



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

---

---

## FACULTAD DE INGENIERIA

División Ciencias de la Tierra

**MODELO GEOLOGICO-ESTRUCTURAL DEL VALLE DE LEON A PARTIR DE  
CARTOGRAFÍA AEROMAGNÉTICA CON SU APLICACIÓN HIDROGEOLÓGICA**

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el título de

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**Presenta**

**FRANCISCO JAVIER SÁNCHEZ BRAVO**

**Tutor**

**Dr. JORGE ARZATE FLORES**



MÉXICO, D.F. ABRIL 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## *Dedicatoria*

### *A mis Padres*

*Para ti papa, hasta el lugar hermoso donde estas, para ti madre la más fuerte guerrera de esta vida*

### *A mis hermanos*

*Para ustedes mis grandes camaradas.*

## *Agradecimientos*

A toda mi familia, por apoyarme incondicionalmente y ser la base para poder alcanzar todos mis sueños.

A la Fis. Alejandra Cortes por todo su apoyo, disponibilidad, confianza, por ser crítica, amiga, gracias por su confianza que ha depositado en mí y por todo el tiempo invertido para culminar esta tesis.

Al Dr. Jorge Arzate por ayudarme a realizar este trabajo, por todas sus asesorías y el tiempo que me dio.

Al Dr. Juventino Martínez a quien le agradezco el tiempo y las enseñanzas en campo, que para mí ha sido una gran experiencia.

A los miembros del Jurado Dr. Osvaldo Sánchez, M.C. Mauricio Nava a quien les agradezco el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis, por todas sus observaciones que ayudaron a mejorar la calidad de este trabajo.

Al OIEA que a través del Grupo de Hidrología Isotópica del Instituto de Geofísica, me otorgo becas para realizar este trabajo de tesis y la impresión del mismo.

Al SAPAL y CEASG, por brindarme la información de los pozos.

A mis amigos, especialmente a Diego, Cristian, Raúl, Vences y Cesar por todas las experiencias, alegrías, fiestas, consejos, por estar siempre que los necesite.

A Citlalli y Paris por brindarme su amistad y recibirme en su casa cada vez que iba a revisión de este trabajo.

A Maribel Ribera, por el amor que me brinda, por su buen humor, por la comprensión, por los cuidados en fin, gracias por ser parte de mi vida.

Dentro de los Programas de Naciones Unidas ONU están contemplados los Proyectos de Colaboración Técnica (PCT) a través del Organismo Internacional de Energía Atómica o por sus siglas, OIEA. El Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM, lleva a cabo la tercera fase del **PCT-MEX0019**; *“Supporting Isotope and Hydrogeochemical Characterization of Drinking Water Wells Supplying the León Valley, Guanajuato”*. Esta Tesis forma parte de los esfuerzos por mostrar a la OIEA la utilidad en la prospección geofísica como herramienta fundamental para que los modelos geoquímicos, isotópicos o de flujo sean más robustos y cercanos a la realidad. Los resultados de esta tesis complementan los objetivos planteados en el Marco Lógico.

# INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN .....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>I) INTRODUCCIÓN.....</b>                                       | <b>9</b>  |
| I.1) Objetivos .....  | 10        |
| I.1.1) Objetivo General.....                                      | 10        |
| <b>II) ANTECEDENTES.....</b>                                      | <b>11</b> |
| II.1) Localización .....  | 12        |
| II.2) Vías de comunicación.....                                   | 13        |
| <b>III) GEOLOGÍA .....</b>  | <b>15</b> |
| III.1) Estratigrafía .....  | 16        |
| III.1.1) La Sierra de Guanajuato .....                            | 17        |
| III.1.2) Los Altos de Jalisco.....                                | 19        |
| III.1.3) El Bajío Guanajuatense.....                              | 20        |
| III.2) Sistemas de fallas .....                                   | 20        |
| <b>IV) MÉTODO MAGNÉTICO.....</b>                                  | <b>22</b> |
| IV.1) Fuerza entre Polos Magnéticos .....                         | 22        |
| IV.2) Campo Magnético.....  | 22        |
| IV.3) Intensidad de Magnetización .....                           | 23        |
| IV.4) Susceptibilidad Magnética .....                             | 24        |
| IV.5) Inducción Magnética.....                                    | 25        |
| IV.6) Permeabilidad .....   | 25        |
| IV.7) Componentes del Campo Geomagnético .....                    | 26        |
| IV.8) Variaciones del campo magnético terrestre.....              | 29        |
| IV.9) Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) ..... | 30        |
| IV.10) Generalidades del levantamiento aeromagnético.....         | 31        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>V) DATOS MAGNÉTICOS DEL VALLE DE LEÓN .....</b>                    | <b>33</b> |
| V.1) Cartografía magnética del entorno del Valle de León.....         | 33        |
| V.2) Carta de datos aeromagnéticos de Campo Total.....                | 37        |
| V.3) Carta magnética Reducida al Polo .....                           | 39        |
| <b>VI) IMPLICACIONES ESTRUCTURALES .....</b>                          | <b>44</b> |
| VI.1) Derivada Inclinada.....   | 44        |
| VI.2) Malla de la derivada Inclinada del Valle de León .....          | 44        |
| <b>VII) GRAVIMETRIA SATELITAL.....</b>                                | <b>48</b> |
| VII.1) Introducción .....   | 48        |
| VII.2) Altimetría .....   | 49        |
| VII.3) Interpretación Cualitativa de Gravimetría Satelital .....      | 50        |
| <b>VIII) CRITERIOS PARA EL MODELADO DE DATOS AEROMAGNÉTICOS. ....</b> | <b>54</b> |
| VIII.1) Selección de Perfiles.....                                    | 54        |
| VIII.2) Selección de susceptibilidades y pozos .....                  | 56        |
| <b>IX) RESULTADOS.....</b>  | <b>61</b> |
| IX.1) Modelos Magnéticos 2D .....                                     | 61        |
| IX.1.1) Sección magnética A-A' .....                                  | 61        |
| IX.1.2) Sección magnética B-B'.....                                   | 63        |
| IX.1.3) Sección magnética C-C'.....                                   | 65        |
| IX.1.4) Sección magnética D-D' .....                                  | 67        |
| IX.2) Modelo Pseudo 3D.....   | 68        |
| IX.3) Modelo Conceptual.....  | 69        |
| IX.4) Estimación de las reservas acuíferas .....                      | 71        |
| <b>X) CONCLUSIONES.....</b>   | <b>76</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>   | <b>78</b> |
| Paginas Web Consultadas.....  | 82        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ANEXO 1.....</b>   | <b>86</b> |
| Continuación Ascendente y Descendente.....                          | 86        |
| Carta de Continuación ascendente con Interpretación Geol. ....      | 86        |
| Carta de continuación descendente con interpretación geológica..... | 87        |
| Derivada direccional en z.....                                      | 88        |
| <b>ANEXO 2.....</b>   | <b>90</b> |
| Componentes del Satélite Geodesy.....                               | 90        |
| El Modelo Geopotencial EGM2008.....                                 | 91        |
| Anomalías de gravedad derivadas de altimetría satelital.....        | 91        |
| <b>ANEXO 3.....</b>   | <b>93</b> |
| Descripción de los pozos utilizados en el Perfil A-A'.....          | 93        |
| Descripción de los pozos utilizados en Perfil B-B'.....             | 96        |
| Descripción de los pozos utilizados en Perfil C-C'.....             | 101       |
| Descripción de los pozos utilizados en Perfil D-D'.....             | 104       |

## RESUMEN

Las cartas de anomalía magnética aéreas de Campo Total del territorio nacional del Servicio Geológico Mexicano (SGM) constituyen una base de datos única con la que muy pocos países cuentan. A pesar de ello, las cartas aeromagnéticas en nuestro país han sido utilizadas casi exclusivamente para la definición de dominios magnéticos asociados a la presencia de recursos minerales siendo que tienen un gran potencial para ser utilizados en otras áreas de prospección de recursos naturales, incluyendo el Agua. En particular, las cartas aeromagnéticas a escala 1:50,000 pueden proporcionar información importante acerca de la estructura tectónica y distribución de rellenos sedimentarios en cuencas sedimentarias del centro del país. Esto tiene incidencia en la determinación de reservas acuíferas, así como en la definición de zonas favorables para la recarga artificial de los sistemas acuíferos, entre otros. En este trabajo presentamos los resultados del procesamiento de datos aeromagnéticos de campo total del Valle de León, ubicado en el Bajío Guanajuatense, cuyo sistema acuífero se encuentra actualmente sobreexplotado. Con el propósito de interpretar los lineamientos y anomalías magnéticas obtenidas en las cartas de campo total, campo reducido al polo y derivada inclinada, se llevó a cabo la actualización de la carta geológica del entorno del valle a partir de visitas de campo. Por otro lado, se realizó un muestreo de especímenes de mano y mediciones *in situ* de la susceptibilidad magnética de las principales unidades geológicas que constituyen la cuenca del valle de León con el propósito de constreñir los modelos propuestos. Adicionalmente, se llevó a cabo la interpretación de los datos gravimétricos satelitales de la zona para definir estructuras de carácter regional coincidentes con las interpretadas a partir de las cartas magnéticas procesadas. Se propone un modelo estructural del Valle de León a partir de la interpretación de los datos aeromagnético (reducción al polo, derivada inclinada) y gravimétricos. El modelo conceptual obtenido representa el punto de partida para establecer volúmenes de reservas, posibles zonas de recarga natural, distribución de unidades geológicas y direcciones de flujo en el valle de León.

## I) INTRODUCCIÓN

El Municipio de León, Gto, ha llevado desde hace décadas un gran número de importantes estudios hidrológicos que han ayudado a la comprensión de los primeros 300-400 m del sistema acuífero de la región. La región poniente del Bajío comprende una vasta zona agrícola e industrial que la convierte en uno de los principales proveedores de productos agrícolas del país así como de divisas y de empleo. Por estos motivos, se vuelve muy importante entender el medio físico en donde se encuentran estos asentamientos productivos, que al mismo tiempo han mermado de manera importante las reservas acuíferas disponibles. Cabe recordar que uno de cada cuatro pozos perforados en el país se encuentra en esta zona. Los estudios hidrológicos que tanto los municipios como la CEASG frecuentemente incluyen sus contrapartes geofísica, geológica, e hidroquímica aunque recientemente también isotópica (p.e. OIEA, 2012). Frente a los diversos objetivos planteados en estos proyectos y por la necesidad de ampliar el conocimiento del medio en el cual se emplaza el agua, tratando de no limitar una caracterización solo al Valle del León sino a todo el sector occidental del Bajío, se recurrió al análisis de dos bases de datos disponibles de dos métodos geofísicos remotos: la magnetometría aérea del SGM y la gravimetría satelital de Scripps Institution of Oceanography, University of California San Diego (<http://topex.ucsd.edu/>), ambas con la capacidad de resolver estructuras regionales y locales en el subsuelo y en superficie.

Tradicionalmente, las técnicas geofísicas utilizadas para el estudios de agua subterránea son los métodos eléctricos y electromagnéticos tipo TEM y rara vez se recurre al método magnético, probablemente debido que las propiedades magnéticas no se asocian directamente al estrato acuífero sino más bien a las rocas que contienen al sistema acuífero estratificado del que suele estar rodeado. Sin embargo la extensión de las cuencas acuíferas, que algunas veces suelen estar administradas por dos autoridades diferentes aunque se trate del mismo acuífero, evita que los estudios abarquen los límites físicos de las mismas por lo que frecuentemente se ignoran sus límites más probables. A la escala de los sistemas acuíferos semi-regionales, la distribución de las rocas de origen ígneo suele estar asociada a los límites físicos (impermeables o semi-permeables) de los mismos así como a las irregularidades del basamento hidrológico (Pacheco y Arzate, 2007)

Desde su desarrollo inicial a inicios de los años 40 (*en* Blakely, 1995), la magnetometría aérea es muy recurrida para proyectos de prospección minera porque se pueden cubrir superficies muy extensas en poco tiempo además de que se pueden hacer estudios en zonas de difícil acceso, teniendo generalmente buena resolución ( $\pm 250$  m). Este método se ha utilizado principalmente en la industria minera, particularmente para la búsqueda y exploración de yacimientos minerales económicos, además la industria petrolera ha utilizado este método para reconocimiento y para estudios regionales desde principios del siglo pasado. En general, una de las características más útiles del método es que puede ser utilizado casi de manera directa, para el mapeo geológico y en muchos casos, como diagnóstico de la complejidad estructural de una región. Estas características combinadas con la disponibilidad de las bases de datos a bajos costos hace recomendable la utilización de esta metodología para el estudio de sistemas acuíferos regionales o semi-regionales, tanto para establecer sus fronteras físicas como para el análisis de las zonas de recarga.

## **I.1) Objetivos**

### **I.1.1) Objetivo General**

Generar un modelo del subsuelo de la parte Noroccidental del Bajío, a partir de datos aeromagnéticos apoyados con gravimetría satelital.

- Analizar la eficacia del método aeromagnético para problemas de hidrogeología
- Contribuir al mejor entendimiento del sistema hidrogeológico de la zona del Bajío Guanajuatense, con un modelo geofísico, generado con datos aeromagnéticos y apoyado de la geología.
- Generar secciones con el modelado directo de los datos potenciales a partir de secciones geológicas del subsuelo calibradas con pozos del área.
- Realizar un modelo magnético de profundidades del Valle de León.
- A partir de los modelos obtenidos, estimar el volumen de las reservas acuíferas de la cuenca del Valle de León.

## II) ANTECEDENTES

Dentro de los Programas de las Naciones Unidas, ONU, están contemplados los Proyectos de Colaboración Técnica, PCT, a través del Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA. Desde el primer semestre de 2005, el Instituto de Geofísica de la UNAM participa en la ejecución de proyectos relacionados al estudio de sistemas acuíferos, particularmente el del Valle de León. Gracias a la intervención de la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM, quien ha actuado como excelente gestora, en el 2012 se firmó la segunda fase del proyecto financiado por esta organización mundial (OIEA).

La mayor parte de los estudios consultados y de donde se ha extraído mucha de la información geológica, así como parte del modelo hidrogeológico conceptual, es de los trabajos que el Instituto de Geofísica de la UNAM y el Centro de Geociencias de Juriquilla, Qro. han venido realizando para el SAPAL (Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León) (SAPAL 2007, SAPAL 2012). Existen varios estudios en la zona del Valle de León que han aportado información importante para la comprensión del sistema acuífero en esa región del Bajío. Entre ellos se encuentra el trabajo de Hernández, 1991 *Modelo Conceptual de funcionamiento Hidrodinámico del Sistema Acuífero del Valle de León Guanajuato*, donde se propone un modelo denominado sistema de flujo regional comprendido el Valle de León (VL) y el Valle del Rio Turbio (VRT). En este proyecto se concluye que el VL se define regionalmente como un sistema libre, constituido por unidades del terciario granular indiferenciado, Ignimbrita y andesita donde el valle de León sobreyace a un basamento de bloques impermeables que puede ser el complejo Vulcano-sedimentario ó el Conglomerado Guanajuato. En los años de 1998 y 1999, el CEASG realizo diversos estudios en el área, por ejemplo: *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de León, GTO 1998*, en el cual se menciona que a partir de las evidencias geológicas y geofísicas, se concluye la existencia de bloques escalonados que conforman pilares y fosas tectónicas asimétricas. *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero Silao Romita, GTO 1998*. En este trabajo se menciona que el acuífero del Valle de Silao Romita se presenta en materiales granulares y en menor proporción en basaltos fracturados y que el espesor aproximado del acuífero es de 400 metros. El acuífero de La Muralla es riolítico, donde se cree que la recarga y descarga es

independiente al Valle de Silao Romita. En otro estudio llamado *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero Valle del Rio Turbio, GTO1998*, se establece que el sistema acuífero está integrado por unidades de tipo granular y rocas fracturadas que se comunican hidráulicamente o bien están separadas por unidades menos permeables. En la zona denominada Valle del Rio Turbio, la unidad acuífera son las rocas ígneas, que se distribuyen ampliamente en el valle, con espesores máximos conocidos de ~350m, ubicados desde las cercanías de Manuel Doblado, a Guadalupe de Jalpa y a Las Adjuntas. Este sistema acuífero también está compuesto por depósitos aluviales, que se extienden en menor proporción, con una profundidad aproximada de 100 m. En estudio más recientes como *Siembra de agua de lluvia en la zona serrana y urbana del municipio de León, Guanajuato* (SAPAL 2012). La información geológica presentada en este trabajo ha sido el principal apoyo bibliográfico, ya que es uno de los más recientes y completos del área.

## II.1) Localización

La zona de estudio, localizada al Oeste del estado de Guanajuato, se encuentra ubicada dentro del margen comprendido entre las coordenadas geográficas 21°14'N y 20° 29' N de latitud norte, y 101° W y 102° W de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. La zona está comprendida al oeste del estado de Guanajuato donde los límites geográficos de la zona; al noreste la ciudad de Dolores Hidalgo, al noroeste con el estado de Jalisco, al sureste el Valle de Santiago y al suroeste la ciudad de Penjamo, (FIGURA 1). Los vértices del área muestran en la TABLA 1.

| Zona de estudio    |          |           |
|--------------------|----------|-----------|
| Vértice            | Latitud  | Longitud  |
| Superior izquierdo | 21°14' N | 102°00' O |
| Superior derecho   | 21°14' N | 101°00' O |
| Inferior derecho   | 20°29' N | 101°00' O |
| Inferior Izquierdo | 20°29' N | 102°00' O |

TABLA 1.- Vértices en coordenadas geográficas con proyección WGS84 de la zona de estudio.

Fisiográficamente esta región se ubica sobre la parte meridional de la provincia de la Mesa Central, en su transición con la provincia del Cinturón Volcánico Mexicano. La zona de estudio se asienta mayormente dentro de la subprovincia denominada Bajío Guanajuatense y

cuyos límites colindantes son: al noreste con el flanco suroeste de la Sierra de Guanajuato, al noroeste con los Altos de Jalisco, al sur este corresponde a la parte sur oriental del Bajío de Guanajuato y al suroeste con la Sierra de Pénjamo, (FIGURA 1).

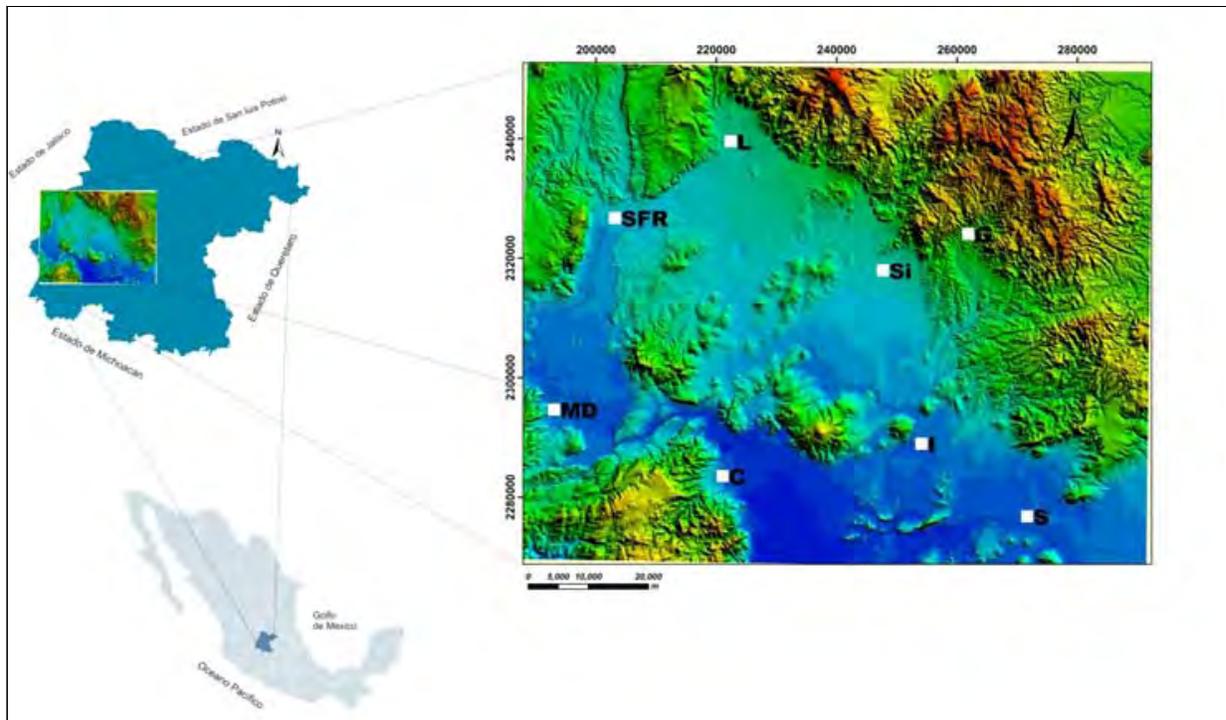


FIGURA 1.- Modelo de Elevación modificado de INEGI, que muestra la localización del área de estudio, donde, *L*: León, *SFR*: San Francisco del Rincón, *G*: Guanajuato, *Si*: Silao, *MD*: Manuel Doblado, *C*: Cueramaro, *I*: Irapuato, *S*: Salamanca.

## II.2) Vías de comunicación.

El área está bien comunicada y cuenta con dos principales vías de acceso, la primera es la carretera Federal No. 45, que une a las ciudades de Irapuato, Silao y León. La otra es la carretera Federal No. 37 que comunica la zona de estudio hacia el sur con el Estado de Jalisco. Existen caminos aledaños de terracería y vías secundarias para la comunicación entre los poblados.

También se encuentra una vía férrea que comunica a las ciudades de Irapuato, Silao, León y San Francisco del Rincón con la ciudad de México y cuenta con un aeropuerto en la ciudad de León (FIGURA 2).

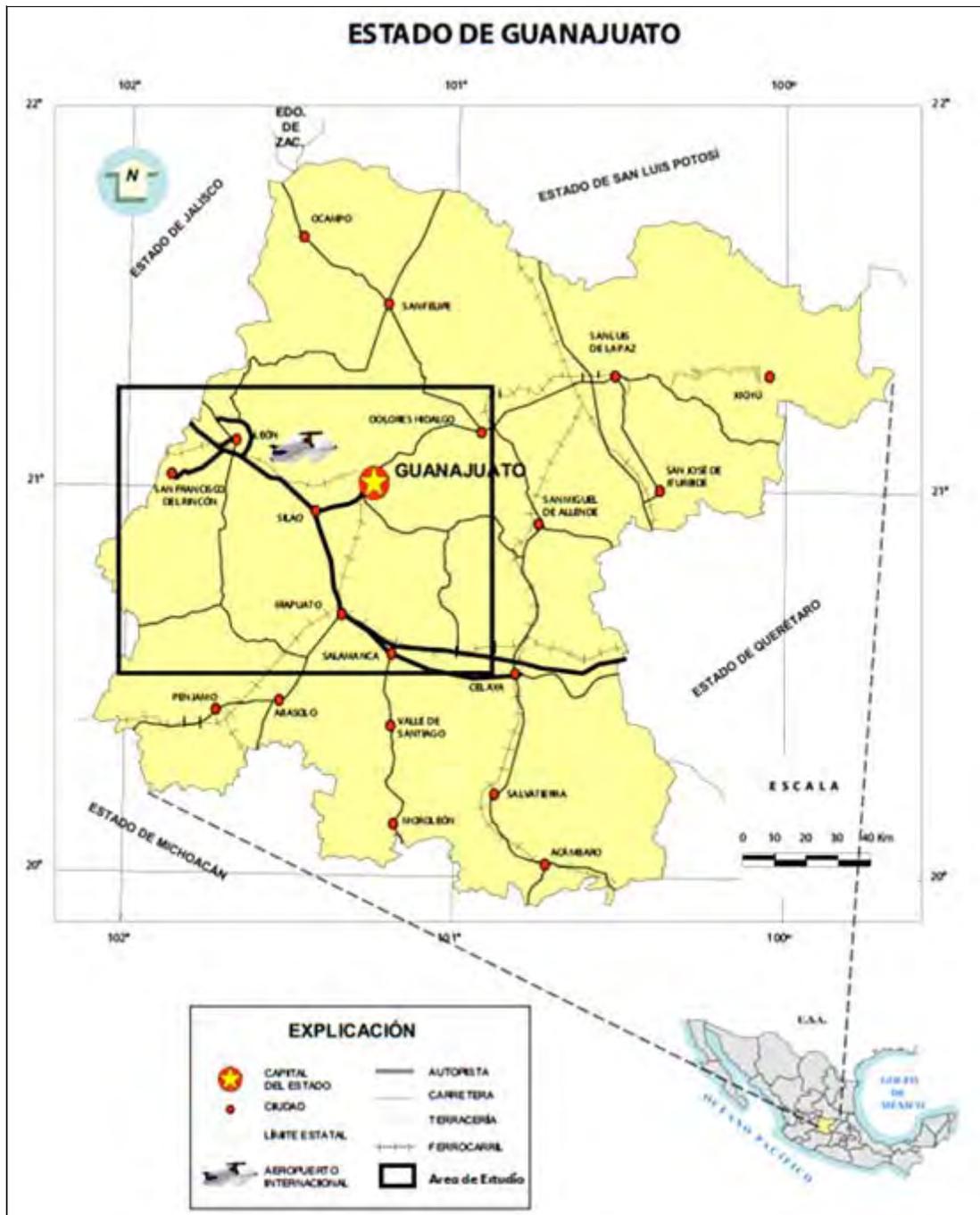


FIGURA 2.- Mapa de localización y principales vías de acceso, modificado de Panorama Minero de Guanajuato 2011.

### III) GEOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra ubicada en dos provincias fisiográficas, la del Eje Neovolcánico y la Mesa del Centro (FIGURA 3). El eje neovolcánico tiene dos subprovincias, la primera es el Bajío Guanajuatense ubicada en el sector central de la zona de estudio, siendo la parte sur la que colinda con la provincia del eje neovolcanico.

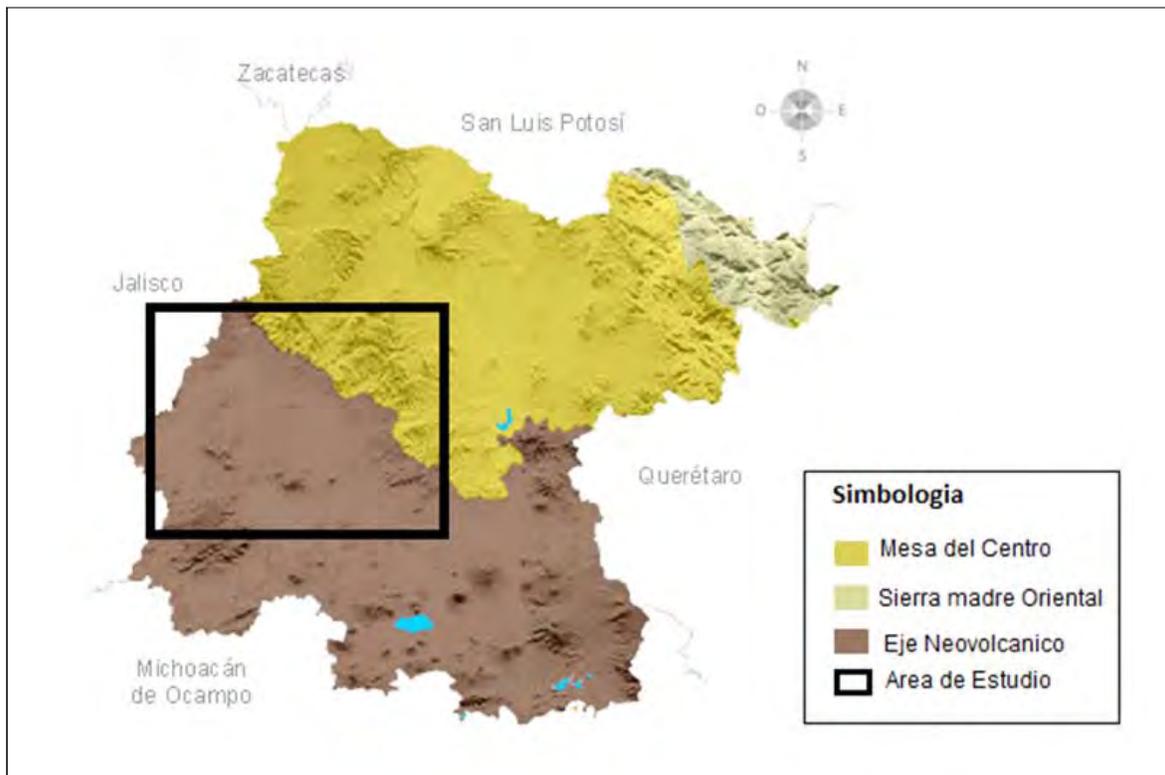


FIGURA 3.- Provincias fisiográficas del estado de Guanajuato. El rectángulo muestra el área de estudio (modificado de INEGI).

Esta provincia está constituida por un valle estructural de origen tectónico relleno por depósitos de material medianamente consolidados (terciario granular indiferenciado) y sin consolidar (aluvión), es una región baja representada por una extensa planicie, perturbada por algunas serranías pequeñas. La provincia de la mesa comprende entre otros a los Altos de Jalisco que es una región de mesetas de altitud media ubicada en la parte noroccidental del área y se caracteriza por sus sierras altas de cumbres escarpadas y está constituida por rocas volcánicas del terciario pertenecientes a las unidades lito-estratigráficas aflorantes (Salas, 2004). La Sierra de Guanajuato es otra región alta y montañosa favorable para que el agua

forme torrentes violentos que disecan densamente el relieve donde hay un alto índice de escurrimiento y una infiltración importante (Salas, 2004).

### III.1) Estratigrafía

Por lo anterior es posible distinguir tres regiones por sus características fisiográficas que enmarcan el área de estudio: la Sierra de Guanajuato al NNE, los Altos de Jalisco al WNW y el Bajío Guanajuatense al SSE

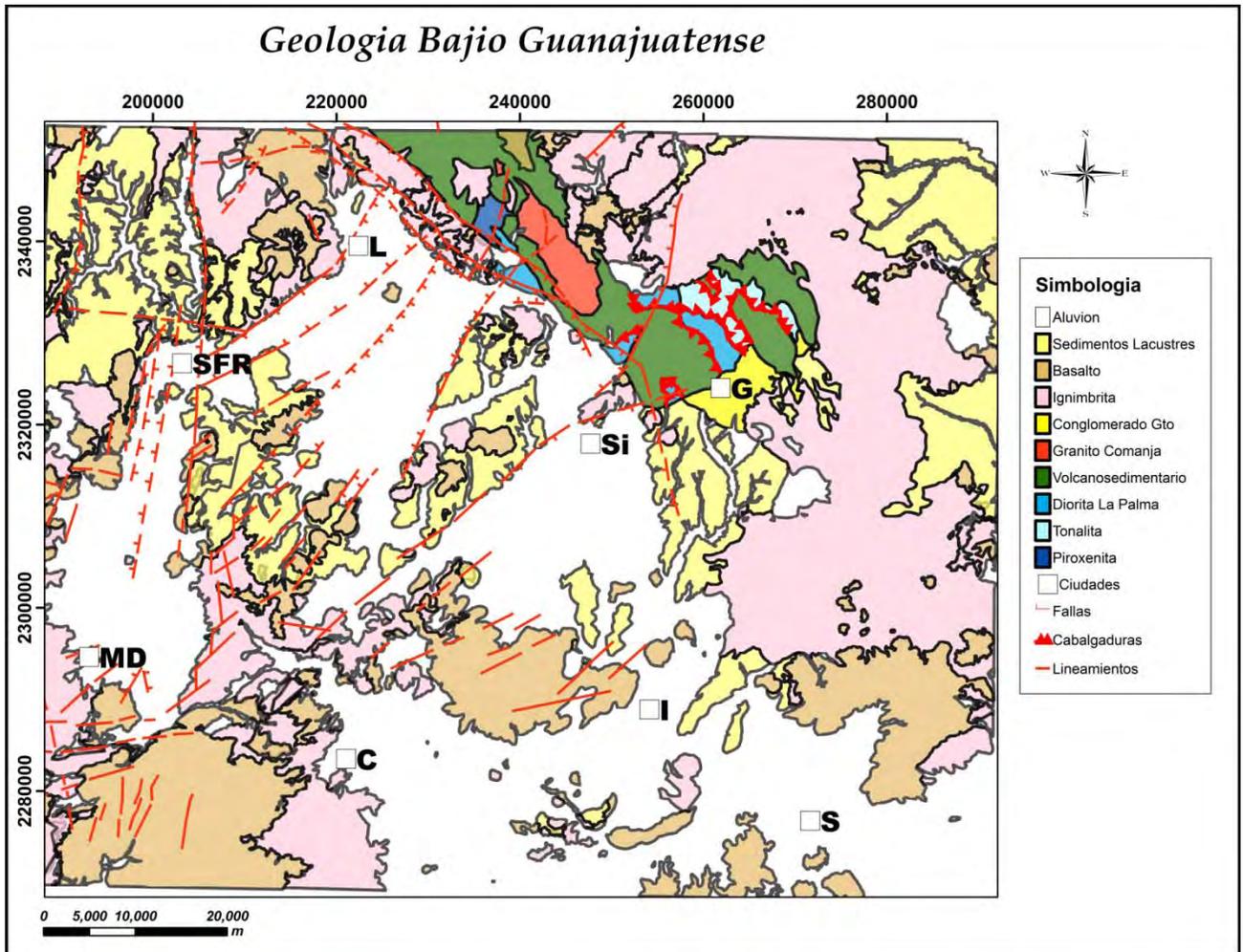


FIGURA 4.-Carta Geológica de la zona de estudio actualizado y digitalizado como parte de este trabajo con información recopilada de 9 cartas geológicas escala 1:50,000 de INEGI e información de los siguientes estudios: Martínez, 1992; SAPAL, 2007 y SAPAL, 2012. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámara, I: Irapuato, S: Salamanca.

