

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA

EDICION 2018



**ANÁLISIS MAGNÉTICO DE DOS ÁREAS GEOTÉRMICAS
EN ARGENTINA Y EL SALVADOR**

PRESENTA: Lic. Antonella Laura Sottile

ASESOR: Lic. José Antonio Rivas

CIUDAD UNIVERSITARIA. Diciembre, 2018

INDICE

RESUMEN.....	3
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN	4
1-1.Introduccion	5
1-2.Objetivos	5
1-3.Ubicación de las áreas de estudio	6
CAPITULO 2: GEOLOGIA	8
2-1.Geologia regional.....	9
2-2.Litologia	9
2-2.Geologia estructural	11
CAPITULO 3: GEOFÍSICA.....	14
3-1.Principios teóricos	15
3-2. Adquisición de datos magnéticos	21
3-3.Procesamiento de datos	23
A-Correcciones	24
A-1.Corrección diurna	24
A-2.Remoción del IGRF	25
B-Cálculo de anomalías magnéticas	25
C-Filtrado de anomalías	27
C-1. Método de continuación analítica.....	28
C-2. Reducción al polo (RTP).....	34
3-5. Resultados.....	37
CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
REFERENCIAS	41

RESUMEN

Este Proyecto Final del Diplomado en Geotermia para América Latina, tiene como principal objetivo analizar mediante técnicas del método magnético, datos de dos áreas geotérmicas de interés en Argentina y El Salvador.

Para cumplir con dicho objetivo en una primera etapa se realizó una búsqueda de la información disponible de las áreas de estudio, organizando y analizando dicha información.

Se adquirieron datos magnéticos terrestres, de la base de datos de la empresa LaGeo correspondientes a un área de El Salvador y de la localidad de La Laja en la provincia de San Juan, Argentina. Estos últimos a utilizarse con fines académicos para la confección de una tesis doctoral.

Para el procesamiento de datos magnéticos se utilizaron los métodos clásicos de obtención de anomalías. Se aplicó la técnica de filtrado de Continuación analítica, para obtener mapas de anomalías residuales, y la técnica de Reducción al Polo (RTP) para analizar los datos.

Mediante la aplicación del filtro RTP, se logró correlacionar los resultados obtenidos, con los mapas geológicos-estructurales. Obteniéndose resultados favorables, con la localización de algunos rasgos geomorfológicos coincidentes con los mapeados en superficie.

Se observaron algunos posibles rasgos no mapeados, que se propone estudiarlos mediante otras técnicas geofísicas como gravimetría, para su corroboración. Así mismo en conjunto con estudios geológicos y geoquímicos. Siendo este trabajo un estudio preliminar, que se ampliará en el futuro.



CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1-1.Introducción

El método magnético es la técnica geofísica más antigua y una de las más ampliamente utilizadas para exploración del subsuelo terrestre. Esta es una herramienta relativamente fácil y económica, para aplicar a una gran variedad de problemas de exploración del subsuelo que involucran variaciones laterales de propiedades magnéticas en la corteza superior. Se emplea para localización de depósitos minerales, estudios de cuencas sedimentarias, en pozos de perforación, minas, submarinos y embarcaciones, estudios terrestres y observatorios, estudios aéreos con aviones y globos, transbordadores espaciales y satélites. Además el método es empleado en arqueología, investigaciones de ingeniería, exploración de recursos económicos, y estudios de rasgos y procesos tectónicos de la corteza **(Hinze et al., 2013)**.

Particularmente, las anomalías magnéticas son sensibles a propiedades físicas de las rocas como la susceptibilidad magnética, estructura cristalina y magnetización remanente. Estas propiedades físicas solo existen a temperaturas por debajo del umbral de magnetización conocido como Punto de Curie o Temperatura de Curie (573°C para la magnetita). Un cuerpo generador de anomalías magnéticas se encuentra en una profundidad de hasta 30-40 km en la corteza superior.

Esto último implica que la parte superior de la Corteza contiene en sus rocas, propiedades magnéticas que, al ser contrastadas con otros métodos y disciplinas, permiten conocer mejor la estructura cortical y la respuesta de los cuerpos allí emplazados.

Conocer la estructura cortical es de vital importancia en disciplinas como la Geotermia, ya que permite comprender sistemas geotérmicos de interés. En particular, en este proyecto se plantea estudiar dos zonas geotérmicas en Argentina y en El Salvador, en una primera instancia desde el punto de vista estructural.

El área geotérmica en Argentina es de baja entalpia y resulta de interés para usos directos, es además la zona de estudio del doctorado en Geofísica de la autora de este proyecto, cuyo tema de investigación se titula: *Estudio geofísico-geológico integrado para la determinación del sistema geotermal de La Laja, Departamento de Albardón, provincia de San Juan*. Por otro lado, el área de El Salvador es de alta entalpia y los datos fueron proporcionados por la empresa LaGeo con fines académicos.

Estudiar estas áreas geotérmicas es de gran interés, para lograr comprender sistemas geotérmicos en distintos países y fortalecer los conocimientos en el área de Geotermia. El propósito a largo plazo es estudiar energías renovables como la geotérmica y fortalecer la matriz energética mundial.

1-2.Objetivos

Este Proyecto Final, tiene como principal objetivo, analizar mediante técnicas del método magnético datos de dos áreas geotérmicas de interés en Argentina y El Salvador.

Los objetivos específicos son:

- 1- Obtener mapas de anomalías magnéticas a partir de la información disponible de las áreas.
- 2- Estimar anomalías residuales, que representen de la mejor manera aspectos geológicos.
- 3- Determinar lineamientos y estructuras a partir de métodos de filtrado.
- 4- Correlacionar los mapas de Reducción al Polo, con los mapas geológico-estructurales en las áreas de interés.

1-3.Ubicación de las áreas de estudio

La localidad de La Laja se ubica 25 km al norte de la ciudad de San Juan, $31^{\circ}20' S$ y $68^{\circ}28' W$ a una altura de 680 msnm, en el piedemonte suroriental de la sierra de Villicum, departamento Albardón. Provincia de San Juan, Argentina (**Figura 1**).

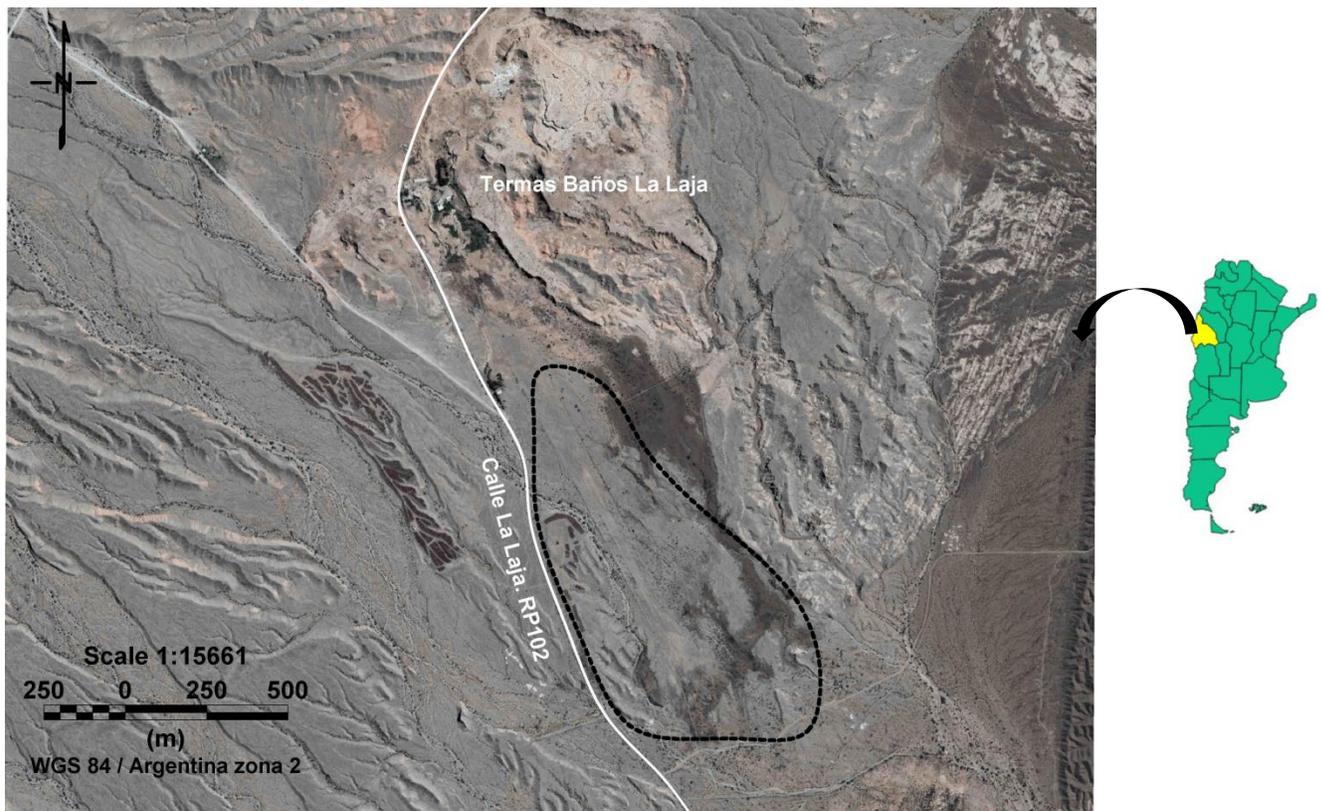


Figura 1. Mapa de ubicación del área geotérmica en La Laja. San Juan, Argentina. En negro se delimita el área estudiada.

Por otro lado, la siguiente figura muestra el área geotérmica de interés en El Salvador (**Figura 2**).

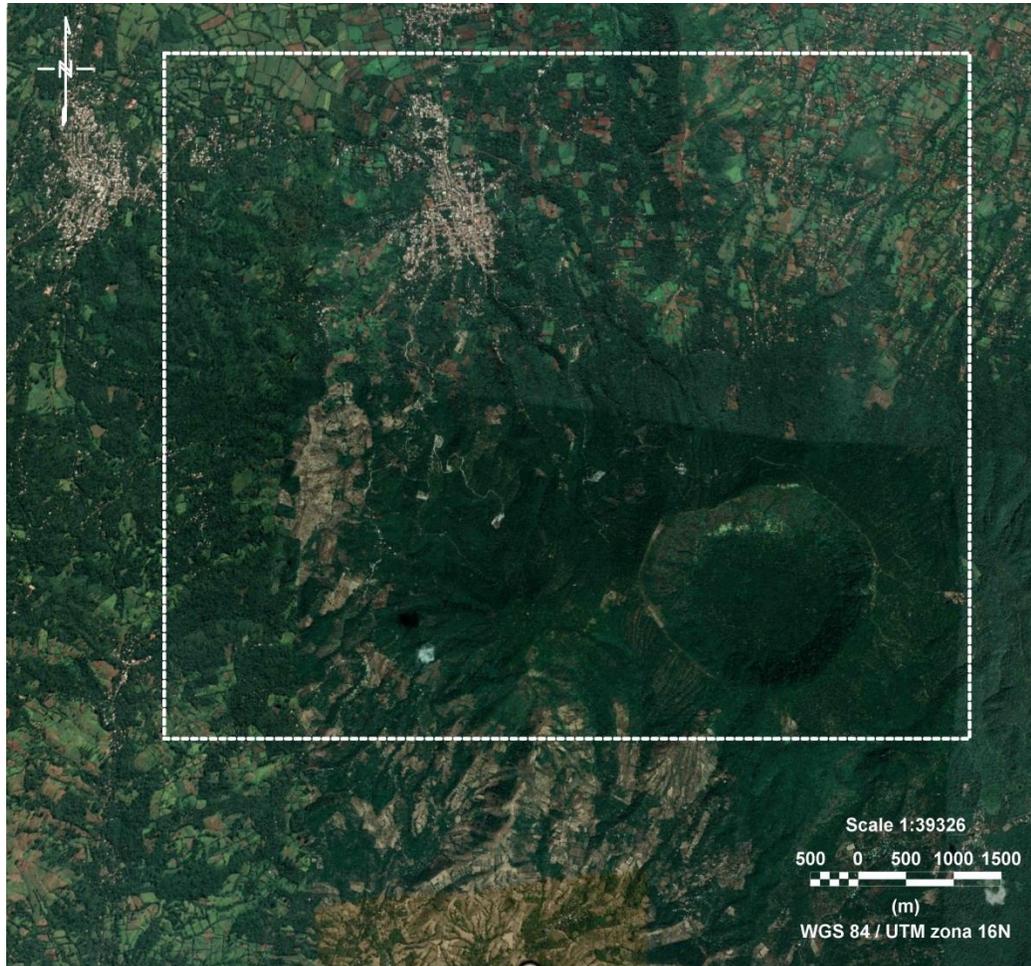


Figura 2. Área geotérmica de interés en El Salvador. En blanco se delimita la zona estudiada.



CAPITULO 2: GEOLOGIA

2-1.Geología regional

LA LAJA, SAN JUAN. ARGENTINA

Está área geotérmica se encuentra ubicada en el borde de subducción de las placas Nazca y Sudamericana (subducción de corteza oceánica a lo largo de un margen continental). Se encuentra en una zona de subducción conocida como “flat-slab pampeano”, la cual no solo es responsable por la presencia o ausencia de magmatismo, sino también de la evolución estructural del área. Otros factores, como las colisiones de dorsales sísmicas, tienen roles importantes en la deformación, actividad magmática, y formación de cuencas (**Ramos, 2009**).

En los “flat-slab” hay alta sismicidad y silencio volcánico, sin embargo, en el proceso de crecimiento de los Andes existieron períodos de intensa actividad volcánica que dejaron su impronta en los afloramientos de la Cordillera, Precordillera y Sierras Pampeanas.

EL SALVADOR

El vulcanismo en América Central resulta de la interacción de la triple convergencia de las placas de Norteamérica, Cocos y del Caribe. La placa oceánica de Cocos subduce por debajo de las placas continentales Norteamericana y del Caribe contribuyendo a que se forme el arco volcánico conocido como Cordillera Volcánica Centroamericana a lo largo de unos 1500 km desde Guatemala hasta Panamá. A escala global, el vulcanismo en esta cordillera forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico.

