



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estudio aeromagnético al  
norte del Complejo Plutónico  
de La Paz**

**T E S I S**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geofísico**

**P R E S E N T A :**

Rodrigo Santiago Ramírez

**DIRECTOR DE TESIS :**

Dr. Tomás González Morán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México

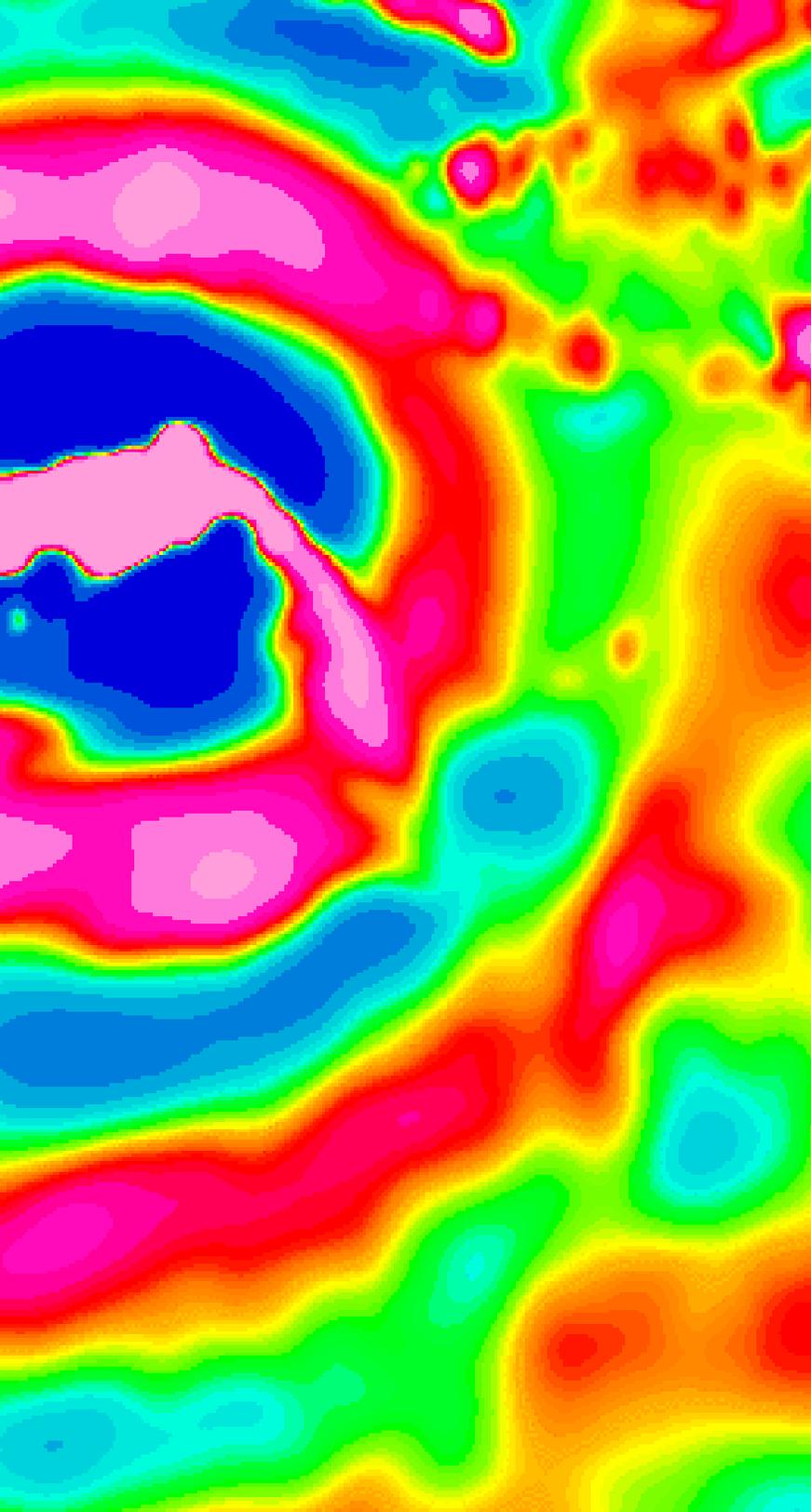


**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**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.



# Agradecimientos



Le agradezco tanto a la Universidad Nacional Autónoma de México, testigo de los mejores momentos de mi vida. A través de sus instalaciones me ha permitido abrir la mente al conocimiento, explorar al mundo de otra forma y conocer a las personas más maravillosas en el camino.

Al Instituto de Geofísica por otorgarme apoyo para el desarrollo de este trabajo, así como por abrirme las puertas a grandes experiencias.

Mi más sincero agradecimiento a mi asesor el Doctor Tomás González Morán, por sus enseñanzas, su gran paciencia y compromiso que me brindó en este trabajo. ¡Muchas gracias Doc.!

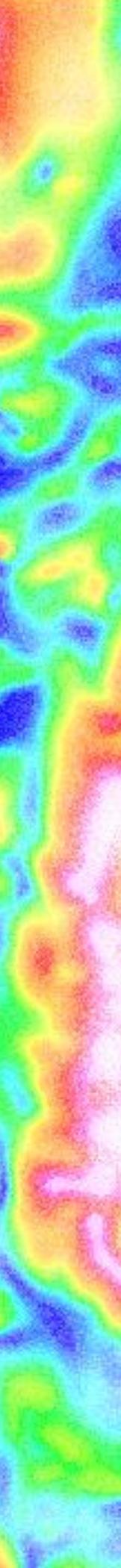
Le agradezco al Dr. José Antonio Pérez Venzor, por sus grandes consejos y principalmente por su gran apoyo en la recolección de muestras, pilares en este trabajo.

Hago una mención especial al Dr. Augusto Antonio Rodríguez Díaz y al Ing. José Antonio González Rangel por la ayuda brindada en el tratamiento de las muestras utilizadas en este trabajo.

A mis sinodales y profesores: la Dra. Ana Luz Caccavari Garza, la Dra. Valerie Pompa Mera, al Ing. Alejandro García Serrano y al Dr. Osvaldo Sánchez Zamora por su tiempo y consejos en la revisión de esta tesis.

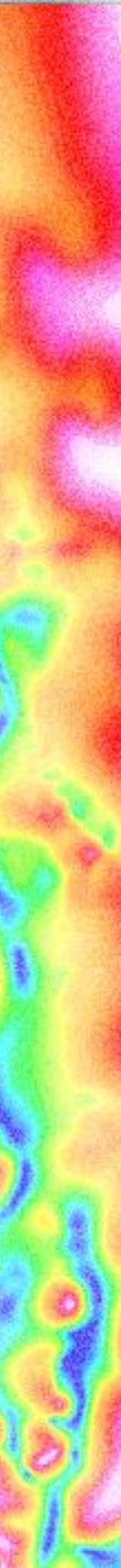
Con mucho cariño agradezco a mis amigos por todo su apoyo.  $\Delta$

Y, por último, pero no por ello menos importante a mis padres y hermanos quienes siempre han creído en mis sueños y con mucho amor me han apoyado a lo largo de mi vida.



# Contenido

Resumen .....	1
1. Introducción.....	2
1.1 Objetivos .....	3
1.2 Alcances y limitaciones del estudio .....	4
2. Zona de Estudio.....	5
2.1 Localización geográfica.....	6
2.2 Fisiografía .....	7
2.2.1 Hidrología superficial .....	10
2.3 Tectónica .....	10
2.4 Geología Regional de la provincia geológica Complejo Plutónico de La Paz	13
2.4.1 Región Punta Coyote.....	13
2.4.2 Bloque La Paz .....	14
2.4.3 Valle de La Paz .....	15
2.4.4 Todos Santos.....	16
2.5 Rasgos estructurales.....	18
3. Fundamentos Teóricos.....	21
3.1 Campo magnético.....	22
3.2 Densidad de flujo y permeabilidad magnética .....	24
3.3 Magnetización y susceptibilidad magnética.....	25
3.4 Histéresis.....	26
3.5 Magnetización remanente .....	28
3.6 Magnetismo de los materiales terrestres.....	29
3.6.1 Diamagnetismo .....	29
3.6.2 Paramagnetismo.....	30
3.6.3 Ferromagnetismo .....	30



3.7 Campo magnético terrestre .....	32
3.8 Componentes del campo magnético terrestre.....	32
3.9 Variaciones temporales.....	34
3.9.1 Variación diurna.....	34
3.9.2 Tormentas magnéticas y micropulsaciones. ....	35
3.9.3 Variación secular.....	35
3.9.4 Inversión magnética .....	36
3.10 Campo de referencia geomagnético internacional (IGRF) .....	36
3.11 Anomalía magnética .....	37
3.12 Reducción al polo .....	39
3.13 Continuación Ascendente .....	42
3.14 Modelado de Talwani .....	44
3.15 Aeromagnetometría .....	47
4. Procesamiento y Análisis de datos .....	49
4.1 Recopilación de información .....	50
4.1.1 Adquisición de datos.....	50
4.2 Procesamiento de datos magnéticos.....	51
4.2.1 Método de la Reducción al Polo .....	52
4.2.2 Continuación ascendente y descendente.....	52
4.2.3 Método de Talwani.....	53
5. Resultados e Interpretación .....	55
5.1 Interpretación cualitativa de la información magnética .....	56
5.2 Interpretación cuantitativa.....	66
Conclusiones .....	69
Bibliografía .....	71

## Resumen

En el año 2000 se llevaron a cabo levantamientos aeromagnéticos dando como resultado las cartas magnéticas del sur de la península de Baja California, en este trabajo, se analizaron los datos recopilados con el objetivo de comprender a mayor detalle las estructuras y la geomorfología regional, basándose en la respuesta magnética, apoyándose de metodologías de procesamiento magnético para caracterizar y correlacionar la información ya existente.

Diversos antecedentes geológico-geofísicos han sido realizados en la ciudad de La Paz y a las periferias permitiendo generar una tesis derivada de observaciones documentales y metodológicas que permitan un mayor análisis al estudio aeromagnético.

Los métodos de procesamiento realizados incluyen la reducción al polo, filtrado de continuación ascendente y descendente; entre los procesos se lograron caracterizar gradientes de anomalías magnéticas que permitieron la identificación de lineamientos debidos a fallas que han sido discutidas en diversos trabajos, principalmente sobre su ubicación, así como geometría. El procesamiento también permitió delimitar estructuras intrusivas en la zona de estudio y así como generar un modelo geológico-estructural bidimensional basado en el algoritmo de Talwani dentro del área.

# Capítulo I

## Introducción



## 1.1 Objetivos

El principal objetivo de este trabajo fue identificar los rasgos geológico-estructurales dentro de una zona de estudio en el municipio de La Paz, Baja California Sur mediante la interpretación de datos obtenidos con el método aeromagnético.

Entre los objetivos particulares se encuentra:

- Caracterizar las respuestas magnéticas obtenidas a través del procesamiento magnético mediante técnicas como la reducción al polo, continuación ascendente y descendente.
- Proponer al menos un modelo geológico de la zona inferido a partir de un perfil magnético (Método de Talwani).
- Delimitar estructuras como la falla de La Paz, la cual ha sido de gran debate sobre su localización ya que diversos estudios indican su cruce a lo largo de la zona de estudio. Se espera poder definirla con las metodologías empleadas en este trabajo.

## 1.2 Alcances y limitaciones del estudio

El principal alcance en este trabajo es la identificación de estructuras regionales dentro de un área de decenas de kilómetros, limitándose a obtener anomalías de longitudes menores que las distancias de adquisición pudiendo ignorar o no confinar con definición cualquier anomalía de menor longitud.

El estudio aeromagnético está igualmente limitado a realizar interpretación regional para un amplio campo del conocimiento como la minería, hidrogeología, geotermia etc. No obstante, será necesaria la correlación utilizando otros métodos geofísicos junto con la evidencia geológica para delimitar con mayor certeza las anomalías. Este trabajo se desarrolló con el método de Talwani, permitiendo generar una gran cantidad de modelos hipotéticos. La incertidumbre de estos modelos disminuirá con la correlación geológica.

# Capítulo II

## Zona de Estudio



En este capítulo se estructura información sobre el área de estudio indicando su ubicación, aspectos geológicos y estructurales de la zona situada en las inmediaciones del municipio de La Paz con el fin de adentrarse y comprender la naturaleza de la zona.

## 2.1 Localización geográfica

La península de Baja California se encuentra al noroeste de la República Mexicana con una longitud de aproximadamente 1250 Kilómetros y un ancho que va desde los 45 Kilómetros a los 227 Kilómetros compartidos por los estados de Baja California y Baja California Sur. La península limita al oeste con el Océano Pacífico y al oriente con el Golfo de California.

Regionalmente se sabe que la península incluye una cordillera a lo largo de su extensión, la cual está desplazada hacia el oriente en la parte sur. Así mismo dentro de los municipios de La Paz y Los Cabos se encuentran tres de las cinco provincias Geológicas de la península; La faja Volcánica de la Giganta, La cuenca Vizcaíno-Purísima y el Complejo Plutónico de La Paz (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992).

La zona de estudio se localiza en la parte sureste del municipio de La Paz Baja California Sur, entre las latitudes 24. 33° y 23. 60° Norte y las Longitudes 110.50° y 109.99° Oeste (Figura 2.1) con dimensiones de 51.3 Km por 81.250 km.

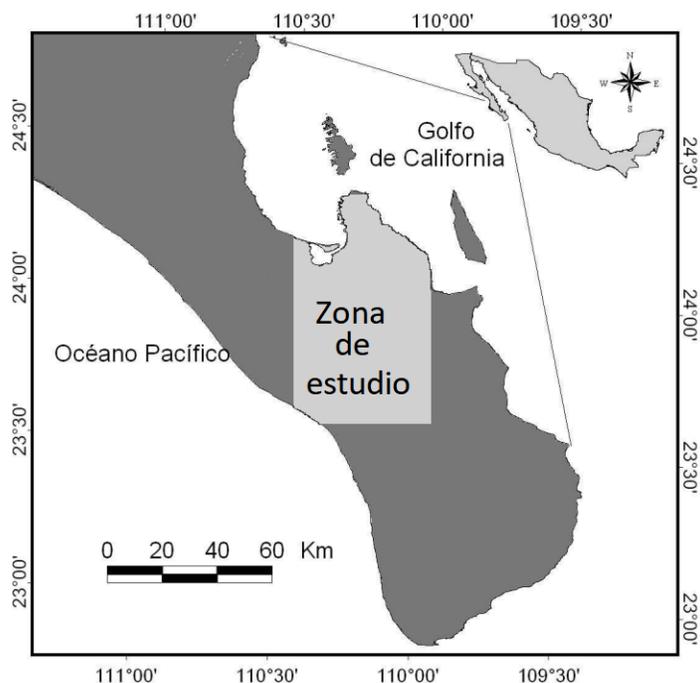


Figura 2.1. Mapa de la zona de estudio dentro de la península, ubicado en la parte sur del estado de Baja California Sur. Editado de Cruz *et al.* (2011).

## 2.2 Fisiografía

Las principales zonas de serranías se encuentran al oriente y al norte del polígono de estudio (Figura 2.2). Entre los más destacados se encuentran la Sierra *Las Cruces* (*Sierra la Pintada* y *Sierra las Canoas*) con una elevación máxima de 1260 m.s.n.m. como se muestra en el modelo digital de elevaciones de la Figura 2.3.

Sobre el suroeste de la *Sierra de las Cruces* se encuentra la *Sierra el Novillo* con dimensiones de 16 km por 6 km, siendo una estructura importante central de la zona de estudio. Al norte de la ciudad de La Paz se encuentra parte de la *Sierra de*

*la Giganta* que de occidente hacia oriente está formada por una serie de montañas con alturas no superiores a los 500 m.s.n.m. hasta la zona sur.

Parte de la bahía de La Paz hacia el sur predomina el Valle de La Paz-Carrizal culminando en bajos lomeríos que inician al suroeste de la bahía de La Paz hasta las cercanías de los poblados de *El Divisadero*, *El Carrizal* y *La Trinidad*.