### III.1.1) La Sierra de Guanajuato

La Sierra de Guanajuato pertenece al municipio de León, está constituida por dos conjuntos litológicos diferentes y bien definidos, un conjunto inferior mesozoico que constituye su basamento, y un conjunto superior cenozoico que representa su cubierta (SAPAL, 2012).

Las más antiguas corresponden a una secuencia volcano-sedimentarias que pertenece a un arco volcano-sedimentario, distribuido en la Sierra de Guanajuato. Esta secuencia corresponde a rocas de arco intra-oceánico, (SGM F14-7, 1997), actualmente disociado tectónicamente, se forman cuatro unidades alóctonas superpuestas, que tendrían la siguiente secuencia, si no hubiera ninguna alteración.

La unidad ultramáfica *Piroxenita* San Juan de Otates que presenta sus mejores exposiciones en arroyo San Juan de Otates al noroeste de León. Es una roca masiva, cristalina que es de color verde claro u oscuro, dependiendo si esta serpentinizada o no, se observan una serie de escamas tectónicas de rocas ultrabásicas y básicas, formadas por serpentinitas, peridotita, clinopiroxenitas serpentinizadas y gabros, por la posición y su naturaleza alóctona al igual que las demás rocas de arco, se le asigna una edad tentativa del Jurásico Superior (+140 Ma) (Martínez Reyes et al., 1992).

La *Diorita* Tuna Mansa donde se distinguen diversas facies cristalinas de roca de composición diorítica, esencialmente granítica y ocasionalmente gabrítica, constituyendo una serie de testigos tectónicos, los cuales son cortados por numerosos diques granófidos, doleríticos y basálticos que en conjunto forman un enjambre complejo de filones. En la zona La Luz-El Cubilete Guanajuato; este enjambre fue denominado Complejo Filoniano Santana. En diversas localidades a lo largo de la Sierra de León-Guanajuato, la Diorita descansa por cabalgadura sobre las unidades basálticas y volcano-sedimentarias. Las edades determinadas son de  $112 \pm 9$  y  $101 \pm 6$  Ma (Zimmermann et al., 1990 en SGM F14-7, 1997), estas edades corresponden al Cretácico Inferior.

La *Tonalita* Cerro Pelón está representada por rocas masivas a manera de escamas tectónicas, se clasificó como un plagiogranito; aflora en la parte suroriental de la Sierra de Guanajuato, hacia el noroeste de la ciudad de Guanajuato. Se le ubica en el Jurásico tardío y Cretácico,  $157.1 \pm 8.8$  Ma, (Zimmermann, 1990 en SGM F14-7, 1997) .

Una sucesión de derrames de lava basáltica y andesita basáltica(La Luz),con estructura masiva y almohadillada, de 1000 m de espesor, distribuida a lo largo de la Sierra de León Guanajuato, cabalga a la secuencia volcanosedimentaria, su edad aproximada es de 108. 4 Ma, cretácico inferior.

***Complejo volcano-sedimentario de la Sierra de Guanajuato;*** Es el basamento de la sierra de Guanajuato, algunos la conocen como formación Arperos, es una formación que está distribuida a lo largo de la sierra (Martínez, 1992).Consiste en una alternancia de lutitas, limolitas, areniscas y calizas. Está compuesta por derrames basálticos submarinos con estructura almohadillada y están cubiertos concordantemente por una alternancia de areniscas y calizas. La formación presenta un bajo grado de metamorfismo regional, por una deformación tectónica intensa a finales del Cretácico Inferior.

***Granito Comanja*** que aparece como un intrusivo de composición acida entre el conjunto basal mesozoico y la cubierta volcano-sedimentaria cenozoica. Es un cuerpo de dimensiones batolíticas, que aflora siguiendo la orientación de la Sierra de Guanajuato, no presenta deformación importante o metamorfismo regional, sin embargo si presenta una aureola de metamorfismo de contacto con mineralogía variada, que está en relación con el tipo de rocas que lo encajonan. La edad absoluta para esta unidad se calculó entre los  $55 \pm 4$  Ma y  $49.5 \pm 1.5$  Ma correspondiente al Eoceno temprano. (Martínez Reyes, 1992)

***Conglomerado Rojo Guanajuato.*** En relación discordante sobre la secuencia volcanosedimentaria del Arco de Guanajuato, se tiene un conglomerado polimíctico, mal clasificado, constituido por clastos de origen sedimentario, metamórfico e ígneo, cementados en una matriz arenosa, con intercalaciones de niveles arenosos. Esta unidad es informalmente conocida como Conglomerado Rojo de Guanajuato, ubicada en el Eoceno (Cenozoico terciario -Paleogeno-Eoceno de 23.7 a 60 Ma) (SGM F14-C43, 1998). El Oligoceno está representado por las emisiones volcánicas de tipo riolítico, que se encuentra ampliamente distribuido en toda el área, y se correlaciona con las unidades que afloran en el Distrito Minero de Guanajuato (Nieto, 1996) y al grupo oligocénico que cubre la Sierra Madre Occidental.

***Ignimbrita,*** dentro del área de estudio existen diversas formaciones de roca tipo ignimbrita, que en la literatura las formaciones las nombran de diferentes maneras ya que son distintas

agrupaciones. Para los objetivos planteados en este trabajo y por la capacidad del método aeromagnetico, a las diversas formaciones se les englobó como ignimbritas ya que estas están presentes en toda el área de estudio.

La mayor parte del oriente del mapa está la Riolita Chichíndaro, que son un conjunto de rocas volcánicas de composición ácida, principalmente derrames de lava y domos riolíticos (Nieto et al., 2012). Esta unidad es de naturaleza riolítica, se trata de lava porfídica, su mineralogía incluye fenocristales de feldespato alcalino, cuarzo, plagioclasas biotita y minerales opacos. Su edad es de Oligoceno y está relacionada con las ignimbritas encontradas en los Altos de Jalisco y el Bajío Guanajuatense. La Ignimbrita Cuatralba la cual se encuentra por contacto por falla con el complejo volcano-sedimentario, en ella se engloban las rocas riolíticas de la cobertura de la Sierra de Guanajuato, es una secuencia de depósitos piroclásticos con un espesor considerable que presenta diferentes grados de consolidación. Son rocas de color rosa, en estructuras fluidales, masivas o vesiculares. Se le calcula una edad de  $31.7 \pm 0.4 \text{Ma}$ ,  $28.2 \pm 0.7 \text{Ma}$  y  $23.4 \pm 0.1 \text{Ma}$  reportadas para distintos niveles de la unidad (SAPAL, 2012).

### **III.1.2) Los Altos de Jalisco**

Aquí afloran solamente rocas volcánicas y clásticas cenozoicas que pueden individualizarse en varias unidades litoestratigráficas por el nombre genérico de las rocas (andesitas, riolitas, sedimentos y basaltos), (SAPAL, 2012), pero el mapa presentado en este trabajo (FIGURA 4) solo hace distinción de ignimbritas basaltos o sedimentos lacustres.

Los **Basaltos** que aquí se encuentran son rocas de color oscuro, compactas, fracturadas con texturas afaníticas, con fenocristales de olivino y augita, se aparecen en una matriz de plagioclasa microcristalina y se le asigna una edad pliocénica (Martínez Reyes, 1992). Estos derrames se encuentran por encima y debajo de la Ignimbrita Cuatralba.

**Sedimentos Lacustres**, estos materiales son lacustres y fluviolacustres representados por arenas de granulometría variable en una matriz limo-arcillosa sin cementante y por

horizontes de gravas constituidas por clastos angulosos a subangulosos de composición diversa. Por su ubicación estratigráfica se puede ubicar en el Mioceno (SAPAL, 2012).

### **III.1.3) El Bajío Guanajuatense**

Es una área planicie en su mayoría, ya que esta perturbada por la aparición de pequeñas serranías y lomeríos que surgen en diversos puntos, las cuales permiten el primer contacto con la estratigrafía del Bajío ya que muestran algunas unidades litológicas que se localizan en su subsuelo.

En el Mioceno (5.1 Ma-23.7Ma) se tienen lavas andesíticas y riolíticas que corresponden a la edad del volcán Zamorano de  $10.9 \pm 0.5$  Ma en esa misma época comienza el ***Relleño de las depresiones del Bajío*** y de San Miguel de Allende, con sedimentos continentales, areniscas y conglomerados, depositados en ambiente lacustre. Por lo cual los lomeríos se conforman por formaciones volcánicas y sedimentarias que se alternan, donde de abajo hacia arriba hay una unidad sedimentaria, ignimbrita, sedimentaria y una unidad basáltica.

***Aluvión*** es un material que es transportado y depositado en las partes bajas de la sierra o cauces de arroyo.

El conocimiento de las rocas del subsuelo del Bajío es escaso, y aunque las unidades que pueden verse en los lomeríos forman parte del subsuelo, su distribución es incierta.

### **III.2) Sistemas de fallas**

La parte central de México es afectada por 4 sistemas de fallas, pero el territorio leonés predominan dos sistemas que son los que dan su composición: el sistema NW-SE y el sistema NE-SW. Son estos sistemas los que gobiernan el arreglo estructural de la Sierra de Guanajuato y de Los Altos de Jalisco. En el subsuelo del Bajío son los que configuran el basamento rocoso sólido en fosas y pilares tectónicos, sobre las cuales se depositaron los materiales fluvioaluviales y fluvioacústicos más recientes. Las unidades alóctonas presentan diversas deformaciones, como cabalgaduras, pliegues fallas, producto de los esfuerzos durante la subducción y presión litostática iniciadas en el Aptiano y que continuaron

durante el Cretácico superior, durante las facies denominadas Orogeniana. Las evidencias mecánicas y minerales de los contactos tectónicos muestran un desplazamiento del SW al NE (SAPAL, 2007).

### **El Sistema de Fallas NW-SE**

El sistema de fallamiento NW-SE se extiende a lo ancho de una franja que abarca desde la región de San Luis Potosí (Sistema de fallas Tepehuanes-Zimapán) hasta la región de León (Sistema de Fallas del Bajío). En esta última región marca el límite entre la Sierra de Guanajuato y El Bajío.

En el territorio leonés, el Sistema de Fallas del Bajío está restringido prácticamente a la Sierra de Guanajuato. La falla más importante es la responsable del levantamiento de la Sierra y de la exhumación del basamento mesozoico. Es la que limita casi rectilíneamente las rocas mesozoicas marinas del basamento de las rocas volcánicas y sedimentos terciarios continentales de la cubierta. Las mineralizaciones más importantes de metales preciosos que se ha explotado en la región son las vetas encajonadas en este sistema de fallas (Veta Madre, Veta La Campechana, etc.). Son fallas de tipo normal, casi rectilíneas, con una fuerte inclinación hacia el SW, con un desplazamiento vertical que puede alcanzar varias centenas de metros. En ocasiones muestran una componente horizontal a veces importante, que les confiere un carácter de fallas de cizallamiento lateral izquierdo (SAPAL, 2012).

### **El Sistema de Fallas NE-SW**

Las fallas de este sistema están presentes en el territorio leonés tanto en la Sierra como en el subsuelo del Bajío. En esta orientación de falla se constituye el límite entre Los Altos de Jalisco y El Bajío y son las responsables de la configuración que se tiene en el subsuelo del Bajío en pilares y fosas tectónicas, pues las fallas del sistema NW-SE desaparecen en la transición Sierra de Guanajuato-El Bajío. En este sentido resultan ser las más importantes para los estudios geohidrológicos de la región, ya que son las que gobiernan la geometría de los acuíferos tanto en el medio granular como en el medio fracturado (SAPAL, 2012).

## IV) MÉTODO MAGNÉTICO

La magnetometría es un método geofísico relativamente simple en su aplicación, que se basa en la medición de la variación espacial del campo magnético total. Es utilizado entre otras muchas cosas, para mapear la distribución y extensión de rocas volcánicas y metamórficas magnéticas, que estas generan sobre el campo magnético, con instrumentos denominados magnetómetros. Los conceptos detrás de la teoría magnetostática son polos y dipolos de fuerza magnética, en analogía a las cargas eléctricas en el entendido de que los mono-polos magnéticos no existen en la naturaleza pero que son útiles para el desarrollo conceptual de los elementos teóricos.

### IV.1) Fuerza entre Polos Magnéticos

La expresión para la fuerza magnética análoga a la ley de Coulomb entre cargas eléctricas, establece que si dos polos magnéticos  $m_1$  y  $m_2$  están separados por una distancia  $r$ , la fuerza entre ellos está dada por:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{\mu r^2} \cdot r_1$$

Es decir la fuerza  $F$  del polo magnético  $m_1$  sobre el polo  $m_2$ , es inversamente proporcional a la distancia  $r$  que los separa.  $r_1$  es un vector unitario que proporciona la dirección del campo y  $\mu$  es la permeabilidad magnética que depende del medio físico donde se encuentran situados los polos. Si el signo de los polos es contrario entonces la fuerza será de atracción, en caso de que sean del mismo signo se generará una fuerza de repulsión.

### IV.2) Campo Magnético

La intensidad del campo magnético en un punto cualquiera del espacio se define como la fuerza por unidad de polo magnético que se ejerce sobre otro polo de intensidad  $m'$  en dicho punto. De aquí que la intensidad del campo magnético debida a la magnitud de un polo  $m$  ubicado a una distancia  $r$  está dada por:

$$H = \frac{F}{m'} = \frac{m}{\mu r^2}$$

La intensidad del campo magnético se expresa frecuentemente como la densidad de líneas de fuerza que representan a dicho campo. El campo magnético se representa por líneas de fuerza continuas que parten del polo norte magnético y se dirigen hacia el polo opuesto de un magneto (FIGURA 5).

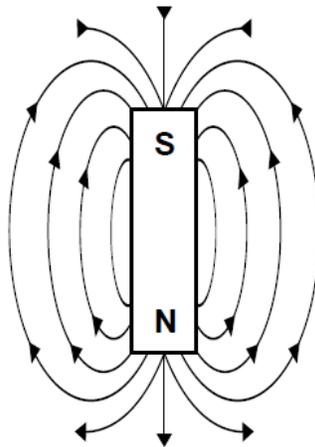


FIGURA 5.- Líneas de fuerza en torno a una barra magnetizada. N y S son los polos magnéticos.

### IV.3) Intensidad de Magnetización

Cuando se ubica cualquier material magnético dentro de un campo magnético primario se inducen polos magnéticos secundarios en su superficie. Para el caso de materiales magnéticos moderados colocados dentro de campos magnéticos relativamente débiles como el terrestre, la magnetización inducida (llamada también polarización) se encuentra en la dirección del campo primario y su intensidad es proporcional a la intensidad de dicho campo. La intensidad de magnetización  $I$ , se puede considerar como la intensidad del polo inducido por unidad de área a lo largo de una superficie normal al campo inductor. El proceso a través del cual ocurre la magnetización se puede pensar como la alineación a lo largo del campo primario de magnetos elementales individuales o dipolos, los cuales están orientados originalmente en direcciones aleatorias. La extensión y distribución de los alineamientos de dipolos depende de la intensidad del campo magnético primario o externo.

#### IV.4) Susceptibilidad Magnética

En el caso de un campo magnético externo  $H$  homogéneo que forma un ángulo  $\theta$  con la normal de la superficie de un material magnético, la intensidad de polo magnético inducida por unidad de área está dada por:

$$I = kH \cos \theta$$

Y cuando el campo es perpendicular a la superficie, entonces:

$$I = kH$$

En donde la constante de proporcionalidad  $k$  se conoce como la susceptibilidad magnética. Los materiales magnéticos que tienen un valor positivo de  $k$  se conocen como paramagnéticos. Los materiales de este tipo tienden a alinearse a lo largo de su dimensión mayor en la dirección del campo externo. Algunas sustancias, tales como la anhidrita y sal de roca tienen susceptibilidades magnéticas negativas y se conocen como materiales diamagnéticos. Los cuerpos de este tipo tienden a alinearse también a lo largo de su dimensión mayor pero cuando el campo primario es perpendicular, es decir cuando está a  $90^\circ$  de la dimensión mayor. Ejemplos de materiales paramagnéticos se muestran en la TABLA 2. El ferromagnetismo se presenta en materiales en los que la interacción entre átomos y grupos de átomos son tan fuerte que existe alineamiento de momentos en una región muy grande del material, (Telford, 1990).

| Susceptibilidad Magnética (SI) |              |                  |                |               |
|--------------------------------|--------------|------------------|----------------|---------------|
| Roca                           | Dobrinysavit | Milson J.J.      | Robinson E.S.  | Telford W.M.  |
| Ígnea básica                   | 0.0326       |                  |                |               |
| Ígnea Acida                    | 0.00813      |                  |                |               |
| Basalto                        |              | 0.001-0.1        | 0.00002-0.0145 | 0.00002-0.145 |
| Riolita                        |              | 0.00025-0.01     | 0.00002-0.003  | 0.00002-0.003 |
| Granito                        |              | 0.00001-0.000065 | 0-0.004        | 0-0.004       |
| Andesita                       |              |                  | 0.0135         | 0.0135        |
| Metamórfica                    | 0.00439      |                  |                |               |
| Lutitas                        | 0.00065      |                  |                |               |
| Arenisca                       | 0.0004       |                  |                |               |
| Caliza                         | 0.00028      |                  |                |               |
| Dolomita                       | 0.0001       |                  |                |               |

TABLA 2.-Valores de susceptibilidad presentadas en algunas rocas, modificada de Escorza (2010).

## IV.5) Inducción Magnética

Los polos magnéticos inducidos en un cuerpo por un campo magnético externo  $H$  generan un campo secundario  $H'$  que se relaciona con la intensidad de magnetización  $I$  a través de la expresión:

$$H' = 4\pi I$$

El flujo magnético total dentro del material medido se conoce como la inducción magnética  $B$ , la cual se expresa a través de la relación:

$$B = H + H' = H + 4\pi I = H + 4\pi kH = (1 + 4\pi k)H \equiv \mu H$$

## IV.6) Permeabilidad

De la ecuación anterior es claro que el campo total de inducción magnética  $B$  dentro del cuerpo es proporcional al campo externo. La constante de proporcionalidad  $(1+4\pi k)$  se conoce como la permeabilidad del material y se utiliza la letra  $\mu$  para designarla. La ecuación anterior se puede reescribir como:

$$\mu = \frac{B}{H} = 1 + 4\pi k$$

Es decir, que la permeabilidad expresa la modificación de la fuerza de atracción o repulsión entre dos polos magnéticos en un medio magnetizado.

En la exploración magnética se miden las variaciones de la intensidad o en ocasiones, alguna de las componentes de la intensidad del campo magnético terrestre. La unidad estándar de intensidad de campo es el oersted, aunque en gran parte de la literatura geofísica se utiliza el equivalente numérico del gauss. Debido a que el oersted es una unidad muy grande (Cpo. mag. terrestre  $\sim 1/2$  oersted) resulta poco práctica para los estudios de prospección magnética por lo que el gamma o nanotesla (nT) es ampliamente utilizado en nuestros días en prospección magnética. Un nanotesla (nT) equivale a  $10^{-5}$  oersted, unidad que resulta mucho más conveniente para medir las variaciones de la intensidad del campo en los trabajos geofísicos de exploración magnética. La siguiente tabla proporciona la equivalencia entre las diferentes unidades de campo magnético.

| Notación | S.I                 | cgs            | Conversión   |
|----------|---------------------|----------------|--|
| $B$      | <i>Tesla</i>        | <i>Gauss</i>   | $1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss}$<br>$1 \text{ nT} = 1 \text{ gamma} = 10^{-9} \text{ teslas}$<br>$1 \text{ gamma} = 10^{-5} \text{ gauss}$ |
| $H$      | <i>amper /metro</i> | <i>oersted</i> | $1 \text{ A/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ oersted}$  |
| $M$      | <i>amper /metro</i> | <i>oersted</i> | $\text{emu/cm}^3 = 10^3 \text{ amp/m}$   |

TABLA 3.- Síntesis de las unidades de medida utilizadas en Magnetometría (Argote, 2008).

#### IV.7) Componentes del Campo Geomagnético

En cualquier punto a lo largo de la superficie terrestre la aguja de una brújula define una posición en el espacio determinado por la dirección del campo magnético total terrestre en ese punto. En general, esta dirección estará a un ángulo de la vertical, además de que su proyección en el plano horizontal hará un ángulo con la línea que define el meridiano en dicho punto. Debido a que los campos magnéticos se definen mejor en términos de sus componentes es deseable poder representar el campo magnético total en términos de su componente horizontal  $h$  (dividida en sus proyecciones X y Y) y de su componente vertical Z (ver FIGURA 6).

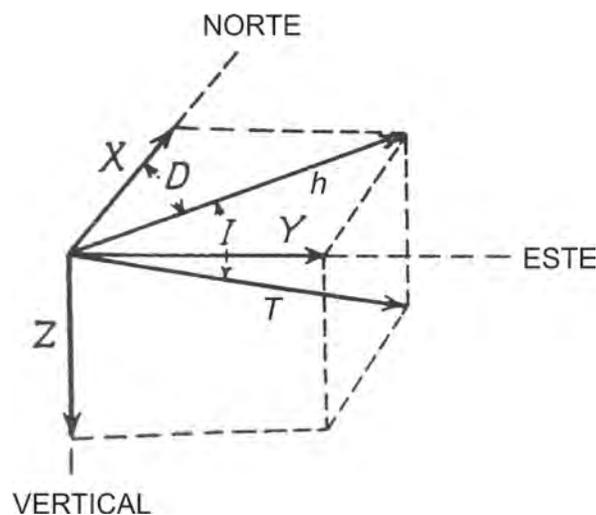


FIGURA 6.- Sistema de referencia y elementos magnéticos (modificado de Dobrin, 1952).

El ángulo que el campo magnético total  $T$  hace con el plano horizontal  $h$  se conoce como la inclinación  $I$ , mientras que el ángulo entre  $h$  y el norte geográfico ( $X$ ) se conoce como la declinación  $D$ . Las cantidades  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $D$ ,  $I$ ,  $h$  y  $T$  se conocen como los elementos magnéticos y se relacionan de la siguiente manera:

$$h = T \cos I \quad Z = T \sin I = h \tan I$$

$$X = h \cos D \quad Y = h \sin D$$

$$X^2 + Y^2 = h^2 \cos^2 D + h^2 \sin^2 D = h^2 = T^2 \cos^2 I$$

De acuerdo con estas expresiones deducidas de la figura es posible deducir también las expresiones para la inclinación  $I$  y la declinación  $D$  magnéticas:

$$I = \arctan \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

y

$$D = \arcsin \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

Los mapas mundiales de todas las componentes del campo geomagnético, se encuentran disponibles en la página de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (<http://www.ngdc.noaa.gov/wist/magfield.jsp>) donde se encuentran datos desde el año 1900 al 2015. Como nuestro estudio comprende datos adquiridos entre los años 1995 y 1998 se obtuvieron los mapas de inclinación y declinación para este periodo (FIGURAS 7 y 8). Como se puede observar de estas cartas de isovalores, el campo magnético terrestre es bastante irregular. En ambos casos las líneas de igual valor (inclinación o declinación) se desvían de lo que se debería esperar de una esfera homogéneamente magnetizada. Aún más impactante es el hecho de que el campo magnético de la Tierra varía con el tiempo de varias maneras. Existen los cambios que ocurren lentamente a través de los siglos (variaciones seculares), o aquellos que ocurren de manera cíclica asociados a la periodicidad de la rotación terrestre (variaciones diurnas), o bien aquellos que ocurren súbitamente debidos a la influencia de ráfagas de partículas solares sobre el campo magnético terrestre (tormentas magnéticas).

Internacional Geomagnetic Reference Field Model -- Epoch 1995  
Main Field Inclination (I)

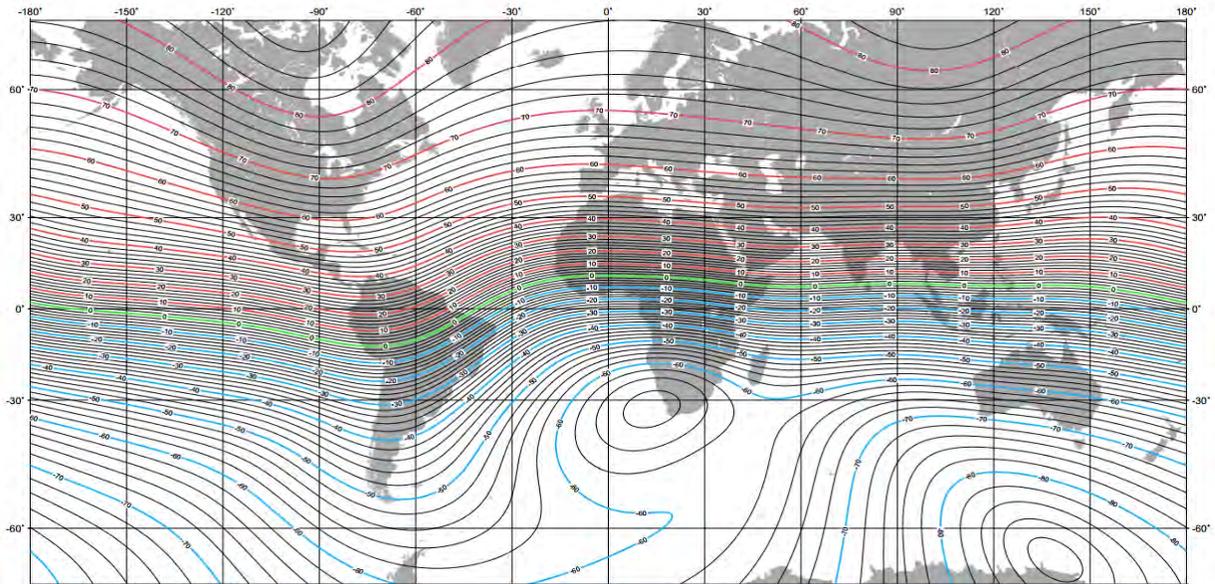


FIGURA 7.- Carta de Inclínación Magnética de 1995, donde los contornos rojos son positivos y los azules negativos, con intervalos cada dos grados con la proyección de Mercator (página web de NOAA).

Internacional Geomagnetic Reference Field Model -- 1995  
Main Field Declination (D)

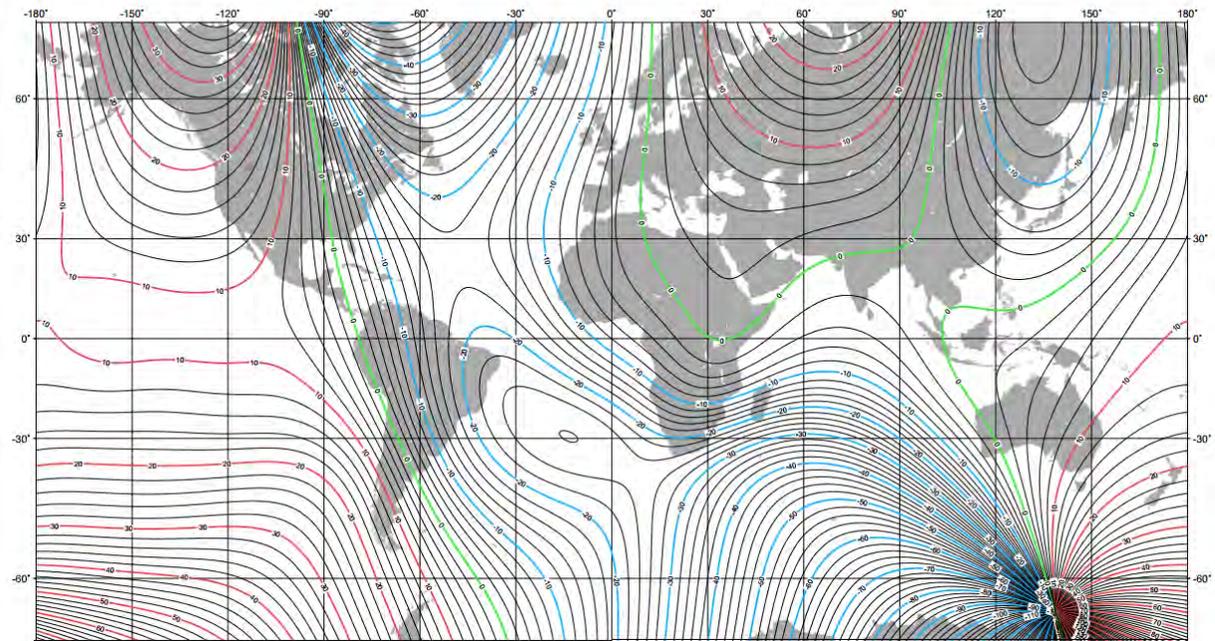


FIGURA 8.- Carta de Declinación Magnética de 1995, donde los contornos rojos son positivos y los azules negativos, con intervalos cada dos grados con la proyección de Mercator (página web de NOAA).

## **IV.8) Variaciones del campo magnético terrestre.**

### **Variación Diurna**

La variación diurna es una variación temporal con duración de un día que pueden llegar a tener variaciones de más de 60 nT (Telford, 1990). Estas variaciones son causadas principalmente por la interacción de las corrientes eléctricas del viento solar con la ionósfera terrestre, las cuales pueden alcanzar varias decenas de nano teslas entre el día y la noche. Al sustraerle la variación diurna a las mediciones en campo se cancela la contribución de estas variaciones magnéticas naturales en los datos medidos por lo cual es necesario monitorear independientemente estas variaciones en el transcurso de una campaña de medición.

### **Variación Secular**

Las variaciones seculares del campo se relacionan con la geodinámica del núcleo terrestre que ocurren en periodos de décadas o siglos, y que se reflejan en la deriva de zonas anómalas sobre la superficie terrestre. Este tipo de variaciones no son igualmente predecibles que las variaciones diurnas debido a que sus periodos de ocurrencia son mucho mayores. La magnitud de las variaciones seculares puede alcanzar valores de algunas decenas de nT al año aunque en algunos sitios se han observado cambios que pueden alcanzar magnitudes de hasta 150 nT/año y variaciones en la declinación e inclinación de hasta 10 minutos/año. Estos cambios tienen su origen en el acoplamiento electromagnético cíclico del núcleo y el manto inferior terrestre. Sin embargo, para los propósitos de la prospección geofísica estas variaciones son poco importantes pues normalmente se llevan a cabo en tiempos relativamente cortos en comparación con los largos periodos en los que ocurren las variaciones seculares, con la salvedad de que si se requieren hacer comparaciones con bases de datos adquiridos en décadas pasadas es necesario contar con las cartas históricas para tener conocimiento de las posibles desviaciones que puedan existir entre los datos nuevos y los adquiridos en el pasado.