Los procesos geodinámicos producidos por el fenómeno de subducción de la placa de Cocos en dirección NE bajo la placa del Caribe, se reflejan en la tectónica y la geología estructural del istmo Centroamericano. La evidencia está en la concentración de volcanes activos en la región, generando una de las zonas de mayor densidad volcánica en el mundo (**Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador**)

2-2.Litología

LA LAJA, SAN JUAN. ARGENTINA

Esta área está dentro de la Carta geológica SAN JUAN 3169-IV (**Figura 3**). Dentro de esta zona se estudió a través del método magnético el área mostrada en la **Figura 4**.

En la zona se encuentran limolitas, areniscas y conglomerados. Depósitos continentales, de abanico aluvial, de planicie fluvial anastomosada, depósitos sinorogénicos de cuenca de antepaís, del terciario (**34, ver figura 4**). Depósitos aterrizados y caliche, fanglomerados con clastos calcáreos y cemento carbonático, depósitos de travertino, de pie de monte, del cuaternario-pleistoceno (**40, ver figura 4**). También se encuentran depósitos coluviales, fanglomerados, arenas, gravas y limos, del cuaternario-holoceno (**46, ver figura 4**), **SEGEMAR**.

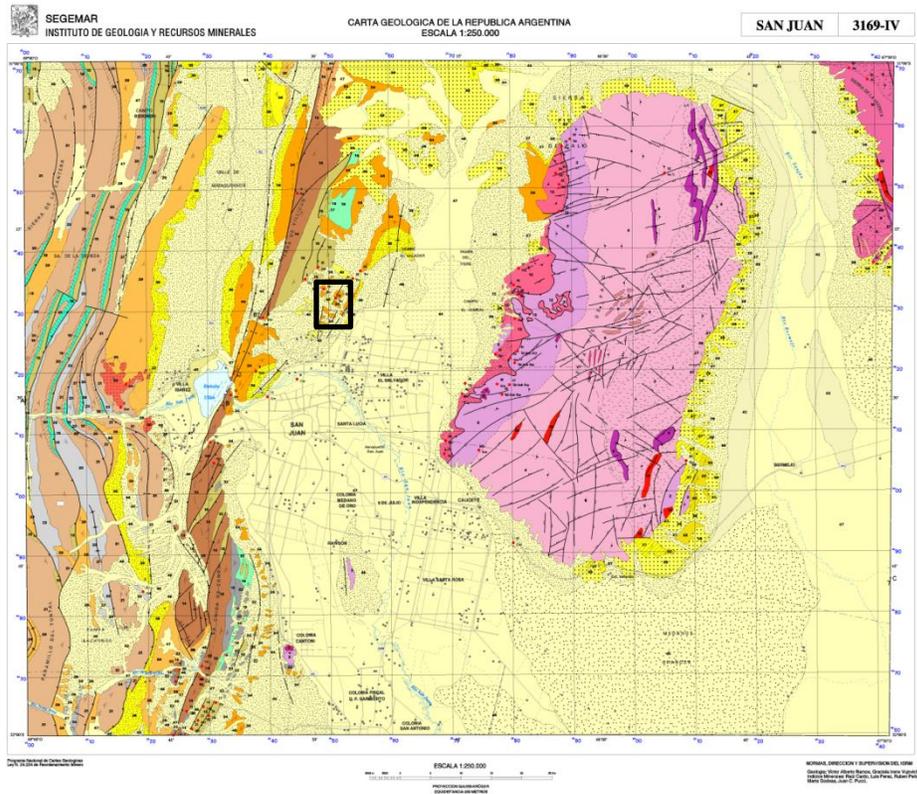


Figura 3. Carta geológica SAN JUAN 3169-IV. Escala 1: 250000. El rectángulo negro delimita la zona estudiada. Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

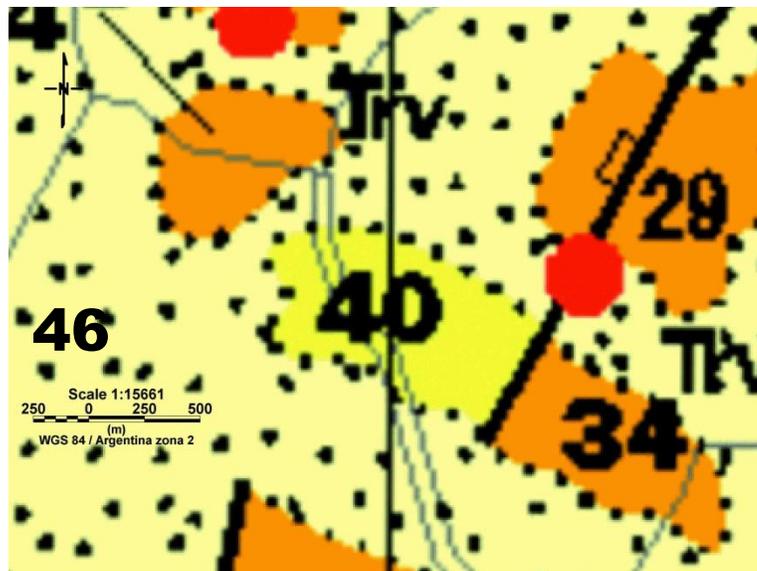


Figura 4. Mapa geológico de la zona estudiada. La Laja, San Juan. Argentina.

El Salvador

La mayor parte de El Salvador está cubierta por rocas de origen volcánico de carácter riolítico hasta basáltico. Existen formaciones volcánicas que se deben a vulcanismo individual. El carácter de las lavas producidas es basáltico y la mayoría de los productos piroclásticos son de carácter dacítico; existen también depresiones volcano-tectónicas. También se conocen productos piroclásticos de erupciones fisurales. El vulcanismo sur es más variado que el de la zona norte, sin embargo, en ambas zonas el tipo de estructura volcánica predominante es la de estrato-volcán (**Servicio geológico Nacional de El Salvador**).

2-2.Geología estructural

LA LAJA. SAN JUAN, ARGENTINA.

En esta región se encuentra un sistema de fallas que afecta a sedimentos aluviales y travertinos de edad cuaternaria que se disponen en el piedemonte suroriental de la Sierra de Villicum. La edad de los depósitos Cuaternarios está determinada a partir de registros fósiles de vertebrados encontrados en los bancos de travertino asignados al Pleistoceno tardío (**Contreras y Pontoriero, 1998**).

Bastias (1986) ubica la zona de fracturación de La Laja dentro del Sistema de Fallamiento Cuaternario Precordillera Oriental.

Las fallas son inversas de bajo ángulo en superficie, de rumbo submeridional que inclinan al este y sobreponen sedimentitas continentales de edad terciaria sobre depósitos aluviales del Cuaternario. El elevado control estructural de estas fallas modernas sobre la erosión permite el afloramiento, por lo general restringido a las zonas elevadas por fallas, de las sedimentitas continentales terciarias en forma de suaves lomeríos. Los estratos que forman estos lomeríos buzcan con ángulos variables hacia el este.

Las fallas poseen un rumbo promedio N 40° E, en general son coincidentes con la estratificación de las sedimentitas terciarias, en superficie inclinan aproximadamente entre 30° y 45° al este y afectan los distintos niveles de abanicos y travertinos presentes en el área. La longitud de las distintas secciones de falla reactivadas durante el Cuaternario varía de 6 a 8 km.

Se destacan en la zona de La Laja cuatro fallas denominadas, de este a oeste, La Laja 1, La Laja 2, La Laja 3 y La Laja 4 (**Figura 5**), cuyos escarpes se disponen en forma subparalela en el piedemonte oriental de la sierra de Villicum, poseen alturas variables desde pocos centímetros hasta algunas decenas de metros y se ubican a contrapendiente, con la cara libre de la escarpa hacia el oeste.

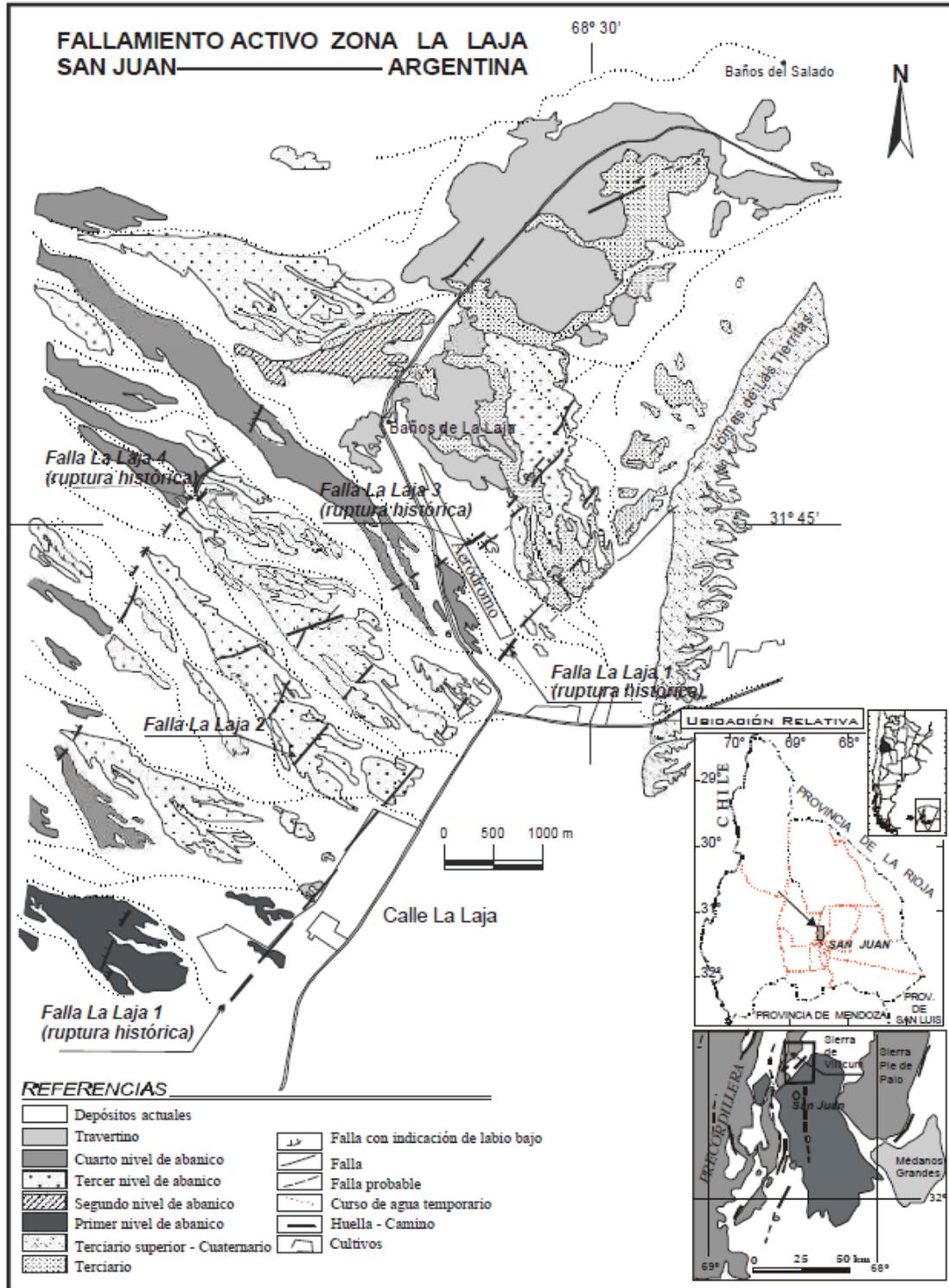


Figura 5. Áreas de Fallamiento en La Laja y rupturas históricas (Tomada de Perucca y Paredes, 2003).

EL SALVADOR

Los únicos elementos tectónicos que se conocen en el país son los de fractura, sin indicios de plegamientos.

Se conocen tres sistemas de debilidad tectónica, siendo el más importante el sistema tectónico con dirección ONO; se caracteriza por desplazamientos verticales considerables que atraviesan la República (**Servicio geológico Nacional de El Salvador**).

Un graben central se formó en toda América Central durante la época del Pleistoceno temprano debido a la subducción de la placa Cocos debajo de la placa Caribe. Aquella estructura, también llamada Fosa Central, atraviesa El Salvador con un rumbo ONO-ESE. Nuestra área de interés está localizada al este de este graben (**CEL, 1989**).



Figura 6. Mapa estructural de la zona estudiada. El Salvador.



CAPITULO 3: GEOFÍSICA

3-1.Principios teóricos

El método magnético es una de las técnicas geofísicas más ampliamente usada para exploración del subsuelo terrestre. Esta es una herramienta no invasiva ni contaminante, de fácil operación y relativamente poco costosa en comparación con otros métodos de exploración geofísicos. Debido a las bondades del método, éste es utilizado frecuentemente para resolver problemas de exploración del subsuelo, que involucran variaciones de propiedades magnéticas laterales dentro de la corteza superior. Estas variaciones causan anomalías en el campo magnético observado o medido sobre la superficie terrestre.

El método magnético es un método de exploración pasiva, ya que registra la Intensidad de Campo Magnético Total de la Tierra (TMI, por sus siglas en inglés). El campo geomagnético está siempre presente, pero varía tanto espacial como temporalmente. Estas variaciones enmascaran señales de corta longitud de onda causadas por unidades geológicas emplazadas en la corteza superior. Esta superposición de señales de diferente longitud de onda requiere aplicar un método de filtrado – a priori – de manera que puedan ser removidas las largas longitudes de onda de los datos observados y finalmente obtener un valor anómalo que responde a dichas unidades geológicas.

Por lo expresado anteriormente, una anomalía en el campo magnético de la Tierra se debe a una variación lateral en el momento magnético por unidad de volumen (magnetización) de los materiales en el subsuelo. Matemáticamente puede definirse como el vector resultante de una magnetización inducida dada por el producto de la susceptibilidad magnética (la aptitud de un material a ser magnetizado en presencia de un campo magnético externo) y la intensidad del campo magnético terrestre, así como cualquier magnetización remanente que contenga una roca debida a campos magnéticos previos (**Ecuación 1**).

$$M = s \cdot B + M_r$$

Ecuación 1

Dónde:

M = magnetización

s = susceptibilidad magnética

B = intensidad de campo magnético terrestre

M_r = magnetización remanente

s · B = M_i = magnetización inducida

El campo geomagnético puede ser considerado en primera aproximación como originado a partir de un dipolo geocéntrico. El campo principal aproximadamente coincide con el eje de rotación de la Tierra y es de naturaleza dipolar. Es comúnmente representado por líneas de campo a partir de un dipolo localizado en el centro de la Tierra, pero inclinado 10.9° del eje de rotación de la Tierra. El polo norte (N) o positivo de la aguja de la brújula apunta al polo sur o negativo del dipolo central de la Tierra y viceversa (**Figura 7**).