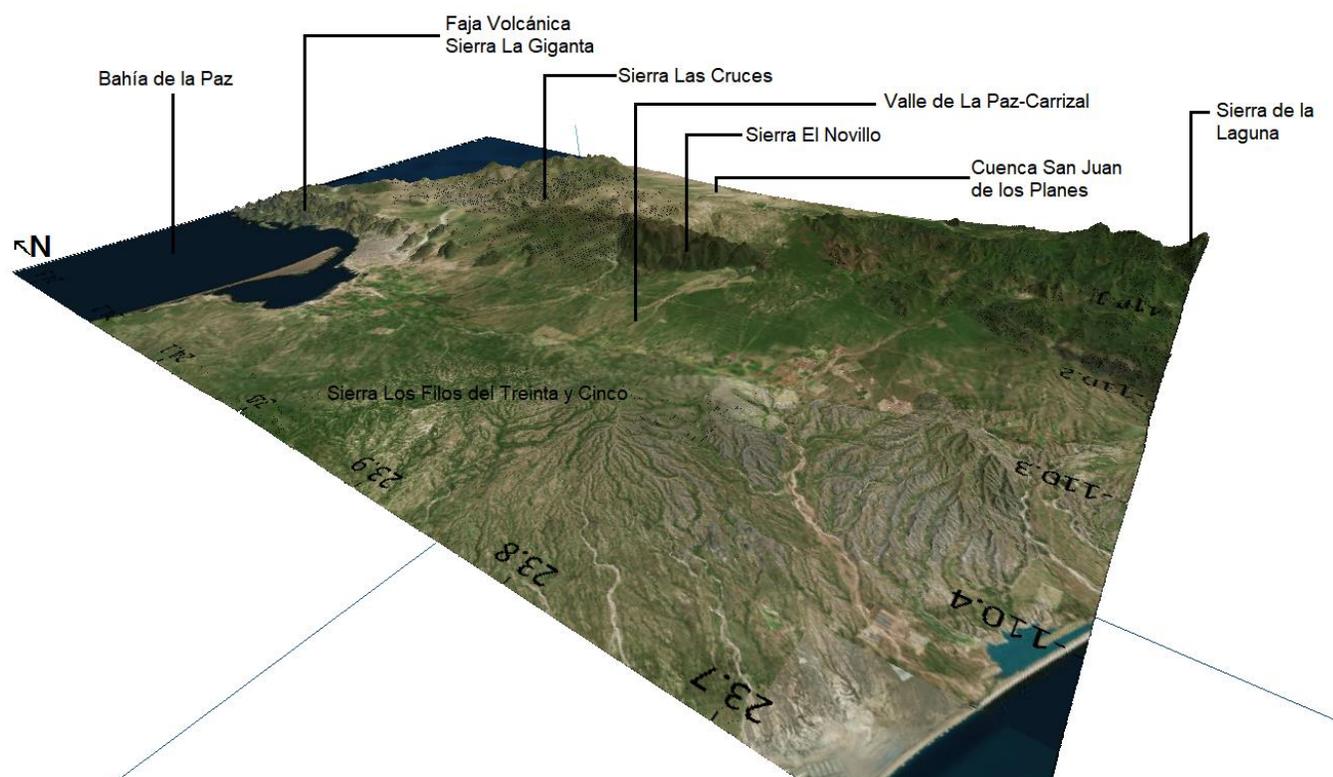


Figura 2.2 Modelo digital de la zona de estudio, donde pueden observarse las principales serranías.

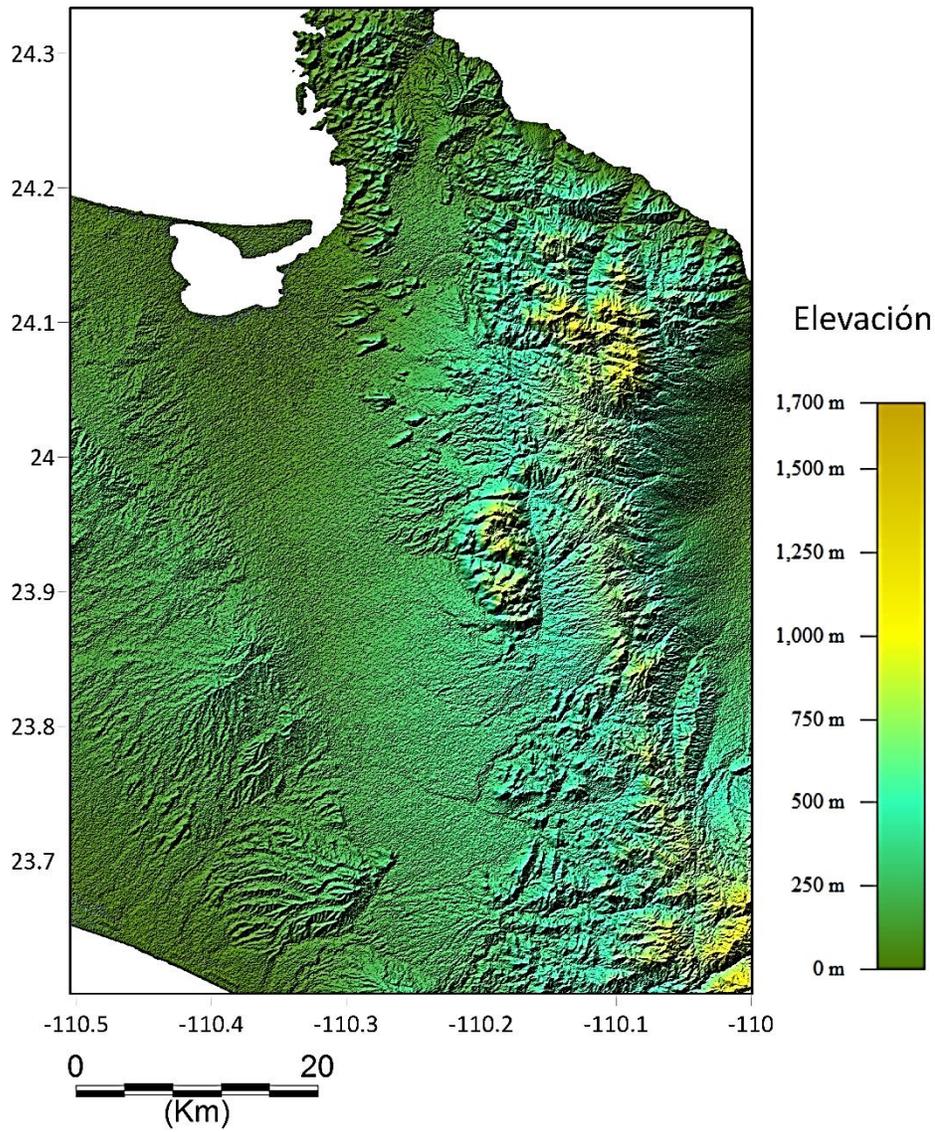


Figura 2.3. Modelo digital de elevaciones (Shuttle Radar Topography Mission)

## 2.2.1 Hidrología superficial

La franja norte de la ciudad de La Paz muestra un cabo “*Punta Coyote o El Coyote*” donde grandes cantidades de arroyos se ven acumulados en dirección al *Valle de la Paz* algunos de ellos intermitentes o carentes de agua, como *Arroyo del Novillo, Arrollo Cardonal, La Palma, Ardilla* entre otros que desembocan directamente en la bahía de La Paz. Al norte de la Sierra de *Las Cruces* también desembocan gran cantidad de corrientes de arroyos como *Arroyo el Saltito o Las Cruces*.

Al oriente arroyos secundarios desembocan sobre la cuenca *San Juan de los Planes*. Una corriente perenne al oeste de la Sierra Las Cruces forma *Agua de Vázquez*, al sur *Vinorama* y más al suroeste de la sierra es posible encontrar la presa *Mujer Bonita* y algunos otros arroyos que dirigen su cauce hacia el *Valle de la Paz*. Al sur de la zona en la sierra *El Novillo* se cuenta con diversas corrientes de drenaje como *El Salto, El Plátano* o la *Represa del Plan de Juárez*, de los cuales, una gran cantidad de ellos se redirigen hacia corrientes de mayor tamaño. En general la zona no cuenta con ríos de grandes dimensiones o cuerpos de agua superficiales notables. La mayoría tienden a ser corrientes que desaparecen o son intermitentes.

## 2.3 Tectónica

La península de Baja California ha estado involucrada en diversos procesos de formación y desplazamiento, sin embargo, hoy en día aún existe incertidumbre sobre la evolución de la apertura oceánica que originó la zona de rift, dando lugar al límite entre las placas Pacífico, Rivera y Norteamérica logrando una fase inicial de oceanización creando piso oceánico.

La evolución de este rift se ha explicado de dos maneras basándose en estudios magnéticos; una de las ideas principales es de *Stock & Hodges* en 1989 quien propone que esta apertura ocurrió en dos etapas, hace aproximadamente 12 *Ma* ocurrió un protogolfo donde la península actuó como una pequeña placa dentro de las placas norteamericana y del Pacífico provocando una apertura temprana del golfo. En la segunda etapa la Península debió principalmente estar adherida a la placa del Pacífico llevándola al desplazamiento posterior a 6 *Ma* con un movimiento oblicuo durante la apertura del golfo, entre las placas Pacífico-Norteamérica (Portilla Pineda 2012).

Otra segunda hipótesis sobre la evolución de la apertura de la Península de Baja California (Figura 2.4), la cual es más aceptada, es la cizalladura del borde de la placa del Pacífico y América del Norte descrita por *Fletcher y Grove* (2007) la cual comenzó a afectar la región de Baja California en la época del Mioceno medio-tardío haciendo que esta se desplazara hacia el noroeste a lo largo del sistema de fallas de San Andrés siendo este el modelo ampliamente aceptado para la evolución cinemática que actualmente se sigue desplazando. Se piensa que el movimiento de la placa de 12.3 a 6 *Ma* se dividió cinemáticamente en deslizamiento de impacto dextral (325 km) en fallas al oeste de Baja California y rifting ortogonal en el Golfo de California (90 km). Esto se conoce como la fase protogolfo debido a un rift. (Fletcher, Grove, Kimbrough, Lovera, & Gehrels, 2007)

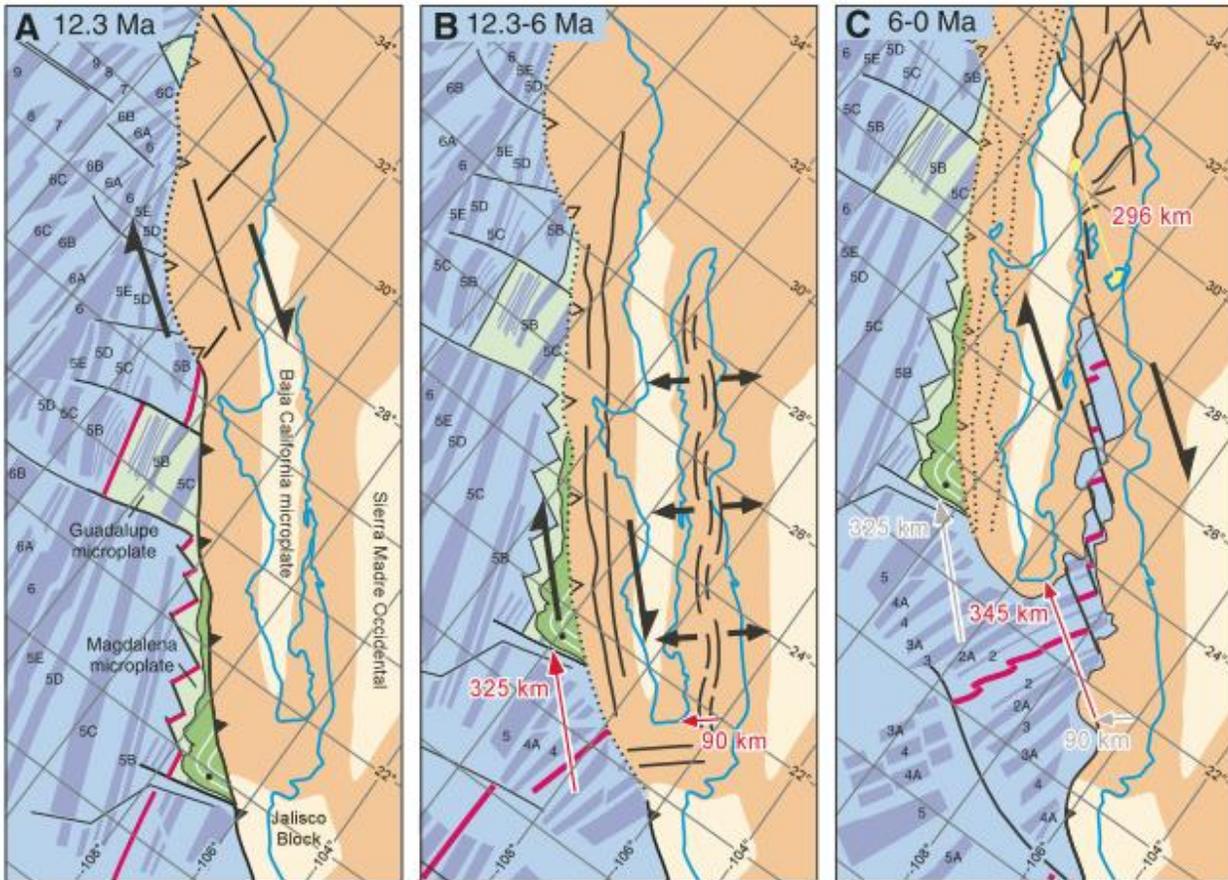


Figura 2.4. Evolución tectónica debido a rifts en tres etapas A) Dorsales oceánicas formadas junto con la cizalladura B) Movimiento de rift provocando un protogolfo de 12.3 a 6 Ma junto con un movimiento oblicuo. C) Se cree que las fallas Oeste del modelo quedaron inactivas dejando activas las zonas de rift. Tomado de Fletcher, Grove, Kimbrough, Lovera, & Gehrels, 2007.

## 2.4 Geología regional de la provincia geológica Complejo Plutónico de La Paz

Esta región localizada al sur de la península ha sido subdividida en nueve regiones geológicas en trabajos de Pérez Venzor 2013: *Todos Santos, El Bloque Los Cabos, Cuenca San José del Cabo, Bloque la Paz, Sierra La Gata, Cuenca San Juan de los Planes, Bloque La Trinidad, Región Valle de La Paz* y la *Región de la Faja Volcánica Sierra La Giganta*. La zona de estudio se encuentra en cuatro de ellas:

### 2.4.1 Región Punta Coyote

Es una región localizada al norte de la provincia geológica del *Complejo Plutónico de La Paz*, llamado así en los trabajos de Aranda Gómez y Pérez Venzor (1988) donde es subdividida en cuatro zonas: (Figura 2.5), al nororiente (zona I) la zona es caracterizada por una topografía abrupta debida a la actividad volcánica; aflorando brechas volcánicas del Mioceno provenientes de la Formación Comondú (Hausback 1984) sin clasificación y con un estratificación mal seleccionada, la altura máxima es de 350 metros y más al sur de esta zona es posible encontrar también secuencias de rocas piroclásticas y volcanoclásticas formando un relieve producido por la actividad volcánica y la erosión fluvial. En la zona norte a *La Paz*, afloran evidencias de riocita del Cenozoico (Hausback 1984), formando colinas de cimas planas inclinadas ligeramente hacia el poniente. Al nororiente de la *Región Punta Coyotes* es posible diferenciar el cambio de litología de la zona de brechas volcánicas con los conglomerados y areniscas que forman bajos relieves no mayores a los 100 m.s.n.m. que junto con la abundante red de drenaje es una

principal característica de la zona. Más al sur (zona III) el terreno forma un amplio valle carente de topografía accidentada, así como de afloramientos rocosos (Aranda Gómez & Pérez Venzor 1988) y finalmente al oriente de la región (zona IV) colindante con la región del *bloque de la Paz*, comienza la Sierra de las Cruces.

