

Capítulo 4

Análisis e Interpretación de Información Aeromagnética

4.1 Información Magnética

Para la realización de este estudio, la información Magnética se obtuvo de la Carta Magnética de Campo Total (Acapulco E14-11, escala 1:250,000 [53]) con base cartográfica INEGI, realizada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) con datos obtenidos de la campaña aeromagnética realizada en 1999, con una altura de vuelo sobre el nivel del terreno de 300 m y distancia entre líneas de vuelo de 1,000 m y 10,000 m entre líneas de control. Se efectuaron además la corrección por movimiento del avión (compensación magnética), corrección por heading y micronivelación.

Se sustrajo la magnitud del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF 1995) y se realizó el mapa de contornos (Figura 4.1). Los parámetros del campo Geomagnético al centro de la carta son:

- Intensidad: 40,309 nT
- Inclínación: 43°39'
- Declinación: 6°42'

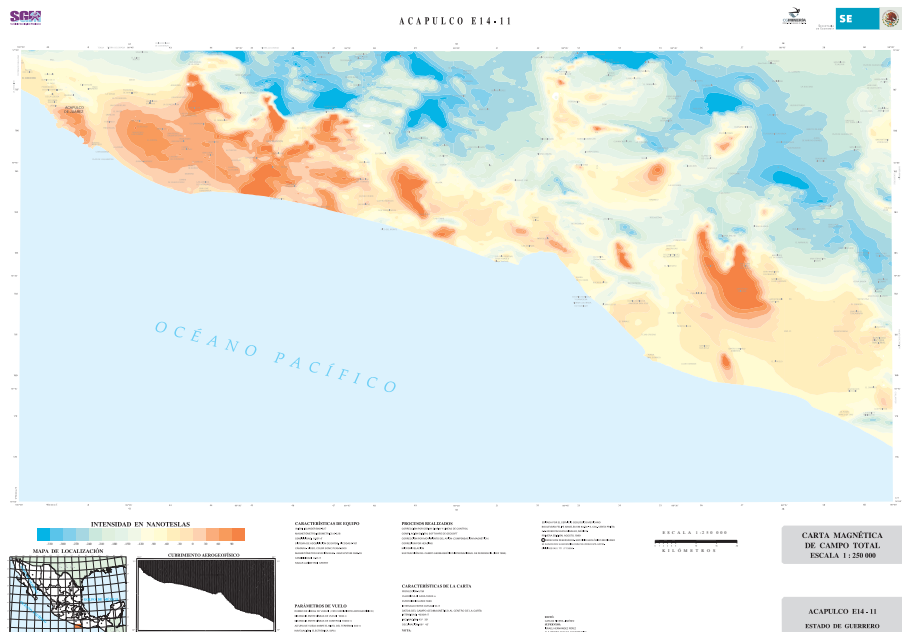


Figura 4.1: Carta Magnética de Campo Total Acapulco E14-11 (Servicio Geológico Mexicano, 1999[15])

4.2 Análisis Cualitativo de los datos

El área de estudio se localiza en la zona limítrofe de los estados Guerrero y Oaxaca, comprendiendo los paralelos 16° y 17° de latitud norte y 99° y 98° de longitud oeste respecto al meridiano de Greenwich.

Fisiográficamente forma parte de la Provincia de la Sierra Madre del Sur, de manera que la porción norte corresponde a la subprovincia de Taludes Meridionales y la porción sur a la Planicie Costera del Pacífico. El relieve de la zona ha sido influenciado por el fallamiento regional que se manifiesta en la mayor parte de la carta, el cual corresponde a fallas de desplazamiento lateral, que continúan varios kilómetros al norte de la zona de estudio, relacionado a la tectónica de desplazamiento lateral izquierdo del Bloque Chortis, dando como resultado una topografía suave con dirección a la costa, que se vuelve abrupta con dirección al norte, alcanzando alturas alrededor de 2000 m sobre el nivel del Mar (Raisz, 1964 ^[27]).

Geológicamente la zona se ha definido como un cinturón de baja presión y alta temperatura, metamórfico plutónico correspondiente a la raíz de un arco magmático distinguiéndose claramente el complejo metamórfico y los granitos que lo intrusionan. Los gneises que forman parte del complejo metamórfico son los más abundantes en el área estudiada, constan de rocas con bandas oscuras y blancas, compactas, foliadas en partes muy fracturadas con presencia de óxidos de hierro debido al intemperismo, megasópicamente se observa la presencia de cuarzo, micas y feldespatos. Petrográficamente presenta como minerales primarios, mica, cuarzo, feldespatos como componentes secundarios, montmorillonita y hematita como resultado de la alteración de magnetita. (SGM, 2000^[19])

Las rocas de origen volcánico que intrusionan al complejo metamórfico son granitos con variación a granodioritas y dioritas. Los granitoides presentan efectos de deformación en estado sólido. Están constituidas por ferromagnesianos, siendo más abundantes la biotita y la honblenda y los agregados lenticulares de cuarzo. Las granodioritas presentan poco fracturamiento y no se aprecia deformación, deleznable en algunas partes y presentando un intemperismo tipo esferoidal. Se observa cuarzo, feldespatos, biotita y óxidos de hierro.

