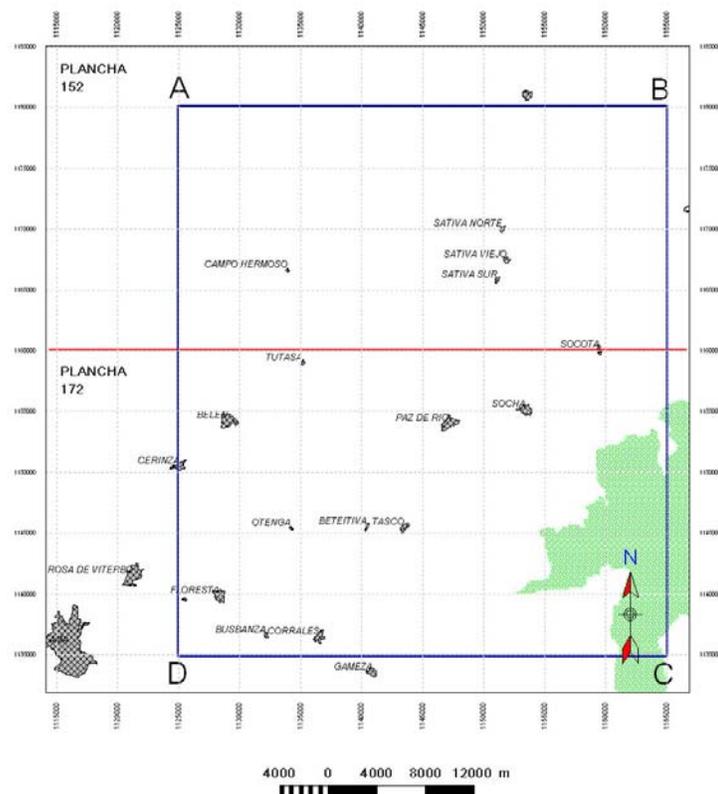


Figura 2. Mapa del área de estudio dónde se resalta su ubicación dentro de las planchas 152 y 172 a escala 1:100000 del IGAC.

La región de trabajo hace parte del altiplano Cundiboyacense, Montaña Santandereana y Vertiente Oriental Andina según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 1985).

Teniendo en cuenta la parte ambiental, dentro del bloque de estudio se encuentra el Páramo de Pisba que ocupa una extensión de 88.592 Km² al Oriente del área. Cómo se observa en la figura 3.

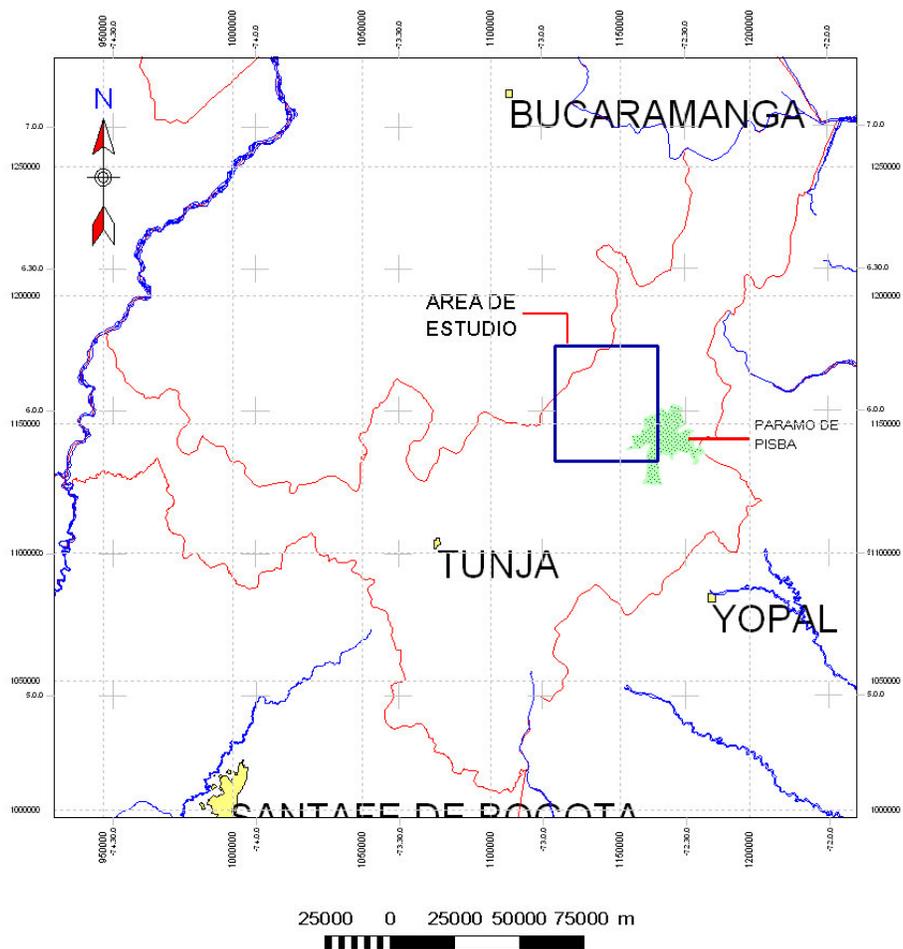


Figura 3. Mapa del departamento de Boyacá, dónde se resalta el área de estudio, la reserva natural y las capitales cercanas.

1.3 Condiciones climáticas

En la región estudiada se presentan alturas comprendidas entre los 2.500 y 4.000 msnm. Sus temperaturas oscilan entre 5° y 20°C, y corresponden a los pisos térmicos frío y de páramo alto según IGAC (1985). La precipitación pluviométrica en los valles es de unos 800 mm anuales y en los páramos, de 3.000 mm anuales (IGAC, 1985).

1.4 Planteamiento del problema

En la última década, debido a la necesidad de realizar "interpretaciones combinadas" con la mayor cantidad de datos geofísicos y geológicos que sean posibles obtener, ha cobrado cada vez más importancia la gravimetría y magnetometría con sus modernos procedimientos de procesamiento e interpretación de datos. La aplicación más destacada es ayudar a resolver problemas geodinámicos y establecer de cierta forma la certeza de la existencia de recursos energéticos.

El estudio de la región es de gran interés en la prospección de hidrocarburos y por tal razón es fundamental el conocimiento pleno y sustentado de la geometría de la falla de Soapaga como posible trampa estructural. En el trabajo de grado para obtener el título de geólogos: "Modelamiento geofísico de la falla de Soapaga" (Castellanos y García, 1997), se realiza un estudio gravimétrico que consta de dos perfiles de aproximadamente dos kilómetros cada uno, ubicados cerca al bloque escogido en esta tesis, en el cual evidencian un ángulo de falla alto, de aproximadamente 75°, hasta una profundidad de 2900m. Sin embargo, comparando estos resultados con el Informe de Geofísica de Campo I-2006, por estudiantes de la maestría en geofísica del departamento de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia, en la zona de Sogamoso, Boyacá, a partir del modelamiento de datos de sísmica, gravimetría y magnetometría, se evidencia que la falla de Soapaga es de bajo ángulo, menos de 40 grados.

Es por esta discrepancia de opiniones que este proyecto pretende determinar las características estructurales de dicha falla mediante la correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría, incluyendo procesos de normalización, índices de favorabilidad y teorema de Poisson. Y así contribuir al avance de proyectos de exploración en la cuenca de Soapaga, Departamento de Boyacá, Colombia, y en el conocimiento de la Geología de nuestro país.

1.5 Justificación

Teniendo en cuenta la necesidad de utilizar cada vez más herramientas, lo que se busca es empezar a estudiar diferentes formas de correlacionar información para permitir un análisis más certero de una cuenca o lugar en particular, en este caso la geometría de la falla de Soapaga.

Lo que se pretende es ayudar a despejar la incertidumbre sobre la geometría real de la falla, permitiendo una descripción de la misma, por medio de la correlación espectral de campos potenciales y su aplicación en la generación de un modelo 2D, que pueda ser representativo de la distribución sedimentaria de la cuenca, para poder interpretar espesores de basamento que se puedan relacionar con los datos obtenidos por medio de la sísmica en la misma zona.

Este tipo de estudio permitirá darle mayor credibilidad a la prospección geofísica por medio de campos potenciales y su gran aplicabilidad no solo al estudio de cuencas posiblemente petroleras, sino al estudio de la geología de la zona, ya que por medio de un modelo bidimensional de la falla se pueden realizar una serie de extrapolaciones estratigráficas para determinar cómo son las características de las zonas vecinas.

1.6 Objetivos

Los objetivos que se plantean y logran a lo largo de la realización de esta tesis son los siguientes:

1.6.1 General

Modelar las características estructurales de la falla de Soapaga y su incidencia en el control del espesor de sedimentos y profundidad del basamento cristalino del área de Soapaga, Departamento de Boyacá, Colombia, mediante la correlación espectral de anomalías de gravimetría y magnetometría, incluyendo procesos de normalización, índices de favorabilidad y Teorema de Poisson.

1.6.2 Específicos

- a. Diseñar un proyecto de adquisición que permita analizar si la estructura presenta contrastes en densidad y/o susceptibilidad magnética, por medio de levantamientos geofísicos terrestres de magnetometría.
- b. Determinación de las fuentes regionales y residuales y su geometría por medio del análisis espectral, índices de favorabilidad y teorema de Poisson, causantes de las anomalías observadas en el mapa gravimétrico y magnético y su correlación con el modelamiento directo.
- c. Elaboración de modelos bidimensionales (2D) a partir de los datos obtenidos, que describan la geometría de la falla, el espesor de sedimentos y la profundidad del basamento.
- d. Generación de bases de datos en SIG para estudios futuros.

1.7 Antecedentes

Durante el año 2007 la Universidad Nacional de Colombia y la Agencia Nacional de Hidrocarburos firmaron un convenio para llevar a cabo la “Evaluación integral, geológica, geofísica y geoquímica del Bloque Soapaga, Cordillera Oriental, en el cual se hizo una compilación de toda la información existente en la zona, y se evaluó el bloque para la exploración de hidrocarburos, dentro de este estudio se presentaron varios prospectos dentro de los cuales no se encontraba la Falla de Soapaga, esto como consecuencia de la baja calidad de la información en la zona de Falla y la incertidumbre sobre la verdadera geometría en el momento de la interpretación. En el capítulo IV se pueden observar varias de las líneas sísmicas interpretadas en la zona de Falla.

Castellanos y García (1997), en su trabajo de grado titulado “Modelamiento geofísico de la Falla de Soapaga”, adquirieron, analizaron y modelaron datos gravimétricos a lo largo de dos perfiles transversales a la Falla de Soapaga, con lo cual, paralelamente a observaciones geológicas de superficie, les fue posible obtener dos modelos congruentes gravimétrico- estructurales y un mapa de anomalías de Bouguer residuales, con lo que se corrigieron los modelos estructurales preexistentes del área. Las anomalías gravimétricas en este estudio son el reflejo de un fuerte contraste de densidades a ambos lados de la Falla de Soapaga, y adicionalmente a esto, son evidencia de un ángulo de fallamiento alto, de aproximadamente 75° , hasta una profundidad de 2900m bajo la topografía, en donde se pierde el contraste, cómo ya se había mencionado anteriormente.

El Departamento de Geociencias de La Universidad Nacional de Colombia (2006), realizó estudios geofísicos en el área de estudio, específicamente en los municipios de Sogamoso y Firavitoba. Se adquirió una línea sísmica de reflexión de 2Km de longitud, 3 perfiles de gravimetría y 3 de magnetometría con el fin de determinar la geometría de la Falla de Soapaga. Este estudio concluyó que es una Falla de tipo Inverso, con un ángulo no mayor de 35°.

En cuanto a la metodología utilizada en este trabajo, la correlación espectral y los índices de favorabilidad, se explican y utilizan en los trabajos realizados por (Hernández, 2008) y (Von Frese 2000-1997). Donde se pueden estudiar anomalías de campo magnético y gravimétrico por medio de normalización de los datos y transformada de Fourier, este procedimiento se explicara con detalle en el capítulo IV.

1.8 Marco Teórico

La zona de estudio ha sido descrita en todas las historias geológicas del macizo de Floresta. Sin embargo, para no hacer muy extensa esta parte se hará un pequeño resumen de su comportamiento.

La falla de Soapaga tuvo un comportamiento normal en el Jurásico, tiempo en el cual presentó depositación en el bloque occidental (colgante), mientras que el bloque oriental (yacente) se convierte en una zona de aporte; para el Terciario es evidente que el comportamiento de la Falla de Soapaga es inverso, pues los afloramientos de la Formación Concentración se restringen al occidente de la falla, además su gran espesor es solo explicable por una constante subsidencia, causada por el desplazamiento inverso. (Cediel, 1969; Cardozo y Zúñiga, 1995).

El marco teórico se basa en el conocimiento de los diferentes tipos de fallas, teniendo en cuenta la anterior descripción de (Cediel, 1969; Cardozo y Zúñiga, 1995).

Las fallas son fracturas en la corteza a lo largo de las cuales ha tenido lugar un desplazamiento apreciable. A veces, pueden reconocerse pequeñas fallas en los taludes de las carreteras, observándose estratos sedimentarios desplazados unos pocos metros. Las fallas de esta escala normalmente aparecen como pequeñas rupturas aisladas. Por el contrario, las grandes fallas, tienen desplazamientos de centenares de kilómetros y consisten en muchas superficies falladas interconectadas. Estas Zonas de falla pueden tener una anchura de varios kilómetros y a menudo son más fáciles de identificar a partir de fotografías aéreas que a nivel del suelo. (Tarbuck, 2005).

La mayoría de las fallas son inactivas y, por lo tanto, restos de una deformación antigua, cómo lo evidencia la falla de Soapaga.

1.8.1 Fallas Con Desplazamiento Vertical

Las fallas en las que el movimiento es fundamentalmente paralelo al buzamiento (o inclinación) de la superficie de falla se denominan fallas con desplazamiento vertical. Los dos tipos principales de fallas con desplazamiento vertical se denominan fallas normales y fallas inversas. Además cuando una falla inversa tiene un ángulo de buzamiento (inclinación) menor de 45° , se denomina cabalgamiento.

1.8.2 Fallas Normales

Las fallas con desplazamiento vertical se clasifican como fallas normales cuando el bloque de techo se desplaza hacia abajo en relación con el bloque de muro. Figura 4.

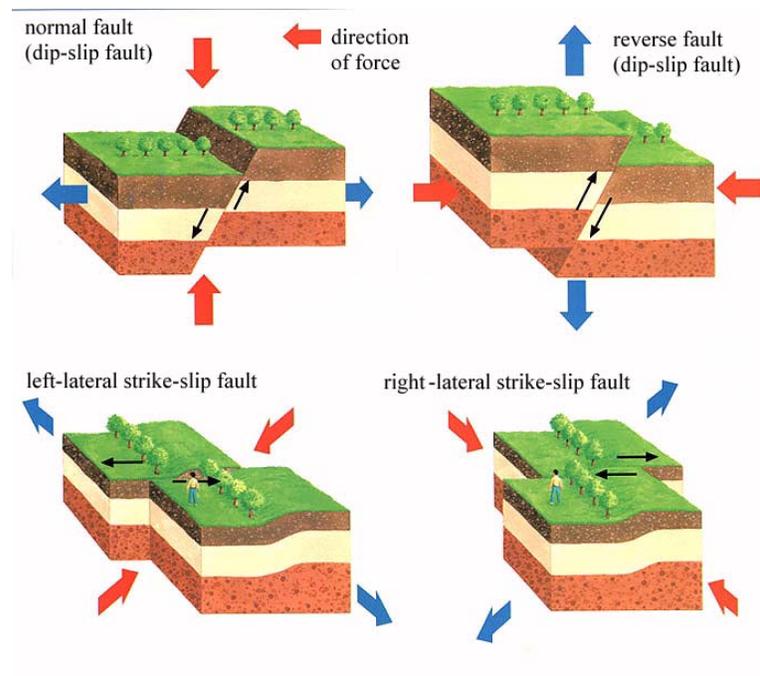


Figura 4. Modelos de Fallas con desplazamiento vertical. (Tomado de Tarbuck, 2005).

La mayoría de las fallas normales tienen buzamientos de unos 60° , que tienden a disminuir con la profundidad. Sin embargo, algunas fallas con desplazamiento vertical tienen buzamientos mucho menores, aproximándose en algunos casos a la horizontal.

La mayoría de las fallas normales son pequeñas, con desplazamientos más o menos de un metro. Las fallas normales indican la existencia de esfuerzos tensionales que separan la corteza.

1.8.3 Fallas Inversas Y Cabalgamientos

Son fallas en las cuales el bloque de techo se mueve hacia arriba con respecto al bloque muro.

Figura 4.

Las fallas inversas tienen buzamientos superiores a 45° y los cabalgamientos inferiores a 45° . Dado que el bloque de techo se mueve hacia arriba y sobre el bloque muro, las fallas inversas y los cabalgamientos reflejan esfuerzos compresionales que acortan la corteza.

Las fallas inversas de alto ángulo suelen ser pequeñas y acomodan desplazamientos locales en regiones dominadas por otros tipos de fallas. Los cabalgamientos, por otro lado, existen a todas las escalas. Los cabalgamientos pequeños exhiben desplazamientos que oscilan entre milímetros y unos pocos metros. Algunos grandes cabalgamientos tienen desplazamientos del orden de decenas a centenares de kilómetros.

Mientras las fallas normales aparecen en entornos tensionales, los cabalgamientos son resultado de fuertes esfuerzos compresivos. Las fuerzas compresivas producen generalmente pliegues además de fallas y provocan un engrosamiento y acortamiento del material implicado. (Tarbuck, 2005).

1.9 Metodología

A continuación se describirán cada una de las etapas desarrolladas durante el tiempo de ejecución del trabajo de tesis, para alcanzar con éxito cada uno de los objetivos planteados:

1.9.1 Fase De Compilación

Durante esta fase se hizo una búsqueda de toda la información disponible y existente en el área de trabajo. Entre esta información se compiló la existencia de bases topográficas, cartografía geológica previa, perfiles geológicos, columnas estratigráficas, pozos exploratorios y líneas sísmicas.

1.9.2 Fase De Análisis

Se evaluó la información compilada en la fase anterior con el fin de realizar una Base de Datos general, en la que se plasmaron los datos, localización geográfica, análisis y referencias bibliográficas. Así mismo se revisó la información con el fin de determinar la necesidad de adelantar una investigación más profunda de las fuentes de datos, se cotejaron documentos, mapas e informes originales referenciados en la información primaria. El objetivo de esta fase fue el de filtrar los datos relevantes y determinar vacíos de información.

1.9.3 Fase De Integración

La integración de la información se realizó con el fin de generar:

- a. Banco de datos digital y análogo – Con el material recopilado entre artículos, libros, informes técnicos, tesis de grado, tablas generales, y una parte gráfica (mapas, columnas estratigráficas, perfiles geológicos, registros de pozo e imágenes de líneas sísmicas).
- b. Coberturas cartográficas bajo plataforma tecnológica SIG, integradas, relacionadas con bases topográficas, la información geológica, geofísica e imágenes de sensores remotos.

1.9.4 Fase De Procesamiento De La Información Geofísica Regional Existente

Utilizando las Bases de Datos de información geofísica existente (principalmente Gravimetría), se hizo un procesamiento inicial:

- a. Por un lado se obtuvo un modelo gravimétrico a escala regional, lo que permitió delinear con mayor precisión los límites del área de estudio, desde la perspectiva de los campos de potencial.

- b. Los mapas y modelos generados proporcionaron una herramienta útil para el diseño de la campaña geofísica terrestre con el fin de adquisición de información de tipo local.

La información se extrajo a partir del Sistema Gravimétrico Nacional de Referencia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (1998).

1.9.5 Fase De Diseño De La Campaña Geofísica

De acuerdo a la información recopilada en las fases anteriores, se diseñaron 5 perfiles con sus parámetros y características de levantamiento geofísico, en este caso magnetometría, que se requirieron para cumplir los objetivos propuestos.

A partir de los resultados obtenidos en la Fase de Procesamiento Regional, se estableció que las estaciones magneto métricas deberían tener un espaciamiento de 200m al inicio y final de cada perfil y 50 m cerca de los afloramientos de la Falla.

1.9.6 Fase De Adquisición

Trabajo de campo que comprendió en el reconocimiento geológico y geofísico del bloque en el cual se hizo uso de los carretables existentes en el bloque, sobre los cuales se delinearon 5 perfiles de medición de campo magnético, obviando así la necesidad de hacer “trochas” o crear caminos nuevos, debido a la gran extensión del bloque de estudio, y de esta forma ir trabajando con el apoyo de un vehículo. En el Capítulo 4 se describirá de manera más específica las particularidades del procedimiento para el levantamiento geofísico.

1.9.7 Fase De Procesamiento

Procesamiento de la información adquirida en campo. En esta fase se elaboraron mapas utilizando para ello el software Oasis Montaj, modelos en GM-SYS y correlación de los datos

recopilados y adquiridos en campo con Matlab. En los Capítulos 3 y 4, se ampliarán detalles correspondientes al procesamiento tanto para la gravimetría regional existente como para magnetometría que se adquirió.

1.9.8 Fase De Interpretación

Interpretación de datos adquiridos, se relacionaron con el modelo geológico, con la información procesada de las Bases de Datos Globales existentes, y se establecieron las conclusiones que explican la Estructura de la Falla de Soapaga. Como herramienta de apoyo se utilizó un software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en este caso ArcGis ® y Geographix, GeoAtlas ®, para superponer capas de información y poder interactuar geo-espacialmente entre ellas. También se utilizaron las herramientas de análisis ofrecidas por MATLAB.

1.9.9 Fase De Elaboración Del Informe Final

Elaboración del informe final con la historia del proyecto, la metodología, procedimiento, descripción de la fase de adquisición y resultados obtenidos, con la respectiva integración de los modelos. Finalmente se incluyen conclusiones y recomendaciones Conclusiones

En el departamento de Boyacá, Colombia. Aproximadamente desde el municipio de Susacón al Norte del departamento se evidencia una falla que cruza todo el departamento, con diferentes grados de Buzamiento. El bloque de estudio esta catalogado como exploratorio para la industria del Petróleo según la Ronda Colombia 2008, realizada por la Agencia Nacional De Hidrocarburos, dentro de esta Ronda, cada uno de los Plays expuestos corresponden a Sinclinales prospectivos en el bloque, pero por poco conocimiento de la geometría de la Falla de Soapaga y pocos estudios geofísicos sobre ella, no se puede determinar si es una posible trampa estructural.

Esta tesis por medio del modelamiento directo e inverso, aplicando diferentes geometrías de falla y procesamiento de los datos adquiridos en campo, pretende dar una visión más detallada de la geometría de la Falla de Soapaga, de la profundidad del basamento cristalino en esta zona, y así poder aportar al conocimiento de la geología, a la utilización de los métodos aplicados y a la prospección del bloque.

2. MARCO GEOLOGICO

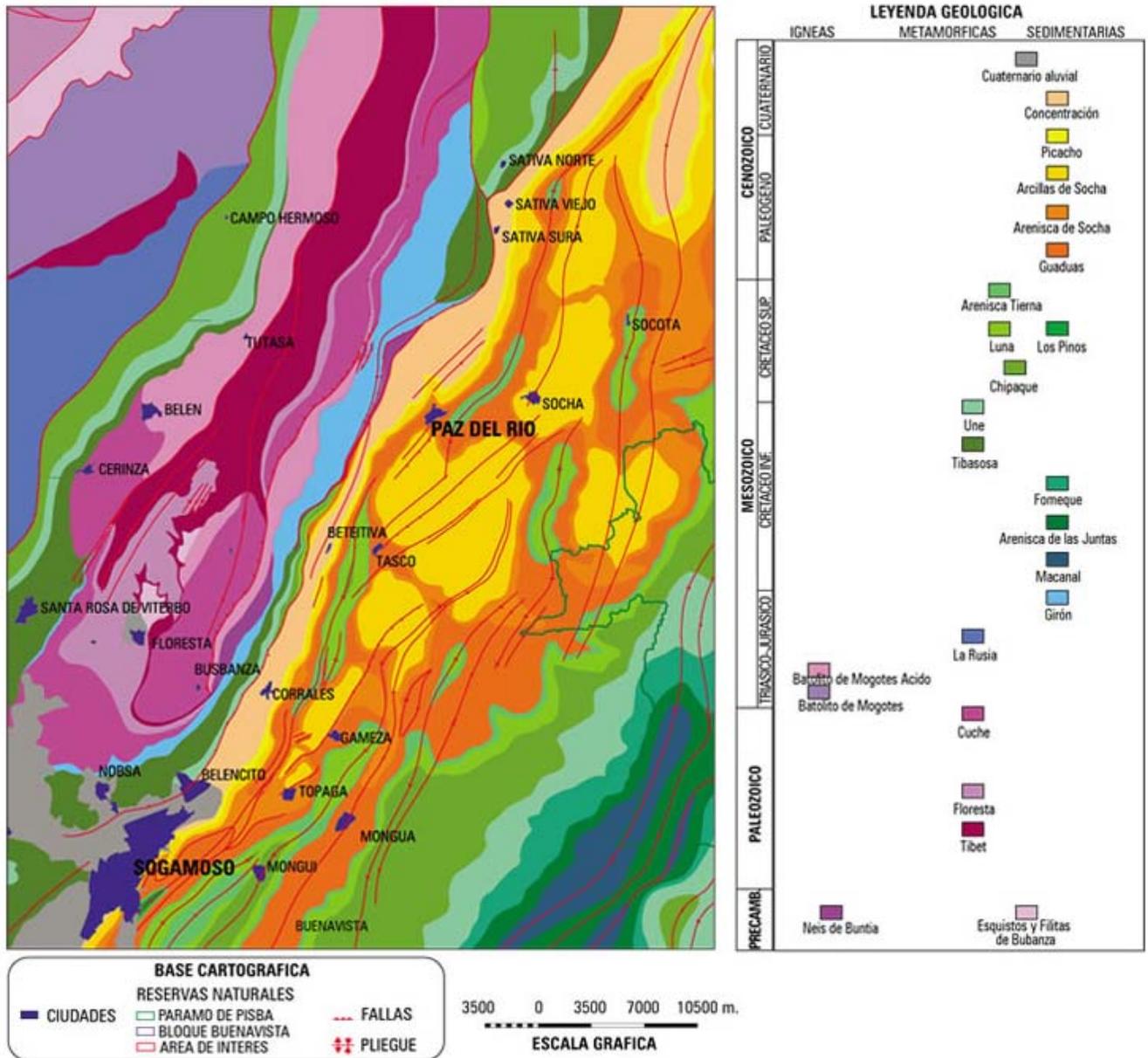


Figura 5. Mapa geológico de la zona de estudio. Bloque Soapaga. Cordillera oriental. Tomado de www.rondacolombia2008/img/secciones/cuenca/cordillera/marco_1.jpg. Elaborado por Andreas Kammer.

2.1 Geología Estructural

Para describir el comportamiento, geometría y posible cinemática de la Falla de Soapaga, se toma como base las conclusiones a las que llegaron algunos de los estudios realizados en el área. Y a partir de estas recopilaciones fue que se realizaron los modelos directo e inverso de la Falla.

2.1.1 Observaciones De Los Datos Existentes

La geología de superficie son las planchas 152 y 172 del Atlas geológico 1:100000 del INGEOMINAS y el mapa Geológico de la zona, elaborado por Andreas Kammer y que se encuentra en: www.rondacolombia2008/img/secciones/cuenca/cordillera/marco_1.jpg, y con estos mapas se realizó el amarre a los perfiles realizados por el profesor Andreas Kammer. Estos compilan la parte enmarcada por las poblaciones de Santa Rosa, Corrales, Sativa Sur y la vereda Llano Grande (carretera Belén Susacón).

Adicional a estas planchas, se utilizaron algunas de las significativas conclusiones extraídas de estudios realizados en el área por diferentes autores, y que se citan a continuación, de forma literal cómo aparecen en “*CARDOZO Y ZUÑIGA (1993)*”.

CEDIEL, F. 1969. 1. El Macizo de Floresta es un anticlinal simétrico delimitado en sus flancos por las Fallas inversas de Boyacá y Soapaga. 2. A partir de las diferencias faciales de las unidades del Terciario al W y E del Macizo, concluye que para finales del Cretáceo y comienzos del Terciario, este ya se presentaba como área positiva que separaba regiones geológicas distintas.

MOJICA, J. VILLARROEL, C. 1984. Durante los lapsos correspondientes a principios del Carboniano, mediados del Jurásico, el macizo de Floresta experimentó un levantamiento que condujo a la erosión o no acumulación de sedimentitas. Así las Fallas de Boyacá y Soapaga parecen haber actuado desde el Paleozóico controlando la sedimentación de las unidades presentes en el área. TORO, J. 1990. Modela con el mecanismo de un pliegue por propagación de falla la geometría general de las zonas del bloque colgante y bloque yacente de la Falla de Soapaga; obteniendo un acortamiento total de 20 km y un despegue a 12 km de profundidad. Concluye que las fallas de Boyacá y Soapaga actúan absorbiendo verticalmente el desplazamiento sinistral de la Falla de Bucaramanga. Así este sistema de fallas inversas constituiría la cola de caballo (horse tail) de la terminación sur de la Falla de Bucaramanga. Finalmente observando la espesa secuencia de rocas Jurásicas en el bloque colgante de la Falla y su ausencia en el bloque yacente, sugiere que esta estructura es una Falla Jurásica normal reactivada.

DENGO, C. COVEY, M. 1993. Distinguen dos episodios de deformación en la Cordillera Oriental: 1. Una deformación que involucra solo a la capa sedimentaria, con falla de bajo ángulo, que ocurren desde finales del Mioceno al Plioceno. 2. Un episodio de deformación de fallas inversas que involucran al basamento y que desplazan a las fallas de bajo ángulo que opera desde el Plioceno al reciente. Según los autores muchas de las fallas de alto ángulo son fallas normales del Jurásico y Cretácico invertidas, cómo lo sugiere el espesor de las unidades Jurásico y Cretácico inferior a ambos lados de estas Fallas. MEJIA, M. GIRALDO, J. 1993. Concluyen que el área de aporte de las areniscas de la Formación Picacho, corresponden al Macizo de Floresta y posiblemente al Macizo de Santander lo que indicaría que para el Eoceno, el macizo ya se presentaba como un área elevada, de relieve abrupto, donde dominaba la meteorización física y la erosión.

JARAMILLO, L. ROA, E. TORRES, M. 1993. Con base en análisis petrográficos y de paleo-corrientes en rocas de la Formación Socha inferior en la sección de Peña de Socotá, concluyen que las posibles áreas de aporte fueron el macizo de Floresta y el Macizo de Santander. Esto indicaría que para finales del Paleoceno, el Macizo de Floresta se comportaba como un área positiva.

En los modelos directo e inverso de la Falla de Soapaga a través de la zona de estudio, se espera obtener un contraste grande de densidades debido a la diferencia de edad y composición de las rocas; debido al contacto entre el macizo de Floresta y el terciario y cretácico, por lo cual se presentará una gran anomalía gravitacional en la zona de falla, cómo se verá en el capítulo III. La inclinación de dicha curva corresponderá al ángulo de buzamiento de la falla, adicional a esto, el Macizo de Floresta, cómo se mencionó anteriormente, esta compuesto de esquistos, filitas y algunas rocas ígneas que tendrán susceptibilidad magnética diferente de cero, por tanto, se esperará que también exista un contraste magnético, ya que están en contacto con rocas sedimentarias cuya susceptibilidad magnética en la mayoría, es igual a cero.

2.2 Estratigrafía

Dentro del bloque de estudio y las áreas vecinas se pueden observar diferentes configuraciones como el afloramiento de rocas sedimentarias con edades del Cretácico Inferior al Reciente y una pequeña apósis de rocas ígneas riolíticas que atraviesan rocas hasta del Terciario inferior. Cerca de Paz del Río afloran rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias con edades que comprenden desde el Proterozoico hasta el reciente. Las rocas ígneas corresponden a cuerpos intrusivos de composición granítica a granodiorítica, emplazados desde finales del Paleozoico hasta el Jurásico.

Es a partir de esta diferencia de afloramientos que se plantea la idea de la utilización de campos potenciales en su modelamiento estructural. Cómo se observará, luego de cada una de las edades se hará una pequeña descripción de lo que se espera como respuesta geofísica de las diferentes rocas encontradas dentro del área de estudio, de acuerdo a su composición, compactación y edad.

La descripción geofísica de cada una de las unidades se hará a partir de la columna estratigráfica generalizada perteneciente a la cuenca Cordillera Oriental, tomada de la página www.rondacolombia2008/img/secciones/cuencas/cordillera/marco_2.jpg.

2.2.1 Precámbrico

Las unidades pertenecientes al Precámbrico y presentes en esta zona, están compuestas por rocas que poseen una alta susceptibilidad magnética y una alta densidad, lo que evidenciará tanto en el modelamiento directo, cómo en la adquisición, anomalías gravimétricas y magnéticas positivas y altas, que presentarán un gran contraste en la zona de falla.

2.2.2 Paleozoico

Las formaciones pertenecientes a esta unidad y en la zona, al macizo de Floresta, están compuestas en su mayoría por areniscas y lutitas de origen metamórfico, en algunos casos localmente conglomeráticas que presentarán valores de densidad medianamente altos y por tanto anomalías gravimétricas altas y positivas, en cuanto a su comportamiento magnético, por ser de origen metamórfico podrán tener susceptibilidades magnéticas diferentes de cero, lo cual generaría una anomalía magnética que dependería directamente del espesor de la unidad en cada uno de los afloramientos, pero en general, presenta contraste magnético alto.

2.2.3 Mesozoico

Dentro de las formaciones citadas para esta edad, se encuentra el Intrusivo de Aguachica el cual por ser de origen ígneo presenta valores altos de susceptibilidad magnética altos y generará anomalías magnéticas altas, el resto de las unidades son de origen sedimentario y por tan razón sus valores de susceptibilidad son cercanos a cero, lo cual mostrará anomalías magnéticas muy bajas, e incluso negativas. En cuanto a la respuesta gravimétrica, sus densidades no varían mucho, estarán dentro de los rangos de las otras unidades, por tanto no presentarán grandes anomalías de campo gravitacional.

2.2.4 Cretácico Inferior y Superior

Todas las formaciones pertenecientes al cretácico superior y al cretácico inferior son de origen sedimentario por tal razón su comportamiento gravimétrico y magnético no es muy significativo, es decir, no presentan grandes contrastes de densidad ni de susceptibilidad magnética, así que por si solas no presentarán anomalías gravimétricas o magnéticas. Si se tiene en cuenta la geometría de las estructuras en las que se encuentren presentes, esto si marcaría anomalías gravimétricas altas a bajas, me refiero, en el caso en el que se encuentren formando un sinclinal o un anticlinal cómo se mostrará en el modelamiento directo del capítulo III.

2.2.5 Cenozoico

Estas unidades presentan densidades más bajas que las formaciones anteriormente descritas, por tal motivo presentarán anomalías gravimétricas bajas o negativas en algunos de los modelamientos, esto se debe a su poca consolidación en comparación con las rocas pertenecientes al cretácico superior o inferior, adicional a que también son de origen sedimentario. Su respuesta magnética es casi nula, debido a que no presentan ningún tipo de mineral magnético que pueda generar anomalías de este tipo.

2.2.6 Depósitos Cuaternarios

Los depósitos cuaternarios en general, presentan una muy baja densidad en comparación con las formaciones anteriormente descritas, y su susceptibilidad magnética es cero, por tal razón, este tipo de depósitos se asocian a anomalías gravimétricas negativas.

En el área estudiada se diferenciaron los siguientes tipos de depósitos cuaternarios:

2.2.6.1 Coluviales (Qc)

Con el término coluviales se incluyen los depósitos de talud y derrubios; están constituidos por acumulaciones de materiales de composición heterogénea y de tamaño variable, predominantemente bloques angulares.

2.2.6.2 Aluviales (Qal)

Depósitos aluviales se ubican hacia las márgenes de los drenajes principales y consisten de bloques redondeados a subredondeados, principalmente de arenitas, en una matriz areno arcillosa. Presentan una morfología plana. De esta forma se plantea el marco geológico regional de área, en el que se describen brevemente, el comportamiento de las unidades geológicas cartografiadas en el mapa del área, según su edad y composición.

3. MODELAMIENTO DIRECTO – GRAVIMETRÍA Y MAGNETOMETRÍA

En el proceso de investigación siempre debe existir como base modelos teóricos que ejemplifiquen la estructura de estudio y su respuesta se asemeje a lo que se está buscando, con el fin de poder planear con mejor precisión la estrategia con la que se abordará el problema de investigación, en este capítulo se elaboraron modelos teóricos de gravimetría y magnetometría que permitieron evidenciar la respuesta geofísica de la falla de Soapaga.

Estos modelos se realizan inicialmente cómo situaciones generales de un tipo de comportamiento estructural y luego se enmarcan dentro de la zona, utilizando densidades y susceptibilidades apropiadas de acuerdo con la litología presente en el área.

3.1 Introducción

Por medio del modelamiento directo, se busca conocer la respuesta magnetométrica y gravimétrica para diferentes tipos de falla y ángulos de inclinación. Para esto se utilizó el software GM-SYS ®. Este software trabaja con 2.5 D para modelamiento gravimétrico y magnético (directo e inverso). La metodología consiste en generar unos modelos geológicos idealizados (con litologías y espesores aproximados), y sobre estos obtener la respuesta geofísica que se esperaría obtener.