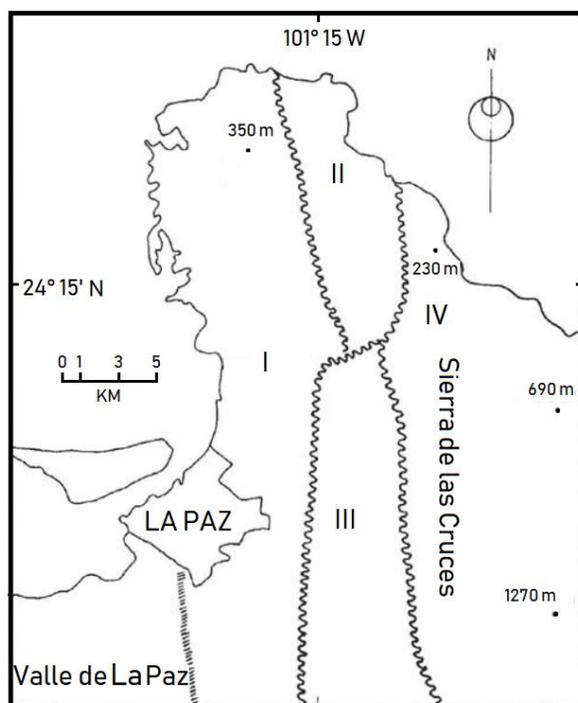


Figura 2.5. Distribución de las zonas del norte de la provincia geológica Complejo Plutónico La Paz. (Aranda Gómez & Pérez Venzor, 1988)

## 2.4.2 Bloque La Paz

Es una región ubicada al norte de la *Provincia Geológica del Complejo Plutónico de la Paz* caracterizada por su geología de origen plutónico que varían de gabro a diorita y granito en la sierra de *Las Cruces* y *El Novillo*.

Al oriente del *Bloque La Paz* se encuentra la *Sierra de las Cruces* la cual es un intrusivo clasificado como granito de color claro y holocristalino de granos medios a gruesos, con contenido de cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Se trata de un granito fechado de 87 a 94 Ma (Pérez -Venzor 2013). Al sur poniente de esta misma región se encuentra la sierra de *El novillo*, constituida por rocas intrusivas de composición máfica limitadas al sur de la *Sierra de las Cruces* donde se ha definido un contacto tectónico en la falla de *La Paz*, en el trabajo de Pérez-Venzor, (2013) describe la posibilidad de que el contacto sea intrusivo y la falla *La Paz* posterior. Al poniente, *El Novillo* está en contacto con la *Tonalita Buena Mujer*, de una forma transicional donde la tonalita rodea al gabro.

Al sur - oriente del *Bloque La Paz* se puede encontrar el *Bloque Los Cabos* en el cual predomina la roca granodiorítica intemperizada de grano grueso a medio, la granodiorita junto con la tonalita se considera como las rocas más dominantes en este bloque. En general la zona oriente de la provincia geológica del *Complejo Plutónico de la Paz* está distribuida de rocas plutónicas desde granodioritas hasta tonalitas además de derrames de lavas riodacíticas. (Pérez Venzor 2013)

### 2.4.3 Valle de La Paz

Es un área que se encuentra entre dos provincias geológicas de la península de Baja California; la *Provincia Geológica Complejo Plutónico de La Paz* y la *Provincia Geológica Faja Volcánica la Giganta*, al poniente del área de estudio. La mayor parte comprende depósitos sedimentarios del Cuaternario asociados con rasgos tectónicos y sistemas montañosos del mismo complejo plutónico. Esta zona se caracteriza por contener un sistema de abanicos aluviales (*Valle de La Paz-El*

*Carrizal*) con diferentes grados de evolución y desarrollo conformado por gravas y arenas sugiriendo varias fases en su desarrollo. Los principales sistemas de abanicos se encuentran al occidente del *Valle de La Paz* y al norte de *Todos Santos* siendo tres sistemas en un proceso intenso de erosión con ápices truncados por el *sistema de Falla El Carrizal* (Pérez Venzor 2013).

#### 2.4.4 Todos Santos

Gran parte de la zona de estudio se encuentra delimitada en esta región, en la que aflora una gran cantidad de rocas metamórficas, aunque también existe la presencia de rocas intrusivas de composición máfica dentro del flanco occidental del sistema montañoso, en los límites con el cinturón metamórfico que abarca desde *Todos Santos* hasta la región de la Paz, siendo una franja casi paralela al cinturón metamórfico y al borde occidental del Bloque Los Cabos. Estos intrusivos están alineados con el *sistema de falla La Paz*. Las variaciones composicionales van de gabro a diorita. En la región de *El Rosario* a *Todos Santos* se pueden encontrar intrusivos de gabros, así como rocas máficas en la región *El Veladero*.

Las pizarras y las filitas son encontradas entre las regiones de *Todos Santos* y la región de *El Triunfo* (Figura 2.8). En dirección oriente es posible encontrar esquistos con intercalaciones de mármol. En la parte occidente de la región *La Muela-El Veladero* existen milonitas en contacto con otras rocas metamórficas (metapelitas y filitas) y al oriente de esta es posible encontrar rocas félsicas-plutónicas (cuarzo-monzonita). Al norte de *La Muela* se tiene una amplia distribución de gneis anfibolítico y metasedimentos de esquisto véase en la Figura

2.8. La figura 2.6 muestra la columna estratigráfica de la Región indicando la edad relativa de formación plutónica, principalmente en la era Mesozoica.

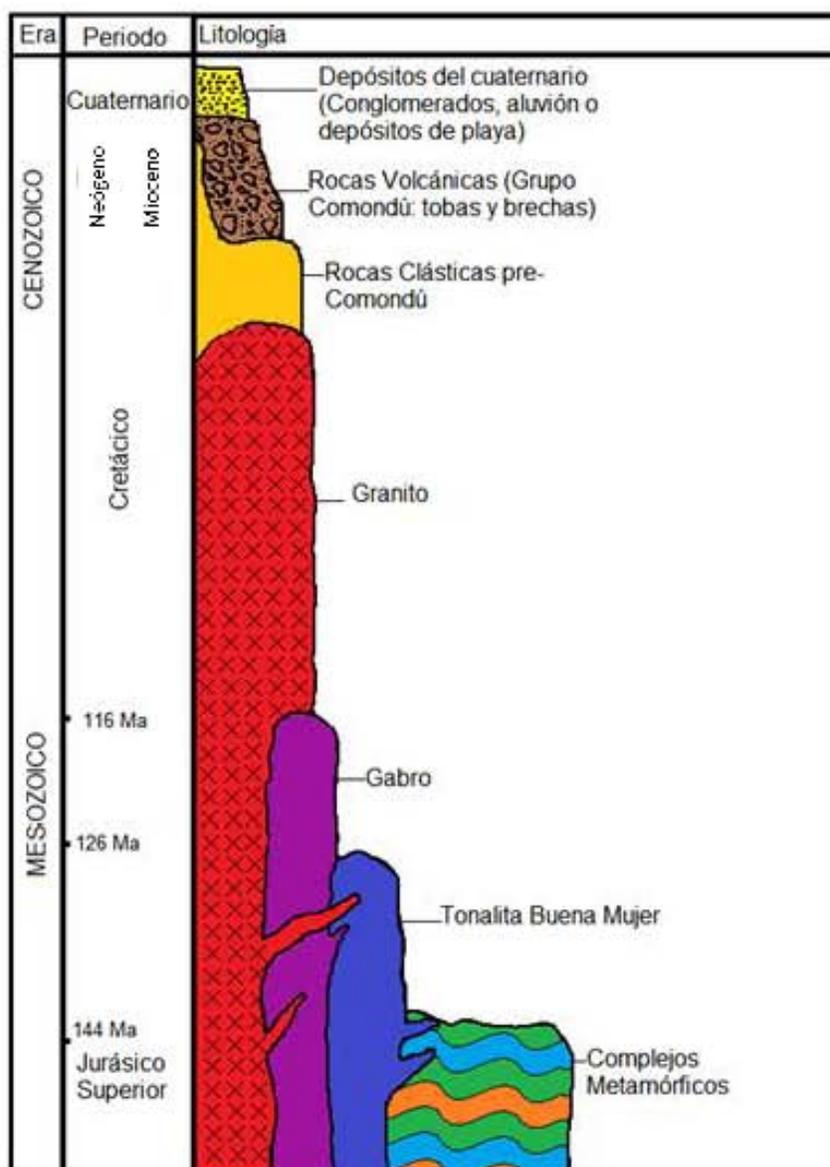


Figura 2.6. Columna Litológica de la región Todos Santos a La Paz mostrando las relaciones entre el complejo metamórfico y el ensamble plutónico, editada de trabajos de Pérez Venzor (2013)

## 2.5 Rasgos estructurales

A lo largo de la zona de estudio se han reportado diferentes estructuras de fallamiento y fracturas debidas a la deformación frágil y dúctil de la zona. En diferentes estudios se han descrito a estos sistemas de fallas como asociaciones de los sistemas de Cuencas y Sierras.

El sistema de fallas *El Carrizal* localizado del occidente al sur de la ciudad de La Paz contiene una extensión de casi 60 km con dirección NW-SE caracterizada por presentar tres escarpes, el mayor coincidente con la dirección de la falla principal y las otras casi paralelas a la falla, pero con trazos curvilíneos (Pérez Venzor 2013) . En la zona de fallas se han generado reportes de enjambres sísmicos donde se muestran a los mecanismos focales obtenidos en los reportes de *González et al. (2004)* sugerentes a la actividad provocada por la falla El Carrizal.

Al oriente de la ciudad de La Paz se encuentra una estructura que genéricamente ha recibido el nombre de "*Falla de la Paz*" la cual ha generado discusión ya que se han realizado diferentes interpretaciones sobre su origen y ubicación. Trabajos como los de *Flecher et al. (2003 y 2007)* o *Ramos -Velázquez 1998*; han considerado que desde el punto de vista tectónico no es importante o no existe. Se trata de una estructura inferida transpeninsular con una orientación N-S que al norte de La Paz la falla está encubierta debajo de un valle en dirección norte-sur subyaciendo terrazas aluviales ricas en gravas que aparentemente no fueron separadas por fallas. (Hausback, 1984). Aranda Gómez y Pérez Venzor consideran a la falla de *La Paz* una estructura importante que ha evolucionado desde los movimientos compresivos en el Mesozoico con periodos de activación posteriores al Cretácico.

En el costado nororiental de la *Sierra las Cruces* se prolonga un sistema de fallas con orientación N-S conocido como *Sistema de Fallas San Juan de los Planes* que contiene diversas fallas subparalelas con edad aproximada de 85.44 Ma que de forma inversa afecta a las rocas plutónicas de la sierra (Pérez Venzor, 2013).

Diversos mapeamientos geológicos han sido realizados en la zona que se describe, entre ellas la Carta Geológica San José del Cabo [F12-2-3-5-6] o las Cartas Geológico-Mineras del Servicio Geológico Mexicano: San José del Cabo y La Paz [F12-10-11] (Figura 2.7).

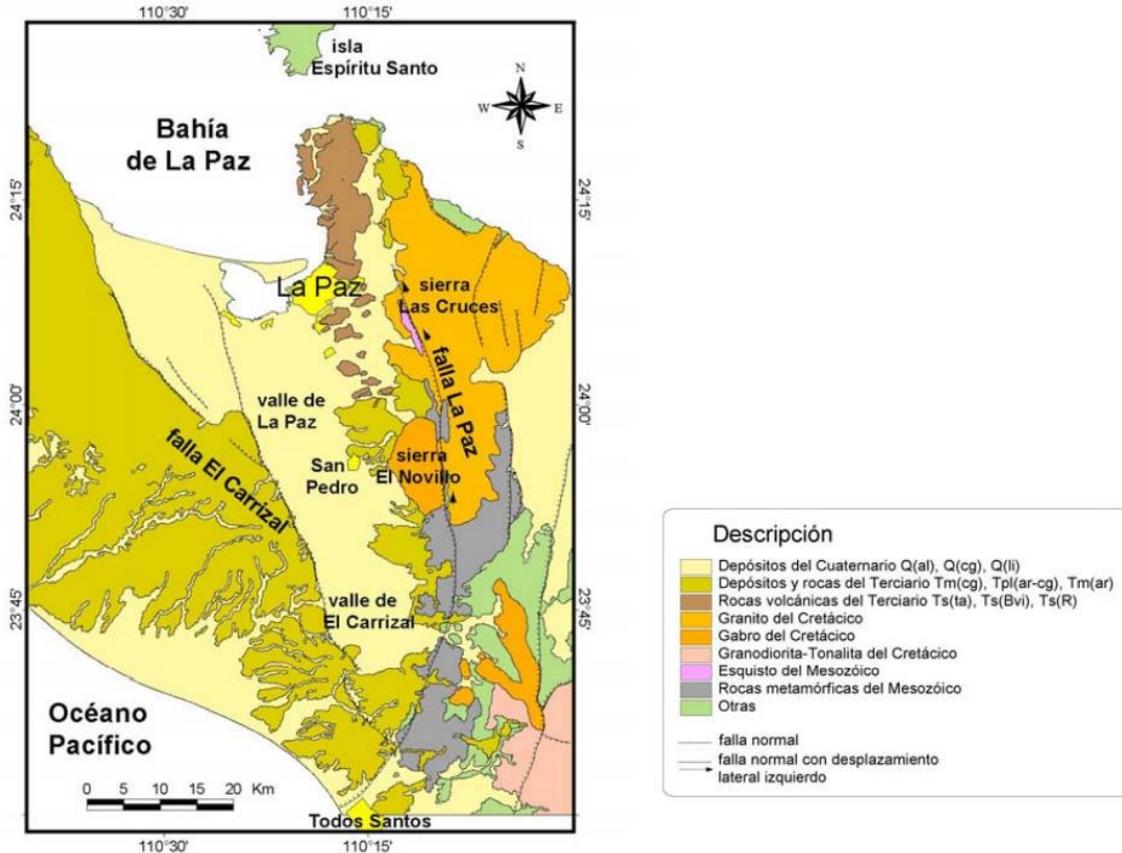


Figura 2.7. Mapa geológico-estructural editado de las cartas geológico-mineras y de Álvarez et al. (1997) en los trabajos de (Cruz et al. 2011)

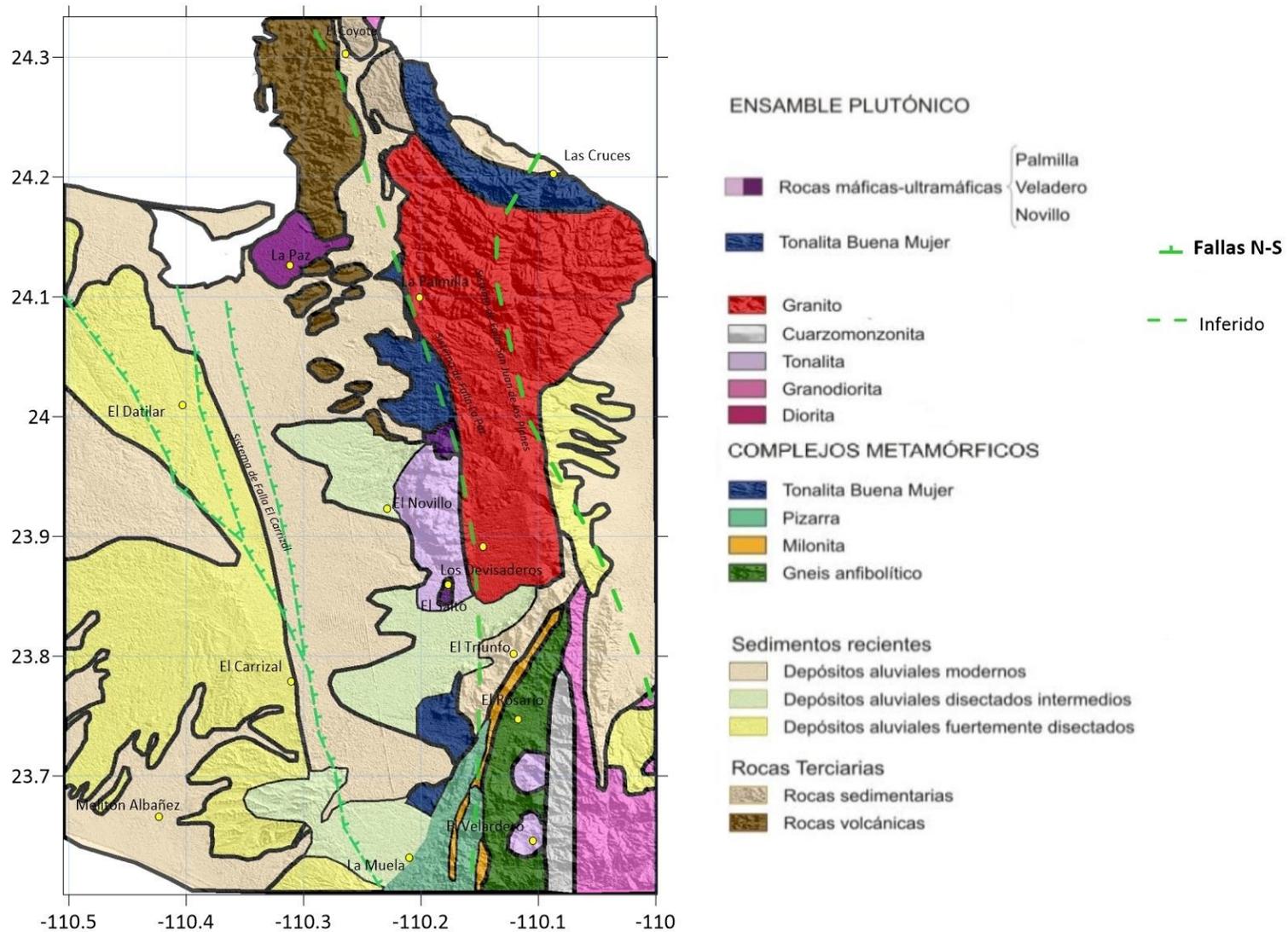


Figura 2.8 Mapa geológico-estructural editado y obtenido de Pérez Venzor (2013) donde se pueden observar las diferentes litologías de la zona de estudio

# Capítulo III

## Fundamentos Teóricos



En este capítulo se describirá la información teórica básica necesaria para comprender el método magnetométrico. Una descripción sobre el método suele ser detallada, extensa y con amplios desarrollos matemáticos, sin embargo, en este trabajo serán descritos los fundamentos necesarios para el desarrollo de esta tesis.