Morán (1992^[45]), con base a dataciones por Rb/Sr reconoce dos eventos magmáticos mayores por lo que las características magnéticas de los plutones podrían variar de acuerdo a su génesis.

Los depósitos aluviales acumulados en los valles de los ríos o al pie de los cerros y lomas forman abanicos y terrazas. Las arenas que la componen son producto tanto de rocas ígneas como metamórficas, cubriendo en algunas partes a los granitos y gneises, e interdigitándose con los depósitos lacustres y litorales. El afloramiento más extenso se encuentra alrededor del río Quetzala, prolongándose al sureste hasta llegar a la costa.

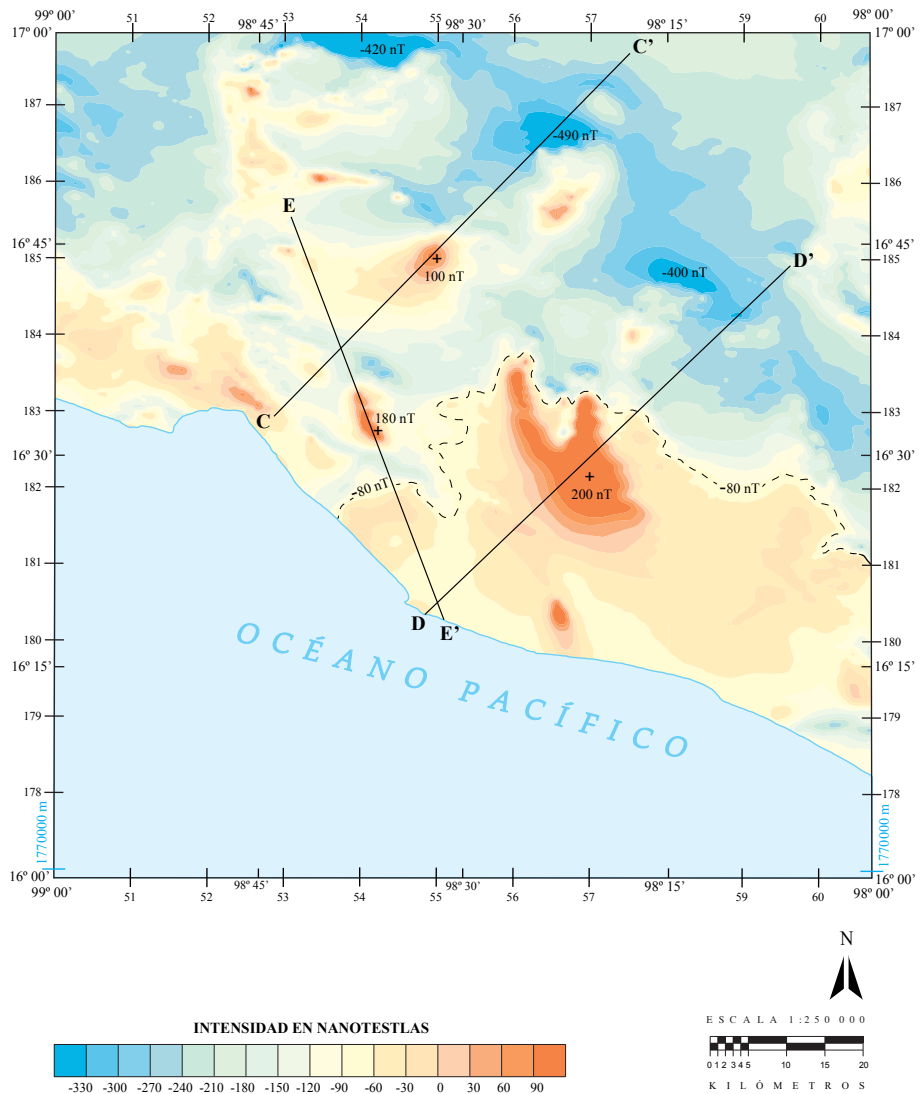


Figura 4.2: Mapa de Campo Total (modificado del Servicio Geológico Mexicano, 1999^[15]) donde se muestran las anomalías de mayor interés en el área de estudio; así como los perfiles seleccionados