3.2 Fundamento Físico-Matemático

El modelamiento inverso se basa en la aplicación del software GM-SYS que permite encontrar la anomalía gravimétrica y magnética causada por un polígono en dos dimensiones. Los métodos usados por GM-SYS para calcular la respuesta gravimétrica y magnética se basan en lo propuesto por Talwani (1959), y Talwani y Heirtzler,(1964), y hace uso de los algoritmos descritos en Won y Bevis (1987). Cálculos de 2 1/2 dimensiones se basan en Rasmussen y Pedersen (1979). La rutina de la inversión de GM-SYS utiliza un algoritmo de inversión de Marquardt (Marquardt, 1963) para linealizar e invertir los cálculos. GM-SYS utiliza una implementación práctica de ese algoritmo para la gravedad y del magnetismo desarrollado por el USGS y usado en su programa de computadora, SAKI (Webring, 1985).

GM-SYS utiliza un modelo bidimensional de la Tierra plana para los cálculos de gravedad y magnetismo; es decir, cada unidad o bloque estructural se extiende a más y menos infinito en la dirección perpendicular al perfil. Se asume que la Tierra tiene topografía pero ninguna curvatura. El modelo también extiende a + 30.000 kilómetros y - 30.000 kilómetros a lo largo del perfil para eliminar efectos de borde. En GM-SYS, las estaciones (puntos en las cuales los valores de gravedad y magnetismo son observados y calculados) deben estar fuera del material fuente (es decir, en un área del modelo con una densidad, magnetización, y susceptibilidad igual a cero). Won and Bevis (1987) presentaron dos algoritmos para computar las anomalías gravitacionales y magnéticas debido a un polígono de n - caras y en un espacio bidimensional. Talwani et al., (1959), y Talwani y Heirtzler (1964) presentaron un método para computar la atracción gravitacional debido a un polígono de n lados. Su algoritmo se ha utilizado en programas de computador para modelamiento gravitacional bidimensional. Ya que cualquier cuerpo 2D, de forma arbitraria, se puede aproximar a un polígono, y cualquier distribución de densidad 3-D se puede modelar como conjunto de polígonos yuxtapuestos de densidad constante. Won and Bevis (1987) modificaron el algoritmo para calcular la aceleración gravitacional debido a un polígono, aplicando la relación de Poisson para expresiones de la aceleración gravitacional. Derivaron un segundo algoritmo para calcular la anomalía magnética debido a un polígono magnetizado por un campo externo. De este modo, la gravedad y las anomalías magnéticas se pueden determinar correctamente para cualquier punto dentro, fuera, sobre o debajo del polígono.

3.2.1 Anomalía Gravimétrica Debida A Un Polígono

Hubbert (1948) mostró que la atracción gravitacional debido a un cuerpo 2D se puede expresar en términos de una línea integral alrededor de su periferia. Talwani et al. (1959) consideraron el caso de un polígono de n -lados y disgregaron la integral lineal en contribuciones, cada una asociada a

un lado del polígono. Won y Bevis (1987) siguieron a Talwani et al. (1959) colocando el punto al cual la anomalía de la gravedad debe ser calculada (es decir, la estación) en el origen del sistema de coordenadas y expresando los componentes verticales y horizontales de la anomalía de la gravedad como:

$$\Delta g_z = 2G\rho \sum_{i=1}^n Z_i \quad (\text{Ec. 3.1})$$

y

$$\Delta g_x = 2G\rho \sum_{i=1}^n X_i \quad (\text{Ec. 3.2.})$$

donde Z_i y X_i son las integrales lineales a lo largo del i -ésimo lado del polígono, G es la constante gravitacional, y el ρ es la densidad del polígono. Talwani et al., (1959) derivaron expresiones para Z_i y X_i que hacen referencias extensivas a las funciones trigonométricas.

Grant y West (1965) reformularon la expresión para Z_i , haciendo mayor referencia a los vértices de coordenadas:

$$(X_i, Z_i) = 1.n \quad (\text{Ec. 3.3})$$

y muy pocas referencias a las cantidades angulares, y así reduce el número de las expresiones trigonométricas implicadas en el cálculo. Won and Bevis (1987) siguieron las aproximaciones de Grant y Wests produciendo una fórmula para X_i así como Z_i compactando la notación al eliminar i . Cualquiera de los dos vértices sucesivos fueron etiquetados 1 y 2 y, a su turno, cada par de vértices vecino fue tratado como vértices 1 y 2 alternadamente. Así los siguientes algoritmos fueron obtenidos:

(Ec. 3.4)

$$Z = A \left[(\theta_1 - \theta_2) + B \ln \frac{r_2}{r_1} \right]$$

$$X = A \left[-\theta_1 - \theta_2 \right) B + \ln \frac{r_2}{r_1} \left. \right] \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$A = \frac{(x_2 - x_1)(x_1 z_2 - x_2 z_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$B = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$r_1^2 = x_1^2 + z_1^2 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$r_2^2 = x_2^2 + z_2^2 \quad (\text{Ec. 3.9})$$

el cómputo de $(-\theta_1 - \theta_2)$ requiere un cierto cuidado si el algoritmo es válido para cualquier estación local. $-\theta_1$ y $-\theta_2$ se obtienen usando la relación:

$$\theta_j = \tan^{-1} \left(\frac{z_j}{x_j} \right)_{\forall j=1,2} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

3.2.2 Anomalía Magnética Debido A Un Polígono

Talwani and Heirtzler (1964) introdujeron un método para computar la anomalía magnética debido a un cilindro poligonal infinito. Combinando las anomalías debido a un conjunto semifinito de columnas, cada una de las cuales está limitada por uno de los lados del polígono. Alternativamente, la anomalía magnética debido a un cilindro poligonal se puede derivar usando la relación de Poisson, a partir de las expresiones anteriores para la anomalía gravitacional asociada. Won and y Bevis (1987) asumieron que la magnetización del cilindro fue inducida aisladamente por el campo magnético de la Tierra.

Entonces:

$$\Delta H = \frac{kH_e}{G_\rho} \frac{\delta}{\delta\alpha} \Delta_g \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde

ΔH = vector de la anomalía magnética,

Δg = vector de la anomalía de la gravedad,

k = susceptibilidad magnética del polígono,

ρ = densidad del polígono

H_e = fuerza escalar ambiente del campo magnético de la Tierra, y

α = dirección de la magnetización inducida.

Al contrario de la anomalía gravimétrica, la anomalía magnética depende del rumbo del cilindro, donde:

I = inclinación magnética, y

β = rumbo del cilindro medido en sentido levógiro a partir del norte magnético hacia el eje y negativo,

Se puede demostrar que

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} = \text{sen} I \frac{\partial}{\partial z} + \text{sen} \beta \cos I \frac{\partial}{\partial x} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

A partir de los componentes de la ecuación (2.10), los componentes verticales y horizontales de la anomalía magnética puede ser derivada como:

$$\Delta H_z = \frac{kH_e}{G\rho} \frac{\partial}{\partial \alpha} \Delta g_z \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Y

$$\Delta H_x = \frac{kH_e}{G\rho} \frac{\partial}{\partial \alpha} \Delta g_x \quad (\text{Ec. 3.14})$$

donde las expresiones para el g_z y el g_x , están dadas por las ecuaciones (3.1) y (3.2).

Substituyendo las ecuaciones (3.1), (3.2), y (3.12) en las ecuaciones (3.13) y (3.14), se obtiene

$$\Delta H_s = 2kH_e \left(\text{sen} I \frac{\partial Z}{\partial z} + \text{sen} \beta \cos I \frac{\partial Z}{\partial x} \right) \quad (\text{Ec. 3.15})$$

y

$$\Delta H_x = 2kH_e \left(\text{sen} I \frac{\partial X}{\partial z} + \text{sen} \beta \cos I \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (\text{Ec. 3.16})$$

Una vez que se conozca ΔH_z y ΔH_x , la cantidad escalar de campo total puede ser calculada por

$$\Delta H = \Delta H_z \text{sen} I + \Delta H_x \text{sen} \beta \cos I \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Las derivadas en las ecuaciones (Ec. 3.15 y 3.16) son:

$$\frac{\partial Z}{\partial z} = \frac{(x_2 - x_1)^2}{R^2} \left[(\theta_1 - \theta_2) + \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \right] - P \quad (\text{Ec.3.18})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{-(x_2 - x_1)(z_2 - z_1)}{R^2} \left[(\theta_1 - \theta_2) + \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \right] + Q \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$\frac{\partial X}{\partial z} = \frac{(x_2 - x_1)^2}{R^2} \left[\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} (\theta_1 - \theta_2) - \ln \frac{r_2}{r_1} \right] + Q \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$\frac{\partial X}{\partial x} = \frac{(x_2 - x_1)(z_2 - z_1)}{R^2} \left[\frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1} (\theta_1 - \theta_2) - \ln \frac{r_2}{r_1} \right] + P \quad (\text{Ec. 3.21})$$

Donde

$$R^2 = (x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

(Ec. 3.22)

$$P = \frac{x_1 z_2 - x_2 z_1}{R^2} \left[\frac{x_1(x_2 - x_1) - z_1(z_2 - z_1)}{r_1^2} - \frac{x_2(x_2 - x_1) - z_2(z_2 - z_1)}{r_2^2} \right] \quad (\text{Ec. 3.23})$$

y

$$Q = \frac{x_1 z_2 - x_2 z_1}{R^2} \left[\frac{x_1(z_2 - z_1) + z_1(x_2 - x_1)}{r_1^2} - \frac{x_2(z_2 - z_1) + z_2(x_2 - x_1)}{r_2^2} \right] \quad (\text{Ec. 3.24})$$

Los casos especiales 1 y 2 mostrados previamente para el problema gravitacional aplican de la misma manera para anomalía magnética. Adicionalmente, un cuarto caso sería:

Si $x_1 = x_2$, entonces

$$\frac{\partial Z}{\partial z} = -P \quad (\text{Ec. 3.25})$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{-(z_2 - z_1)^2}{R^2} \ln \frac{r_2}{r_1} + Q \quad (\text{Ec. 3.26})$$

$$\frac{\partial X}{\partial z} = Q \quad (\text{Ec. 3.27})$$

$$\frac{\partial X}{\partial x} = \frac{(z_2 - z_1)^2}{R^2} (\theta_1 - \theta_2) + P \quad (\text{Ec. 3.28})$$

Won and Bevis (1987) desarrollaron la subrutina en FORTRAN m-poly calculando el componente x, el componente z y la fuerza de la anomalía de campo magnético total debido a un cilindro infinito magnetizado por un campo magnético externo. Se asume que el rumbo del cilindro es paralelo al eje y en un sistema de coordenadas [x, y, z]. Las anomalías vertical, horizontal y magnitud de anomalía de campo total dependen de las ubicaciones relativas del polígono y de la estación en el plano [x, y], la susceptibilidad magnética del cilindro, la inclinación del campo magnético de la Tierra, la magnitud del campo magnético total terrestre, y el acimut geomagnético (rumbo) del polígono. Esta cantidad (β) es el ángulo del norte magnético con el eje x negativo medido en el plano horizontal. El ángulo es positivo cuando es medido en sentido levógiro del norte magnético. Las coordenadas x, y de los vértices del polígono deben ser especificadas en sentido dextrógiro cuando el plano x, z se observa hacia el eje y negativo.

La rutina calcula las anomalías en cualquier número específico de estaciones, y estas pueden ser especificadas en cualquier secuencia. En caso que el campo magnético de la Tierra sea vertical (Inclinación = 90°), el rumbo (β) es indefinido e irrelevante y puede ser ajustado a cualquier valor. El algoritmo no incluye los efectos de la desmagnetización (Grant y West, 1965) y por lo tanto no es útil para modelar las anomalías debido a cuerpos cuya susceptibilidad magnética excede 0.01 e.m.u. Los valores de susceptibilidad magnética se deben asignar con cuidado, aunque la susceptibilidad magnética es una cantidad adimensional, ésta difiere por un factor de 4π entre el SI y el sistema emu ($k_{emu} = 4 \pi \text{ SI}$). Las unidades de H son gammas. Si se utiliza el SI las unidades se dan en nanoTeslas (nT). Las coordenadas espaciales pueden ser dadas en cualquier unidad de la longitud, mientras que la unidad elegida sea consistente con el sistema utilizado. Los códigos del FORTRAN se pueden consultar en el Journal of Geophysics, volumen 52 No. 2 publicado por la Society of Exploration Geophysics (<http://www.segdl.org/geophysics/>).

3.3 Modelos Generales

A continuación se muestra la primera parte del desarrollo de esta tesis, que consiste en una imagen inicial de lo que se espera obtener con datos reales.

3.3.1 Fallas Con Diferente Angulo Y Dirección De Buzamiento

Teniendo en cuenta el fundamento teórico anterior, se desarrollaron modelos teóricos de las respuestas gravimétricas y magnéticas que se esperaría obtener para fallas a diferentes ángulos de buzamiento, esto con el fin de conocer la posible respuesta gravimétrica y magnética del tipo de estructura y cómo afecta el ángulo de buzamiento dichas respuestas.

Para esto se realizaron modelos de falla en GMSYS, con una capa superior de material no consolidado de densidad 1,8g/cm³, al lado izquierdo caliza con una densidad de 2,6 g/cm³, y al lado derecho arenisca con densidad de 2,4 g/cm³; con susceptibilidad magnética de 0.002 SI y 0,0015 SI, respectivamente y con buzamiento a la izquierda a diferentes ángulos, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50°, 55°, 60°, 65°, 70°, 75° y 80°. A continuación se muestran algunos de ellos.

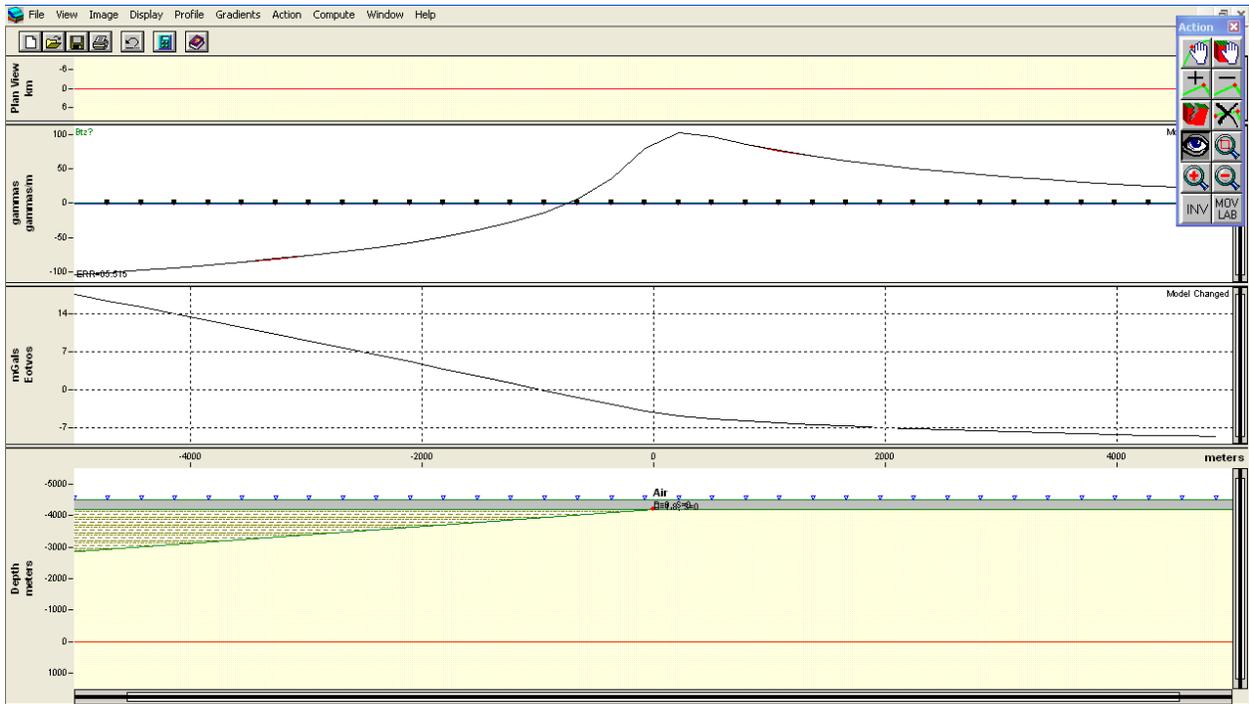


Figura 7. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 15° , con buzamiento hacia el Oeste.

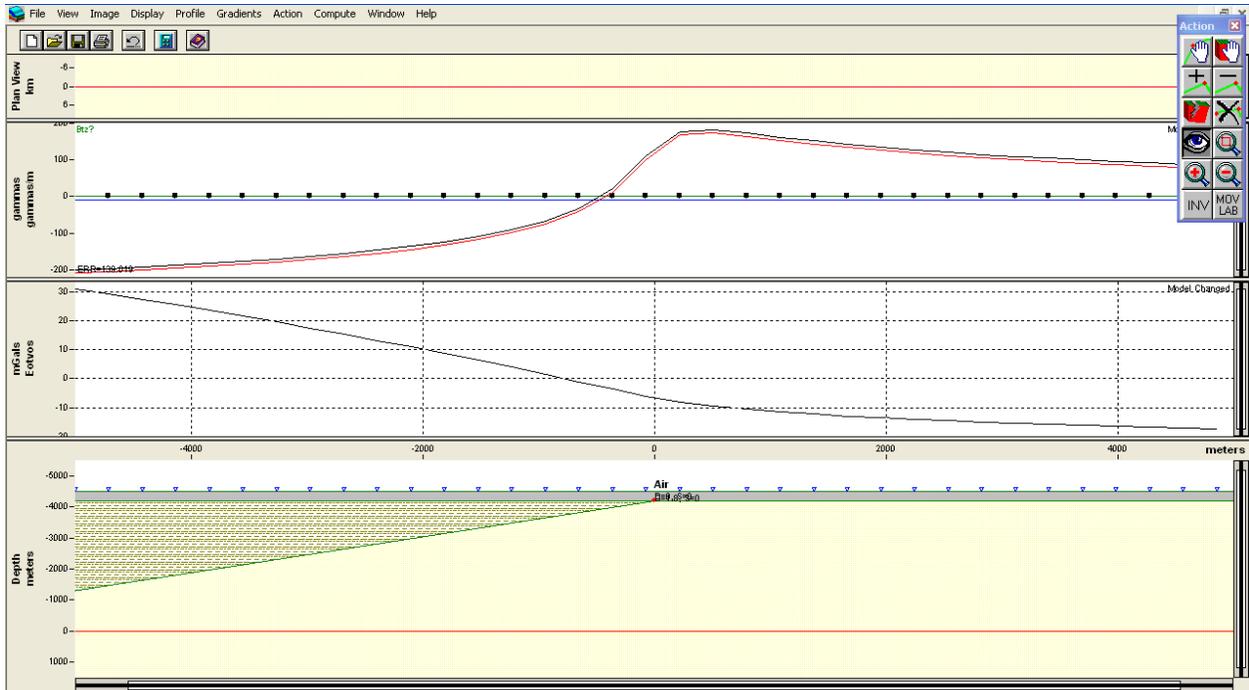


Figure 8. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 30°

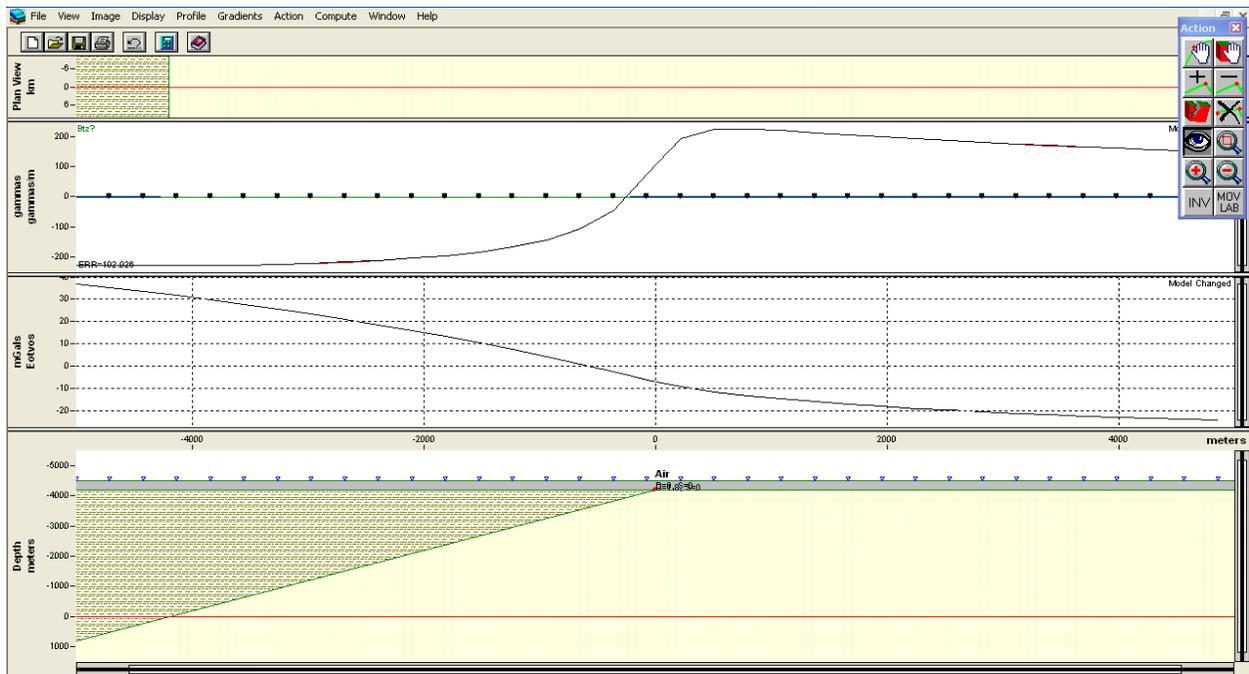


Figura 9. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 45°

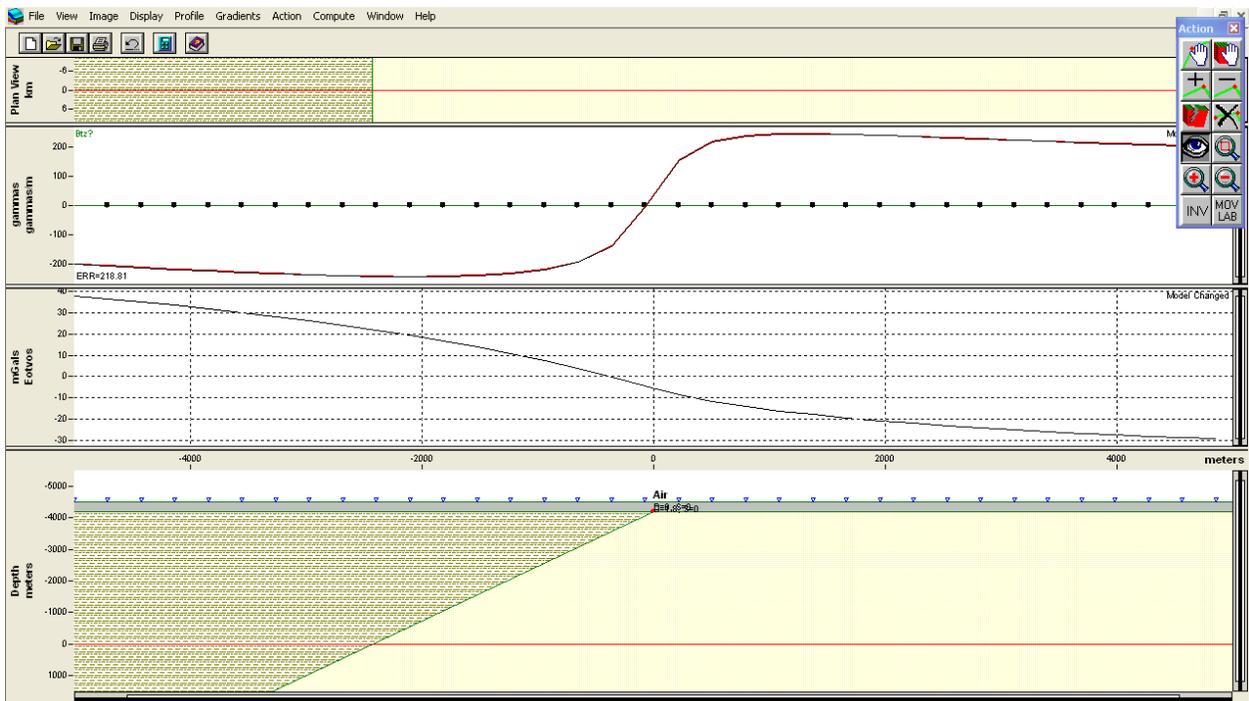


Figura 10. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 60°.

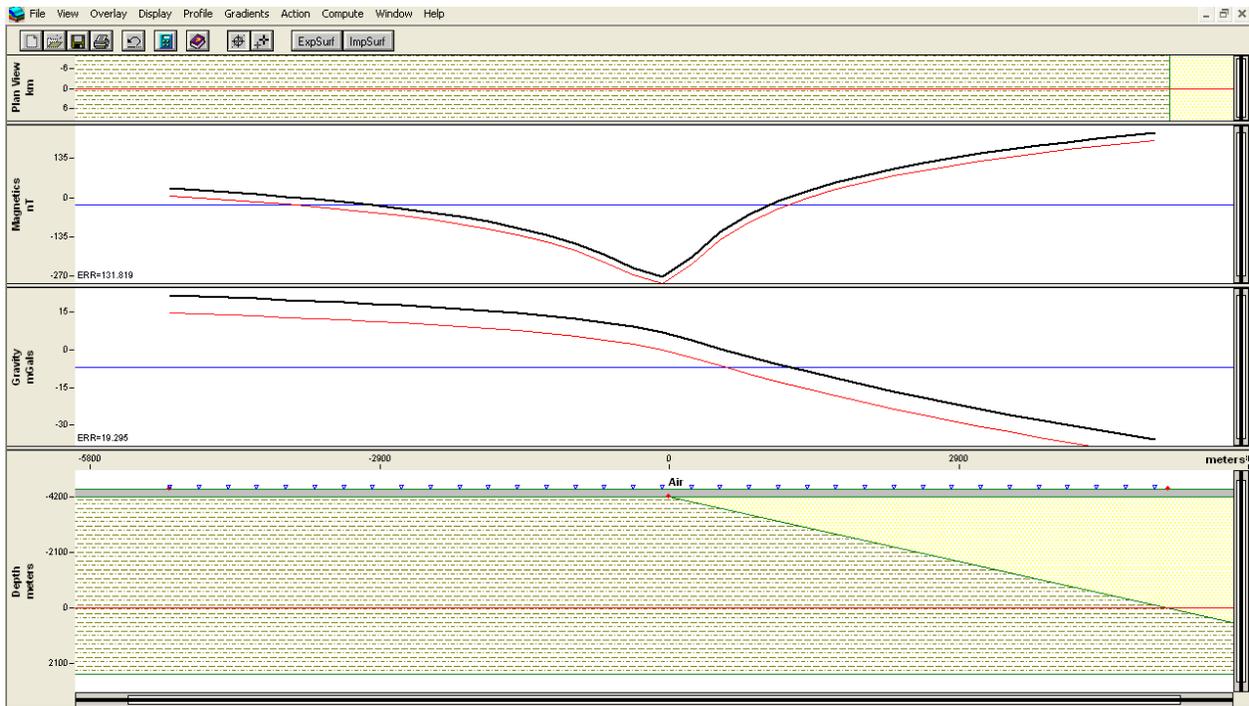


Figura 11. Modelo de falla en GMSYS, ángulo de 40° buzando hacia el Este.

En cada una de las figuras se observan tres cajas, la primera es una vista en planta del modelo a una cota de cero metros y las dos últimas curvas de anomalías, en las cuales la superior muestra la respuesta magnetométrica expresada en nT (nanoteslas) y la curva inferior la respuesta gravimétrica dada en miligales (mGals). La parte inferior de cada cuadro muestra el modelo geológico idealizado. Como se observa, todos los modelos tienen la Falla buzando hacia el Oeste lo que genera un comportamiento especial en la pendiente de las respuestas gravimétrica y magnética; en la dirección de buzamiento la pendiente de las curvas es alta, mientras que en la dirección contraria se suaviza a medida que se aleja de la zona de falla. Este comportamiento también es observable en la figura 11, que ilustra el mismo modelo de falla pero en este caso buzando en dirección contraria, es decir, hacia el Este. A continuación se muestra la familia de curvas resultantes para los casos de adquisición sobre la superficie del terreno, para cada uno de los ángulos de falla anteriormente ilustrados.

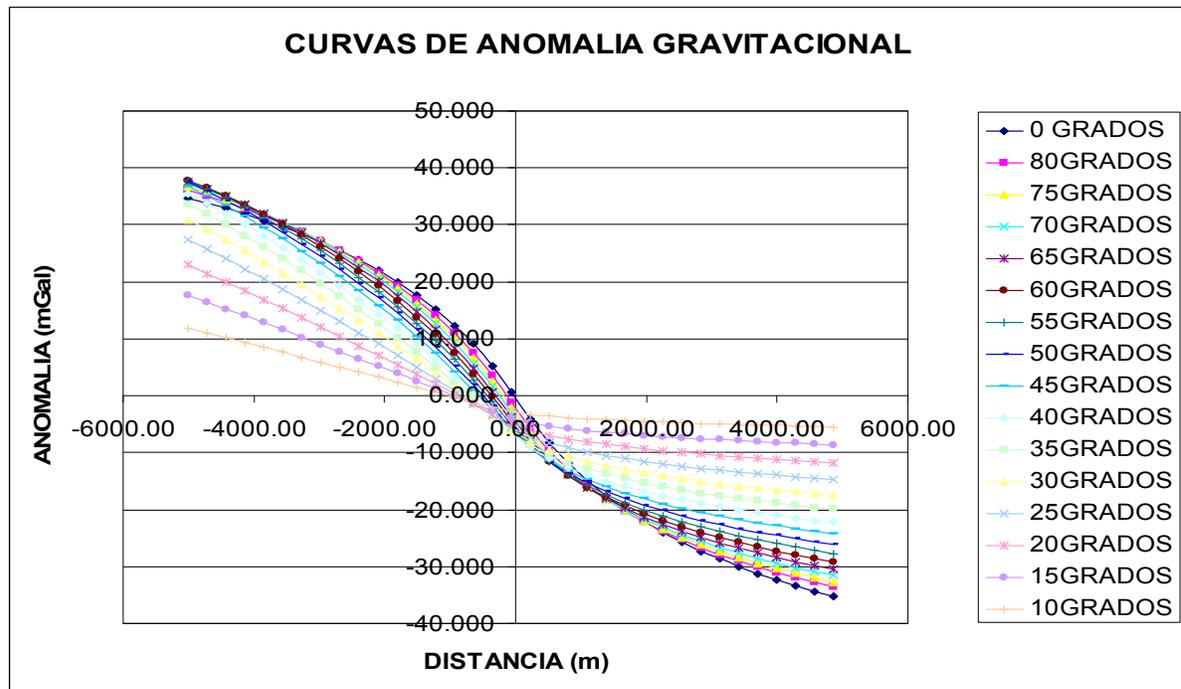


Figura 12. Familia de curvas de respuesta gravimétrica para el modelo de falla a diferentes ángulos.

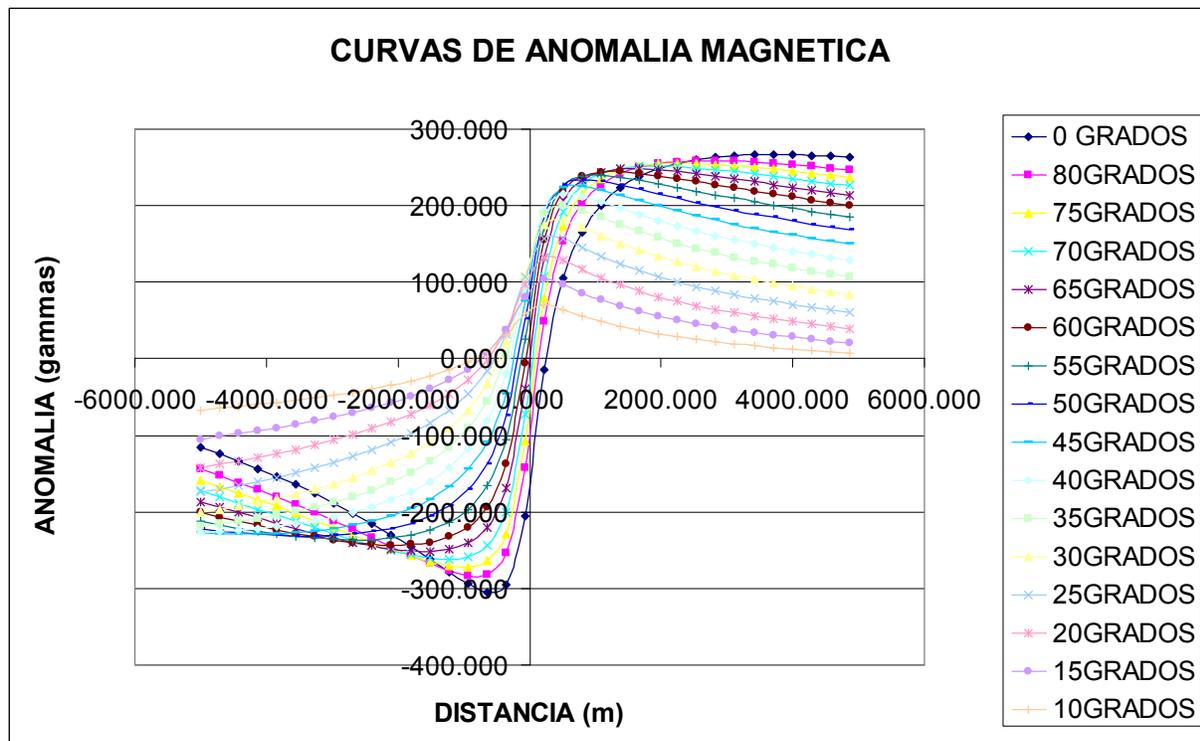


Figura 13. Familia de curvas de respuesta magnética para el modelo de falla a diferentes ángulos.

A partir de este tipo de modelos se puede tener una idea de cual será la respuesta gravimétrica y magnética que caracteriza la estructura de falla que se está estudiando y como varían las respuestas de acuerdo al ángulo y a la dirección de buzamiento. Así mismo se observa cómo con un espaciamiento entre estaciones de 300m, es suficiente para poder obtener anomalías debidas a la zona de falla.

3.4 Modelos Teóricos A Partir De Cortes Geológicos

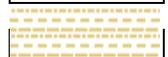
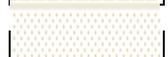
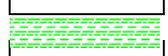
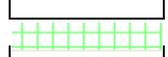
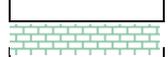
Para realizar los modelos teóricos se utilizaron algunos de los cortes geológicos que el Profesor Andreas Kammer había realizado, sobre líneas sísmicas que atraviesan la falla de Soapaga en dirección E-W; con el apoyo del Departamento de Geociencias en los diferentes reconocimientos geológicos y topográficos sobre el área de estudio.

Se escogieron cuatro perfiles que corresponden a líneas sísmicas de diferentes proyectos y tiempos de adquisición (SOA-2005-24, SOA-2005-22, SOA-2005-18, SOA-2005-14, PDR-88-16), en los cuales se modelaron cada una de las formaciones, manteniendo la geometría asignada.

La mayoría de los valores característicos de cada Formación se obtuvieron de los registros de los pozos Corrales y Bolivar-1 y la topografía se realizó a partir de las UKOAS de las líneas sísmicas.

En la siguiente tabla se muestran los valores de densidad y susceptibilidad magnética utilizados para cada una de las Unidades características del área. Las variables que se encuentran con asterisco son los valores asignados a partir de registro de pozo.

TABLA 2. VALORES DE SUSCEPTIBILIDAD Y DENSIDAD ADOPTADOS PARA EL MODELAMIENTO DIRECTO

| Color | Unidad | Descripción | ρ (Kg/m ³) | Sucep(Si) | Edad | Litología |
|---|--------|---|--------------------------------|-----------|--------------------------|--|
|  | *Pgc | Formación Concentración | 2400 | 0.00011 | Eoceno/oligoceno medio. | Arcillolitas comunmente yesíferas y areniscas con extractos de hierro oolítico |
|  | *Pgp | Formación Picacho | 2420 | 0.00015 | Eoceno temprano. | Areniscas y areniscas conglomeráticas, y arcillolitas. |
|  | *Pgas | Formación Arcillas de Socha | 2550 | 0.00013 | Paleoceno. | Arcillas. |
|  | *Pgars | Formación Areniscas de Socha | 2500 | 0.00015 | Paleoceno temprano. | Areniscas de grano grueso e intercalaciones de arcillas. |
|  | *KPgg | Formación Guaduas | 2500 | 0.00016 | Maestrichtiano/Paleoceno | Arcillas, con interclaciones pocas de carbon y areniscas. |
|  | *Ksgt | Grupo Guadalupe Formación Arenisca Tierna | 2480 | 0.00015 | Maestrichtiano | Cuarzo arenitas, igneo fósiles, cuarzo arenitas calcáreos. |
|  | *Ksgpi | Grupo Guadalupe Formación Labor y Pinos | 2530 | 0.00011 | Maestrichtiano | Arcillas. |
|  | *Ksc | Formación Chipaque | 2590 | 0.00012 | Turoniano/Santoniano | Arcillas. |
|  | Kiu | Formación Une | 2550 | 0.00016 | Cenomaniano | Areniscas, arcillas y calizas. |
|  | Kif | Formación Fόμεque | 2560 | 0.00012 | Hauteriviano | Esquistos piritosos, caliza cristalino y areniscas cuarcíticas. |
|  | Kit | Formación Tibasosa | 2570 | 0.00012 | Hauteriviano/Albiano | Conglomerado, limolitas y areniscas |
|  | Kiaj | Formación Areniscas de las Juntas | 2580 | 0.00012 | Hauteriviano | Miembros arenosos y lutíticos. |
|  | Jg | Formación Girón | 2600 | 0.00012 | F. Jurásico | Areniscas, limolitas rojas y conglomerados. |
|  | Jtrma | Intrusivo aguachica | 2700 | 0.015 | Triasico/Jurásico | Rocas graníticas, metaarenitas |
|  | Cc | Formación Cuche | 2590 | 0.002 | Carbonífero | Arcillolitas |
|  | Df | Formación Floresta | 2600 | 0.002 | Devónico medio | Areniscas conglomeraticas, arcillolitas y arenas. |
|  | Dt | Formación Tibet | 2610 | 0.0018 | F. Devonico Inicial | Areniscas conglomeráticas, Lodolitas |
|  | pEefb | Filitas y esquistos de Busbanzá | 2630 | 0.001 | Mesoproterozóico | Filitas cordieríticas y Esquistos Mozcovíticos cuarzosos |
|  | pEob | Neis de Buntia | 2640 | 0.0023 | P. Neoproterozoico | Cuarzo feldespático Hornbléndico |

Dentro de la zona de estudio, los perfiles modelados se nombran así: Sativa, que corresponde a las líneas sísmicas SOA_2005_24 y SOA_94_106, Socotá, que corresponde a las líneas sísmicas SOA_2005_22 Y PDR_88_16, Divaquia, que corresponde a la línea SOA_2005_18 y Buntia que corresponde a la línea SOA_2005_14. A continuación se muestran los perfiles de Andreas Kammer, utilizados para el modelamiento directo, los perfiles adquiridos en campo y la ubicación de la falla de Soapaga. Figura 15.