### **Tormentas magnéticas**

Otro tipo de variaciones que pueden afectar las mediciones de campo magnético durante una campaña de adquisición son aquellas producidas por ráfagas de partículas cargadas que

proviene del sol como resultado de explosiones en su superficie. Este tipo de variaciones son conocidas como tormentas magnéticas y suelen ser de muy corta duración. Entre el Ecuador y los 60° de latitud las variaciones del campo pueden alcanzar valores de hasta 1000 gamas. Estas rápidas variaciones de periodo corto no se pueden corregir por lo que es conveniente suspender la obtención de datos cuando se presentan estas condiciones, (Dobrin, 1988).

#### **IV.9) Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)**

El Campo Magnético Internacional de Referencia (IGRF) es la representación matemática del campo geomagnético, que se ha adoptado como referencia por un acuerdo internacional a través de la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA). El IGRF consiste de los coeficientes de Gauss hasta el grado de orden 10 ya que estos representan en gran parte el campo producido por el núcleo de la tierra (Blakely, 1996). Como el campo geomagnético cambia con el tiempo, el IGRF se actualiza continuamente cada 5 años, llamadas épocas, de tal manera que el IGRF predice el campo suponiendo que los coeficientes de Gauss cambian linealmente, pero cada coeficiente tiene un término que es la deriva y con el tiempo mayor a 5 años esta predicción no es exacta. La IAGA adaptó modelos pasados usando nuevos datos, a lo que se les llama DGRF por lo que se convierten en el registro oficial de cómo se comporta el campo en épocas pasadas. Por lo tanto al resultado de haber realizado las correcciones por IGRF y variación diurna de las mediciones originales se le llama Campo anómalo  $\Delta B$  y la relación entre ellas está dada por:

$$\Delta B = \Delta B(\text{IGRF}) + \Delta B(\text{vd})$$

$$\Delta B(\text{IGRF}) = B_{\text{obs}} - B(\text{IGRF})$$

$$\Delta B(\text{vd}) = B_{\text{obs}} - B(\text{vd})$$

Dónde:

$$\Delta B = \text{Campo anómalo.}$$

$$B_{\text{obs}} = \text{Campo total medido.}$$

$$B(\text{IGRF}) = \text{Modelo del campo terrestre}$$

$$B(\text{vd}) = \text{Variación diurna.}$$

#### **IV.10) Generalidades del levantamiento aeromagnético**

El levantamiento de datos aeromagnéticos generalmente consiste de líneas paralelas, que son atravesadas por otras perpendicularmente, llamadas líneas de control o líneas base, la separación de estas líneas es mayor que el de líneas de vuelo principal, esto con el objetivo de tener diferentes medidas del campo magnético en las intersecciones, en tiempos diferentes, para poder eliminar los efectos de variaciones temporales y los de deriva del instrumento.

El espaciado entre líneas de vuelo va a depender de la profundidad a la que se encuentra el objetivo, siendo esta separación un poco mayor a la mitad de la profundidad que se desea llegar, para el caso que la profundidad sea variable o no se tenga información de la profundidad, la separación se elige empíricamente, (Ardizzone, 1996).

La elevación de vuelo durante la adquisición de datos debe ser en teoría la misma, pero en algunas veces como el área a explorar es muy grande, el levantamiento se realiza en diferentes campañas, en las cuales en algunas ocasiones la adquisición se hace a diferente altura, esto es importante ya que se debe tomar en cuenta que a más altura las anomalías magnéticas se atenúan en amplitud y se distribuye sobre un área más extensa, al contrario de las bajas altitudes que presentan anomalías magnéticas más definidas.

Generalmente el magnetómetro se lleva en el extremo de un cable con longitud de 24 a 30 m, distancia a la cual se puede desprejar el efecto magnético del avión, la caja en la cual se encuentra el magnetómetro tiene un diseño aerodinámico proporcionando una mejor estabilidad y una menor resistencia al aire, también cuenta con aletas para que no rote. (Geometrics, 2004)

#### **Ventajas y desventajas del método aeromagnético.**

En todos los métodos de exploración geofísica existen ventajas y desventajas, las cuales dependen de los objetivos de la exploración, teniendo en cuenta la rapidez y profundidad a la que se desee llegar. Obviamente también se deben tomar en cuenta los costos de operación y adquisición de los datos y la relación costo/beneficio del estudio. A continuación se enlistan las ventajas y desventajas del método.

## Ventajas

- La más importante y evidente es la rapidez y el reducido número de personas que se requieren para realizarlo.
- Bajos costos de operación, de la instrumentación y del procesamiento comparados con la extensión de terreno que puede cubrirse.
- Se puede realizar un levantamiento en lugares de difícil el acceso incluso con helicópteros.
- Los efectos de deriva del instrumento y la variación diurna quedan disminuidos al mínimo gracias a la rapidez del trabajo.
- El ruido provocado por campos magnéticos artificiales, afectan en lo más mínimo, debido a la altitud a la que vuela el avión.
- Se pueden reconocer mejor las anomalías producidas por las fuentes geológicas a profundidad, gracias a la altitud de vuelo, que discrimina en su mayoría el efecto de las más someras.
- La regularidad de los datos permite un mejor uso de los métodos analíticos de procesamiento.

## Desventajas

- La precisión del resultado del trabajo está siempre limitada por la exactitud del mapa al que se transcriben los datos magnéticos.
- La cartografía de algunas zonas puede estar incompleta o es demasiado inexacta para poder situar adecuadamente la anomalía magnética. Sin embargo, cuando en estas zonas se llevan exploraciones terrestres, el levantamiento topográfico necesario puede realizarse al mismo tiempo que las medidas magnéticas.

## V) DATOS MAGNÉTICOS DEL VALLE DE LEÓN

### V.1) Cartografía magnética del entorno del Valle de León.

El análisis realizado de las cartas aeromagnéticas comprende el rectángulo definido por las coordenadas de latitud norte 20° 29' a 21° 14' y de longitud oeste de 101° a 102°, es decir, un total de nueve cartas que comprenden una superficie total de aproximadamente de 8,576 km<sup>2</sup>. Los datos que se adquirieron del Servicio Geológico Mexicano (SGM: <http://www.sgm.gob.mx/>) fue adquirida en dos mallas de datos x, y, z, ambas de un tamaño de celda de 200 x 200m pero voladas a diferentes alturas por provenir de diferentes proyectos. La primera malla de datos aeromagnéticos, que comprende las cartas F14C:41,42,43 fue adquirida en vuelos de 300 metros de altura, mientras que la segunda malla, que comprende las cartas F14C: 51,52,53,61,62,63, fue volada a una altura de 450 m.

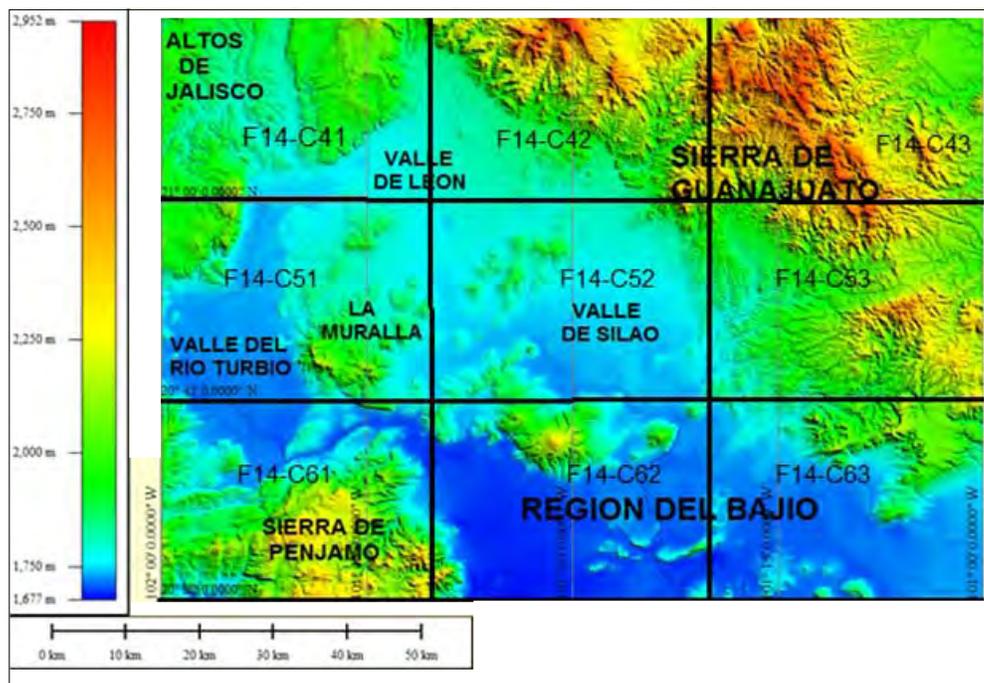


FIGURA 9.-Modelo de Elevación digital basado en cartografía de INEGI, que comprende el área que cubren las 9 cartas de datos aeromagnéticos de Campo Total analizados en este trabajo.

Los nombres de las cartas digitalizadas de Campo Magnético Total, de escala 1:50,000 son los siguientes: León (F14-C41), Nuevo Valle de Moreno (F14-C42), Guanajuato (F14-C43), San Diego de Alejandría (F14-C51), Silao (F14-C52), Aldama (F14-C53), Manuel Doblado (F14-C61), Irapuato (F14-C62) y Salamanca (F14-C63). Estas cartas combinadas cubren una extensión de 8,576 km<sup>2</sup> mostrada en la FIGURA 9.

Para el caso de las cartas F14: C41, C42 Y C43 la información fue obtenida con un avión Islander BN2-B27, con un magnetómetro Scintrex de cesio de bombeo óptico, con una sensibilidad de 0.001 nT, con una distancia entre líneas de vuelo de 1000 m y distancia entre líneas de control de 1800 m. Se voló a una altura de 450 m sobre el nivel del terreno, y el estudio se realizó en el año de 1996. En las demás cartas se utilizó un magnetómetro Geometrics G-B22A, también de bombeo óptico de la misma sensibilidad, con un sistema de adquisición Picodas P-101, cámara de video Urtec PCA m- 5000. El magnetómetro base fue un GEM-System GSM-19, tipo Overhauser con una sensibilidad de 0.01 nT. La distancia entre líneas de vuelo es de 1000 m, con líneas de control cada 10,000 m, los datos se adquirieron a una altura de 300 m sobre el nivel del terreno en el año de 1998.

Antes de poder ser utilizados, los datos Aeromagnéticos tienen que ser procesados para corregirlos por movimientos del avión (micro-nivelación), así como ser corregidos por la variación magnética diurna y por supuesto, sustraerles el Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF). Este procesamiento y adecuación de los datos se lleva a cabo previamente por técnicos especializados del SGM para poderlos ofrecer al acceso público en cartas impresas y digitalizadas básicas de Campo Magnético Total.

A pesar de que el SGM tiene completamente cubierta la república mexicana con datos aeromagnéticos, lo que representa un gran avance respecto a otros muchos países del mundo, en ocasiones existen incompatibilidades entre diferentes bases de datos de proyectos llevados a cabo en el transcurso de décadas de adquisición. Sin embargo, la mayor parte de las veces es posible hacer compatibles dos bases de datos de proyectos diferentes a partir de transformaciones matemáticas realizadas a las mallas. Para el caso de los datos del área de interés, como se mencionó, fueron volados a diferentes alturas por lo que para hacerlos compatibles fue necesario realizar una continuación analítica descendente (ver ANEXO 1) a los datos volados a una altura de 450 m para que fueran compatibles con

los adquiridos a la altura de vuelo de 300 m. Una vez realizada esta homogenización se realizó la unión de las dos mallas (o *grids*) de datos con el método de Empate de Sutura para que coincidieran en valores de contornos y colores. Para este propósito se define una línea de sutura que define la frontera en donde se unirán los *grids*, para lo cual se usa una función de Transformada de Fourier (FFT) que consiste en extender las correcciones sobre los dos *grids* en proporción a la longitud de onda de las desigualdades a lo largo de la trayectoria de sutura.

Una vez hecho esto, el primer paso previo al procesamiento es preparar los datos en una malla equi-espaciada que tenga las dimensiones y tamaño de celdas acorde a las dimensiones de los elementos geológicos mínimos que se desean resolver. Lo primero que hace el algoritmo de interpolación es remover tendencias del *grid* artificialmente producidas, luego extrapola hacia los bordes frecuentemente agregando áreas ficticias a los bordes del *grid* que tienen que ser reemplazados para evitar modelar e interpretar los valores ficticios. Este proceso completa los *grids* con datos deducidos a partir de los valores frontera de la malla, por lo que en todo caso las anomalías ubicadas en los bordes de las cartas tienen que ser tomadas con reserva a la hora de ser interpretadas.

Para este proceso se genera una rejilla temporal que sirve para aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) en el dominio espacial  $f(x, y)$  que está definida por:

$$F(u, v) = \iint f(x, y) \cdot e^{-2i\pi(ux+vy)} dx dy$$

Si se considera que el *grid* de datos fue realizado manteniendo el criterio de incremento espacial uniforme en las direcciones  $x$  y  $y$ , la transformada tomara una muestra con un incremento regular de:

$$\frac{1}{\text{tamaño del area}(\text{ciclos/metro})}$$

entre 0 y la frecuencia de Nyquist ( $f_N$ )

$$f_N = \frac{1}{2} \times \text{tamaño de celda.}$$

Además de este proceso se llevan a cabo filtrados de los datos para eliminar tendencias (FIGURA 10).

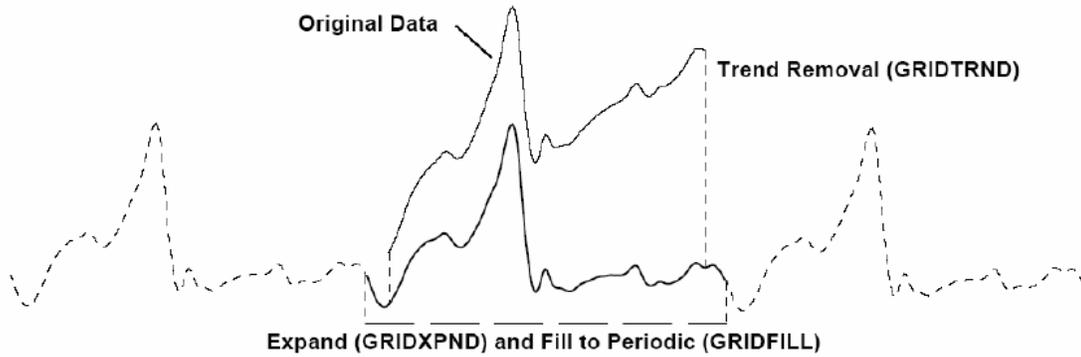


FIGURA 10.- Imagen que muestra la eliminación de tendencias como parte del pre procesamiento del *grid*, que se lleva a cabo utilizando el software de Oasis Montaj ® (2005).

La transformada inversa está definida como:

$$F(x, y) = \iint f(\mu, \nu) \cdot e^{-2i\pi(\mu x + \nu y)} d\mu d\nu$$

En donde  $\mu$  y  $\nu$  son números de ondas en las direcciones de  $x$  y  $y$  respectivamente y medidos en radianes por metro, los cuales están relacionados con frecuencias espaciales  $f_x$  y  $f_y$  expresadas en ciclos por metro (Oasis Montaj, 2005).

Para combinar ambas mallas de datos primero se seleccionan los valores de cada *grid* a lo largo de una línea de sutura y posteriormente se calcula la diferencia entre los valores del *grid* 1 y del *grid* 2 utilizando el algoritmo *Knitting* (Tutorial, Oasis Montaj, 2005). La FIGURA 11 muestra la carta de anomalía magnética de Campo Total obtenida a partir del proceso descrito que constituye la base fundamental de la interpretación.

Para el caso que nos ocupa, el análisis e interpretación de las estructuras en el Valle de León se basó en los datos magnéticos reducidos al Polo, es decir a partir de una transformación numérica (siguiente sección) que representa el efecto de un campo magnético radial y mono polar semejante al gravimétrico, que resulta más práctico a la hora de ubicar

espacialmente las fuentes de las anomalías magnéticas observadas y a través de los modelos cuantitativos.

A partir de la base de datos magnéticos reducidos al Polo se generó la carta de la derivada inclinada de la cual se habla más adelante en este capítulo, esto con el propósito de analizar lineamientos probablemente asociados a estructuras y fallas geológicas cartografiadas o no. El procesado de los datos fue realizado utilizando software comercial (Oasis Montaj®), el cual está diseñado para realizar múltiples operaciones, transformaciones y filtrado a la mallas de datos.

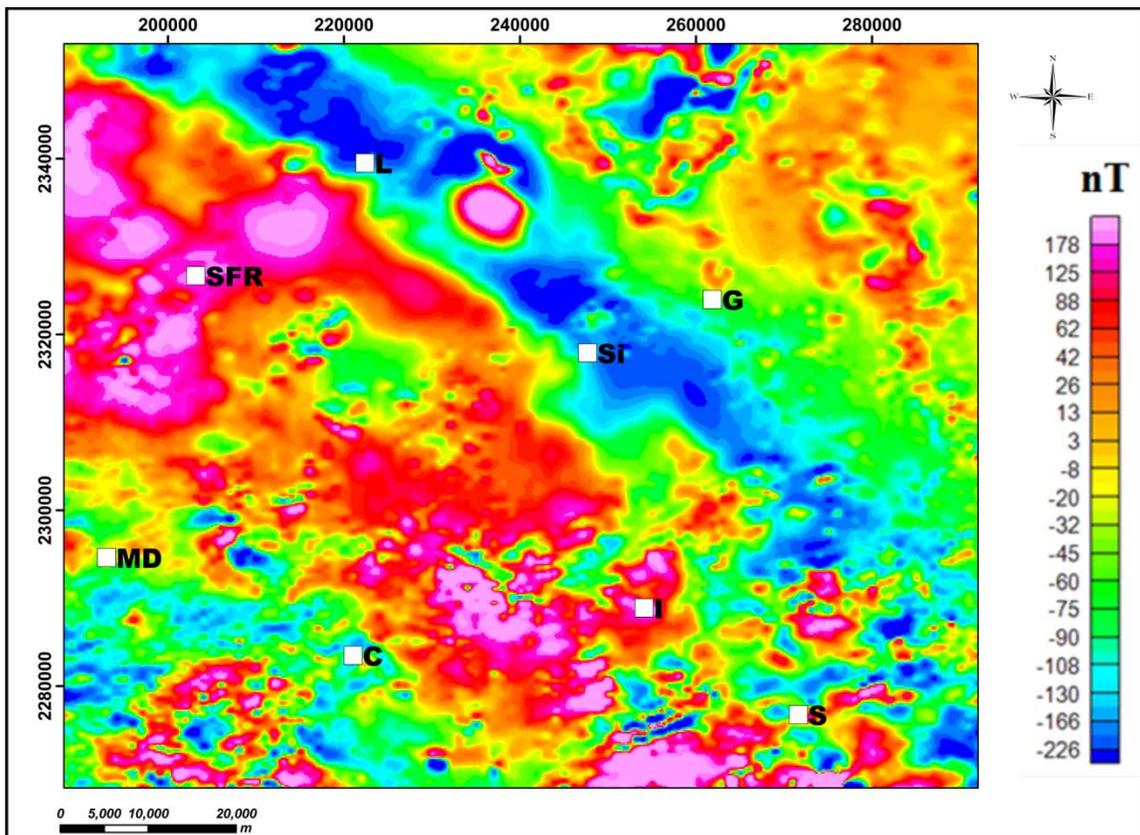


FIGURA 11.-Carta de anomalía del Campo Magnético Total de la zona de estudio obtenida a partir de la continuación descendente del *grid* adquirido a 450 m de altura sobre el nivel del terreno y la posterior combinación de ambas bases de datos (*grid 1* y *grid 2*) unida con el método empate de sutura. **L:** León, **SFR:** San Francisco del Rincón, **G:** Guanajuato, **SI:** Silao, **MD:** Manuel Doblado, **C:** Cuerámara, **I:** Irapuato, **S:** Salamanca.

## V.2) Carta de datos aeromagnéticos de Campo Total

Las anomalías magnéticas se pueden pensar como la suma de los efectos de distintas fuente a diferentes profundidades, incluyendo el ruido ocasionado por el entorno y la variación

temporal del campo primario, por lo cual es necesario separar los distintos efectos para poderlos interpretar adecuadamente. Existe una gran variedad de procesos numéricos matriciales que pueden ser aplicados a la base de datos aeromagnéticos para asistir en esta tarea, pero es necesario tener en claro qué tipo de análisis requieren los datos en función de objetivos específicos y no sobre interpretarlos, lo que ocurre frecuentemente, porque lo permite la rapidez con la que se pueden manejar las bases de datos y obtener las transformaciones matemáticas de las mismas.

La FIGURA 12 muestra la carta de anomalía magnética de Campo Total sobrepuesta a la carta geológica del Valle de León y valles circunvecinos, en donde se puede observar el corrimiento de los máximos magnéticos hacia el SW de la Sierra de Guanajuato sobre la cual deberían estar localizados si el campo no fuera dipolar.

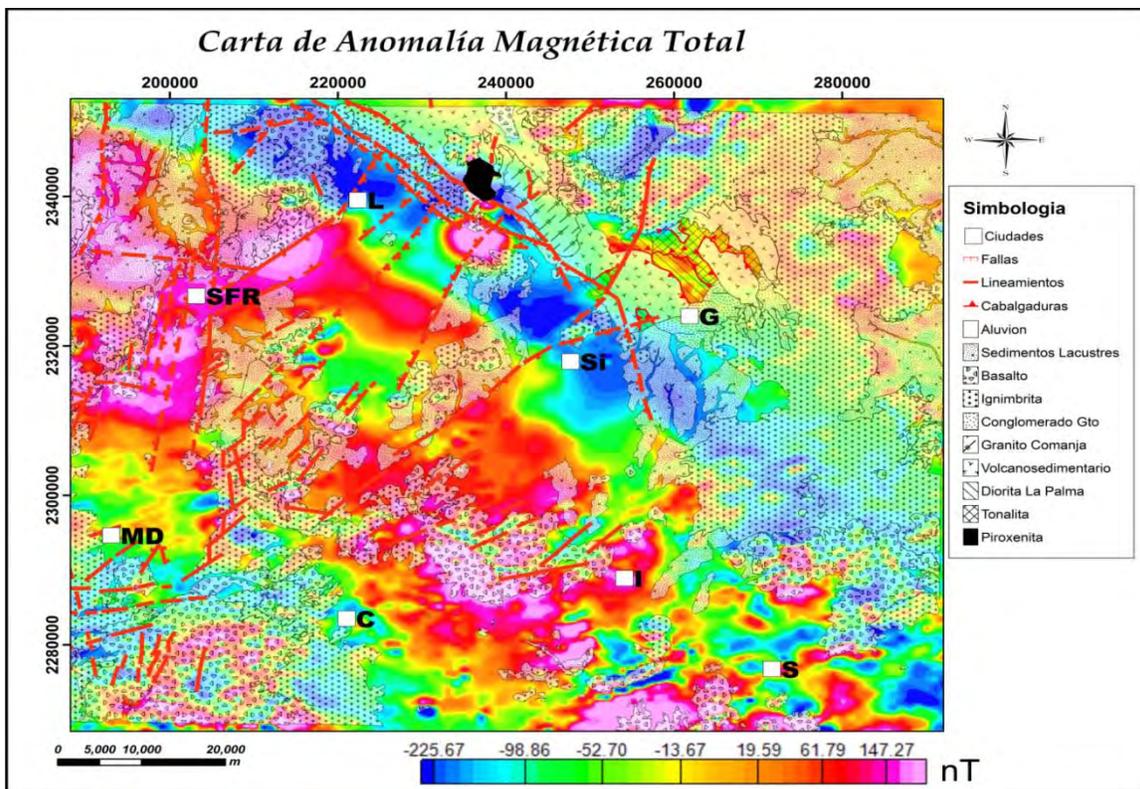


FIGURA 12.-Carta de anomalía del campo magnético Total, que tiene sobrepuesta la geología de la región. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámara, I: Irapuato, S: Salamanca.

Es sobradamente conocido que los pórfidos minerales más importantes en la región pertenecen al masivo metamórfico que comprende parte de la Sierra de Guanajuato y sin embargo su respuesta magnética se ubica desplazada espacialmente en el plano además de que aparece una anomalía negativa muy pronunciada que hace todavía más compleja su interpretación visual. Sin embargo, la distribución de las estructuras y fallas cartografiadas (líneas rojas continuas), así como las inferidas (líneas rojas punteadas), coinciden razonablemente bien con los límites de las diferentes zonas de anomalía magnéticas observadas (máximas y mínimas). A pesar de ello, resulta necesario realizar la transformación al Polo de los datos no solo para reubicar las zonas anómalas sobre las fuentes que las producen, sino cuantificar correctamente los espesores de los paquetes de relleno sedimentario.

### **V.3) Carta magnética Reducida al Polo**

Para hacer el análisis más objetivo en vista de que el campo magnético terrestre es dipolar, lo cual hace más compleja su visualización en términos de las probables fuentes en el subsuelo, se echa mano de una herramienta matemática para transformar el campo magnético dipolar a su forma mono polar. Este proceso se conoce como reducción o transformación del campo magnético al Polo, que en principio nos permite asociar los máximos y mínimos magnéticos directamente sobre los cuerpos hipotéticos que los producen. Este procedimiento nos permite como primera aproximación, trazar límites entre las diferentes unidades magnéticas que a su vez pueden ser interpretadas en términos geológicos y eventualmente hidrológicos. La expresión matemática que representa la transformación de datos magnéticos de campo dipolar a otro de tipo mono polar (o radial) está dada por (p.e. Grant y West, 1985):

$$L(\theta) = \frac{[\text{sen}(I) - i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}{[\text{sen}^2(I_a) + \cos^2(I_a) \cos^2(D - \theta)][\text{sen}^2(I) + \cos^2(D - \theta)]}, \text{ si } (I_a < I),$$

donde:

$I_a$ : Inclinación por corrección de amplitud (nunca es menor que el valor de la inclinación  $I$  (por defecto, el MAGMAP utiliza para esta corrección un valor de  $\pm 20^\circ$ )

$I$ : Inclinación geomagnética

$D$ : Declinación geomagnética

$\theta$  = dirección de número de ondas

Por ser el campo terrestre dipolar, la forma de las anomalías magnéticas en la superficie terrestre o cerca de ella, depende de la Declinación e Inclinación del campo magnético que varía de  $0^\circ$  en los Polos, a  $90^\circ$  en el Ecuador. El patrón de variación del campo primario se suma a la complejidad estructural de la corteza terrestre que produce los campos secundarios y rasgos magnéticos de interés asociados a la acumulación de recursos naturales, particularmente el agua.

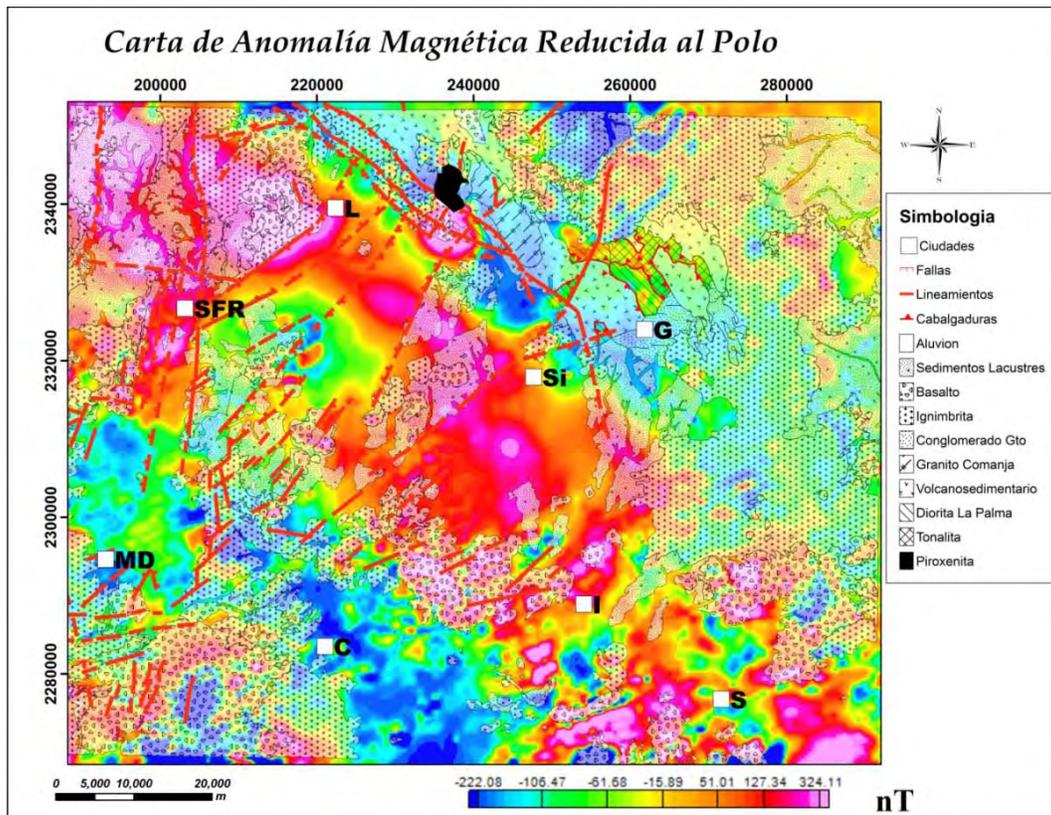


FIGURA 13.- Configuración del campo Magnético Total Reducido al Polo, con una declinación de 7.66 e Inclinación de 48.5, que tiene sobrepuesta la geología de la región. **L:** León, **SFR:** San Francisco del Rincón, **G:** Guanajuato, **Si:** Silao, **MD:** Manuel Doblado, **C:** Cuerámaro, **I:** Irapuato, **S:** Salamanca.

Por esta razón para simplificar la interpretación de los campos secundarios se generó la carta de Reducción al Polo (FIGURA 13), ya que esto permite ver las anomalías magnéticas situadas sobre la fuente que las ocasiona. Con el objeto de valorar el efecto de la temporalidad y variaciones en los valores de inclinación y declinación del campo entre las campañas de 1996 y 1998, se realizaron pruebas de varias reducciones al Polo considerando valores extremos de dichas variaciones. La primera fue hecha con una declinación e inclinación del año de 1995, tomada de la página de la NOAA, con latitud  $20.8^\circ$  y longitud oeste de  $101.5^\circ$ , tratando que este valor se calculara al centro del área de estudio, arrojando un campo de 43,002 nT con una declinación de  $7.66^\circ$ , con un cambio al año de  $0.06^\circ$  al W y  $48.54^\circ$  de inclinación. Los segundos valores obtenidos de inclinación y declinación fueron de  $48.41^\circ$ ,  $7.38^\circ$  respectivamente, con un campo de 43,315 nT. Estos parámetros se obtuvieron de las 9 cartas de campo total utilizadas. Los valores correspondientes al centro de cada una de las 9 cartas se sumaron y se promediaron para obtener un solo juego de parámetros para el modelado posterior de los perfiles. Esto se realizó para analizar si la anomalía reducida al Polo variaba o no considerablemente dependiendo de las variaciones locales y diferencias de adquisición de las dos bases de datos utilizadas. Como no hubo cambios significativos en los resultados se considera que las variaciones locales y temporales (2 años) no son relevantes para la interpretación cuantitativa de la carta magnética reducida al Polo.

La FIGURA 14 muestra el modelo de elevación digital sobrepuesto a la carta de reducción al Polo, en donde se puede observar que el máximo magnético asociado a la Sierra de Guanajuato se ha desplazado hacia el NE lo que sugiere una mayor precisión para la ubicación de las fuentes. Esto se refuerza observando que el máximo local asociado a la Sierra de Guanajuato coincide topográficamente con la ubicación de las zonas de mayor mineralización (piroxenita y tonalita), muchas de ellas expuestas por la antigua explotación minera del entorno de la ciudad de Guanajuato. Por esta razón y las expuestas anteriormente se considera, que aunque con reservas, es posible afirmar que los datos magnéticos transformados al Polo son una mejor aproximación para el modelado cuantitativo a pesar de que aún pueda existir cierto desfase no cuantificado aún.