4.- Análisis e Interpretación de Información Aeromagnética

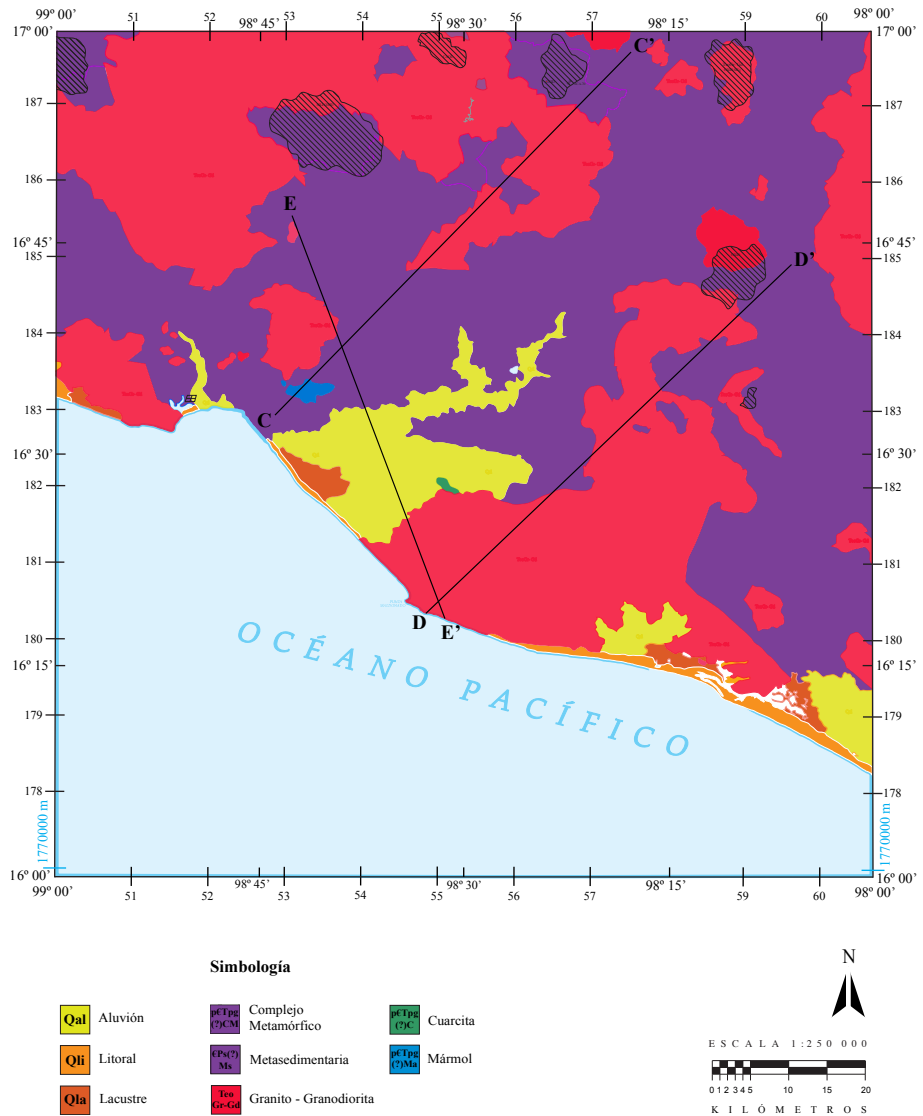


Figura 4.3: Mapa Geológico de la zona de estudio, donde se muestra la ubicación de los perfiles seleccionados, (modificado de Servicio Geológico Mexicano, 1999^[15])

El mapa de Intensidad Magnética de Campo Total (Figura 4.2) refleja el efecto de las anomalías magnéticas causadas por los cuerpos plutónicos intrusivos. Destaca principalmente la anomalía que se encuentra a 6 km al este de Cuaajinicuilapa, Gro., coincidente con el cause del río Cortijos, tiene una dirección N-S con un máximo de 200 nT. Se aprecia una anomalía de 100 nT, con dirección NE-SW, a 1.5 km del río Quetzala y sobre el cerro Cuate. Finalmente se encuentra una anomalía de 180 nT con dirección NW-SE, que cruza al río Quetzala, a 12.3 km al noreste de la costa y al noroeste de Punta Maldonado, Gro.