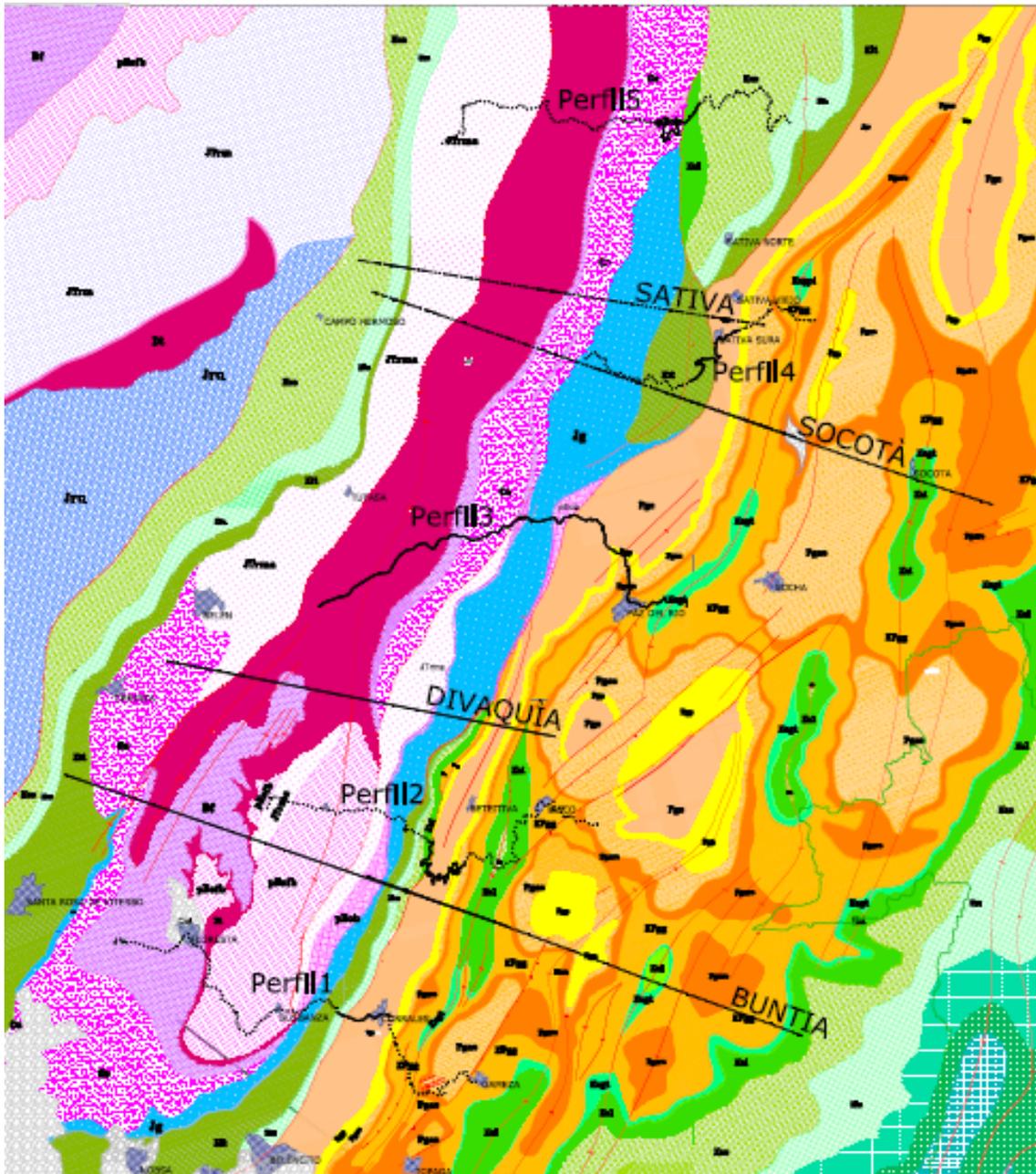


Figure 14. Mapa de perfiles utilizados en el modelamiento directo y en la adquisición en campo, sobre el mapa geológico de la zona. Tomado de www.rondacolombia2008/img/secciones/cuenca/cordillera/marco_1.jpg. Elaborado por Andreas Kammer.

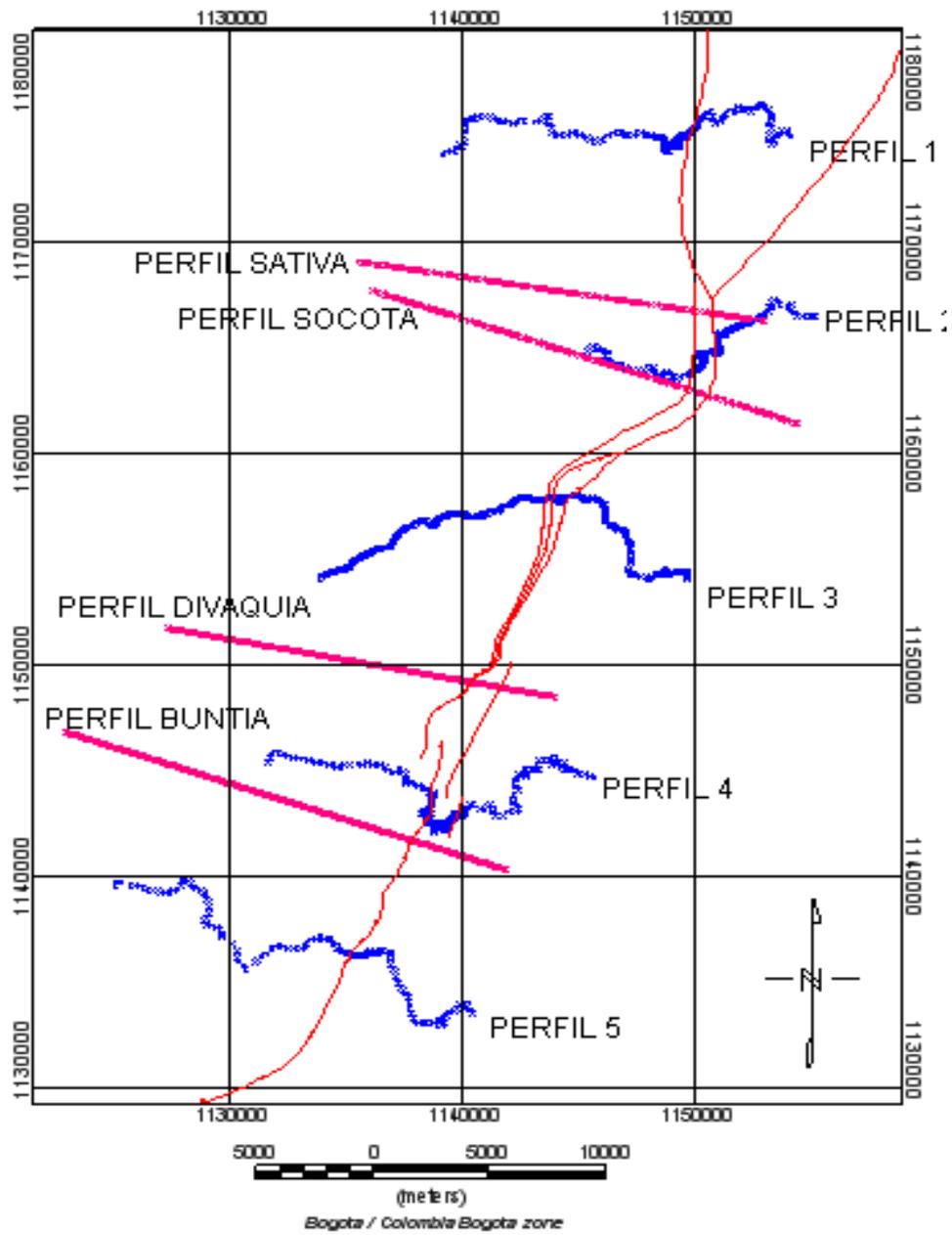


Figure 15. Mapa de perfiles utilizados en el modelamiento directo, en Magenta, y en la adquisición en campo, en azul; se muestra el lugar en el que cruzan la falla de Soapaga.

3.4.1 Líneas Sísmicas Sobre El Área De Estudio

A continuación se mostraran las imágenes de cada una de ellas y la interpretación realizada y expuesta en el CD de la Ronda Colombia 2008.

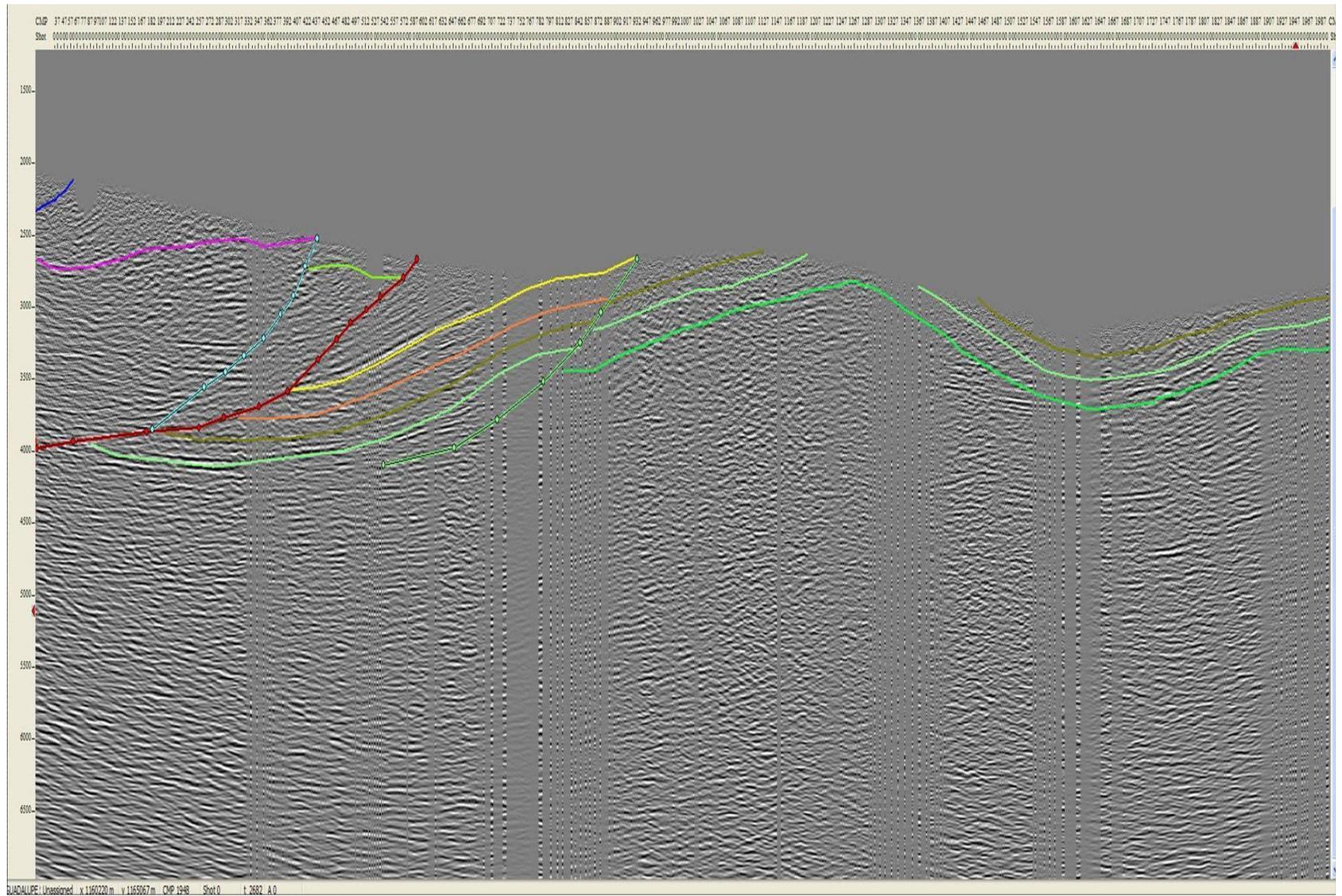


Figura 16. Interpretación línea Sísmica ANH-2005-24 en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo al lado izquierdo de la imagen.

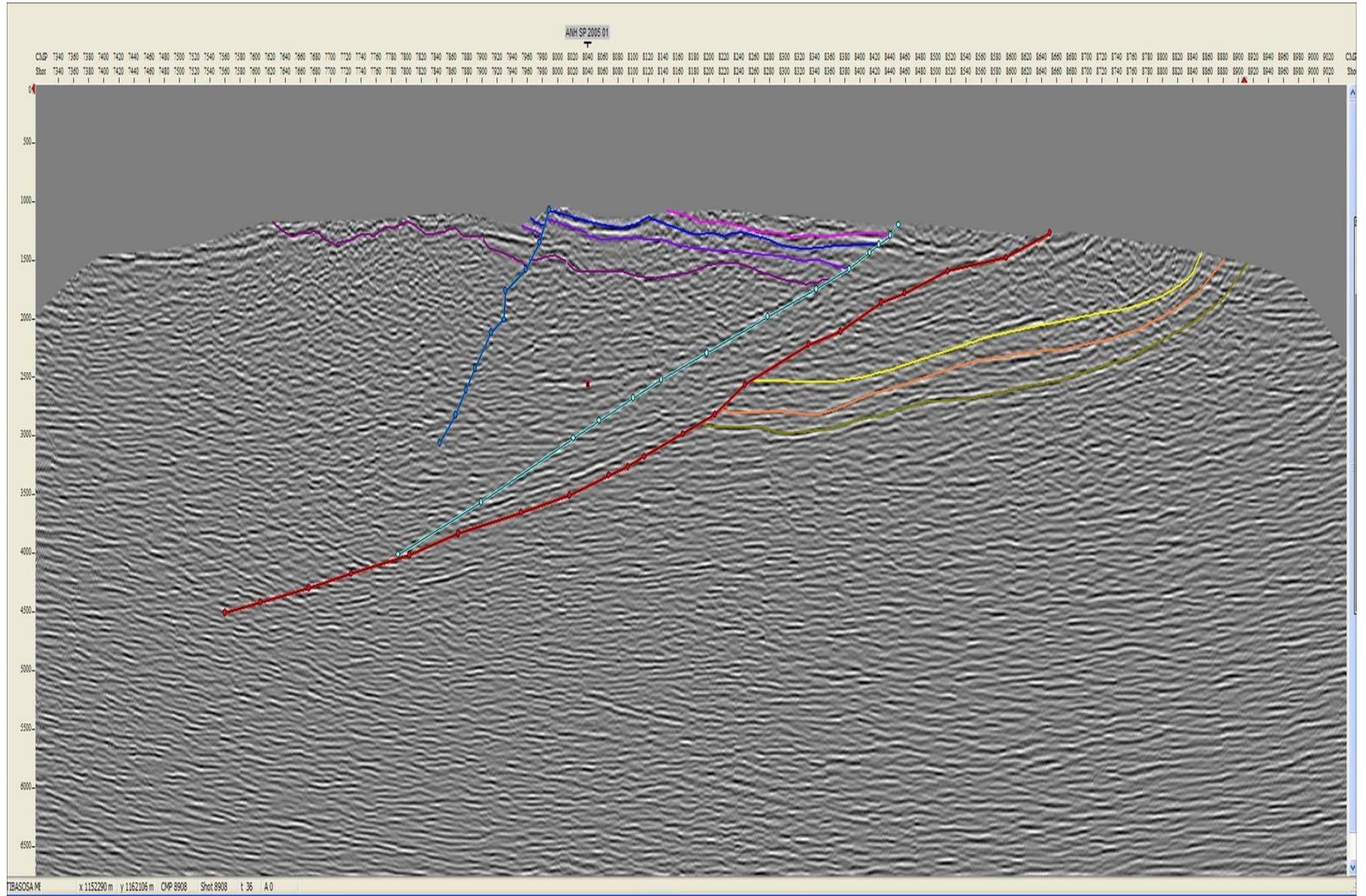


Figure 17. Interpretación línea Sísmica SOA-94-106, en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo.

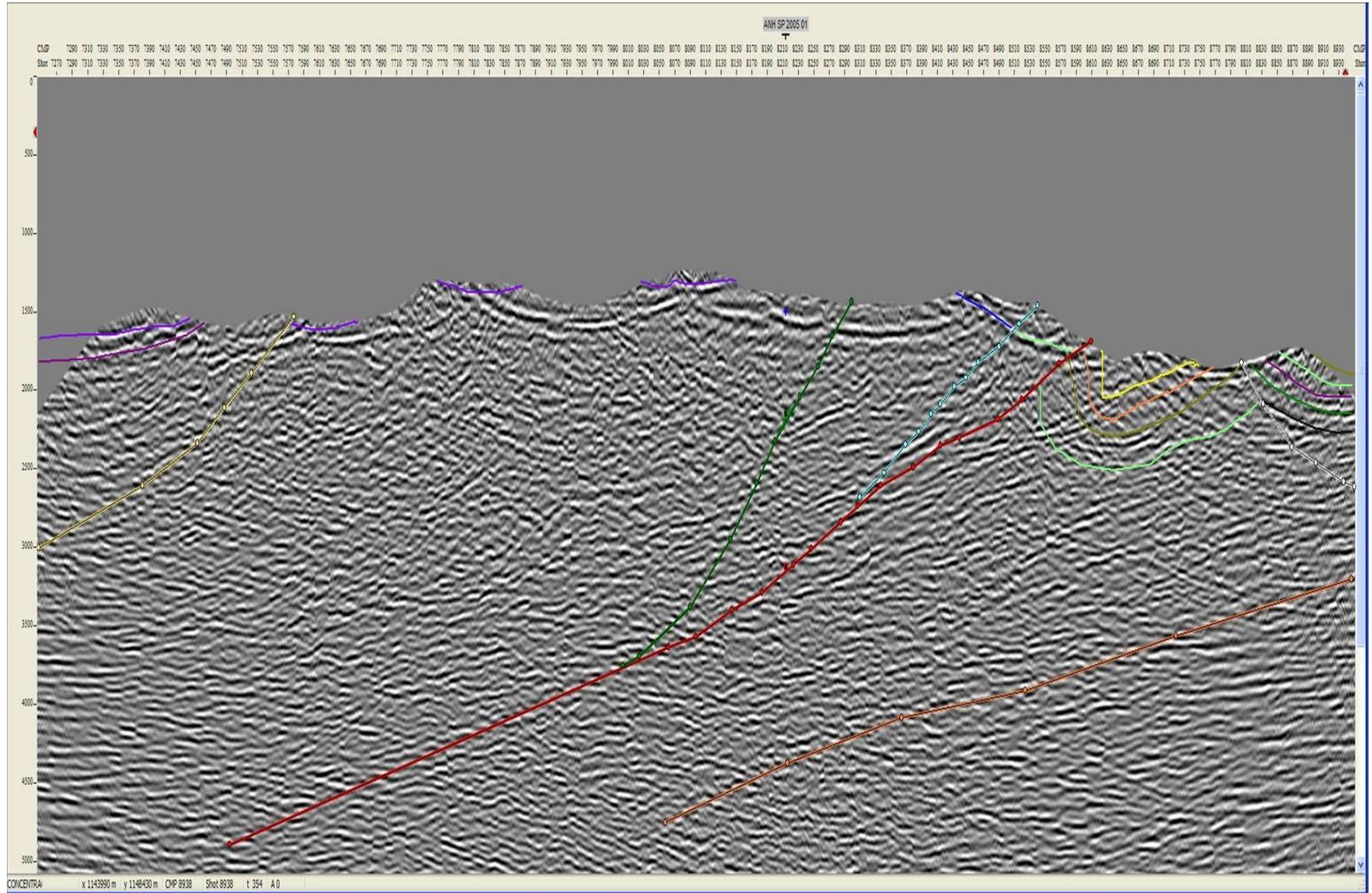


Figura 18. Interpretación línea Sísmica PDR-88-16, en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo.

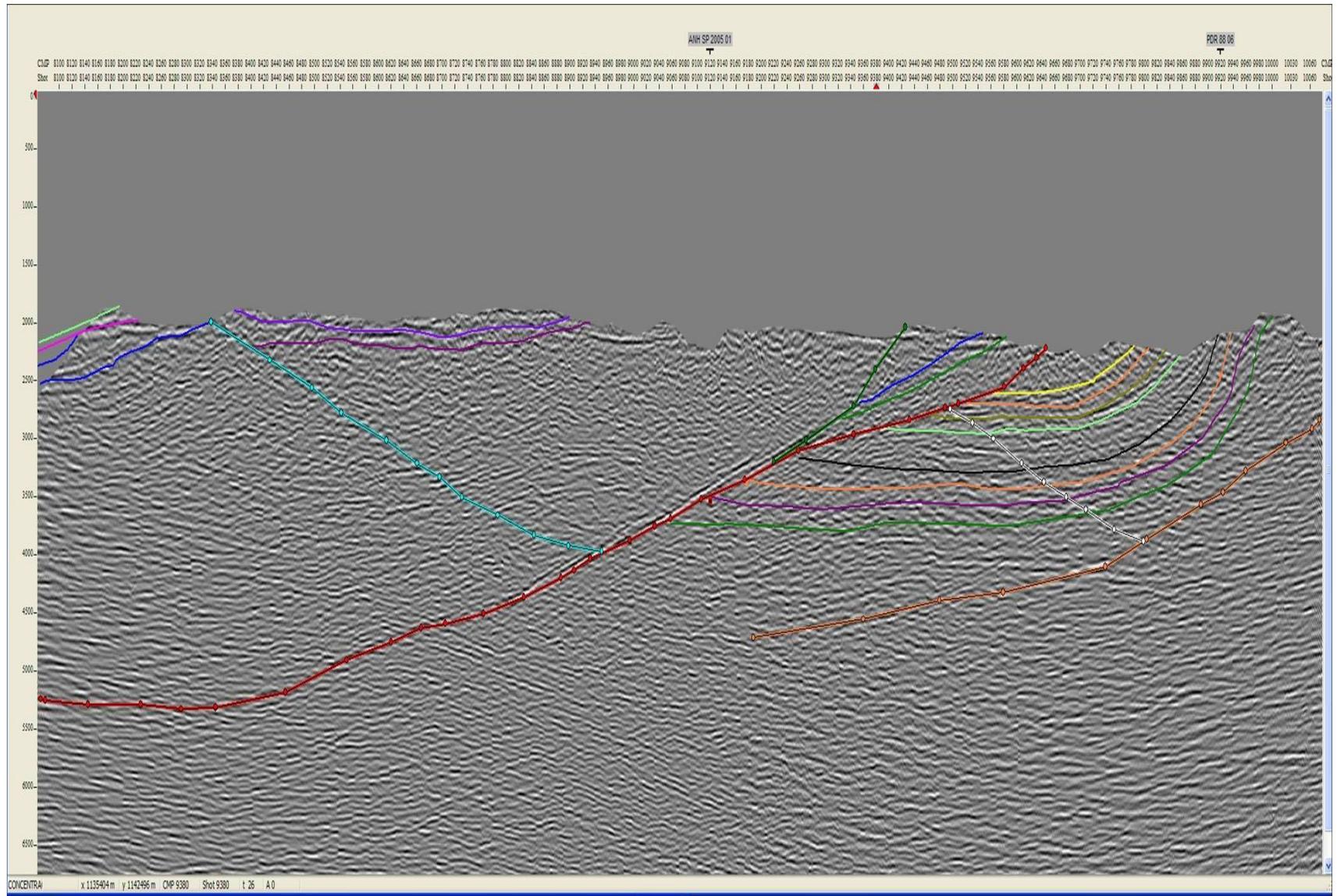


Figura 19. Interpretación línea Sísmica ANH-2005-14, en la que la Falla de Soapaga se traza en color rojo.

3.4.2 Perfiles Geológicos De Las Líneas Sísmicas

A continuación se presentan 5 secciones estructurales, cuya localización se indicó en la figura 15.

Estas secciones las construyó el profesor Andreas Kammer a lo largo de las líneas sísmicas mencionadas anteriormente, elegidas de acuerdo a su representatividad dentro del marco estructural general. Para su construcción se utilizaron las bases cartográficas del Atlas Geológico de INGEOMINAS 1:100000. Las coordenadas pertinentes a su ubicación, así como las líneas sísmicas de referencia están compiladas en la tabla 3.

TABLA 3. COORDENADAS PERFILES GEOLOGICOS

| Perfil | Líneas Sísmicas De Referencia | Punto Inicial | Punto Final |
|----------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| SATIVA | SOA_2005_24_SOA_94_106 | X = 1125901 Y = 1145785 | X = 1164136 Y = 1132404 |
| SOCOTA | SOA_2005_22 y PDR_88_16 | X = 1128256 Y = 1151423 | X = 1165003 Y = 1144423 |
| DIVAQUIA | SOA_2005_18 | X = 1133771 Y = 1168335 | X = 1164941 Y = 1157680 |
| BUNTIA | SOA_2005_14 y PDR_88_06 | X = 1135444 Y = 1168954 | X = 1164879 Y = 1164246 |

A continuación se describe brevemente el comportamiento estructural sobre cada una de las secciones geológicas.

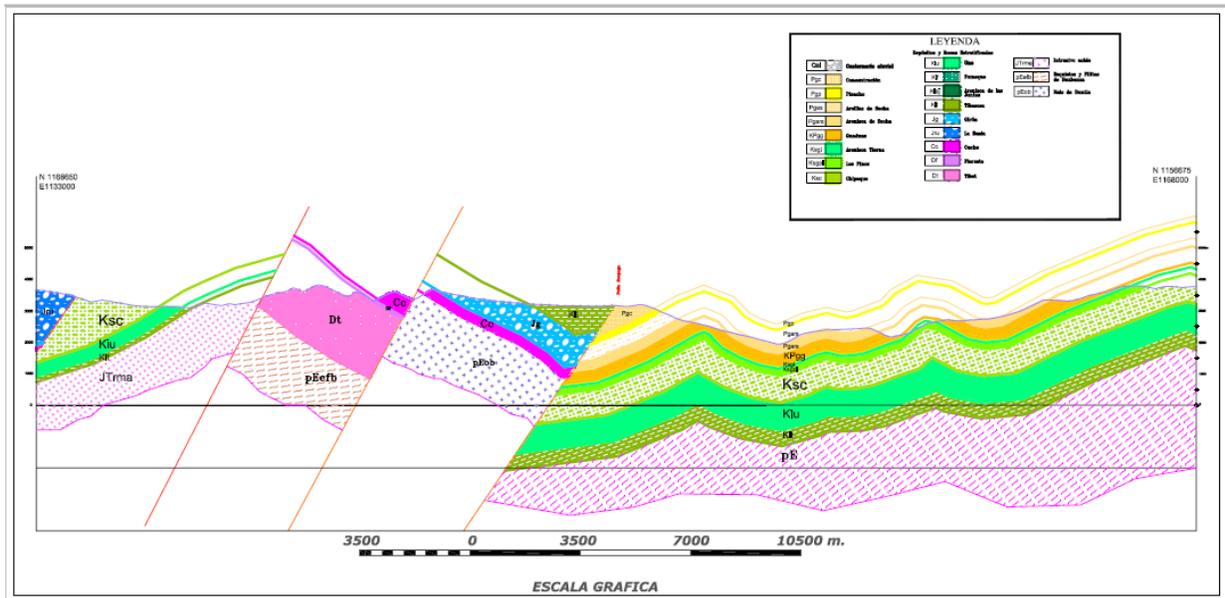


Figura 21. Perfil estructural Socotá, Elaborado por Andreas Kammer.

3.4.2.3 Sección Vertical Por Las Líneas ANH-05-18 Y SOA-94-102

Esta sección comprende las estructuras del área transicional del Macizo de Floresta que delimita el sector sur plegado del dominio norte fallado. En esta sección la Falla de Soiquía se reactivó, dando lugar a un mayor desplazamiento normal. El bloque yacente de la Falla de Soapaga está forzado en un plegamiento casi isoclinal. Las unidades cretácicas del flanco occidental de este plegue están afectadas por un fuerte adelgazamiento tectónico.

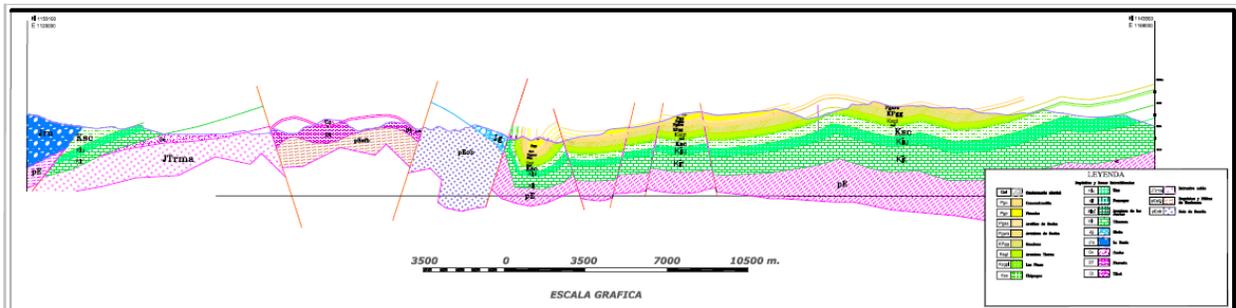


Figura 22. Perfil estructural Divaquia. Elaborado por Andreas Kammer.

3.4.2.4 Sección Vertical Por Las Líneas ANH-05-14 Y PDR-89-06

Esta sección une los municipios de Corrales y Santa Rosa y se caracteriza por los elementos estructurales ya identificados anteriormente. Aquí los pliegues ligados a la falla de Tutasá son más acentuados.

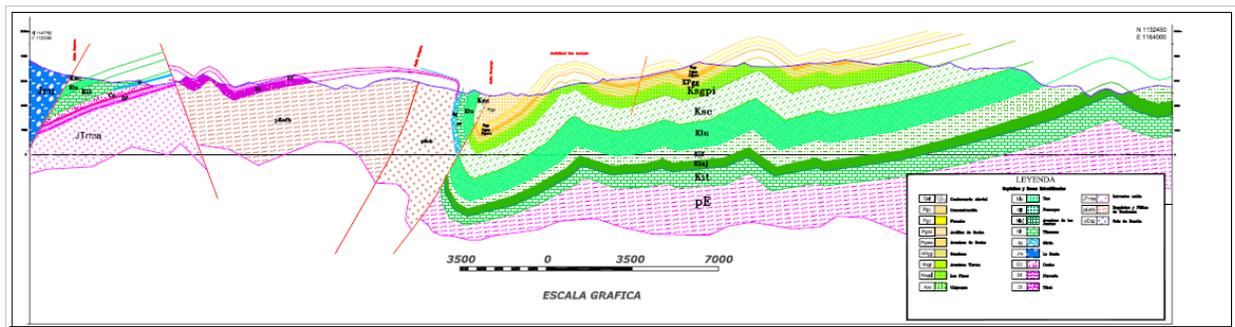


Figura 23. Perfil estructural Buntia. Elaborado por Andreas Kammer.

3.4.3 Modelamiento Directo De Las Secciones Geológicas

A continuación se presentan cada uno de los modelos directos realizados a partir de las secciones verticales con sus correspondientes respuestas gravimétrica y magnética, teniendo en cuenta los valores de referencia presentados en la tabla II.

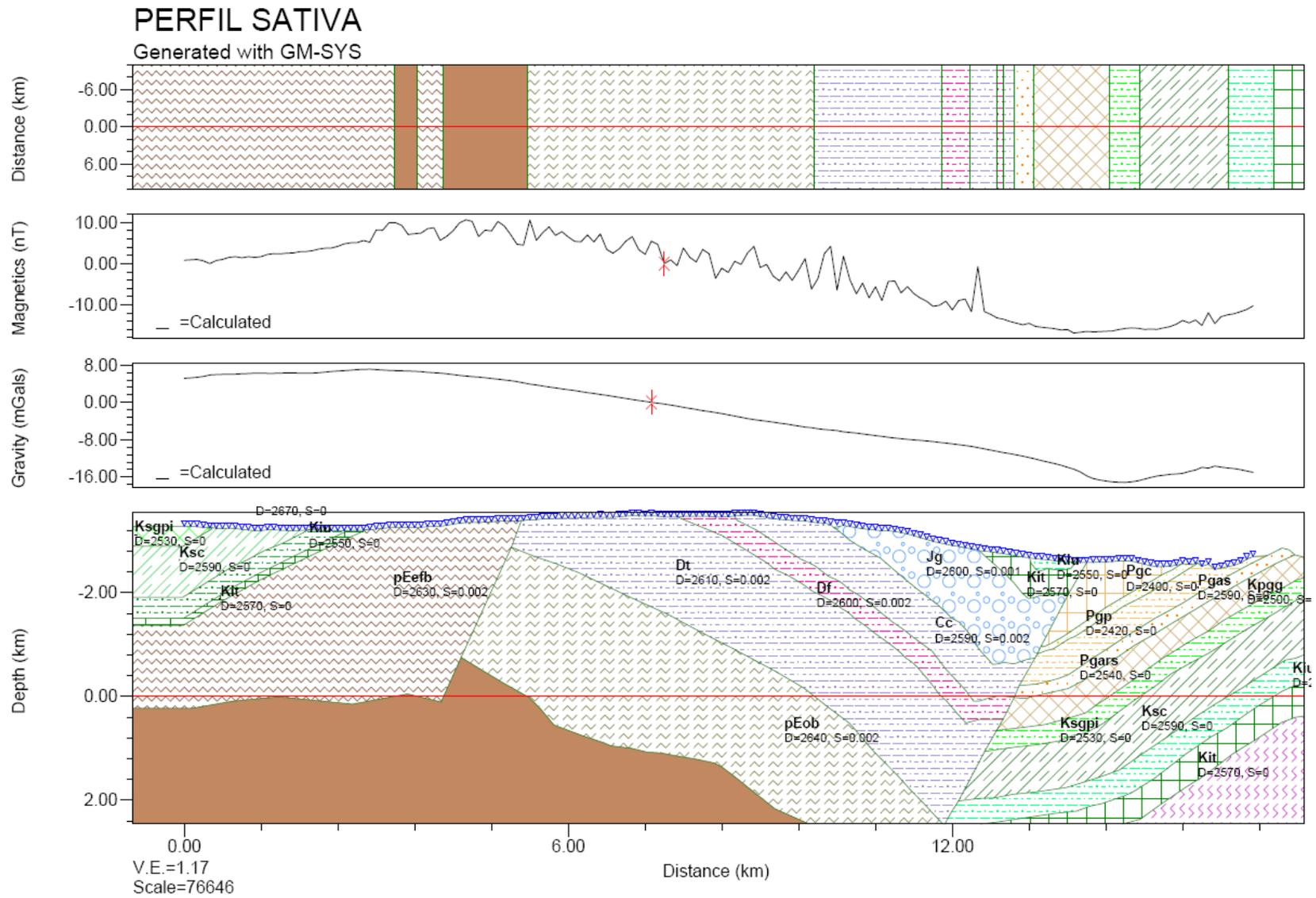


Figure 24. Modelo Directo Del perfil Sativa (Elaborado por Andreas Kammer.), en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, ubicada al lado derecho de la imagen.