### 3.1 Campo magnético

La teoría magnética clásica explica la existencia de polos magnéticos asemejándose a las cargas eléctricas o la fuerza entre masas en las teorías de gravedad y eléctrica en donde existe una fuerza descrita por la ley de Coulomb de forma:

$$F = \left( \frac{p_1 p_2}{\mu r^2} \right) r_1 \quad (\text{ec. 3.1})$$

Donde  $\mu$  es la permeabilidad del medio en el que se encuentren los polos  $p_1$  y  $p_2$ . Es importante reconocer que el dipolo magnético es un concepto fundamental de la teoría magnética clásica en donde existe una fuerza  $F$  actuando entre los polos magnéticos de forma repulsiva o atrayente. Los polos magnéticos nunca están solos por lo que no existen los polos magnéticos libres en la naturaleza y sus intensidades serán de la misma magnitud, aunque en signos contrarios. (Cantos Figuerola, 1974)

Dada la naturaleza de los polos magnéticos existen representaciones geométricas de los recorridos a lo largo de los cuales un polo magnético libre se movería cerca del dipolo (Figura 3.1), estas son llamadas líneas de campo.

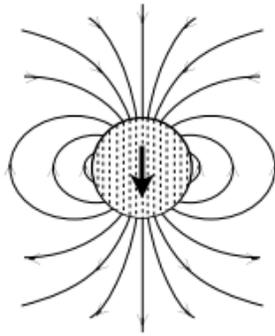


Figura 3.1. Campo Magnético debido a una esfera uniformemente magnetizada. (Lowrie 2007)

El patrón de geometría del campo magnético estará representado por las líneas del campo, donde cualquier punto dentro de él existirá una fuerza dirigida de forma tangencial sobre la línea del campo y con la intensidad de la fuerza proporcional al número de líneas de campo por unidad de área en una sección transversal (Lowrie 2007).

Describiendo el comportamiento del campo magnético se definirá  $B$  al campo debido a un polo de fuerza  $m$  a una distancia  $r$  del polo ejerciendo una fuerza sobre un polo positivo unitario en ese punto con una permeabilidad relativa  $\mu_R$ .

$$B = \frac{\mu_0 m}{4\pi\mu_R r^2} \quad (ec. 3.2)$$

El campo magnético  $B$  también puede ser descrito con la ley de Gauss del electromagnetismo:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (ec. 3.3)$$

Expresando que el flujo campo magnético siempre debe cerrarse sobre sí mismo formando un campo solenoidal, es decir, si el campo se encuentra en una superficie cerrada, el número neto de líneas de inducción que atraviesan la superficie es cero (Blakely 1996).

### 3.2 Densidad de flujo y permeabilidad magnética

La intensidad del campo magnético da origen a un flujo magnético, al igual que una intensidad de campo eléctrico puede dar lugar a un flujo de carga eléctrica. La densidad de ese flujo magnético es medida por unidad de área que le atraviesa, el cual también es llamado inducción magnética representada por  $B$ , inducido por la intensidad de campo  $H$  y la permeabilidad magnética del medio  $\mu$  quedando una relación de forma:

$$B = \mu H \text{ (ec. 3.4)}$$

En el Sistema Internacional de Unidades el campo  $H$  es medido en ampere por metro definido en términos de flujo de corriente eléctrica, es decir, si una corriente es atravesada por una bobina, un flujo magnético fluye a través y alrededor del anillo de la bobina que surge de una fuerza de magnetización  $H$ .

El campo  $B$  por otra parte, la unidad de flujo del campo es volt por segundo en un área determinada  $V \cdot s \cdot m^{-1}$  también llamado *tesla* (T) debido a que el tesla es demasiado grande como unidad de medición, en geofísica las densidades de flujo se expresan más convenientemente en nanotesla ( $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$ ) que también es llamado gamma ( $\gamma$ ).

La permeabilidad magnética está ligada plenamente a estos dos campos  $H$  y  $B$  y es definida como la capacidad de un material para transmitir un flujo magnético. En un medio diferente al vacío la permeabilidad es descrita de la forma

$$B = \mu H \quad \text{ec. (3.5)}$$

### 3.3 Magnetización y susceptibilidad magnética

Cuando un material es colocado en un campo magnético éste puede magnetizarse adquiriendo la dirección de dicho campo el cual se pierde cuando el material es retirado del campo. El momento magnético por unidad de volumen de los dipolos elementales alineados se le es llamado magnetización (Figura 3.2), denotado  $M$  (Kearey, Brooks, and Hill 2013).

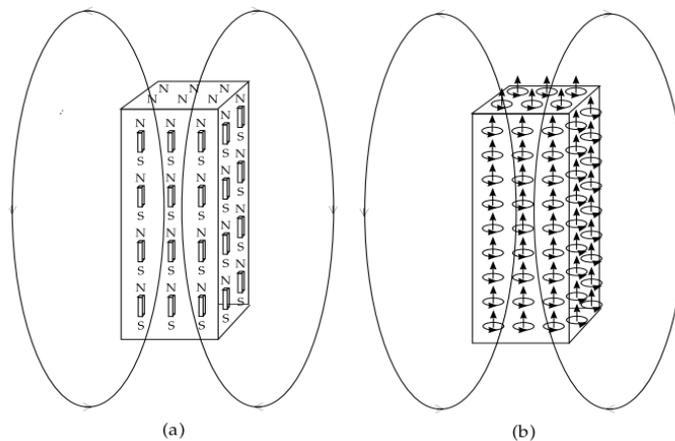


Figura 3.2. Diagrama de magnetización de un material, vista desde dos formas: (a) pequeños dipolos o (b) spines equivalentes; en un imán permanente la fuente física del campo  $B$  del material es un sistema de corrientes eléctricas a escala atómica. (Lowrie 2007)

El momento magnético es una expresión de un dipolo expuesto a un campo magnético que tiende a rotar ejerciendo un par o momento elemental. La

magnetización de un cuerpo está definida por su momento magnético por unidad de volumen con una dirección y magnitud

El grado de sensibilidad a la magnetización que adquiere un cuerpo debido a un campo magnético es denominado susceptibilidad magnética. Dentro del cuerpo, los momentos dipolares sufrirán de una alineación en dirección de la magnetización dando por hecho que el grado de magnetización es proporcional a la fuerza de magnetización, es decir:

$$\vec{M} = \chi_M \vec{H} \text{ (ec. 3.6)}$$

En un medio lineal e isótropo  $\chi_M$  la susceptibilidad magnética de un material hará que la magnetización y la intensidad  $H$  sean proporcionales. La susceptibilidad magnética puede ser entendida como el número de dipolos dentro de una unidad de volumen de un material con la facilidad de orientarse a un campo magnético inducido. (Nettleton 1990)

### 3.4 Histéresis

A medida que se va aumentando un campo externo, muchos materiales magnetizables llegan a su punto magnético de saturación, y es aquí donde casi todos los momentos magnéticos de un material ferromagnético se alinean de forma paralela con el campo externo, al llegar a este punto no hay forma que la magnetización aumente. Algunos materiales paramagnéticos también tienen la cualidad de saturación cuando se les ha inducido un campo lo suficientemente intenso. Al inducir un campo en sentido inverso la magnetización puede llegar a cero (Young et al. 2009).

Como puede observarse en la ecuación 3.6, al aumentarse  $H$  se aumenta la magnetización de forma que al tomar valores negativos de  $H$  éste puede llegar a un punto de máxima saturación negativo generando un ciclo llamado histéresis, teniendo un área bajo la curva representando la energía perdida por unidad de volumen (W.M. Telford, Geldart, and R.E. 1991). En el diagrama de la figura 3.3 puede observarse este bucle.

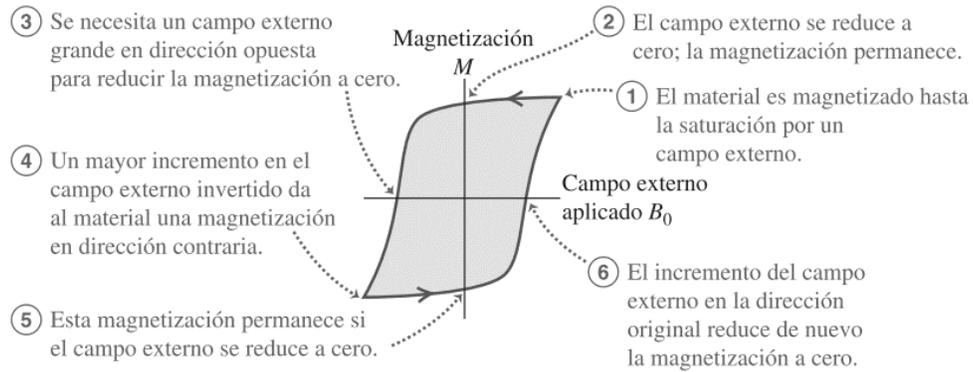


Figura 3.3. Ciclo de histéresis donde el campo magnético inducido puede magnetizar y desmagnetizar un material generando un ciclo. (Young et al. 2009)

Sí el campo que magnetiza es reducido a cero, un material ferromagnético puede retener parte de esta magnetización inducida llamándola magnetismo residual o remanente.

### 3.5 Magnetización remanente

La magnetización de las rocas depende principalmente de los campos magnéticos presentes y del contenido de material magnético que contenga. La magnetización remanente contribuye al campo en amplitud y dirección dependiendo del pasado magnético de las rocas. Este puede generarse de múltiples formas:

La termorremanencia (TRM) ocurre cuando los materiales magnéticos son enfriados por debajo del punto de Curie en presencia de un campo externo y suele encontrarse en la magnetización remanente residual. En el caso de rocas sedimentarias, en el depósito de granos finos, los minerales magnéticos contenidos tienden a orientarse en la dirección del campo magnético local, dando lugar a una magnetización remanente detrital (MRD). La magnetización química remanente (MRQ) ocurre cuando los granos magnéticos incrementan su tamaño o han cambiado de una forma a otra como resultado de la acción química a temperaturas moderadas debajo del punto de Curie, algunas rocas sedimentarias y metamórficas pueden verse afectadas. Otro proceso de magnetización es la isothermal (IMR); ocurre cuando se elimina el campo externo dejando un residuo magnético. Un claro ejemplo son los rayos que dejan magnetizadas pequeñas zonas. Otro tipo de magnetización adquirida es la magnetización remanente viscosa, la cual ocurre por la exposición a un campo magnético en grandes periodos de tiempo siendo la magnetización más estable. (W.M. Telford et al. 1991)

## 3.6 Magnetismo de los materiales terrestres

Toda la materia a escala atómica es magnética, pues cada átomo actúa como un dipolo debido al giro de sus electrones. La teoría cuántica permite que dos electrones existan en la misma capa de electrones siempre que sus espines estén en direcciones opuestas. En general los materiales tienen propiedades magnéticas que se clasifican como diamagnéticas, paramagnéticas o ferromagnéticas.

### 3.6.1 Diamagnetismo

Los materiales con valor de susceptibilidad magnética negativa son llamados diamagnéticos, de tal forma que la intensidad magnética inducida en la sustancia está en dirección opuesta a la intensidad del campo magnético y la densidad de flujo en dicha sustancia es menor que la que existiera si el espacio correspondiente fuera vacío. En una magnetización débil proporcional a la intensidad de campo en la dirección opuesta al campo la magnetización se desvanece cuando se elimina el campo magnético aplicado. Los materiales diamagnéticos muestran una sensibilidad diamagnética reversible, débil y negativa, así como independiente de la temperatura. Muchos minerales importantes formadores de rocas pertenecen a esta clase, entre ellos el cuarzo y la calcita que tienen susceptibilidades alrededor de  $-1 \times 10^{-6}$  en unidades SI. (Lowrie 2007)

### 3.6.2 Paramagnetismo

En una sustancia paramagnética el momento magnético del átomo no es nulo debido a una disposición simétrica insuficiente en los orbitales, éstos momentos magnéticos están en todas direcciones haciendo a la sustancia parecer no magnéticas, sin embargo en la presencia de un campo exterior, éstos se ordenan de forma que refuerzan al campo (Cantos Figuerola 1974). En general la susceptibilidad de las sustancias paramagnéticas son positivas existiendo gran número de rocas paramagnéticas como gneises, pegmatitas, dolomitas o sienitas (Parasnis, 1962).

### 3.6.3 Ferromagnetismo

El ferromagnetismo es un fenómeno que se presenta en estado sólido cuando las fuerzas atómicas de la sustancia son tan grandes para producir que los momentos atómicos sean paralelos. con un valor mayor en susceptibilidad que los paramagnéticos (Cantos Figuerola 1974). El momento magnético de los átomos de estas sustancias suelen alinearse a sí mismos en una sola dirección incluso sin la presencia de un campo externo, en estos materiales ferromagnéticos al aumentar la temperatura suele desaparecer el campo magnético al llegar a la de Curie (Parasnis 1962). El hierro, el acero, el cobalto, el níquel y la magnetita son algunos ejemplos de estas sustancias.

En los cristales de óxido, los iones de oxígeno generalmente mantienen a los iones metálicos alejados, por lo que no es posible el intercambio directo de electrones entre los iones metálicos a esto se le conoce como antiferromagnetismo.

En algunos minerales la interacción entre espines magnéticos se hace posible mediante el intercambio de electrones de un ion metálico a otro, haciendo que la susceptibilidad de un cristal antiferromagnético sea débil y positivo, y la magnetización remanente no sea posible. (Lowrie 2007)

### 3.6.4 Respuesta Magnética en las rocas

Por lo general las rocas sedimentarias son caracterizadas por su nula respuesta magnética. Usualmente en la interpretación de datos geofísicos se deduce que las fuentes magnéticas deben estar debajo de la base de la secuencia sedimentaria. Un ejemplo es la identificación de las cuencas sedimentarias ocultas en la exploración petrolera. El grosor de la secuencia sedimentaria puede ser inferido mediante la determinación de las profundidades de las fuentes magnéticas "basamento magnético" en un área de estudio. Existen excepciones complejas que pueden crear confusión como los depósitos sedimentarios de hierro que pueden causar dificultades con esta suposición con ciertos depósitos de hierro, secuencias volcánicas o piroclásticas ocultas dentro de una secuencia sedimentaria o intrusivos emplazados en los sedimentos.

Existe un amplio rango de valores magnéticos dentro de las rocas ígneas. Un ejemplo de ello son las rocas plutónicas de composición máfica y lopolitos que pueden ser altamente magnéticos (aunque existen registros donde no lo son), por otro lado, las rocas graníticas plutónicas pueden llegar a ser débilmente magnéticas. Los diques y sills de composición máfica suelen contener una fuerte magnetización remanente debido a su rápido enfriamiento (Reeves 2005). Cualquier proceso de metamorfismo o alteración que crea o destruye los minerales

magnéticos es la causa principal de los cambios en el magnetismo de las rocas, especialmente si los minerales son ferromagnéticos, así el rango de las rocas metamórficas dependerá principalmente del contenido de material ferromagnético. (Dentith et al. 2014)

### 3.7 Campo magnético terrestre

Los procesos convectivos de hierro metálico en la parte líquida del núcleo externo terrestre da origen a un campo magnético dipolar (Tarbuck et al. 2005), asemejándose a una barra magnética alineada aproximadamente sobre el eje de rotación.