En la parte Sur de la carta se nota claramente la influencia de la topografía en las curvas de campo total, puesto que se encuentran en una zona prácticamente plana con elevaciones que van de 0 m a 170 m sobre el nivel del mar. La diferencia de elevaciones es notable a partir de la curva de -80 nT estableciéndose un espaciamiento mayor entre ellas en dirección a la Costa con un rango de -80 nT a -30 nT, como se muestra en la Figura 4.2

En la parte norte y noreste de la zona de estudio se aprecian un conjunto de tres anomalías negativas de considerable valor. La primera se halla en la parte Norte en los límites de la carta, entre los poblados El Rincón, Gro. y Río Iguapa, Gro., con una orientación E-W y valor mínimo de -420 nT. La segunda se encuentra en el poblado de San Jerónimo Gro. y el río Las Minas, con una orientación E-W y valor mínimo de -490 nT. Finalmente la tercera, se haya a 4.5 km al Noreste de La Guadalupe, Gro., a 8 km al Suroeste de Guadalupe Victoria Gro., y coincidente con el afluente del Río Verde, Río Grande y Río Atotonilco, con orientación NW-SE, con un valor mínimo de -400 nT.

Para retroalimentar los modelos con valores de susceptibilidad representativos se realizaron 2 visitas a la zona de estudio recolectando muestras geológicas de diferentes localidades, tanto de los complejos metamórficos y graníticos como de rocas sedimentarias que afloran en la parte costera. Las muestras fueron cortadas en cubos de 1 cm de lado y se midieron los valores de susceptibilidad utilizando el equipo Kappabridge KLY-2.01 perteneciente al departamento de Paleomagnetismo, del Instituto de Geofísica de la UNAM. Los Apéndices B.3, B.2, B.1) muestran los valores obtenidos

4.3 Reducción al Polo

Generalmente las anomalías gravimétricas positivas tienden a estar localizadas sobre las masas que las originan, pero esto no es necesariamente cierto en el caso de las anomalías magnéticas cuando el vector de magnetización y el campo magnético no están ambos en dirección vertical (Blakely, 1996^[6]), haciendo así la interpretación de las señales magnéticas más compleja que la gravimétrica. Ya que la intensidad de magnetización es una cantidad vectorial, además la forma de la anomalía magnética depende de las variaciones físicas del cuerpo y de la orientación que tenga el vector del campo magnético terrestre y el vector de polarización asociado al cuerpo.

El proceso de reducción al polo, es una transformación utilizada para facilitar la interpretación de la información magnética en donde se elimina la distorsión producida

por la inclinación del campo geomagnético, eliminando o minimizando la asimetría y los desplazamientos laterales de las anomalías del campo magnético total, relacionados con las desviaciones de las direcciones de magnetización. Esto permite obtener anomalías, que pueden ser interpretadas como una pseudoanomalía gravimétrica. Responden a la verdadera ubicación de las heterogeneidades del medio, lo que posibilita el empleo de métodos de interpretación más sencillos.

A partir del proceso propuesto por Baranov (1957^[3]) muchos investigadores se dedicaron a buscar algoritmos más eficientes para realizar dicha transformación, entre ellos Bhattacharyya (1965^[5]).

Para la realización de la reducción al polo se requieren los parámetros magnéticos (ángulo de inclinación magnética, declinación magnética y el azimut del perfil). Los datos de campo total se obtuvieron de la carta magnética Acapulco E14-11 (Figura 4.1). Una vez seleccionados los perfiles se interpolaron los datos cada 2 km, debido a que el estudio tiene un carácter regional de extensión considerable. Una vez seleccionados los perfiles se utilizó el programa SignProc versión 1.56, (Cooper 2001^[17]), el cual fue creado por motivos académicos, sin fines de lucro. El algoritmo utilizado está basado en la publicación de Gunn (1975^[32]).

4.4 Análisis Cuantitativo

La finalidad de la interpretación cuantitativa es correlacionar las anomalías observadas con un modelo geológico estructural propuesto. A partir de la interpretación de las señales observadas y del conocimiento geológico del área de estudio, se propone un modelo inicial que será modificado, con la finalidad de reducir los errores observados entre la anomalía observada y la generada, por el modelo propuesto. El proceso se realiza mediante prueba y error

Hay que recordar que dada una señal existen gran número de soluciones que pueden reproducir aceptablemente la señal observada. Esta ambigüedad existente sólo se podrá reducir mediante el conocimiento geológico de la zona, la obtención de columnas litológicas y un manejo adecuado de las propiedades físicas, de todas las unidades geológicas existentes.

Con el fin de facilitar el proceso de interpretación las señales aeromagnéticas fueron transformadas utilizando la metodología que propone Bhattacharyya (1965^[5]). Esta transformación genera la anomalía reducida al polo, que puede ser tratada como una pseudo-anomalía gravimétrica.

El proceso de modelación se realizó utilizando el algoritmo bidimensional de Talwani (1959^[54]), utilizando los algoritmos descritos por Won y Bevis (1987^[58]), a partir de las secciones magnéticas, previamente seleccionadas. Se empleó el paquete GM-SYS (1999) de NGA (Northwest Geophysical Associates, Inc.). El paquete cuenta con una interfase gráfica con diversas opciones que permiten el cálculo de la respuesta magnética y gravimétrica y la manipulación de un modelo de geometría compleja, así como el error entre la señal calculada y la observada.