El campo geomagnético también exhibe una componente del campo principal no dipolar que se origina dentro del núcleo externo de la Tierra que está superpuesto sobre el campo dipolar. Las dimensiones de estos campos son medidos en miles de kilómetros, y ellos tienen magnitudes del orden del 10% del campo principal.

La porción más dominante del campo no dipolar se desvía hacia el oeste en un ritmo de aproximadamente $0.18^\circ/\text{año}$.

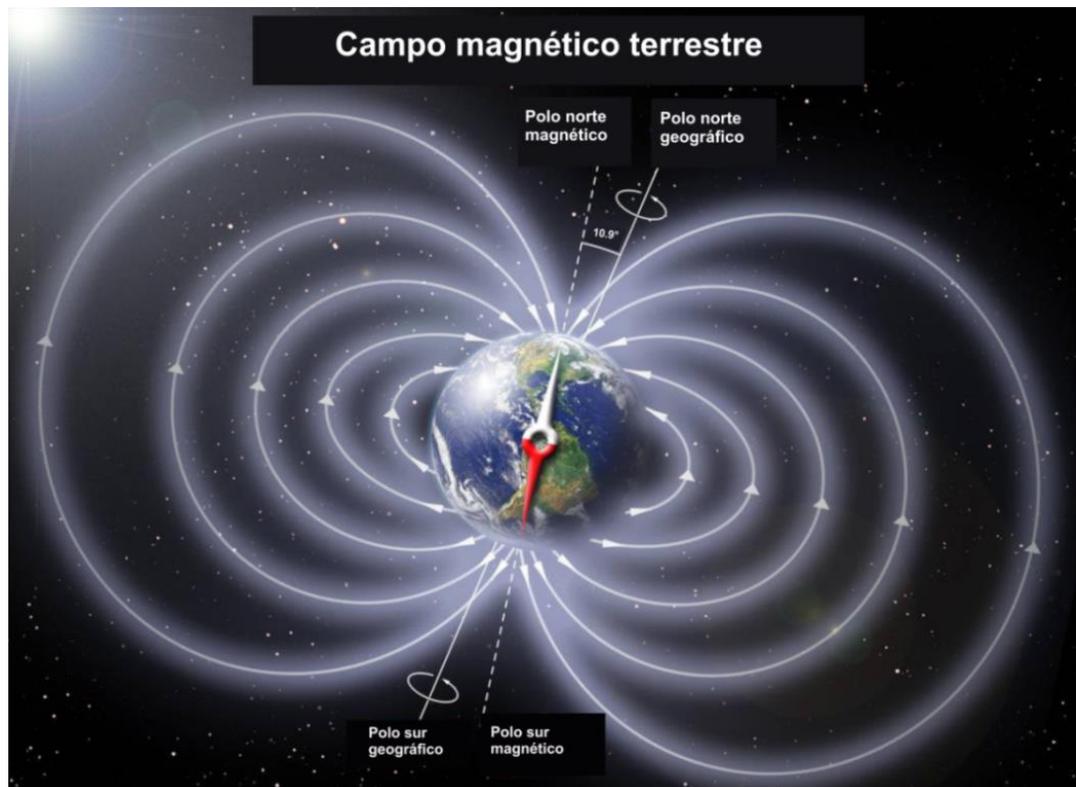


Figura 7. Campo magnético de la Tierra (Modificada de https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/Earths-magneticfieldlines-dipole.html).

El campo principal generado por corrientes electromagnéticas en el núcleo externo de la Tierra representa aproximadamente el 98% o más del TMI. Los campos externos altamente dinámicos debido a la interacción de los plasmas solares con el campo del núcleo contribuyen a la mayor parte del campo remanente. Superpuestos a los campos principal y externo están los efectos estáticos, relativamente menores, generados a partir de los contrastes de magnetización del subsuelo. Estos últimos son de interés en estudios de exploración para determinar las propiedades composicionales, estructurales y térmicas, y por lo tanto la historia de la corteza terrestre y manto superior.

Las principales componentes del campo magnético terrestre en latitudes medias se representan en la siguiente figura:

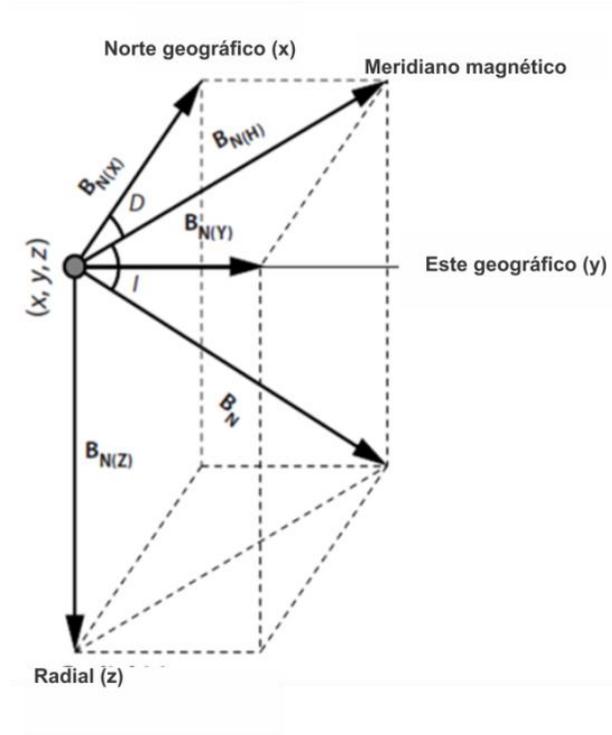


Figura 8. Componentes del campo normal en un punto de observación (x, y, z) (Modificada de Hinze et al. 2013).

Dónde:

I: Inclinación magnética

D: Declinación magnética

La intensidad del vector de campo normal, B_N , en sus componentes geomagnéticas está dada por la siguiente ecuación:

$$B_N = \sqrt{B_{N(H)}^2 + B_{N(Z)}^2} = \sqrt{B_{N(X)}^2 + B_{N(Y)}^2 + B_{N(Z)}^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

La base teórica del método magnético se deriva de La ley de Coulomb, que establece que la atracción entre polos magnéticos es una función directa del producto de la magnitud de los polos e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre sus centros. La fuerza es de atracción entre polos magnéticos opuestos, o de repulsión entre tales polos cuando son de igual signo (Figura 9; ecuación 3).

La fuerza magnética no puede ser determinada independientemente de la propiedad fundamental de la magnitud del polo. Por lo tanto, una cantidad más útil es el campo magnético, B, el cual es la fuerza sobre unidad de polo (**ecuación 4**).

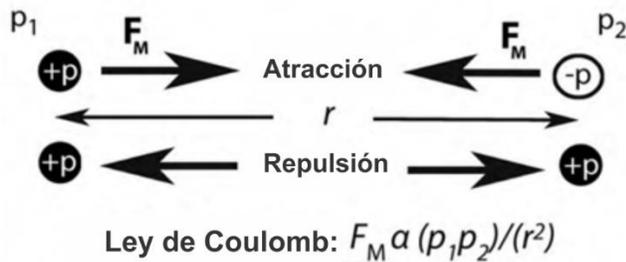


Figura 9. Fuerzas magnéticas atractivas o repulsivas (F_M) generadas entre dos polos magnéticos dadas por la Ley de Coulomb (**Modificada de Hinze et al. 2013**).

$$F_M = C_m \frac{p_1 p_2}{r^2}$$

Ecuación 3

Dónde: p_1 y p_2 son polos magnéticos puntuales y r es la distancia entre ellos. C_m es una constante magnética que depende de las unidades usadas en la formulación.

$$B = \frac{F_M}{p_1} = \frac{C_m p_2}{r^2}$$

Ecuación 4

Dónde: p_1 es un polo unidad ficticio en un punto del espacio donde B está especificado. Se asume que $p_2 \gg p_1$ entonces p_1 no afecta el campo B .

Datos de observatorios en combinación con observaciones geomagnéticas a partir de satélites desde la temprana década de 1960 revelan que el campo magnético dipolar principal de la Tierra está distorsionado en una forma como cometa (**Figura 10**) llamada magnetosfera. El flujo de la radiación corpuscular o plasma desde el Sol, llamado viento solar, causa que el campo principal sea comprimido hacia la Tierra en la dirección del Sol y extendido hacia el espacio en la posición opuesta. La magnetopausa es el límite entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra. Los plasmas son neutros eléctricamente y contienen partículas cargadas positivamente y negativamente.

Para la mayoría de los propósitos de exploración la magnitud del campo magnético, es medida ya sea en un modo direccional donde el sensor es orientado espacialmente o un modo no direccional donde el sensor obtiene mediciones de campo total que se presumen que son colineales con el campo magnético terrestre.

La mayor parte de los estudios magnéticos en terreno, marinos y aéreos, sin embargo, observan la intensidad de campo total más simple (B_T) usando sensores no orientados. Interpretando la observación de campo total (B_T) para la intensidad anómala (ΔB_T) a partir de la variación en la

magnetización se asume que la anomalía ΔB_T perturba el campo principal de la Tierra B_N solo en su dirección principal, entonces se mantiene la simple relación escalar (**ecuación 5**).

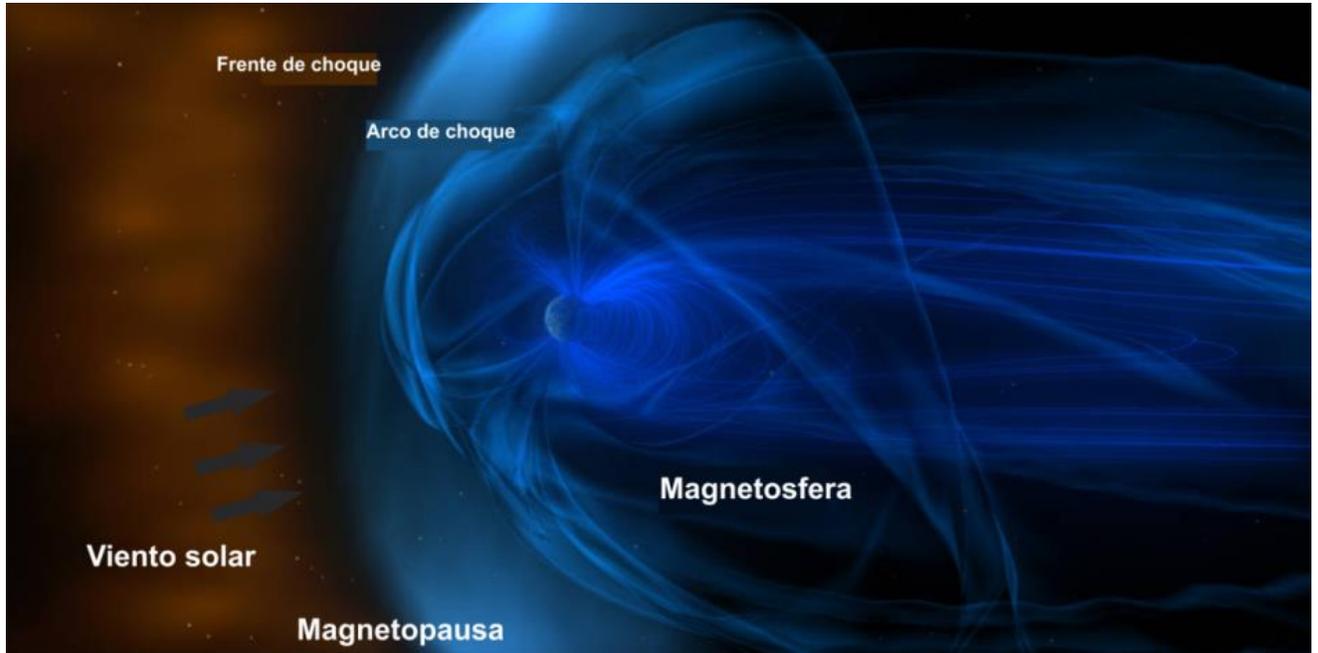


Figura 10. Magnetosfera alrededor de la Tierra. (Modificada de <https://www.nasa.gov/content/goddard/heliospheric-current-sheet>).

En general, el campo total (B_T) es la suma vectorial del campo principal (B_N) y la anomalía (ΔB_T) entonces la intensidad del campo total escalar medido está dada por la **ecuación 6**.

$$\Delta B_T = B_T - B_N \tag{Ecuación 5}$$

$$B_T = \sqrt{B_N^2 + \Delta B_T^2} \tag{Ecuación 6}$$

La componente de interés en exploración geofísica es derivada a partir de variaciones horizontales en la magnetización de la litosfera, la capa más externa de la tierra, que posee un comportamiento mecánico rígido y se extiende aproximadamente 150 km desde la superficie, abarcando la corteza y las porciones más externas del manto (**Figura 6**). La corteza es la fuente primaria de esta componente porque las rocas del manto tienen la característica de poseer pocos minerales magnéticos.

Particularmente, las anomalías magnéticas son sensibles a propiedades físicas de las rocas como la susceptibilidad magnética, estructura cristalina y magnetización remanente. Estas propiedades físicas solo existen a temperaturas por debajo del umbral de magnetización conocido como Punto de Curie o Temperatura de Curie (573°C para la magnetita). Un cuerpo generador de anomalías magnéticas se encuentra en una profundidad de hasta 30-40 km en la corteza superior.