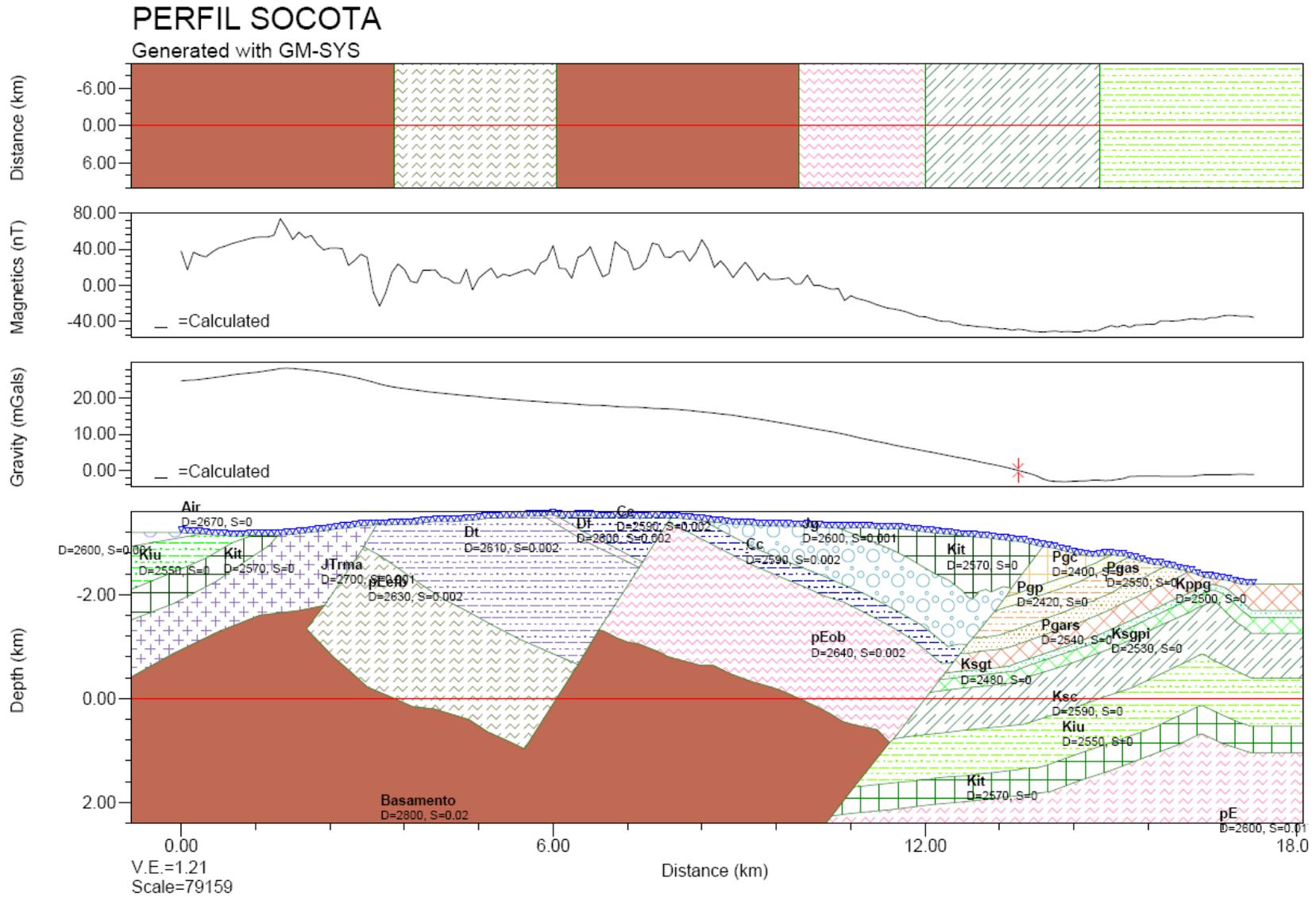


Figura 25. Modelo Directo Del perfil Socota (Elaborado por Andreas Kammer), en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, ubicada al lado derecho de la imagen.

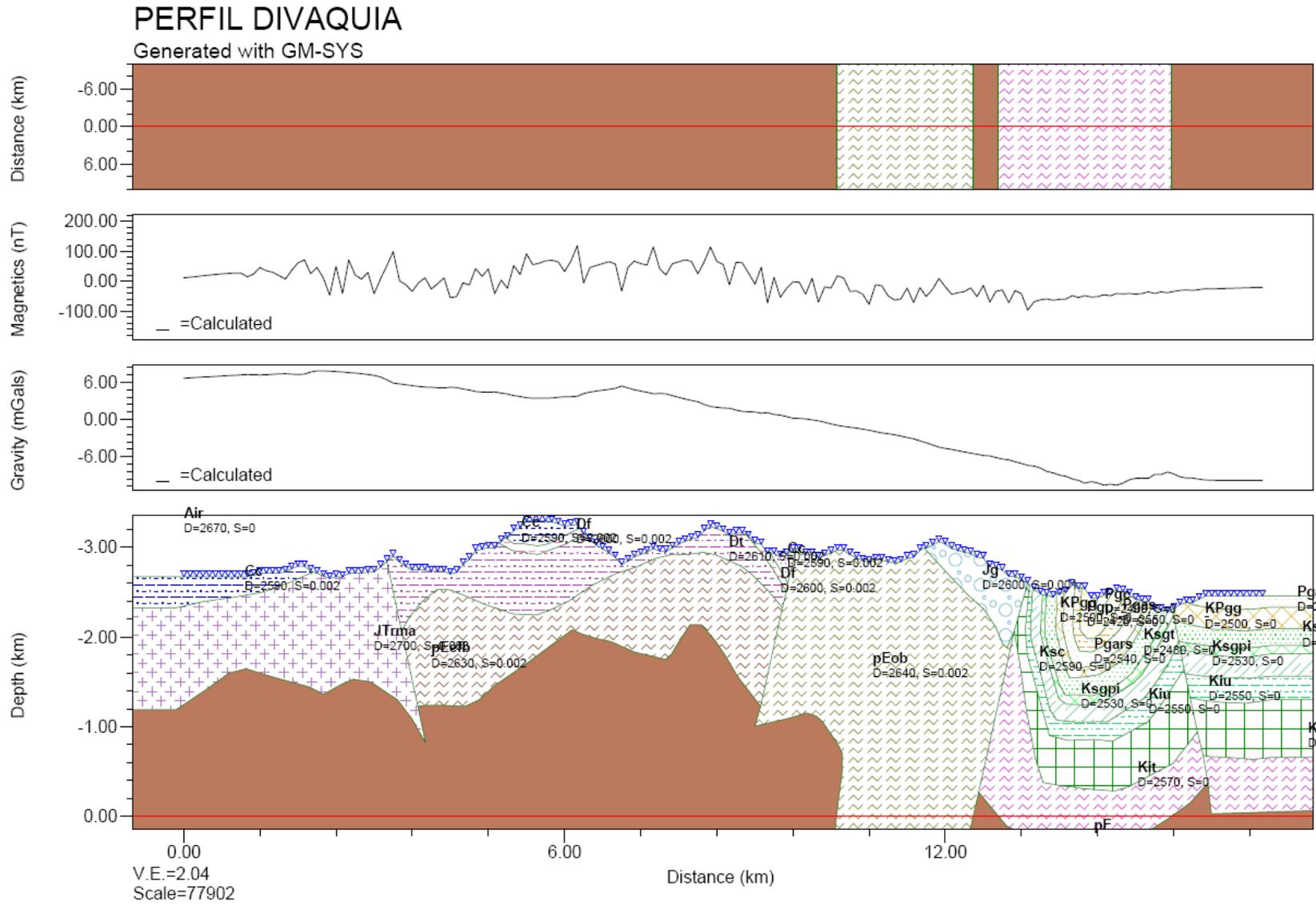


Figura 26. Modelo Directo Del perfil Divaquia (elaborado por A.ndreas Kammer), en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, segunda de derecha a izquierda.

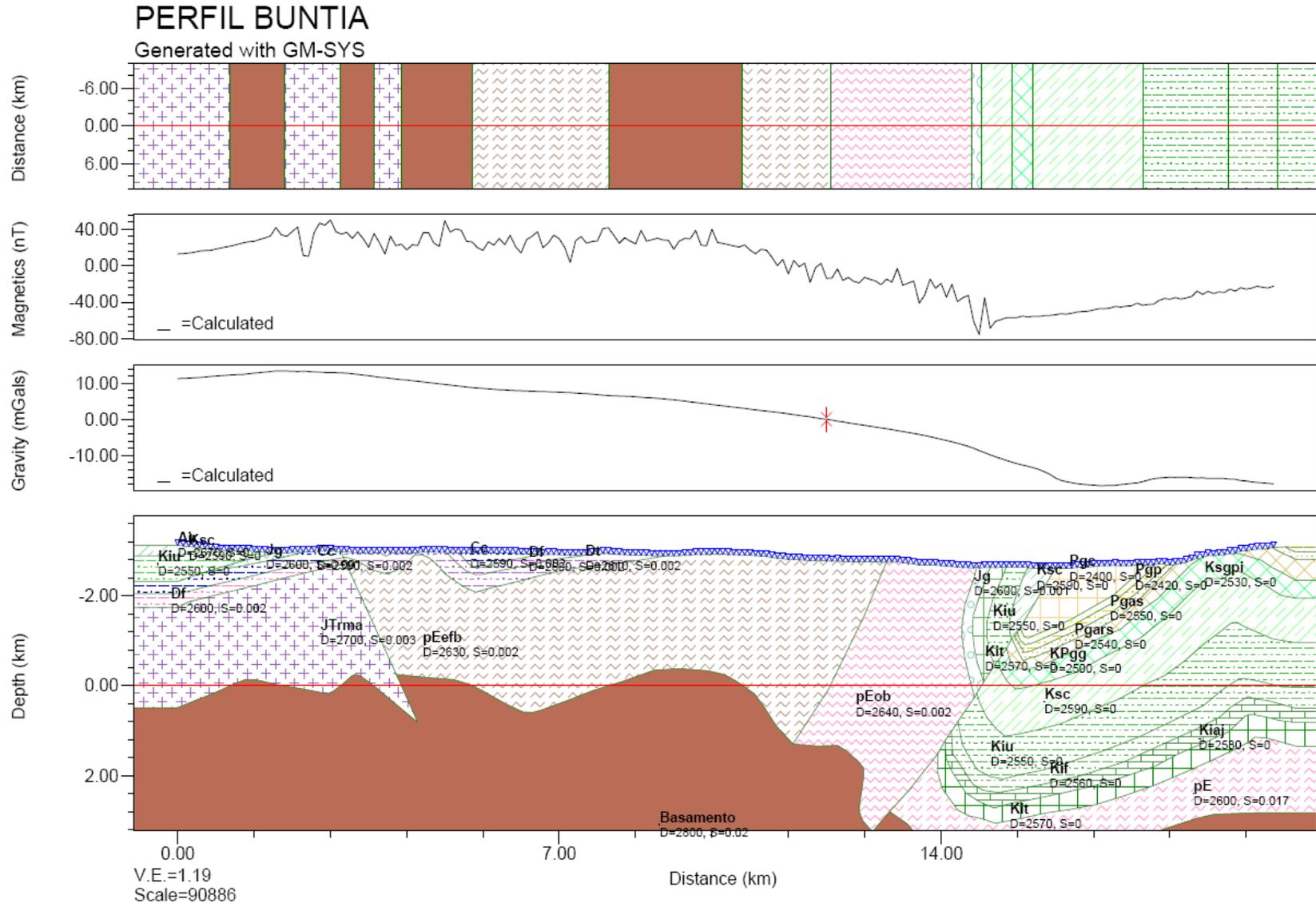


Figura 27. Modelo Directo Del perfil Buntia (elaborado por Andreas Kammer), en el cual se observa la respuesta gravimétrica y magnética de la Falla de Soapaga, ubicada al lado derecho de la imagen.

En cada uno de los modelos es fácil apreciar como cambia la pendiente de las curvas al acercarse a la zona de falla, por tanto, se evidencia que por medio de un levantamiento gravimétrico o magnético en la zona, con estaciones separadas entre 150 y 300m, (separación promedio entre estaciones para el modelamiento directo), es posible apreciar las anomalías generadas por estas estructuras. A partir de estas curvas de anomalía gravimétrica y magnética se generaron unas grillas de interpolación en Oasis Montaj en las que se puede apreciar mejor el contraste de anomalías en la dirección S-N de la zona de estudio. A continuación se muestran cada uno de los mapas generados a partir del modelamiento directo.

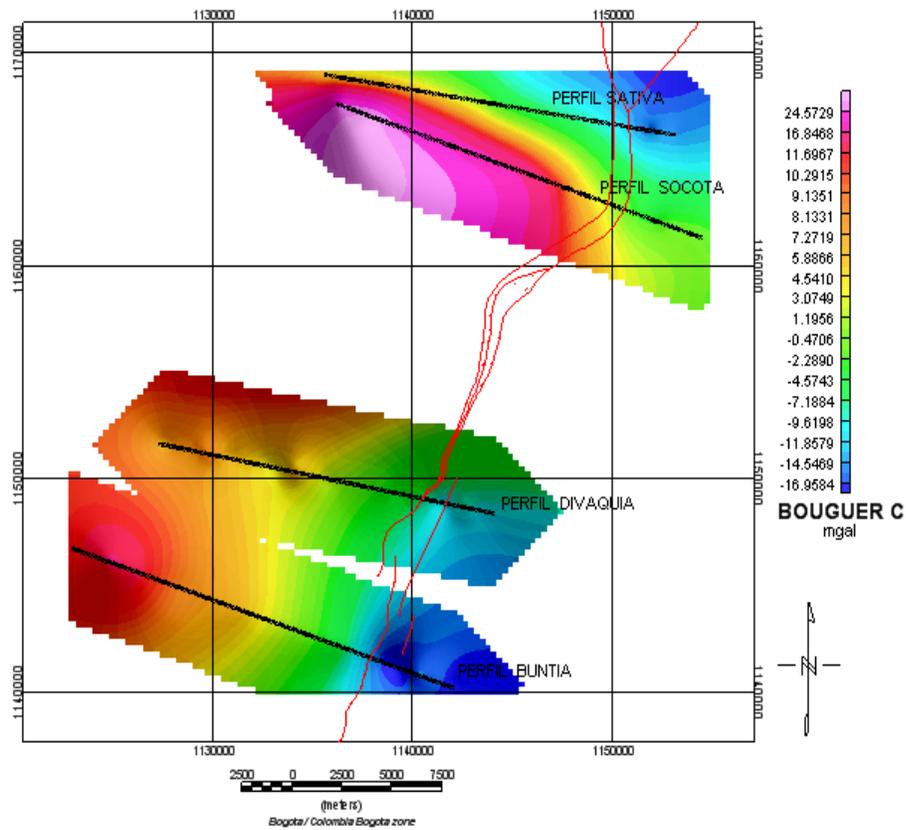


Figura 28. Perfiles de anomalía de Bouguer completa a partir del Modelamiento directo. Se observa el contraste de anomalías sobre el corredor de influencia de la falla.

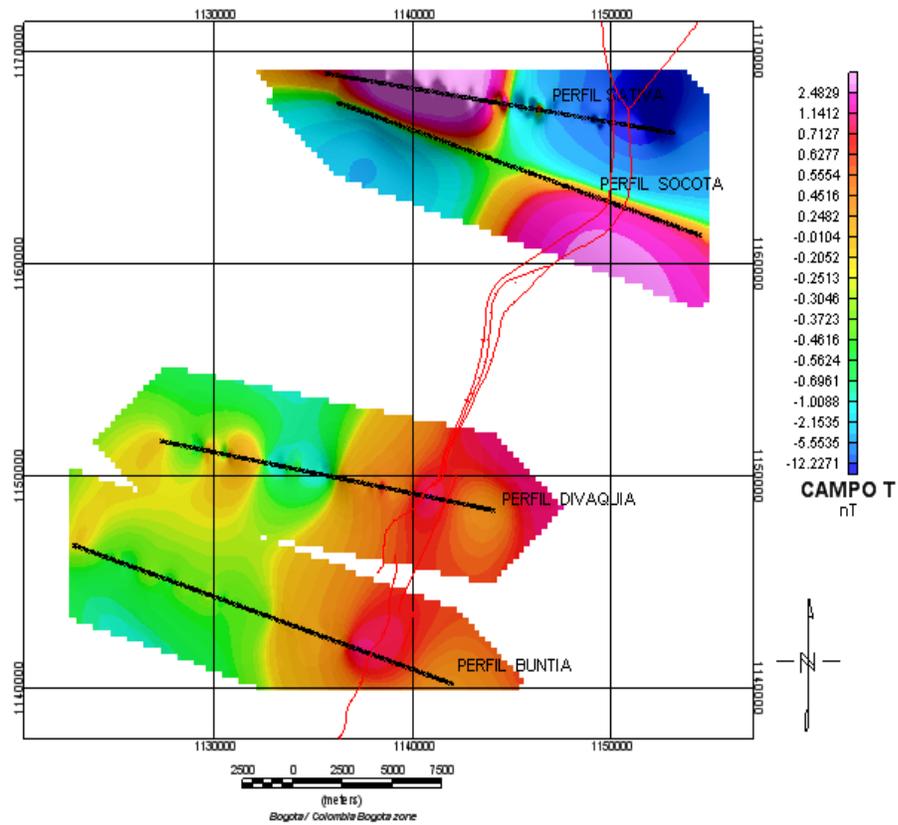


Figura 29. Mapa magnético de Campo total a partir del Modelamiento directo. Al igual que en el mapa gravimétrico, se observa el contraste sobre el corredor de influencia de la falla.

Luego de realizar este modelamiento directo, y observar cada una de las respuestas se establecieron los parámetros de adquisición para la etapa de trabajo en campo.

Se plantearon 5 perfiles de levantamiento magnético que fueran correlacionables con el modelamiento directo ya realizado, preferiblemente en la misma posición de los cortes geológicos. Con una longitud total de 15 kilómetros lineales, con el fin de poder tener mayor resolución hacia el Oeste, dirección de buzamiento de la Falla de Soapaga. La distancia entre estaciones sería de

200m, y a un kilómetro de la falla hacia el Este y hacia el Oeste, se tomarían mediciones cada 50m para mejorar la resolución.

El diseño de adquisición final se describe en el capítulo 4.

Los resultados de las correlaciones entre el modelo geológico, y los datos obtenidos en campo se muestran todos en el siguiente capítulo, donde se describe con gran detalle cada uno de los pasos que fueron necesarios para llevar a cabo la metodología propuesta, las correlaciones espectrales, los índices de favorabilidad y la determinación de una pseudo gravedad, con datos de campo magnético reducido al polo, aplicando el Software Magpick ®,

4. MODELAMIENTO INVERSO-ADQUISICIÓN GEOFISICA

Como se puede observar en el capítulo III los resultados obtenidos por medio del modelamiento directo, contribuyen al planteamiento de nuevos enfoques acerca de los parámetros geofísicos de adquisición en campo que luego fueron procesados en conjunto, para poder obtener un modelo geológico de la zona y llegar a muchas conclusiones favorables y desfavorables en la utilización de esta metodología en el estudio de estructuras de Falla.

En este capítulo se mostrará todo el proceso de adquisición en campo teniendo en cuenta la logística, el procesamiento de todos los datos y los diferentes parámetros establecidos como consecuencia de los resultados obtenidos en el capítulo anterior y su correlación con los obtenidos por medio del levantamiento geofísico en la zona de estudio.

4.1 Introducción

Durante el convenio entre la Universidad Nacional y la Agencia Nacional de Hidrocarburos para la evaluación integral del bloque Soapaga, Cordillera Oriental, se presentaron varias inquietudes con respecto a la geometría exacta de la falla, ya que ésta diverge desde el punto de vista de las líneas sísmicas y la geología de superficie analizada en la zona. Motivados por estas inquietudes, se planteó presentar un proyecto de tesis que buscara por medio de metodologías un poco más numéricas y procedimentales, esclarecer esta situación, y favorecer la exploración de hidrocarburos o minerales en el área como resultado de la estructura de falla.

El trabajo de grado consta entonces de un modelamiento directo de la zona de estudio a partir de datos topográficos extraídos de las líneas sísmicas presentes en el área de estudio y densidades determinadas de los registros adquiridos en los pozos Corrales y Bolivar-1, las susceptibilidades magnéticas fueron estimadas por medio de tablas y materiales presentes en la zona de estudio. Y una adquisición en campo que permitirá aclarar algunos de los resultados obtenidos en el capítulo III por medio del modelamiento directo y poder finalmente realizar la correlación espectral de los perfiles obtenidos a partir de las secciones geológicas del área.

4.2 Caracterización Geológica

A continuación se describen algunas características geológicas muy generales del área, debido a que todas ellas se encuentran con detalle en el capítulo II.

4.2.1 Geomorfología

El departamento de Boyacá, Colombia, en donde se encuentra el área de estudio, en general, presenta una morfología de relieve alto por encontrarse sobre la Cordillera Oriental. Estas regiones se caracterizan por presentar tierras planas, onduladas y escarpadas con profundos cañones, como se observa en la figura 30. En las tierras planas, con alturas entre 2500 y 2650 m.s.n.m. se encuentran localizadas las principales poblaciones como son Duitama, Belén, Santarosa de Viterbo y Floresta. Otras poblaciones como Paz del Río, Tasco, Socha y Otengá se ubican en las zonas onduladas y valles de ríos.



Figura 30. Foto del Cañón del Chicamocha, tomada durante la etapa de scouting.

4.2.2 Condiciones Climáticas

En la zona de estudio las temperaturas oscilan entre 5°C y 20°C, y corresponden a los pisos térmicos frío y de páramo alto según IGAC (1985). La vegetación en las regiones planas de los valles de la Floresta, Sogamoso y Belén se caracteriza por la presencia de eucaliptos, guaragüerones, cultivos de maíz, papa, trigo, legumbres y árboles frutales, como peras, manzanas y grandes extensiones con pastos para ganadería. Las regiones de páramo con altas precipitaciones se caracterizan por la presencia de frailejones y chugua, mientras que los páramos

con poca precipitación, cómo el del Alto del Tibet y El Doga, por vegetación xerofítica de regiones semiáridas. La precipitación pluviométrica en los valles es de unos 800mm anuales y en los páramos, de 3000 mm anuales (IGAC, 1985). Razón por la cuál fue conveniente aplazar la fecha de adquisición para mitad de año, siendo esta época la de menor precipitación como muestran la figura 31, de precipitaciones registradas para en el año 2007.

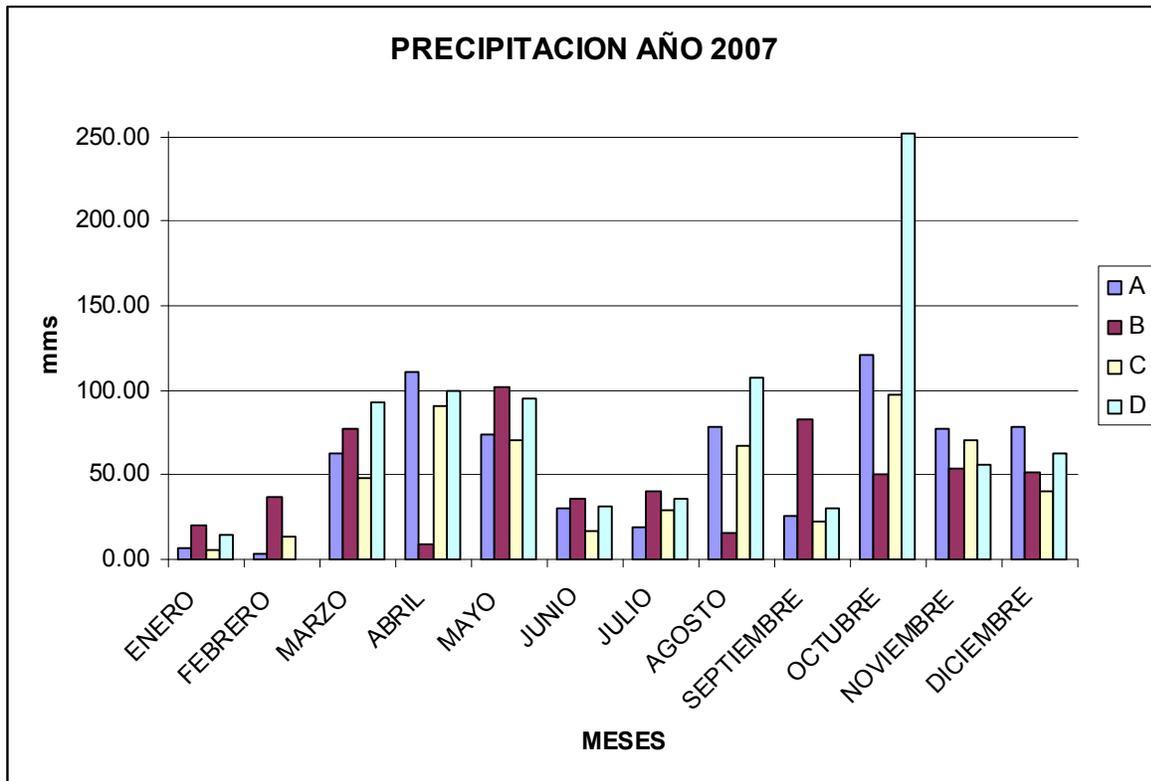


Figure 31. Precipitaciones registradas durante el 2007 en la zona de estudio en cuatro diferentes estaciones A, B, C, D.

Las categorías A, B, C y D pertenecen a cuatro estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), estación 2403502 BETEITIVA, estación 2403016 TASCO, 2403017 TASCO2, estación 2403532 SATIVANORTE, respectivamente.

4.2.3 Geología

El marco geológico que describe el área, esta compilado en el capítulo II.

4.3 Caracterización Geofísica

En esta sección se describe toda la parte de la adquisición y procesamiento realizado en esta tesis, además de los resultados obtenidos en cada una de las secciones.

4.3.1 Diseño De Adquisición

Al inicio de la tesis la adquisición debería tener por lo menos cinco perfiles, perpendiculares a la falla, con levantamiento gravimétrico y magnético, trazados sobre los perfiles geológicos que fueron utilizados para el modelamiento directo; pero las condiciones cambiaron debido a la escasez de gravímetros durante todo el año por la fuerte demanda de este tipo de levantamientos geofísicos, así, finalmente la adquisición consta de sólo magnetometría gracias a los Magnetómetros de muy buena resolución, facilitados por la empresa TEP Ltda. (Anexo 1).

Teniendo en cuenta el mapa geológico, tomado de www.rondacolombia2008/img/secciones/cuenca/cordillera/marco_1.jpg, se trazaron 7 perfiles tentativos para la adquisición. Cada uno de ellos con una extensión lineal de 15 Km, de los cuales las dos terceras partes están hacia el Oeste, buzamiento de la Falla, como muestra la figura 32.

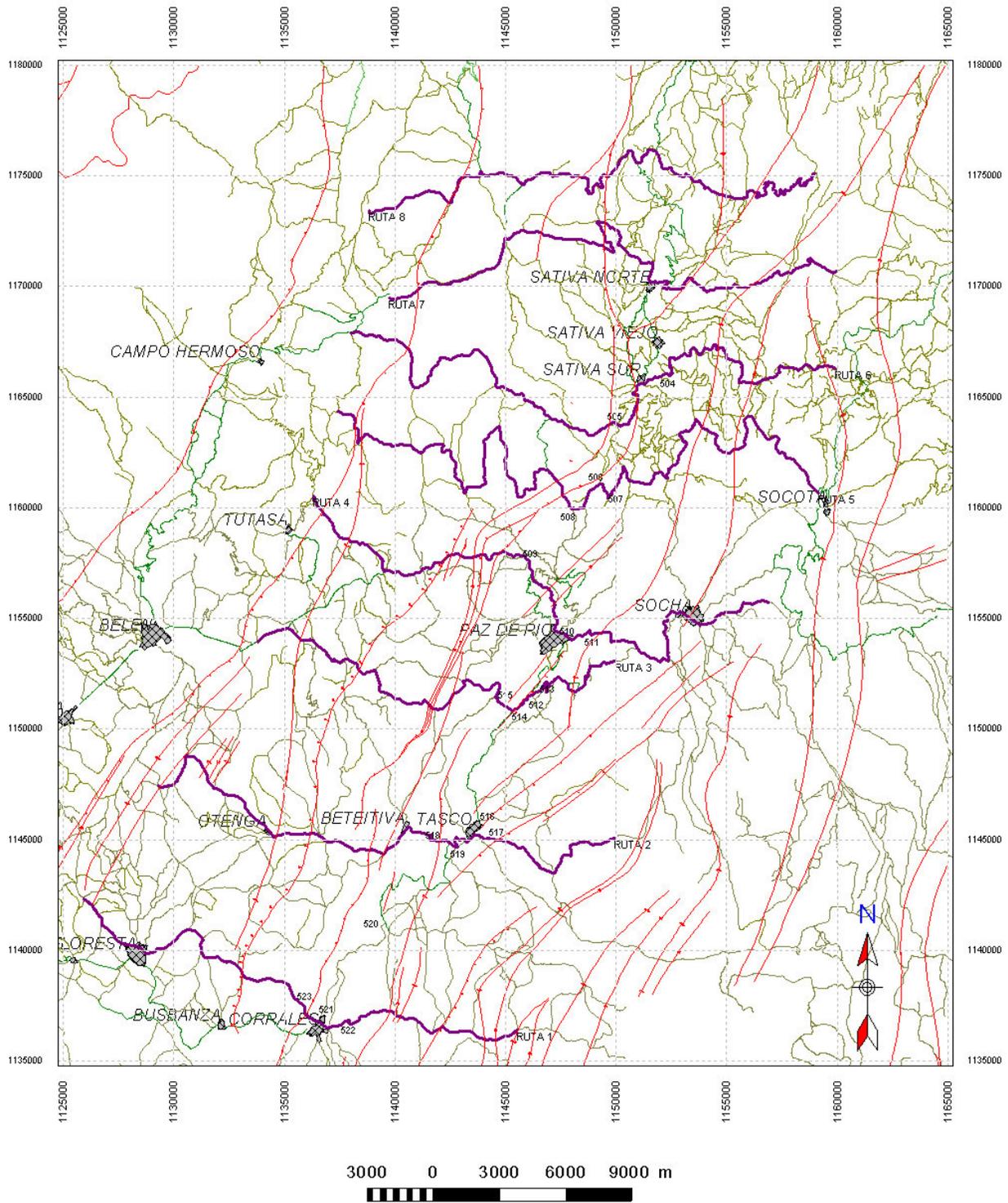


Figura 32. Mapa de rutas plateadas para la adquisición geofísica en campo.

4.3.1.1 Reconocimiento de la zona

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona y la topografía abrupta, fue necesario hacer un reconocimiento inicial del área. Éste se realizó a mediados del mes de marzo del 2008 y fue esencial para poder determinar las rutas que se utilizarían en el levantamiento, debido a que de las siete que se plantearon inicialmente solo eran factibles 5 por problemas topográficos, así mismo se decidió realizar la adquisición por los carreteables, debido a que el levantamiento en línea recta se convertiría en una labor demasiado larga y peligrosa, por la presencia de grandes cañones y altos topográficos. En esta salida, también fue posible estimar la mejor época del año para la adquisición, según los registros de precipitación y las fuertes lluvias y tormentas que se presentan en las épocas de invierno.

En las figura 33, 34 y 35 se puede observar, cómo durante el scouting (época de invierno), el Río Chicamocha, luego de una gran tormenta; en su creciente, atraviesa por encima del puente y las laderas del Río, arrastrando rocas y escombros, que bloquearon el paso de vehículos, por dos días, del Municipio de Paz del Río al Municipio de Tasco.



Figura 33. Puente sobre el Río Chicamocha en el Municipio de Paz del Río.



Figura 34. Rocas y escombros llevados por el Río hacia las casas periféricas del Río.



Figura 35. Río Chicamocha en su cauce normal, 10 horas después del incidente.

Teniendo en cuenta la topografía de la zona y las condiciones climáticas se realizaron las siguientes rutas de toma de datos. Figura 36.

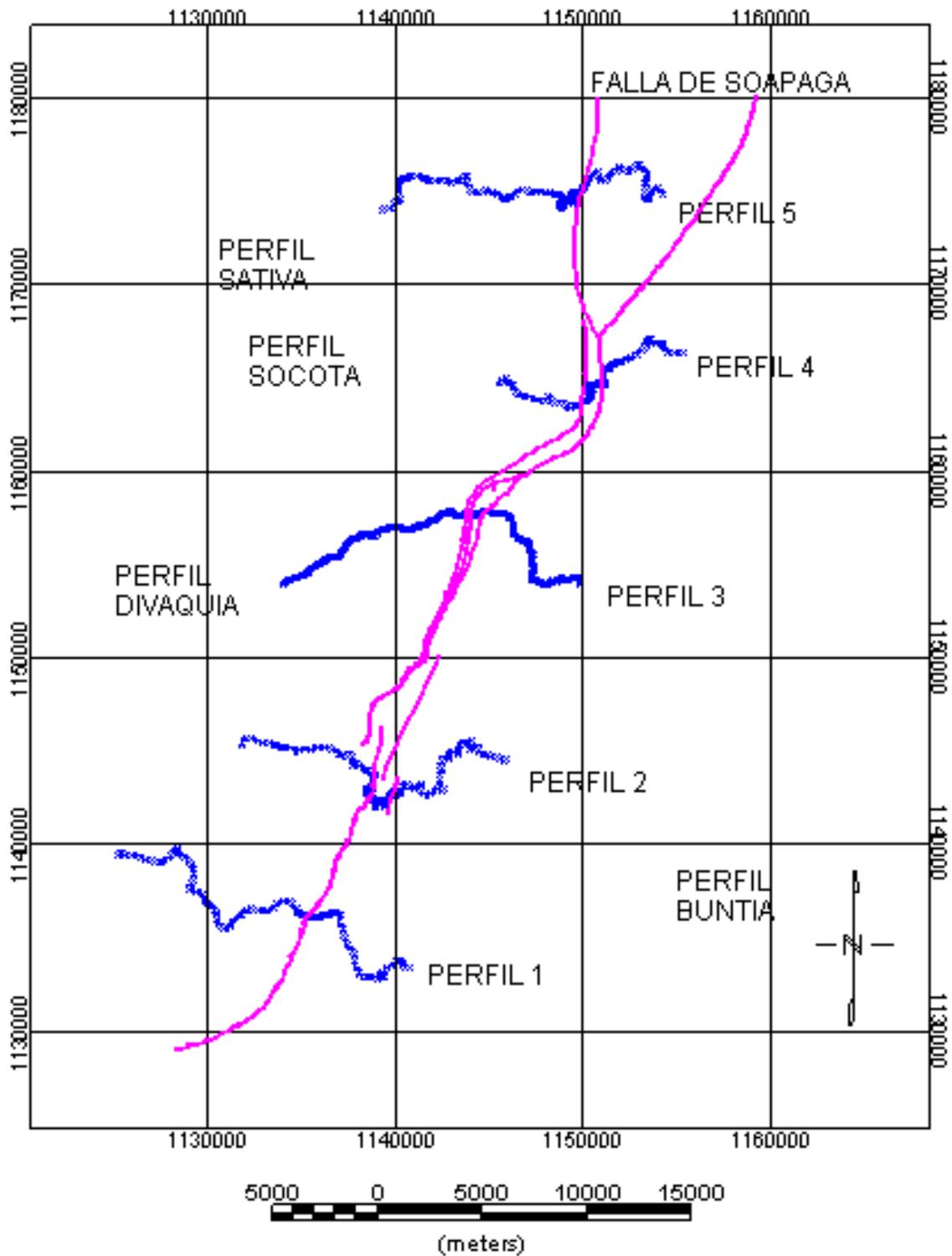


Figura 36. Ubicación de los perfiles adquiridos en campo con respecto a la Falla de Soapaga.

4.3.2 Magnetometría

Se elaboró el diseño, se escogieron los equipos y se procedió con la fase de campo, procesamiento e interpretación de los datos obtenidos. La especificaciones de la adquisición de cada uno de los perfiles, puntos de medición y bases magnetométricas están descritas en la tabla 4.

TABLA 4. ESPECIFICACIONES DE ADQUISICIÓN MAGNÉTICA

| PERFIL | PUNTO INICIAL | PUNTO FINAL | Km. | # ESTACIONES |
|---------------|----------------------------|----------------------------|-------------|---------------------|
| PERFIL 1 | X = 1125137 Y = 1139498 | X = 1140665 Y = 1133498 | 16.69 | 165 |
| PERFIL 2 | X = 1125137 Y = 1139498 | X = 1136327 Y = 1155396 | 14.22 | 219 |
| PERFIL 3 | X = 1133934 Y = 1154038 | X = 1136327 Y = 1155396 | 15.84 | 351 |
| PERFIL 4 | X = 1145419 Y = 1164751 | X = 1153251 Y = 1166854 | 10.12 | 150 |
| PERFIL 5 | X = 1154194 Y = 1174941 | X = 1139225 Y = 1174057 | 15.02 | 191 |
| BASE 1 | X = 1151587 Y = 1176296 | | | |
| BASE 2 | X = 1134432 Y = 1153468 | | | |
| TOTAL | | | 71.9 | 1076 |

4.3.2.1 Adquisición en campo

La adquisición de datos de magnetometría se realizó entre el 22 de Julio y el 27 de Julio de 2008. Se registraron un total de 1076 estaciones. Las mediciones se realizaron utilizando un

magnetómetro/gradiómetro – Modelo G-858/G. Los perfiles se adquirieron mediante cierres continuos de control, adicionales al inicial y final en la ubicación de la Base.

El levantamiento comenzó en la zona norte del bloque, cerca al Municipio de Susacón, dónde, aprovechando el poco ruido y población, se determinó la posición de la Base 1, utilizada para la adquisición de los perfiles 4 y 5, luego se realizó la adquisición hacia el sur, perfiles 3, 2 y 1, teniendo que utilizar una nueva base, (Base 2), cerca al municipio de Belén, debido a que la Base 1, con respecto a estos perfiles 3, 2 y 1, superaba la distancia permitida para generar las correcciones posteriores. Para establecer esta nueva base, fue necesario registrar variaciones durante un periodo de 5 horas, en dos ubicaciones diferentes.

Teniendo en cuenta lo anterior, todos los perfiles se adquirieron con una estación Base, un magnetómetro móvil y posicionamiento GPS de cada una de las estaciones. A partir de los datos de GPS, se generaron los mapas de perfiles y un estimativo de la topografía de cada una de las zonas. Figura 37.