Por otro lado, la FIGURA 14 muestra diferentes “dominios” magnéticos definidos como zonas de valores de campo magnético contrastante, es decir zonas de anomalía Positiva o Negativa máximas con altos gradientes entre ellas que frecuentemente definen estructuras escaladas aisladas o continuas. Dichos dominios obedecen regionalmente una relación matemática simple  $I=kH$ , la cual indica que la intensidad de magnetización ( $I$ ) es proporcional al campo magnético primario ( $H$ ) en donde la constante  $k$  (susceptibilidad magnética) que es una propiedad física del material, representa un dominio magnético, es decir que diferentes unidades litológicas con propiedades magnéticas diferentes representan diferentes dominios magnéticos.

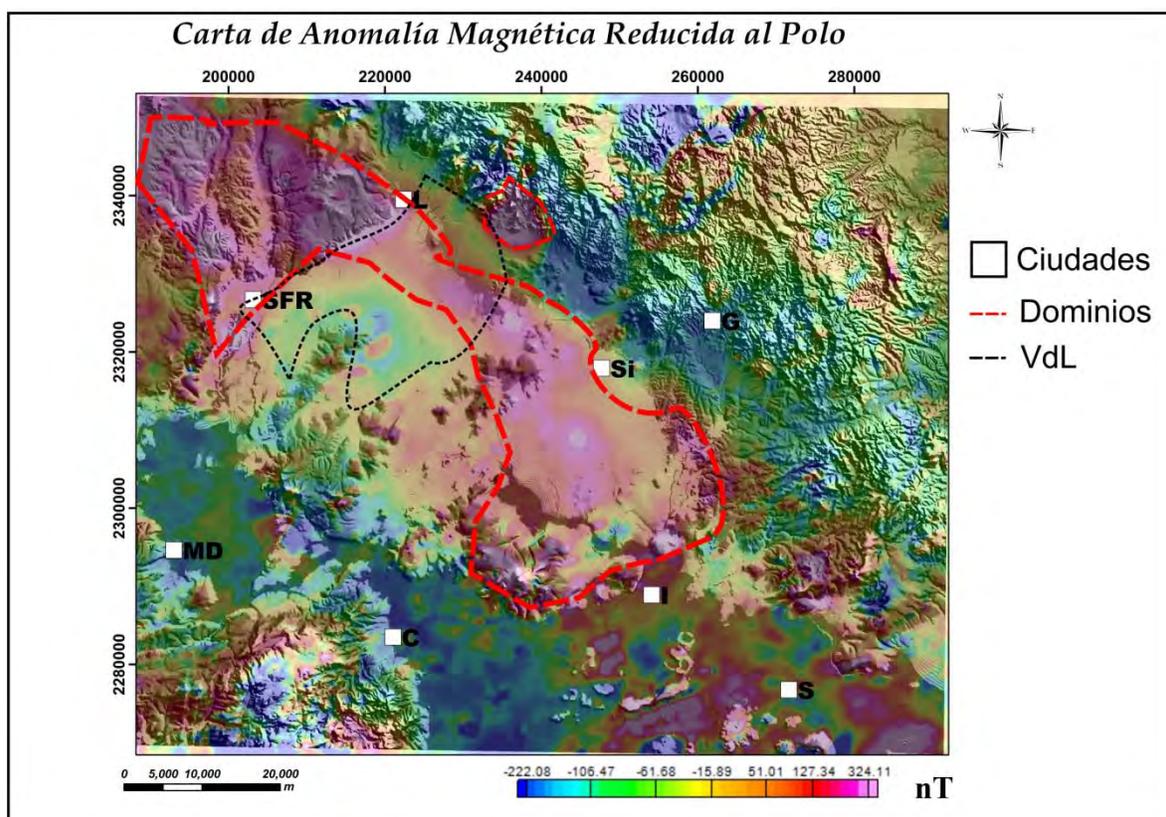


FIGURA 14. Anomalía de Campo Total Reducida al Polo, sobre el modelo de elevación. **L:** León, **SFR:** San Francisco del Rincón, **G:** Guanajuato, **Si:** Silao, **MD:** Manuel Doblado, **C:** Cuerámara, **I:** Irapuato, **S:** Salamanca **VdL:** Valle de León.

Por ejemplo, en la figura se aprecia que unidades geológicas que afloran en superficie (principalmente volcánicos) coinciden con zonas de máximos magnéticos confinadas por

altos valores de gradiente por lo que puede ser considerado como un dominio magnético de origen ígneo. De manera similar, es posible definir otros dominios aunque frecuentemente se ignora su relación litológica y estructural.

Uno de los rasgos magnéticos que llama la atención por lo bien definido de su expresión es otro dominio magnético positivo, que representa un lineamiento importante que cruza prácticamente el sector nororiental del área de estudio en una dirección NW- SE, desde los Altos de Jalisco hasta Salamanca donde la litología superficial son basaltos e ignimbritas por lo que probablemente se encuentra controlada estructuralmente. Este Alto magnético parece desaparecer en las partes más bajas topográficamente del Valle de León y Valle de Silao Romita pero resurge eventualmente hacia la zona central del Bajío (FIGURA 14).

Por otro lado y de manera relevante para este trabajo, se encuentran los dominios magnéticos negativos pues se pueden asociar a las rocas de origen sedimentario cuyas magnetización es considerablemente inferior a la de las rocas de origen ígneo. De acuerdo a este criterio y bajo el argumento de que los mínimos magnéticos definen espacialmente dominios negativos separados que coinciden razonablemente con las zonas de valles, lo que hace suponer la existencia de cuencas tectónicas vulcano-sedimentarias, una de las cuales (sur de la ciudad de León) llamada la cuenca del Valle de León es objeto principal del presente trabajo.

## VI) IMPLICACIONES ESTRUCTURALES

### VI.1) Derivada Inclinada.

Por la forma en la que está definida, la derivada inclinada tiende a enfatizar las estructuras magnéticas a partir del cociente de la derivada del campo magnético total (T) con respecto a la vertical entre la magnitud del campo magnético horizontal. Es decir, proporciona una medida de la variación de la componente vertical de T con respecto al campo horizontal resaltando los efectos de los campos magnéticos secundarios inducidos localmente por las estructuras. Es particularmente útil para resaltar rasgos estructurales a longitud es de onda media y corta producidas por heterogeneidades en los primeros cientos de metros, quizás unos cuantos km de la corteza, destacando lineamientos tales como ejemplo fallas, contactos y discontinuidades litológicas. Entonces, la derivada inclinada se define como

$$TDR = \arctan (VDR/THDR)$$

donde:

$VDR$  = derivada vertical del campo magnético total  $T$

$THDR$  = (*Gradiente Horizontal*)

ó magnitud de la derivada del campo magnético horizontal

Es decir,

$$VDR = dT/dz$$

$$THDR = \sqrt{(dT/dx)^2 + (dT/dy)^2}$$

$$\text{Derivada del Tilt} = \arctag \left( \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}} \right)$$

### VI.2) Malla de la derivada Inclinada del Valle de León

Utilizando la base de datos magnéticos reducida al polo mencionada anteriormente se obtuvo la malla de la derivada inclinada que se muestra en la FIGURA 15 sobrepuesta a la

carta geológica simplificada, en donde se pueden apreciar diferentes patrones de variación que coinciden parcialmente con la distribución de las unidades litológicas cartografiadas en superficie. Como se puede apreciar, regionalmente la derivada inclinada sugiere orientaciones estructurales entre EW y NE-SW, excepto en los valles de Silao y León en donde se observan anomalías prominentes de la componente vertical de T cuyo patrón difiere marcadamente del entorno. En el Valle de Silao la orientación de la zona anómala es aproximadamente NS en tanto que en el Valle de León su orientación es marcadamente NW-SE pero consistente con la orientación de la anomalía asociada con las rocas más magnetizadas de la zona que corresponden a la región del distrito minero de Guanajuato.

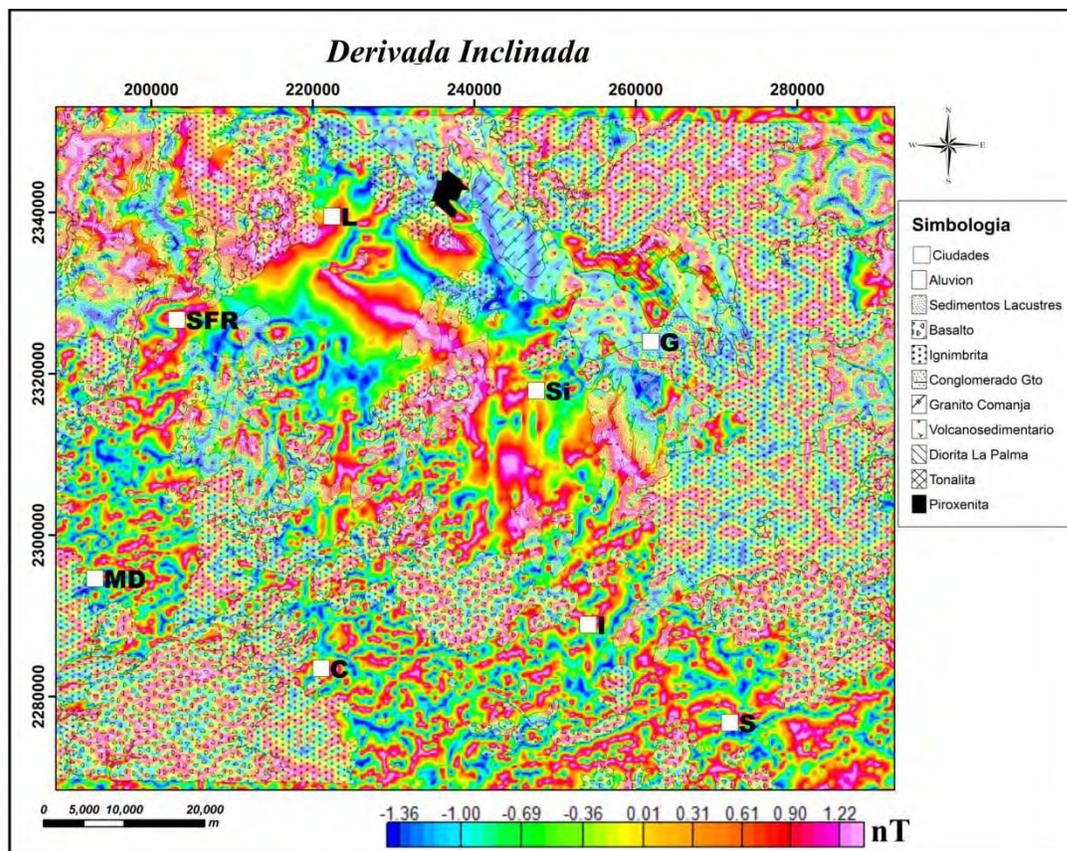


FIGURA 15.- Derivada inclinada con la carta geológica sobrepuesta. **L:** León, **SFR:** San Francisco del Rincón, **G:** Guanajuato, **Si:** Silao, **MD:** Manuel Doblado, **C:** Cuerámaro, **I:** Irapuato, **S:** Salamanca.

La FIGURA 16 muestra la carta de la derivada inclinada sobrepuesta a la carta del modelo digital de elevación en donde se incluye el conjunto de lineamientos interpretados (líneas negras punteadas) a partir de la FIGURA 15, así como las fallas y lineamientos cartografiados y verificadas en campo (líneas azules punteadas y continuas).

Como se puede apreciar, la mayor parte de los lineamientos interpretados tiene una orientación SW-NE y frecuentemente es posible continuar estructuras cartografiadas o interpretadas por otros medios con lineamientos sugeridos por la derivada inclinada. Esta orientación es consistente con la orientación de las estructuras de graben que forman las cuencas y valles de la zona norte del Bajío. Con líneas negras gruesas se muestran los valores anómalos altos de la derivada inclinada cuya fuente se ubica dentro de los valles de Silao (NS) y León (NW-SE) y que sugieren límites estructurales probablemente relacionados con eventos de compresión de carácter regional.

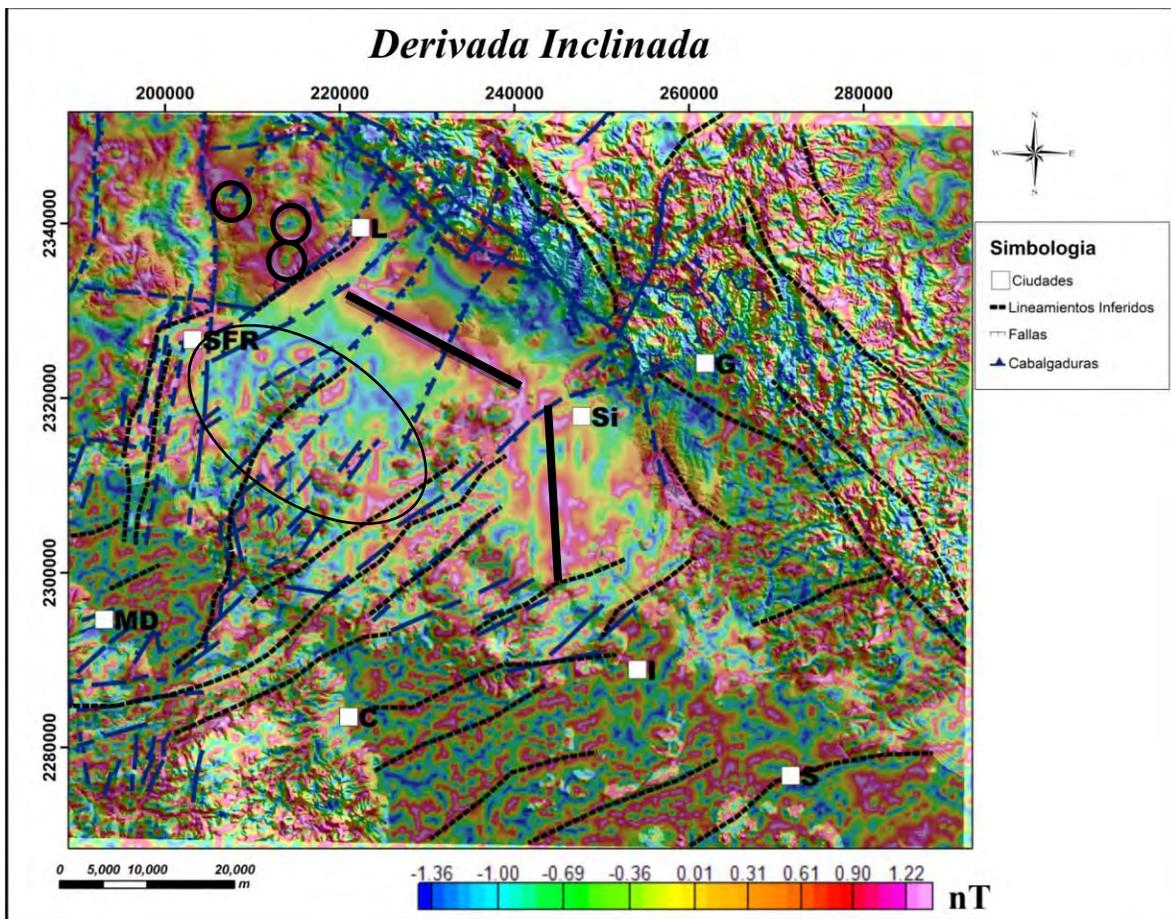


FIGURA 16.- Combinación de la derivada inclinada y del modelo digital de elevación. Las líneas negras punteadas indican lineamientos interpretados a partir de la derivada inclinada las líneas azules punteadas y continuas corresponden a las fallas y lineamientos cartografiados, los círculos pequeños en el extremo superior izquierdo indican probables centros eruptivos sugeridos por los patrones circulares observados, en tanto que la zona dentro de la elipse trazada es probablemente una de las principales zonas de recarga del sistema acuífero del Valle de León. **L:** León, **SFR:** San Francisco del Rincón, **G:** Guanajuato, **Si:** Silao, **MD:** Manuel Doblado, **C:** Cuerámara, **I:** Irapuato, **S:** Salamanca.

En la parte superior izquierda se muestra con círculos la posible ubicación de centros eruptivos sugeridos por los resultados, sin embargo parte de estos rasgos podrían ser artificiales por lo que es necesario verificación de campo. Por otro lado, como se sabe las zonas de debilidad causada por fallas y/o fracturas se pueden asociar a zonas de recarga por lo cual se puede argumentar que una de las principales zonas de recarga del sistema acuífero del Valle de León sugerida por los datos de la derivada inclinada se ubica en el entorno de la elipse trazada en la FIGURA 16.

## VII) GRAVIMETRIA SATELITAL

### VII.1) Introducción

La Geodesia es el campo de la ciencia que está implicado en la medición del tamaño y forma de la tierra, así como su campo de gravedad. Los geodestas usualmente calculan el geoides a partir de la gravedad observada, pero también se puede realizar lo contrario, convertir el geoides observado en anomalías gravimétricas.

En general la geodesia moderna intenta resolver problemas geofísicos, estudiando fenómenos observables, como la variación en la rotación de la Tierra, en la gravedad y la deformación de la superficie. Hoy en día, estas observaciones provienen de varias fuentes, que incluye el *Satellite Laser Ranging (SLR)* o Sistema *DORIS*, o el Sistema de Medición Laser (SML) *Very-Long\_Baseline Interferometry (VLBI)*, o los sistemas de Posicionamiento Global (GPS) tales como el *Doppler Orbitography and Radio Position (DORP)* integrados al satélite, cuyas principales características se presentan de manera breve en el ANEXO 2.

Los radares utilizados para conformar el modelo de gravimetría fueron: *Geosat*, *ERS-1*, *Topex/Poseidon*, *ERS2*, *Jason 1*, *ENVISAT*, *Jason 2*, cada radar obtiene perfiles a lo largo de las diferentes orbitas, y juntando los perfiles se convierten en mallas.

En general las herramientas geodésicas como los sistema de posicionamiento global (GPS), altimetría de radar de apertura sintética, altimetría laser y los seguimientos por satélite, son lo suficientemente precisos para detectar pequeñas variaciones en las características de la tierra, ya sea relacionadas con la tectónica de placas, con la circulación oceánica y atmosférica, etc., por lo cual las anomalías de gravedad derivadas por altimetría Satelital son enormemente valiosas para la exploración de cuencas oceánicas remotas, para la predicción de la batimetría, para la navegación, el estudio de la tectónica de placas, la isostasia de volcanes y la exploración petrolera entre otros (p.e. Sandwell y Smith, 1997). En particular, en este estudio los datos gravimétricos satelitales son utilizados para tener una idea general aunque de forma cualitativa, de la complejidad estructural y límites laterales de la cuenca del Valle de León cuyo objeto es ayudar a constreñir los modelos cuantitativos derivados de los datos aeromagnéticos interpretados.

## VII.2) Altimetría

Para poder hablar de la altimetría es preciso definir lo que se entiende por Elipsoide y por geoide. El elipsoide se debe entender como la superficie equipotencial generada por una elipse de revolución que se aproxima a la forma de la Tierra, la cual aunque tenga desviaciones locales en lo general resulta muy conveniente debido a que simplifica cálculos matemáticos (Li y Götze, 2001). Al geoide se le define como la superficie equipotencial que coincide con el nivel medio del mar (Li y Götze, 2001). Por lo tanto esta superficie de referencia enfatiza la distribución de masas ya sea por efecto o defecto respecto al elipsoide, conociendo a estas diferencias como ondulaciones del Geoide.

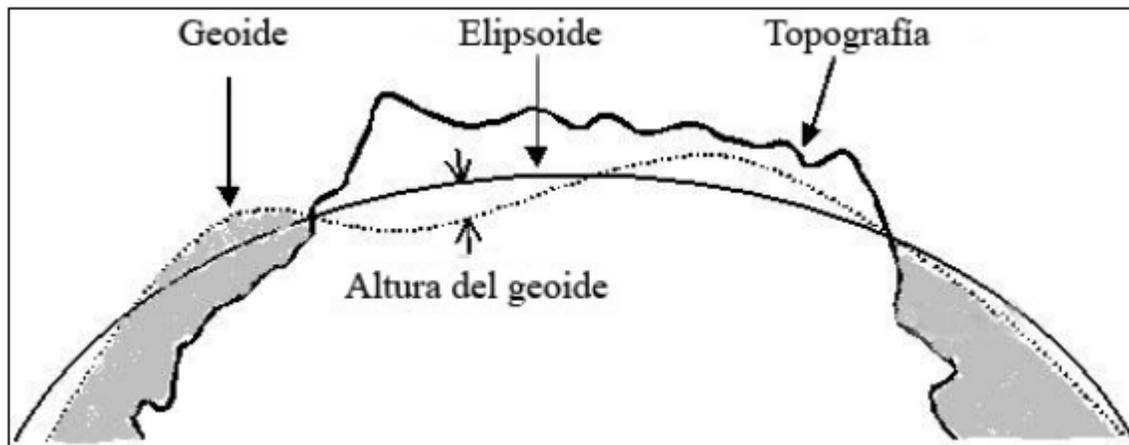


FIGURA 17.- . Superficies del geoide, elipsoide, topografía y la altura del geoide, tomada de Li y Götze, 2001.

La adquisición de datos se da a partir de un satélite orbitando durante varios años que orbita la Tierra, sumando y apilando datos de altura del geoide a partir de perfiles continuos. Los datos se agrupan en una rejilla equidistante con proyección de *Mercador* con dimensiones de celda de 2 minutos en longitud y  $\cos(\theta) \times 2$  minutos en latitud, lo que define rejillas de aproximadamente 3 x 3 kilómetros (Sandwell y Smith, 1997), aunque existen versiones más recientes publicadas en 2008 en la que el tamaño de celda más pequeña, es decir de 2' de longitud y 1' de latitud, que corresponde a celdas de 2 x 1 km, lo que mejora sustancialmente la resolución espacial. La malla resultante obtenida por Sandwell y Smith (2009) es una rejilla con 21,600 columnas y 17,280 filas. El modelo altimétrico utiliza un

procedimiento "remove- restore" para mezclar el detalle proporcionado por la onda corta de altimetría con las anomalías a gran escala de modelos geopotenciales. El modelo utilizado es EGM2008, del cual se proporciona mayor detalle en el ANEXO 2, así como del proceso de conversión de alturas de geoide y del modelo geopotencial a anomalía gravimétrica.

Los datos satelitales se pueden obtener en un formato  $x, y, z$ , donde  $x$ , es la longitud,  $y$  la latitud y  $z$  es el valor del campo gravimétrico deducido de las variaciones en la altura del satélite debidas a las variaciones en la intensidad del campo gravitacional por efecto de concentración o deficiencia de masa asociadas a la geodinámica terrestre. Las orbitas satelitales se caracterizan comúnmente por la altura a la que orbitan alrededor de la Tierra, entre las cuales se distinguen las siguientes:

LEO = Órbita terrestre baja, de hasta 2,000 km,

MEO = Órbita de la Tierra Media; 5,000-20,000 km

GEO = Órbita geoestacionaria, 36,000 km.

La geodesia satelital de LEO se obtiene en su mayoría a partir de órbitas prácticamente circulares. Por lo general se pueden realizar misiones de gravedad sobre el terreno como es el caso de los proyectos CHAMP, GRACE o GOCE a una altura orbital de 400 kilómetros o con los satélites de teledetección (como SPOT, Landsat, ERS) en alturas orbitales de alrededor de 800 a 1,000 km, o bien con satélites tales como TOPEX/POSEIDON, ENVISAT, JASON en alturas orbitales de 1,000 a 1,500 km. LEO también se utiliza en combinación con satélites de comunicación como Global Star e Iridium . El período orbital en estas altitudes varía entre 90 minutos y dos horas. El radio de la huella satelital (es decir, el área en la superficie desde la que el satélite es visible por encima de la horizonte) varía entre 2,000 y 4,000 km (Günter Seeber, 2003).

### **VII.3) Interpretación Cualitativa de Gravimetría Satelital**

La gravedad depende de la distribución de las masas en el subsuelo por lo que nos puede dar una idea clara de la concentración de cuerpos anómalos en una región determinada. Los cuerpos anómalos pueden generar anomalías de gravedad positivas o negativas dependiendo de si existe concentración o deficiencia de masa en contraste con valores

intermedios de gravedad. La distribución de estas variaciones sobre una región determinada, y en particular en el caso de la zona del Bajío en el Edo. de Guanajuato, permite constreñir espacialmente las zonas anómalas con el apoyo de la cartografía geológico-estructural y proponer modelos conceptuales más objetivos y funcionales.

Los datos gravimétricos a partir de la interpolación de la base de datos descargada del sitio ([http://topex.ucsd.edu/WWW\\_html/mar\\_grav.html](http://topex.ucsd.edu/WWW_html/mar_grav.html)) se muestra en la FIGURA 18, la cual tiene sobrepuesta la geología superficial actualizada como parte de este estudio. La escala de color del lado derecho en dicha figura representa la escala de anomalía gravimétrica o intensidad de atracción gravitacional, en donde los tonos azules representan valores mínimos de campo y los tonos rojos los valores máximos. Como se puede apreciar, los máximos gravimétricos se pueden asociar a cuerpos masivos, con antecedentes de mineralización como la Sierra de Guanajuato en el sector N y NE del área de análisis considerada, así como a Los Altos de Jalisco (al NW) y al Cerro de Pénjamo (al SW) entre otros. En contraste, los mínimos gravimétricos visualizados en tonos azules y verde claro, se asocian de manera natural y precisa a las cuencas sedimentarias de origen tectónico, pues en general se encuentran limitadas por fallas y/o estructuras de origen volcánico. Los valores mínimos de gravedad que definen dichas cuencas se deben a los mayores espesores de rellenos sedimentarios o vulcano-sedimentarios permeables de baja densidad relativa que da como resultado valores negativos y cercanos a cero de anomalía gravimétrica. Entre las cuencas mejor definidas (-4 a 6 mgal) se encuentran las de Silao, Cuerámaro y Manuel Doblado, sin embargo aunque con mayores valores relativos de campo gravimétrico (-4 a 15 mgal), se define una estructura de graben aproximadamente rectangular entre las ciudades de León (al NE) y San Francisco del Rincón (al SW) a la que llamamos cuenca del Valle de León, así como otra pequeña cuenca al norte de la ciudad de Irapuato (ver FIGURA 18). El incremento de los valores de intensidad de la anomalía en la cuenca del Valle de León hacia el NE podría estar influenciada por la cercanía de una importante concentración de masa asociada con la mineralización a lo largo de la Sierra de Guanajuato cuya densidad media podría ser probablemente alrededor de 2.9 a 3.1 g/cm<sup>3</sup> (Complejo Filoniano).

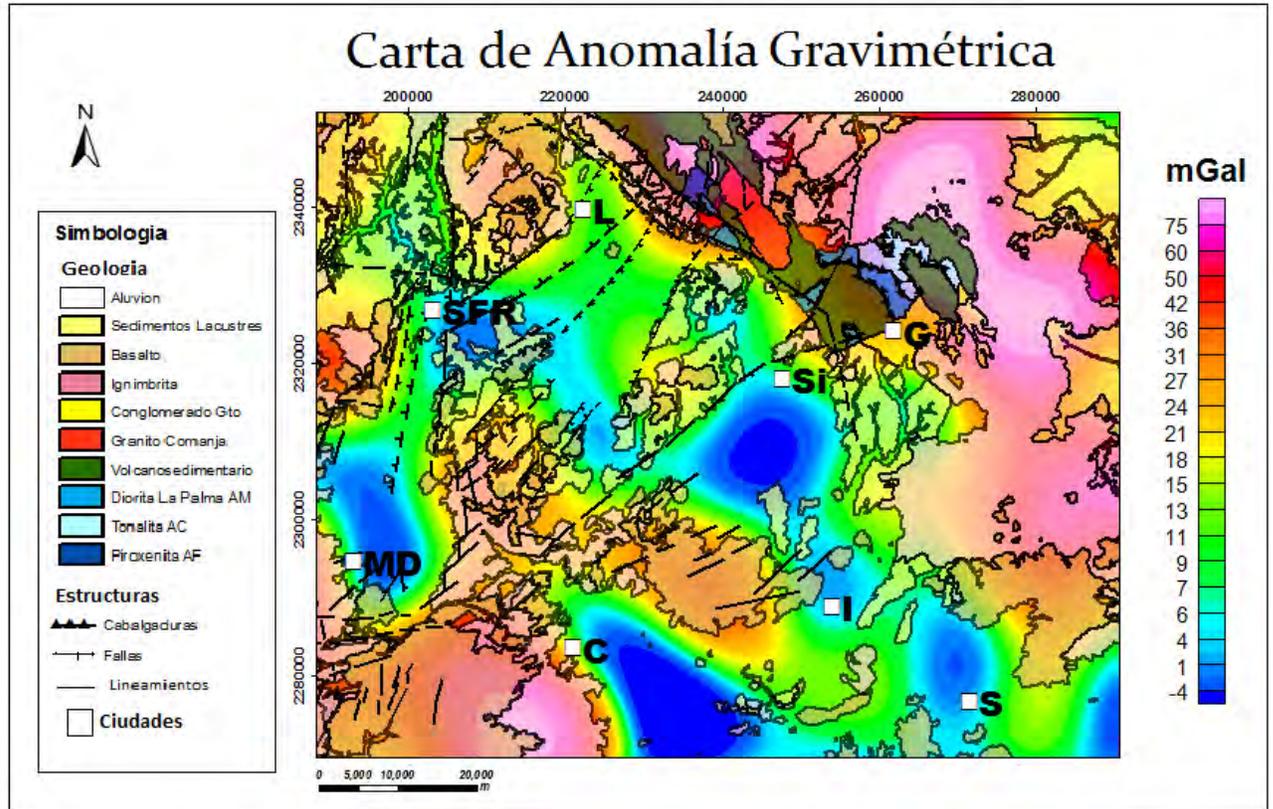


FIGURA 18.-Configuración de los datos de Gravimetría Satelital, que tiene sobrepuesta la geología. Donde **L**: León, **SFR**: San Francisco del Rincón, **G**: Guanajuato, **Si**: Silao, **MD**: Manuel Doblado, **C**: Cueremaro, **I**: Irapuato, **S**: Salamanca. Tomados de (<http://topex.ucsd.edu/>)

Por otra parte la FIGURA 19 muestra el mismo mapa de anomalía gravimétrica con los lineamientos estructurales y fallas geológicas, tanto cartografiadas como inferidas a partir de la derivada inclinada, es decir, a partir del cociente de la derivada vertical del campo entre la combinación de las derivadas horizontales del campo magnético (Sec. VI.1). Como se puede observar, existe una buena correlación entre la mayor parte de los lineamientos y estructuras deducidos y cartografiados con la distribución de anomalías gravimétricas, sin embargo la resolución de zonas anómalas a partir de la altimetría satelital a la altura de vuelo (~2,000 km) realizada. La distancia del satélite al centro de masa de la Tierra, es decir, la órbita satelital es crucial para la resolución de la cartografía de gravimetría satelital la cual aumenta de forma exponencial cuando disminuye el tamaño de la órbita satelital.