La naturaleza del campo magnético dipolar terrestre es un vector con magnitud y dirección donde la intensidad del campo  $B$  es medida en nanoteslas (nT). Este campo magnético terrestre es débil teniendo una máxima intensidad en los polos magnéticos donde su valor es aproximado a 60 000 nT. El vector magnético puede ser expresado en componentes paralelos a los ejes ortogonales teniendo así las direcciones paralelas al norte al este y verticalmente hacia abajo.

### 3.8 Componentes del campo magnético terrestre

La magnitud del vector magnético del campo terrestre está dada por la fuerza de campo  $F$  que puede proyectarse en dos ángulos; la declinación  $D$  que es el ángulo entre el meridiano magnético y el meridiano geográfico y la inclinación  $I$  que es el ángulo al cual el vector magnético se inclina sobre una horizontal (Figura 3.4). Estos elementos pueden ser expresados en coordenadas esféricas ( $F, D, I$ ) y cartesianas ( $X, Y, Z$ ) (Lowrie 2007).

$$X = F \cos(I) \cos(D) \quad Y = F \cos(I) \sin(D) \quad Z = F \sin(I) \quad F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

$$D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right) \quad I = \arctan\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) \quad (\text{ec. 3.7})$$

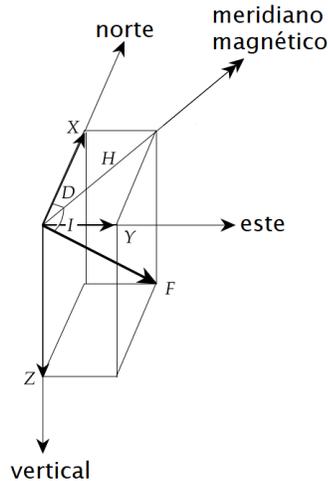


Figura 3.4. Elementos del campo magnético en coordenadas cartesianas o descrito por su ángulo de inclinación y declinación. (Lowrie, 2007)

Los valores de campo pueden ir de positivos a negativos según la posición de su vector. Será positiva si el vector se encuentra por debajo del plano horizontal, y la declinación será positiva si la dirección va hacia el este, de otra manera serán negativas. (W.M. Telford et al. 1991)

Dentro del mismo sistema pueden ser descritas las ecuaciones la componente horizontal H en términos del campo B y de la de Intensidad total.

$$H = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (\text{ec. 3.8})$$

$$F = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (\text{ec. 3.9})$$

Un punto medido en la superficie está compuesto de la interacción los campos magnéticos externos e internos del planeta. El valor del campo interno de

la Tierra es aproximadamente el 97% del campo total interno. Su valor dependerá del campo geomagnético formado por las cargas eléctricas en el sistema convectivo del núcleo externo y la parte restante del campo cortical creado por las cantidades de material magnético de la corteza. Esto último geofísicamente representando por anomalías que permiten conocer la repartición de materiales sobre la corteza. El campo externo está ligado a las cargas de corrientes inducidas en la ionosfera debidas al movimiento convectivo de la atmósfera generadas por radiación solar así como la influencia de la Luna y el Sol. (Cantos Figuerola 1974).

### 3.9 Variaciones temporales.

El campo magnético no es constante en ningún punto de la superficie. Este experimenta cambios en su valor de tipo natural, los cuales pueden estar en diferentes escalas de tiempo que van desde segundos hasta millones de años.

#### 3.9.1 Variación diurna

Esta variación depende principalmente de ciclo diario de rotación terrestre, además del viento solar de partículas cargadas provenientes del sol, incluso en condiciones normales, de pocas o nulas alteraciones solares, tiende a distorsionar las regiones externas del campo magnético terrestre

La corrección principal que debe aplicarse a un conjunto de observaciones magnéticas es para la variación diurna del campo terrestre. (Parasnis, 1962)

### 3.9.2 Tormentas magnéticas y micropulsaciones.

Las tormentas magnéticas son periodos de variación magnética usualmente debida a la actividad solar, las variaciones pueden ser del orden de cientos de nT, con periodos de hasta 24 horas. El efecto puede ser mayormente observado en zonas alrededor de los polos magnéticos.

Otro tipo de alteraciones magnéticas son las micropulsaciones que ocurren en periodos pequeños de tan solo algunos minutos con amplitudes de varios nT. La captura de la información magnética puede variar tanto en las pulsaciones como en las tormentas de un lugar a otro. Estos factores operan en escalas de tiempo que son cortas en comparación con el tiempo que se tarda en realizar un levantamiento magnético, que generalmente se calcula en semanas o meses requiriendo un monitoreo cuidadoso de los datos en los cuales es posible mapear confiablemente anomalías magnéticas fiables e invariables en el tiempo.(Reeves 2005)

### 3.9.3 Variación secular.

Son variaciones magnéticas en una mayor escala de tiempo que sólo se aprecian al comparar valores medios durante varios años reflejando la deriva magnética en zonas de la superficie terrestre.

Los efectos de estos cambios en una localidad determinada son predecibles con un cierto grado de precisión para períodos de cinco a diez años en el futuro, pero tales predicciones deben actualizarse a medida que estén disponibles las

últimas grabaciones de observadores magnéticos y satélites terrestres (Reeves 2005).

### 3.9.4 Inversión magnética

El traslado de los polos magnéticos se puede evidenciar gracias a las rocas propagadas en el fondo marino o en flujos de lava mostrando la información remanente captada en la dirección del campo magnético que fue formada. Técnicas modernas de datación permiten unir las edades rocas recolectadas. Tales estudios en todo el mundo muestran que todo el campo magnético de la Tierra ha sido invertido repetidamente en su polaridad a intervalos irregulares de mil años hasta millones de años. El registro magnético de polaridad que tienen las rocas en el último cambio es llamado normal. La construcción de una escala de tiempo de inversión magnética global es de fundamental importancia para la interpretación histórica de la tierra. Entre otras cosas, las inversiones del campo se registran en la magnetización remanente de la corteza oceánica lo que permite fechar la edad del suelo oceánico e inferir las posiciones anteriores de los continentes. (Reeves 2005)

### 3.10 Campo de referencia geomagnético internacional (IGRF)

El Campo de referencia geomagnético internacional es una serie de modelos matemáticos que describen la parte interna a gran escala del campo magnético de la Tierra entre las épocas de 1900 al presente. El modelo representa al campo  $B$  en términos de la distancia radial de la Tierra, latitudes longitudes y ángulos, así como los coeficientes de Gauss. El modelo del campo parte del gradiente del potencial magnético:

$$B(r, \phi, \theta, t) = -\nabla U(r, \phi, \theta, t) \quad (\text{ec. 3.10})$$

Los científicos utilizan el IGRF en una amplia variedad de estudios, por ejemplo, sobre la dinámica del campo central de la Tierra, el clima espacial o las anomalías magnéticas locales impresas en la corteza terrestre.

El modelo IGRF debe revisarse periódicamente para seguir los cambios temporales continuos del campo geomagnético generado en el núcleo externo de la Tierra. (Thébault et al. 2015)

### 3.11 Anomalía magnética

La medición realizada por un magnetómetro en cualquier punto terrestre tendrá un valor escalar el cual no contendrá información de la dirección del campo. El valor escalar puede ser considerado como un vector resultado de la suma del campo calculado por IGRF en ese punto y un valor  $\Delta F$  de campo anómalo. (Reeves 2005)

Si  $T$  representa el campo total en cualquier punto y  $F$  es el campo regional en la misma zona,  $\Delta F$  se entenderá como una perturbación de  $F$  debido a alguna fuente de anomalía magnética

$$\Delta T = T - \Delta F \quad (3.10)$$

Lo ideal sería conocer los tres componentes de  $\Delta F$ , o al menos un solo componente de  $\Delta F$ , para comprender la fuente de la anomalía, bajo las condiciones que generalmente prevalecen en los estudios magnéticos de la corteza. La anomalía del campo total es una buena aproximación de un componente de  $\Delta F$  que puede considerarse una función armónica. El componente  $F$  estará orientado en la dirección del campo principal de la Tierra en ese punto, mientras que el campo magnético debido a una fuente local,  $\Delta F$ , puede, en principio, tener cualquier

orientación. Sin embargo, los dos componentes se pueden trazar en un plano, y  $F$  es normalmente al menos dos órdenes de magnitud mayor que  $\Delta F$ . La primera de estas condiciones se cumple si el campo anómalo es pequeño en comparación con el campo regional (Figura 3.5). Si  $|F| \gg |\Delta F|$ , entonces  $\Delta T = F \cdot \Delta F$  (Blakely 1996)

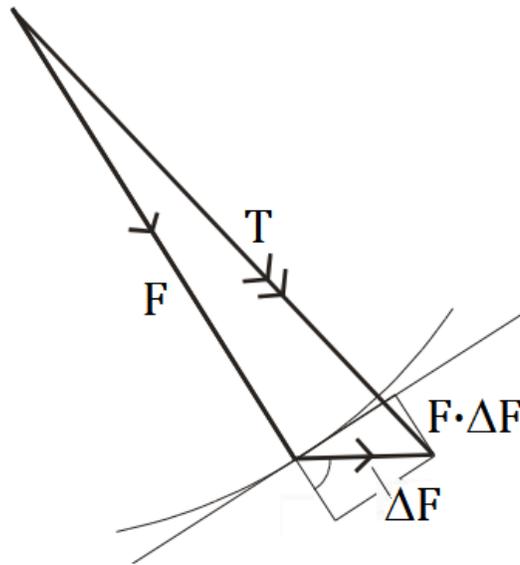


Figura 3.5. Plano donde se representan los vectores de campo total  $T$  y sus relaciones con el campo  $F$  calculado por IGRF y la anomalía magnética  $\Delta F$ . Tomado y editado de Reeves, 2005.

Las observaciones dadas sobre un cuerpo magnético local describen que su valor de campo magnético tiende a reforzar el campo geomagnético, así como lugares donde el campo local se opone principalmente al campo geomagnético. Entonces de aquí se deduce que un cuerpo magnético compacto simple produce una anomalía magnética que tiene partes positivas o negativas encontrando anomalías "dobles" (Figura 3.6), aunque sus formas exactas dependen de muchos factores, incluyendo la inclinación del campo terrestre. (Reeves 2005)

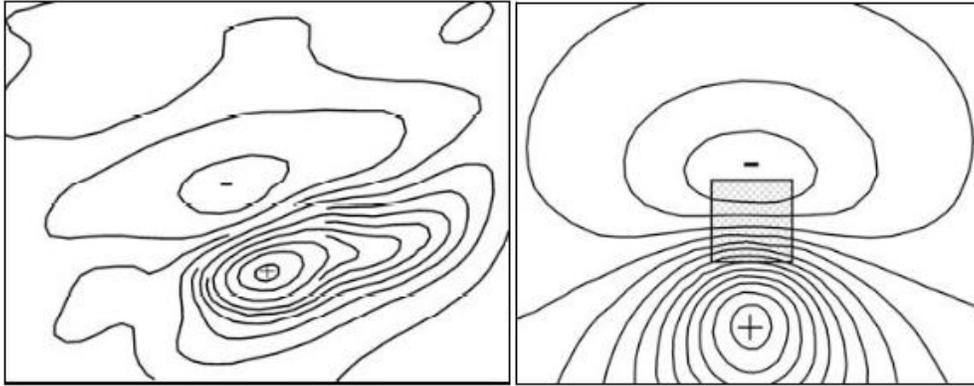


Figura 3.6. Respuestas comunes de dipolos magnéticos del campo total o del campo anómalo  $\Delta F$  tomado de Reeves, 2005.

### 3.12 Reducción al polo

Las direcciones del campo magnético terrestre contienen variaciones en dirección y magnitud dependiendo de la latitud en la que se encuentren modificando la intensidad. En el ecuador terrestre el campo magnético debido a las líneas semi-horizontales a la superficie es de menor intensidad mientras que en los polos magnéticos es mayor debido a la inclinación del campo afectando la medición de la componente vertical (Figura 3.7) y deformando las anomalías magnéticas generando asimetrías que serán corregidas con el proceso de reducción al polo.

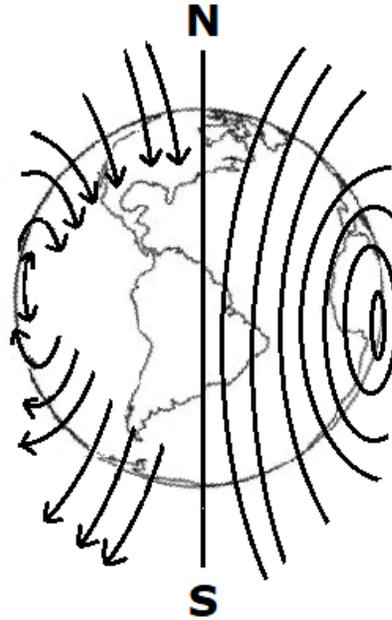


Figura 3.7. Líneas de fuerza magnéticas que generan el campo magnético, en la parte izquierda del diagrama puede observarse la dirección en la que el campo penetra, con una magnitud proporcional al tamaño del vector. (Tomado y editado de Nettleton, 1976).

La forma de la anomalía magnética es afectada por la inclinación del campo magnético, así como las variaciones en la geometría de los cuerpos y su dirección de magnetización (Figuras 3.8\_a, 3.8\_b).

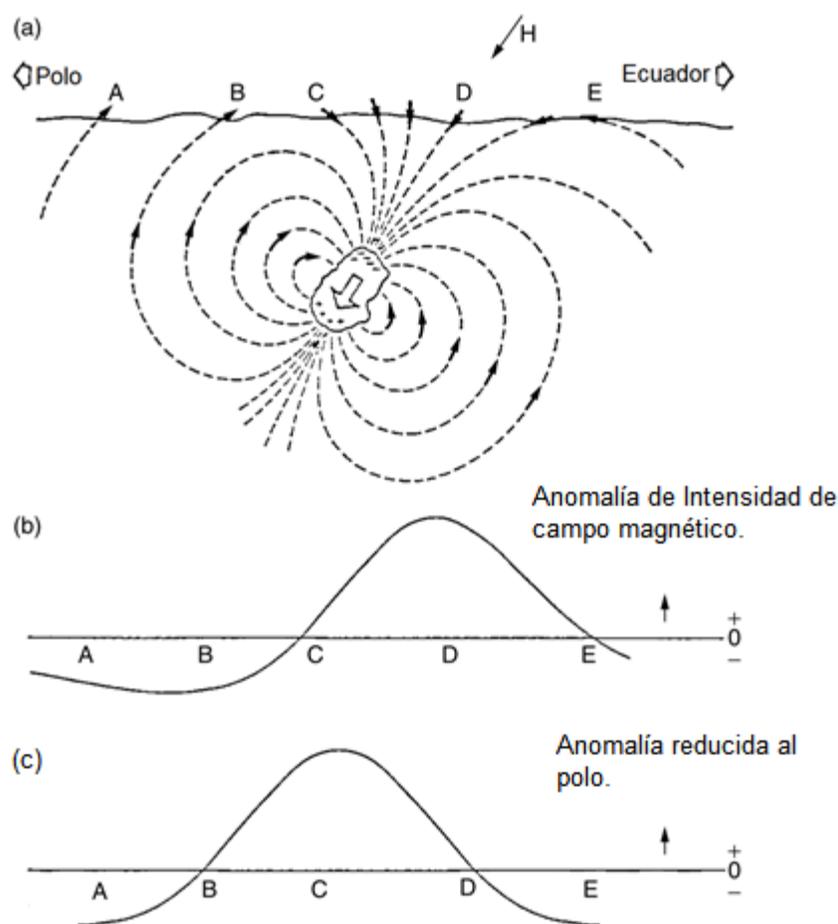


Figura 3.8. Respuesta magnética debida a la magnetización inducida de un objeto y el campo H (Tomado y editado de J.Milson,2004)

La reducción al polo involucra un proceso de conversión de anomalías equivalentes a las observadas en el polo sur magnético, en una transformación de la intensidad magnética total en anomalías más simples, eliminando la distorsión debida a la oblicuidad del campo magnético terrestre, haciendo que los vectores sean localizados en la componente vertical (Baranov 1957). Este proceso hace a la interpretación menos compleja, desplazando las anomalías a sus respectivas fuentes alterando su forma y generando anomalías simétricas. (Blakely 1996).