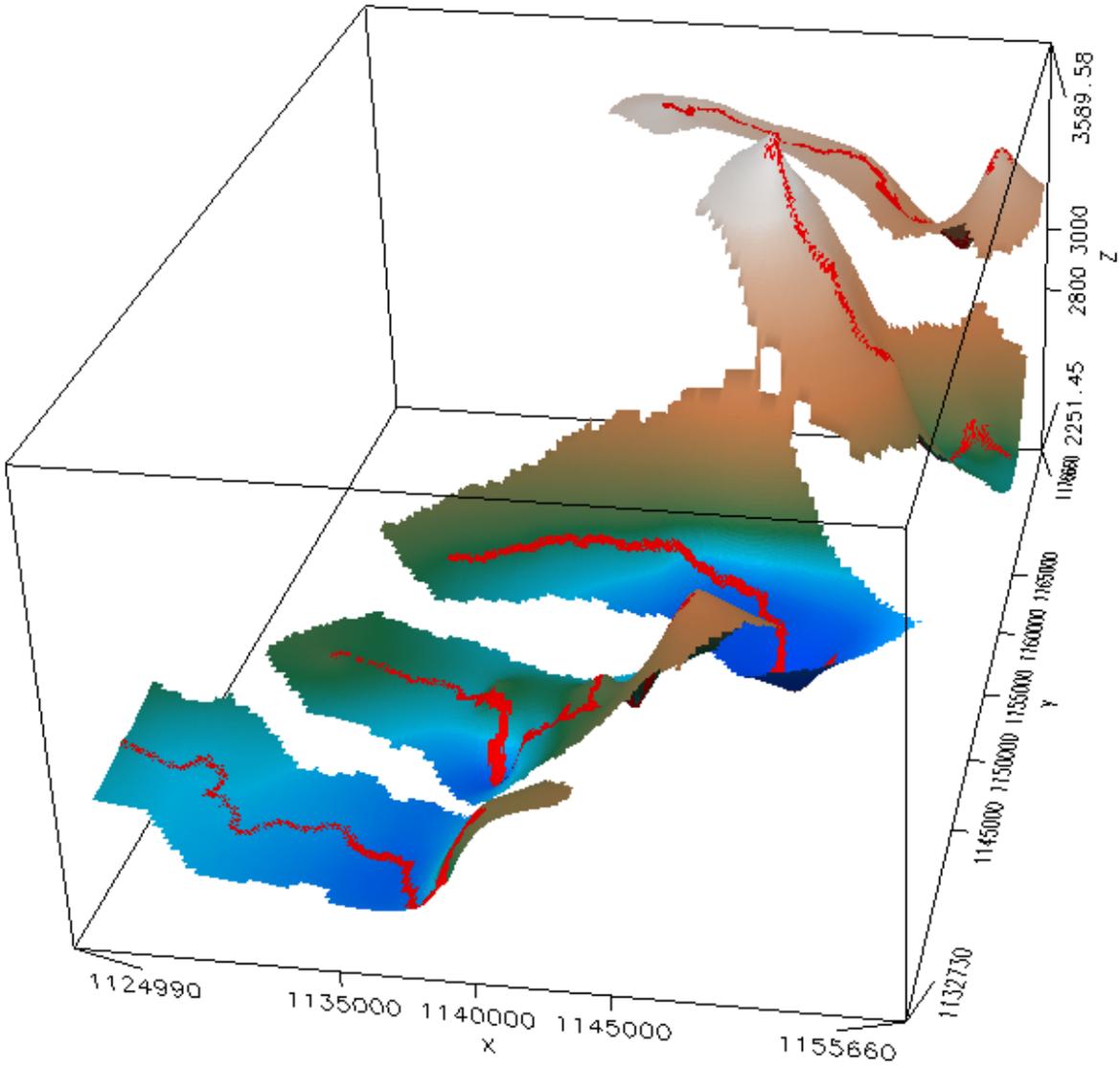


Figura 37. Topografía adquirida en campo, por medio del GPS Garmin 650X, de cada uno de los perfiles de la adquisición.

4.3.2.2 Estaciones Base de referencia

Al comienzo del levantamiento se definieron la ubicación de las estaciones base, para el magnetómetro, ya que en estos lugares no deben existir elementos culturales, fuentes o

elementos que generen una variación del campo magnético mayor a 2 gammas por cada 5m, en un radio de 12m. Estas bases se ubicaron a una altura de 2m, sobre el nivel del suelo y protegidos de la lluvia.

4.3.2.3 Reducción de datos de campo

La magnetización de las rocas presenta diferentes características dependiendo de su origen y composición mineralógica y de sus características de acidez o alcalinidad. Por lo cual entre mayor sea la susceptibilidad magnética de un cuerpo mayor será la anomalía magnética que genera.

El principio del magnetismo se rige en que la Tierra genera un campo magnético en el rango de aproximadamente 0,30000 a 0,65000G (Gauss, o Oersted). Este campo se puede comparar con el campo correspondiente a un dipolo (como un imán de barra) situado en el centro de la Tierra, cuyo eje está inclinado con respecto al eje de rotación de la Tierra. El dipolo está dirigido hacia el Sur, de tal modo que en el hemisferio Norte cerca del polo Norte geográfico se ubica un polo Sur magnético y en el hemisferio Sur cerca del polo Sur geográfico se ubica un polo Norte magnético.

El campo magnético terrestre está integrado por tres campos provenientes de tres fuentes:

- La principal fuente es el núcleo de la tierra, que cambia lentamente con el tiempo (Variación secular).
- Las variaciones externas causadas principalmente por el Sol, cuya principal fuente es la variación diurna.

- Otras, causadas por heterogeneidades de la corteza que son pequeñas variaciones (anomalías) en el campo magnético de la tierra, las cuales son el interés principal de la prospección magnética y son denominadas también como campo anómalo de la tierra.

Para el valor de este campo anómalo, se parte del campo magnético de la tierra:

$$B = C_n + C_{ex} + C_c \quad (4.1)$$

donde:

B Campo magnético de la tierra.

C_n Campo causado por el núcleo, equivalente al IGRF (International Geophysical Reference Field).

C_{ex} Campo externo, igual a la corrección diurna.

C_c Campo causado por la corteza.

4.3.2.4 Variación Diurna

El campo producido por anomalías en la corteza (C_c) resulta de restar al campo magnético total corregido (C_n) el campo geomagnético procedente del núcleo (IGRF – Internacional Geophysical Reference Field) y el campo externo (C_e) o variación diurna. Se obtiene la siguiente fórmula:

$$C_c = C_n - \text{IGRF} - C_e \quad (4.2)$$

El modelo de IGRF utilizado fue el del año 2005.

4.3.3 Procesamiento

El procesamiento que se describirá a continuación, responde a los objetivos planteados, y se resumen en la realización de mapas y perfiles de los campos de información referente al campo

total, campo reducido al polo, pseudo campo gravimétrico y correlaciones espectrales, para llegar a las características estructurales de la falla de Soapaga.

Los campos del archivo que se entregará como producto final se han procesado utilizando los programas Geosoft ® y Magpick ® y MATLAB ®.

4.3.3.1 Teorema de Poisson

Teniendo en cuenta que la adquisición en campo solo cuenta de datos de campo magnético y la idea inicial de la tesis era poder correlacionar dos campos potenciales que fueran corregistrados, para obtener la misma resolución y así poder demostrar que las anomalías pertenecen a la misma fuente se decidió determinar un campo pseudo gravimétrico a partir de los datos magnéticos adquiridos en campo y correlacionar el pseudo campo gravimétrico obtenido con los perfiles gravimétricos extraídos de grillas realizadas con los datos del IGAC (Se delimitó la zona de estudio y se localizaron en total 99 estaciones, ubicadas irregularmente en la zona de estudio, tomadas por el IGAC en el año 1998); como método para controlar y determinar si la fuente generadora de dichas anomalías era la misma.

De esta forma, el Teorema de Poisson no se manipuló de forma directa, es decir, no se hizo su desarrollo matemático, sólo se tuvo en cuenta como base para poder correlacionar campos potenciales en esta zona, ya que en términos muy generales este teorema me permite determinar un campo potencial, si conozco otro campo potencial, siempre y cuando las anomalías que generen sea debidas a la misma fuente, en este caso se supone que la misma fuente de

anomalías es el contraste de densidades y susceptibilidades presentes en el contacto de la Falla de Soapaga.

Por esta razón el desarrollo matemático de dicho Teorema no se desarrollará en esta Tesis.

A partir de la adquisición en campo y el marco teórico explicado, se determinó el pseudo campo gravimétrico para la zona de estudio, con la ayuda del software Magpick ® de Geometrics, el cual determina un campo pseudo gravimétrico a partir de una grilla de campo magnético reducido al polo.

Así que se cargaron los datos de los perfiles magnéticos adquiridos en campo, en el software de Geosoft ®, Oasis Montaj, se les realizaron las correcciones correspondientes y se aplicó la reducción al polo, (IGRF 32073.07, Inclinación magnética 31.24° y declinación magnética de -7.33°) esto, con el fin de tener las anomalías correspondientes al área de estudio. Luego de este proceso se cargaron las grillas de campo magnético reducido al polo al software Magpick ® para la generación del campo pseudo gravimétrico y los resultados se volvieron a cargar a Oasis Montaj, para la generación de los siguientes mapas de resultados.

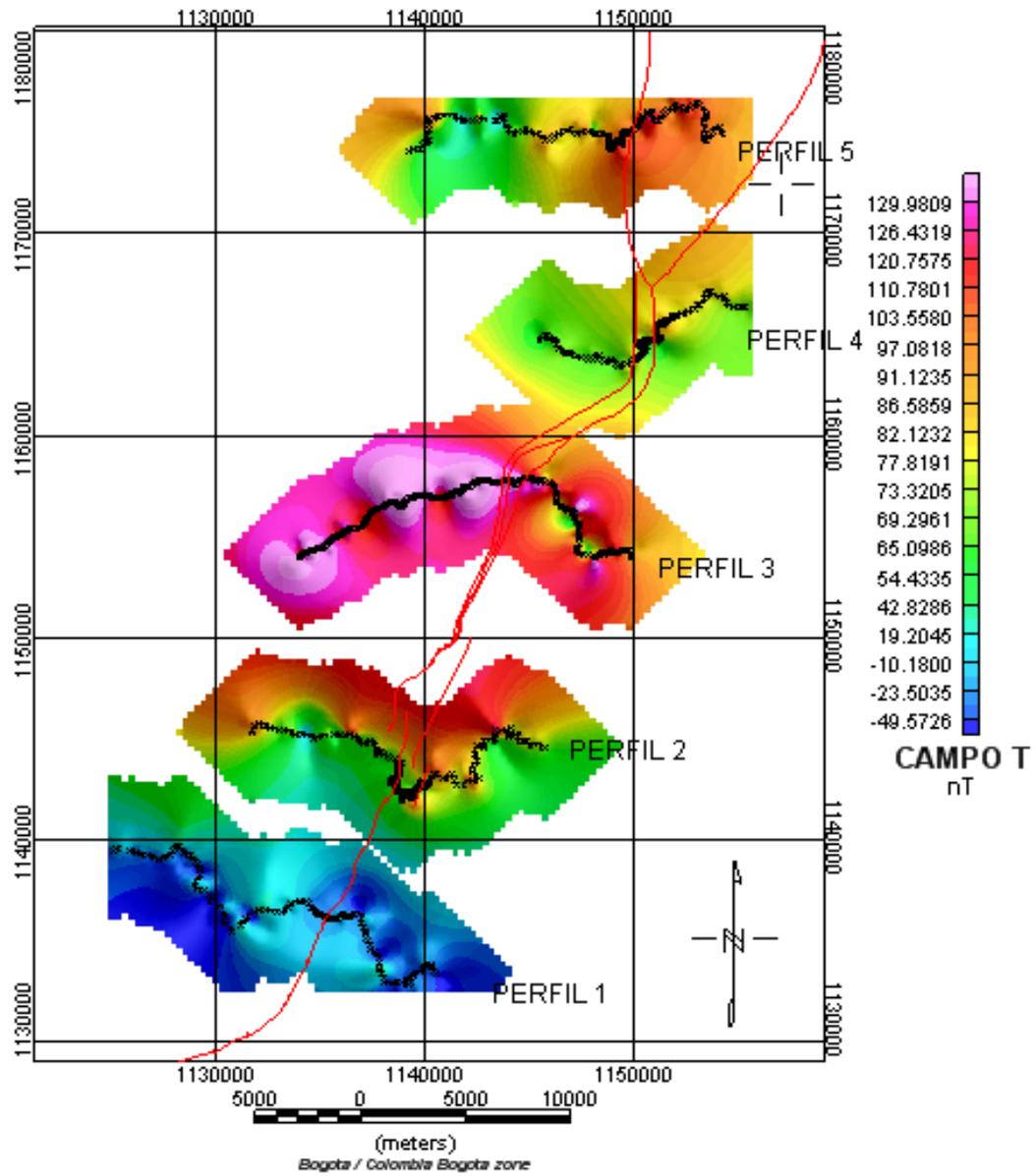


Figura 38. Perfiles de campo magnético Total, adquirido en campo, (IGRF 2005 = 32073.07nT).

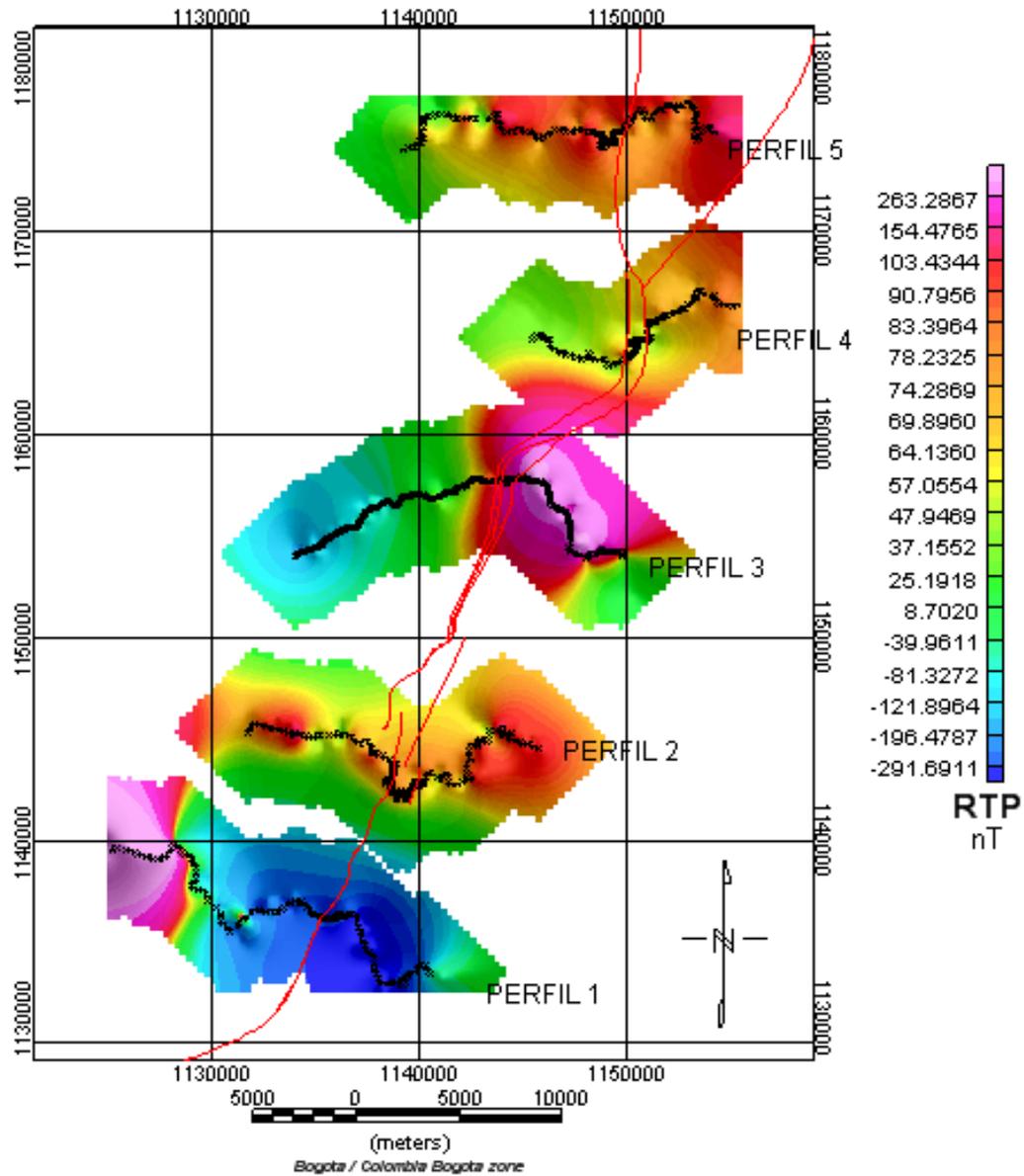


Figura 39. Perfiles de campo magnético reducido al Polo. (Inclinación magnética = 31.24° y Declinación magnética = -7.33°).

Cómo se puede observar, en el mapa de perfiles de campo magnético total, existe algo de contraste alrededor de la zona de falla, y luego de realizar la reducción al polo (RTP) este se acentúa a cada lado de la falla, lo que evidencia que el contraste se produce en profundidad y no en superficie.

Luego de tener los datos de campo magnético y los de pseudo campo gravimétrico obtenidos por medio del software Magpick®, se procedió a cargar los datos de gravimetría regional del IGAC, con el fin de poder generar una sola base de datos con todas las variables correspondientes al área de estudio. A esta base se le aplicó la primera deriva en la vertical.

4.3.3.2 Filtros

Teniendo en cuenta que un espectro de energía típico para datos magnéticos puede exhibir tres partes: una componente de la fuente profunda, una componente de fuentes someras y una componente de ruido. Es necesario aplicar filtros para remover los efectos de una u otra según el caso.

En el caso particular de esta tesis no se aplicó ningún tipo de algoritmo matemático para remover ruido, atenuar altas o bajas frecuencias. Solo se removieron de los perfiles los puntos en los cuales, según la cartera de campo, había contaminación ambiental de la señal.

Adicional a esto se utilizaron las herramientas propias de Geosoft (Oasis Montaj) que determinan la primera derivada en la vertical y la reducción al polo, definidas en el manual del usuario, literalmente como se citan a continuación.

4.3.3.3 Derivada Vertical (FFTDRV GX)

La derivada vertical es comúnmente aplicada al total de los datos de campo magnético para mejorar la mayoría de los recursos geológicos superficiales en la data. Como con otros filtros que mejoran los componentes altos de número de onda del espectro, se debe a menudo aplicar filtros pasa bajo para remover el ruido de altos números de onda.

$$L(\omega) = \omega^n$$

Parámetro:

n Orden de diferenciación

4.3.3.4 Reducción De Polo Magnético

La reducción del polo es usada en latitudes magnéticas bajas para cambiar una anomalía a sus equivalentes como podría ser observada en el polo norte magnético. Esta transformación simplifica la interpretación y visualización de anomalías desde latitudes magnéticas bajas.

La reducción al polo es:

$$L(\theta) = \frac{1}{(\sin I_a + i \cos I \cdot \cos(D - \theta))^2}$$

Donde

I Inclinación magnética

Ia Inclinación por corrección de amplitud (nunca menos que I)

D Declinación geomagnética

Parámetro:

la Inclinação para usar la corrección de amplitud. Predeterminado es ± 20 . ($I_a = 20$, si $I > 0$; $I_a = -20$, si $I < 0$). Si I_a es especificado para ser menos que I , este se configura a I .

La reducción al polo tiene un componente de amplitud (el término de $\sin(I)$) y un componente de fase (el término $i\cos(I)\cos(D-\theta)$). Cuando hay reducción al polo desde latitudes ecuatoriales, características de Norte a Sur pueden desaparecer debido a la fuerte corrección de amplitud (término $\sin(I)$) que es aplicada cuando $D-\theta$ es $\pi/2$. Por especificación de una latitud alta para la corrección de amplitud individual, este problema puede reducirse o eliminarse a expensas de los menores de la corrección de las amplitudes de las características Norte-Sur.

Una inclinación de amplitud de 90 causa únicamente la componente de fase a ser aplicada a la data (no corrección de amplitud), y un valor de cero causa correcciones de fase y amplitud a ser aplicadas sobre el rango entero.

A partir de la aplicación de estas herramientas se determinaron la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer regional, la primera derivada en la vertical de la anomalía gravimétrica obtenida por medio del modelamiento directo y la reducción al polo de los datos obtenido en campo y los obtenidos por medio del modelamiento directo. Se generaron grillas de interpolación para toda el área de estudio, con el fin de no trabajar con perfiles de anomalía, sino tener resultados más generales, teniendo en cuenta que los datos de gravimetría regional trabajados, eran de diferentes puntos sobre la zona. Cómo se muestra en la figura 49.

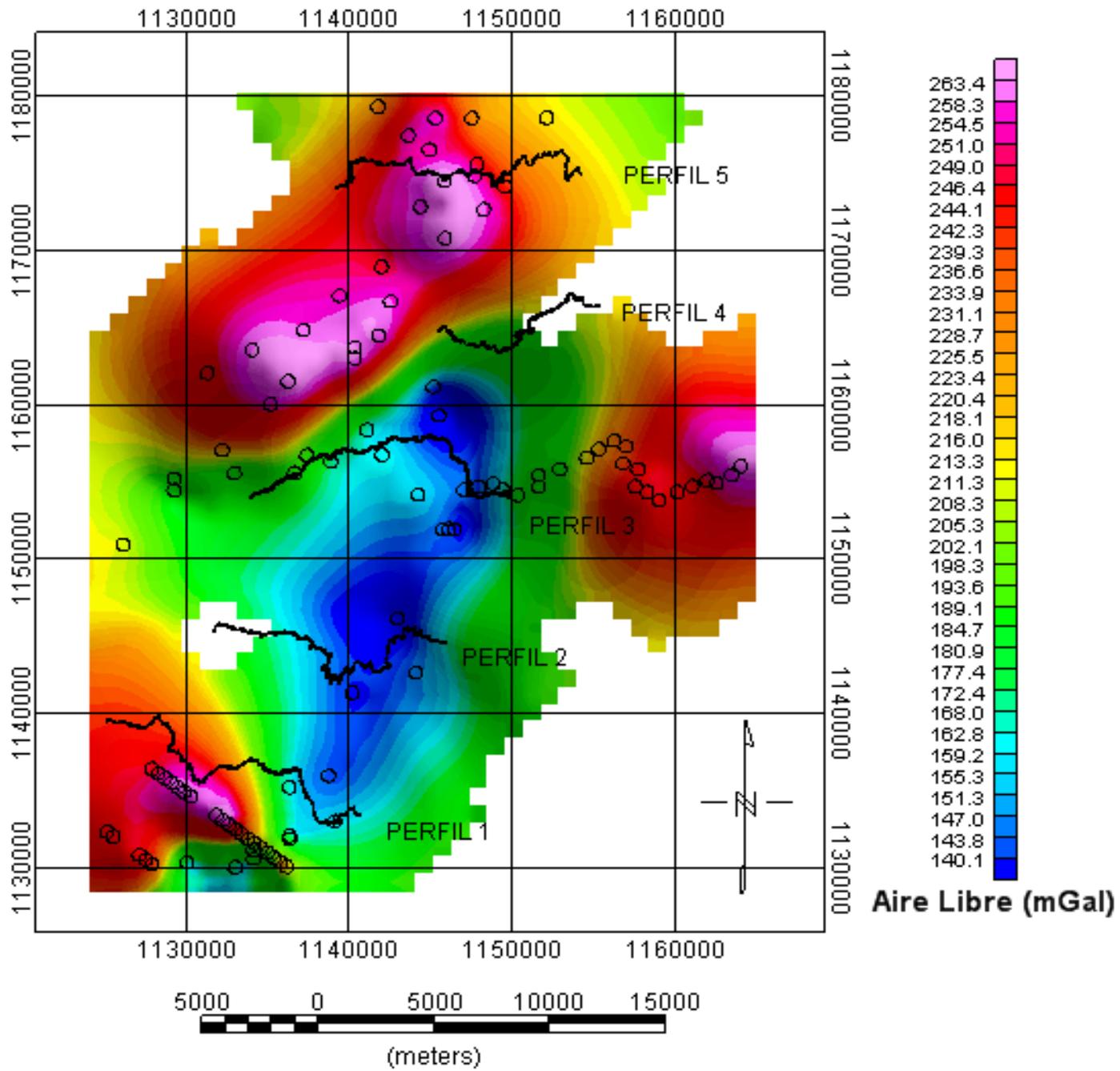


Figura 40. Perfiles de adquisición en campo y puntos de gravedad regional (IGAC, 1998). (Mapa de anomalía de aire libre). Corregida con $\phi=978,032681\text{Gal} (1+0,0052789704 \text{ sen}^2\phi + 0,0000234611 \text{ sen}^4\phi)$.

Estas grillas de interpolación se realizaron utilizando la metodología de grillaje, aprendida en un curso de Geoestadística que se tomó para aclarar dudas sobre cual sería el mejor método de interpolación y extrapolación para el tipo de datos que se iban a trabajar en la tesis.

A continuación se describe el método de grillaje utilizado en la realización de todos los mapas desarrollados en esta tesis.

4.3.3.5 Geoestadística

Teniendo en cuenta que los datos que se adquirieron no son equidistantes en la dirección N-S, y que la idea era modelar la Falla con la menor incertidumbre posible, se tomó la decisión utilizar gridding kriging que se define de la siguiente manera.

La palabra Kriging procede del nombre del geólogo sudafricano D.G. Kige, cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizados en la década de los cincuenta, suelen considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial. Kriging encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción. En la tabla 6, se menciona los tipos de kriging y algunas de sus propiedades.

TABLA 5. TIPOS DE PREDICCIÓN KRIGING

| TIPO DE PREDICTOR | NOMBRE | PROPIEDADES |
|-------------------|---|---|
| LINEAL | <ul style="list-style-type: none"> • Simple • Ordinario | <ul style="list-style-type: none"> • Son óptimos si hay normalidad multivariada. |

| | | |
|-----------|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Universal | <ul style="list-style-type: none"> • Independientemente de la distribución son los mejores predictores linealmente insesgados. |
| NO LINEAL | <ul style="list-style-type: none"> • Indicador • Probabilístico • Log Normal, Trans-Gaussiano. • Disyuntivo | <ul style="list-style-type: none"> • Son predictores óptimos. |

Los métodos kirging se aplican con frecuencia con el propósito de predicción, sin embargo estas metodologías tiene diversas aplicaciones, dentro de las cuales se destacan la simulación y el diseño de redes óptimas de muestreo.

4.3.3.6 Correlación espectral

En este capítulo, la teoría de la correlación espectral (Leftwich, et al., 2005; von Frese and Tan, 1999) es aplicada a las anomalías de gravedad y a las anomalías de campo magnético para obtener nuevos datos de las características estructurales de la Falla de Soapaga y la profundidad del basamento cristalino. Se implementaron Normalización e índices de favorabilidad local para facilitar la visualización e interpretación de cada una de las anomalías. Esta metodología ha sido aplicada y validada en variados estudios corticales entre los que se cuentan los del Norte de Suramérica (Hernández, 2006, op. cit.), en el Este de Asia (Tan y Von Frese, 1997), Antártica (von

Frese et al. 1999), Groenlandia (Roman, 1999), Ohio (Kim et al., 2000), e Islandia (Leftwich, 2005) y en estudios de Geofísica planetaria.

Se utilizó la teoría de correlación espectral para analizar Anomalía de campo gravimétrico (Aire Libre, Bougue y Primera derivada) con el campo magnético (campo total y Reducción al polo). Específicamente, las transformadas de Fourier T y F de cada una de las anomalías de los campos estudiados, respectivamente, fueron usadas para obtener su espectro de correlación (von Frese, 1997, Kim, 2000) dados por:

$$CC(k) = \cos(\Delta\theta k) = \operatorname{Re} \left[\frac{F(k)T(k)}{T(k)F(k)} \right] \quad (4.16)$$

Donde $CC(k)$ es el coeficiente de correlación entre los k -ésimo componentes de número de onda de $F(k)$ y $T(k)$, y se denota tomando las partes reales de los componentes del número de onda. Usualmente, $CC(k)$ es evaluado a partir del coseno de la diferencia de fase $(\Delta\theta k)$ entre los dos k -ésimos componentes de número de onda.

4.3.3.7 Normalización

Cada una de las anomalías estudiadas fueron normalizadas para facilitar el reconocimiento de sus correlaciones de anomalías (von Frese, 1997). Para mejorar la percepción visual de las correlaciones de anomalías, se aplicó la siguiente transformación:

$$Z_i(X) = \sigma_x \left(\frac{x_i - \mu_x}{\sigma_x} \right) + \mu_z \quad (4.17)$$

Donde μ_z y σ_z representan los valores de la desviación estándar y media de la señal X, respectivamente. La expresión en paréntesis estandariza los coeficientes xi a la media cero y unifica la desviación estándar, este es un valor adimensional. Sin embargo, los valores de la media σ_z y la desviación estándar de μ_z de la señal normalizada Z puede ser especificada por el usuario para facilitar el análisis visual.

Las transformaciones de anomalías de campo gravitacional y las de campo magnético usan la normalización de $\sigma_z = 10$ para facilitar el ploteo con los dos paquetes de datos con parámetros comunes para impresión (von Frese, 1997). Los índices locales de favorabilidad (Merriam y Sneath, 1966) fueron usados para resaltar las variadas correlaciones de anomalías normalizadas. Las características positivamente correlacionadas fueron mapeadas por medio de la sumatoria de los índices de favorabilidad local (SLFI) obtenido por

$$\text{SLFI}_i = \frac{(z_i(X)) - \mu_z}{\sigma_z} + \frac{(z_i(Y)) - \mu_z}{\sigma_z} \quad (4.18)$$

Donde Z(X) y Z(Y) son los coeficientes normalizados de cada uno de los campos a correlacionar, respectivamente. Los coeficientes SLFI extraen las características positiva o directamente correlacionables, mientras que suprimen las características negativas o no correlacionadas entre los campos a correlacionar. (Hernández O, 1995, 2008)

Para poder llevar a cabo la correlación espectral y determinar los índices de favorabilidad que existen en cada una de las variables fue necesario extraer una ventana de las grillas regionales que se realizaron anteriormente por el método de kriging, debido a que la transformada rápida de Fourier en Matlab funciona por teoría, en matrices cuadradas. Lo que convencionalmente se hace

es completar las matrices con ceros, pero en nuestro caso este procedimiento introduciría falsos coeficientes de correlación e índices de favorabilidad, por tal razón se extrajo una ventana de datos cuya grilla fuera de 64 por 64, de esta forma se generaron nuevos mapas que luego fueron introducidos en Matlab para la determinación de los coeficientes de correlación e índices de favorabilidad. Algunas de las grillas de entrada a los flujos realizados en Matlab, se muestran a continuación.

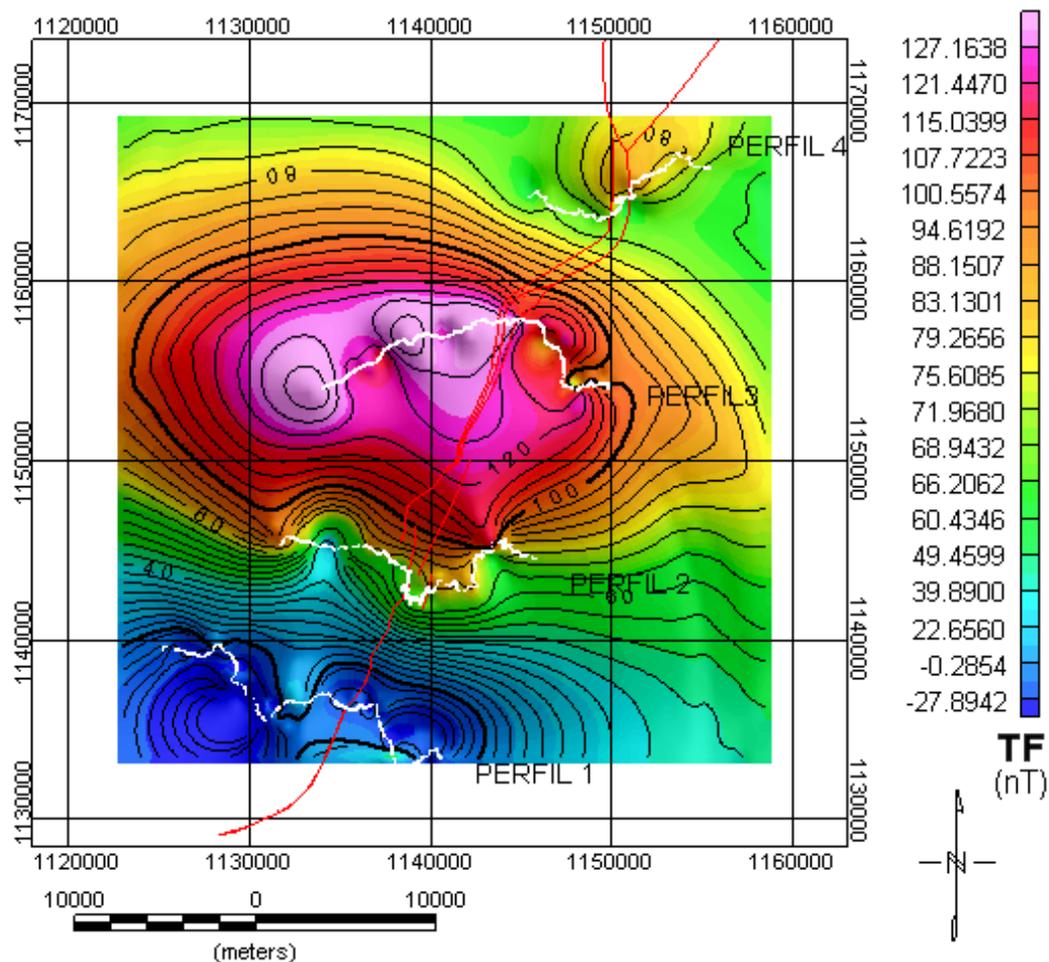


Figura 41. Grilla cuadrada de Anomalía de campo magnético total, adquirido en campo, (IGRF 2005 = 32073.07nT). En la figura se resalta la posición de 4 de los perfiles adquiridos en campo, sobre los cuales se hizo el modelamiento inverso.

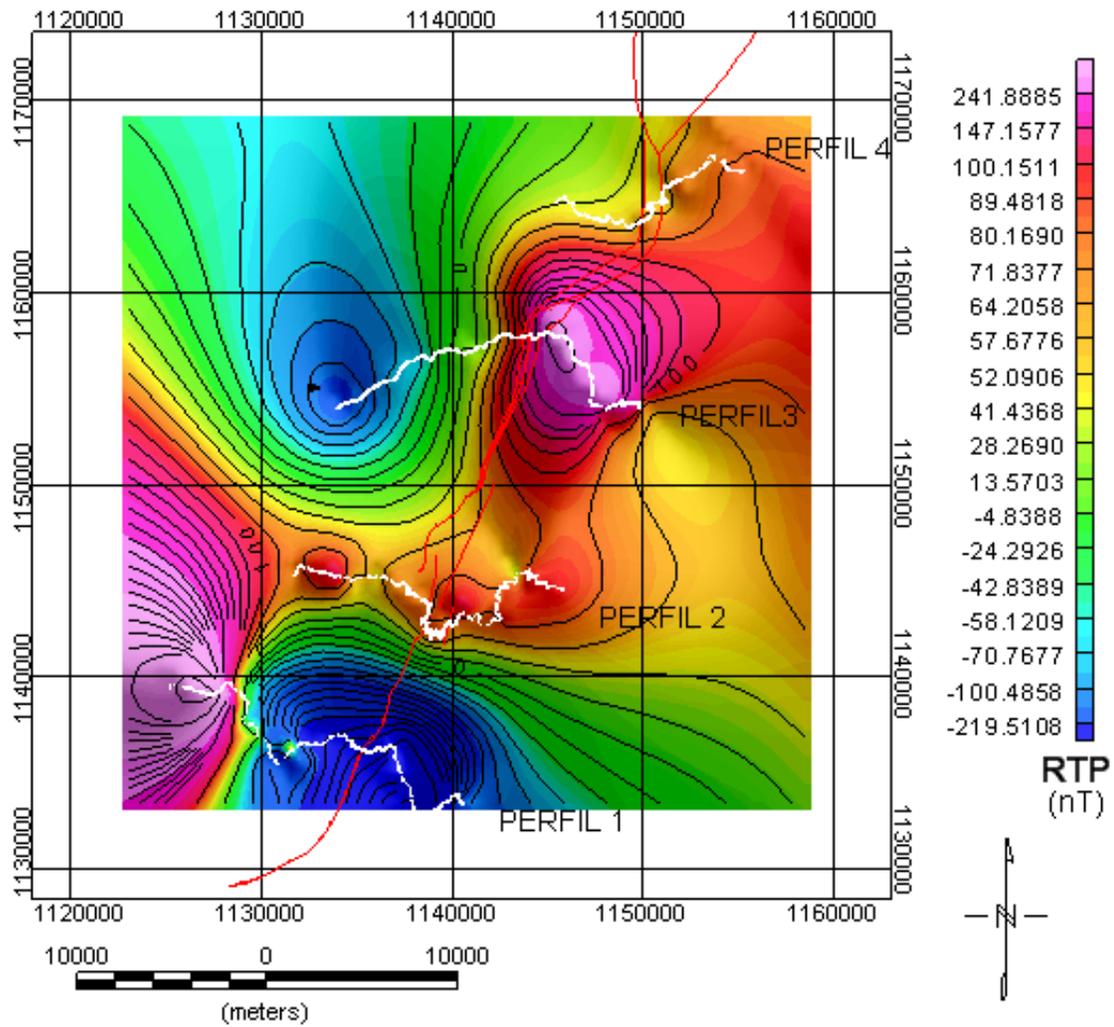


Figura 42. Reducción al Polo de los datos de campo. ($I = 31.24^\circ$ y $D = -7.33^\circ$). Se observa el contraste de anomalía en la mayor parte del corredor de la Falla de Soapaga.