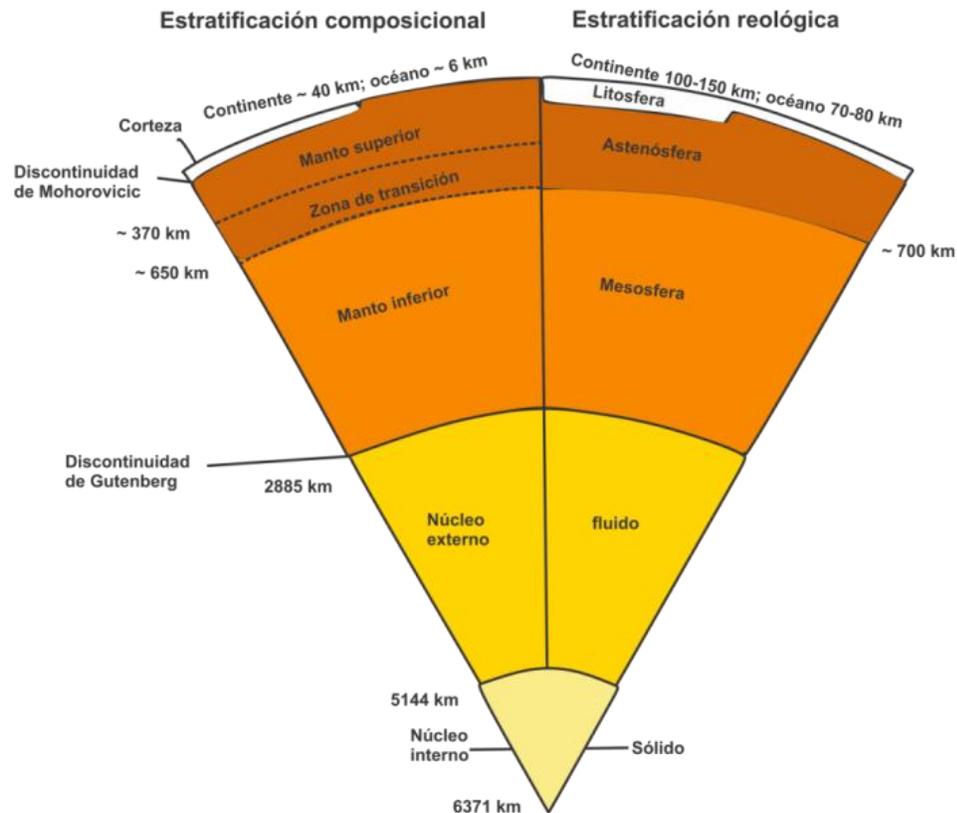


Figura 11. Sección de un segmento de la Tierra que muestra las principales subdivisiones internas en composición y propiedades mecánicas o reológicas (**Modificada de Hinze et al. 2013**).

El campo geomagnético sufre cambios debido a variaciones seculares a largo plazo que se originan en el núcleo exterior. También se ve afectado por variaciones temporales que abarcan una amplia gama de períodos debido a corrientes eléctricas ionosféricas causadas por radiación electromagnética solar y corpuscular, así como por efectos de las mareas.

En particular, la variación diurna resulta del campo magnético inducido por el flujo de partículas cargadas dentro de la ionósfera que se dirigen hacia el polo magnético, los patrones de circulación como así también las variaciones diurnas están relacionadas con el efecto de mareas del Sol y la Luna.

Cada media década desde 1965 un Campo de Referencia Geomagnético Internacional (IGRF) ha sido computado y adoptado internacionalmente. El cálculo se realiza en base a registros de observatorios magnéticos y mediciones de prospección, que desde años recientes incluye observaciones del campo de la Tierra a partir de satélites. El IGRF representa una mejor aproximación que ajusta el campo mediante una serie de armónicos esféricos de grado creciente. Armónicos superiores al grado 13, aproximadamente 3100 km y más largo en la superficie de la

Tierra, son representativos del campo generado por el núcleo, mientras que los grados más altos están relacionados con anomalías de magnetización litosférica. Cada 5 años un Campo de Referencia Geomagnético Definitivo (DGRF) es calculado teniendo en cuenta una aproximación a la variación secular real que ha sido observada en la época anterior.

Aplicaciones exitosas del método magnético requieren el entendimiento de sus principios básicos, y una cuidadosa adquisición, procesamiento e interpretación de los datos.

La fase de planificación de un estudio magnético involucra definir el rango de anomalías características las cuales son anticipadas a partir de las fuentes de interés y la naturaleza del ruido anómalo esperado que interfiere con la identificación y análisis de anomalías de interés. Todas las decisiones sobre el patrón, densidad de observaciones, instrumentación, procesamiento y procedimiento interpretacional, se basan en estas anomalías y ruidos característicos teniendo en cuenta las consideraciones de costo/beneficio del estudio.

El paso siguiente luego de la adquisición es el procesamiento de los datos, que involucra la reducción de estos a una forma interpretable mediante la eliminación de todos los efectos magnéticos predecibles, dejando solo los efectos magnéticos residuales de las fuentes desconocidas del subsuelo. Esto se realiza comparando los datos observados con el modelo teórico del campo geomagnético en cada sitio de observación y removiendo las variaciones temporales diurnas en el campo de la Tierra. Además, el procesamiento involucra el aislamiento o mejoramiento de las anomalías de interés para que puedan ser identificadas y analizadas.

Una vez obtenidas las anomalías, luego de efectuar las correcciones, la siguiente etapa es la interpretación de las anomalías de interés. Esta puede ser simplemente una cuestión de identificar la localización de las fuentes específicas, pero comúnmente incluye una interpretación cuantificada que involucra inversión de las anomalías seleccionadas para conocer parámetros de sus fuentes causativas. Este proceso de inversión es inherentemente ambiguo, pero el rango de fuentes posibles generalmente es limitado por incorporación de otros datos geológicos y geofísicos dentro del análisis. Finalmente, el modelo físico de la inversión es convertido en términos geológicos (**Hinze et al., 2013**).

Los métodos potenciales magnéticos y gravimétricos pueden relacionarse de manera tal que los datos magnéticos podrán ser transformados en pseudogravimétricos a través de la relación de Poisson. Una buena correlación entre ambas anomalías indicaría que una misma fuente posee un contraste alto de densidad generando una anomalía de gravedad y, además, tiene un alto contraste de susceptibilidad magnética. Esta suposición permite descartar magnetización remanente, y permite mayor definición en la interpretación (**Estrada, 2009**).

3-2. Adquisición de datos magnéticos

Se cuenta con un total de 1469 puntos de mediciones magnéticas en La Laja (**Figura 12**) y 973 puntos medidos en el área de El Salvador (**Figura 13**). Estas mediciones fueron realizadas a lo largo de perfiles que atraviesan perpendicularmente las estructuras de interés y tienen una precisión de +/- 0,1 nT.

En el área geotérmica de La Laja se utilizaron dos magnetómetros de campo total, GSM 19 V7 Overhauser de la marca GEM SYSTEMS (sensibilidad 0.022 nT, rango de medición 20000 to 120000 nT). El magnetómetro móvil equipado para medir en modo continuo, tomó mediciones a lo largo de cuatro perfiles completando una longitud aproximada de 6 km. Por otro lado, el magnetómetro de base fue configurado para registrar la intensidad del campo magnético total cada 30 segundos durante varios días.

En el caso de las mediciones efectuadas en El Salvador, se utilizó el mismo tipo de magnetómetro que en La Laja. Las mediciones fueron realizadas cada 50 m, en líneas con separación de 250 m entre ellas. El magnetómetro de base es de idénticas características, habiéndose tomado las lecturas con un intervalo de muestreo de 2 minutos.

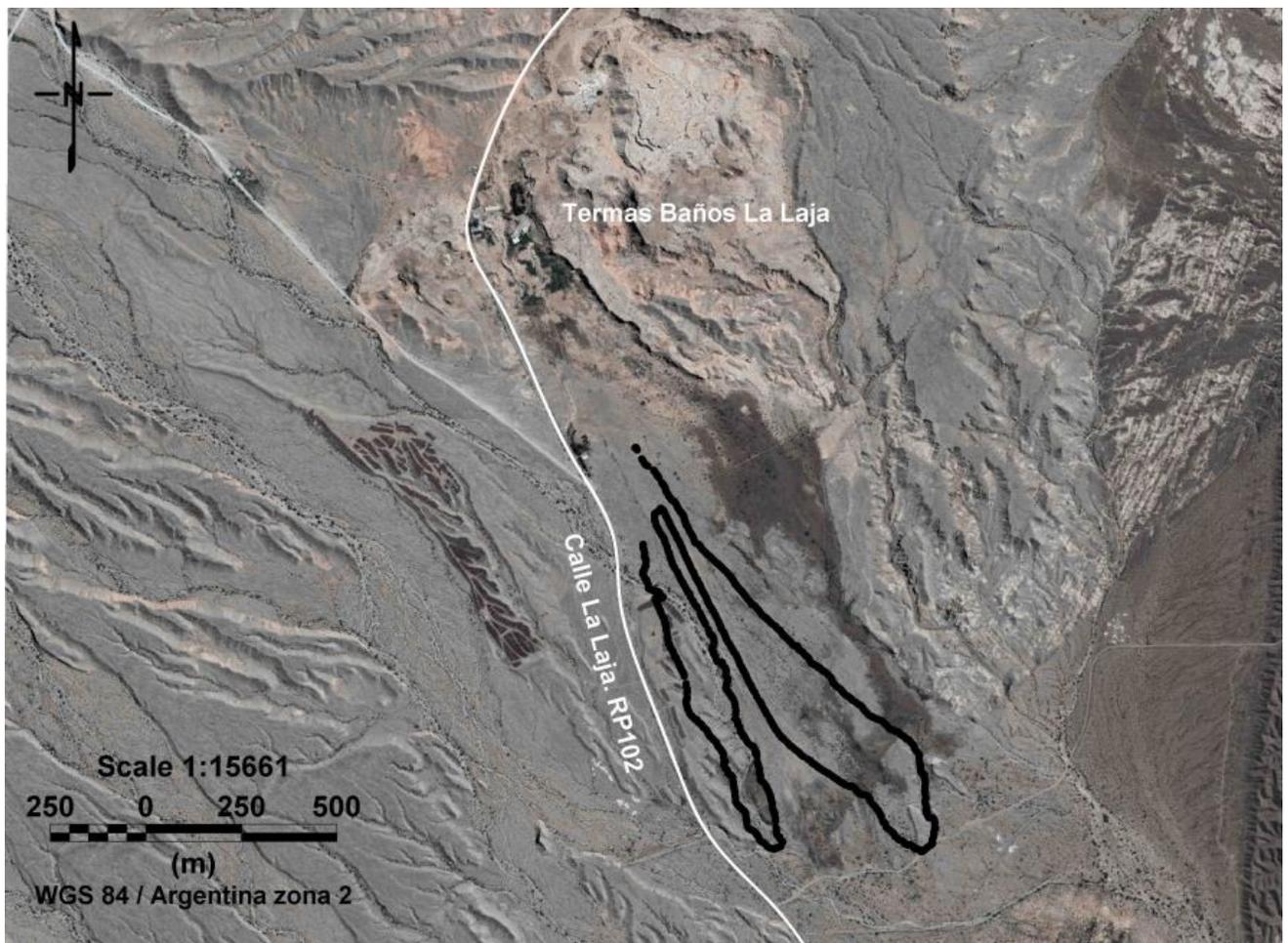


Figura 12. Datos magnéticos adquiridos en La Laja. San Juan, Argentina. En negro se representa la trayectoria de medición.

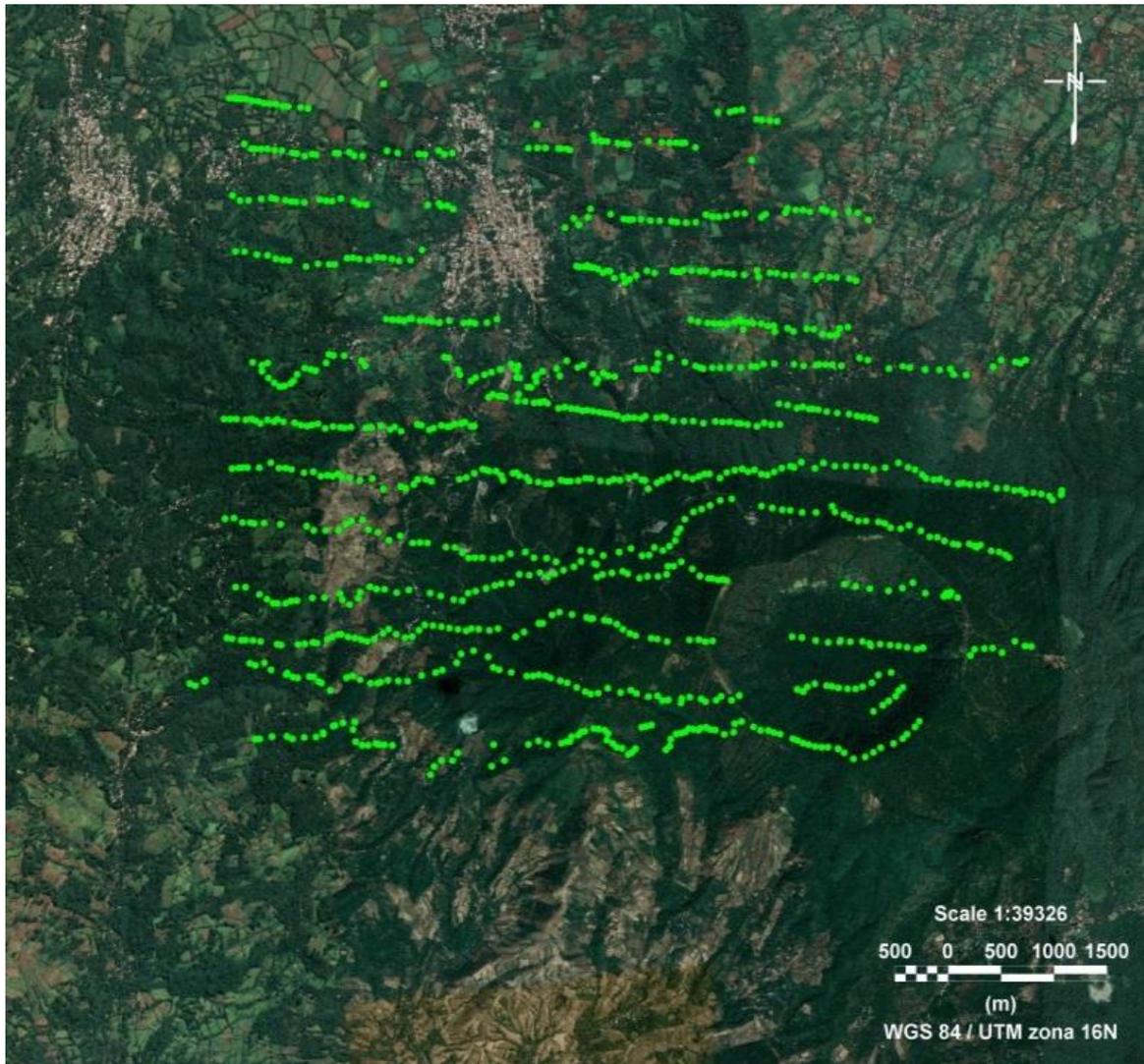


Figura 13. Datos magnéticos adquiridos en El Salvador. En verde se representan los puntos de medición.