En los trabajos de Baranov (1957) y Baranov & Naudy (1964) se muestra el desarrollo de esta metodología de forma numérica acomodando a las anomalías, sin embargo, Bhattacharyya (1965) simplificó la forma de realizar la metodología utilizando la transformación de Fourier en las direcciones  $x$ ,  $y$  y de los valores magnéticos.

### 3.13 Continuación Ascendente

La continuación ascendente es un método de filtrado de datos que transforma las anomalías medidas en una superficie en aquellas que se habrían medido en una superficie más alta. Las anomalías no proporcionan información directa sobre la fuente, pero pueden ayudar a ser auxiliares en la interpretación. En particular, el proceso de continuación ascendente tiende a atenuar las anomalías causadas por fuentes locales cercanas a la superficie en relación con las anomalías causadas por fuentes más profundas, por lo que puede ser utilizada con el propósito de atenuar las fuentes someras enfatizando las fuentes profundas (Blakely 1996), tales como plutones en este trabajo.

Este proceso es realizado gracias al teorema de Green (Tercera Identidad de Green), de la cual se puede calcular el valor de un campo potencial en cualquier punto dentro de una región cerrada; siempre y cuando no existan otras fuentes que afecten a las superficies satisfaciendo la ecuación de Laplace, esto permitirá tomar cualquier punto por encima del nivel de superficie horizontal de forma que si se necesita el potencial a un nivel superior al de la superficie se tomará de referencia  $U(x, y, z_0 - \Delta z)$  como se muestra en la figura 3.9.

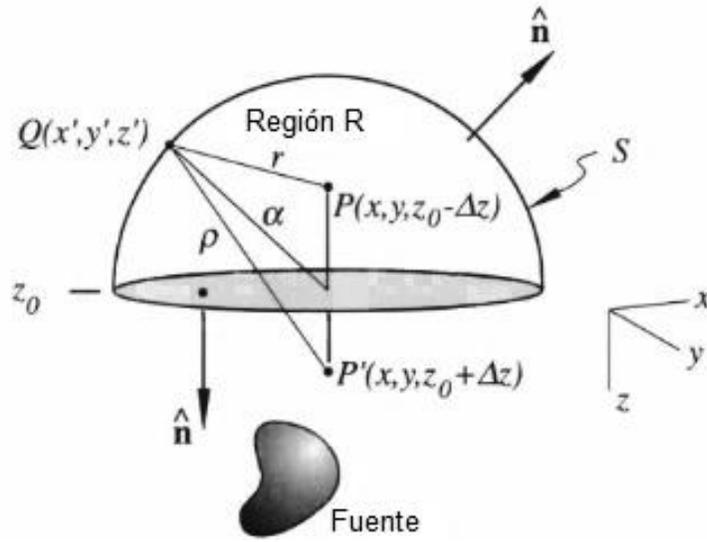


Figura 3.9. Principio del filtro de continuación ascendente de una fuente donde el potencial  $U$  es conocido dentro del plano  $Z=Z_0$ , deseado en el punto  $P$ . La integración de  $Q$  está sobre la superficie  $S$ ,  $r$  es la distancia entre los puntos  $Q$  y  $P$ , la dirección es tomada positiva en dirección a la fuente.

Tomado de Blakely, 1996.

La ecuación para el cálculo del potencial será:

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = \frac{\Delta z}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x', y', z_0)}{[(x - x')^2 + (y - y')^2 + \Delta z^2]^{\frac{3}{2}}} dx' dy' \quad \text{donde} \quad \Delta z > 0 \quad (3.11)$$

Esta misma ecuación puede ser utilizada en el dominio de Fourier, siendo un procedimiento más eficiente se realiza una transformación a la ecuación 3.11 en una convolución de dos dimensiones, el potencial del punto  $U$ , así como el segundo término queda de la forma:

$$U(x, y, z_0 - \Delta z) = e^{-\Delta z |k|}, \quad \Delta z > 0 \quad (3.12)$$

Esto resulta cierto para cualquier tipo de campo potencial tanto en las componentes de gravedad como el campo magnético medido en una superficie horizontal (Blakely 1996).

### 3.14 Modelado de Talwani

Talwani y Heirtzler (1964), proponen las bases de un método para el cálculo de anomalías magnéticas y gravimétricas debido a modelos arbitrarios poligonales en una sección bidimensional teniendo como objetivo la construcción de modelos posibles que generen una respuesta con menor error que la señal observada. Comúnmente las estructuras geológicas pueden ser bidimensionadas en secciones lo que es una gran ventaja para el método ya que se busca calcular la respuesta magnética.

En los trabajos de Talwani (1965), se describe la metodología para realizar el cálculo de las anomalías magnéticas producidas por polígonos. Las fórmulas son obtenidas a partir del cálculo de anomalía causada por láminas de polígonos irregulares homogéneos de forma arbitraria desarrollando un algoritmo computacional. El algoritmo parte de la ecuación del cálculo del potencial magnético que dependiente de las direcciones de la intensidad de magnetización (M) producida por un elemento diferencial de volumen del cuerpo Q (Figura 3.10) en una sección transversal, es decir, en las direcciones  $\Delta X$  y  $\Delta Y$  de la barra elemental quedando en función de la distancia de observación R de la forma:

$$U = \Delta X \cdot \Delta Y \int_{-\infty}^{\infty} \frac{M \cdot \vec{r}}{r^3} dy = 2\Delta X \cdot \Delta Z \left( \frac{M_X X + M_Z Z}{x^2 + y^2} \right) \quad (3.13)$$

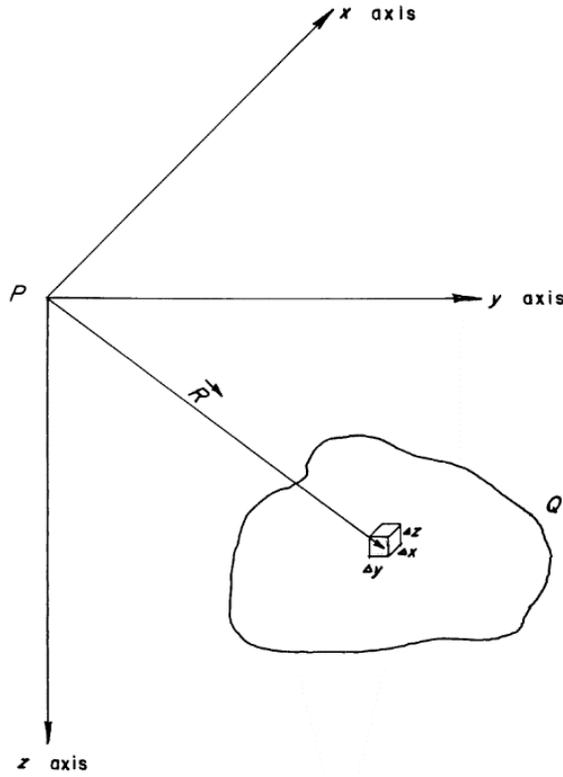


Figura 3.10. Sistema coordenado del volumen elemental  $\Delta x \Delta y \Delta z$ . (Talwani 1965).

Del potencial magnético pueden ser obtenidas las componentes verticales y horizontales del campo magnético derivando la función potencial en las direcciones  $z$  y  $x$ , respectivamente. Para realizar el cálculo de la anomalía producida por el largo de un lado del polígono será necesario establecer las funciones que dependan del ángulo en dirección al punto de observación  $P$  (Figura 3.11) y así mismo todos los costados del polígono son añadidos a la respuesta en dicho punto, añadiendo al cálculo, los ángulos de abertura entre los costados infinitos del polígono seccionado y los ángulos entre el punto de observación  $P$  haciéndolo para varios puntos a lo largo del eje horizontal.

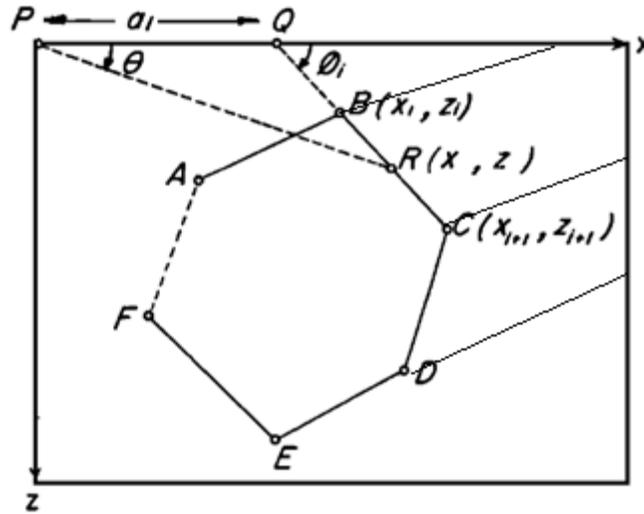


Figura 3.11. Elemento poligonal del que se calcula su potencial y su respuesta magnética. Editado (Talwani, Worzel, and Landisman 1959)

Evaluados los puntos en dirección de las de las componentes del campo magnético se evalúa la intensidad del campo en una suma de proyecciones de las componentes horizontal y vertical del campo en dirección a F obteniendo el efecto magnético del campo quedando:

$$T = H_y \sin(I) + H_x \cos(\theta_{Mx} - D) \cos I \quad (3.14)$$

Donde T es la proyección total de las componentes horizontales y verticales ( $H_x$  y  $H_y$ ), dependiendo del ángulo con la componente de magnetización  $M_x$  ( $\theta_{Mx}$ ), inclinación (I) y declinación (D).

### 3.15 Aeromagnetometría

Este método magnético es comúnmente usado para la cartografía magnética de amplias extensiones de terreno con grandes ventajas y realmente pocas desventajas. Un ejemplo de esto es el poco tiempo de adquisición logrando reducir la deriva del instrumento y la gran cantidad de datos que se obtiene a una frecuencia continua de adquisición sin importar lo abrupto de la topografía. Debido a la naturaleza de la adquisición de datos, la magnetometría aérea reduce el ruido de materiales magnéticos en la superficie ajenos a la geología.

El método aeromagnético suele tomar datos obtenidos por una geometría de líneas de adquisición a una distancia promedio de altura de vuelo que pueden ser cruzadas generando mallas de datos (Figura 3.12). Es posible también encontrar distintas configuraciones para la toma de datos, líneas equidistantes en una sola dirección con trazos perpendiculares llamadas líneas de control. Algunas desventajas dentro de un levantamiento aeromagnético es el poco detalle que se puede dar debido a la altura de adquisición.

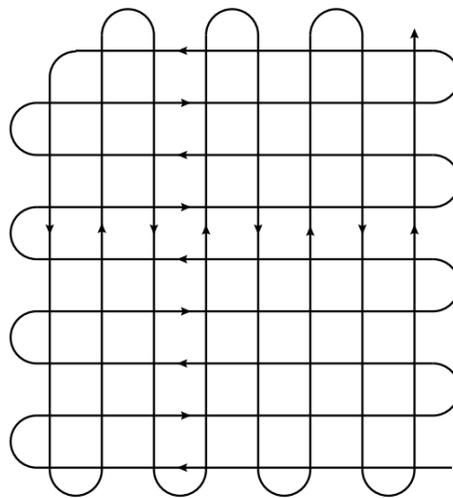


Figura 3.12. Geometría típica de adquisición de datos (Reeves 2005)

Un levantamiento aeromagnético puede tener una altura media a nivel de mar llamado barométrico o tener una altura a nivel topográfico llamado vuelo de contorno. Idealmente, las líneas de levantamiento deben ser rectas y paralelas, ya que el espaciado entre líneas y la distancia entre estaciones deberían mantenerse constantes durante todo el levantamiento. Sin embargo, en la práctica existe gran cantidad de factores que puede evitarlo. Puede haber falta de datos causados por problemas de equipo, cuerpos de agua, pozos abiertos, edificios, terrenos severos, áreas de acceso denegado o áreas donde hay altos niveles de ruido. (Dentith *et al.* 2014). La altura es una limitante que hace a los cuerpos magnéticos atenuar sus anomalías a mayor distancia, así como el aumentar el espaciado entre líneas de vuelo harán menos probable la localización de estructuras haciendo al estudio menos preciso, a menos que, lo que se busque sean cuerpos de varios kilómetros enfocando únicamente estructuras regionales. (Reeves 2005)

# Capítulo IV

## Procesamiento y Análisis de datos



## 4.1 Recopilación de información

La península Baja California ha sido estudiada permitiendo el acceso a una gran cantidad de información disponible para el análisis. Estos trabajos muestran los procesos geológicos formativos y de evolución, así como mapeamiento de estructuras, estudios geofísicos y cartas realizadas por el Servicio Geológico Mexicano todo ello necesario para realizar un trabajo integral de la zona.

### 4.1.1 Adquisición de datos

La información se obtuvo de datos mostrados dentro de las cartas magnéticas de La Paz (G12-10-11) y San José del Cabo (F12-2-3-5-6) realizadas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) con datos adquiridos en el año 2000 y comprados por el proyecto de CeMIEGeo P-01, en una campaña geofísica utilizando un avión ISLANDER BN2-A21 con un magnetómetro de bombeo óptico de vapor de cesio G-822A de Geometrics con una sensibilidad de 0.001 nT.

Según las configuraciones de vuelo la distancia entre líneas fue de un kilómetro con distancias de diez kilómetros entre líneas de control (Figura 4.1) y una altura de vuelo sobre el nivel del terreno de 300 m.

A los datos magnéticos adquiridos se les realizó un proceso de sustracción del Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) del año 1995. La inclinación es de  $49^{\circ} 30'$  con declinación  $10^{\circ} 01'$  al centro de la carta.



Figura 4.1. Cubrimiento Aerogeofísico de la carta San José del Cabo realizada en enero del 2000, donde se pueden notar las líneas de control a mayor distancia.

## 4.2 Procesamiento de datos magnéticos

Los datos magnéticos son datos del campo de anomalía total, los cuales fueron procesados con diferentes métodos para delimitar y localizar efectos que serán discutidos en el siguiente capítulo en el análisis cualitativo y cuantitativo. Inicialmente se contó con 139,230 valores magnéticos medidos por el Servicio Geológico Mexicano de los que no se tiene información detallada sobre su corrección y procesos realizados sin embargo se indican las correcciones por compensación magnética de movimiento del avión, variación diurna y la

nivelación utilizando líneas de control. Interpolados los datos que cubren la zona de estudio, se generó el mapa de anomalía de campo total del cual se pueden realizar interpretaciones preliminares de la zona.

#### 4.2.1 Método de la Reducción al Polo

Para la reducción al polo se necesitó de una componente de amplitud ( $\sin(I)$ ) y una fase ( $i \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)$ ), dependientes de la declinación e inclinación del lugar de la toma de datos, para el centro de la carta magnética en la fecha de adquisición se utilizó:

- **Inclinación de 49.5°**
- **Declinación de 10.016°.**

La malla de procesamiento inicial parte de los datos magnéticos de la zona de estudio utilizando la extensión MAGMAP del software Geosoft Oasis Montaj™.

#### 4.2.2 Continuación ascendente y descendente

Dentro de los parámetros para la realización del mapa de continuación ascendente se utilizaron los datos magnéticos reducidos al polo, calculando un  $\Delta z$  de 0.750 km que es equivalente al promedio del  $\Delta x$  y  $\Delta y$  del número de celdas interpoladas equivalentes en km.

En el caso de la continuación descendente se necesitó conocer la distancia a la fuente para evitar inestabilidad en la señal, ya que las máximas frecuencias tienden a crear ruido, para ello se aplicó un filtro para disminuir las frecuencias.

#### 4.2.3 Método de Talwani

El método tiene por objetivo crear una sección de un modelo geológico-estructural bidimensional dentro de la zona de estudio a partir de las señales observadas en campo y calculadas con modelos.