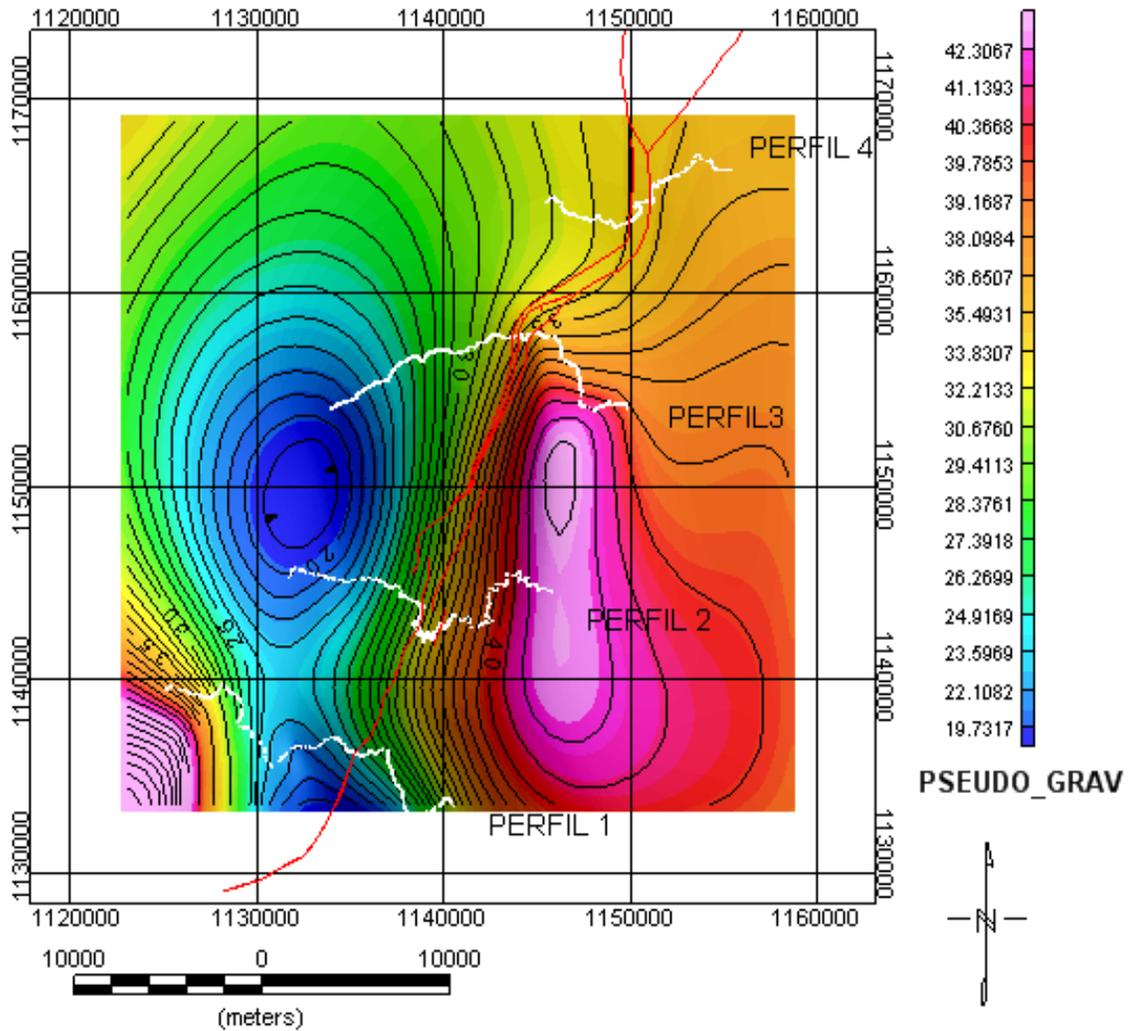


Figura 43. Pseudo gravedad obtenidos a partir de los datos de campo magnético reducidos al polo, utilizando el software Magpick® y los parámetros de inclinación y declinación magnética para la zona.

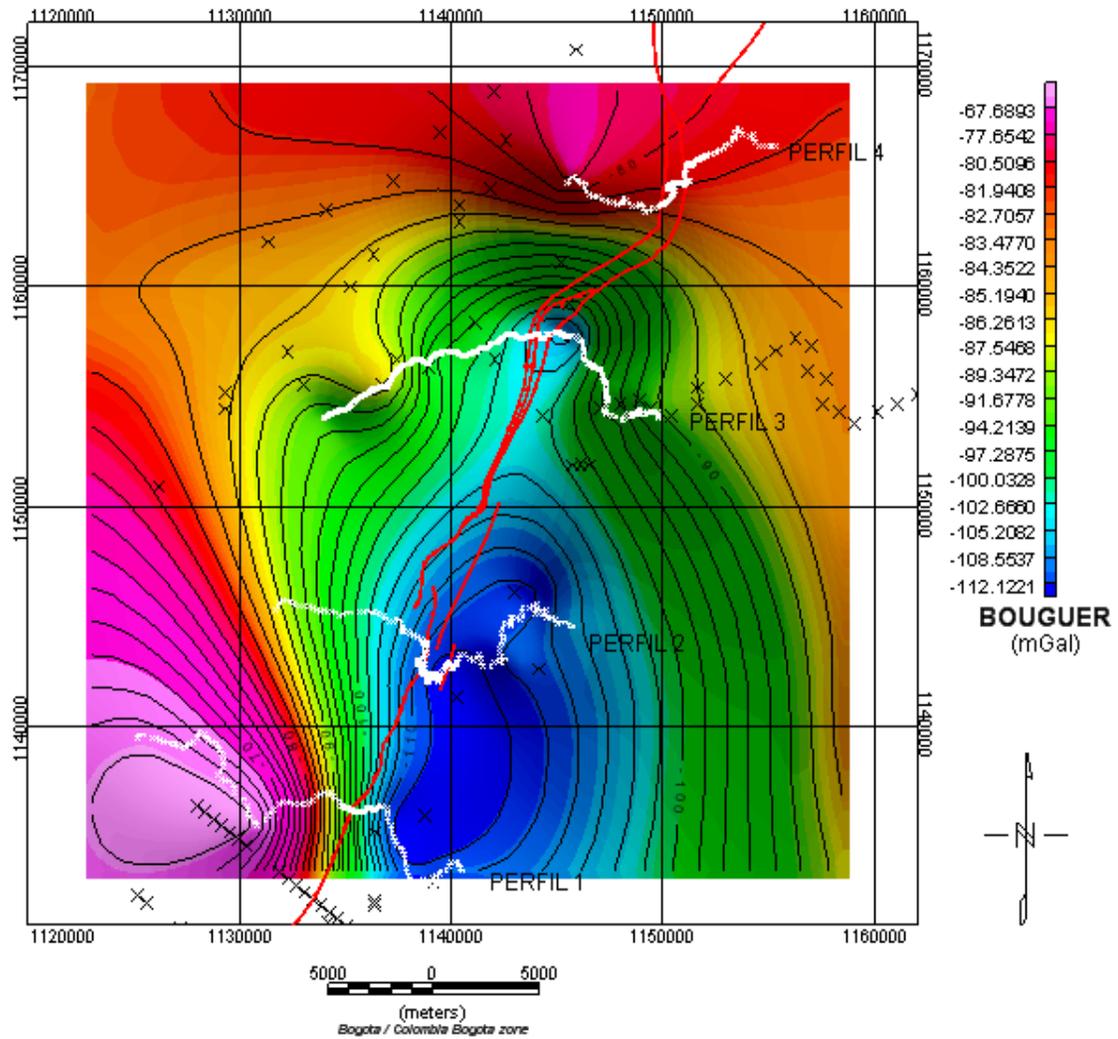


Figura 44. Anomalía de completa de Bouguer graficada a partir de los puntos del IGAC. (Densidad representativa de la corteza terrestre $2,67\text{g/cm}^3$).

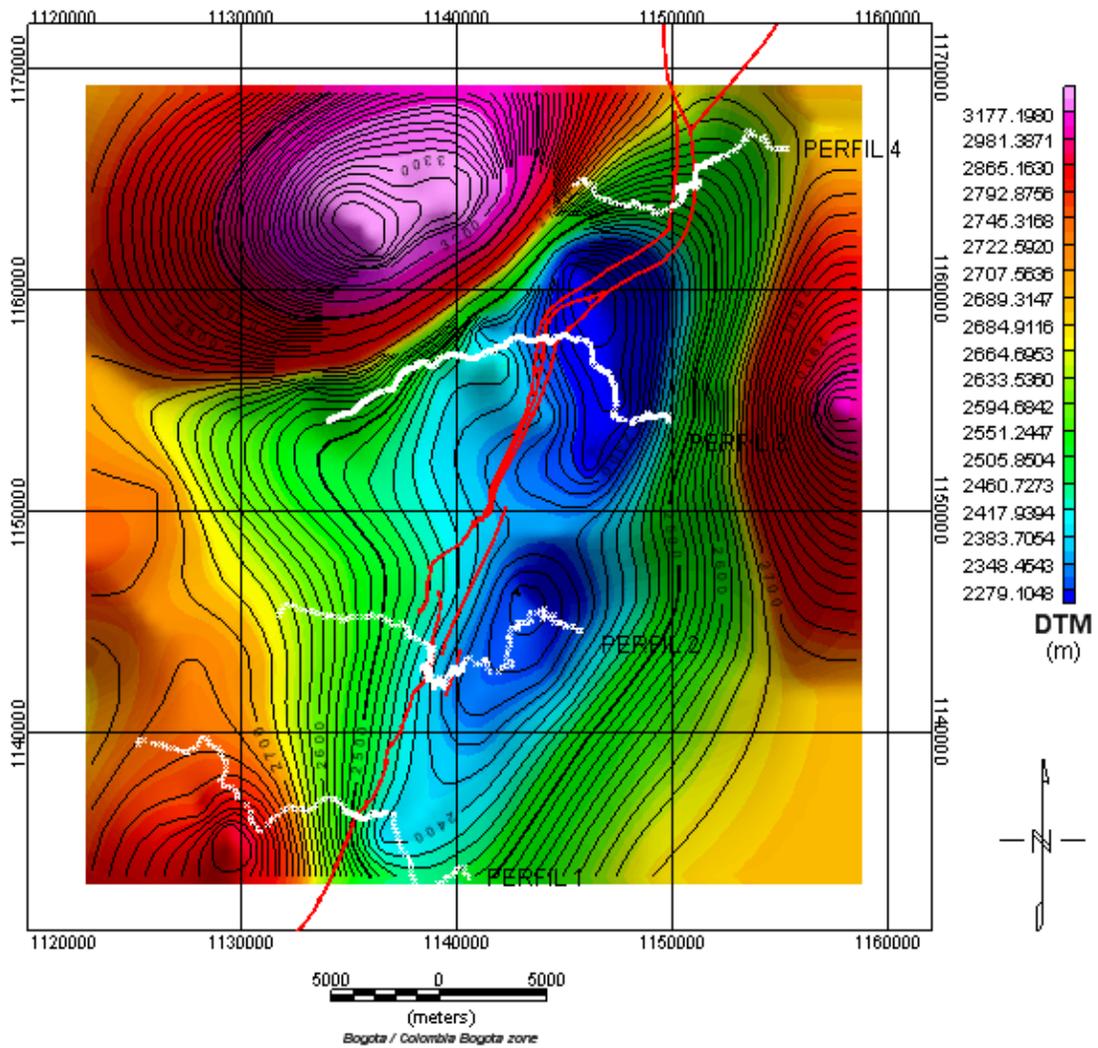


Figura 45. Modelo de elevaciones generado a partir de los puntos de elevación adquiridos en campo, con el GPS de altímetro barométrico Garminmap 60CSX.

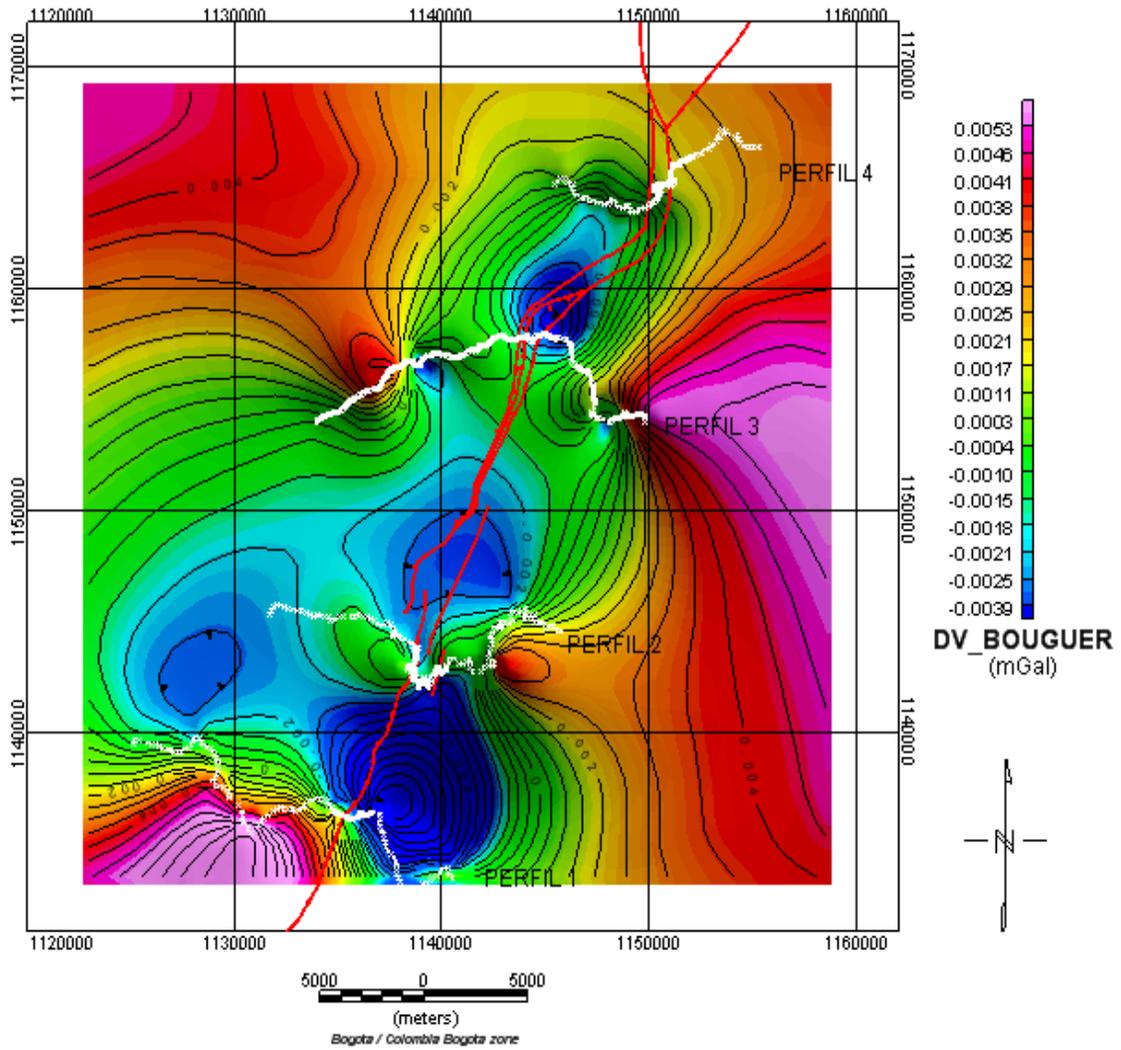


Figura 46. Primera derivada en la vertical de la anomalía completa de Bouguer. (Densidad representativa de la corteza terrestre $2,67\text{g/cm}^3$).

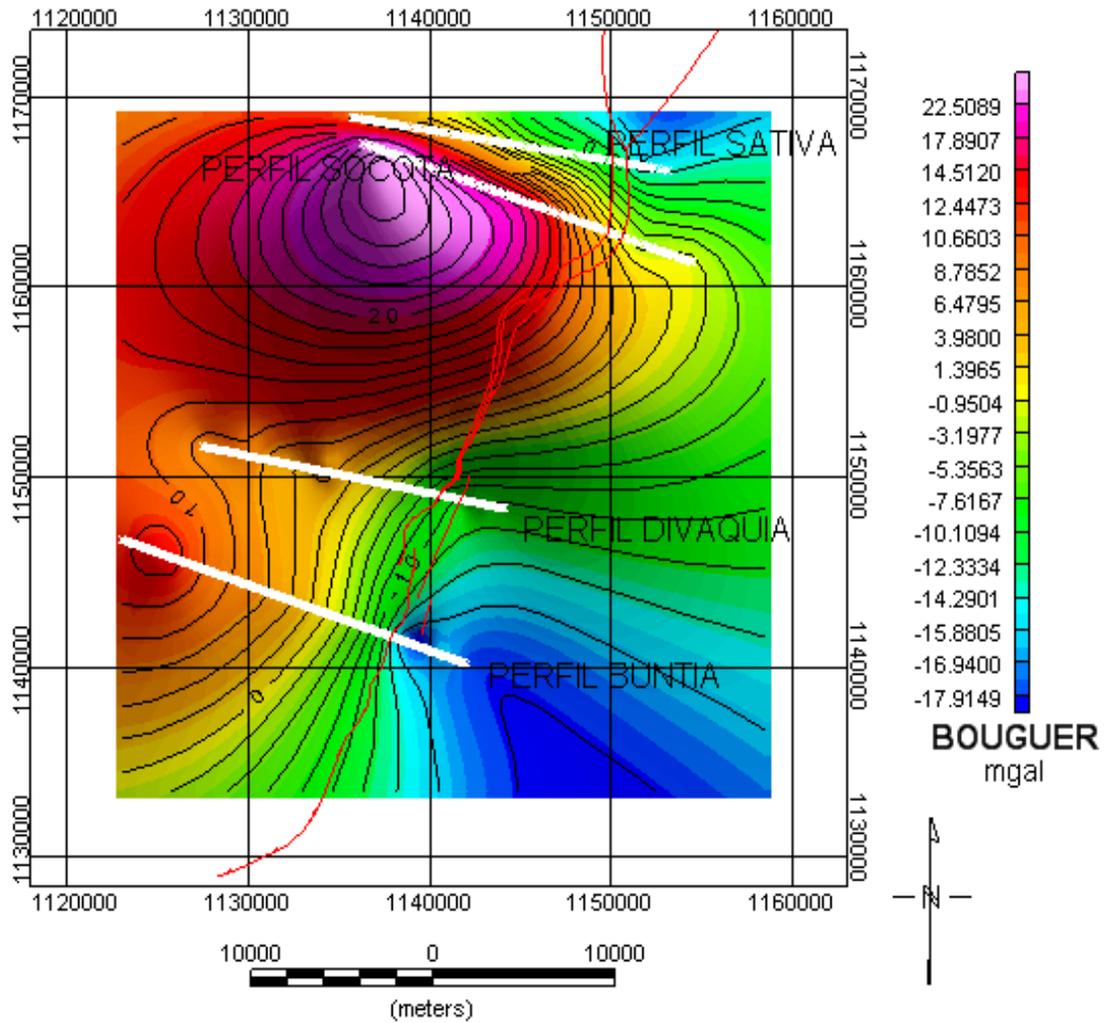


Figura 47. Anomalia Completa de Bouguer modelamiento directo. Se observa la variación a lo largo de la Falla.

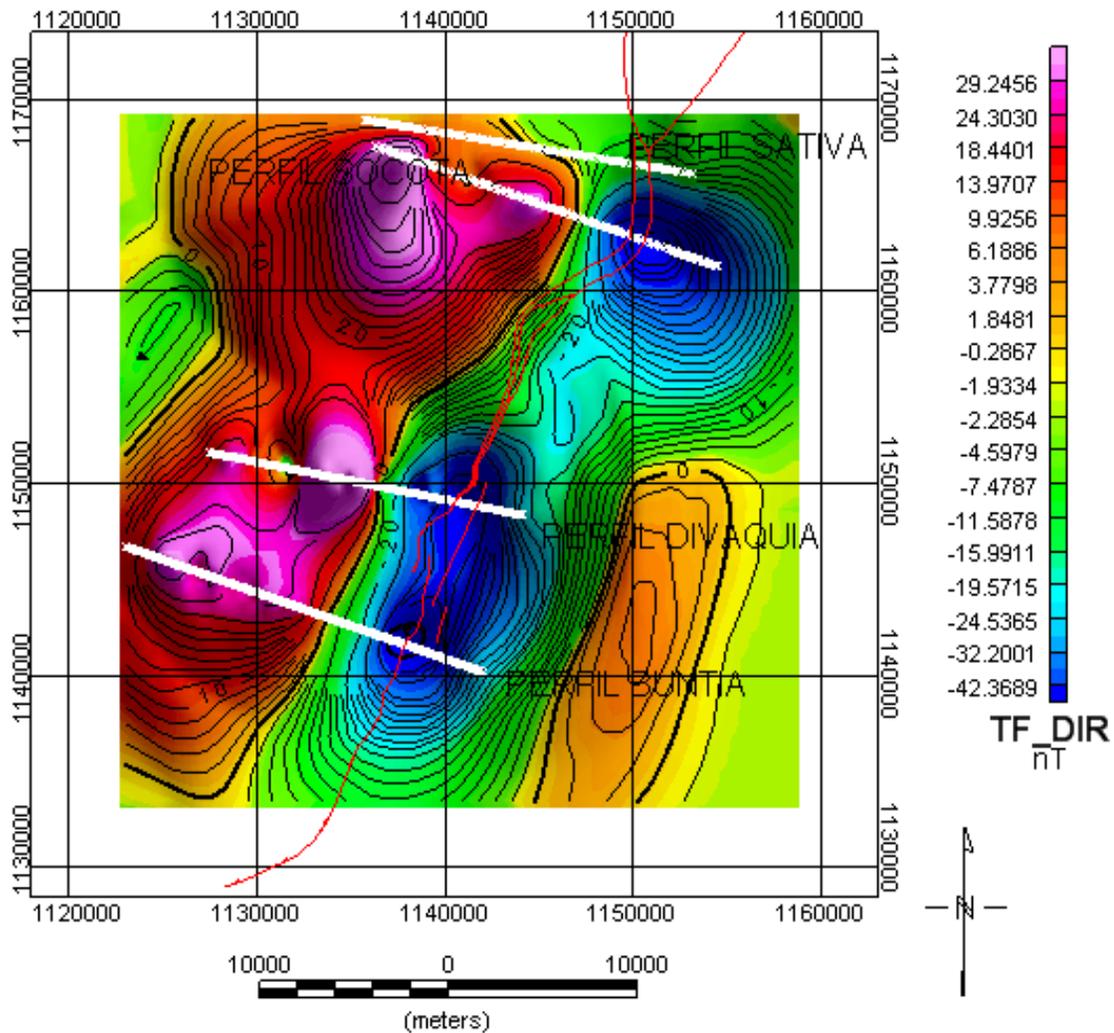


Figura 48. Anomalía de campo magnético, obtenida por medio del modelamiento directo de los perfiles. De igual forma que en la anomalía de campo gravitacional, se puede observar el contraste de anomalías paralelo a la Falla.

A partir de estas grillas se determinaron los coeficientes de correlación almacenados en la tabla 7. Es a partir de esta tabla de coeficientes que se generan toda una serie de conclusiones sobre la metodología utilizada y el objetivo principal que era poder tomar decisiones acerca de la estructura de falla por medio de su aplicación. En el Anexo 1, se encuentran las definiciones de cada una de las convenciones utilizadas en esta tabla.

TABLA 6. COEFICIENTES DE CORRELACION OBTENIDOS ENTRE TODOS LOS DATOS.

| CC | FAA | $\frac{\partial(FAA)}{\partial Z}$ | CBA | $\frac{\partial(CBA)}{\partial Z}$ | TF | RTPMA G | PSEUDO MAG | CBA_D | $\frac{\partial(CBA_D)}{\partial Z}$ | PSEUDO _D | TF_D | RTPMAG _D |
|---------------------------------------|------------|------------------------------------|------------|------------------------------------|-----------|--------------------|-----------------------|--------------|---------------------------------------|----------------------|-------------|----------------------|
| FAA | 1 | 0.3294 | 0.3754 | 0.3292 | -0.5216 | -0.2696 | -0.4641 | 0.2848 | 0.2340 | 0.1461 | -0.1511 | -0.4210 |
| $\frac{\partial(FAA)}{\partial Z}$ | 0.3294 | 1 | 0.2803 | 0.9314 | 0.0192 | -0.0946 | 0.4512 | 0.0282 | 0.0972 | 0.4512 | 0.1511 | -0.1611 |
| CBA | 0.3754 | 0.2803 | 1 | 0.3937 | -0.4961 | -0.0776 | 0.2413 | 0.1836 | 0.2146 | 0.2389 | -0.1945 | -0.2512 |
| $\frac{\partial(CBA)}{\partial Z}$ | 0.3292 | 0.9314 | 0.3937 | 1 | -0.0450 | -0.0907 | 0.13 | 0.1105 | 0.1836 | 0.4193 | -0.0437 | -0.1259 |
| TF | -0.5216 | 0.0192 | -0.4961 | -0.0450 | 1 | -0.2253 | 0.4271 | 0.0045 | -0.0079 | -0.2288 | 0.0136 | -0.0261 |
| RTPMAG | -0.2696 | -0.0946 | -0.0776 | -0.0907 | -0.2253 | 1 | 0.2241 | -0.4195 | -0.1996 | 0.3878 | 0.4123 | 0.3522 |
| PSEUDO MAG | -0.4641 | 0.4512 | 0.2413 | 0.13 | 0.4271 | 0.2241 | 1 | 0.0926 | 0.1233 | 0.2658 | 0.1372 | -0.2106 |
| CBA_D | 0.2848 | 0.0282 | 0.1836 | 0.1105 | 0.0045 | -0.4195 | 0.0926 | 1 | 0.7211 | -0.1208 | 0.3918 | 0.0079 |
| $\frac{\partial(CBA_D)}{\partial Z}$ | 0.2340 | 0.0972 | 0.2146 | 0.1836 | -0.0079 | -0.1996 | 0.1233 | 0.7211 | 1 | 0.0944 | 0.2477 | -0.0421 |
| PSEUDO_ D | 0.1461 | 0.4512 | 0.2389 | 0.4193 | -0.2288 | 0.3878 | 0.2658 | -0.1208 | 0.0944 | 1 | -0.2185 | -0.2081 |
| TF_D | -0.1511 | -0.1511 | -0.1945 | -0.0437 | 0.0136 | 0.4123 | 0.1372 | 0.3918 | 0.2477 | -0.2185 | 1 | 0.4665 |
| RTPMAG_ D | -0.4210 | -0.1611 | -0.2512 | -0.1259 | 0.4665 | 0.3522 | -0.2106 | 0.0079 | -0.0421 | -0.2081 | 0.4665 | 1 |

4.4 Análisis De Resultados Coeficientes De Correlación

A continuación se describirán cada uno de los resultados obtenidos por medio de la correlación espectral de los campos potenciales utilizados, en nuestro caso, gravimetría y magnetometría.

Antes de este análisis se debe recordar que el comportamiento gravimétrico y magnético muestran características diferentes de un lugar, y en este caso, de una estructura, mientras que el campo gravitacional evidencia la respuesta de todo un cuerpo ya que se basa en la densidad de las rocas y de esta forma me puede dar una visión más de la geología y estructura de un lugar, el campo magnético por depender de los materiales o minerales magnéticos dentro de las rocas; que equivale a menos del 5% del tamaño de la roca, solo puede permitir ver el tipo de estructura que se está modelando.

Lo primero que se observa al leer los valores de correlación, es que el 95% están por debajo de 0.6, lo que en términos generales se esperaba obtener, debido a la falta de mediciones de campo gravimétrico y magnético, co registradas en campo, lo que hubiese permitido obtener datos con la misma resolución y valores mayores de correlación.

Se empezará describiendo el comportamiento de las variables que se correlacionan directamente, es decir, su coeficiente es positivo, y adicional a esto es alto en relación con los demás.

Las anomalías de Aire Libre y Bouguer (FAA y CBA, respectivamente) se correlacionan con un coeficiente del 0.3754, que al ser bajo evidencia claramente que mientras que una no tiene la corrección por topografía la otra si. Al contrario, cuando se correlacionan sus primeras derivadas en la vertical, ($\frac{\partial(FAA)}{\partial Z}$ y $\frac{\partial(CBA)}{\partial Z}$, respectivamente), su coeficiente es de 0.9314, lo cual

evidencia que tienen continuación y que su anomalía es generada por el contraste en la zona de falla.

La anomalía de campo magnético con el campo pseudo gravimétrico, determinado por medio del Teorema de Poisson del software Magpick, tiene un coeficiente relativamente alto, con respecto a los demás, de 0.4271, y al correlacionar el último con la reducción al polo del campo magnético total, el coeficiente baja a (0.2241), lo que demuestra que aunque el pseudo campo gravitatorio es resultado de la reducción al polo del campo magnético total, el tipo de algoritmo utilizado por el software Magpick, no está siendo lo suficientemente efectivo para la determinación de un campo pseudo gravitatorio, o que las relaciones de densidad de magnetización y densidad, establecidas por el mismo programa no son las apropiadas para dicho procesamiento.

Siguiendo con el análisis del párrafo anterior, al correlacionar el pseudo campo gravimétrico con la derivada en la vertical de la anomalía de aire libre regional, su correlación se encuentra dentro de las más altas, 0.7211, lo cual sugiere que el tipo de pseudo campo generado se parece más una continuación de la anomalía de aire libre en la vertical, que a una continuación de la anomalía de Bouguer en la vertical, como sugiere la Teoría propuesta por Poisson.

En cuanto a la correlación existente entre los modelos teóricos, los datos de anomalía del IGAC y los datos obtenidos en campo, se citarán los que obtuvieron los mayores coeficientes.

La anomalía de aire libre, con la pseudo gravedad determinada a partir de los datos de campo magnético obtenidos por medio del modelamiento directo, tiene un coeficiente de 0.4512, que es alto en comparación con los otros, lo cual sugiere nuevamente que el tipo de algoritmo da un campo gravitacional que se relaciona altamente con una anomalía de aire libre. Al realizar la correlación de esta pseudo gravedad con la derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer

regional, da un resultado de 0,4193, lo cual sugeriría que el tipo de geometría utilizada en el modelamiento directo corresponde más a contrastes en profundidad.

De igual forma, al correlacionar la reducción al polo de los datos obtenidos en campo, con los datos de campo magnético del modelamiento directo, el coeficiente es de 0,4123, lo que podría evidenciar que la respuesta del modelamiento directo se refiere más a anomalías residuales que regionales; pautas que fueron muy útiles en la realización del modelamiento inverso, donde los contrastes de campo magnéticos vendrían de pequeños contrastes entre unidades y no de una respuesta regional, cómo sería la Falla de Soapaga.

Adicional a los coeficientes que muestran una correlación directa y alta entre nuestras variables de campos potenciales, también se encuentran las correlaciones inversas entre ellas, es decir, de signo negativo.

Entre las que vale destacar se encuentra la correlación entre campo magnético medido en campo, con la anomalía de aire libre y de Bouguer del IGAC, (-0.5216, -0.4961), que aunque se encuentran altamente de-correlacionadas, no es bueno buscar similitudes entre sus respuestas, cómo lo tiene a hacer la mayoría de personas cuando observa dos mapas de anomalías magnéticas y gravimétricas, ya que estas anomalías corresponden a características diferentes de una zona, cómo ya se había explicado anteriormente. Pero son en gran manera útiles para validar que se pueden correlacionar dos campos, cuyas anomalías son el resultado de la misma fuente, cómo muestran estos valores de correlación altos.

En cambio, cuando se correlacionan, las derivadas de las anomalías de gravedad con la reducción al polo, es cuando se pueden evidenciar respuestas un poco más coherentes ya que en este momento se estará trabajando con dos campos potenciales monoplares y se evitara la confusión

en la interpretación. En estos datos, las correlaciones entre estas variables es muy baja, en el 52% de las correlaciones está por debajo de 0.1, lo cual indica que estos dos campos pierden contraste en profundidad.

4.5 Análisis De Resultados Índices De Favorabilidad

Los índices de favorabilidad son los que finalmente me indican los lugares en los cuales existen correlaciones cresta a cresta, decir positivo y positivo, o correlaciones valle a valle, negativo y negativo, entre los dos paquetes de datos que fueron mapeados. Los coeficientes SLFI extraen las características positiva o directamente correlacionables, mientras que suprimen las características negativas o no correlacionadas entre los datos suministrados al programa.

Los coeficientes (DLFI) extraen las características inversamente correlacionadas obtenidas a partir de números de onda con coeficientes de correlación negativa. Los datos normalizados y escalados fueron sustraídos celda a celda para los índices de favorabilidad local diferenciados (DLFI).

A continuación se muestran algunos de los gráficos obtenidos durante el procesamiento de índices de favorabilidad, cresta a cresta y valle a valle.

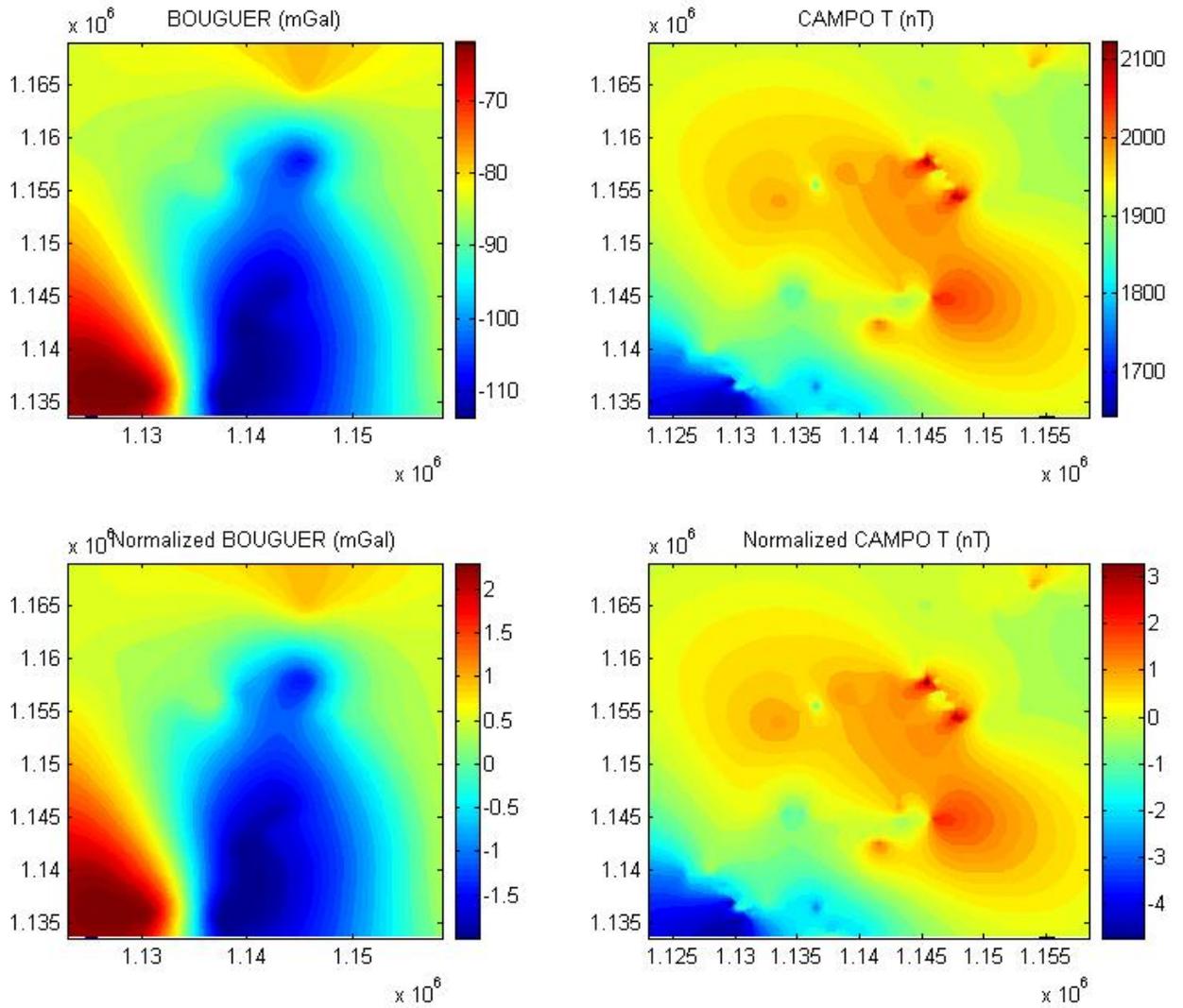


Figura 49. Mapas de anomalía de Bouguer y campo magnético total, en sus dimensiones normales y normalizados, para determinar los índices de favorabilidad y sus correlaciones directas e inversas. Se puede observar que el comportamiento no cambia, solo la escala en la que se miden las anomalías.