3-3. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se utilizó el software Oasis Montaj. El procesamiento de los perfiles magnéticos incluyó la corrección magnética diurna y remoción del IGRF (Campo Geomagnético Internacional de Referencia). Se utilizaron los métodos clásicos de obtención de anomalías. Se aplicó técnica de filtrado Continuación analítica para obtener mapas de anomalías residuales y la técnica de filtrado de Reducción al polo para analizar los datos.

A-Correcciones

A-1. Corrección diurna

Como se explicó anteriormente, existen distintas variaciones que sufre el campo geomagnético, por lo que deben aplicarse correcciones de distinta magnitud a los datos observados. En este sentido, la variación solar tiene un período de 24 horas solares, alcanzando amplitudes de entre 20 y 100 nT en el Ecuador Magnético. La variación lunar (período de 24 horas lunares) solo es del orden de 1 nT por lo cual la variación diurna se refiere principalmente a la componente solar diaria. La variación diurna es mayor en las regiones ecuatoriales, incluyendo un cambio estacional, de modo que es más importante en verano.

La variación diurna resulta del campo magnético inducido por el flujo de partículas cargadas dentro de la ionósfera que se dirigen hacia el polo magnético, los patrones de circulación como así también las variaciones diurnas están relacionadas con el efecto de mareas del Sol y la Luna.

En los períodos de calma solar el campo magnético es casi constante durante las noches, pero disminuye entre el amanecer y alrededor de las 11 a.m., luego incrementa hasta alrededor de las 4 p.m. y disminuye lentamente durante la noche (**Figura 14**). Los picos máximos de intensidad del campo magnético en las latitudes medias son de unas pocas decenas de nT (**Sánchez et al., 2016**).

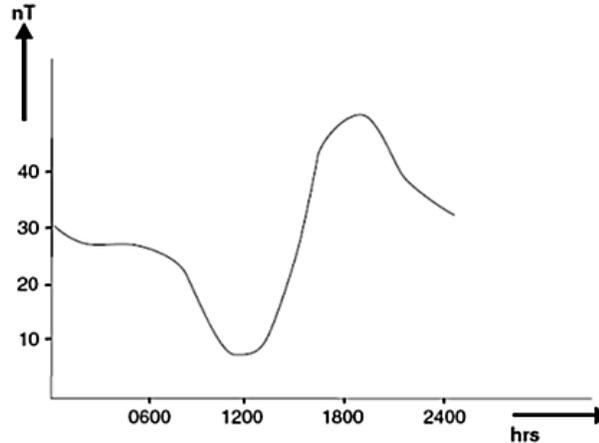


Figura 14. Variación típica del campo magnético en latitudes medias en días calmos (Tomada de Sánchez et al., 2016).

Para efectuar la corrección diurna se requiere conocer el comportamiento del campo geomagnético de manera continua, en la región de medición. Con el magnetómetro cerca de la zona de estudio, los datos son almacenados junto con la hora y la fecha. Esta corrección será de signo opuesto a la variación diurna calculada.

A-2. Remoción del IGRF

Cada grilla de TMI (Total Magnetic Intensity) fue corregida por IGRF, para su fecha de medición y por localización de cada dato.

Se utilizaron los coeficientes del desarrollo en armónicos esféricos del quinquenio IGRF 2005 para el caso de los datos de El Salvador y 2015 para el caso de La Laja, hasta grado y orden 10 del campo principal, a través del módulo IGRF GX del software Oasis Montaj. Los términos de grado inferior representan en gran medida el campo principal proveniente del núcleo externo (**Peddie, 1982; Hinze et al., 2013**).

B-Cálculo de anomalías magnéticas

El cálculo de las anomalías magnéticas de campo total ΔT se efectuó por las expresiones clásicas para estudios regionales (**ecuación 7**):

$$\Delta T = T_0 + C_{am} - T_t$$

Ecuación 7

Dónde:

T_0 : Es el campo magnético total observado $T_0 = T + dT_0$

T_t : Es la componente total teórica (campo magnético de origen interno, IGRF).

T : Es la componente total absoluta.

dT_0 : Es la variación de la componente total incluida la variación diurna.

C_{am} , corrección por altura y masa (*por su baja incidencia, ha sido despreciada*).

Al sustraer el campo normal al valor TMI observado, se obtuvieron anomalías magnéticas a partir del método de Mínima Curvatura (**Briggs, 1974**). Las anomalías magnéticas obtenidas para cada área de estudio se presentan en las **Figuras 15 y 16**.

En el caso del mapa de anomalías magnéticas de La Laja, observamos valores que rondan entre -22 nT y 36 nT. Por otro lado, en el mapa de anomalías magnéticas de la región de El Salvador, los valores están en un rango entre -1436.6 nT y 2273.1 nT. Es interesante destacar que en la zona de La Laja se observa un importante contraste en las anomalías, que puede estar relacionado con el gran fracturamiento que presenta la zona.

Por otro lado, en el área de El Salvador, se observan zonas muy diferenciadas, de alto contraste. Esto último puede estar relacionado con contrastes de temperaturas en el área, siendo los mínimos magnéticos posibles zonas de alta temperatura, donde los minerales magnéticos comienzan a desmagnetizarse. Esto lo podemos inferir debido a que esta área se ubica en una zona volcánica, con altas temperaturas.

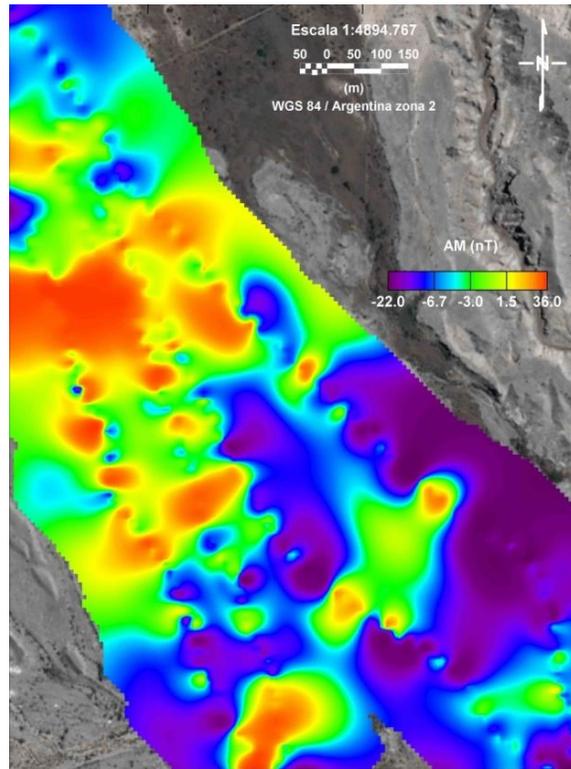


Figura 15. Mapa de anomalías magnéticas de La Laja. San Juan, Argentina.

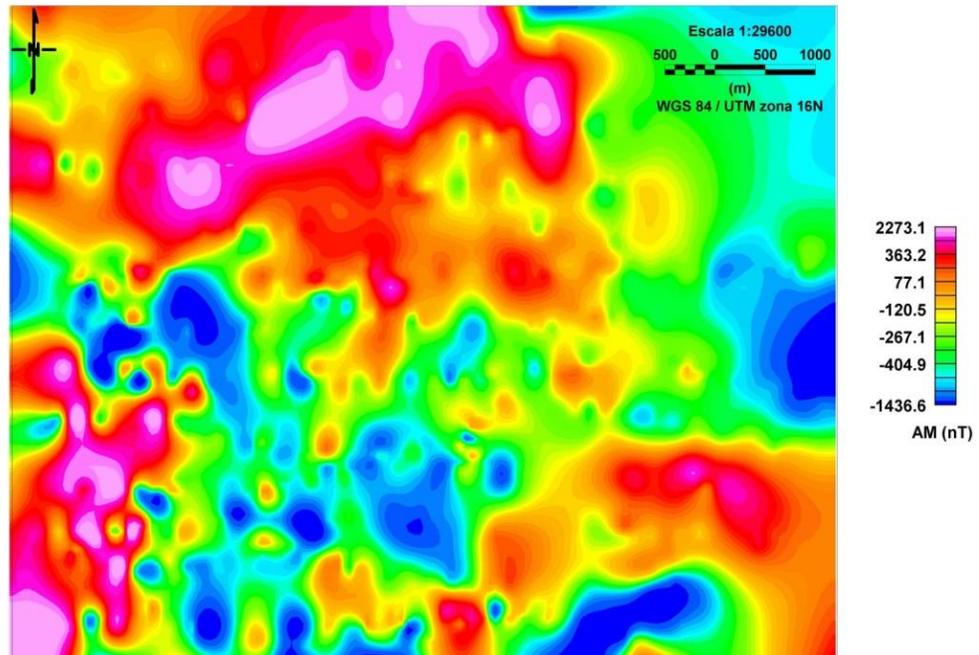


Figura 16. Mapa de anomalías magnéticas del área geotérmica de interés en El Salvador.

C-Filtrado de anomalías

Los valores de campo magnético medidos y reducidos adecuadamente se disponen luego en un mapa (o perfil), obteniéndose así una representación gráfica de las anomalías.

Al evaluar estos mapas resulta necesario recordar que ellos describen un campo potencial, por lo que dos características importantes de los campos potenciales son:

- El campo observado en cualquier punto representa la suma de efectos de todas las fuentes en el subsuelo detectables por el método geofísico, el instrumental empleado y el diseño del levantamiento.
- Un número infinito de configuraciones de distintas fuentes en el subsuelo pueden proporcionar los mismos resultados en superficie.

Los mapas de anomalías muestran entonces la superposición de varios efectos: los rasgos estructurales profundos causan variaciones de gran longitud de onda, con un gradiente horizontal suave y gradual, y de carácter regional. Este efecto regional suele enmascarar los efectos debidos a estructuras geológicas de reducida extensión o someras, de carácter local, y con gradientes horizontales más abruptos.

Una anomalía magnética está compuesta por una componente regional (debido a fuentes profundas) y una componente residual (debido a fuentes someras) (**Ecuación 8 y Figura 17**)

La separación del campo medido en sus componentes regional (A_{reg}) y residual (A_{res}) se logra utilizando técnicas de filtrado.

$$A_o = A_{reg} + A_{res}$$

Ecuación 8

Dónde:

A_o : anomalía observada

A_{reg} : anomalía regional

A_{res} : anomalía residual

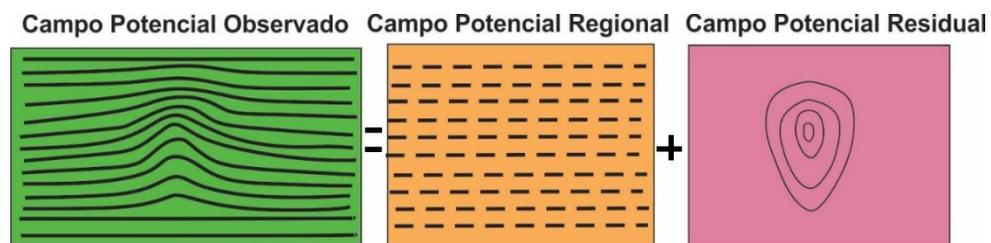


Figura 17. Campo potencial observado como suma de efectos Regional y Local.

Algunos métodos para filtrado de anomalías se explican a continuación.

C-1. Método de continuación analítica

Este método permite obtener anomalías residuales prolongando un campo potencial (de gravedad o magnético) a una altura distinta de la cota del punto de observación en el dominio frecuencial. Este método suele aplicarse con el objetivo de identificar diferentes longitudes de onda para ser separadas.

La continuación analítica ascendente consiste en calcular el campo potencial a una altura h constante sobre la superficie de medición (Dean, 1958; Pacino e Introcaso, 1987; Miranda e Introcaso, 1999). El método realiza una transformación del campo potencial medido sobre una superficie, al campo que sería medido sobre otra superficie más alejada de la fuente. Esta transformación atenúa las anomalías de corta longitud de onda, es decir suaviza el efecto de cuerpos superficiales o de corta longitud de onda.

La continuación analítica ascendente se calculó a partir de integrales de convolución que se resolvieron en el dominio de las frecuencias espaciales mediante el programa FF2CON CNUP del menú de programas integrados MAGMAP (Oasis Montaj). El filtro L (Ecuación 9 y Figura 18) es:

$$L(h) = e^{-hr} \tag{Ecuación 9}$$

Dónde:

h : Distancia de la continuación relativa al plano de observación.

r : Número de onda en radianes por unidad de longitud ($r = 2\pi k$), con k ciclos/unidad de longitud.

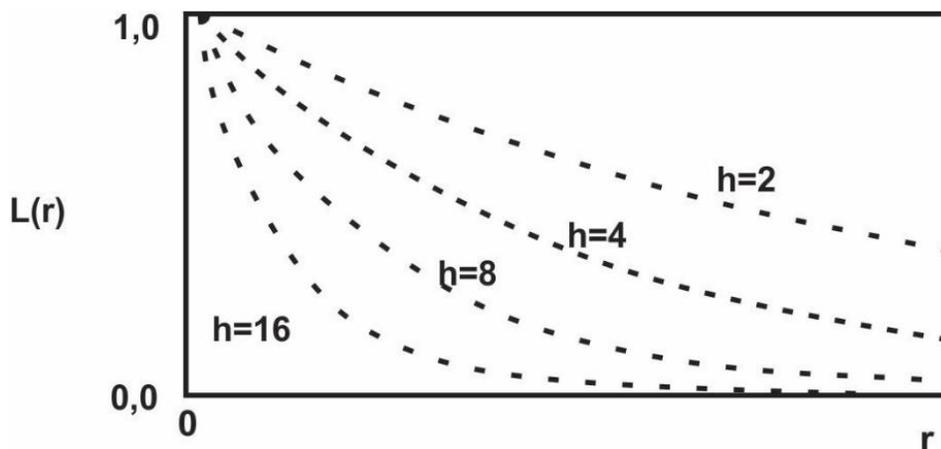


Figura 18. Relación del filtro de continuación analítica ascendente en función de la distancia al plano de observación.