La señal debida a la geología del terreno fue calculada a partir de cuerpos inferidos en el modelo, esto genera un problema de no unicidad, ya que n-modelos pueden dar solución sin importar la precisión de la observación. Para ello fue indispensable crear un modelo con mediciones reales de susceptibilidad en las rocas para disminuir la incertidumbre en los modelos. De esta manera, ocho muestras de afloramientos de diversas zonas fueron recolectadas para realizar mediciones de susceptibilidad magnética en laboratorio (Figura 4.2)

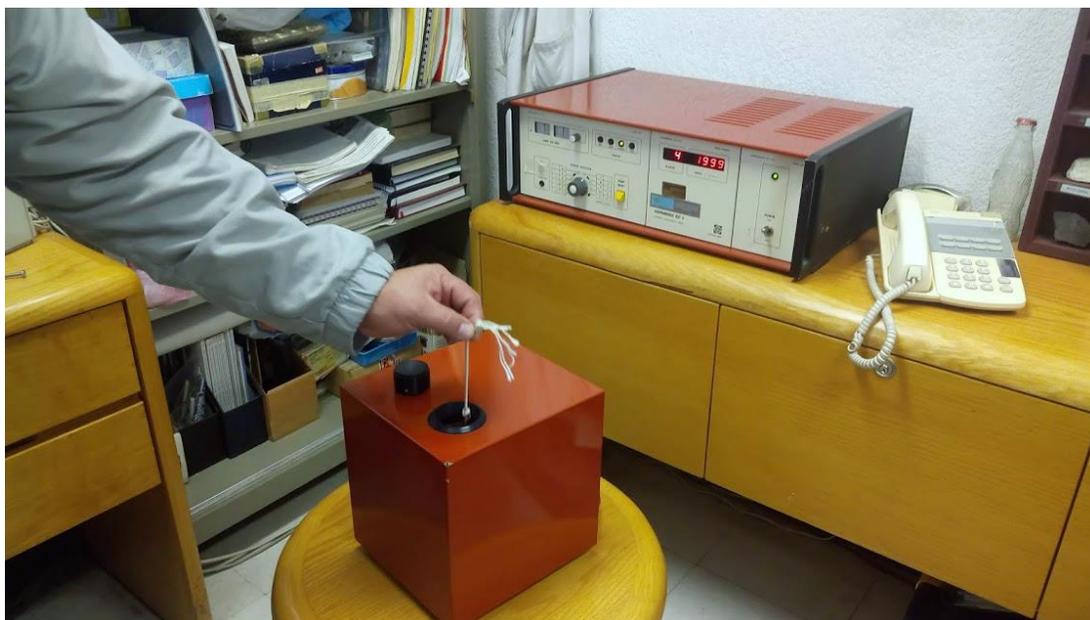


Figura 4.2. Mediciones de Susceptibilidad Magnética realizadas con el equipo Kappabridge KLY-2 del Instituto de Geofísica.

Los valores susceptibilidad magnética medidos se muestran en la Tabla 4.1. Algunos de ellos ayudaron a la señal del modelo bidimensional para converger con la señal observada. Una de las restricciones dentro del método es aumentar los bloques horizontalmente dentro de los modelos bidimensionales con el objeto de evitar efectos adicionales de borde. La señal observada fue extraída de la interpolación obtenida de la reducción al polo permitiendo al modelo proponer cuerpos bajo anomalías pseudo-gravimétricas, muestreo de la señal será de 700 puntos a lo largo de un perfil de 48.2 Km.

<i>Muestra</i>	<i>SI (10<sup>-6</sup>)</i>
<i>Granodiorita a Tonalita</i>	1716
<i>Tonalita</i>	1389
<i>Granito Las Cruces</i>	54
<i>El novillo</i>	31160
<i>Granodiorita a granito</i>	63
<i>Gabro de hornblenda</i>	5170
<i>Roca Máfica a Ultramáfica</i>	58950
<i>El novillo (grano medio-fino)</i>	32747

Tabla 4.1: Listado de muestras medidas de la zona de estudio.

Para el modelado algunos parámetros como altura de vuelo, topografía, nT del campo total, inclinación y declinación serán necesarios dentro del paquete GM-SYS de Geosoft.

# Capítulo VI

## Resultados e Interpretación



## 5.1 Interpretación cualitativa de la información magnética

Dentro de la primera interpolación de los datos (Figura 5.1) se pudieron observar múltiples anomalías magnéticas; rasgos de al menos dos bloques de tamaño importante con valores magnéticos positivos, uno de ellos en dirección NW-SE contiene rasgos de diferentes fuentes que tienden a alinearse incidiendo sobre el cabo norte de la península hacia el centro de la zona de estudio con un largo aproximado de 66 kilómetros y un ancho de hasta 15 km. En la región suroeste también se muestra un gran paquete magnético yaciendo desde la costa sur del área de estudio hacia 25 km dentro de la península con un gradiente magnético de menor pendiente y de menor intensidad que la franja NW-SE, pero de gran tamaño, por otra parte, dentro de la zona se muestran dos depresiones magnéticas a los costados de la franja central.

En general estos datos prevén la naturaleza magnética de la zona permitiendo hacer primeras interpretaciones. La parte poniente de la Sierra de las Cruces muestra una depresión magnética superior que en la zona oriente independientemente de la topografía.

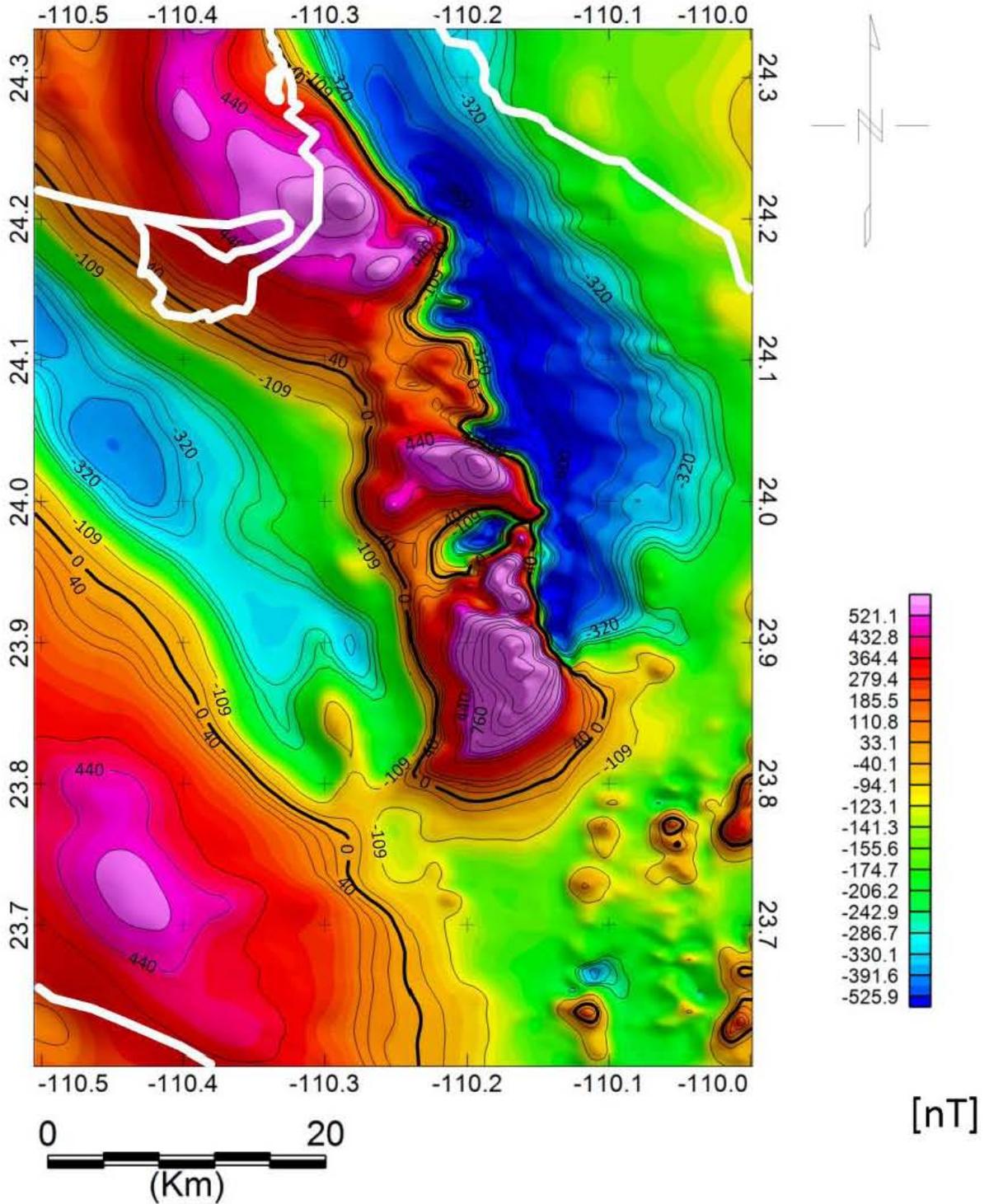


Figura 5.1. Mapa de anomalía de campo total mostrando las anomalías de la zona de estudio medidas en nanotesla, la barra de valores ha sido normalizada, los valores mayores se encuentran en las isolíneas.

Con ayuda de la reducción al polo fue posible caracterizar la información magnética en anomalías simétricas, modificando la posición de los bloques debido a la distorsión magnética del campo terrestre (Figura 5.2).

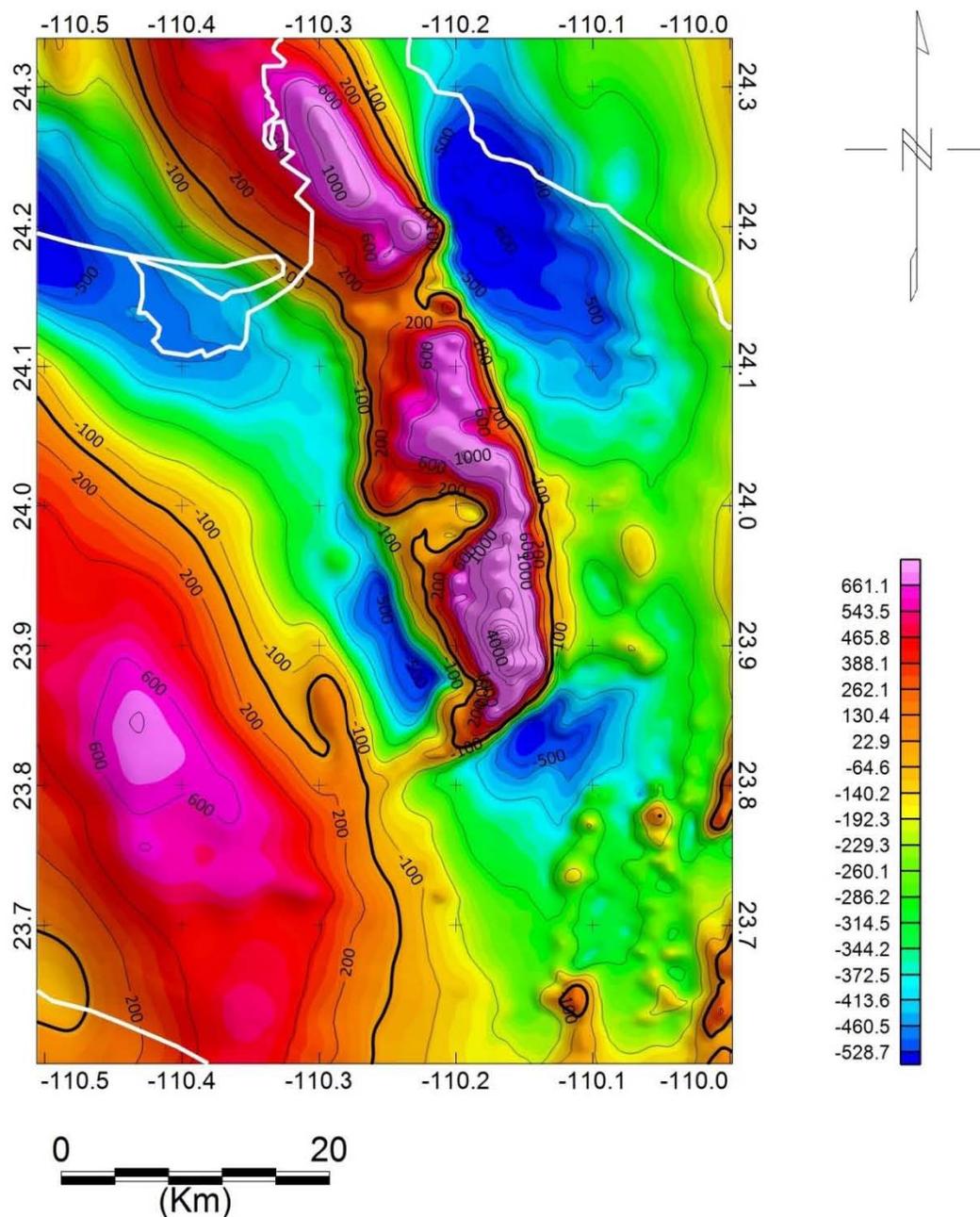


Figura 5.2. Mapa de anomalías reducidas al polo. la barra de valores ha sido normalizada, los valores mayores se encuentran en las isolíneas, la línea gruesa marca el valor cero.

En este proceso fue posible analizar algunas estructuras en un mapa plano, aquí fue evidente la geometría de algunos cuerpos intrusivos del área de estudio, un ejemplo claro es *La Sierra del Novillo* la cual ha mejorado de forma significativa su ubicación y aspecto dejando una clara señal de su anomalía con una gran densidad de valores máximos relativos con intensidades mayores a los 6000 nT. Al costado suroeste, el desplazamiento del mayor cuerpo magnético fue mínimo dejando el gradiente de bajas pendientes laterales.

El *Valle de la Paz* se mostró como una depresión magnética iniciando desde un mínimo relativo en el poniente de la *Bahía de La Paz* con una anomalía de hasta -570 nT e indicando un cambio posiblemente topográfico a profundidad en dirección NW-SW, así como un direccionamiento hacia el sur en paralelo 24 siendo ésta la parte más somera y estrecha del valle con valores mínimos de -370 nT. En la dirección sur, al poniente de *El Novillo*, se vuelve a mostrar una depresión magnética proveniente del *Valle de La Paz* muy posiblemente debido a la topografía profunda del graben. En términos generales, el Valle se va acuñando hacia el sur quedando estrangulado por los paquetes magnéticos de *El Novillo* y el dominio sur-poniente.

Los complejos metamórficos que afloran en la franja suroccidental del área de estudio no mostraron información de anomalías magnéticas notables, solo algunos altos magnéticos en la zona de *El Veladero* y *El Rosario* producidos por intrusivos que han sido descritos en el mapeamiento geológico, estos intrusivos cuentan con una media de 3 km de diámetro mientras que el muestreo de adquisición tiene 1 km por lo que algunas anomalías de intrusivos serán difusas o imposibles de localizar.

Al sur de *El Novillo* y norte de *El triunfo* se mostró una anomalía de naturaleza negativa que puede inferirse a la respuesta magnética de las rocas

graníticas de baja susceptibilidad, permitiendo inferir la existencia de un pequeño valle.

Los diferentes gradientes magnéticos regionales pueden deberse a cambios litológicos o topográficos; un cambio brusco de anomalías puede indicar contrastes litológicos o pendientes muy inclinadas, considerando lo anterior se ha inferido un mapa de estructuras (Figura 5.3.1 y Figura 5.3.2).