Material	Susceptibilidad magnética (cgs)
Aluvión	2×10^{-6}
Arenisca	4×10^{-6}
Conglomerado	1×10^{-6}
Gneis	1.3×10^{-5}
Granito	1.5×10^{-3}
Granodiorita	2×10^{-3}
Mármol	6×10^{-6}
Metasedimentario	1.3×10^{-5}

Tabla 4.1: Tabla de Susceptibilidad Magnética de los materiales que conforman los perfiles

Se de por hecho que los bloques constituyentes del modelo se extienden lateralmente al infinito ($\sim 30,000$ km) en dicha dirección para eliminar los efectos de borde. La estabilidad del programa así como los resultados que aporta el paquete GM-SYS han sido analizados por la NGA en múltiples ocasiones y aplicados en trabajos de consultoría geofísica e investigaciones de análisis e interpretación, siendo por lo tanto un programa robusto que brinda una alta confiabilidad en los resultados (GMY-SYS 1999^[48]). Hay que recordar que la profundidad máxima de los modelos magnéticos varía de acuerdo a la Temperatura de Curie. A medida que nos acercamos a esta temperatura se va reduciendo el efecto magnético de los materiales ferromagnéticos. La magnetita pierde sus propiedades a $\sim 570^\circ\text{C}$ (Lowrie, 2007^[42]). La profundidad a la que se alcanza la temperatura de Curie dependerá de la zona de estudio y del gradiente geotérmico presente. En particular para la zona de estudio se estimó entre 16 y 20 km (Prol, 1991^[51], Manea y Manea, 2010^[44])

Tomando en cuenta el análisis cualitativo de la sección anterior, en los mapas geológico y magnético (Figura 4.2 y Figura 4.3) se muestran los 3 perfiles seleccionados (CC', DD' y EE') que cortan a las anomalías de mayor interés y que serán de utilidad para otros tipos de estudio de sismicidad, que se están realizando en la zona.

A continuación se presenta el análisis cualitativo de cada uno de los perfiles y el modelo geológico-estructural resultante. En la Tabla ?? se presentan las susceptibilidades magnéticas utilizadas para los tres perfiles

4.5 Sección magnética reducida al polo y modelo geológico-estructural CC'

Este perfil tiene una dirección N 44.5°E , con una longitud de 66 km, con estaciones cada 2 km. Inicia a 9 km al sureste de Marquelia Gro., a 3 km de la Costa y termina a 4.5 km al Noroeste de San Pedro Gro., en la parte norte de la zona de estudio (Figura 4.2). Los primeros 30 kilómetros presenta una topografía más suave de 0 a 180 m.s.m. aproximadamente y posteriormente a partir del río Quetzala se incrementa abruptamente hasta alcanzar los 1400 m.s.m.

La señal magnética reducida al polo, presenta 5 máximos relativos, el más prominente se halla en el kilómetro 32, alcanzando los 129 nT y en el kilómetro 54, se presenta un mínimo relativo de -422 nT. Como se ha mencionado anteriormente, en la zona afloran básicamente y en grandes extensiones, el complejo metamórfico (Xolapa) y la presencia muy importante de intrusiones graníticas y granodioríticas.

Con la finalidad de incluir parámetros mas confiables en los modelos, se recolectaron especímenes de muestras, en diversas zonas de la región para realizar mediciones de susceptibilidad magnética en el laboratorio (Figura 4.4). Esto permite establecer cuales son los elementos involucrados de mayor influencia en los modelos (Apéndice B.3, B.2, B.1). De esta manera se asignó un valor promedio de susceptibilidad magnética de 1.3×10^{-5} para el complejo metamórfico y 1.5×10^{-3} a 2×10^{-3} para el granito-granodiorita.



Figura 4.4: Equipo Kappabridge KLY-2 del Instituto de Geofísica con el que se midió la susceptibilidad magnética de las muestras recolectadas en campo

A continuación se describirán brevemente las formaciones antes mencionadas.

- **Granito-Granodiorita**

Constituye la base del modelo. Proporciona la mayor contribución magnética a la señal. Estos intrusivos se asocian a los fenómenos magmáticos que afectaron al complejo Xolapa y cuya edad predominante es Terciaria. Morán (1992^[45]) ha podido identificar por lo menos dos eventos magmáticos mayores.