En las **Figuras 19-24** se presentan los mapas de anomalías regional y residual para cada zona. Estos mapas se obtuvieron luego de aplicar la técnica de continuación analítica ascendente, para distintas alturas y sustraer de la grilla de anomalía magnética total la componente regional, para obtener las anomalías residuales.

Los mapas de anomalías regionales son una representación de los efectos causados por cuerpos profundos, observándose mayores longitudes de onda en las anomalías, respecto a los mapas de anomalías residuales. Estas últimas representan efectos de los cuerpos más someros y son de especial interés, ya que nos permiten conocer las características geofísicas de los cuerpos más superficiales de la corteza terrestre.

En el caso de La Laja, se efectuaron continuaciones analíticas ascendentes para las alturas 50, 100 y 200m (**Figuras 19, 20 y 21**), exhibiendo similitudes en todos los casos. Los mapas de anomalías regionales muestran valores que rondan entre -14 nT y 6 nT. Por otro lado, en los mapas de anomalías residuales los valores rondan entre -16 nT y 30 nT.

En el caso del área en El Salvador, los ensayos se hicieron para las alturas 500, 1000 y 1500m, los mapas de anomalías regionales muestran valores que rondan entre -500 nT y 600 nT. Por otro lado, en los mapas de anomalías residuales los valores rondan entre -1300 nT y 1600 nT. **Figuras 22, 23 y 24.**

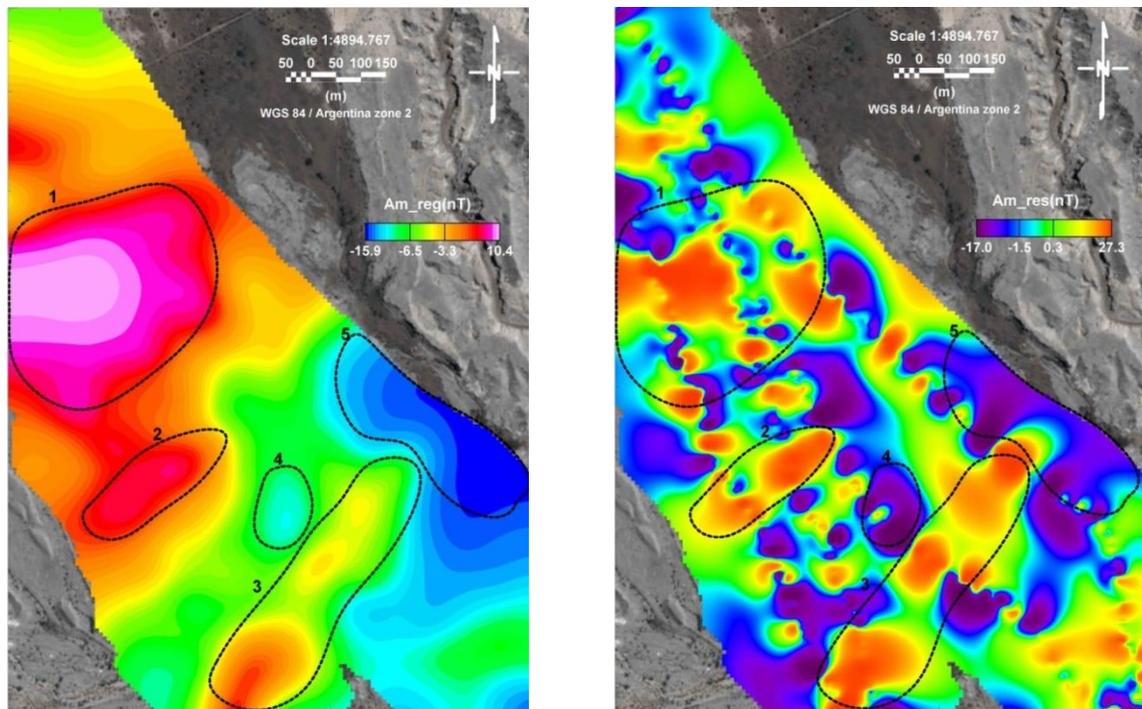


Figura 19. Izquierda: Mapa de anomalías magnéticas regionales, $h=50m$, **derecha:** anomalías magnéticas residuales. La Laja. San Juan, Argentina. Las líneas negras delimitan zonas coincidentes en ambos mapas, observándose máximos en 1, 2 y 3, y mínimos en 4 y 5.

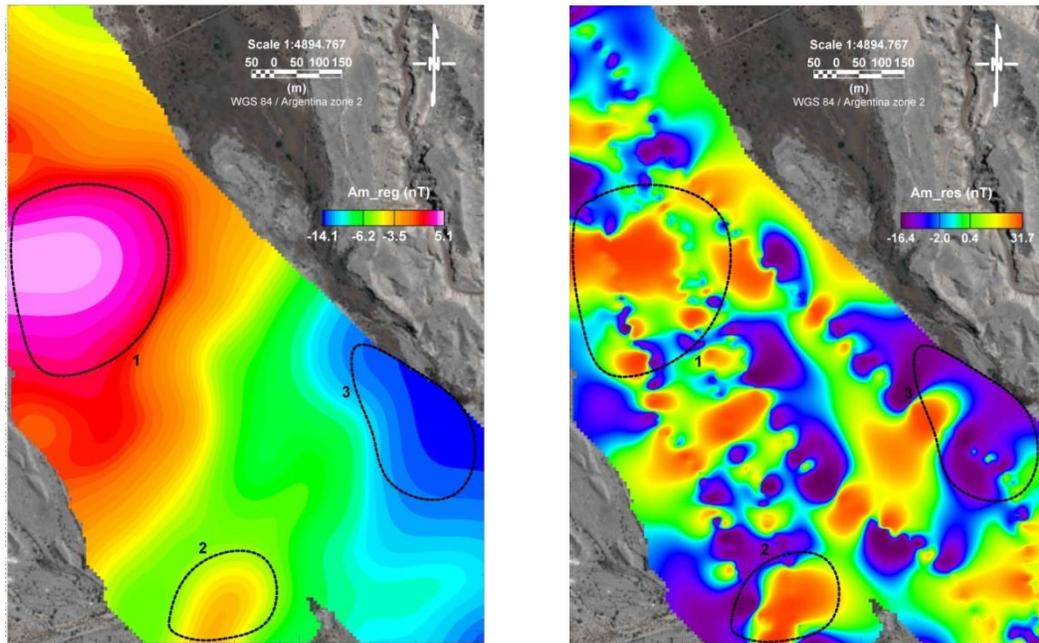


Figura 20. Izquierda: Mapa de anomalías magnéticas regionales, $h=100m$, derecha: anomalías magnéticas residuales. La Laja. San Juan, Argentina. Las líneas negras delimitan zonas coincidentes en ambos mapas, observándose máximos en 1 y 2 y un mínimo 3.

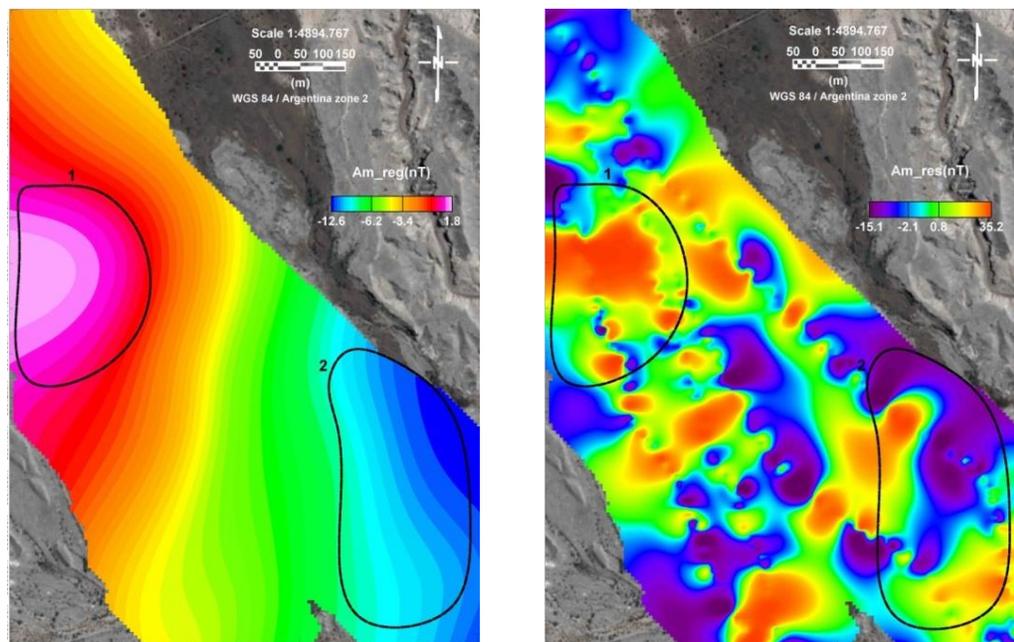


Figura 21. Izquierda: Mapa de anomalías magnéticas regionales, $h=200m$, derecha: anomalías magnéticas residuales. La Laja. San Juan, Argentina. Las líneas negras delimitan zonas coincidentes en ambos mapas, observándose un máximo en 1 y un mínimo en 2.

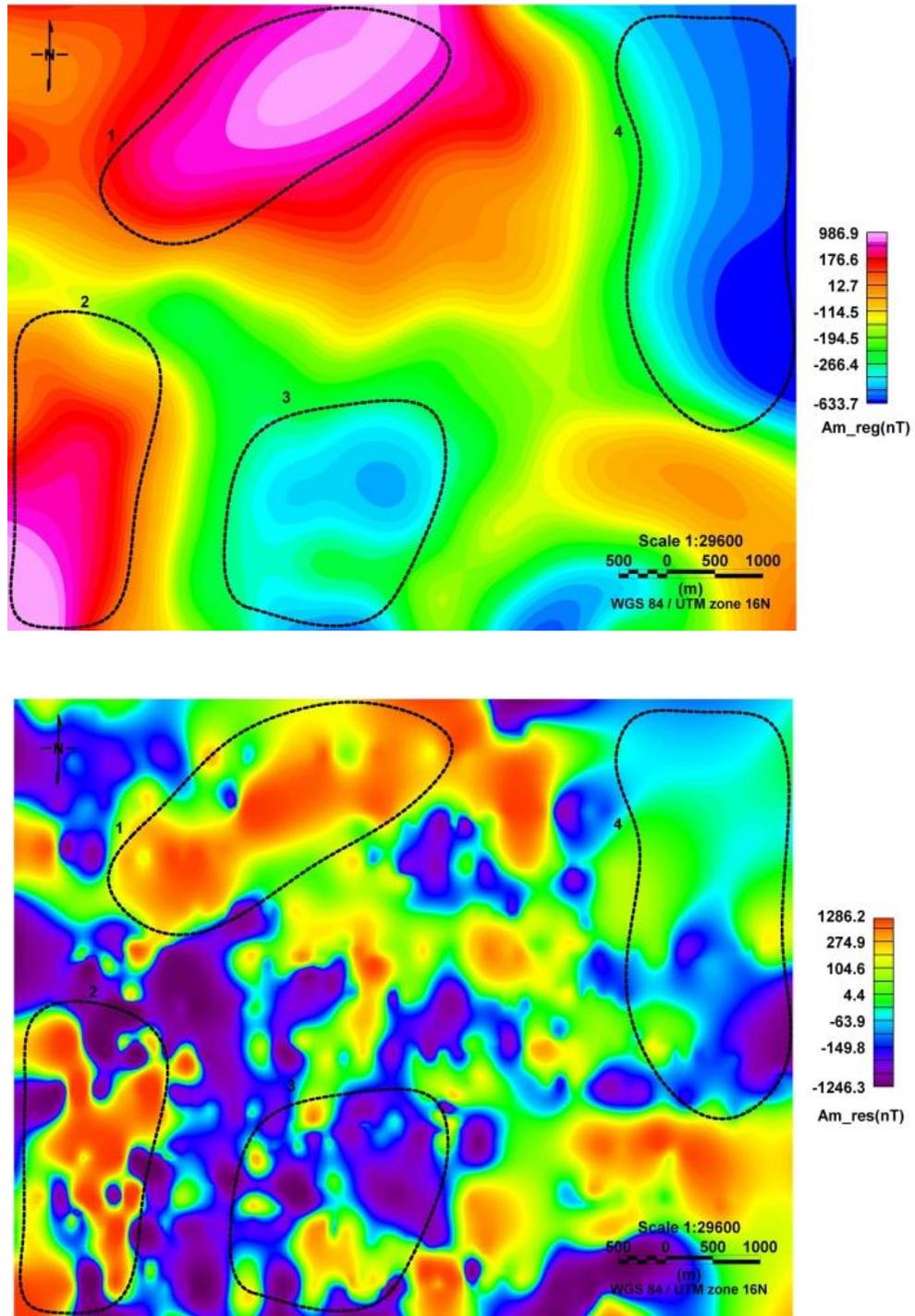


Figura 22. Arriba: Mapa de anomalías magnéticas regionales, $h=500m$, abajo: anomalías magnéticas residuales. El Salvador. Las líneas negras delimitan zonas coincidentes en ambos mapas, observándose máximos en 1 y 2 y mínimos en 3 y 4.