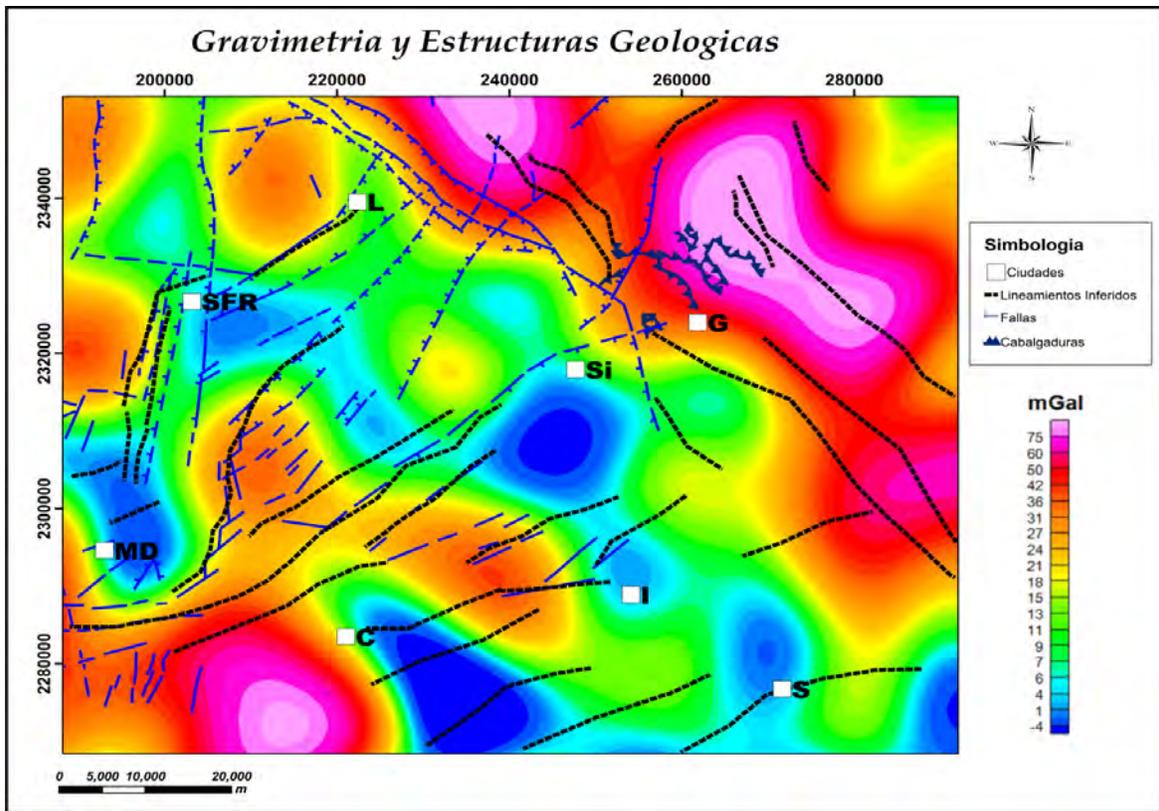


FIGURA 19.- Configuración de los datos de Gravimetría Satelital, con los lineamientos y fallas geológicas cartografiados (líneas azules) e inferidos (líneas negras punteadas) sobrepuestos. Donde **L**: León, **SFR**: San Francisco del Rincón, **G**: Guanajuato, **Si**: Silao, **MD**: Manuel Doblado, **C**: Cuernavaca, **I**: Irapuato, **S**: Salamanca. Tomados de (<http://topex.ucsd.edu/>)

## VIII) CRITERIOS PARA EL MODELADO DE DATOS AEROMAGNÉTICOS.

En el caso de campos potenciales, el problema de modelado directo consiste en determinar el potencial generado por las diversas fuentes existentes, generando un modelo geológico estructural hipotético, conociendo la posible distribución y observando su respuesta gravitacional y/o magnética. Esta respuesta está definida por parámetros físicos tales como la densidad de las rocas para el caso del campo gravitatorio y la susceptibilidad magnética para el caso del campo magnético.

### VIII.1) Selección de Perfiles

Para este trabajo se escogieron cuatro perfiles para modelar, dos con dirección NW-SE y dos con dirección SW-NE (FIGURAS 20, 21 y 22). Se escogieron de esta manera para atravesar las 2 direcciones principales de las estructuras, las cuales dan lugar a la geometría del área de estudio. Los vértices de cada perfil se muestran en la TABLA 4.

| Perfil | Inicio   |         | Final    |         | Extensión (m) |
|--------|----------|---------|----------|---------|---------------|
|        | Longitud | Latitud | Longitud | Latitud |               |
| A-A'   | 210339.4 | 2346718 | 247203.8 | 2323881 | 43,365        |
| B-B'   | 200448.8 | 2339417 | 271800.5 | 2294402 | 84,365        |
| C-C'   | 188288.1 | 2298292 | 232287.2 | 2345226 | 64,333        |
| D-D'   | 199713.7 | 2296336 | 236123.1 | 2336706 | 54,363        |

TABLA 4.-Vértices de las secciones modeladas en coordenada UTM con proyección WGS84.

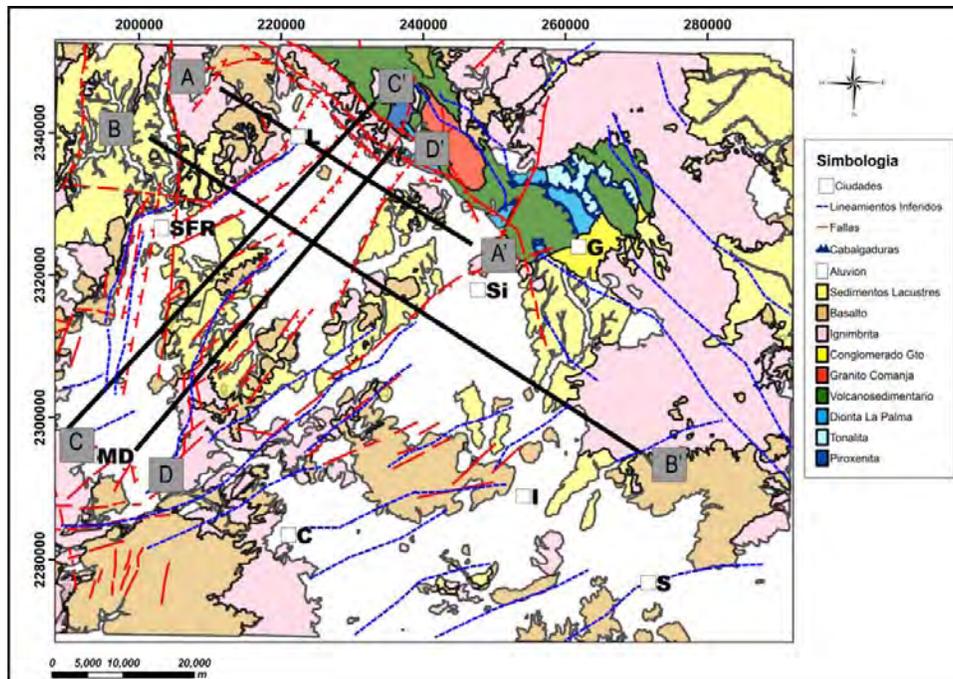


FIGURA 20.- Mapa Geológico el cual muestra la ubicación de los perfiles aeromagnéticos propuestos. Donde **L**: León, **SFR**: San Francisco del Rincón, **G**: Guanajuato, **Si**: Silao, **MD**: Manuel Doblado, **C**: Cuernamaro, **I**: Irapuato, **S**: Salamanca.

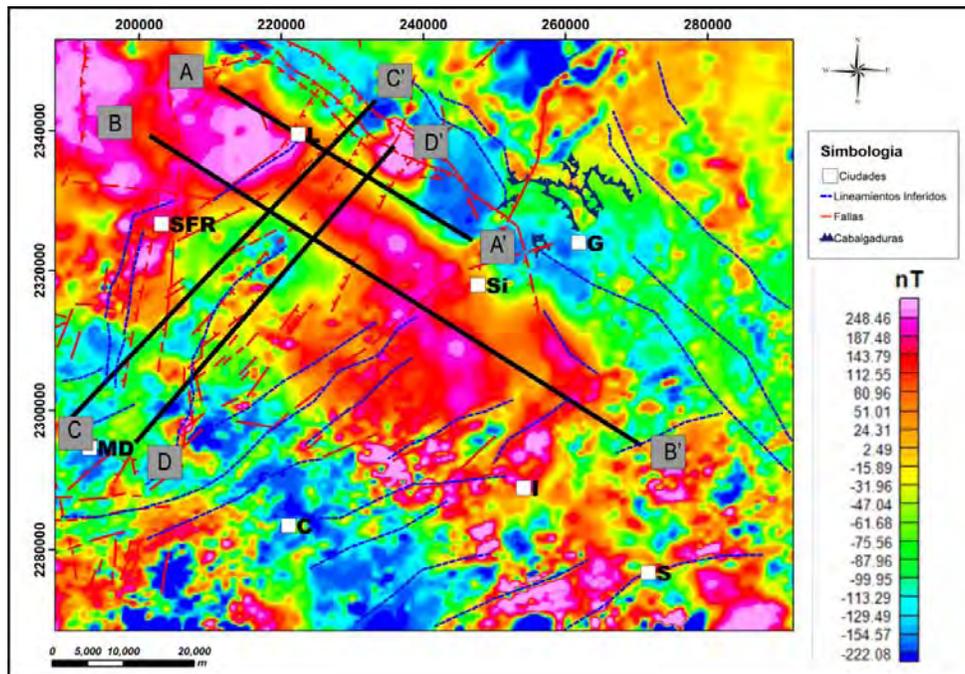


FIGURA 21.- Mapa de Reducción al Polo el cual muestra la ubicación de los perfiles aeromagnéticos propuestos. Donde **L**: León, **SFR**: San Francisco del Rincón, **G**: Guanajuato, **Si**: Silao, **MD**: Manuel Doblado, **C**: Cuernamaro, **I**: Irapuato, **S**: Salamanca.

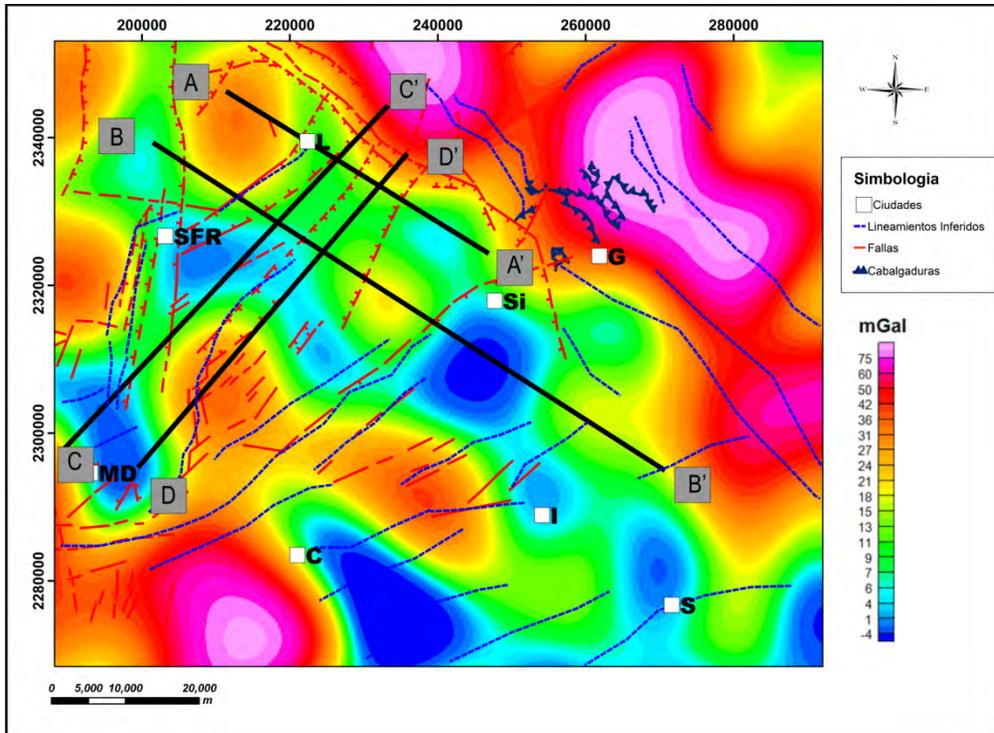


FIGURA 22.- Mapa de anomalía gravimétrica el cual muestra la ubicación de los perfiles aeromagnéticos propuestos para modelar. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueramaro, I: Irapuato, S: Salamanca.

## VIII.2) Selección de susceptibilidades y pozos

Sabemos que las anomalías son originadas por la distribución de densidades que existen en el subsuelo para el caso de gravimetría y de susceptibilidad magnética para el caso de magnetometría, por lo cual se hicieron mediciones de estos parámetros en campo, tratando de muestrear las diferentes formaciones que afloran en la región consideradas representativas para constreñir los modelos propuestos.

Se realizó una recolección de 20 muestras de roca en la ciudad de León y la Sierra de Guanajuato (FIGURA 23). Esta zona se escogió para el muestreo ya que afloran las rocas volcánicas, como basaltos, ignimbritas, tobas y andesitas y estas son fundamentales para poder hacer una caracterización del basamento, también en esta zona afloran las rocas más antiguas de la zona de estudio, que son la Tonalita, Dorita, Piroxenita y el complejo vulcano-sedimentario, dándonos de esta manera una idea del rango en que podrían estar los valores de prácticamente todos los tipos de roca que encontramos en el área de estudio.

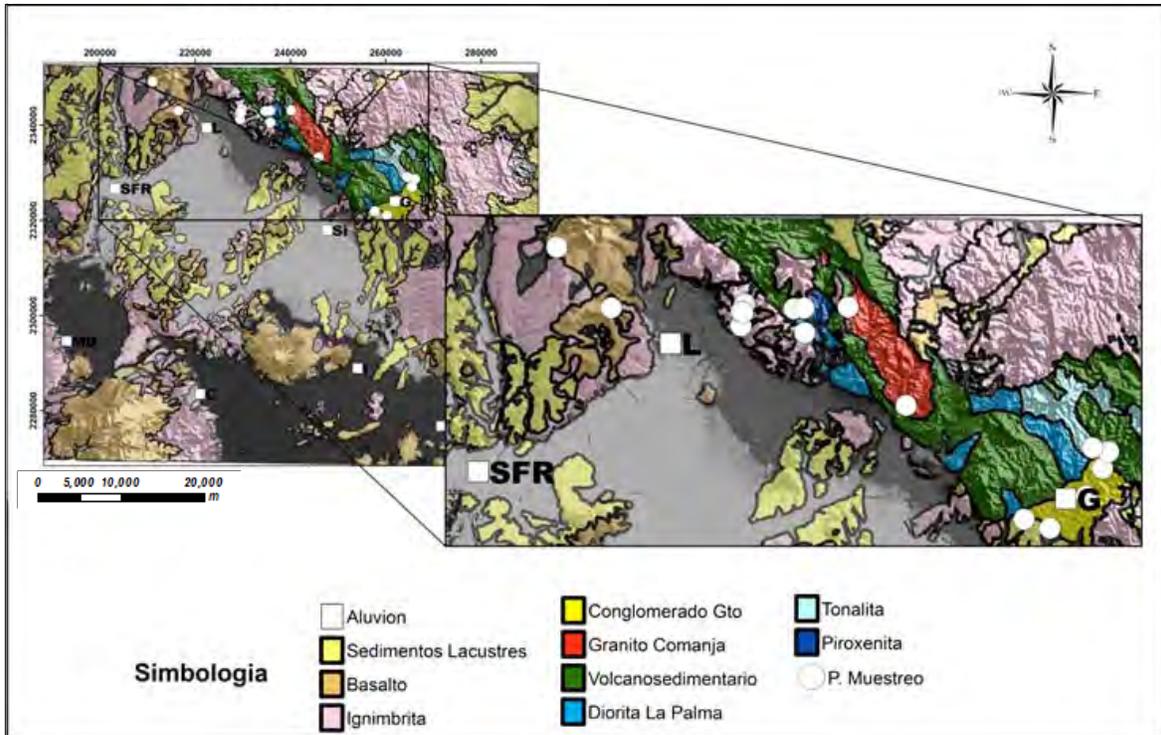


FIGURA 23.- Modelo de elevación en escala de grises donde lo más claro es lo más bajo, que tiene sobrepuesto la geología y muestra la distribución de los puntos de muestro en color blanco a lo largo de la Sierra de Guanajuato. **L**: León, **G**: Guanajuato, **SFR**: San Francisco del Rincón.

### Susceptibilidad Magnética de las rocas

Los susceptibilidad magnética fue medida en campo usando un suceptibilmetro de mano Exploranium KT-9 Kappameter (FIGURA 24), que tiene una sensibilidad aproximada  $10^{-5}$  SI, pero las medidas realizadas son expresadas como  $10^{-3}$  unidades SI. Como las mediciones se realizaron *in situ*, se tomó en cuenta la alteración superficial de las rocas por lo cual se golpeaba la roca hasta tener un área más limpia. Se tomaron 40 lecturas en cada estación, a las cuales se les saco un promedio de los datos, quitando los tres valores más altos y los tres más bajos (TABLA 5).



FIGURA 24.- Fotografías del equipo utilizado para las mediciones *in situ* de susceptibilidad magnética. Del lado izquierdo es el suceptibilímetro KT-9 y del lado derecho muestra el realizado *in situ*.

| Estación | Litología                     | procedimiento<br>Susceptibilidad<br>SI x10 <sup>-3</sup> |
|----------|-------------------------------|--|
| Gto1     | Conglomerado rojo             | 0.05516129   |
| Gto2     | Conglomerado rojo             | 0.020540541  |
| Gto3     | Sed mesozoico (Cz,Lut,Aren)   | 0.014545455  |
| Gto4     | Complejo Filoniano            | 0.093771429  |
| Gto5     | Tonalita                      | 0.1478125  |
| Gto6     | Lavas la Luz                  | 0.480285714  |
| Gto7     | Granito Comanja               | 0.144375   |
| Gto8     | Sedimentaria Lacustre Mioceno | 1.686315789  |
| Gto9     | Sedimentos Lacustres Bancos   | 1.918157895  |
| Gto10    | Piroxenita                    | 35.48  |
| Gto11    | Serpentinita                  | 17.6762069   |
| Gto12    | Conglomerado Duarte           | 1.094130435  |
| Gto13    | Basaltos                      | 7.136944444  |
| Gto14    | Si A=ign B=DiqueRiol          | 0.632222222  |
| Gto15    | Basalto Mesa de Medina        | 10.34774194  |
| Gto16    | Derrame de Ignimbrita         | 4.428823529  |
| Gto17    | Andesita                      | 10.60526316  |
| Gto18 A  | Tobas                         | 0.133421053  |
| Gto18 B  | Tobas Solidas                 | 0.384782609  |
| Gto19    | Ignimbrita                    | 0.603611111  |

TABLA 5.- Valores obtenidos de susceptibilidad magnética de las 20 muestras de roca recolectadas en la sierra y ciudad de León, Guanajuato.

Los datos de susceptibilidad se utilizaron como base para realizar los perfiles que se muestran más adelante, estos datos, en algunos casos se variaron tratando que estuvieran en el rango según la litología (TABLA 2).

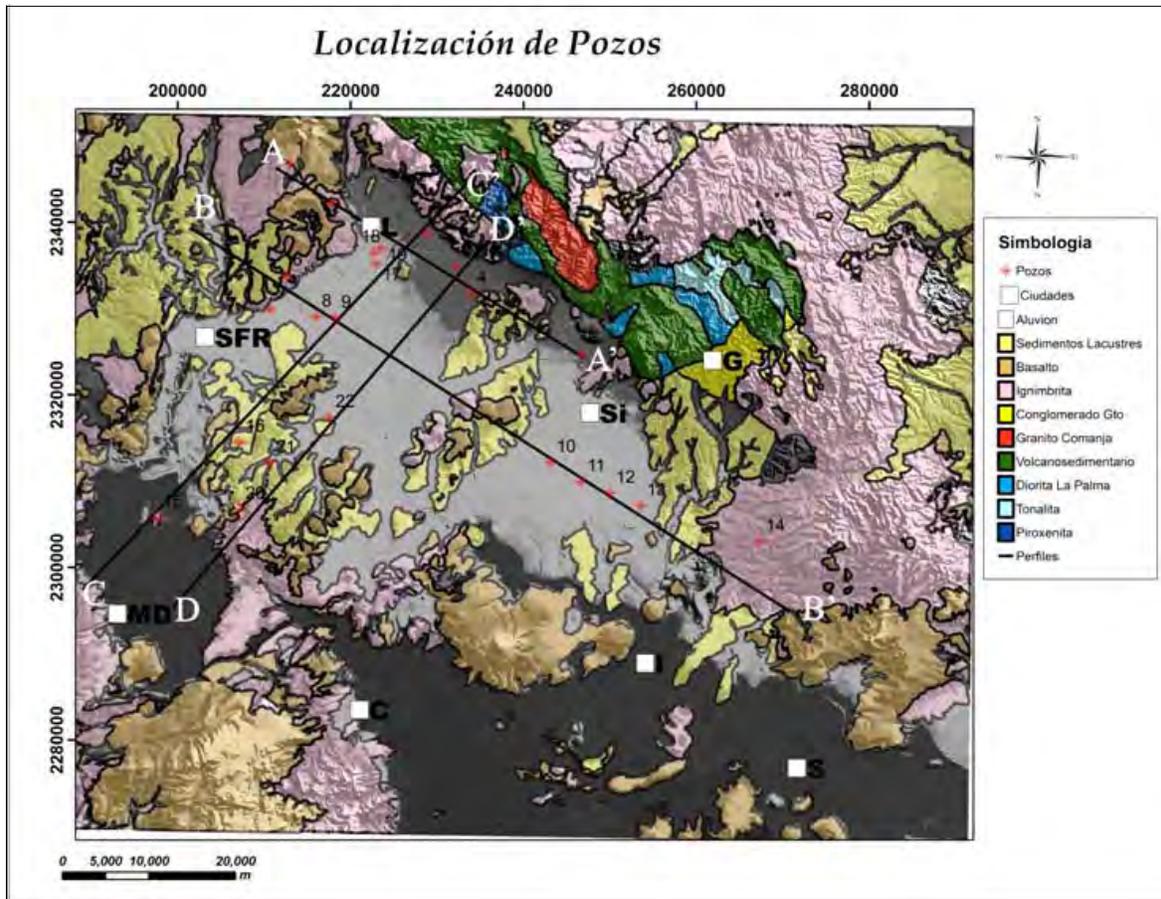


FIGURA 25.- Modelo de elevación en escala de grises, donde lo más claro es lo más bajo, que tiene sobrepuesto la geología y muestra los 23 pozos en color rojo escogidos para los perfiles. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuernavaca, I: Irapuato, S: Salamanca

### Pozos del área de estudio

Al realizar un modelo con datos de magnetometría, se debe tener en cuenta que la solución no es única pero esta ambigüedad intrínseca frecuente en la metodología científica, se puede reducir considerablemente en la medida de la información que se tenga sobre el subsuelo en la zona de interés, por ejemplo la estratigrafía de pozos que suele ser la más efectiva para calibrar los modelos obtenidos. Para este estudio se escogieron y utilizaron 23 pozos de la zona del valle con información litológica para constreñir los modelos (FIGURA

25) requeridos por los datos. Dichos pozos están distribuidos a lo largo de los perfiles seleccionados en zona de estudio. El criterio para escoger los pozos fue que no estuvieran alejados más de 2 km o que la ubicación del pozo y del perfil coincidiera con la misma litología. La información litológica de los pozos mencionados fue proporcionada por los organismos operadores del agua la SAPAL y la CEASG y la descripción detallada de los mismos se encuentra en el ANEXO 3.

## **IX) RESULTADOS**

### **IX.1) Modelos Magnéticos 2D**

La modelación bidimensional de los perfiles se realizó con el software GM-SYS de Oasis Montaj, v. 6.4.2, el cual es un programa interactivo que permite realizar el modelo geológico y calcular iterativamente la respuesta magnética. Esta respuesta se calcula utilizando el método de Talwani et al. (1959). Los bloques que forman el modelo se extienden al infinito (-30,000 km a 30,000 km) para eliminar los efectos de borde.

#### **IX.1.1) Sección magnética A-A'**

Este perfil tiene una dirección S58E con una longitud de 43,365 m, el cual inicia en los Altos de Jalisco al SW de la Lagunilla, atraviesa la ciudad de León, el municipio Loza de los Padres, continua al sur de Nápoles y termina al SE de la Quinta Chilla. Topográficamente viene de una zona alta, de los 2,000 msnm baja a los 1,700 msnm en la parte correspondiente al Valle de León.

En el extremo NW se observan altos magnéticos, el mayor de los cuales alcanza aproximadamente los 240 nT y se encuentra entre los kilómetros 5 y 8. Pasando el km 18, los valores de la anomalía se vuelven negativos y alcanzan un mínimo de -115 nT.

Superficialmente encontramos dos tipos de litología en la zona correspondiente a los Altos de Jalisco, las tobas e ignimbritas. Los valores de susceptibilidad magnética que se tomaron en el campo de estas litologías son de  $0.384 \times 10^{-3}$  y  $0.604 \times 10^{-3}$  que corresponde a las muestras Gto 18 y Gto 19 (TABLA 5). El valor con el cual se modeló fue  $0.5 \times 10^{-3}$  ya que este es el valor promedio entre estas dos litologías. En el Valle de León se encuentran los sedimentos lacustres los cuales tienen un valor que va de  $1.6 \times 10^{-3}$  a  $1.9 \times 10^{-3}$ , se modeló con un valor de  $1.61 \times 10^{-3}$ . Estos dos tipos de litología son la base del modelo, ya que el objetivo de esto es dar un espesor tentativo de los sedimentos en la zona de León. Un problema es que ningún pozo tiene información sobre el basamento ya sea hidrológico y mucho menos geológico por lo cual se propuso una tercer capa con una susceptibilidad de  $10.34 \times 10^{-3}$  correspondiente a la roca volcánica a la cual denominamos Basamento, esta capa profunda funciona como el basamento tomando en cuenta que algunos modelos

propuestos por autores dan susceptibilidad más alta, conforme la profundidad. Esta capa aunque contribuye al modelo, se trató con mucho cuidado, ya que realmente lo que interesa es la profundidad de los sedimentos y la forma de la unidad denominada Volcánica.

Ya seleccionadas las unidades que conforman al perfil A-A', junto con sus valores de susceptibilidad, el paso siguiente fue fijar a lo largo del perfil las fallas interpretadas anteriormente. Con estas referencias de inicio, se procedió a variar el espesor de los sedimentos, teniendo como control la información de los pozos.

En los primeros 9 km en el perfil se encuentran los pozos 01 y 02, los cuales en su descripción (ANEXO 3) relatan la existencia de riolitas, tobas y basaltos. Estas litologías están englobadas en la capa que en el perfil llamamos Volcánica. Los pozos 03 y 04 describen sedimentos con alguna intercalación de ignimbritas con un espesor no mayor de 4m, por lo cual se consideró despreciable para el modelo, a este paquete se le denominó como Sedimentos. Al término del perfil se encuentra el pozo 05, el cual describe puros sedimentos, por lo tanto el espesor de esta capa, se propone con un espesor que satisfaga la condición de ser mayor a estos, ya que ningún pozo en los Valles a lo largo de este perfil llega a tocar las ignimbritas.

El perfil cruza dos partes altas una entre 0 y 10 km, la otra entre 28 y 35 km, donde el mapa geológico indica que en estas zonas se encuentra roca Volcánica (FIGURA 25), es por eso que en estas dos zonas la capa Volcánica sale a la superficie. Como se explicó anteriormente, la forma de las diferentes litologías propuestas se iban modificando en forma y espesor, tomando en cuenta toda la información recaudada (pozos, fallas y susceptibilidad), con el objetivo de lograr que la anomalía calculada se ajustara a la observada, obteniendo un ajuste con un error RMS del 6.01% para este perfil. Este error es muy aceptable y la razón por la que no se redujo más, es porque el espesor de las diferentes litologías no varía prácticamente nada al llegar a este punto.

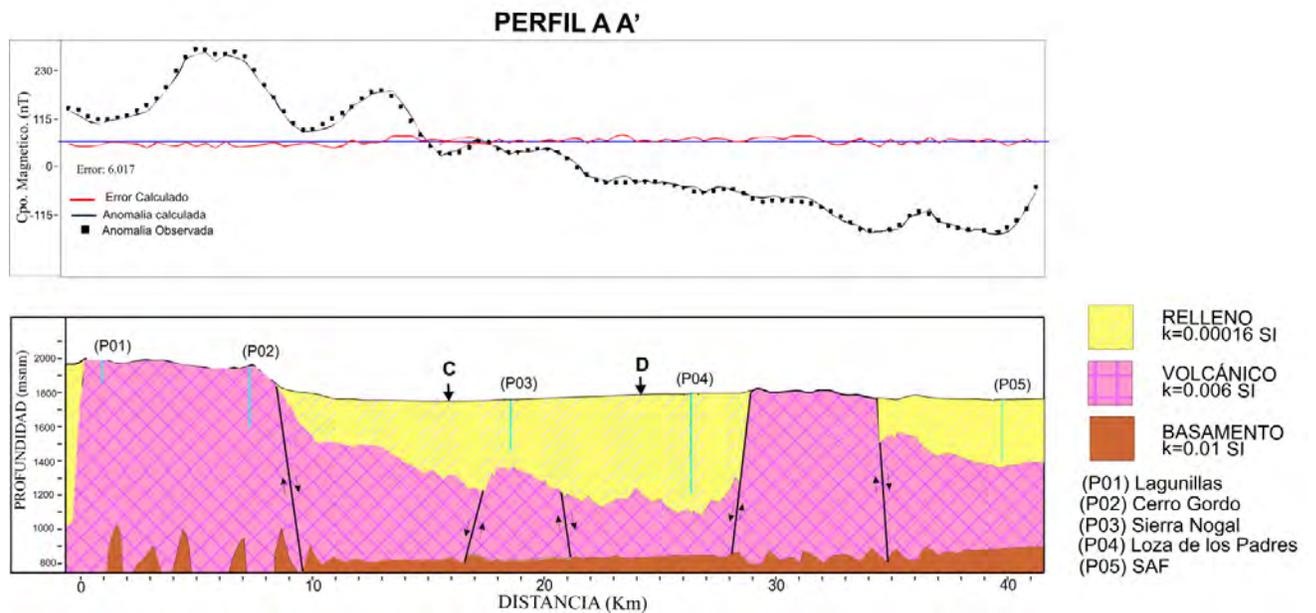


FIGURA 26.- Perfil magnético A-A', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades.

### IX.1.2) Sección magnética B-B'

Este perfil tiene una dirección S58E con una longitud de 84,365m y es paralelo a la sección A-A'. Inicia al Sur de San Bartolo, Jalisco, ubicado en los Altos de Jalisco, continuando por Rancho Nuevo, La Estancia, Santa Ana del Conde y termina en la parte SW de la Sierra de Guanajuato a 15 km del poblado de Aldama. Topográficamente viene de una zona alta de los 2,000 msnm y baja a los 1,700 msnm. Entre los kilómetros 32 y 46 del perfil existen algunas serranías que separan al Valle de León y el Valle de Silao, provocando la elevación de la topografía. En el kilómetro 46, donde baja nuevamente hasta encontrarse con la Sierra de Guanajuato en el kilómetro 63 del perfil.

La señal magnética presenta altos magnéticos, entre los 200 y 227 nT, estos altos magnéticos se encuentra en las partes topográficamente altas, antes descritas. Existe un mínimo magnético de -65 nT, que se ubica pasando los altos de Jalisco aproximadamente en el kilómetro 20. En el kilómetro 79 se visualiza otro con un valor de -101nT.

Las formaciones geológicas escogidas para este perfil son prácticamente las mismas que se utilizaron en el perfil A-A', la única variante que se presenta, es la adición de un segmento

con una susceptibilidad menor, donde este valor está dentro del rango de susceptibilidad magnética que se midió en campo para las Tobas. Este valor corresponde a la muestra Gto 18A (TABLA 5) con una susceptibilidad de  $0.133 \times 10^{-3}$ . Este segmento se encuentra al final del perfil, la razón por la cual se utilizó en esta parte, es porque existe un bajo magnético y con este valor, el ajuste de la anomalía calculada fue prácticamente inmediato. Se le llama segmento para no confundir que es otra capa litológica, recordemos que los valores utilizados en el modelo, son paquetes de varias litologías y los rangos en que nos hemos movido a la hora de modelar, son los correspondientes a los valores medidos en campo.

El proceso de modelación fue el mismo que en el perfil A-A', ya seleccionadas las unidades que conforman al perfil con sus valores de susceptibilidad y teniendo las fallas fijas, el paso siguiente fue variar el espesor de los sedimentos, teniendo como control la información de los pozos.

En este perfil se utilizaron 9 pozos, por lo que la longitud del perfil fue más extensa que cualquiera de los modelos. Los pozos 06 y 07, describen a grandes rasgos, roca volcánica de consolidada a semi consolidada, en cambio los pozos 08 y 09 nos hablan de sedimentos, por lo cual se interpreta la caída del bloque de los Altos de Jalisco, con una falla normal. La ubicación de donde cae este bloque, nos la da los lineamientos y fallas que se fijaron en el modelo.

Las serranías que dividen el Valle de León y el Valle de Silao (entre los kilómetros 32 y 45) superficialmente corresponde prácticamente a la misma litología que la de los Altos de Jalisco (FIGURA 25), por lo cual este paquete sale a la superficie nuevamente por una falla inversa.

Los pozos del 10 al 13 nos indican material arcilloso y nuevamente la ubicación de las fallas nos da para interpretar un graben, donde la profundidad tanto de este, como los anteriores, se hizo bajo la condición que debe de ser más profundo al menos que los pozos ya que no tocan a las ignimbritas o cualquier otro material diferente a este.