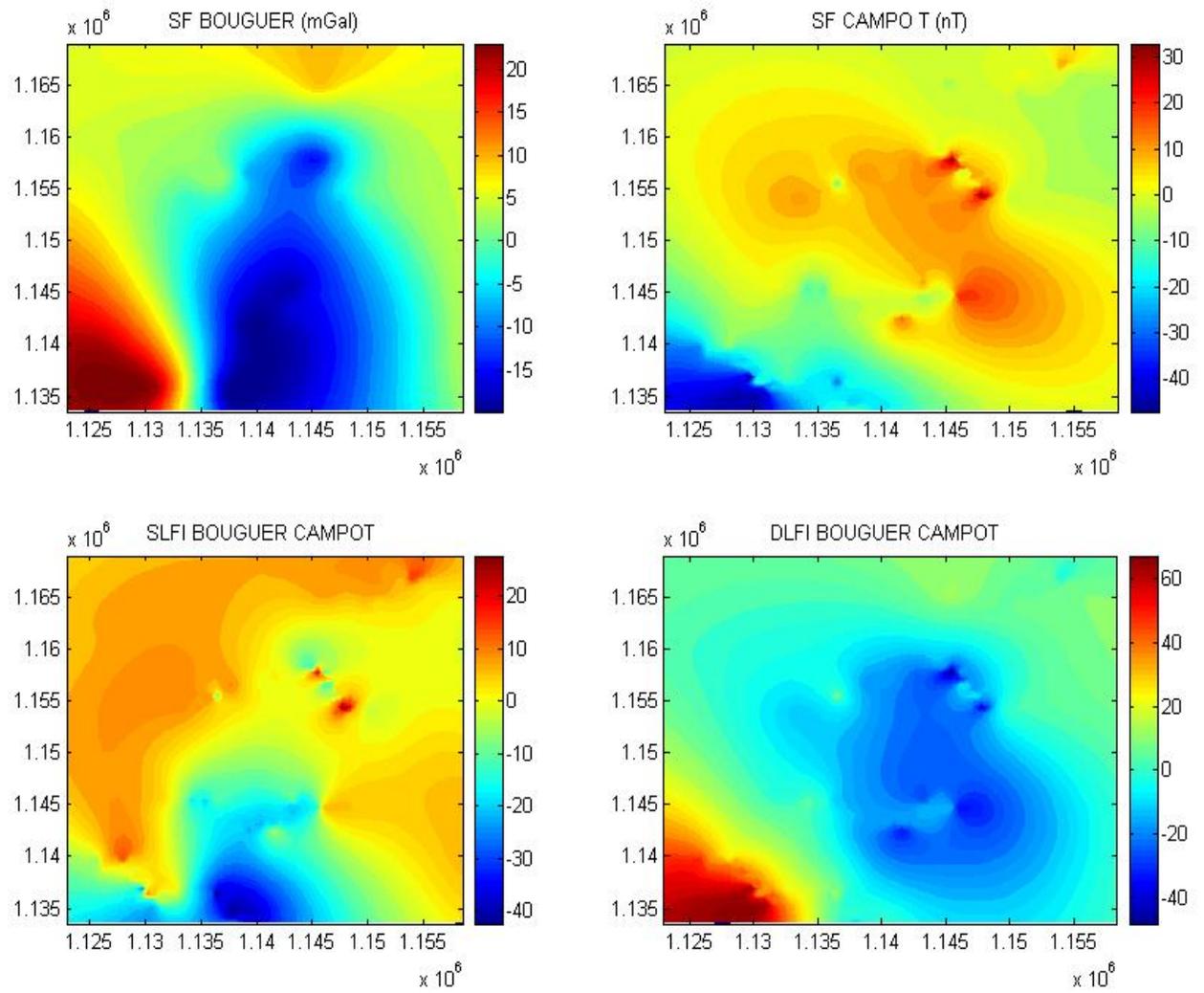


Figura 50. Mapas de los índices de favorabilidad de correlación directa e inversamente para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Se puede observar las gráficas SLFI y DLF I, donde se enmarcan algunos lugares donde se tienen altas correlaciones directa e inversa.

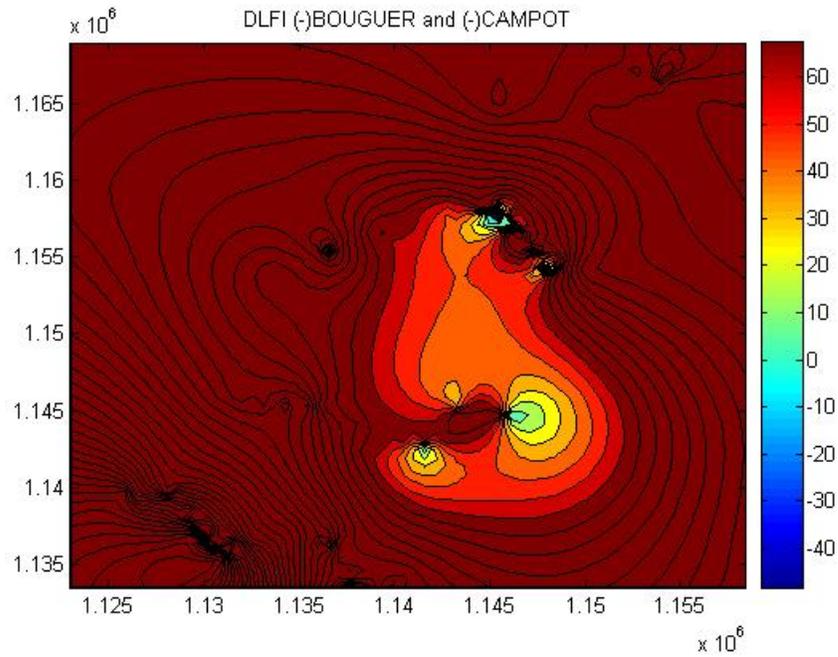


Figura 51. Coeficientes DLFI ≤ 17.2979 . Para anomalía de Bouguer y campo magnético Total. Mostrando la correlación inversa, valle con valle.

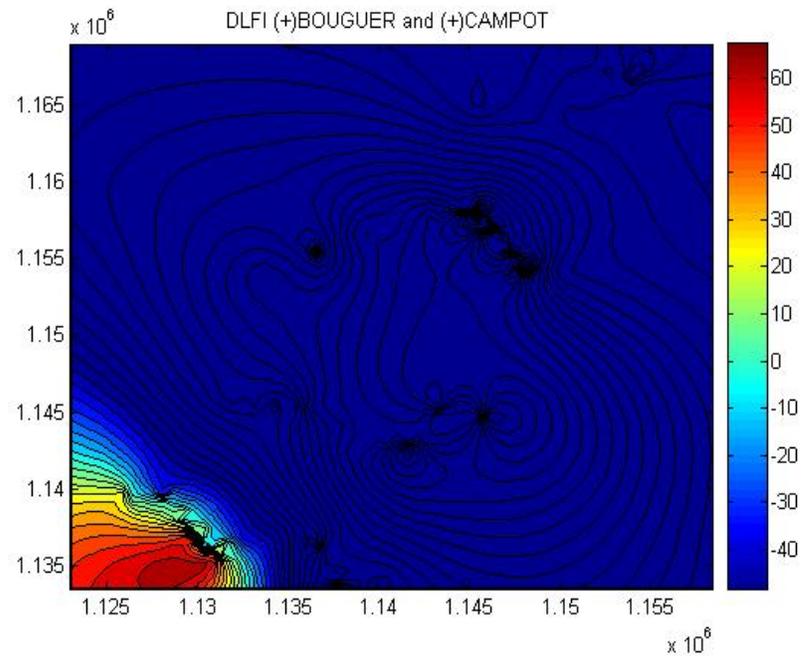


Figura 52. Coeficientes DLFI ≥ 17.2979 . Para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Mostrando la correlación inversa, cresta con cresta.

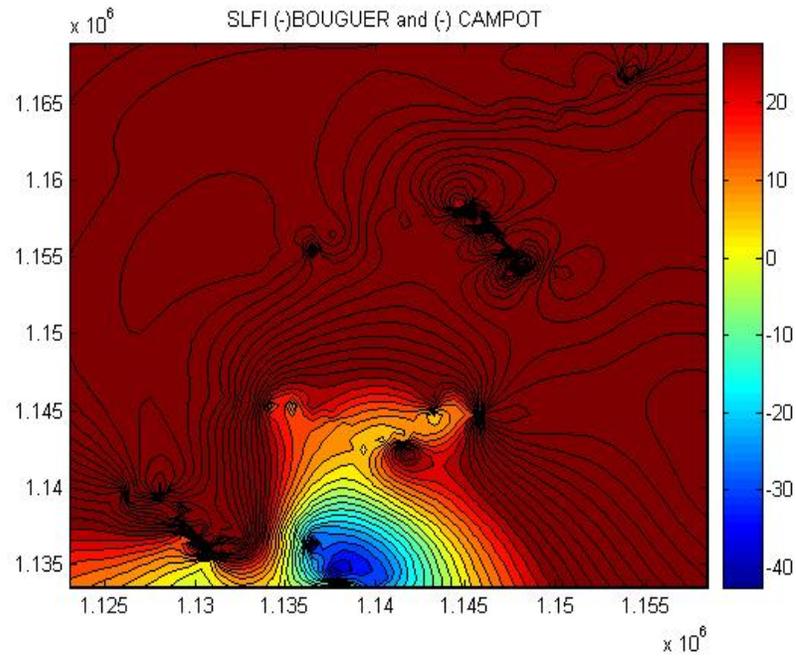


Figura 53. Coeficientes $SLFI \leq 10.0391$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con valle.

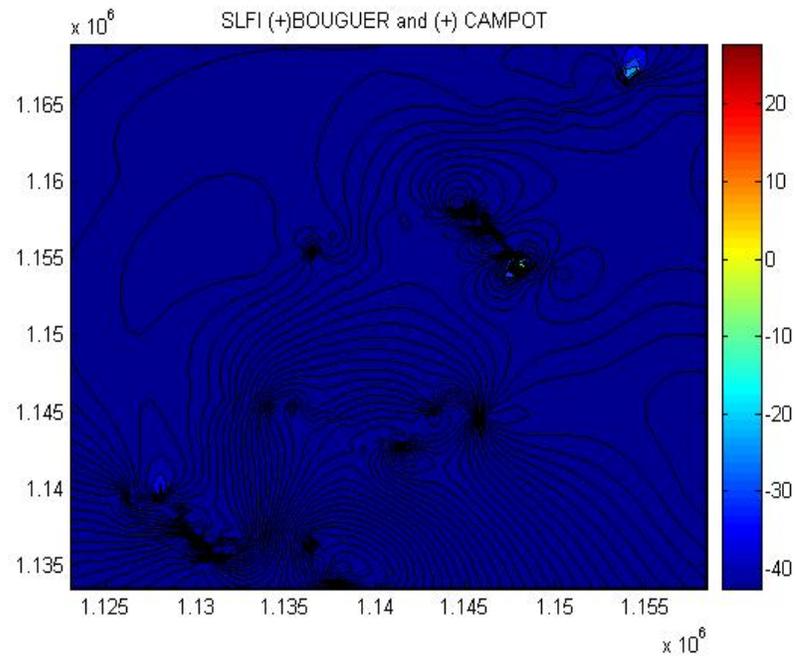


Figura 54. Coeficientes $SLFI \geq 10.0391$. Para anomalía de Bouguer y campo magnético total. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta.

Cómo se puede observar, al graficar los índices de favorabilidad directa e inversamente correlacionados, entre la anomalía gravimétrica de Bouguer y la anomalía de campo magnético total, es poco o casi nada lo que se puede observar, verificando una vez más que la relación entre el campo magnético y el gravimétrico no se deben comparar directamente.

Algo completamente diferente sucede cuando se grafican los índices para la anomalía de Bouguer y para la reducción al polo de los datos magnéticos, en este caso se puede observar cómo con los índices de correlación inversa, se marca el corredor de la Falla de Soapaga, mostrando que aunque su coeficiente de correlación es bajo; como se dedujo en el numeral anterior, se alcanza a evidenciar el contraste perteneciente a este tipo de estructura regional y se podrá entonces tener en cuenta para realizar el modelamiento inverso de los datos adquiridos en campo.

El mismo comportamiento descrito en el párrafo anterior se presenta también al graficar los índices de favorabilidad para las siguientes relaciones: Derivada en la vertical de Bouguer con la Reducción al Polo, anomalía de Aire Libre con la Reducción al Polo y la derivada en la vertical de la anomalía de Aire Libre con la Reducción al Polo, lo que verifica los datos obtenidos, analizados y descritos en el numeral anterior. Figuras 55, 56, 57, 58, 59 y 60.

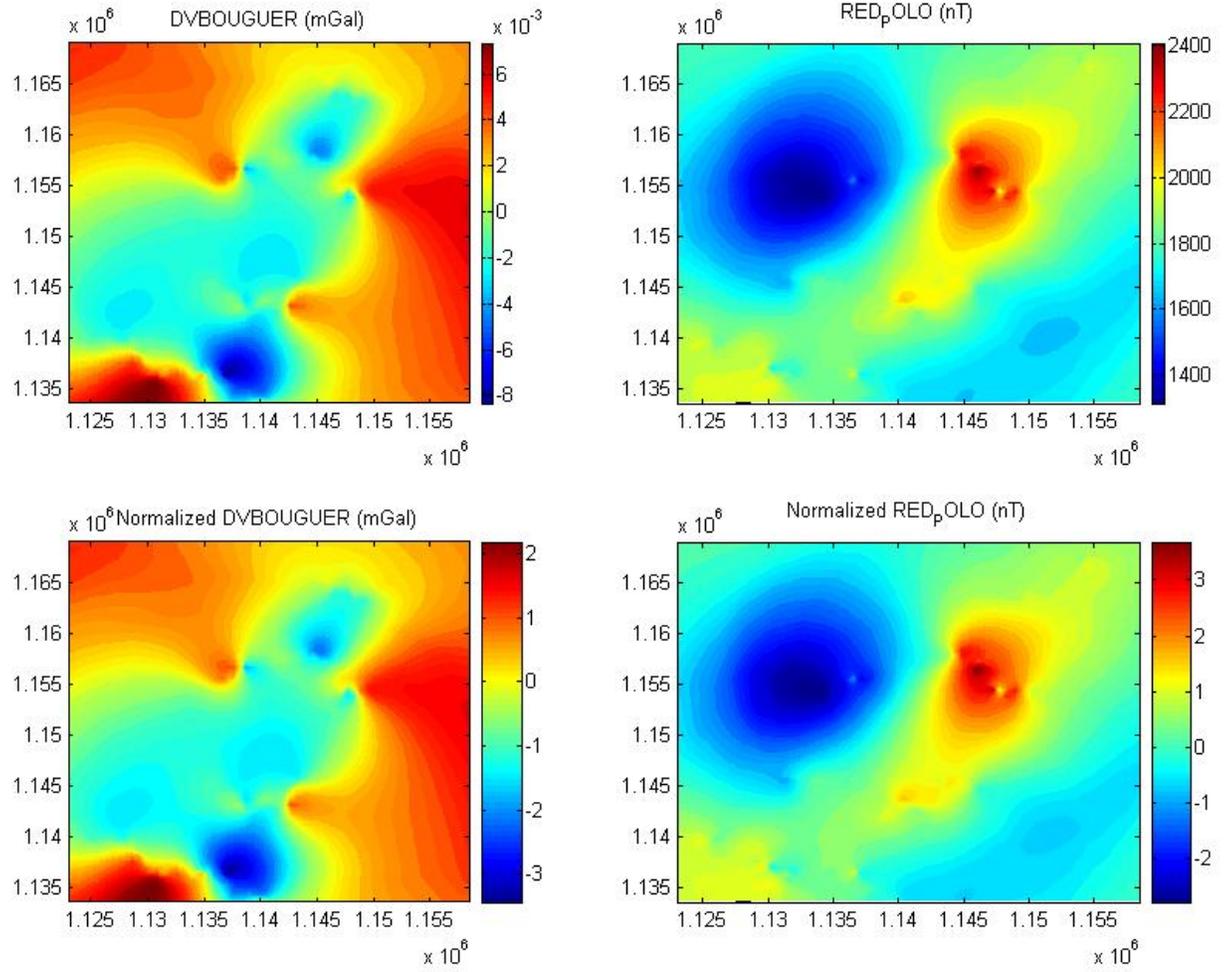


Figura 55. Mapas de la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total, en sus dimensiones normales y normalizados.

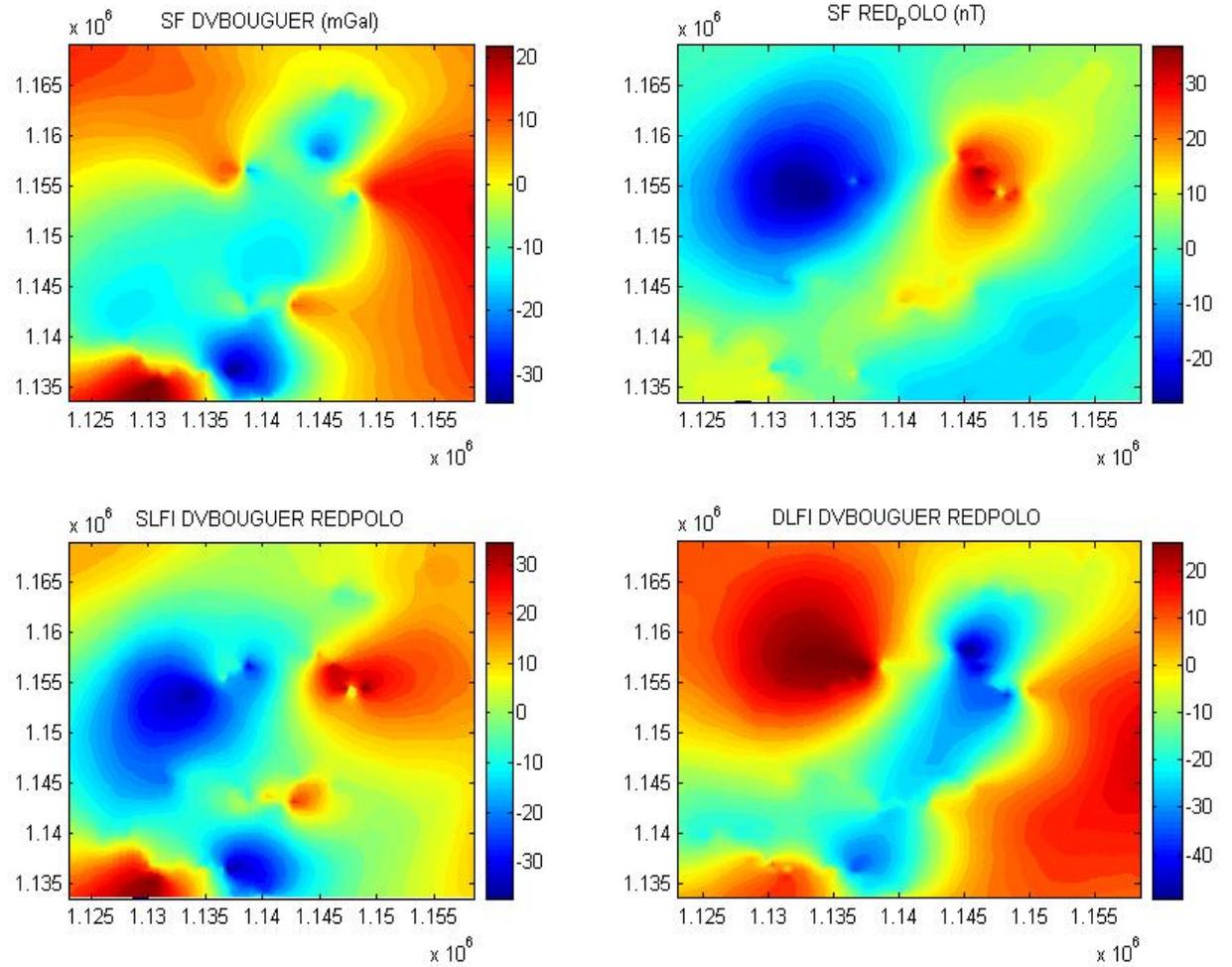


Figura 56. Mapas de los índices de favorabilidad de correlación directa e inversamente para la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total.

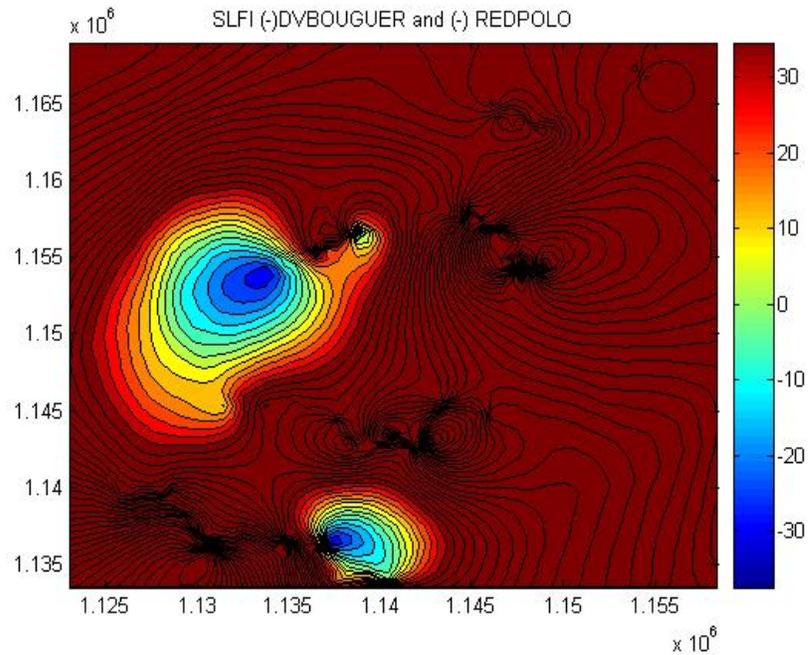


Figura 57. Coeficientes $SLFI \leq 13.4856$. Para primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con valle.

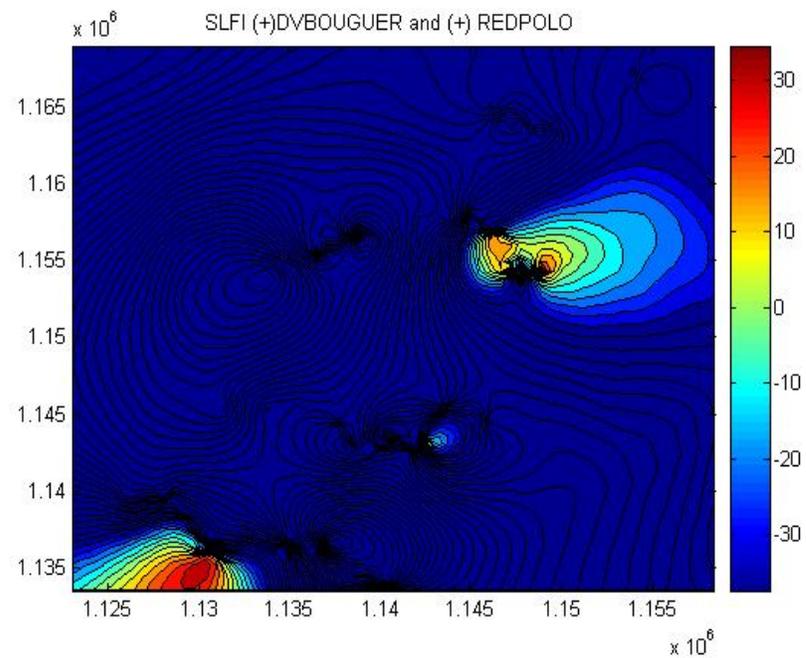


Figura 58. Coeficientes $SLFI \geq 13.5856$. Para la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta.

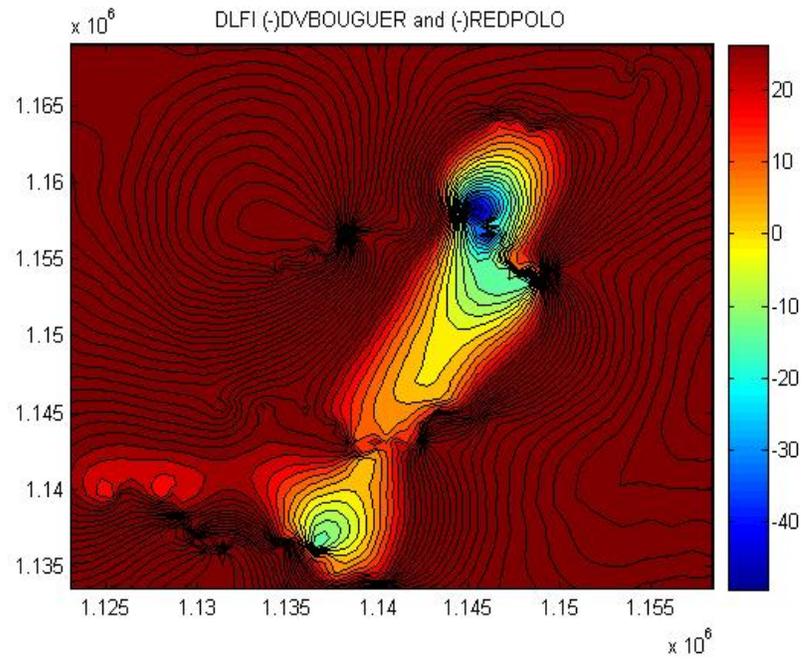


Figura 59. Coeficientes $DLFI \leq 14.7695$. Para primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético Total. Mostrando la correlación directa, valle con cresta.

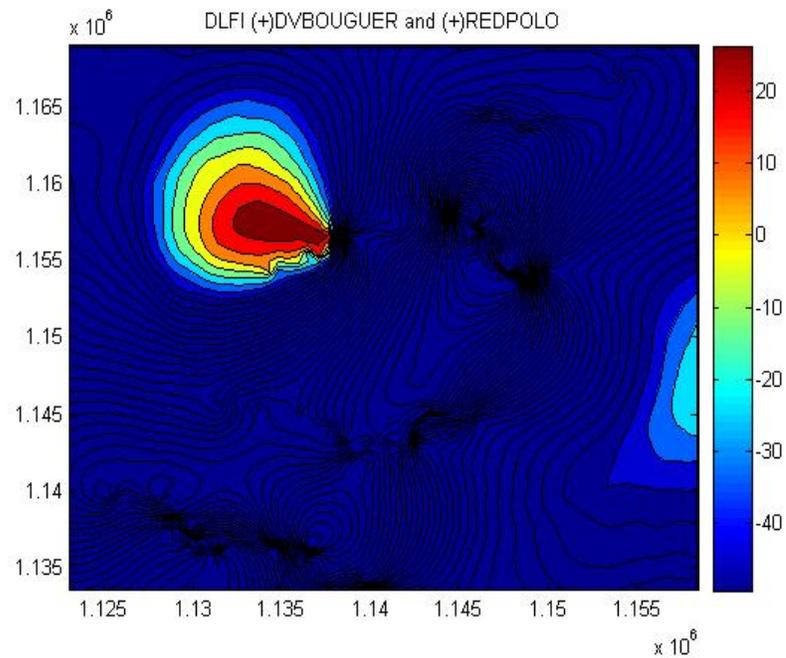


Figura 60. Coeficientes $DLFI \geq 14.7695$. Para la primera derivada en la vertical de la anomalía de Bouguer y la reducción al polo del campo magnético total. Mostrando la correlación directa, cresta con valle.

Al analizar los índices de favorabilidad para los datos obtenidos por medio del modelamiento directo con respecto a su correlación directa o inversa con los datos de campo y la gravimetría regional, presentaron contrastes que ayudaron a determinar conclusiones adicionales en cuanto a la prospección, cómo lo son la presencia de contrastes en las zonas que se catalogan como posibles campos, dentro de los cuales se encuentra en este momento; Buenavista (cerca al Municipio de Corrales, exactamente en la zona iluminada con amarillo). Figuras 61 y 62.

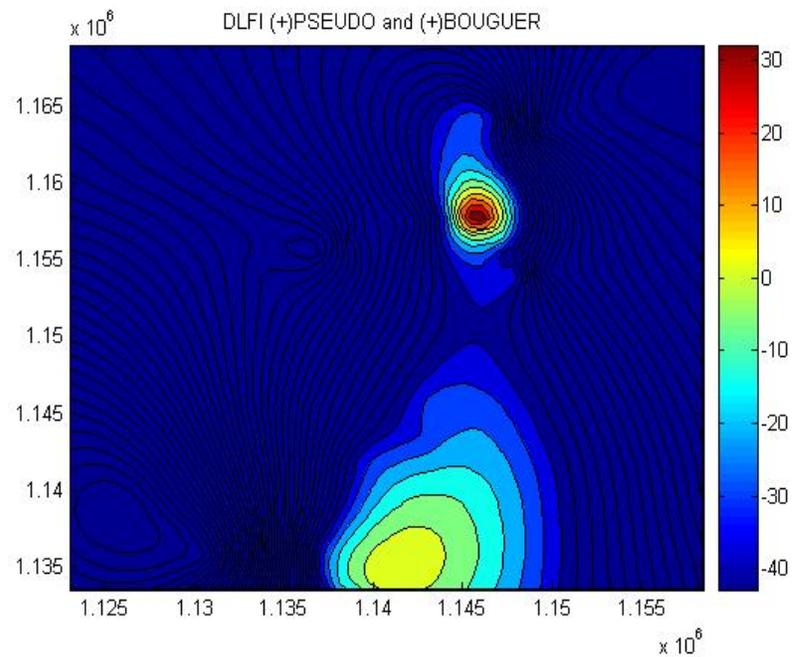


Figura 61. Coeficientes DLFI ≥ 17.1538 . Para el Pseudo campo gravimétrico y la anomalía de Bouguer. Mostrando la correlación directa, cresta con cresta.

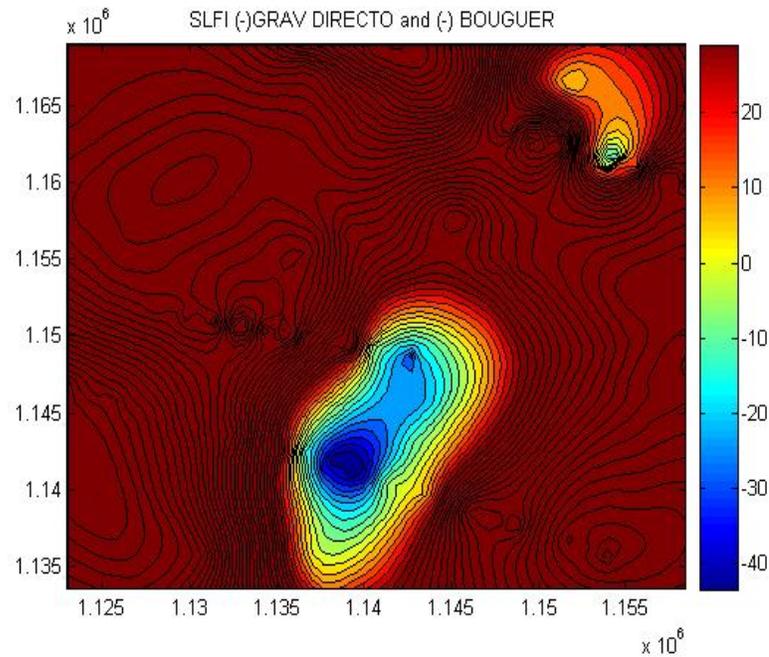


Figura 62. Coeficientes $DLFI \leq 13.0339$. Para la anomalía gravitacional del modelamiento directo y la anomalía de Bouguer. Mostrando la correlación directa, valle con valle.

4.6 Modelamiento Inverso

Dentro de la metodología propuesta es necesario recordar que para determinar los coeficientes de correlación y los índices de favorabilidad, fue necesario extraer una ventana de Z^n elementos; por requerimientos teóricos de la transformada rápida de Fourier. A partir de la generación de estas grillas cuadradas e interpoladas por Kriging, se extrajeron los datos gravimétricos y magnéticos de la zona y las interpolaciones de datos del modelamiento gravimétrico y magnético sobre los puntos en los cuales se realizó la adquisición en campo.

Con la base de datos generada se realizaron las correlaciones y se determinaron los índices de favorabilidad anteriormente descritos; para el modelamiento directo, se utilizó la anomalía

completa de Bouguer obtenida a partir de los puntos del IGAC y remuestreada de las grillas, sobre los puntos en los que se realizó la adquisición magnética. Y los datos Anomalía de campo magnético, determinados en campo. Se trazaron por medio de Oasis Montaj perfiles aproximados a una recta, debido a que los perfiles en campo se realizaron sobre los carreteables y por ser una zona altamente montañosa, presentan muchas curvas.

Los valores de densidad y susceptibilidad magnética utilizados durante la realización de estos modelos, son semejantes a las almacenadas en la tabla 2, debido a que éstas fueron extraídas de registros de pozo en el área de estudio.

En cuanto a las características estructurales obtenidas como resultado de las correlaciones espectrales entre los dos campos potenciales y los índices de favorabilidad, no son tan detalladas como se esperaba inicialmente, solo dan un indicio del tipo de anomalías que presenta la zona, en cuanto a la continuación de contrastes en profundidad, relacionadas a anomalías regionales y no residuales. Esto se sustenta teniendo en cuenta que los campos potenciales (gravimétrico y magnético) en el modelamiento directo, se correlacionan altamente con las derivadas en la vertical o continuaciones en profundidad de los datos de campo.

Este comportamiento también da un claro resultado del tipo de estructuras presentes en la zona, además de validar una vez más los perfiles geológicos desarrollados por el profesor Andreas Kammer, utilizados para el desarrollo de esta tesis.

Es a partir de estas determinaciones que se realizaron las siguientes inversiones que dieron como resultado un modelo de la Falla a lo largo de su corredor de influencia, empezando cerca al Municipio de Corrales y finalizando en vecindades del Municipio de Susacón.

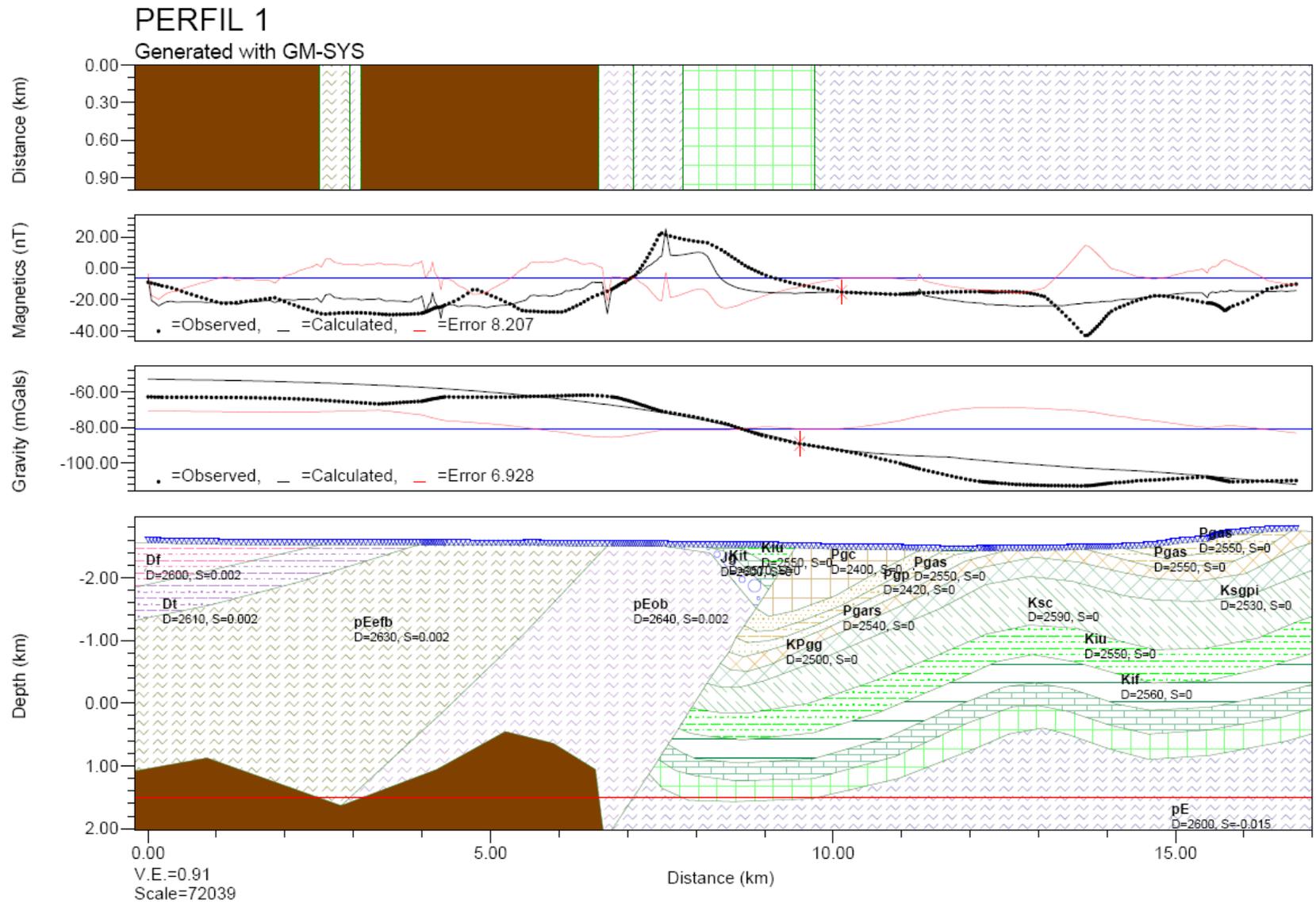


Figura 63. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Corrales. Perfil1.