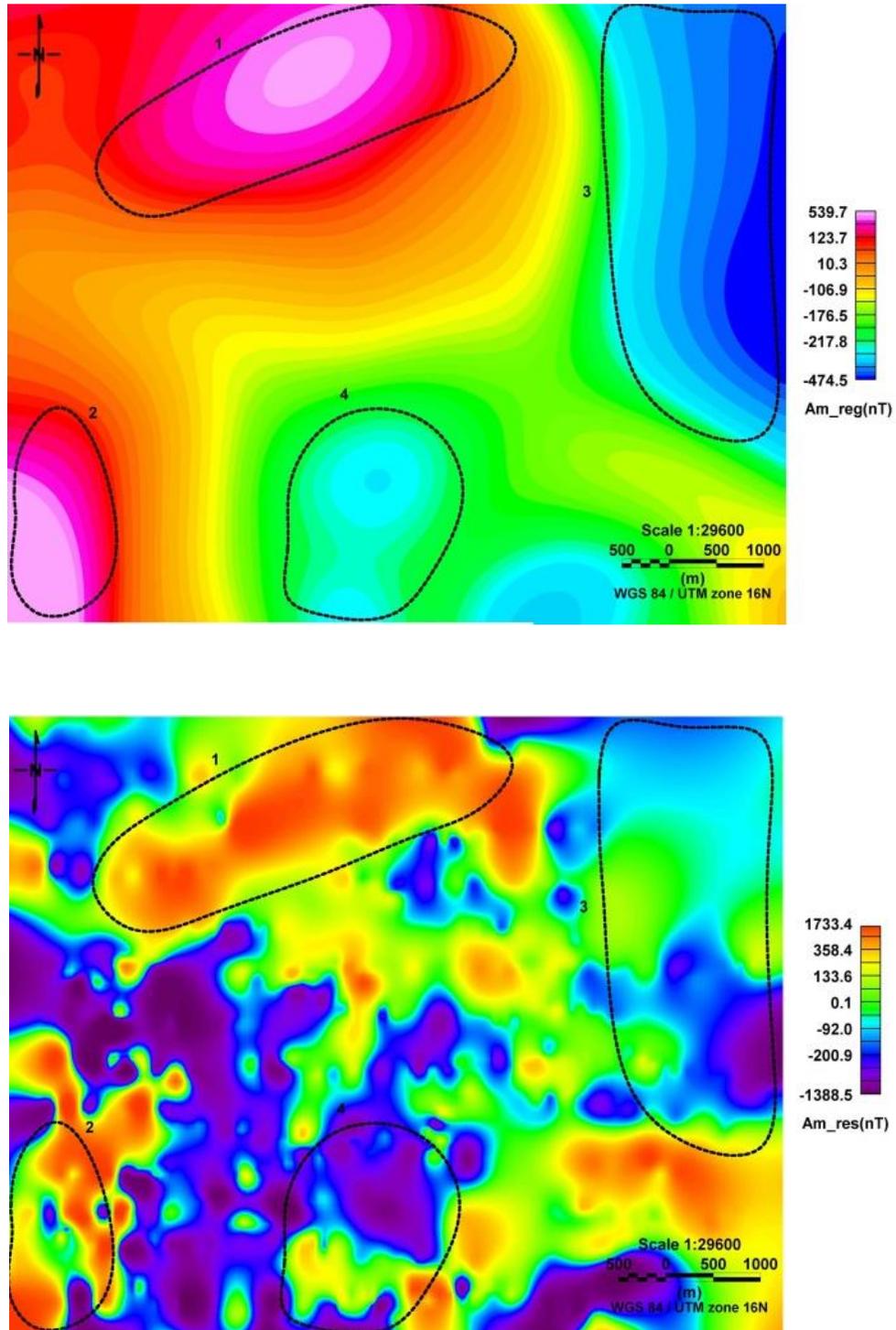


Figura 23. Arriba: Mapa de anomalías magnéticas regionales, $h=1000m$, **abajo:** anomalías magnéticas residuales. El Salvador. Las líneas negras delimitan zonas coincidentes en ambos mapas, observándose máximos en 1 y 2 y mínimos en 3 y 4.

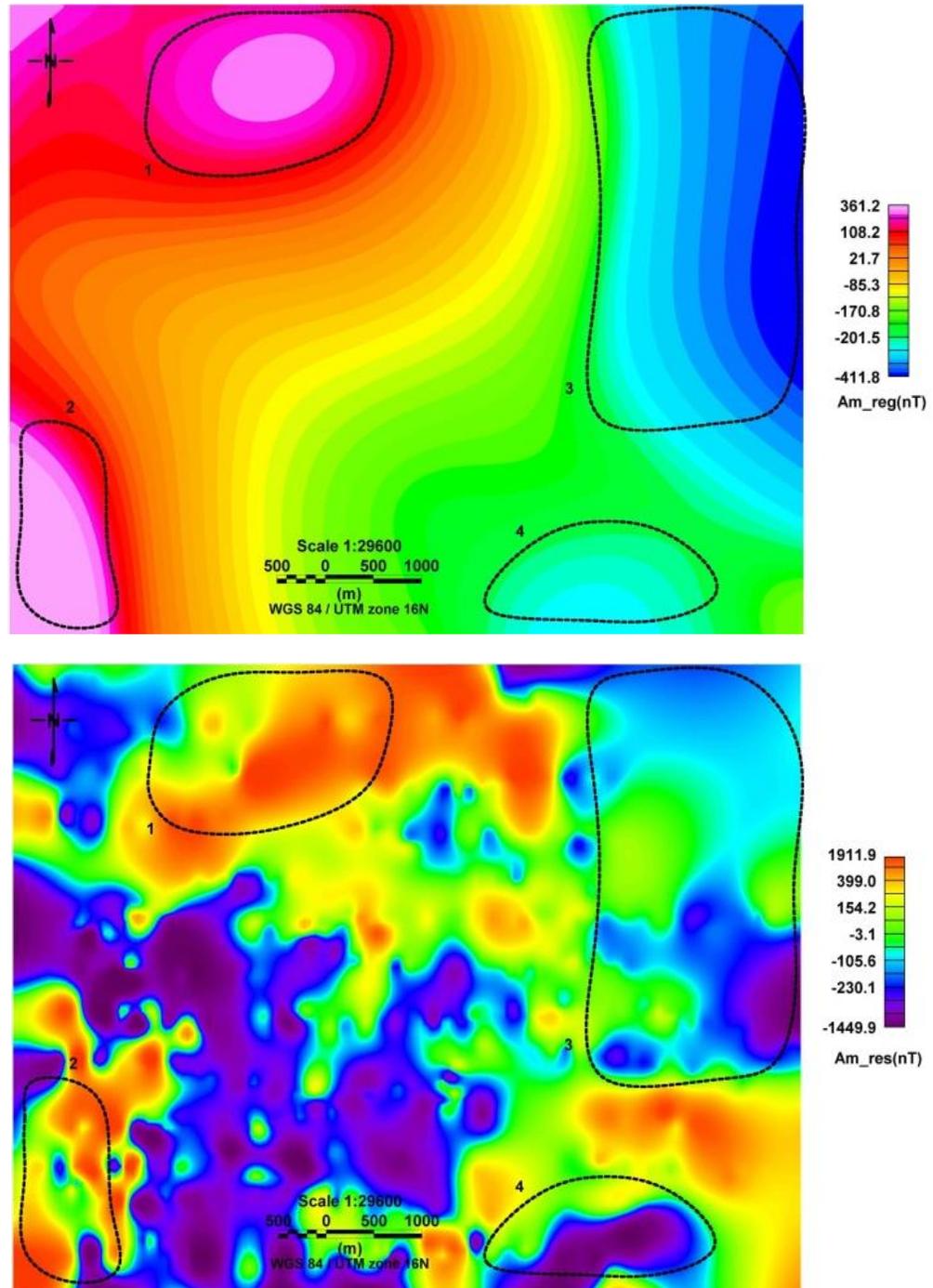


Figura 24. Arriba: Mapa de anomalías magnéticas regionales, $h=1500m$, **abajo:** anomalías magnéticas residuales. El Salvador. Las líneas negras delimitan zonas coincidentes en ambos mapas, observándose máximos en 1 y 2 y mínimos en 3 y 4.

C-2. Reducción al polo (RTP)

El objetivo de la reducción al polo magnético (RTP) es tomar un mapa de campo magnético y transformarlo para producir el mapa magnético que hubiera resultado de un área estudiada en el polo magnético. Asumiendo que todo el campo magnético observado es debido a los efectos magnéticos inducidos, la reducción al polo puede ser calculada en el dominio de Fourier usando el siguiente operador (L) (**Grant and Dodds, 1972**):

$$L(\theta) = \frac{1}{[\sin(I) + i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde:

θ Es la dirección del número de onda.

I Es la inclinación magnética.

D Es la declinación magnética.

De la **ecuación 11**, vemos que a medida que I se aproxima a 0 (el ecuador magnético), y $(D - \theta)$ se aproxima a $\pi/2$ (una estructura Norte-Sur), el operador tiende a infinito. Este efecto se muestra en la **Figura 25**.

En bajas latitudes magnéticas, las correcciones son muy grandes para las amplitudes en estructuras Norte-Sur, por lo que también amplifican las componentes Norte-Sur del ruido y de los efectos magnéticos de cuerpos magnetizados en direcciones diferentes a la del campo inductor.

Unos de los métodos más simples y efectivos que modifica la corrección de la amplitud en la dirección Norte-Sur magnética dentro del dominio de Fourier es el creado por **Grant and Dodds (1972)** implementado en el sistema **MAGMAP (Oasis Montaj)**. En donde se introduce una segunda inclinación (I') que es usada para el control de la amplitud del filtro (L) cerca del ecuador como se muestra en la **ecuación 12**.

$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - i \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(I') + \cos^2(I') \cos^2(D - \theta)][\sin^2(I) + \cos^2(I) \cos^2(D - \theta)]} \quad \text{Ecuación 12}$$

si ($|I'| < |I|$), $I' = I$

Para controlar el operador RTP, se trata de elegir $|I'| > |I|$, para que de esta forma continúe proporcionando resultados aceptables. Esto dependerá de la calidad de los datos (ruido bajo) y de la cantidad de la magnetización no inducida en el área.

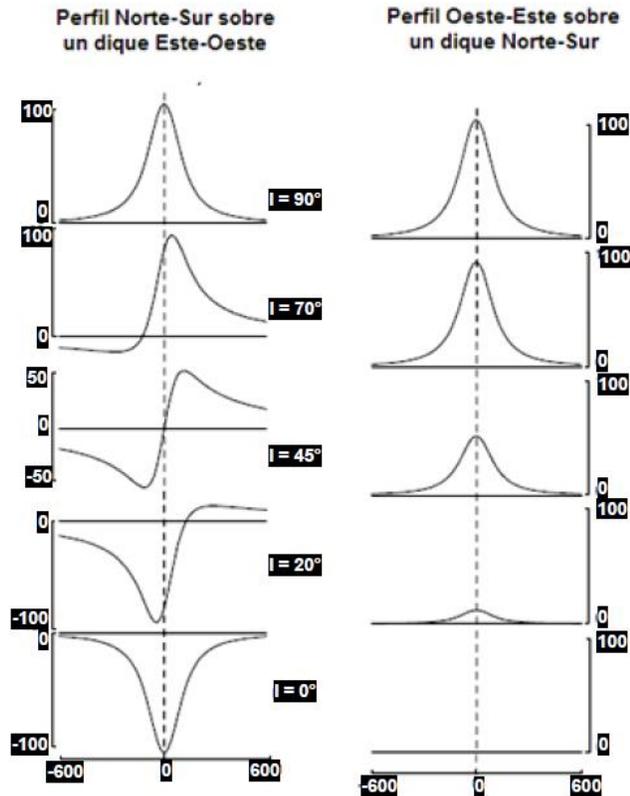


Figura 25. Sobre la izquierda, se muestra el perfil N-S de un dique vertical con rumbo Este-Oeste, a la derecha el perfil transversal al dique con rumbo Norte-Sur, para inclinaciones (I) del campo magnético ambiental de 90, 70, 45, 20 y 0°. La reducción al polo involucra la corrección de la forma de la estructura Este-Oeste y la corrección de la amplitud de la estructura Norte-Sur para producir el mismo perfil que sería observado en una inclinación de 90°.

A continuación en las **Figuras 26 y 27** se presentan los resultados de aplicar el filtro RTP a mapas de anomalías magnéticas residuales, para ambas zonas de estudio.

Podemos observar para ambos casos lineamientos y formas que no se observaban en los mapas de anomalías magnéticas residuales. Para el caso de La Laja vemos valores que rondan entre - 44 nT y 40 nT. Para el Salvador los valores rondan entre -2700 nT y 2800 nT aproximadamente.

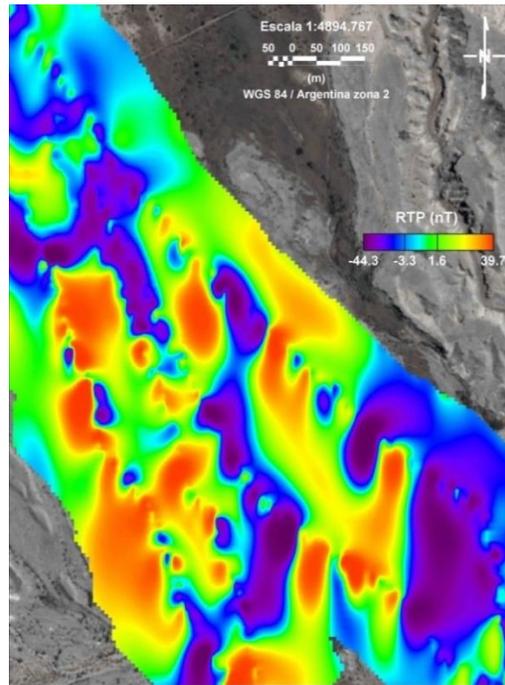


Figura 26. Mapa de reducción al polo obtenido de aplicar el filtro RTP al mapa de anomalía magnética residual, $h=100m$. La Laja. San Juan, Argentina.

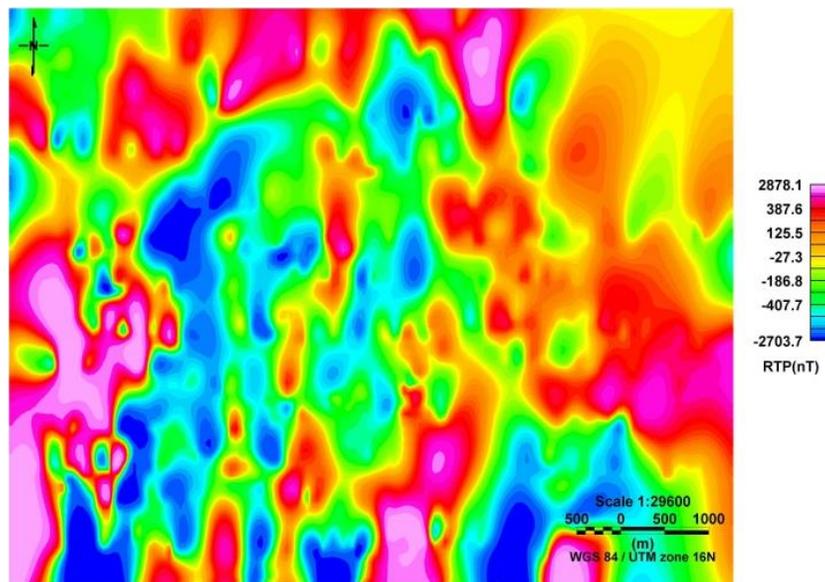


Figura 27. Mapa de reducción al polo obtenido de aplicar el filtro RTP al mapa de anomalía magnética residual, $h=1000m$. El Salvador.