El pozo 14 describe tobas en su mayoría, ya sean fracturadas o consolidadas, por lo cual tiene la misma susceptibilidad que se viene manejando para este paquete Volcánico,

excepto en un segmento, donde la anomalía baja bruscamente y se infiere una susceptibilidad menor.

En este perfil se obtuvo un ajuste entre anomalía observada y calculada, un valor de error de 6.11%.

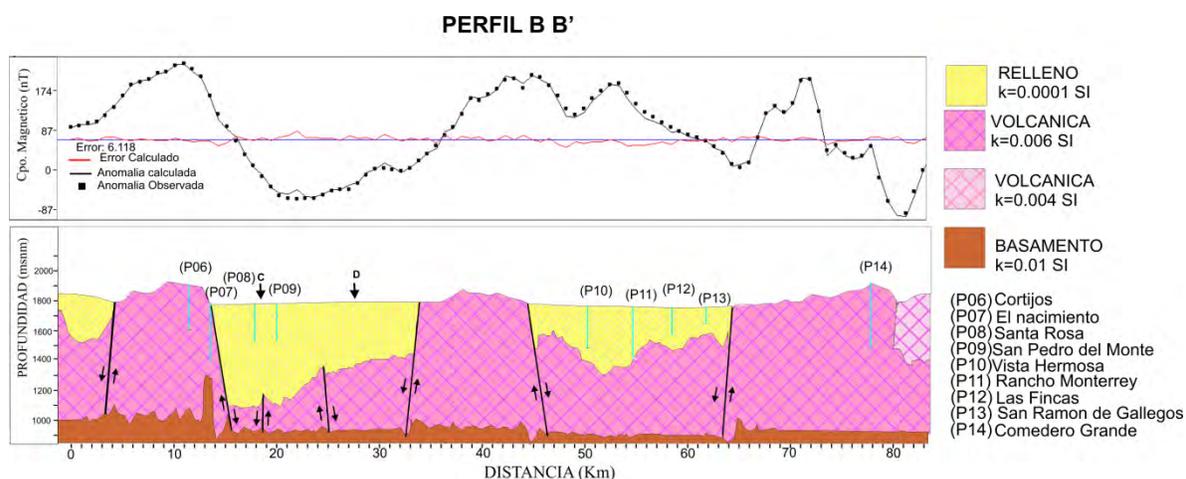


FIGURA 27.-Perfil magnético B-B', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades.

### IX.1.3) Sección magnética C-C'

Este perfil tiene una dirección N42E con una longitud de 64,333m y es perpendicular a las secciones A-A' y B-B', cruzándolas en el kilómetro 53 y 42 respectivamente. Inicia al Norte de Manuel Doblado, aproximadamente a 3 km de este, pasa por Loma De San Rafael, cruza la ciudad de León y termina en la Sierra de Guanajuato a 6 km de Medina. Empieza con una topografía baja de 1700msnm. Entre los kilómetros 17 y 40 del perfil hay serranías que hacen que la topografía aumente un poco, bajando nuevamente en el Valle de León, hasta la Sierra de Guanajuato donde sube abruptamente hasta los 2,100-2,200 msnm a los 50 kilómetro del perfil aproximadamente. La señal magnética presenta dos máximos magnéticos, uno de 115 en el km 46 el otro que decae a los -168 nT al final del perfil. Las formaciones geológicas base escogidas para este perfil son las mismas que se utilizaron en los perfiles A-A', B-B' y se le añadieron 2 nuevas capas que a continuación se describen:

*Relleno 2*: A esta capa se le puso una susceptibilidad diferente al *Relleno 1*, ya que son sedimentos más antiguos de los que se encuentran en la parte del bajío. La susceptibilidad escogida fue de  $1.91 \times 10^{-3}$ , la cual está dentro del rango de las muestras Gto8 y Gto9 (TABLA 5), correspondiente a las mediciones en sedimentos. Aunque las muestras no corresponden a estos sedimentos, se propuso partir de valores reales de la zona y utilizar el de la susceptibilidad mayor, ya que están cerca de los basaltos, los cuales tienen una alta susceptibilidad.

*Volcano-sedimentario*: Esta formación está representada en el mapa geológico en color verde, (FIGURA 25) y se extiende a lo largo de la Sierra de Guanajuato, litológicamente son lutitas, limolitas, areniscas y calizas intercaladas. Las mediciones que se hicieron en campo, arrojaron una susceptibilidad de  $0.014 \times 10^{-3}$ .

En este perfil se utilizaron 5 pozos; al principio del perfil tenemos el pozo 15, donde la información que nos provee es sobre la existencia de toba y riolita. Se puede ver que la ubicación de este pozo (FIGURA 25) se aleja de la trayectoria del perfil algunos metros y este se encuentra sobre este tipo de roca, pero el perfil no, por lo cual se modeló como una capa que no sale a la superficie pero sí muy cercana a esta. En los primeros 16 km se sugiere la existencia de grabens y horst debido a los lineamientos y fallas interpretadas en los capítulos anteriores.

En el medio del perfil se observan serranías las cuales separan al Valle del río turbio y el Valle de León, donde la litología presente en estas serranías son basaltos y sedimentos, pasando el perfil por este último y a la cual le llamamos *Relleno 2*, adicional a esta información el pozo 16 nos describe materia arcillosa, por lo cual se modeló con el valor de  $1.91 \times 10^{-3}$  ya que es el valor de mayor susceptibilidad de las muestras de sedimentos que se tomaron en campo. Se le puso este valor ya que se encuentra cerca de los basaltos y estos tienen un valor alto, pero no pasa sobre estos.

Los pozos del 17 al 19 nos describen sedimentos, tocando material sólido solo el primero de estos, que tiene una profundidad de 450m, es por eso que la unidad Volcánica toca parte del pozo y se modeló sin que esta alcanzara a los demás.

Las fallas que dan forma a la Sierra de Guanajuato, son las que se presentan en la parte final del perfil, saliendo a superficie el material Volcánico y la unidad Vulcano-

sedimentaria, que se puede ver en el mapa geológico de color verde (FIGURA 25). Esta unidad en campo nos dio una susceptibilidad baja de  $0.014 \times 10^{-3}$ , siendo esta la razón por la cual podemos asociar el bajo magnético que se presenta en el perfil. Este perfil se modeló al igual que los anteriores, se fijaron las fallas, se analizaron los pozos para determinar profundidades, se escogieron las capas con su susceptibilidad correspondiente y se variaron los espesores, llegando a un ajuste con un error de 6.01%.

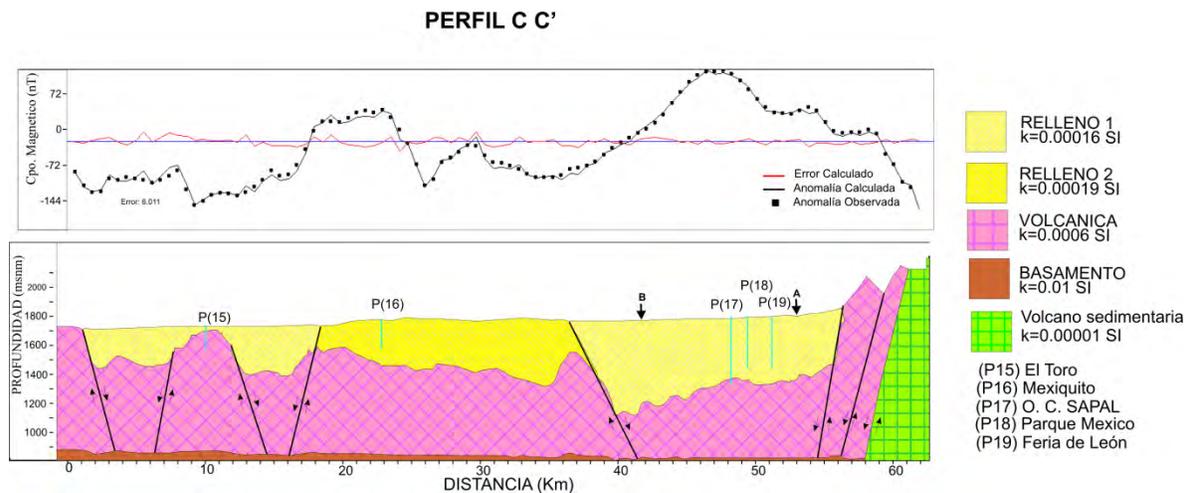


FIGURA 28.-Perfil magnético C-C', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades.

#### IX.1.4) Sección magnética D-D'

Este perfil tiene una dirección N42E con una longitud de 54,363m paralelo al perfil C-C' y perpendicular a las secciones A-A' y B-B' cruzándolos en el kilómetro 50 y 39 respectivamente. Inicia al este de Manuel Doblado, pasando al sur de El Desagüe, cruzando la carretera 45 México, La Herradura, terminando al NE de San Juan de Otates aproximadamente a kilómetro y medio de este. Su topografía es baja y casi constante, ya que cruza los valles de Río Turbio y León sin llegar a la Sierra de Guanajuato manteniéndose en 1,700msnm, excepto en las serranías que separan a los valles, alcanzando una máxima de 2,080msnm.

La señal magnética presenta dos picos magnéticos, uno de 500 nT al final del perfil y uno de -224 nT a los 4km del inicio del perfil. Las formaciones geológicas base son las mismas

que se utilizaron en los 3 perfiles anteriores y se le añadió la capa llamada *Relleño 2* que fue descrita anteriormente. Este perfil se modeló al igual que los anteriores, se fijaron las fallas y se analizaron los pozos para determinar profundidades de las diferentes capas.

Los primeros kilómetros se modelaron tomando en cuenta la profundidad calculada en el perfil C-C'. En la parte del *Relleño 2* que está delimitada por dos fallas se modeló con una profundidad mínima de 180 m, ya que es la profundidad del pozo y se describe material de este tipo. En este perfil se utilizaron 4 pozos, donde los últimos 3 se encuentran en el Valle de León y todos describen material sedimentario. El ajuste alcanzado entre la anomalía observada y calculada fue del 6.54% de error.

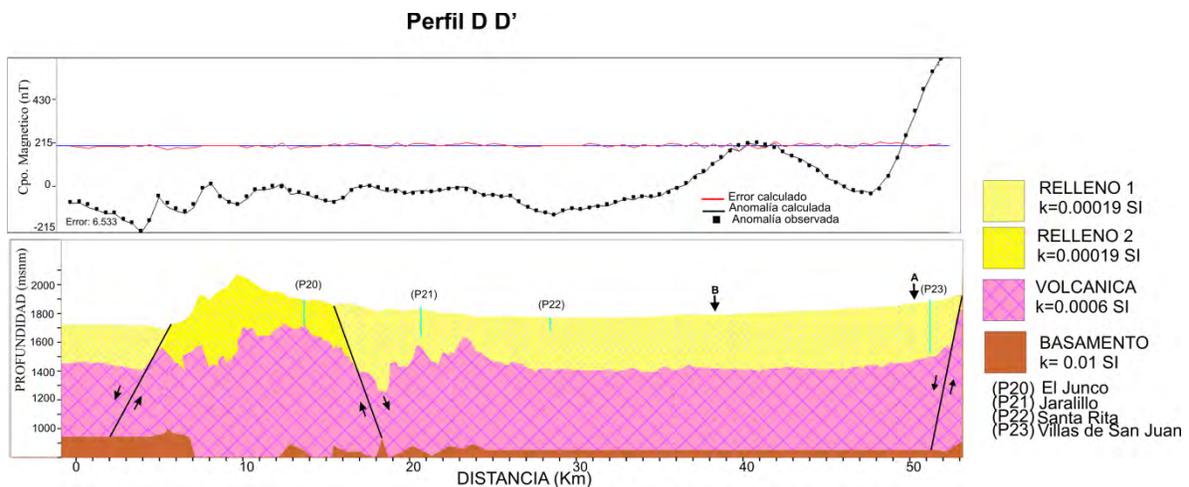


FIGURA 29.- Perfil magnético D-D', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades.

## IX.2) Modelo Pseudo 3D

Uno de los objetivos de este trabajo es aportar un modelo que nos dé idea de las estructuras que controlan el área que sean útiles para visualizar rasgos característicos de la zona, tales como estructuras de grabens y horst a partir de la correlación de información de cada perfil.

Con este propósito se generó un modelo pseudo 3D (FIGURA 30) a partir de los modelos aeromagnéticos bidimensionales, georeferenciados y escalados

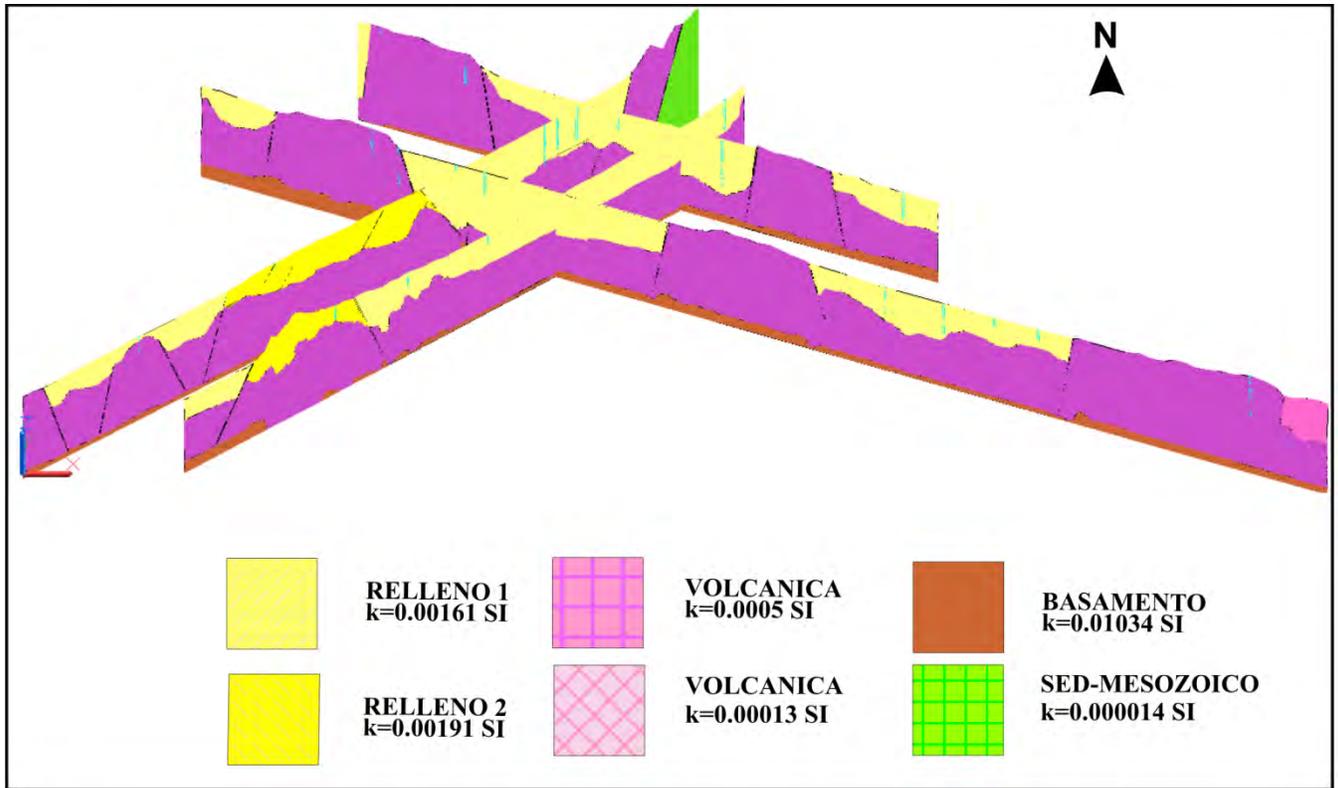


FIGURA 30.- Modelo pseudo 3D, generado a partir de los modelos 2D.

En los puntos donde los perfiles cruzan se puede observar un ajuste de la capa de Relleno 1 y la unidad Volcánica. También a lo largo de estos perfiles se pueden visualizar las continuaciones de las fallas y lineamientos enfatizando de esta manera la presencia de estructuras de graben y de horst.

### IX.3) Modelo Conceptual

El sistema acuífero del Valle de León se considera regionalmente como un sistema acuífero libre que ocurre en material sedimentario (terrígenos de la unidad Terciario Granular Indiferenciado) de granulometría y compacidad variable hospedado y confinado por rocas volcánicas y piroclásticas de la Ignimbrita Cuatralba.

Los modelos conceptuales existentes proporcionan una idea general, aunque probablemente imprecisa de las dimensiones y extensión del “sistema acuífero compuesto” del valle de León, como para poder cuantificar objetivamente las reservas hídricas disponibles.

Con el modelo obtenido de los datos aeromagnéticos se propone que el material clástico sedimentario continental (Terciario Granular no diferenciado) se aloja en las fosas tectónicas que forman los acuíferos de la región (León, Río Turbio y Silao-Romita) en donde existe una gran heterogeneidad y anisotropía en los materiales que los constituyen y que van desde gravas y arenas hasta limos y arcillas; además el espesor del relleno que forma los acuíferos es variable, y van de los 300 a 650m de profundidad. Por otro lado, de los estudios de SAPAL se conoce la piezometría de la zona, observando que el nivel freático va de 120 a 140m de profundidad en la región de estudio. La (FIGURA 31) muestra el modelo conceptual a lo largo de un perfil del acuífero del Valle de León en donde se observa la ubicación de pozos disponibles.

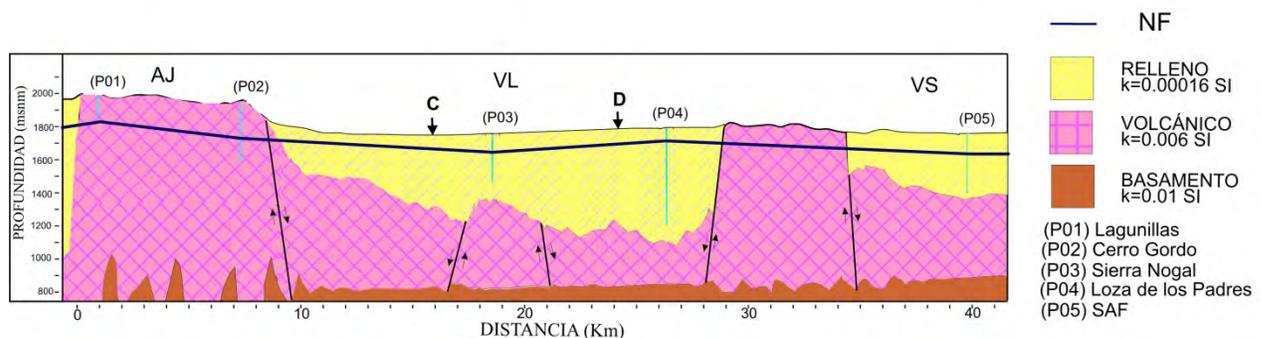


FIGURA 31.-Modelo conceptual del basamento hidrológico del valle de León que sugiere un escalonamiento tectónico regional que muestra la profundidad del nivel freático.

En principio el sistema de fallas NE-SW en la región definen límites físicos para los modelos geológico-estructurales del basamento hidrológico. Las estructuras de graben definen teóricamente la extensión y volumen de las reservas hídricas determinadas por los espesores de los rellenos y por su porosidad efectiva.

Las zonas que se consideran que tienen la mayor aportación de la recarga natural al sistema acuífero, son la sierras de Los Altos de Jalisco y la Sierra de Guanajuato aunque no están bien establecidos los volúmenes. Esto ocurre esencialmente en donde afloran depósitos terrígenos de buena permeabilidad, como ocurre al norte del poblado de San Francisco del Rincón, o a través del sistema persistente de diaclasas en rocas piroclásticas y volcánicas de la unidad de la ignimbrita Cuatralba, y en menor grado debido a la permeabilidad relativamente menor de los depósitos vulcano-sedimentarios (tobas) de esta misma unidad estratigráfica que le subyace a poca profundidad. La zona de La Muralla también se considera una zona de recarga natural, pero en una magnitud todavía menor debido a que

afloran rocas alquímicas de la unidad Terciario Granular Indiferenciado (calizas y margas) de baja permeabilidad, que retardan el proceso de recarga natural hacia las rocas ígneas de la unidad Ignimbrita Cuatralba que le subyace.

#### **IX.4) Estimación de las reservas acuíferas**

A través de la opción Grid-Volume en Golden Software Surfer v11, es posible estimar el volumen de la capa de sedimentos considerando el lecho rocoso como límite acuífero y posteriormente el volumen hídrico de la cuenca del valle de León de acuerdo a la definición geométrica de la (FIGURA 32). El primer paso consistió en generar una malla con la profundidad de los sedimentos que se obtuvo al modelar los datos aeromagnéticos, otra malla con los datos del nivel freático una más con la información de la topografía superficial con lo cual es posible estimar a partir de la diferencia entre las mismas el volumen total de la región saturada si se conoce la porosidad del relleno sedimentario saturado. Se debe de tener presente que el cálculo del volumen de lo que constituiría las reservas hidrológicas del valle estimada de esta manera tiene la limitante de que la porosidad del relleno sedimentario es desconocida, por lo que los valores obtenidos se deben considerar solamente como aproximaciones. La zona para la cual se estimó el volumen de reservas hídricas se define como la cuenca o el graben del Valle de León y se muestra en la (FIGURA 32).

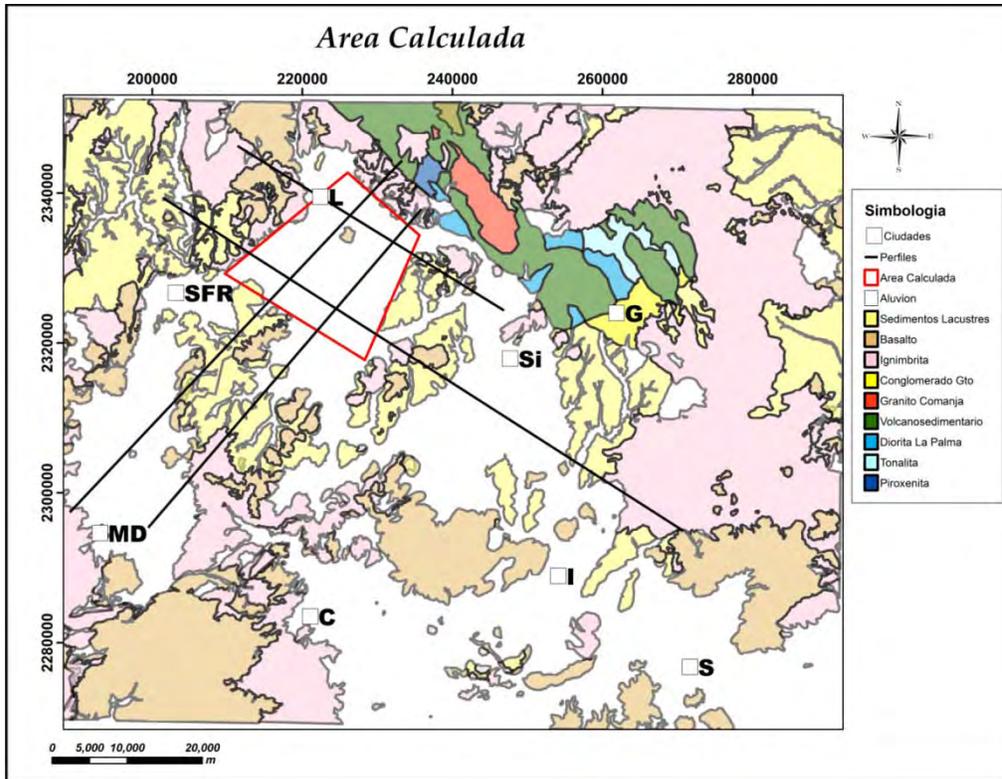


FIGURA 32.- Mapa geológico que muestra en color rojo el área donde se realizó el cálculo del volumen de las posibles reservar hídricas. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueramaro, I: Irapuato, S: Salamanca

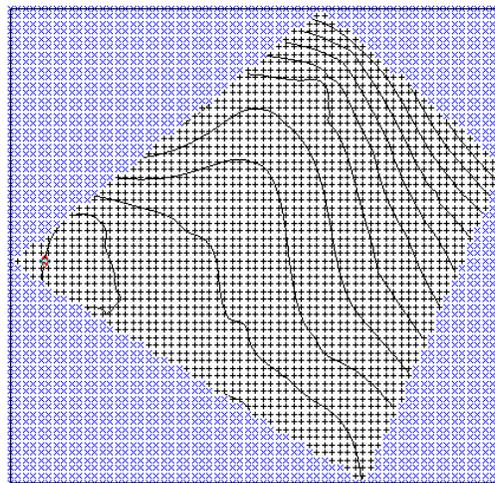


FIGURA 33.- Malla de topografía que muestra el "blanqueo" que se realizó con los datos. En color negro se observa el área a calcular y en color azul los valores "blanqueados".

Entre los parámetros que se requieren para interpolar los valores de profundidad obtenidos para la capa impermeable de origen ígneo son los extremos del área, pero los extremos de nuestra área esta inclinada, por lo que se realizó un "Blanqueo", que consiste en mandar a cero aéreas que no se van a ser consideradas como se indica en la (FIGURA 33). Estos límites se muestran en las siguientes tablas.

| Vértices Cuadro Azul |         | Vértices Cuadro Negro |         |
|----------------------|---------|-----------------------|---------|
| X Mínima:            | 209800  | 209800                | 2329256 |
| Y Mínima:            | 2317800 | 226050                | 2342600 |
| X Máximo:            | 235600  | 235600                | 2334367 |
| Y Máximo:            | 2342600 | 228293                | 2317800 |

TABLA 6.- Límites del área para interpolar. Siendo la del lado izquierdo los vértices con los que se realizó la malla en el software y del lado derecho los vértices del área calculada.

El área aproximada considerada, ubicada dentro de las principales estructuras que limitan la cuenca es de un poco más de 317 km<sup>2</sup>. El volumen estimado del paquete completo de los sedimentos que rellenan la cuenca considerando el límite de las rocas ígneas como basamento hidrológico fue de 149.39 km<sup>3</sup>, en tanto que el volumen del acuífero considerando el nivel estático actual es de 120.50 km<sup>3</sup> siendo el volumen de sedimentos drenados de 28.89 km<sup>3</sup> aproximadamente (FIGURA 34).

|   | Total    | Eficaz          |
|---|----------|-----------------|
| Arcillas                                  | 40 a 60  | 0 a 5           |
| Limos                                     | 35 a 50  | 3a 19           |
| Arenas finas, arenas limosas              | 20 a 50  | 10 a 28         |
| Arena gruesa o bien clasificada           | 21 a 50  | 22 a 35         |
| Grava                                     | 25 a 40  | 13 a 26         |
| Esquistos                                 | 1 a 10   | 0.5 a 5         |
| Esquistos fracturados/alterados           | 30 a 50  |                 |
| Arenisca                                  | 5 a 35   | 0.5 a 10        |
| Calizas, dolomías NO clasificadas         | 0.1 a 25 | 0.1 a 5         |
| Calizas, dolomías clasificadas            | 5 a 50   | 5 a 40          |
| Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar | 0.01 a 1 | 0.0005          |
| Rocas ígneas y metamórficas fracturadas   | 1 a 10   | 0.000005 a 0.01 |

TABLA 7.- Valores estimados de la porosidad en (%) de las diferentes litologías. Tomadas de Sanders (1998).

Para poder estimar el valor aproximado del volumen hídrico disponible correspondiente al área propuesta, se requiere del valor de la porosidad efectiva del relleno sedimentario, definida como el espacio que tiene la roca para poder contener fluido. La TABLA 7 muestra ejemplos de porosidades para diferentes tipos de rocas (Sanders, 1998) que como se puede observar, poder llegar a ser muy variables.

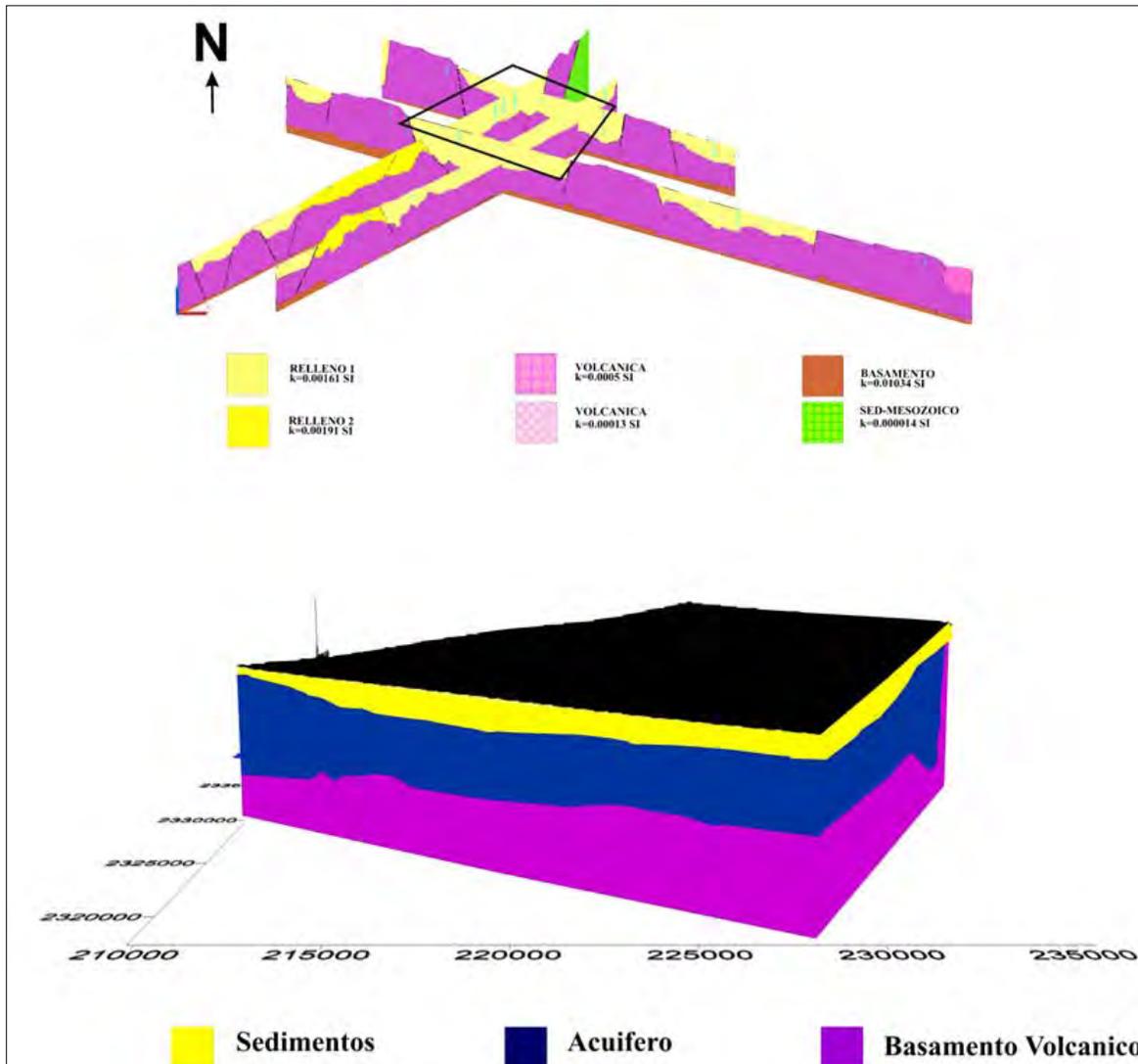


FIGURA 34.- Modelo 3D del Valle de León que muestra la forma de los sedimentos y el basamento hidrológico.

En vista de la que a la fecha no nos fue posible obtener información más puntual de las características de porosidad del relleno del Valle de León, se llevó a cabo el ejercicio de

estimar los volúmenes hidrológicos utilizando porosidades efectivas de 10, 20, 30% para contrastar los resultados en vista de que los rellenos sedimentarios varían desde arcillas hasta gravas (ANEXO3). El resultado obtenido después de sustraer el volumen de sedimentos drenados resulta ser de **12.05 km<sup>3</sup>**, **24.10 km<sup>3</sup>**, y **36.15 km<sup>3</sup>** respectivamente con porosidades efectivas de 10, 20 y 30% para las reservas acuíferas de la zona considerada como la cuenca del Valle de León lo que hace una diferencia importante en términos de reservas acuíferas.