- **Granito**

Forma una parte importante del modelo, ya que aporta una considerable respuesta magnética a la señal observada. La susceptibilidad magnética obtenida, es del orden de 1.5×10^{-3} . Su origen es el mismo que el del granito-granodiorita de la zona, pero presenta mayor cantidad de feldespatos alcalinos

- **Complejo metamórfico**

Esta unidad constituye más del 70 % de la geología superficial. Está formada esencialmente por gneis, esquistos y rocas metasedimentarias. Sin embargo su aportación a los modelos magnéticos, es pobre puesto que su susceptibilidad magnética, es por lo menos dos órdenes de magnitud menor que la contribución, del granito-granodiorita.

Adicionalmente a las unidades más importantes, se presentan depósitos cuaternarios en los alrededores de los cauces de los ríos Quétzala y Cortijos. Algunos autores (SGM, 1993^[13]) también han mencionado la presencia de mármol, de color blanco con presencia esporádica de grafito, generalmente intercalado con los paragneises. Su contribución al modelo es despreciable. Posee una susceptibilidad magnética de 6×10^{-6} . Se consideró en el modelo de manera representativa, pues el tamaño del muestreo impide delimitar su geometría.

Una vez establecidas las unidades constituyentes del perfil CC' y sus respectivas propiedades físicas se procedió a proponer el modelo geológico de cada perfil seleccionado. La base del modelo está constituido principalmente por roca granito-granodiorita, granodiorita y el complejo metamórfico, que ha sido intrusionado por las rocas de origen volcánicas. Posteriormente se modificaron los espesores hasta lograr una respuesta adecuada entre las anomalías observadas y las calculadas.

La Figura 4.5 muestra el excelente ajuste logrado, obteniendo un error de 2,998 % para el perfil CC'.

En la parte central de la Figura 4.5, se observa un gran bloque de granito-granodiorita de 20 km en dirección SW-NE que logra aflorar en varios puntos en superficie de la sección geológica, causando los altos magnéticos principales. En los primeros 24 km, la geología indica la presencia de formaciones metamórficas, sin embargo, su contribución no permite ajustar la señal observada, por esta razón, se incluyen formaciones ígneas a profundidad que subyacen al metamórfico alcanzando espesores aproximados de 1.5 a 6 km, conforme se aproxima al río Quétzala.

A partir del kilómetro 48 la señal reducida al polo tiende a disminuir, para posteriormente incrementarse suavemente Figura 4.5. Este efecto se asoció a un contraste lateral del gran cuerpo plutónico antes mencionado y el metamórfico que aflora en el resto de la sección. Para logra el efecto de ajuste deseado se requirió la presencia de un cuerpo intrusivo de susceptibilidad mayor que el metamórfico.

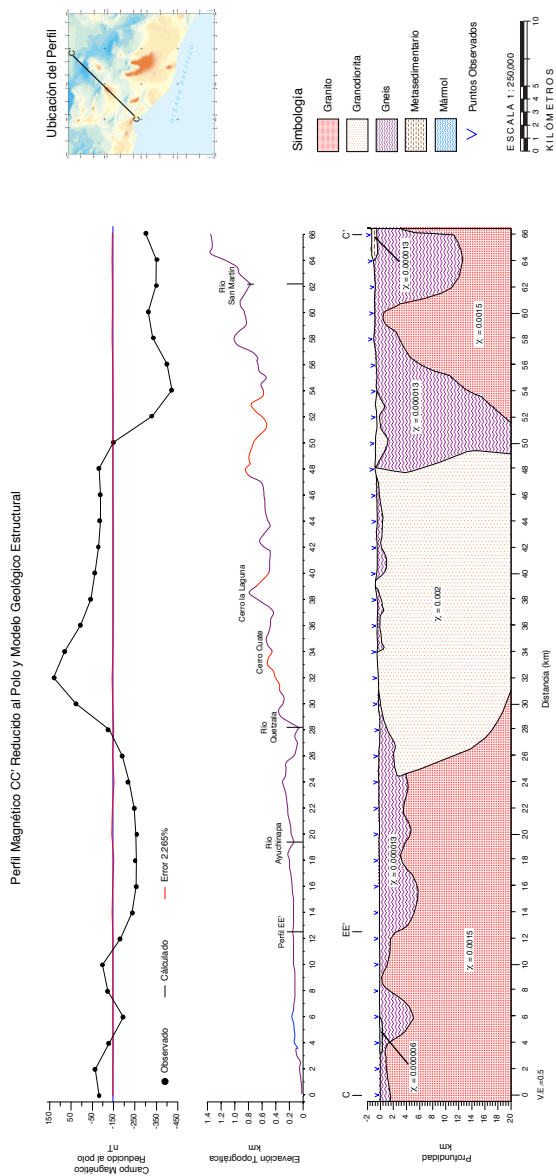


Figura 4.5: Perfil magnético reducido al polo CC' y modelo geológico-estructural

4.6 Sección magnética reducida al polo y modelo geológico-estructural DD'

El Perfil DD' tiene una dirección N46.4°E, con una longitud de 66 km con estaciones cada 2 km. Inicia a 2.5 km al sureste de Punta Maldonado, Gro., cerca de la costa y termina a 7.8 km al norte de San Pedro Amuzgos, Gro., cubriendo la parte central de la zona de estudio (Figura 4.2). En los primeros 36 kilómetros presenta una topografía suave de 0 a 95 m.s.m. que posteriormente se incrementa abruptamente a 700 m.s.m en el Cerro de Samapila, alcanzando su punto más alto (800 m.s.m) en el kilómetro 64 a 65, a 1.5 km al oeste de San Antonio Ocotlán, Gro.