3-5. Resultados

A continuación se muestran los resultados de comparar los mapas de reducción al polo de ambas zonas, con los mapas geológicos-estructurales correspondientes (**Figuras 28 y 29**).

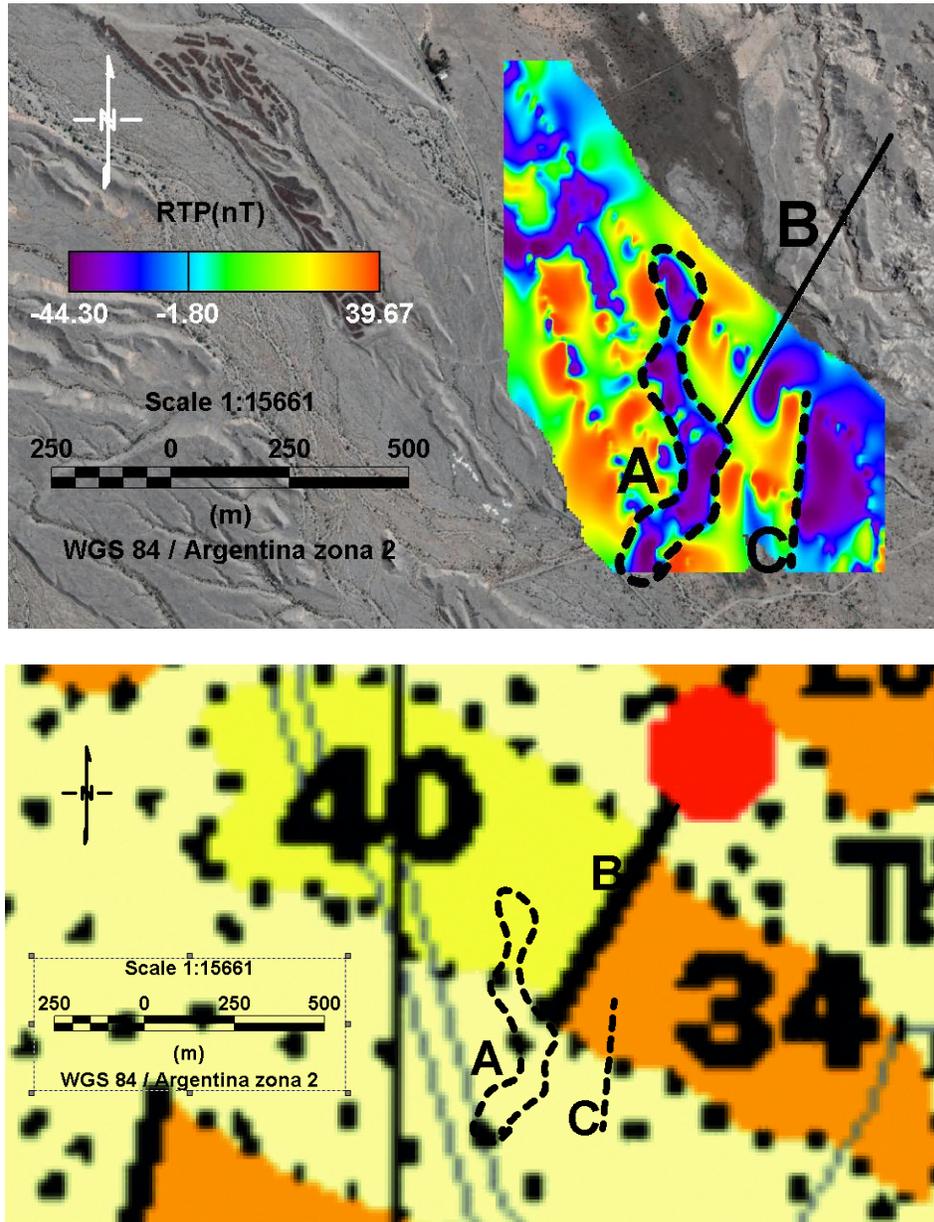


Figura 28. *Arriba:* Mapa de reducción al polo obtenido de aplicar el filtro RTP, *abajo:* mapa geológico. La Laja. San Juan, Argentina. Con línea negra: se resalta la correspondencia entre el mapa de RTP y las estructuras en el mapa geológico (B). Con línea discontinua negra: se representan estructuras inferidas (A y C).

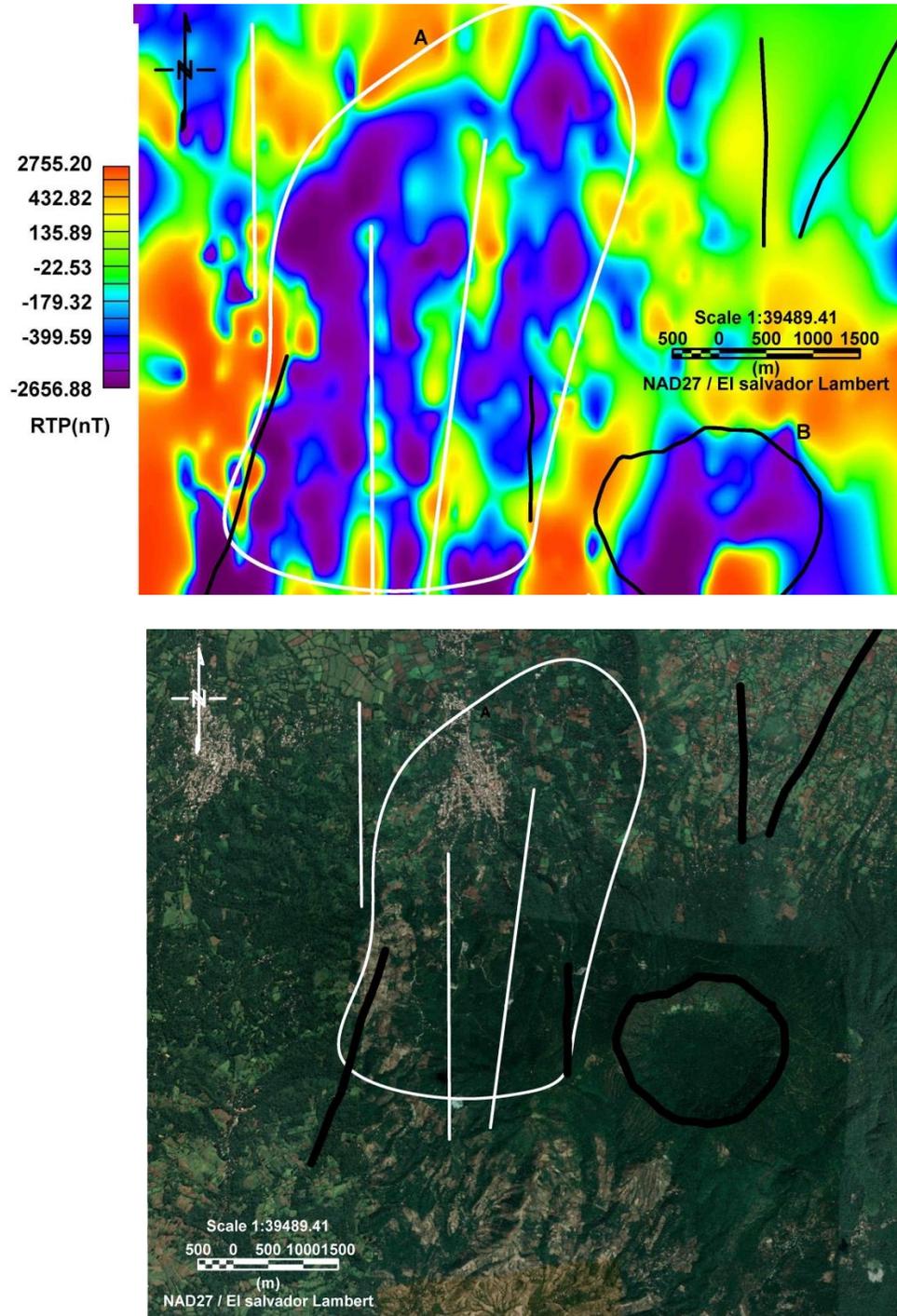


Figura 29. *Arriba:* Mapa de reducción al polo obtenido de aplicar el filtro RTP, *abajo:* mapa estructural. El Salvador. Con línea negra: se resalta la correspondencia entre el mapa de RTP y el estructural. Con línea blanca se representan estructuras inferidas. En A y B: mínimos magnéticos.



CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el desarrollo de este trabajo se han aplicado diferentes métodos analíticos a mapas de anomalías magnéticas, para el estudio de estructuras en dos áreas geotérmicas, en Argentina y El Salvador.

Se realizaron ensayos con el método de Continuación analítica, a fin de obtener mapas de anomalías residuales que representen de la mejor manera –desde el punto de vista geológico- las estructuras de la corteza.

Se aplicó el filtro de Reducción al Polo, con el objetivo de analizar los datos disponibles. A partir de su aplicación, se pudo correlacionar con los mapas geológicos-estructurales. Se localizaron algunos rasgos geomorfológicos coincidentes con los mapeados en superficie. Así mismo, se observaron algunos posibles rasgos no mapeados, que se propone estudiarlos mediante otras técnicas geofísicas como gravimetría, para su corroboración.

En el caso de La Laja se evidenció la presencia de una falla mapeada con orientación NE-SO (**B**) y se han inferido otros aspectos geológicos como el contacto en **C** con orientación N-S y la estructura en **A** con rumbo N-S, **Figura 28**. Se recomienda ampliar la zona estudiada con el método magnético y otros métodos de apoyo, para una interpretación más precisa. Estudiar estructuralmente la zona, nos permitirá comprender el sistema geotérmico de La Laja en el futuro, incorporando otras disciplinas para generar un modelo conceptual integrado.

Por otro lado, en el área de El Salvador se evidenciaron fracturas mapeadas con orientaciones NE-SO y N-S, y la presencia de una estructura circular en el sector SE del mapa, que coincide con un mínimo magnético, **A**. Por otro lado, se han inferido otros lineamientos con rumbo N-S y una estructura en dirección N-S coincidente con mínimos magnéticos, **B Figura 29**. Los mínimos podrían estar indicando áreas de alta temperatura, donde los materiales se están desmagnetizando. Se recomienda realizar estudios de detalle en las áreas A y B y corroborar las estructuras inferidas. También sería importante extender las mediciones, con el fin de comprender en detalle el sistema geotérmico de esta zona.

Este trabajo es una primera aproximación para el estudio de estructuras. Sería importante realizar mediciones de susceptibilidad magnética y vincular dichos resultados con otros métodos geofísicos como gravimetría, magnetotelúrica, tdem –entre otros – a fin de validar el presente análisis. Además se recomienda hacer análisis geoquímicos y campañas geológicas.

REFERENCIAS

- Bastias, H., 1986. Fallamiento Cuaternario en la región sismotectónica de precordillera San Juan, Argentina: San Juan, Universidad Nacional de San Juan, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Tesis doctoral, 133 p.
- Briggs, I. C. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1), 39-48.
- CEL, 1989. Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa. El Salvador.
- Contreras, V., Pontoriero, S., 1998, Hallazgo de Neochoreorus Hay (Rodentia: Hydrochoeridae) en los travertinos de La Laja (Pleistoceno tardío-Holoceno), San Juan, Argentina, in VII Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Actas Resúmenes: Bahía Blanca, Argentina, Octubre/1998, p. 141.
- Dean, W.C., 1958. Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation: *Geophysics*, v.23, p.97-127.
- Estrada, L. 2009. Clases de Prospección Magnética. Para alumnos de Ingeniería Geodésica y Geofísica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán.
- Grant, F. and J. Dodds, 1972. "MAGMAP FFT processing system development notes". Peterson Grant and Watson Limited.
- Hinze W, Von Frese R, Saad A. 2013. Gravity and Magnetic Exploration.Principles, Practices, and Applications. Cambridge University Press.
- Miranda, S., e Introcaso, A. 1999. Cartas Gravimétricas de la Provincia de Córdoba. Interpretación de la estructura profunda de la Sierra de Córdoba. República Argentina. Colección de Temas de Geociencias N°1. Instituto de Física de Rosario. Pág. 48.
- Pacino, M. C. and Introcaso, A, 1987. Gravity Andean model associated with subduction near 24°25' south latitude. *Rev. Geofísica* Vol. 43 N°2.
- Peddie, N. W. (1982). International geomagnetic reference field: The third generation. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 34(6), 309-326.
- Perucca, L y Paredes, J., 2003. Fallamiento cuaternario en la zona de La Laja y su relación con el terremoto de 1944, Departamento Albardón, San Juan, Argentina. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 20, núm. 1, 2003, p. 20-26.

- Ramos, V. 2009. Anatomy and global context of the Andes: Main geologic features and the Andean orogenic cycle. Geological Society of America Memoir 204, p. 31–65.
- Sánchez, Marcos; Martínez, Patricia; Folguera, Andrés. 2016. Análisis geofísico a partir de Métodos Potenciales de las Zonas de Transición del Segmento de Subducción Pampeano hacia Zonas de Subducción Normal adyacentes (28°- 34°S y 66°- 71°W). Tesis Doctoral en Geofísica. Universidad Nacional de San Juan. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. San Juan, Argentina.
- Servicio geológico Nacional de El Salvador:
<http://www.snet.gob.sv/Geologia/Sismologia/3mapageo.htm#ELEMENTOS%20ESTRATIGR%EF%BF%BDFICOS>
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales de El Salvador (SNET):
<http://portafolio.snet.gob.sv/digitalizacion/pdf/spa/doc00188/doc00188-contenido.pdf>
- https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/Earths-magneticfieldlines-dipole.html).
- <https://www.nasa.gov/content/goddard/heliospheric-current-sheet>