## X) CONCLUSIONES

### Conclusiones

1. Uno de los objetivos del presente trabajo fue mostrar la utilidad que tiene el acervo de cartas aeromagnéticas del Servicio Geológico Mexicano (antes CRM) para estudios de tipo hidrogeológico y geológico-estructurales.
2. A partir de las cartas aeromagnéticas de Campo Total de la región NW del Bajío se obtuvieron las cartas de campo magnético reducido al Polo, así como la carta de la derivada inclinada. La primera de estas fue la base del modelado cuantitativo de los perfiles seleccionados, mientras que la segunda fue la base de la interpretación estructural de la zona estudiada y la información obtenida fue fundamental para constreñir los modelos aeromagnéticos.
3. Los modelos a lo largo de los perfiles seleccionados arrojan espesores máximos de rellenos sedimentarios de hasta 600 m confinados por un basamento de origen ígneo cuya permeabilidad hidráulica depende en gran medida de la intensidad de fracturamiento que se puede inferir espacialmente a partir de la presencia de fallas inferidas y cartografiadas.
4. La ubicación más propicia para zonas de recarga natural e inducida son aquellas que se correlacionan con cruces de fallas y/o fracturas en la periferia de los valles.
5. La carta de anomalía gravimétrica satelital de la zona del Valle de León se correlaciona con los principales rasgos estructurales y permite distinguir cuencas separadas consistentes con los sistemas de falla. La separación en cuencas y la diferencia en la intensidad de las anomalías sugieren que algunas tienen mayores espesores que otras. En particular, la cuenca del Valle de León por los valores de intensidad de campo gravimétrico parece ser menos profunda que la de Silao o la de Irapuato.
6. A partir de los modelos magnéticos cuantitativos se elaboró un modelo pseudo 3D con el propósito de obtener una estimación de las posibles reservas hidrológicas de la cuenca del Valle de León. El volumen aproximado de las reservas hídricas depende en gran medida de la porosidad volumétrica efectiva, parámetro que actualmente se desconoce. Sin embargo, asumiendo porosidades mínima de 10% y

máxima de 30%, las reservas estimadas estarían en el rango entre 12 y 36 km<sup>3</sup> lo que demuestra un importante potencial del Valle de León en reservas hídricas.

7. Adicionalmente, el modelo pseudo 3D tiene el objetivo de proporcionar límites físicos y modelos conceptuales más cercanos a la realidad que sirvan de punto de partida para generar modelos matemáticos más allegados a la realidad, teniendo de esta manera modelos de predicción más objetivos.
8. Gracias al trabajo de recopilación de información geológica, como la cartografía, Pozos, el Modelo de Elevación adquirido de las páginas del INEGI y los mapas adquiridos del procesamiento de datos aeromagnéticos, se realizó una base de datos que podrá ser utilizada para futuros proyectos del GHI (Grupo de Hidrología Isotópica).

## BIBLIOGRAFÍA

- ANDERSEN, O. B.; KNUDSEN, P. Global marine gravity field from the ERS-1 and Geosat geodetic mission altimetry, *Journal of Geophysical Research*, v. 103, n. C4, p. 8129-8137, 1998.
- ARDIZONE, G. J.A., *Análisis de datos aeromagnéticos. metodologías y aplicación al tratamiento aeromagnético España Peninsular*. Universidad Complutense de Madrid, Memoria presentada para optar el grado de Doctor en Ciencias Físicas, 1996.
- ARGOTE E. D. L., Modelación en 3D de Datos Magnéticos para Caracterizar Estructuras Arqueológicas. UNAM, Tesis Doctoral en Ciencias, 2008
- BASLEY, J. R., *The Airbone Magnetometer, Preliminary Report*, USGS Geophysical Investigation 1966
- BLAKELY R J., *Potential Theory in Gravity and magnetic applications*, Cambridge University Press, 1996
- BATISTA R J. A, Rodríguez I. A. *Geological Particularities of Ophiolite Complex from Moa Starting from the Aeromagnetics Data 1: 50,000*. Revista Minería y Geológica Vol.XVII, No. 1, 2000.
- CEASG, *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero del Valle de León, GTO 1998*,
- CEASG, *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático del Acuífero Valle del Rio Turbio, GTO 1998*
- DOBRIN, M. B., *Introducción a la Prospección Geofísica, New York, USA., 4ª edición 1998*.
- ESCORZA R. M., *Magnetometría de la Isla Socorro, Archipiélago de la Revillagigedo*, UNAM, tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico, 2010
- EXERTIER P, BONNEFOND P.,NICOLAS J and BARLIER F., *Contributions of Satellite Laser Ranging to Past and Future Radar Altimetry missions*, Observatoire de la Côte D'Azur, départ. CERGA, av. Copernic, F-06130 Grasse, 2001

- FEATHERSTONE, W. E. *Comparison of different satellite altimeter-derived gravity anomaly grids with ship-borne gravity data around Australia*, in: Tziavos, I.N. (ed) *gravity and Geoid 2002*, Department of Surveying and Geodesy, Aristotle University of Thessaloniki, p 326-331, 2003.
- FORGARTY T., *Wavenumber filtering of gravity data and its application to interpreting structure in the western transverse ranges of southern California*. University of Southern California Tesis de Maestría. 1985.
- Geometrics, G-823A and G823B, *Cesium Magnetometer, Operation Manual*, San Jose, CA, USA., 2004.
- GM-SYS, *Gravity/Magnetic Modeling Software, User's guide for version 4.6*, Corvallis, OR, USA.
- GOITIA S. M. H., *Modelado gravimétrico del basamento de la zona de la ciudad de Valencia, Estado Carabobo*, Universidad Simón Bolívar, Tesis de Ingeniero Geofísico, 2012.
- HARNOLD G. A. M., *Generación de un mapa de basamento de la cuenca Barinas-Apure de Venezuela a partir de datos Gravimétricos y Magnéticos Satelitales*, Universidad Central de Venezuela, Para obtener el título de Ingeniero Geofísico, 2012
- HEARST R. B., Morris W. A., *Case History: Regional gravity settings of the sudbury structure* *Geophysics*, v 66, no. 6, p. 1680-1690, 2001
- HENDERSON, R.G., Zietz, I., *The computational of second vertical derivatives of geomagnetic fields*: *Geophysics* 14, p. 508-516. 1949.
- HERNÁNDEZ, L. N. *Modelo Conceptual de Funcionamiento Hidrodinámico del sistema acuífero del valle de León, Guanajuato*. UNAM, Para obtener título de Ingeniero Geólogo, 1991.
- Li X.yGÖTZE H. J., *Tutorial Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics*, *GEOPHYSICS*, vol 66, No. 6, p, 1660-1668, 2001.

- LÓPEZ-L. H., Urrutia- F. J., Valdivia A. L., *Estudio aeromagnetico del complejo volcánico de colima, occidente de Mexica-Implicaciones tectónicas y estructurales*, Revista geológicas,v.28, núm. 3, p. 249-270 2001.
- LÓPEZ-L. H., Tristian G. M., *Geología y Magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: Implicaciones tectónicas y geohidrológicas*, , Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen 65, Num1, P.137-156. , 2013.
- MARTÍNEZ R. J., *Mapa Geológico de la Sierra de Guanajuato*. Instituto de Geología, UNAM,1992
- MILSON J., *Field Geophysics*. John Wiley & Sons. Gran Bretaña. Terceraedición, 2003.
- NETTLETON L., *Regional Residual and Structures*. Geophysics, v 19, no. 1, 1954.
- NIETO-Samaniego, Á. F., Macías-Romo Consuelo, Alaniz-Álvarez, S. A., *Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol 13,p. 117-122. 1996
- NIETO, S. A. F., Ojeda G. A. C., Alaniz A. S. A., Shunshan X., *Geología de la Región de Salamanca, Guanajuato, México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana V. 64, núm. 3, p. 411-425, 2012
- OASIS MONTAJ, *MAGMAP Filtering Tutorial*. Geosoft Inc. 2005.
- PACHECO M., J. y **ARZATE, J.A.**, *Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24, no. 3, p. 389-402, 2007.
- QUIJADA C. M. F., *Inversión gravimétrica 3d en el Noroccidente de Venezuela y zonas costa afuera*, Universidad Simón Bolívar proyecto de grado, Ingeniero Geofísico, 2006
- SALAS M.M. A.,*Caracterización Hidrogeoquímica del Agua Subterránea de las Principales Fuentes de Abastecimiento de la Ciudad de León, Guanajuato, UNAM Facultad de Ingeniería*. Tesis de Ingeniero Geólogo. 2004.

- SANDWELL D. T. y Smith W. H. F., *Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate* Geophysical, Vol 114, Num. B01 411, doi:10.1029/2008JB006008, 2009.
- SANDWELL, D. T.; SMITH, W. H. F. Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. B5, p. 10.039-10.054, 1997.
- SAPAL. Proyecto de investigación realizado por el Instituto de Geofísica, con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a través del proyecto MEX8025. *Modelación Hidrogeoquímica, comportamiento Isotópico y Modelación Matemática de las fuentes de Abastecimiento de la ciudad de León Guanajuato*. 2007.
- SAPAL. Proyecto de investigación realizado por el Grupo de Hidrología Isotópica (GHI) del Instituto de Geofísica en colaboración con el Centro de Geociencias, con el apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) a través del proyecto MEX8026. *Siembra de agua de lluvia en las zonas serranas y urbana del municipio de León, Guanajuato* 2012.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), *Carta Geológico-Minera 1:250,000, Guanajuato, F14-7*, 1997
- SGM Servicio Geológico Mexicano, *Carta Geológico-Minera 1:250,000, Querétaro F14-10*, 1999
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), *Carta Geológico-Minera 1:50,000, Nuevo Valle de Moreno, F14-C42*, 1999
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), *Carta Geológico-Minera 1:50,000, Guanajuato, F14-C43*, 1998
- SGM (Servicio Geológico Mexicano), *Carta Geológico-Minera 1:50,000, Aldama F14-C53*, 2002
- TALWANI M., Worsel J. L., Landisman M., *Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone*, *Geophysics Research*, volumen 64, p.49-59, 1959

- TAPIA C. V. J., Estudio Aeromagnetico en el sureste de México: zona limite limítrofe Guerrero-Oaxaca, UNAM, Tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico, 2011.
- TELFORD, W. M., Applied Geophysics. Cambridge University Press. Gran Bretaña segunda edición. 1990
- VERDUZCO B., Fairhead J.D., Green C.M. and MacKenzie C., *New insights into magnetic derivatives for structural mapping*, p. 116-119. 2004.
- ZIMMERMANN J.L., Stein G., Lapierre H., Vidal R. Campa M.F., Monod O., 1990, Données géochronologiques nouvelles sur les granites laramiens du centro et l'ouest du Mexique (Guerrero et Guanajuato): Société Géologique de France, 13e Réunion des Sciences de la Terre, Grenoble, France, p. 127.

### **Paginas Web Consultadas**

- <http://topex.ucsd.edu/>
- [http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com\\_content&task=view&id=128&Itemid=111](http://www.sgm.gob.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=128&Itemid=111)
- <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/#declination>
- [http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas\\_impresas/productos/cartas/cartas50/geofisica50/numcarta50.html](http://mapserver.sgm.gob.mx/cartas_impresas/productos/cartas/cartas50/geofisica50/numcarta50.html)
- <http://geoweb.inegi.org.mx/DescargaCEM2/>
- <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/gps.aspx>
- <http://www.iers.org/IERS/EN/Organization/organization.html>
- <http://www.ngdc.noaa.gov/wist/magfield.jsp>

## INDICE DE FIGURAS

|   |           |
|---|-----------|
| <i>FIGURA 1.- Modelo de Elevación modificado de INEGI, que muestra la localización del area de estudio, donde, L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueramaro, I: Irapuato, S: Salamanca.....</i>   | <i>13</i> |
| <i>FIGURA 2.- Mapa de localización y principales vías de acceso, modificado de Panorama Minero de Guanajuato 2011. 14</i>   |           |
| <i>FIGURA 3.- Provincias fisiográficas del estado de Guanajuato. El rectángulo muestra el área de estudio (modificado de INEGI).....</i>  | <i>15</i> |
| <i>FIGURA 4.-Carta Geológica de la zona de estudio actualizado y digitalizado como parte de este trabajo con información recopilada de 9 cartas geológicas escala 1:50,000 de INEGI e información de los siguientes estudios: Martínez, 1992; SAPAL, 2007 y SAPAL, 2012. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámáro, I: Irapuato, S: Salamanca. ....</i>                                    | <i>16</i> |
| <i>FIGURA 5.- Líneas de fuerza en torno a una barra magnetizada. N y S son los polos magnéticos. ....</i>   | <i>23</i> |
| <i>FIGURA 6.- Sistema de referencia y elementos magnéticos (modificado de Dobrin, 1952).....</i>  | <i>26</i> |
| <i>FIGURA 7.- Carta de Inclinación Magnética de 1995, donde los contornos rojos son positivos y los azules negativos, con intervalos cada dos grados con la proyección de Mercator (página web de NOAA). ....</i>   | <i>28</i> |
| <i>FIGURA 8.-Carta de Declinación Magnética de 1995, donde los contornos rojos son positivos y los azules negativos, con intervalos cada dos grados con la proyección de Mercator (página web de NOAA). ....</i>  | <i>28</i> |
| <i>FIGURA 9.-Modelo de Elevación digital basado en cartografía de INEGI, que comprende el área que cubren las 9 cartas de datos aeromagnéticos de Campo Total analizados en este trabajo. ....</i>  | <i>33</i> |
| <i>FIGURA 10.- Imagen que muestra la eliminación de tendencias como parte del pre procesamiento del grid, que se lleva a cabo utilizando el software de Oasis Montaj® (2005).....</i>   | <i>36</i> |
| <i>FIGURA 11.-Carta de anomalía del Campo Magnético Total de la zona de estudio obtenida a partir de la continuación descendente del grid adquirido a 450 m de altura sobre el nivel del terreno y la posterior combinación de ambas bases de datos (grid 1 y grid 2) unida con el método empate de sutura. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámáro, I: Irapuato, S: Salamanca. ....</i> | <i>37</i> |
| <i>FIGURA 12.-Carta de anomalía del campo magnético Total, que tiene sobrepuesta la geología de la región. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámáro, I: Irapuato, S: Salamanca.....</i>   | <i>38</i> |
| <i>FIGURA 13.- Configuración del campo Magnético Total Reducido al Polo, con una declinación de 7.66 e Inclinación de 48.5, que tiene sobrepuesta la geología de la región. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámáro, I: Irapuato, S: Salamanca.....</i>  | <i>40</i> |
| <i>FIGURA 14. Anomalía de Campo Total Reducida al Polo, sobre el modelo de elevación. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámáro, I: Irapuato, S: Salamanca VdL: Valle de León.....</i>   | <i>42</i> |
| <i>FIGURA 15.- Derivada inclinada con la carta geológica sobrepuesta. .L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámáro, I: Irapuato, S: Salamanca. ....</i>  | <i>45</i> |
| <i>FIGURA 16.- Combinación de la derivada inclinada y del modelo digital de elevación. Las líneas negras punteadas indican lineamientos interpretados a partir de la derivada inclinada las líneas azules punteadas y continuas corresponden a las fallas y lineamientos cartografiados, los círculos pequeños en el extremo superior izquierdo indican</i>   |           |

probables centros eruptivos sugeridos por los patrones circulares observados, en tanto que la zona dentro de la elipse trazada es probablemente una de las principales zonas de recarga del sistema acuífero del Valle de León. L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuerámara, I: Irapuato, S: Salamanca. 46

FIGURA 17.- Superficies del geoide, elipsoide, topografía y la altura del geoide, tomada de Li y Götze, 2001. .... 49

FIGURA 18.- Configuración de los datos de Gravimetría Satelital, que tiene sobrepuesta la geología. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca. Tomados de (<http://topex.ucsd.edu/>) ..... 52

FIGURA 19.- Configuración de los datos de Gravimetría Satelital, con los lineamientos y fallas geológicas cartografiados (líneas azules) e inferidos (líneas negras punteadas) sobrepuestos. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca. Tomados de (<http://topex.ucsd.edu/>) ..... 53

FIGURA 20.- Mapa Geológico el cual muestra la ubicación de los perfiles aeromagnéticos propuestos. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca..... 55

FIGURA 21.- Mapa de Reducción al Polo el cual muestra la ubicación de los perfiles aeromagnéticos propuestos. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca..... 55

FIGURA 22.- Mapa de anomalía gravimétrica el cual muestra la ubicación de los perfiles aeromagnéticos propuestos para modelar. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca. .... 56

FIGURA 23.- Modelo de elevación en escala de grises donde lo más claro es lo más bajo, que tiene sobrepuesto la geología y muestra la distribución de los puntos de nuestro en color blanco a lo largo de la Sierra de Guanajuato. L: León, G: Guanajuato, SFR: San Francisco del Rincón. .... 57

FIGURA 24.- Fotografías del equipo utilizado para las mediciones in situ de susceptibilidad magnética. Del lado izquierdo es el suceptibilmetro KT-9 y del lado derecho muestra el realizado in situ..... 58

FIGURA 25.- Modelo de elevación en escala de grises, donde lo más claro es lo más bajo, que tiene sobrepuesto la geología y muestra los 23 pozos en color rojo escogidos para los perfiles. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca ..... 59

FIGURA 26.- Perfil magnético A-A', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades. .... 63

FIGURA 27.- Perfil magnético B-B', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades. .... 65

FIGURA 28.- Perfil magnético C-C', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades. .... 67

FIGURA 29.- Perfil magnético D-D', elaborado con los datos Reducidos al Polo. La figura muestra el ajuste de la anomalía observada-calculada y el modelo geológico estructural, hecho con el contraste de susceptibilidades. .... 68

FIGURA 30.- Modelo pseudo 3D, generado a partir de los modelos 2D. .... 69

FIGURA 31.- Modelo conceptual del basamento hidrológico del valle de León que sugiere un escalonamiento tectónico regional que muestra la profundidad del nivel freático. .... 70

FIGURA 32.- Mapa geológico que muestra en color rojo el área donde se realizó el cálculo del volumen de las posibles reservar hídricas. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca ..... 72

|  |           |
|--|-----------|
| <i>FIGURA 33.- Malla de topografía que muestra el "blanqueo" que se realizó con los datos. En color negro se observa el área a calcular y en color azul los valores "blanqueados".....</i> | <i>72</i> |
| <i>FIGURA 34.-. Modelo 3D del Valle de León que muestra la forma de los sedimentos y el basamento hidrológico. ....</i>  | <i>74</i> |

## **TABLAS**

|   |           |
|---|-----------|
| <i>TABLA 1.- Vértices en coordenadas geográficas con proyección WGS84de la zona de estudio. ....</i>  | <i>12</i> |
| <i>TABLA 2.-Valores de susceptibilidad presentadas en algunas rocas, modificada de Escorza (2010).....</i>  | <i>24</i> |
| <i>TABLA 3.- Síntesis de las unidades de medida utilizadas en Magnetometría (Argote, 2008). ....</i>  | <i>26</i> |
| <i>TABLA 4.-Vértices de las secciones modeladas en coordenada UTM con proyección WGS84. ....</i>  | <i>54</i> |
| <i>TABLA 5.- Valores obtenidos de susceptibilidad magnética de las 20 muestras de roca recolectadas en la sierra y ciudad de León, Guanajuato. ....</i>   | <i>58</i> |
| <i>TABLA 6.- Límites del área para interpolar. Siendo la del lado izquierdo los vértices con los que se realizó la malla en el software y del lado derecho los vértices del área calculada.....</i> | <i>73</i> |
| <i>TABLA 7.- Valores estimados de la porosidad en (%) de las diferentes litologías. Tomadas de Sanders (1998).....</i>  | <i>73</i> |

## ANEXO 1

### **Continuación Ascendente y Descendente**

A partir de las mediciones de un campo potencial en un plano determinado, como es el caso del magnético o gravitatorio, es posible calcular este campo ya sea en un plano o nivel más alto o más bajo, mediante el proceso de continuación de campo hacia arriba o hacia abajo según sea el caso.

La diferencia entre hacer uno y otro es que si se realiza una continuación hacia arriba el campo se suaviza, al contrario que cuando se hace la continuación hacia abajo, ya que se hace mas abrupto en el nivel de medición (Nettleton, 1968).

Cuando no se intenta ir a un nivel más profundo que la fuente, la continuación hacia abajo está bien definida (Boschetti et al, 2001), la limitante es que este proceso es altamente sensible al ruido, ya que la señal es amplificada exponencialmente, con un exponente proporcional a la frecuencia espectral.

La continuación hacia arriba se utiliza para reducir efectos de fuentes superficiales, ya que al cambiar el nivel de observación la respuesta disminuye, puesto que el campo magnético es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y el nivel de observación, por lo que la señal magnética se suaviza (Telford et al.,1990). En Geosoft está dado como:  $P(u,v) = \exp(-2\pi z)$ , donde  $z$  es la distancia de continuación en metros.

### **Carta de Continuación ascendente con Interpretación Geol.**

En esta carta se visualiza de una mejor manera la anomalía que va de 69 a 207 nT con una dirección NW- SE. Al norte en la sierra de Guanajuato se observa una anomalía con la misma dirección con valores negativos de -66 a -177 nT, dentro de esta franja la litología que se observa es el volcanosedimentario, el granito Comanja, el conglomerado Guanajuato, solo donde se encuentra la Piroxenita y la diorita, existe una anomalía de 207 nT la cual tiene una forma de pera. Aunque en esta anomalía se encuentra las dos litologías mencionadas, en otros lugares donde afloran estos cuerpos la anomalía es muy baja incluso negativa. Al NE de la carta se visualiza una anomalía de -1nT a 18 nT de color amarillo, la

litología superficial nos muestra la ignimbrita, esta abarca prácticamente el E de la carta. Al Sw de la carta donde se encuentra la Sierra de Penjamo la anomalía de 18 a 158 nT cubre la orilla del basalto, observándose una anomalía negativa al centro de la sierra y alrededor de la sierra donde se observa la ignimbrita observamos bajos magnéticos de -16 a -97 nT. De lo observado en carta de reducción al polo continuada 600m y de la reducción al polo, las anomalías magnéticas altas, están asociadas al basalto en su mayoría y a la Piroxenita en la sierra de Guanajuato, mientras que las rocas como la volcanosedimentaria, el granito Comanja y el conglomerado Guanajuato nos dan anomalías negativas nos da bajos magnéticos, en la zona de MD y C se encuentra la ignimbrita que también se observa en los bajos magnéticos.

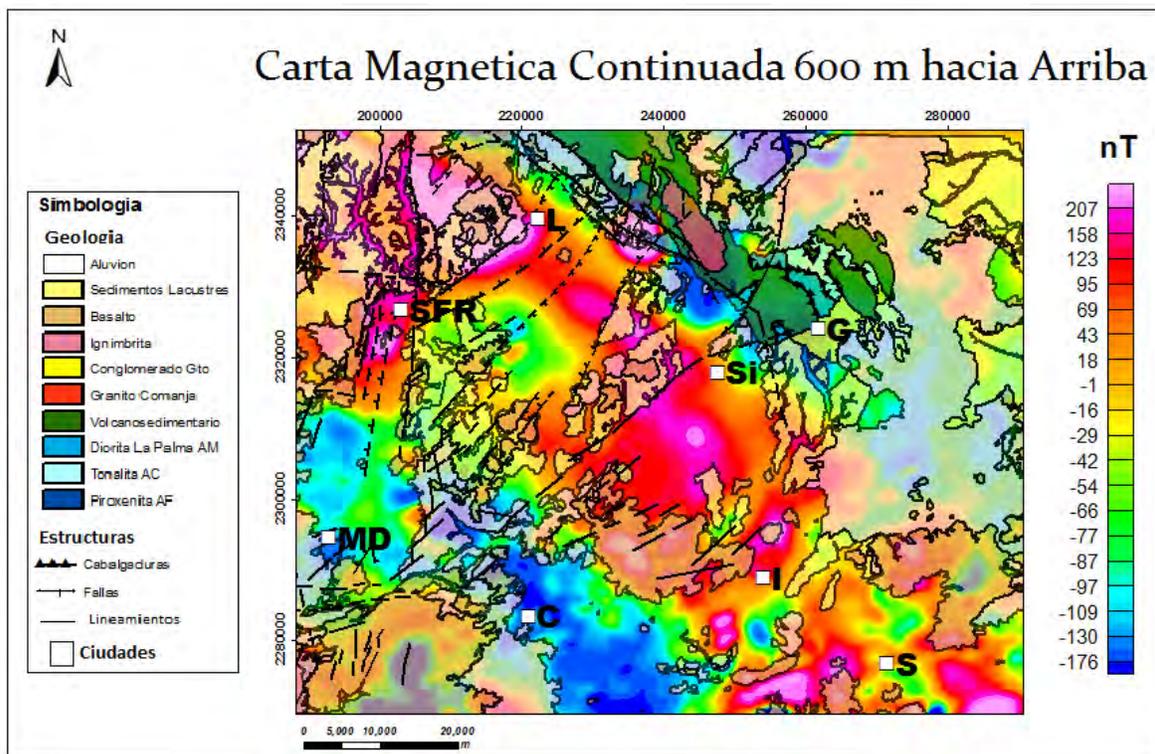


FIGURA 1.- Composición resultante al realizar la Continuación ascendente a los datos Reducidos al Polo. Donde L: Leon, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca

### Carta de continuación descendente con interpretación geológica

Este filtro se utilizó para transformar el campo magnético en la superficie ya que los datos fueron tomados a una altura de 300m. Es decir, la operación realizada consistió en llevar los datos a nivel del suelo, como si se hubieran tomado desde la superficie. En general se

puede observar las mismas estructuras, solo cambia un poco al sur, lo que corresponde a la Sierra de Penjamo, donde se observa un contorno con una anomalía de 95 a 171 nT y muestra anomalías de 304 nT al SE y al NW de la carta. Otro de los objetivos de realizar esta continuación descendente es para poder utilizar este mapa para la caracterización cuantitativa, es decir los perfiles se harán sobre esta carta para quitar la diferencia de altura que existe.

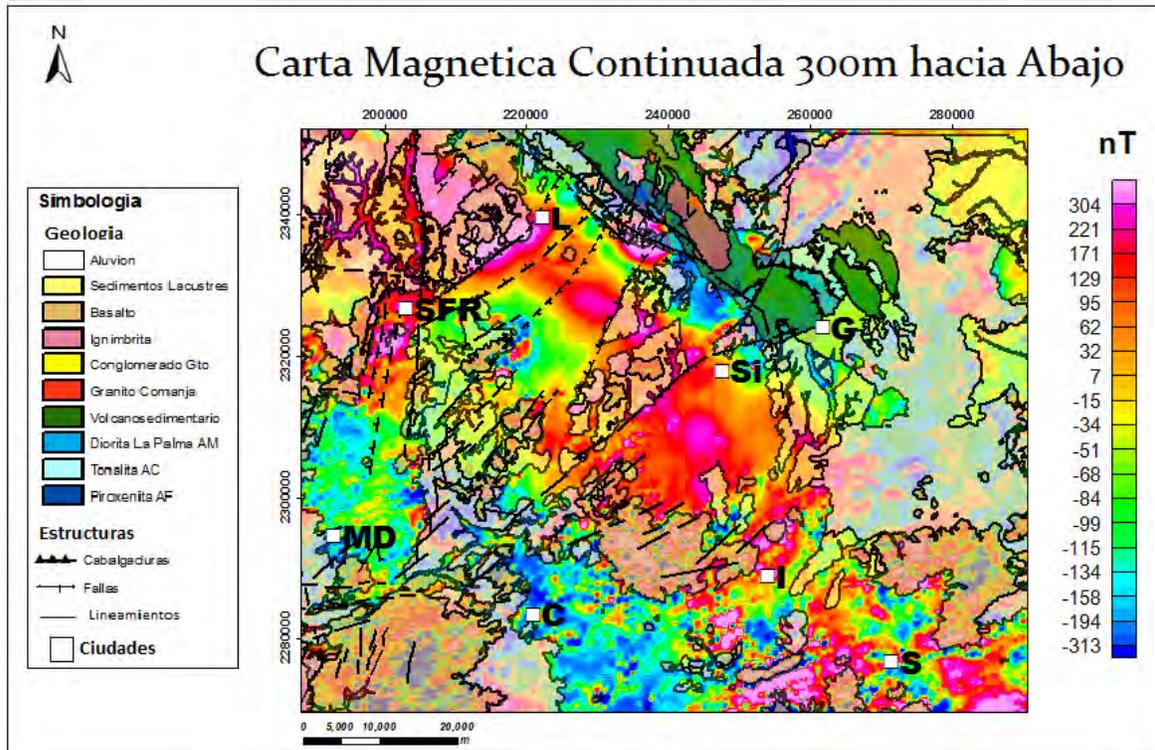


FIGURA 2.- Composición resultante al realizar la Continuación descendente. Donde L: León, SFR: San Francisco del Rincón, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cueremaro, I: Irapuato, S: Salamanca

### Derivada direccional en z

La derivada vertical del campo magnético se utiliza principalmente para visualizar contactos y pequeños rasgos asociados con anomalías magnéticas (Henderson y Zietz, 1949) ya que tiende remarcar los bordes y suprime las variaciones regionales, enfatizando las características más someras.

La derivada direccional en z está dada por:

$$z = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

En el mapa de la configuración de la primera derivada vertical, del campo magnético reducido al polo, se pueden observar el contorno de la anomalía de 0.04 a 0.08 nT, con dirección NW- SE al centro de la carta FIGURA 13. Al sur de la carta se visualiza un tipo de anomalía que viene desde el este, aproximadamente desde SFR y continua todo hacia al sur. La litología donde se aprecian la mayor amplitud de onda corresponde a los basaltos, donde de alguna manera me delimita bien toda esa zona.

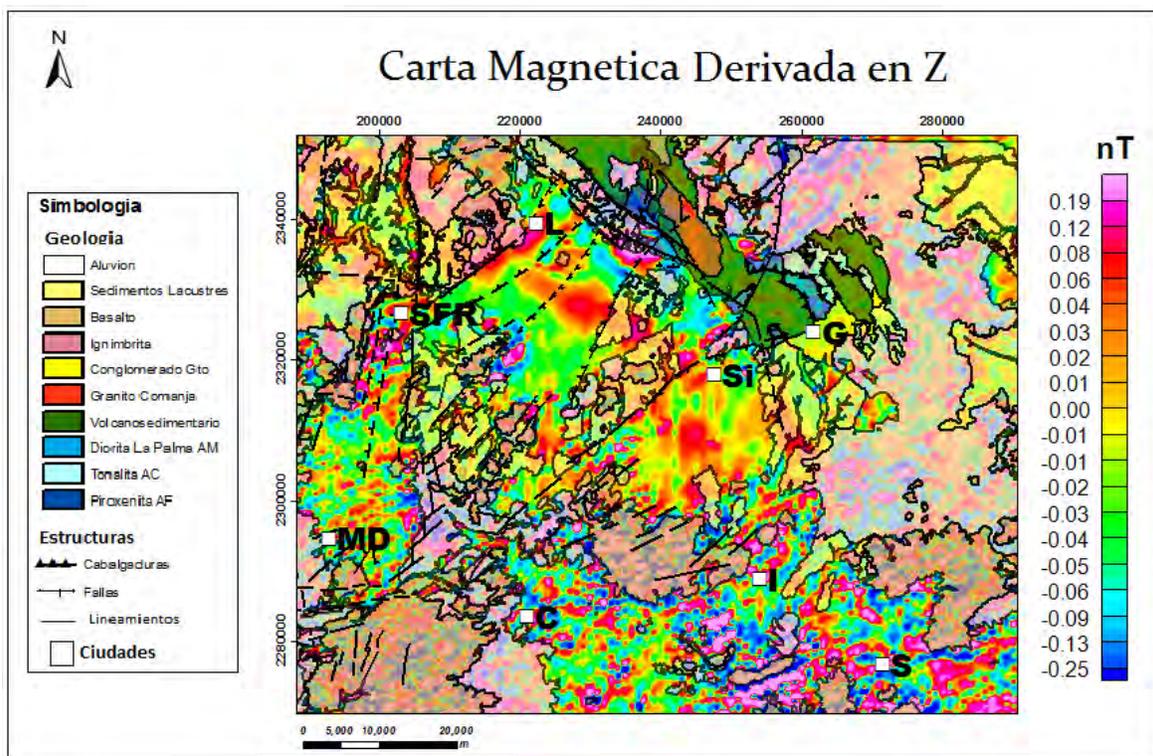


FIGURA 4.- Composición resultante al realizar la derivada en Z. Donde L: Leon, SFR: San Francisco del Rincon, G: Guanajuato, Si: Silao, MD: Manuel Doblado, C: Cuernamaro, I: Irapuato, S: Salamanca

## ANEXO 2

### **Componentes del Satélite Geodesy**

*Satellite Laser Ranging (SLR)* o Sistema Laser Satelital de Medición, técnica que permite la medición precisa de la distancia al satélite que orbita la Tierra, permite cuantificar de manera instantánea el tiempo de ida y vuelta de pulsos ultra angostos de luz laser entre la estación en tierra y satélites equipados con retro reflectores. El tiempo de viaje registra las medidas instantáneas de distancia entre el satélite y la superficie terrestre de referencia con precisión milimétrica, la cual es una indicación de mayor o menor grado de atracción gravitacional terrestre. Es decir, la variación orbital de los satélites se relaciona directamente con zonas de mayor o menor concentración de masa según sea el caso. Las cartas de variación espacial que resultan una vez que se compensan por las variaciones topográficas de la superficie terrestre, constituyen anomalías gravimétricas que pueden ser interpretadas en términos de concentración y deficiencia de masas en el subsuelo (Exertier et. al., 2001).