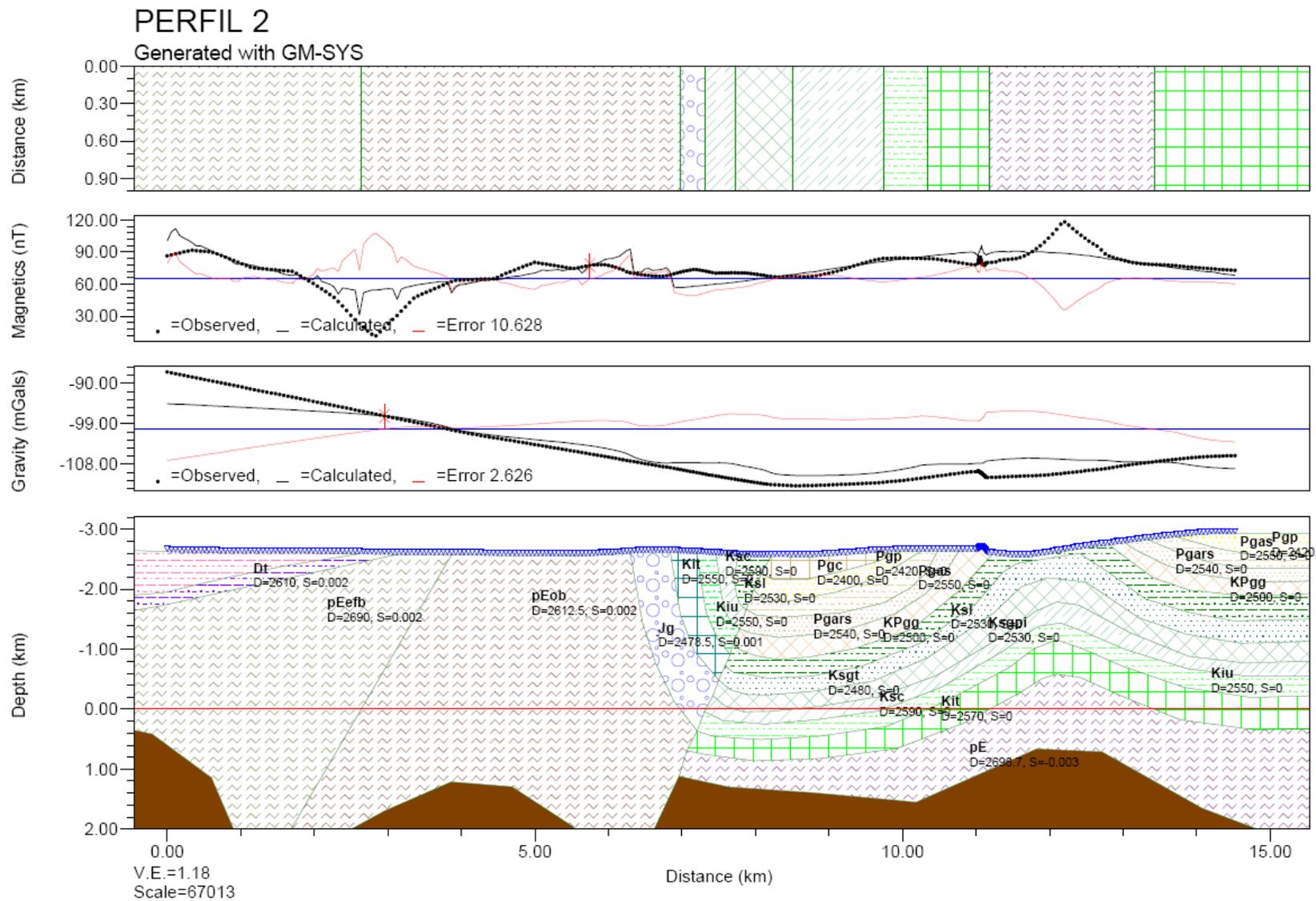


Figura 64. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Tasco. Perfil 2.

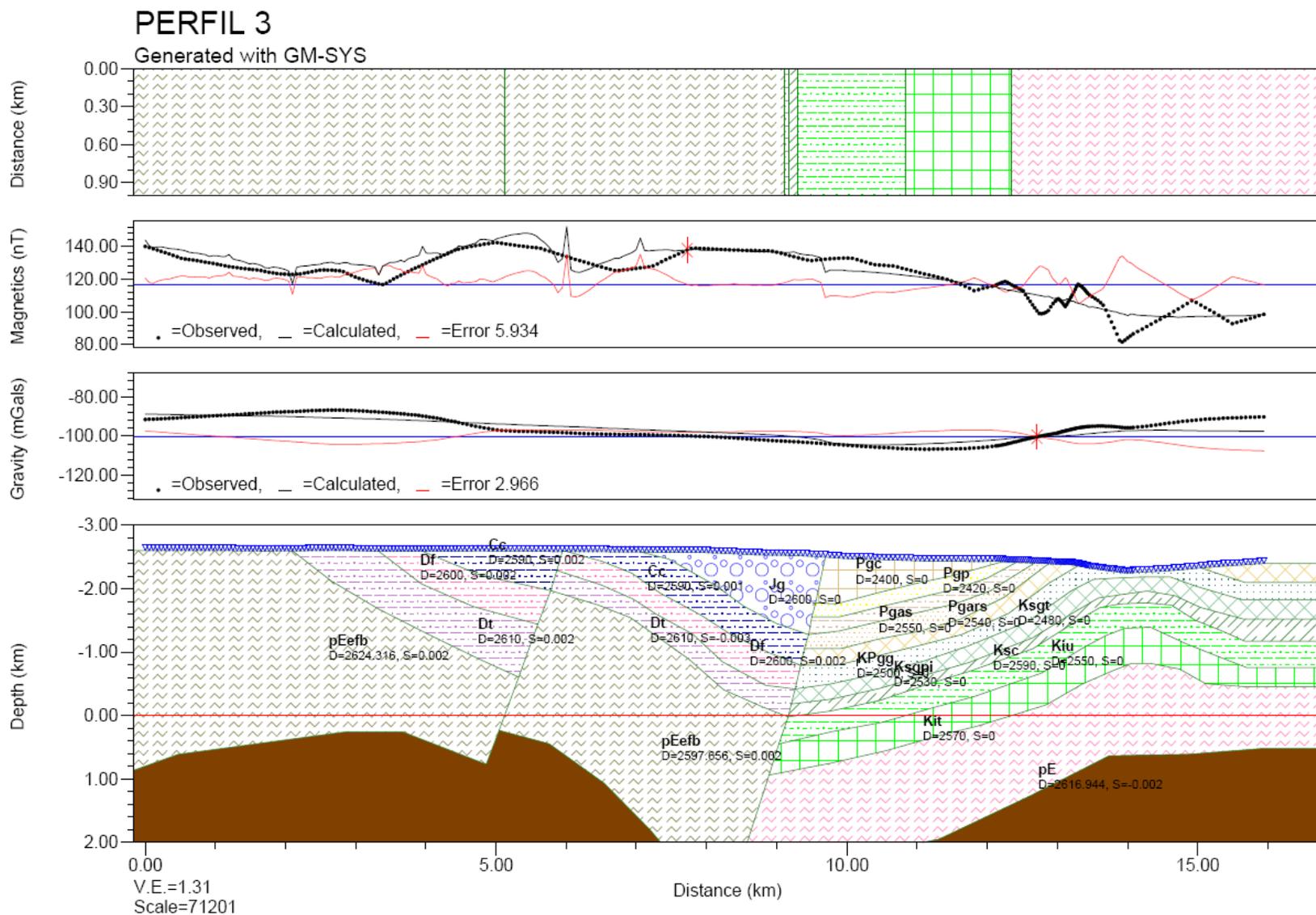


Figura 65. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Paz del Río. Perfil 3.

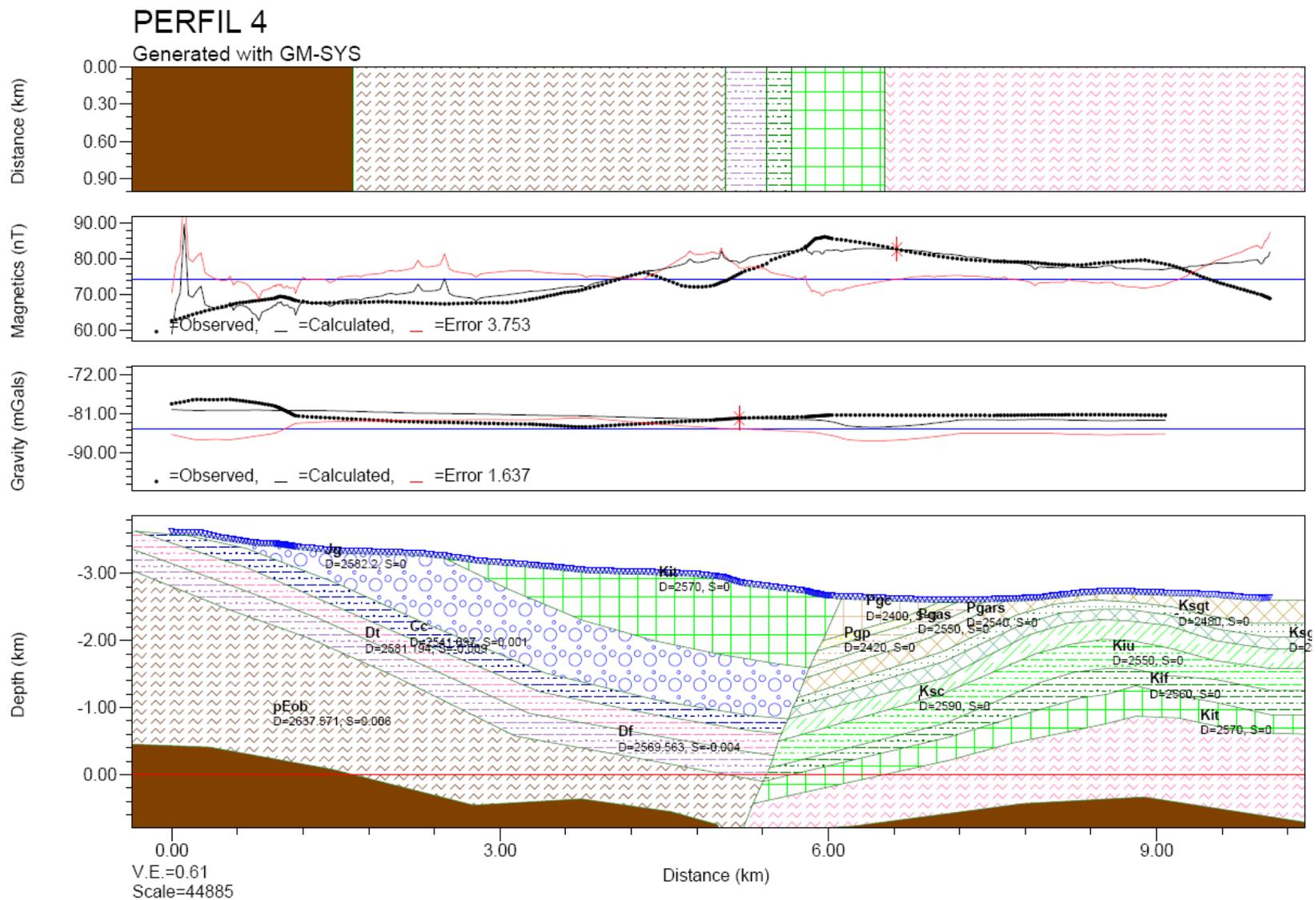


Figura 66. Modelamiento inverso de la Falla de Soapaga, a la altura del Municipio de Sativa Viejo. Perfil 4.

Cómo se puede observar la Falla mantiene muchas de las características estructurales descritas por los autores anteriormente mencionados en el capítulo 2, esto debido a la correlación determinada y explicada anteriormente y que al generar estos modelos inversos, el nivel de error es muy bajo ya que del 80% de los perfiles el valor de error generado en los modelos no supera el 10%.

Es así cómo se tiene un modelo que explica por ahora las respuestas gravimétricas y magnéticas, existentes y adquiridas, dentro del área de Estudio.

Dentro de las características de la estructura de Falla en el modelo realizado se puede concluir que:

- a. El ángulo de buzamiento permanece relativamente constante. En el perfil 1, presenta un ángulo de 66° , en el perfil 2 de 60.71° , en el perfil 3 de 64.64° , en el perfil 4 de 73.2° , y en el perfil 5 de 56° . Cuya desviación estándar es de 6.4° .
- b. En cuanto al espesor del basamento cristalino en toda la zona de estudio, se comporta constante, sin presentar grandes altos o bajos de espesor, por lo cual, se concluye que dentro de esta zona no sería rentable una posible exploración de minerales.
- c. El espesor de las unidades tiene un comportamiento importante en la respuesta gravimétrica, y se explica por el avance tectónico de la cuenca, en la cual se puede verificar una vez más que esta falla era de tipo Normal y luego por compresión se reactiva en un tipo de falla inversa. Lo que indica que la Falla no tiene influencia en el espesor de las unidades, sino el tipo de cuenca y depositación existente en la misma.

5. CONCLUSIONES

- Las observaciones llevadas a cabo en la visita de campo y el reconocimiento geológicos confirmaron la premisa inicial resultante de los altos topográficos y cañones presentes en el área. Es así cómo el trabajo de campo cumple con una labor muy importante en el desarrollo profesional de esta Maestría, ya que la mayoría de ocasiones se procesan datos de origen desconocido, y en la medida que no se tenga una visión clara de las estructuras y unidades presentes en las zonas de estudio, es muy complejo llegar a conclusiones satisfactorias.
- Las descripciones de material litológico presente en el área corresponden a formaciones viejas que componen al Macizo de Floresta, cuyo origen metamórfico facilita una mayor susceptibilidad magnética y se encuentran en contacto con material de edad menor y origen sedimentario. Este tipo de contrastes hace que sea un muy buen ejemplo para explicar las respuestas gravimétricas que presentaría el área.
- Los modelos teóricos han permitido determinar que en el caso de una Falla Regional como ésta, se genera un contraste de densidades, al poner en contacto unidades de edades y composiciones diferentes y ocasionando anomalías gravimétricas variables. La respuesta magnetométrica se debe a los afloramientos del intrusivo de Aguachica, en la zona oeste de la falla.

- Dentro de las grillas de anomalías de campos potenciales se observó que los contrastes se encontraban desplazados con respecto al rumbo cartografiado de la Falla. esto se explicó por medio de las correlaciones y los índices de favorabilidad en los cuales, los campos tiene mayores coeficientes de correlación negativos o positivos, cuando se trabaja con su continuación en la vertical, es decir evidencia un claro contraste en profundidad.
- Los valores de correlación espectral estuvieron en su mayoría por debajo del 50%, esto a causa de la falta de datos de campo gravimétrico que fuesen corregistrados con los datos de campo magnético. A partir de la obtención de estos datos se podrían generar nuevas conclusiones sobre la respuesta que genera la Falla, al tener mayor resolución.
- Se verificó que las correlaciones entre anomalías de campo gravimétrico y magnético no se deben correlacionar directamente, ya que presentaron valores por debajo de 0.1 en estos coeficientes. Esto tiene explicación en la naturaleza física de cada uno de los campos, mientras el campo gravitacional explica las propiedades de todo el cuerpo y por tanto es monopolar, el campo magnético o la anomalía detectada por los levantamientos son la respuesta de minerales magnéticos presentes en las rocas, los cuales la mayoría de veces no superan el 5% del tamaño total de la roca, adicional a esto es un campo bipolar.
- Los coeficientes altos de correlación entre los valores de la derivada en la vertical de la anomalía de campo gravitacional y la reducción al polo del campo magnético marcan y evidencian, nuevamente, que el tipo de contraste que presenta esta Falla es en profundidad.

- Los resultados del punto anterior también se evidenciaron en la determinación de los índices de favorabilidad, en los cuales se mostró claramente el corredor de influencia de la Falla de Soapaga.
- Los mapas en los cuales se evidenciaron altos contrastes entre los índices de favorabilidad resaltaron zonas que a simple vista no tenían ningún atractivo en particular, pero al comparar dichos puntos con los posibles plays planteados dentro del proyecto de la ANH y la Universidad Nacional de Colombia, se observó que correspondían a las mismas zonas planteadas, entre ellas un bloque que actualmente es productor. Su producción es muy poca y su grado API es de aproximadamente 18, pero corresponde con el tipo de hidrocarburo característico de esta zona.
- La utilización de esta metodología fue lo suficientemente buena como para dar resultados satisfactorios del comportamiento de la Falla, la falta de resolución en los datos gravimétricos y la falta de un mayor contraste de susceptibilidades magnéticas en la zona no permitieron mostrar los beneficios de este tipo de modelamiento.
- Con esta tesis se pudo mostrar, un vez más, gráficamente, resultados que por lo general se quedan en la parte matemática de su formulación, pero en la práctica nunca se muestran los resultados, como lo es la determinación de pseudo gravedad a partir de un software Magpick de Geometrics que en teoría se basa en el Teorema de Poisson, digo en teoría ya que el manual no explica, con mayor detalle, cómo llega a esta solución y adicional a esto no fue muy satisfactoria o mejor no cumplió con las expectativas que se tenían, esto se debe explicar

por la falta de opciones en el menú de entrada de datos para la generación del modelo, ya que en ninguna ocasión se debe incluir un valor promedio de magnetización o de densidad.

- Lo mejor de utilizar los coeficientes de correlación y los índices de favorabilidad, fue la ventaja de trabajar con datos numéricos en la comparación de los modelos, debido a mi pregrado, es importante para mi saber de forma más cuantitativa y menos cualitativa, lo acertado que puede ser un modelo o no, adicional a cual es el porcentaje de error, ya que adicional a esto la geofísica tiene un poco más de rigurosidad en las interpretaciones cuantitativas que la Geología.

6. RECOMENDACIONES

- Dentro de los trabajos de tesis o materias de la Maestría en Geofísica de la Universidad, se debería implementar el trabajo en campo, es una experiencia enriquecedora, sobre todo para una profesión como la mía. Pero adicional a esto, permite un mejor entendimiento de la estructura de la tierra, su comportamiento dinámico y la composición geológica de las zonas visitadas.
- Para estudios posteriores sería interesante modificar el flujo de matlab para poder correlacionar directamente los perfiles adquiridos en campo y de esta forma no perder resolución con las interpolaciones de grillaje, debido a que la Falla presenta diferentes buzamientos a lo largo de la zona.
- La posible utilización de métodos de interpolación que también incluyan correlación espacial, en este tipo de estudios, donde se sabe o se pretende saber en donde se encuentra la falla, podrá permitir saber si algunas mediciones tienen más peso que otras por encontrarse más cerca o lejos de la zona de influencia, es así que en el anexo 2 se encuentra la descripción de tipo de correlación que se aconseja utilizar para determinar con precisión las posiciones en las cuales se deben tomar datos en campo y adicional a esto, utilizar una interpolación que tenga en cuenta la correlación espacial de las estaciones. Este procedimiento no se pudo realizar por falta de tiempo y porque el curso de geoestadística para el análisis de los datos de la tesis se tomó finalizando este semestre.

- Definitivamente los resultados obtenidos en esta tesis hubiesen sido de mucha mejor calidad en la medida en la que se realizara la toma de las dos anomalías de campos potenciales, esto no fue posible debido a que los equipos de la Universidad Nacional de Colombia estuvieron fuera de funcionamiento por más de un año, por esta razón, luego de esperar más de 6 meses a la reparación de los mismo, la empresa TEP LTDA me colaboró con magnetómetros autofinanciados para poder adquirir los datos.

7. BIBLIOGRAFIA

1. CARDOZO N, GALINDO J. 1995. Análisis estructural de las zonas del Bloque colgante y el bloque yacente de la Falla de Soapaga entre Corrales y Paz del Río. (Boyacá, Colombia. Informe Ecopetrol)
2. CASTELLANOS, M, GARCIA, A 1997. Modelo geofísico de la Falla de Soapaga. Tesis para optar al título de Geólogos. Universidad Nacional de Colombia.
3. CEDIEL, F. 1969. Geología del Macizo de Floresta. 1 Congr. Col. Geol., Mem. :17-29. COLOMBIAN SOCIETY OF PETROLEUM GEOLOGISTS AND GEOPHYSICISTS, 1961. Cundinamarca-Boyaca Muzo Emerald Mines. 2a Annual Field Conf., 29 p. Bogota.
4. DENG0 C, COVEY M, 1993. Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: Implications for traps styles and regional tectonics. AAPG Vol 77. No. 8. p 1315 – 1337.
5. GRANT, F. S., and West, G. F. 1965. Interpretation theory in applied geophysics: McGraw-Hill Book Co.
6. GEOSOFT. Manual del Usuario Módulo de Geofísica. 2003.
7. HERNANDEZ, O. 2008. New magnetic anomalies map of Colombia MAM-2008. Earth Sciences Research Journal. Vol. 12. Special Edition.
8. HERNANDEZ, O. 1995. Visualization of hidden geology in a 2D GIS with support from interpretation of potential field anomalies, MS thesis, International Institute for Geoinformation. Science and Earth Observation, 1995. 1-75.
9. HERNANDEZ, O. 2008. New gravity map of Colombia CBAM-2008. Science and Earth Observation, 1995. 1-75.

10. HUBBERT, M. K. 1948. A line-integral method of computing the gravimetric effects of two-dimensional masses: *Geophysics*, 13, 215-225.
11. INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI - IGAC. 1998, *Gravimetria 1998*. 1-320.
12. JARAMILLO, ROA, TORRES. 1993. Relaciones estratigráficas entre las unidades del paleoceno del Piedemonte llanero y la parte media de la Cordillera Oriental. Tesis para optar al título de Geólogos. N. 335. Universidad Nacional de Colombia.
13. KAMMER, A. 2007. Perfiles estructurales sobre el Bloque Soapaga Cordillera Oriental. Sin Publicar.
14. MARQARDT, D.W. 1963. An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters: *J.SIAM*, v.11, 431-441.
15. MEJIA M, GIRALDO, 1993. Estudio petrográfico de la Formación Picacho en un área al noroeste de Sogamoso. Tesis para optar al título de Geólogos. N. 338. Universidad Nacional de Colombia.
16. MOJICA, J.; VILLARROEL, C. 1984. Contribución al conocimiento de las Unidades Paleozoicas del área de Floresta (Cordillera Oriental Colombiana, Departamento de Boyacá) y en especial al de la Formación Cucho. *U. Nal., Geol. Col.*, 13:55-80. Bogota.
17. NAVAS, J. 1963. Estudio estratigráfico del Girón al W del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia). *UIS, Bol. Geol.*, (12):19-34. Bucaramanga.
18. RASMUSSEN, R., and Pedersen, L. B. 1979. End corrections in potential field modeling: *Geophysical Prospecting*, 27, p. 749-760.
19. TALWANI, M., and Heirtzler, J. R., 1964, Computation of magnetic anomalies caused by twodimensional bodies of arbitrary shape, in Parks, G. A., *Computers in the mineral industries*, Stanford Univ. Publ. Geol. Sci. 9, 464-480.

20. TALWANI, M., Worzel, J. L., and Landisman, M., 1959, Rapid gravity computations for twodimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone: J. Geophys. Res., 64, 49-59.
21. TARBUCK, E. Ciencias de la Tierra. Ed. Person Education. 2005
22. TORO, J. 1990. The termination of the Bucaramanga fault in the Cordillera Oriental de Colombia. Thesis of Master. University of Arizona.
23. ULLOA, C. y RODRIGUEZ, 2001, Geología de la plancha 172. Escala 1:100000. INGEOMINAS.
24. WEBRING, M., 1985, SAKI: A Fortran program for generalized linear inversion of gravity and magnetic profiles: USGS Open File Report 85-122, 29 p.
25. WON, I. J., and Bevis, M., 1987, Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines: Geophysics, 52, 232-238.
26. www.rondacolombia2008.com, Cuenca Cordillera Oriental.

8. ANEXOS

ANEXO 1. Convenciones Tabla De Correlaciones Espectrales

| | |
|---------------------------------------|---|
| CC | Coeficientes de correlación espectral |
| FAA | Anomalía de aire libre. Datos del IGAC. |
| $\frac{\partial(FAA)}{\partial Z}$ | Primera derivada e la vertical de la anomalía de aire libre. Datos del IGAC. |
| CBA | Anomalía de Bouguer. Datos del IGAC. |
| $\frac{\partial(CBA)}{\partial Z}$ | Primera derivada e la vertical de la anomalía de Bouguer. Datos del IGAC. |
| TF | Campo magnético total. Datos de campo. |
| RTPMAG | Reducción al polo. Datos de campo. |
| PSEUDO MAG | Pseudo campo gravimétrico. Datos de campo. |
| CBA_D | Anomalía gravimétrica. Datos de modelamiento directo. |
| $\frac{\partial(CBA_D)}{\partial Z}$ | Primera derivada e la vertical de la anomalía de Bouguer. Datos del IGAC. |
| PSEUDO_D | Pseudo campo gravimétrico determinado a partir de los datos de campo magnético de modelamiento directo. |
| TF_D | Campo magnético. Datos de modelamiento directo. |
| RTPMAG_D | Reducción al polo. Datos de modelamiento directo. |

ANEXO 2. Procedimiento Para La Determinación De Puntos Óptimos De Muestreo.

Funciones de Correlación Espacial

La primera etapa en el desarrollo de un análisis geoestadístico es la determinación de la dependencia espacial entre los datos medidos de una variable. Esta etapa es también conocida como análisis estructural. Para llevarla a cabo, con base en la información muestral, se usan tres funciones: El semivariograma, el covariograma y el correlograma experimental. A continuación se hace una revisión de los conceptos asociados a cada una de ellas y se describen sus bondades y limitaciones.

Variograma y Semivariograma.

Representa la varianza de los incrementos de la variable regionalizada y se denota por $2g(h)$. De acuerdo con lo anterior utilizando la definición teórica de la varianza en términos del valor esperado de una variable aleatoria, tenemos:

$$\begin{aligned} 2\gamma(h) &= V(Z(x+h) - Z(x)) \\ &= E\left((Z(x+h) - Z(x))^2\right) - \underbrace{\left(E(Z(x+h) - Z(x))\right)^2}_0 \\ &= E\left((Z(x+h) - Z(x))^2\right). \end{aligned}$$

La mitad del variograma ($g(h)$), se conoce como la función de semivarianza y caracteriza las propiedades de dependencia espacial del proceso. Dada una realización del fenómeno, la función de semivarianza es estimada por medio del semivariograma experimental, que se calcula mediante (Wackernagel, 1995):

$$\gamma(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n(h)}$$

donde $Z(x)$ es el valor de la variable en un sitio x , $Z(x+h)$ es otro valor muestral separado del anterior por una distancia h y $n(h)$ es el número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia.

Covariograma y Correlograma.

De acuerdo con la fórmula de la covarianza dada en el capítulo uno, la función de covarianza espacial entre parejas de observaciones que se encuentran a una distancia h está dada, con base en los datos muestrales, por:

$$\begin{aligned} \text{COV}(Z(x+h), Z(x)) &= \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x+h) - m)(Z(x) - m)}{n} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n (Z(x+h) \cdot Z(x))}{n} - m^2 = C(h) \end{aligned}$$

donde m , si el proceso es estacionario de segundo orden, representa el valor promedio en todo punto de la región de estudio y n es el número de parejas de puntos que se encuentran a una distancia h . De otro lado para determinar la fórmula del correlograma, dado que se conoce el covariograma, sólo faltaría establecer las desviaciones estándar en cada punto del dominio. Sin embargo, si el fenómeno es estacionario, éstas al igual que la media son constantes y por consiguiente:

$$r(h) = \frac{\text{COV}(Z(x+h), Z(x))}{S_{x+h} \cdot S_x} = \frac{C(h)}{S_x^2} = \frac{C(h)}{V(Z(x))} = \frac{C(h)}{C(0)}$$

Cualquiera de las tres funciones de dependencia espacial mencionadas, es decir semivariograma, covariograma o correlograma, puede ser usada en la determinación de la relación espacial entre los datos. Sin embargo como se puede observar en las fórmulas, la única que no requiere que la media del proceso (m) sea conocida, es la función de semivarianza. Por esta razón, fundamentalmente, en la práctica se emplea el semivariograma y no las otras dos funciones. A continuación se presenta un ejemplo ilustrativos del cálculo de la función de semivarianza experimental.

Suponga que se tienen medidas sobre una variable hipotética cuyos valores están comprendidos entre 28 y 44 unidades y su configuración en la región de estudio es como se presenta en el esquema de la siguiente página. Como se indica en la representación, la distancia entre cada par de puntos contiguos es de 100 unidades. Luego si existe un punto faltante la distancia entre los dos valores ubicados a cada lado de éste será de 200 unidades.

Veamos como calcular bajo esta situación el semivariograma experimental. Por simplicidad, se calcularán sólo los semivariogramas en sentido “occidente-oriente” (izquierda-derecha) y “sur-norte” (inferior-superior), debido a que para obtener un semivariograma experimental en el que sólo se tenga en cuenta la distancia y no la orientación, se requeriría calcular la distancia euclidiana entre todas las parejas de puntos.

| | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| 44 | | 40 | 42 | 40 | 39 | 37 | 36 | |
| 42 | | 43 | 42 | 39 | 39 | 41 | 40 | 38 |
| 37 | 37 | 37 | 35 | 38 | 37 | 37 | 33 | 34 |
| 35 | 38 | | 35 | 37 | 36 | 36 | 35 | 200 |
| 36 | 35 | 36 | 35 | 34 | 33 | 32 | 29 | 28 |
| 38 | 37 | 35 | | 30 | | 29 | 30 | 32 |

← 100 →

↑
200
↓

En primer lugar en sentido izquierda-derecha se encuentran todas las parejas de puntos que están a una distancia de 100 unidades. Una vez detectados estos puntos se aplica la fórmula del semivariograma experimental. De igual forma se procede para las distancias de 200, 300, 400 y 500 unidades. Específicamente en el caso de las distancias de 100 y 200 unidades se realiza la siguiente operación:

$$g(100) = (38 - 37)^2 + (37 - 35)^2 + (29 - 30)^2 + \dots + (37 - 36)^2 / 2 * 36 = 1.458$$

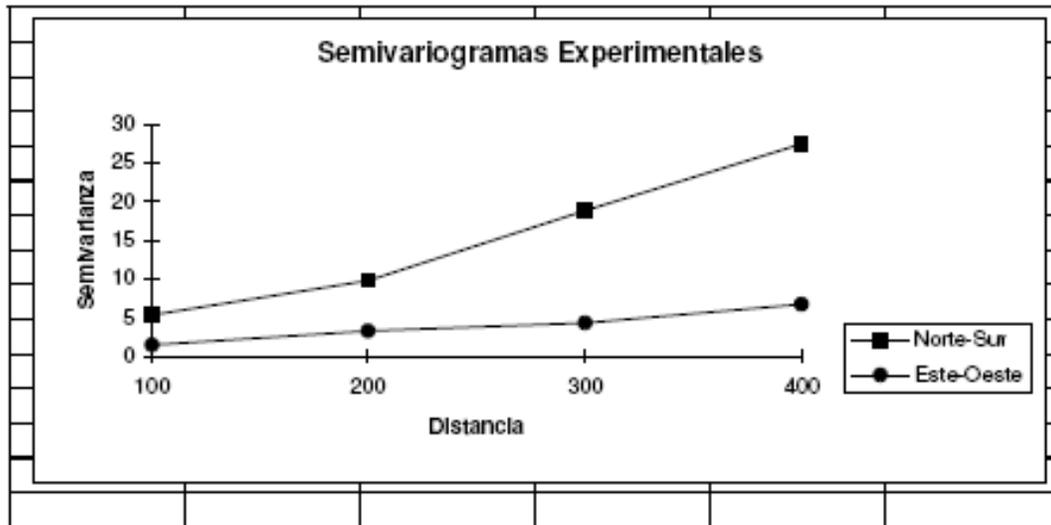
$$g(200) = (40 - 44)^2 + (40 - 40)^2 + (42 - 39)^2 + \dots + (29 - 32)^2 / 2 * 36 = 3.303$$

Similarmente procedemos para las otras distancias y para el sentido inferior-superior. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

VALORES DE LA FUNCIÓN DE SEMIVARIANZA EXPERIMENTAL EN DOS DIRECCIONES PARA EL CONJUNTO DE DATOS HIPOTÉTICOS DE LA CONFIGURACIÓN DE DATOS DADA.

| Distancia | Semivarianza Sentido Este - Oeste | Semivarianza Sentido Norte - Sur |
|-----------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 100 | 1.45 | 5.34 |
| 200 | 3.30 | 9.87 |
| 300 | 4.31 | 18.88 |
| 400 | 6.69 | 27.53 |

Al graficar los valores de la función de semivarianza experimental dados en la tabla anterior se observa que en sentido inferior-superior el semivariograma es mayor que en sentido izquierda-derecha, luego la conclusión más relevante para este conjunto de datos es que la estructura de correlación espacial no sólo depende de la distancia entre las observaciones, sino de su orientación. En otras palabras el fenómeno es *anisotrópico* (debido a que el sill en las dos direcciones es distinto existe anisotropía zonal; Samper & Carrera, 1990).



Función de semivarianza experimental en dos direcciones para el conjunto de datos hipotéticos del ejemplo de esta sección.

ANEXO 3. Flujo En Matlab Para La Determinación De Coeficientes De Correlación E

Índices De Favorabilidad

```

% -----
%FAVORABILITY INDICES
%INPUT DATA
clear all;
clc;
fprintf('----- \n');
    Clock2 = clock;
    Date2 = Clock2(1, 1 : 3);
    Time2 = Clock2(1, 4 : 6);

    fprintf('Starting Date : %4f %2f %2f \n', Date2);
    fprintf('Starting Time : %2f %2f %4.2f \n', Time2);
    fprintf(' \n');
% -----

[lat,lon,faga1]=textread('BOUGUER.txt','%n%n%n');
[lat,lon,tge1]=textread('MAGPOLO.txt','%n%n%n');
%Reshape data from 4096X1 to 64x64

BOUGUER=reshape(BOUGUER1,64,64);
MAGPOLO=reshape(POLO1,64,64);
%obtain mean values and standard deviation, using the vector array 4096x1

Mean_bouguer=mean2(BOUGUER);
Mean_magpolo=mean2(MAGPOLO);

Std_BOUGUER=std2(BOUGUER);
Std_magpolo=std2(MAGPOLO);

%NORMALIZATION= For each dataset the mean value is removed and the result
%is divided by the standard deviation
Nor_BOUGUER= (BOUGUER-Mean_BOUGUER)/Std_BOUGUER;
Nor_MAGPOLO= (TGE-Mean_MAGPOLO)/Std_MAGPOLO;

%ENHANCE FACTOR= A scale factor is used to enhance the differences in the
%datasets, for example the datasets are multiplied by a factor of five

SF=10;
SF_BOUGUER=Nor_BOUGUER*SF;
SF_MAGPOLO=Nor_MAGPOLO*SF;

%FAVORABILITY INDEXES = We obtain the summation and difference of the
%normalized and enhanced data sets

```

```

SLFI_BOUGUER_MAGPOLO= SF_BOUGUER + SF_MAGPOLO;
DLFI_BOUGUER_MAGPOLO= SF_BOUGUER - SF_MAGPOLO;

%Obtain peak to peak and trough to trough corelative features

Std_SLFI=std2(SLFI_BOUGUER_MAGPOLO

%SLFI_peak_peak = SLFI_MAGPOLO_BOUGUER - Std_SLFI;

%SLFI_trough_trough= SLFI_MAGPOLO_BOUGUER + Std_SLFI ;

%Obtain peak to trough and trough to peak corelative features
Std_DLFI=std2(DLFI_BOUGUER_MAGPOLO);
%DLFI_peak_trough = DLFI_MAGPOLO_BOUGUER + Std_DLFI;
%DLFI_trough_peak= DLFI_MAGPOLO_BOUGUER - Std_DLFI;

%=====
=

%Plotting results

MinLat = 1123000;
MaxLat = 1158437.5;
MinLon = 1133500;
MaxLon = 1168937.5;

x=unique(lat);
y=unique(lon);

figure;
subplot(2, 2, 1);
    contourf(x,y,(BOUGUER'),50)
    colorbar;
    title('BOUGUER (mGal)');

subplot(2, 2, 2);
    contourf(x,y,(MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('RED_POLO (nT)');

subplot(2, 2, 3);
    contourf(x,y,(Nor_BOUGUER'),50)
    colorbar;
    title('Normalized BOUGUER (mGal)');

subplot(2, 2, 4);
    contourf(x,y,(Nor_MAGPOLO'),50)

```

```

    colorbar;
    title('Normalized RED_POLO (nT)');

figure;
subplot(2, 2, 1);
    contourf(x,y,(SF_BOUGUER'),50)
    colorbar;
    title('SF BOUGUER (mGal)');

subplot(2, 2, 2);
    contourf(x,y,(SF_MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('SF RED_POLO (nT)');

subplot(2, 2, 3);
    contourf(x,y,(SLFI_BOUGUER_MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('SLFI BOUGUER RED_POLO ');

subplot(2, 2, 4);
    contourf(x,y,(DLFI_BOUGUER_MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('DLFI BOUGUER RED_POLO');

figure;
    contourf(x,y,(SLFI_BOUGUER_MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('SLFI (+)BOUGUER and (+) RED_POLO ');

figure;
    contourf(x,y,(SLFI_BOUGUER_MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('SLFI (-)BOUGUER and (-) RED_POLO');

figure;
    contourf(x,y,(DLFI_BOUGUER_MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('DLFI (+)BOUGUER and (+)RED_POLO');

figure;
    contourf(x,y,(DLFI_BOUGUER_MAGPOLO'),50)
    colorbar;
    title('DLFI (-)BOUGUER and (-)RED_POLO');

% -----
fprintf(' \n');
fprintf('----- \n');
Clock3 = clock;

```

```
Date3 = Clock3(1, 1 : 3);  
Time3 = Clock3(1, 4 : 6);  
  
fprintf('Ending Date : %f %f %f \n', Date3);  
fprintf('Ending Time : %f %f %f \n', Time3);  
fprintf('----- \n');  
% -----
```

El flujo de correlación espectral y la base de datos realizada en Oasis Montaj se encontraran en el CD anexo a la tesis, al igual que las coberturas utilizadas para los mapas y los perfiles en GMSYS originales.