La señal magnética reducida al polo presenta 1 máximo relativo prominente en la parte central (kilómetro 28) con una intensidad magnética de 200 nT y en el kilómetro 56, un mínimo relativo de -312 nT.

Las formaciones geológicas presentes en este perfil son las mismas descritas anteriormente en el perfil CC', sólo que se presenta en la región costera una capa de areniscas y conglomerados. A continuación se describen brevemente:

- **Arenisca**

Unidad de rocas clasificadas petrográficamente como litarenita fosilífera calcárea que alterna con caliza espática. Se dispone en estratos horizontales que varían de delgados a gruesos. Durham (1981^[26]) le asigna una edad correspondiente al Terciario Superior. La susceptibilidad magnética medida en promedio es de 4×10^{-6} , el cual casi no tiene influencia en la señal observada comparada con la respuesta de los granitos y el complejo metamórfico.

- **Conglomerado**

Forma terrazas aluviales y pequeñas masas al este y oeste de Cuajinicuilapa Gro., los clastos varían su coloración del gris a gris oscuro e incluso negro; el espesor de los afloramientos es mínimo y la integran fragmentos de cuarzo, feldespato, plagioclasa, mica y hornblenda principalmente. Cubre discordantemente a las rocas graníticas del Mesozoico y pequeñas porciones de arenisca. No se tienen muestras de susceptibilidad magnética de la zona, sin embargo, se le asignó una susceptibilidad magnética de 1×10^{-6} de acuerdo con valores de rocas similares.

Las areniscas se incluyeron de manera representativa, pues el tamaño del muestreo, así como su poca susceptibilidad magnética no influyen en el modelo.

La base del modelo está constituido principalmente por un cuerpo central de granito-granodiorítico, como unidad secundaria los elementos graníticos y como tercera el complejo metamórfico. Se modificaron los espesores hasta lograr una respuesta adecuada entre la anomalía magnética observada y la calculada. La Figura 4.6 muestra el ajuste logrado, obteniendo un error de 8,659 %.

4.- Análisis e Interpretación de Información Aeromagnética

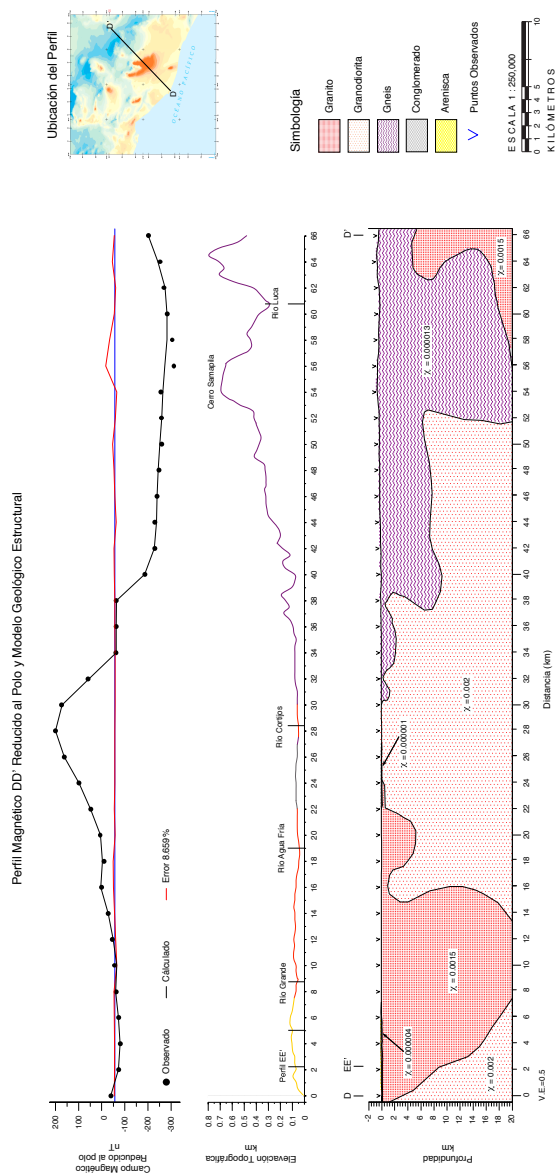


Figura 4.6: Perfil magnético reducido al polo DD' y modelo geológico-estructural

En el modelo geológico se pueden establecer tres zonas. La primera, de considerable tamaño conformada por una estructura granito-granodiorítica, que intrusióna al noreste del complejo metamórfico y al granito al suroeste en dirección a la costa. A pesar de ser una gran estructura intrusiva solo aflora del kilómetro 27 al 30 del perfil, siendo cubierto por tres kilómetros en dirección suroeste por una capa de poco espesor de conglomerados. Esta estructura Tiene presenta una longitud en su base de 39 km