*Very-Long\_Baseline Interferometry (VLBI)*, consiste en la observación de objetos celestes con varios radiotelescopios ubicados alrededor del mundo, y como tiene la capacidad de grabación los datos se procesan como si fuera un solo obteniendo una mejor resolución, (<http://www.iers.org.html>).

*Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*, es un sistema que consiste en 21 satélites operativos y tres de repuesto que orbitan la tierra a una altitud de 20,000 km, las posiciones se obtienen mediante la determinación de las distancias a los satélites visibles. El momento de la transmisión de la señal en el satélite se compara con el momento de la recepción en el receptor. La diferencia de estos dos tiempos nos dice cuánto tiempo tomó para que la señal viajara desde el satélite al receptor. Si se multiplica el tiempo de viaje por la velocidad de la luz, podemos obtener el rango, o de distancia, con el satélite si se repite este proceso desde tres satélites permite determinar la longitud y latitud y sería necesario un cuarto para determinar la altura.

*Doppler Orbitography and radio position in Integrate by Satellite (DORIS)*, es un sistema de satélite, originado en Francia, utilizado para determinar las orbitas de los satélites.(<http://topex.ucsd.edu/>).

### **El Modelo Geopotencial EGM2008**

Los valores de los modelos Geopotenciales en general se obtienen esencialmente mediante tres fuentes de datos. Los que proceden de la observación del movimiento perturbado de los satélites artificiales de la Tierra, los cuales contribuye proporcionando los coeficientes de menor grado (mayor longitud de onda). La altimetría de satélite, que permite disponer de valores asociados a los océanos y por último de gravimetría terrestre a partir de los que se determinan los coeficientes de mayor grado y por lo tanto de mayor resolución (menor longitud de onda). Durante mucho tiempo el mejor modelo geopotencial global para fines geodésicos fue el EGM96, de grado y orden 360, con una resolución de 55.5 km, pero en abril de 2008, el *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) reveló oficialmente el modelo global más reciente *Earth Gravitational Model* (EGM08) en el que hubo una notable mejoría en las tres fuentes de datos mencionadas anteriormente y por lo cual se ha conseguido un desarrollo hasta el grado y orden 2160, pero que contiene coeficientes adicionales hasta grado 2190 y orden 2159, lo cual supone recuperar el campo gravitatorio hasta longitudes de onda de unos 20 kilómetros. y una sustancial mejora en la precisión. A partir de estos modelos geopotenciales globales es posible calcular las magnitudes gravimétricas derivadas, en particular el geoide.

### **Anomalías de gravedad derivadas de altimetría satelital**

Para calcular las anomalías de gravedad a partir de altimetría satelital se utilizan diferentes técnicas, como usar la formula inversa de Stokes en el dominio espectral vía FFT (Andersen et al., 1998), o la conversión de la deflexión de la vertical del campo gravitacional vía integración de la ecuación de Laplace (Sandwell y Smith, 1997).

A continuación se enuncian los conceptos básicos de la altimetría que permitirán entender el fenómeno, pero su estudio es extenso y el desarrollo matemático profundo, por lo cual su exposición detallada queda fuera del alcance del presente trabajo, por lo que se recomienda,

referirse a las respectivas referencias proporcionadas para obtener más información acerca de los métodos.

Para resaltar los efectos de pequeña escala este geode es convertido a anomalías gravimétricas, que en términos sencillos se calcula tomando las derivadas del geode y usan la ecuación de Laplace. Se realizan dos mediciones para poder calcular el geode, la primer medida es la altura del satélite arriba del elipsoide  $h^*$  rastreando el satélite mediante una red distribuida globalmente de estaciones de laser y/o Dopper. La otra medida que se realiza es la altura del satélite sobre la superficie del océano mas cercana, esta elevación  $h$ , es medida con un altímetro de radar microondas (Sandwell y Smith, 1997). Por lo tanto la altura del geode es la diferencia entre la altura del elipsoide y la altura del mar.

$$N = h^* - h$$

Como se mencionó, la anomalía de la gravedad puede ser calculado utilizando la fórmula Stokes inversa o mediante la adopción de los derivados de la geode y utilizando la ecuación Laplace, pero la relación más simple entre la anomalía gravimétrica y el geode, para anomalías bidimensionales esta dado por (Li y Götze, 2001):

$$\Delta g = \frac{2\pi\gamma N}{\lambda}$$

Donde:

$$\Delta g = \text{anomalía gravimétrica asociada}$$

$$\lambda = \text{longitud de onda}$$

$$N = \text{amplitud}$$

$\gamma = 980000 \text{ mGal}$ , que es el valor promedio de la gravedad de la tierra.

Esta fórmula expresa que una variación en el geode asociada a una anomalía de 10 mGal y una longitud de onda de 10 km es solo de 16 mm, lo cual nos indica que tan preciso debe ser el geode para derivar anomalías útiles para la exploración geofísica (Li y Götze, 2001):

### ANEXO 3

#### Descripción de los pozos utilizados en el Perfil A-A'

| LAGUNILLAS |  |
|------------|--|
| 0 - 8      | BASALTO ALTERADO FRACTURADO                  |
| 8. - 16    | BASALTO ALTERADO OXIDADO                     |
| 16 - 20    | BASALTO                                      |
| 20 - 22    | BASALTO CON FRAG. DE BASALTO ALTERADO        |
| 22 - 26    | BASALTO                                      |
| 26 - 32    | BASALTO VISICULARALTERADO OXIDADO            |
| 32 - 36    | BASALTO ALTERADO OXIDADO                     |
| 36 - 46    | BASALTO                                      |
| 46 - 48    | BASALTO CON FRAG. DE TOBA BASALTICA          |
| 48 - 62    | BASALTO                                      |
| 62 - 64    | BASALTO ALTERADO CON FRAG. DE BASALTO        |
| 64 - 76    | BASALTO ALTERADO                             |
| 76 - 86    | BASALTO                                      |
| 86 - 90    | BASALTO OXIDADO ALTERADO                     |
| 90 - 104   | BASALTO ALTERADO                             |
| 104 - 110  | GRAVAS Y GRAVILLAS DE BASALTO                |
| 110 - 114  | TOBA BASALTICA                               |
| 114 - 116  | BASALTO CON FRAG. DE BASALTO ALTERADO Y TOBA |
| 116 - 124  | BASALTO                                      |
| 124 - 128  | BASALTO CON FRAG. DE TOBA                    |
| 128 - 130  | RIOLITA SILICIFICADA CON FRAG. DE BASALTO    |
| 130 - 140  | RIOLITA SILICIFICADA                         |

| EX HACIENDA CERRO GORDO |  |
|-------------------------|--|
| 0 - 2                   | RIOLITA ALTERADA FRAG. DE TB                   |
| 2. - 6                  | GRAVAS Y GRAVILLAS EMPACADAS EN MAT. ARCILLOSO |
| 6. - 10                 | RIOLITA SILISIFICADA CON FRAG. DE Q            |
| 10. - 18                | RIOLITA ALTERADA CON FRAG. DE TB               |
| 18 - 24                 | RIOLITA ALTERADA                               |
| 24 - 36                 | TOBA RIOLITICA                                 |
| 36 - 38                 | BASALTO CON FRAG. DE TB RIOLITICA              |

|           |   |
|-----------|---|
| 38 - 76   | BASALTO CON ALGUNOS FRAG. DE Q                      |
| 76 - 78   | BASALTO CON POCA OXIDACION                          |
| 78 - 86   | BASALTO   |
| 86 - 98   | BASALTO CON FRAG. DE BX<br>ALTERADO Y ALGUNOS DE TB |
| 98 - 100  | RIOLITA ALTERADA CON FRAG. DE BX                    |
| 100 - 112 | RIOLITA PRESENTA POCA<br>SILIFICACION               |
| 112 - 126 | RIOLITA ALTERADA                                    |
| 126 - 130 | RIOLITA POCO ALTERADA                               |
| 130 - 148 | RIOLITA ALTERADA                                    |
| 148 - 152 | RIOLITA CON FRAG. DE BX                             |
| 152 - 162 | GRAVAS Y GRAVILLAS EMPACADAS<br>EN ARCILLA          |
| 162 - 176 | AGLOMERADO  |
| 176 - 184 | RIOLITA ALTERADA CON FRAG. DE TB<br>Y BX            |
| 184 - 214 | TOBA RIOLITICA CON FRAG. DE RX                      |
| 214 - 222 | AGLOMERADO ARENOSO                                  |
| 222 - 252 | AGLOMERADO ARCILLOSO                                |
| 252 - 298 | TOBA - ARENOSA                                      |
| 298 - 350 | TOBA ARENO - ARCILLOSA                              |

|              |  |
|--------------|--|
| SIERRA NOGAL |  |
| 2            | PAQUETE DE ARCILLAS. 2 M   |
| 20           | TOBA ARENOSA, FRAGMENTOS<br>SUBANGULOSOS Y<br>SUBREDONDEADOS DE DIVERSA<br>COMPOSICION, POCO ALTERADOS<br>EMPACADOS EN UNA MATRIZ<br>ARENOSA. 18 M |
| 56           | TOBA GRAVO-ARENOSA<br>FRAGMENTOS DE ROCA DE<br>DIFERENTE COMPOSICION,<br>SUBREDONDEADOS EMPACADOS EN<br>UNA MATRIZ ARENOSA. 36 M                   |
| 74           | TOBA GRAVO-ARCILLOSA,<br>FRAGMENTOS DE ROCA<br>SUBREDONDEADOS DE DIVERSA<br>COMPOSICION EMPACADOS EN UNA<br>MATRIZ ARCILLOSA 18 M                  |
| 170          | TOBA GRAVO-ARENOSA,<br>FRAGMENTOS DE ROCA<br>SUBREDONDEADOS DE DIVERSA<br>COMPOSICION EMPACADOS EN UNA<br>MATRIZ ARCILLOSA 96 M                    |
| 235          | FRAGMENTOS DE ROCA (BLOQUES Y<br>GUIJAS), SUBANGULOSOS Y<br>SUBREDONDEADOS DE DIVERSA<br>COMPOSICION EMPACADOS EN UNA<br>MATRIZ ARENOSA. 65 M      |
| 253          | RIOLITA, ROCA PARCIALMENTE<br>ALTERADA Y FRACTURADA DE   |

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
|     | COMPOSICION ACIDA. 18 M          |
| 300 | PAQUETE GRUESO DE ARCILLAS. 47 M |

| VILLAS DE SAN JUAN |   |
|--------------------|---|
| 100                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 100 M |
| 200                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 100 M |
| 224                | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ MAS ARCILLOSA 24 M      |
| 254                | ROCA VOCANICA DE TIPO ACIDO COMPUESTA POR RIOLITAS Y/O IGNIMBRITA, ALTERADA Y FRACTURADA. 30 M                            |
| 300                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 46 M  |
| 325                | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARCILLOSA 25 M          |
| 400                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 75 M  |
| 425                | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ MAS ARCILLOSA 25 M      |

| LOZA DE LOS PADRES |   |
|--------------------|---|
| 49                 | ARENAS Y GRAVILLAS 49 M                   |
| 85                 | INTERCALACION DE ARCILLAS CON ARENA 36 M  |
| 112                | ARCILLAS CON ARENAS 27 M                  |
| 151                | INTERCALACION DE ARENAS CON ARCILLAS 39 M |
| 193                | ARCILLAS CON ARENAS 42 M                  |
| 220                | ARENAS CON ARCILLAS 7 M                   |

|     |   |
|-----|---|
| 230 | COLADA DE ROCA IGNEA<br>FRACTURADA 10 M         |
| 344 | INTERCALACIONES DE ARCILLAS CON<br>ARENAS 114 M |
| 363 | ROCA IGNEA FRACTURADA 19 M                      |
| 600 | INTERCALACION DE ARENAS CON<br>ARCILLAS 237 M   |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| SAN AGUSTIN DE LAS<br>FLORES |   |
| 0 - 4                        | ARCILLA                                 |
| 4. - 22                      | BOLEOS EMPACADOS EN ARCILLA             |
| 22 - 26                      | BASALTO POROSO Y FRACTURADO             |
| 26 - 32                      | BOLEOS EMPACADOS EN ARCILLA             |
| 32 - 60                      | BASALTO FRACTURADO COLOR<br>VERDE       |
| 60 - 104                     | ROCA IGNEA FRACTURADO Y POROS<br>ROJISO |
| 104 - 118                    | BASALTO FRACTURADO                      |
| 118 - 144                    | BASLTO COMPACTO                         |
| 144 - 174                    | BASALTO FRACTURADO                      |
| 174 - 182                    | BASALTO POROSO, TEZONTLE                |
| 182 - 192                    | BASALTO FRACTURADO                      |
| 192 - 208                    | BOLEOS EMPACADOS EN ARCILLA             |
| 208 - 222                    | MATERIAL ARENO - ARCILLOSO              |
| 222 - 226                    | ARCILLA                                 |
| 226 - 250                    | MATERIAL ARENO - ARCILLOSO              |

### Descripción de los pozos utilizados en Perfil B-B'

|          |   |
|----------|---|
| CORTIJOS |   |
| 6        | FRAGMENTOS Y PEDACERIA DE<br>ROCA TIPO VOLCANICO Y<br>COMPOSICION ACIDA, CON<br>MATERIAL CLASTICO ARENO<br>ARCILLOSO, SEMICONSOLIDADO. 6<br>M |
| 10       | TOBA RIOLITICA<br>SEMICONSOLIDADA. 4 M  |
| 18       | ROCA VOLCANICA ACIDA<br>(RIOLITA) COMPACTA A<br>LIGERAMENTE FRACTURADA. 8 M   |

|     |  |
|-----|--|
| 26  | ROCA VOLCANICA ACIDA (RIOLITA) FRACTURADA CON PROCESOS DE ALTERACION. 8  |
| 32  | SEDIMENTOS CLASTICOS ARENOSOS, CON MATERIAL ARCILLOSO. 6 M   |
| 90  | TOBA HIBRIDA SEMICONSOLIDADA Y/O MATERIAL PETREO FRAGMENTADO, EMPACADO EN SEDIMENTOS CLASTICOS ARENO ARCILLOSOS SEMICONSOLIDADOS. 58 M |
| 104 | MATERIAL CLASTICO ARENOSO, EMPACADO EN ARCILLAS. 14 M  |
| 128 | ROCA VOLCANICA ACIDA FRACTURADA. 14 M  |
| 320 | AUSENCIA DE MUESTRAS POR PERDIDA DE CIRCULACION. 192 M   |

| EL NACIMIENTO |  |
|---------------|--|
| 2             | SUELO ALUVION COMPUESTO DE MATERIAL ARCILLO ARENOSO. 2 M   |
| 36            | MATERIAL CLASTICO SEDIMENTARIO DE ORIGEN FLUVIAL, COMPUESTO DE ARENAS FINAS CON POCA ARCILLA. 34 M             |
| 92            | CLASTICO SEDIMENTARIOS COMPUESTOS DE GRAVILLA Y POCA ARENA GRUESA. 56 M  |
| 140           | MATERIAL CLASTICO ARCILLO ARENOSO DE COLOR CREMA ROSADO. 48 M  |
| 172           | MATERIAL CLASTICO SEDIMENTARIO COMPUESTO DE ARENAS Y ARCILLAS CON TEXTURA PLASTICA COLOR CAFÉ VERDOSO. 32 M    |
| 230           | CLASTICOS DE MATERIAL COMPUESTO DE GRAVAS CON ARCILLA ARENOSA DE COLOR CAFÉ ROJIZO. 58 M                       |
| 246           | MATERIAL CLASTICO SEDIMENTARIO COMPUESTO DE ARCILLA CON ARENAS FINAS COLOR CREMA ROJIZO. 16 M                  |
| 254           | ROCA IGNEA EXTRUSIVA ACIDA (RIOLITA SANA) CON ALTO RENDIMIENTO DE CUARZO. 8 M                                  |
| 294           | CLASTICOS SEDIMENTARIOS ARCILLO ARENOSOS DE COLOR CAFÉ A NEGRO 40 M  |
| 314           | FRAGMENTOS DE ROCA IGNEA EXTRUSIVA ACIDA FRACTURADA Y ALTERADA (RIOLITA). 20 M                                 |
| 390           | MATERIAL CLASTICO ARCILLOSO DE COLR CAFÉ OSCURO CON ALGUNOS FRAGMENTOS DE TOBA RIOLITICA Y TOBA PUMITICA. 76 M |

|     |   |
|-----|---|
| 400 | ROCA RIOLITICA LIGERAMENTE<br>FRACTURADA Y SANA. 10 M |
|-----|---|

|            |  |
|------------|--|
| SANTA ROSA |  |
| 0 - 4      | TIERRA VEGETAL   |
| 4. - 6     | CONGLOMERADO ARENOSO   |
| 6. - 18    | CONGLOMERADO   |
| 18 - 40    | BASALTO CON FRAG. DE RIOLITA<br>ALTERADA Y TOBA                        |
| 40 - 48    | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MAT. ARCILLOSO                      |
| 48 - 50    | BASALTO CON FRAG. DE RIOLITA Y<br>TOBA CONTENIENDO                     |
| 50 - 58    | MATERIAL ARCILLOSO   |
| 58 - 84    | BASALTO CON FRAG. DE RIOLITA Y<br>TOBA CONTENIENDO MATERIAL<br>ARENOSO |
| 84 - 122   | BASALTO CON FRAG. DE RIOLITA Y<br>TOBA                                 |
| 122 - 130  | MATERIAL ARCILLOSO   |
| 130 - 132  | BASALTO MUY FRACTURADO   |
| 132 - 134  | MATERIAL ARCILLOSO   |
| 134 - 138  | GRAVILLAS EMPACADAS EN<br>ARCILLAS CON FRAG. DE                        |
| 138 - 140  | TOBA RIOLITICA   |
| 140 - 142  | BASALTO CONTENIENDO<br>MATERIAL ARCILLOSO                              |
| 142 - 144  | TOBA RIOLITICA   |
| 144 - 148  | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN ARCILLA                             |
| 148 - 150  | BASALTO CON FRAG. DE RIOLITA   |
| 150 - 152  | BASALTO CON FRAG. DE TOBA<br>RIOLITICA                                 |
| 152 - 156  | MATERIAL ARENO - ARCILLOSO<br>CON FRAG. DE BASALTO                     |
| 156 - 160  | MATERIAL ARCILLO - ARENOSO<br>CON FRAG. DE BASALTO                     |
| 160 - 190  | MATERIAL ARCILLOSO<br>CONTENIENDO GRAVILLAS TOBA<br>RIOLITICA          |
| 190 - 192  | TOBA RIOLITICA   |
| 192 - 202  | MATERIAL ARCILLOSO   |
| 202 - 226  | GRAVILLAS EMPACADAS EN<br>MATERIAL ARCILLOSO                           |
| 226 - 250  | CONGLOMERADO PREDOMINAN<br>FRAG. DE BASALTO                            |
| 250 - 252  | MATERIAL ARCILLOSO   |

|                        |                              |
|------------------------|------------------------------|
| SAN PEDRO DEL<br>MONTE |                              |
| 0 - 28                 | ARENAS EMPACADAS EN ARCILLAS |
| 28 - 52                | ARENAS                       |

|           |  |
|-----------|--|
| 52 - 120  | ARENAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN ARCILLA   |
| 120 - 148 | GRAVILLAS Y FRAGMENTOS DE<br>TOBA EN ARCILLA |
| 148 - 170 | ARCILLA CON ARENAS                           |
| 170 - 214 | ARENAS Y GRAVILLAS EN ARCILLA                |
| 214 - 250 | ARCILLA CON GRAVILLAS                        |

|                        |   |
|------------------------|---|
| VISTA HERMOSA<br>SILAO |   |
| 0 - 4                  | TIERRA VEGETAL                                    |
| 4. - 12                | MATERIAL ARENOSO                                  |
| 12. - 18               | GRAVAS Y GRAVILLAS                                |
| 18 - 44                | GRAVAS EMPACADAS EN<br>MATERIAL ARCILLOSO         |
| 44 - 56                | MATERIAL ARENO - ARCILLOSO                        |
| 56 - 70                | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MAT. ARCILLOSO |
| 70 - 104               | CONGLOMERADO                                      |
| 104 - 116              | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MAT. ARCILLOSO |
| 116 - 150              | CONGLOMERADO                                      |
| 150 - 168              | ARENA GRUESA                                      |
| 168 - 240              | CONGLOMERADO ARENOSO                              |
| 240 - 276              | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MAT. ARCILLOSO |
| 276 - 282              | GRAVILLAS EMPACADAS EN<br>MATERIAL ARCILLOSO      |
| 282 - 292              | MATERIAL ARCILLOSO                                |
| 292 - 300              | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MAT. ARCILLOSO |

|                     |  |
|---------------------|--|
| RANCHO<br>MONTERREY |  |
| 0 - 60              | MATERIAL ARCILLOSO, CONTIENE<br>GRAVILLAS    |
| 60 - 80             | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MATERIAL  |
| 80 - 126            | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MATERIAL  |
| 126 - 130           | GRAVAS Y GRAVILLAS                           |
| 130 - 144           | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MATERIAL  |
| 144 - 146           | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MATERIAL  |
| 146 - 184           | MATERIAL ARCILLOSO COLOR<br>BEIGE            |
| 184 - 250           | MATERIAL ARCILLOSO COLOR GRIS<br>CLARO       |
| 250 - 158           | GRAVILLAS EMPACADAS EN<br>MATERIAL ARCILLOSO |

|           |   |
|-----------|---|
| 258 - 288 | MATERIAL ARCILLOSO                          |
| 288 - 306 | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MATERIAL |
| 306 - 314 | CONGLOMERADO                                |
| 314 - 318 | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MATERIAL |
| 318 - 320 | GRAVAS Y GRAVILLAS<br>EMPACADAS EN MATERIAL |
| 320 - 357 | CONGLOMERADO                                |

|            |  |
|------------|--|
| LAS FINCAS |  |
| 4. - 84    | ARENA Y BOLEOS EMPACADAS EN<br>ARCILLA         |
| 84 - 110   | BOLEOS Y ARENAS EMPACADAS EN<br>ARCILLA ROJISA |
| 110 - 154  | ARENAS EMPACADAS                               |
| 154 - 202  | ARENAS   |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| SAN RAMON DE<br>GALLEGOS |  |
| 0 - 16                   | MATERIAL ARCILLOSO                       |
| 16 - 22                  | MATERIAL ARENO - ARCILLOSO               |
| 22 - 36                  | ARENA                                    |
| 36 - 40                  | MATERIAL ARCILLO - ARENOSO               |
| 40 - 100                 | MATERIAL ARCILLO - ARENOSO<br>POCA ARENA |
| 100 - 119                | CONGLOMERADO                             |

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| COMEDERO<br>GRANDE |                    |
| 0 - 22             | CONGLOMERADO       |
| 22 - 40            | RIOLITA 0          |
| 40 - 50            | TOBA RIOLITICA     |
| 50 - 68            | RIOLITA            |
| 68 - 170           | RIOLITA FRACTURADA |
| 170 - 240          | TOBA RIOLITICA     |
| 240 - 310          | CONGLOMERADO       |
| 310 - 320          | RIOLITA            |
| 320 - 450          | CONGLOMERADO       |

### Descripción de los pozos utilizados en Perfil C-C'

|                          |   |
|--------------------------|---|
| El Toro                  |   |
| 0 - 4                    | CALIZAS   |
| 4. - 6                   | TOBA RIOLITICA  |
| 6. - 8                   | RIOLITA   |
| 8. - 24                  | TOBA RIOLITICA  |
| 24 - 56                  | RIOLITA   |
| 56 - 70                  | RIOLITA ALTERADA                                      |
| 70 - 80                  | RIOLITA   |
| 80 - 86                  | TOBA RIOLITICA  |
| 86 - 106                 | MATERIAL ARCILLOSO                                    |
| 106 - 122                | RIOLITA CON FRAG. DE TOBA RIOLITICA                   |
| 122 - 160                | MATERIAL ARCILLOSO                                    |
|                          |   |
| Mexiquito                |   |
| 0 - 12                   | TOBA  |
| 12. - 24                 | ARENA SILICA  |
| 24 - 64                  | MATERIAL ARENO - ARCILLOSO                            |
| 64 - 70                  | ARENA MEDIA A GRUESA                                  |
| 70 - 104                 | CONGLOMERADO  |
| 104 - 112                | CONGLOMERADO ARCILLOSO                                |
| 112 - 140                | TOBA RIOLITICA CON FRAG. DE RIOLITA ALTERADA Y SILICE |
| 140 - 150                | ARENA CONTIENE Q                                      |
| 150 - 152                | MATERIAL ARCILLO - ARENOSO                            |
| 152 - 170                | ARENA CONTIENE Q                                      |
| 170 - 186                | ARENA SILICIFICADA                                    |
| 186 - 188                | MATERIAL ARENO - ARCILLOSO                            |
| 188 - 198                | RIOLITA SILICIFICADA                                  |
| 198 - 202                | RIOLITA ALTERADA CON FRAG. DE RIOLITA SILICIFICADA    |
| 202 - 208                | MATERIAL ARCILLOSO CONTIENE GRAVILLAS                 |
|                          |   |
| Oficinas Centrales SAPAL |   |
| 4                        | ARENA MEDIA Y GRUESA 4 m                              |

|               |  |
|---------------|--|
| 16            | ALTERNANCIA DE TOBAS ARCILLO - ARENOSAS, TOBAS ARENO - GRAVOSAS 12 m   |
| 42            | TOBAS ARENO-GRAVOSAS 26 m  |
| 132           | ALTERNANCIA DE TOBAS ARENO-GRAVOSAS, TOBAS ARENOSAS Y TOBAS GRAVO-ARENOSAS 90 m  |
| 154           | TOBAS ARCILLO- LIMOSAS CON ARENAS 22 m   |
| 160           | TOBAS ARENOSAS 6 m   |
| 184           | TOBAS ARCILLO ARENOSAS 24 m  |
| 200           | ALTERNANCIA DE TOBA ARCILLO-ARENOSA Y TOBAS ARENO-ARCILLOSAS 16 m  |
| 238           | TOBAS ARENO-GRAVOSAS 38 m  |
| 252           | TOBA ARACILLO-ARENOSA Y POCA GRAVA 14 m  |
| 437           | ALTERNANCIA DE TOBAS. ARCILLO - ARENOSAS, TOBAS ARCILLO-GRAVOSAS Y TOBAS ARENO - GRAVOSAS 185 m                            |
| 442           | TOBA ARENOSA 6 m   |
| 450           | TOBA RIOLITICA (ROCA) 8 m  |
|               |  |
|               |  |
|               |  |
|               |  |
|               |  |
| Parque México |  |
| 4             | PAQUETE DE SEDIMENTOS ARENO ARCILLOSOS. 4 m  |
| 50            | MATERIALES CLASTICOS DEL TAMAÑO DE GRAVAS Y GRAVILLAS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA. 46 m                                |
| 90            | BOLEOS Y GRAVA, FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION, EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA- ARCILLOSA. 40 m              |
| 132           | TOBA CLASTICA POCO CONSOLIDADA, FRAGMENTOS DE ROCA DEL TAMAÑO DE GRAVAS Y GRAVILLAS, EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA. 42 m |
| 180           | MATERIALES CLASTICOS DEL TAMAÑO DE GRAVAS Y GRAVILLAS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA. 48 m                                |

|               |   |
|---------------|---|
| 240           | MATERIALES CLASTICOS DEL TAMAÑO DE GRAVAS, DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA. 60 m                   |
| 270           | BOLEOS Y GRAVAS, FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION, EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA- ARCILLOSA 30 m             |
| 289           | MATERIALES CLASTICOS DEL TAMAÑO DE GRAVILLAS, EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENO-ARCILLOSA. 19 m                               |
| 351           | BOLEOS Y GRAVAS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS Y CONSOLIDADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA. 62 m                               |
|               |   |
| Feria de León |   |
| 4             | SUELO, ARCILLOSO CON ALGUNOS FRAGMENTOS DE ROCA DE DIVERSA COMPOSICION. 4 m   |
| 58            | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA – ARCILLOSA. 54 m |
| 78            | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARCILLOSA. 20 m         |
| 154           | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 76 m  |
| 166           | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARCILLOSA. 12 m         |
| 236           | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 70 m  |

|     |  |
|-----|--|
| 244 | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARCILLOSA 8 m            |
| 318 | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 74 m |

### Descripción de los pozos utilizados en Perfil D-D'

|            |  |
|------------|--|
| El Junco   |  |
| 0 - 12     | BOLEOS RIOLITICOS                        |
| 12. - 16   | BOLEOS Y TOBA ALTERADA                   |
| 16 - 24    | TOBAS ARENOSAS                           |
| 24 - 36    | TOBA RIOLITICA ALTERADA                  |
| 36 - 50    | ARENAS SILICAS Y TOBA ALTERADA           |
| 50 - 96    | TOBA RIOLITICA                           |
| 96 - 108   | TOBA RIOLITICA ALTERADA                  |
| 108 - 138  | FONDO PERDIDO                            |
| 138 - 180  | TOBA RIOLITICA                           |
|            |  |
| Jaralillo  |  |
| 0 - 6      | BOLEOS Y ARCILLA                         |
| 6. - 22    | CALICHE Y TOBA                           |
| 22 - 48    | CALICHE                                  |
| 48 - 66    | ARCILLA PLASTICA                         |
| 66 - 82    | ARCILLA                                  |
| 82 - 180   | ARENAS Y GRAVILLAS Y BOLEOS INTERCALADOS |
| 180 - 200  | BOLEOS                                   |
|            |  |
| Santa Rita |  |
| 0 - 2      | MATERIAL ARCILLOSO Y TIERRA VEGETAL      |
| 2. - 8     | TOBAS                                    |
| 8. - 22    | TOBA RIOLITICA                           |
| 22 - 40    | BASALTO FRACTURADO CON POCA OXIDACION    |
| 40 - 74    | BASALTO                                  |

|                    |   |
|--------------------|---|
| 74 – 100           | RIOLITA FRACTURADA  |
|                    |   |
| Villas de San Juan |   |
| 100                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 100 m |
| 200                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 100 m |
| 224                | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ MAS ARCILLOSA 24 m      |
| 254                | ROCA VOCANICA DE TIPO ACIDO COMPUESTA POR RIOLITAS Y/O IGNIMBRITA, ALTERADA Y FRACTURADA. 30 m                            |
| 300                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 46 m  |
| 325                | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARCILLOSA 25 m          |
| 400                | FRAGMENTOS DE ROCA SUBANGULOSOS Y SUBREDONDEADOS DE DIVERSA COMPOSICION EMPACADOS EN UNA MATRIZ ARENOSA - ARCILLOSA 75 m  |
| 425                | FRAGMENTOS DE ROCA DE DIFERENTE COMPOSICION SUBREDONDEADOS Y SUBANGULOSOS EMPACADOS EN UNA MATRIZ MAS ARCILLOSA 25 m      |