La segunda zona se encuentra cercana a la costa y está formada principalmente por granitos que afloran al inicio del perfil en una extensión de 15 km. A pesar que presenta continuidad en dirección a la costa, es cubierta por una capa de areniscas que oculta los granitos. Con una longitud en su base de 6 km. Se presenta nuevamente al final del perfil, como una débil estructura que intrusióna al complejo metamórfico, a una profundidad de 4.7 km. Presenta menos de 4 km en su parte más somera y 10 km en la base.

La tercera zona está formada por el complejo metamórfico, siendo esta la de mayor extensión superficial, aflorando desde el kilómetro 30 hasta el fin del perfil en el kilómetro 66. Tiene una longitud en su base de 4 km.

Con respecto a la señal, no fue posible ajustar el mínimo de -312 nT de la anomalía (kilómetro 56), a pesar que en dicho punto el complejo Metamórfico alcanza su mayor profundidad. Se infiere por lo tanto, la presencia de una capa superficial con menor susceptibilidad magnética, sin embargo tanto las cartas del Servicio Geológico Mexicano (1999, ^[15]), como del INEGI (1988, ^[15]) no muestran la presencia de otro material diferente (Figura 4.3). A pesar de ello el error alcanzado (8,659 %) es aceptable y el modelo logrado se correlaciona adecuadamente a la señal reducida al polo.

4.7 Sección magnética reducida al polo y modelo geológico-estructural EE'

Este Perfil tiene una dirección S20.7°E, con una longitud de 56 km con estaciones cada 2 km. Inicia a 3.8 km al Noroeste de San Luis Acatlán, Gro., sobre el cerro Tonaltepec y termina a 5 km al Sureste de Punta Maldonado, Gro. En los primeros 23 kilómetros presenta una topografía abrupta, alcanzando una altura de 724 m.s.m en el Cerro Tonaltepec. Posteriormente, se vuelve bastante suave con alturas en el orden de 10 m.s.m, volviéndose a incrementar con dirección a la costa, a partir del kilómetro 34.

Esta sección tiene la particularidad de cruzar el perfil CC' en el kilómetro 18.35 y al perfil DD' en el kilómetro 53.7 (Figura 4.2).

La señal magnética reducida al polo se presenta 2 máximos relativos, destacando el que se encuentra en la parte central, en el kilómetro 24, con una intensidad magnética de 190 nT y en el kilómetro 32, un mínimo relativo de -328 nT.

Las formaciones presentes en este perfil, son las mismas que se describieron anteriormente en los perfiles CC' y DD', sólo que a diferencia de éstos se presenta una capa considerable de aluvión.

■ Aluvión

Los depósitos aluviales acumulados en los valles de los ríos o al pie de cerros y lomas forman abanicos y terrazas. Son de origen ígneo y metamórfico principalmente. En algunas partes cubren los granitos y se interdigitan con los depósitos lacustres y litorales. Se localizan los afloramientos más extensos en la costa

La base del modelo está constituido esencialmente por cuerpos graníticos, como unidad secundaria el granito-granodioritas y como tercera unidad, el complejo metamórfico. Se modificaron los espesores hasta lograr una respuesta adecuada entre la anomalías observadas y la calculadas. La Figura 4.7 muestra el buen ajuste logrado, obteniendo un error de 5,607 %.

En este modelo geológico propuesto se pueden establecer dos zonas. La primera, de considerable tamaño son las formaciones graníticas que sólo afloran a partir del kilómetro 42 al final del perfil. Sin embargo, su contribución es necesaria para ajustar la parte inicial de la sección magnética. Estas formaciones subyacen al complejo metamórfico que aflora hasta el kilómetro 39.

La segunda zona corresponde a un cuerpo granítico-granodiorítico que intrusión la capa granítica y en la parte central al complejo metamórfico que aflora alrededor del kilómetro 30 y 34. Presenta una forma caprichosa, de alrededor de 22 kilómetros de longitud con su parte más superficial en el kilómetro 22 al 30. (Figura 4.7). Es cubierto en algunas partes por una delgada capa de aluviones.