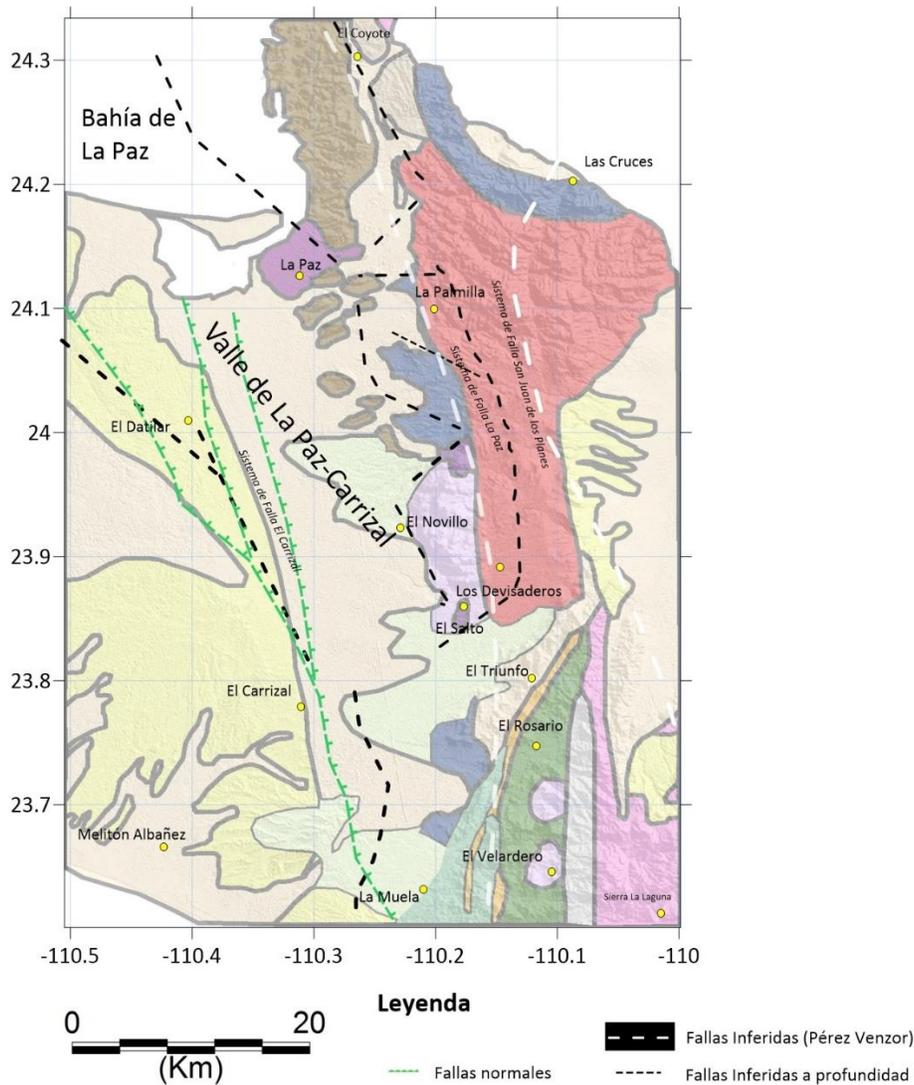


Figura 5.3.1 Estructuras inferidas por los cambios de pendiente en los gradientes magnéticos correlacionado con la litología

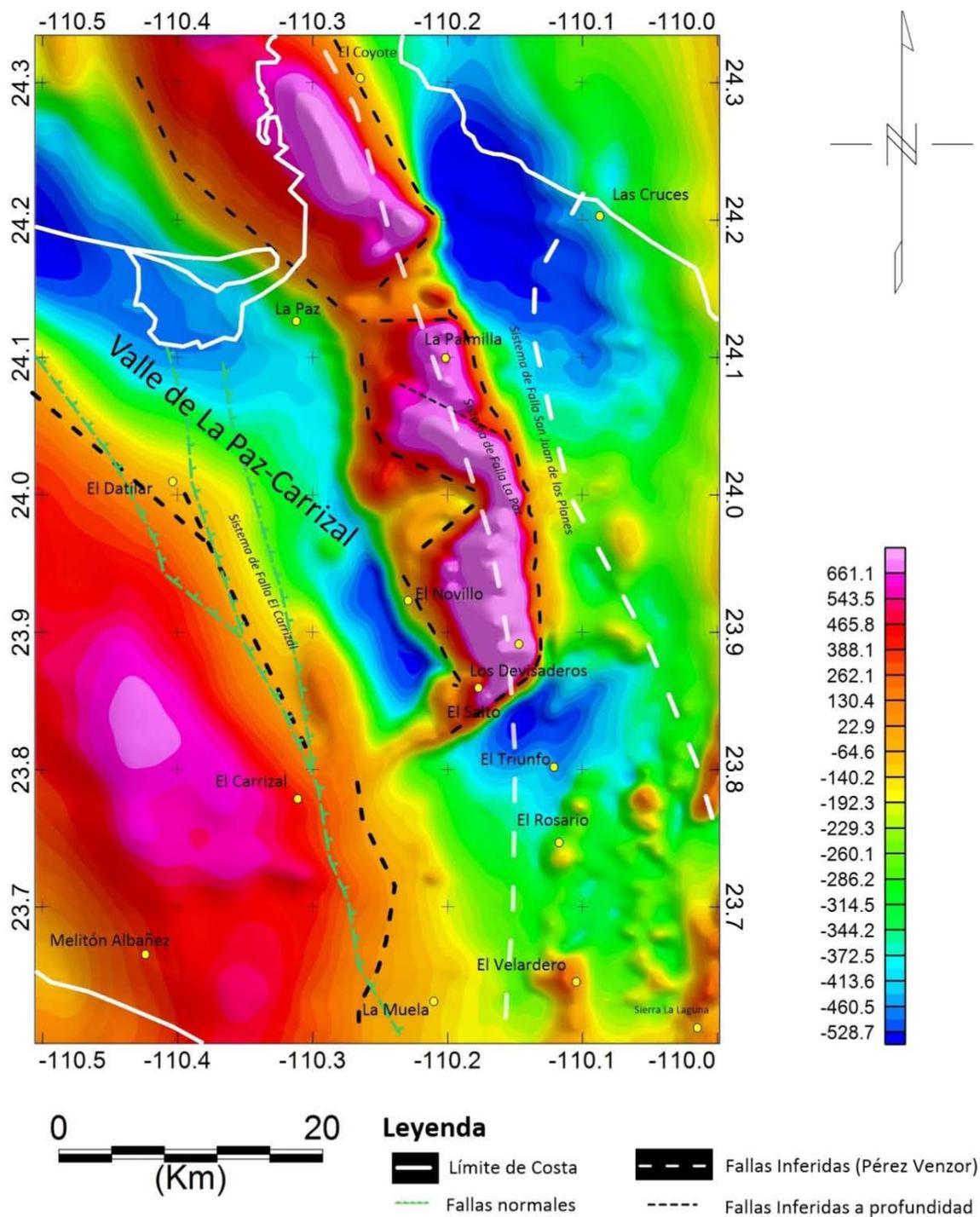


Figura 5.3.2 Estructuras inferidas por los cambios de pendiente en los gradientes magnéticos

Algunas de estas estructuras se correlacionan con las estructuras geológicas mapeadas como la falla *El Carrizal* y *La Paz* ésta última muestra un cambio litológico indiscutible superficialmente y magnéticamente, sin embargo, aún queda a discusión su prolongación transpeninsular ya que su continuidad solo es magnéticamente notable hasta el costado sur del gabro *El Novillo*.

El filtro de continuación ascendente generó una interpretación cualitativa de carácter regional a profundidad de la zona, en el mapa de la Figura 5.4. Los grandes bloques se han dividido en cinco diferentes regiones magnéticas inferidas de la geología documentada de la zona. Las anomalías de la región I y III son debidas a cuerpos ígneos intrusivos de grados mayores de susceptibilidad mostrándose de mejor forma en la región I donde existen tres grandes dominios magnéticos alineados en dirección NW-SE.

Los granitos medidos en la zona II a pesar de la topografía en el extremo nororiente, donde yace la *Sierra de las Cruces*, la señal filtrada permitió observar el tamaño del cuerpo intrusivo granítico y su modificación horizontal hacia el sur.

El Valle de La Paz mostrado en la zona IV muestra su dirección preferencial y a pesar de que la señal es atenuada por el filtro, el valle mantiene su acuñaamiento hacia el sur.

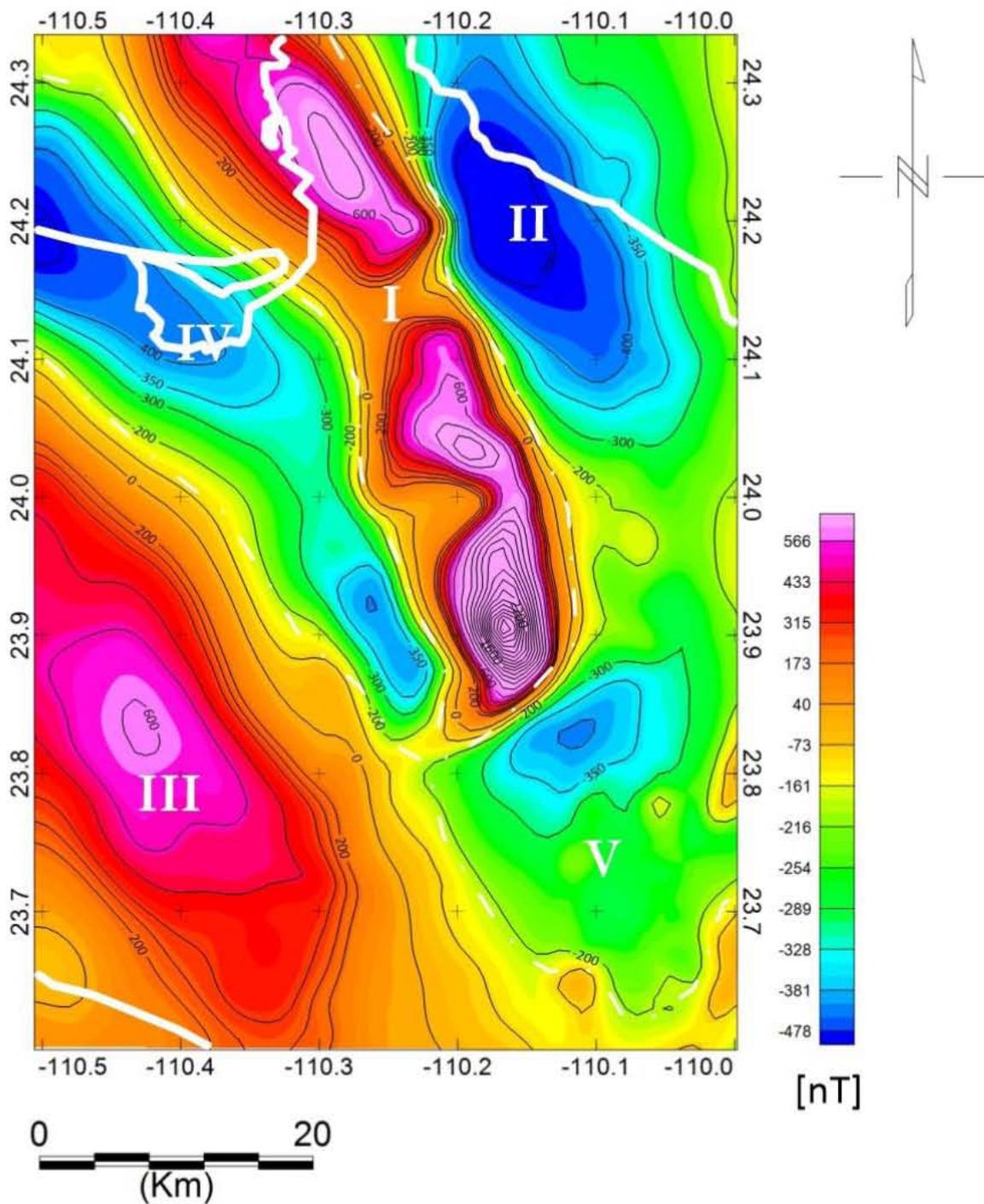


Figura 5.4. Bloques observados a partir de la señal filtrada por continuación ascendente. La barra de valores ha sido normalizada, los valores mayores se encuentran en las isolíneas agrupados en los principales bloques regionales.

Para poder observar la señal más cercana a la fuente y amplificar algunas anomalías fue necesario aplicar un filtro de continuación descendente, sin embargo, a diferencia del filtro ascendente éste tiende ser inestable cuando se alcanza a la fuente generadora amplificando señales de altas frecuencias (Figura 3.9), por lo que la distancia de vuelo fue indispensable en este proceso, así como un filtro que elimine las frecuencias más altas.

La figura 5.5 representa el mapa generado por este filtro, gran cantidad de anomalías fueron resaltadas principalmente las identificadas como un conjunto de máximos relativos a lo largo de la franja central de las cuales se infiere una gran cantidad de enyecciones plutónicas de rocas gabroícas principalmente en el intrusivo *El Novillo* y hacia el norte de éste.

En la franja el occidental de la sierra *Las Cruces* la tonalita *Buena Mujer* aflora, la susceptibilidad medida en esta roca genera una señal muy tenue, sin embargo, la gran cantidad de rocas hipabisales como el gabro pueden contribuir al aumento de la señal.

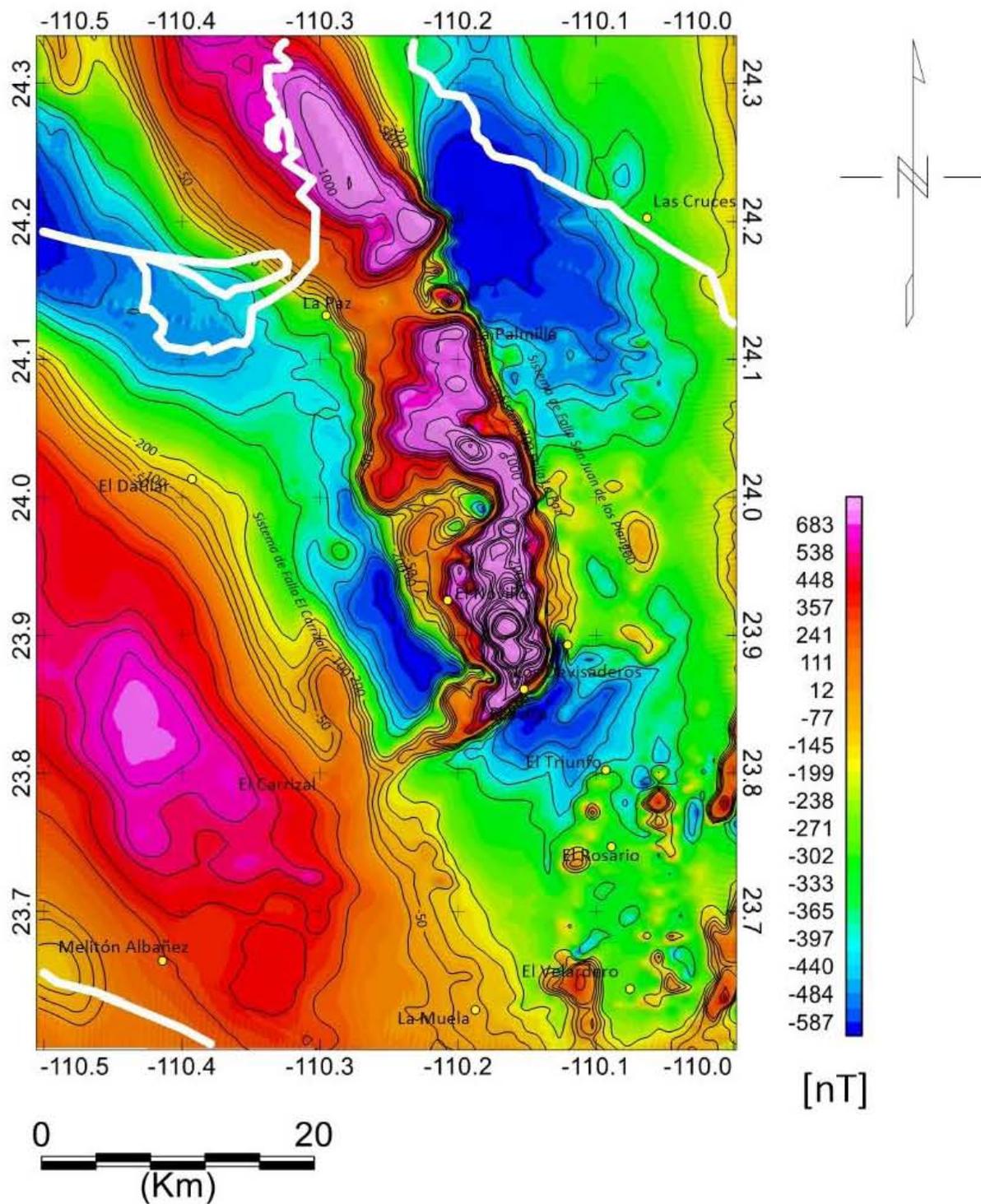


Figura 5.5. Mapa de continuación descendente a 300 metros. la barra de valores ha sido normalizada, los valores mayores se encuentran en las isóneas.

## 5.2 Interpretación cuantitativa

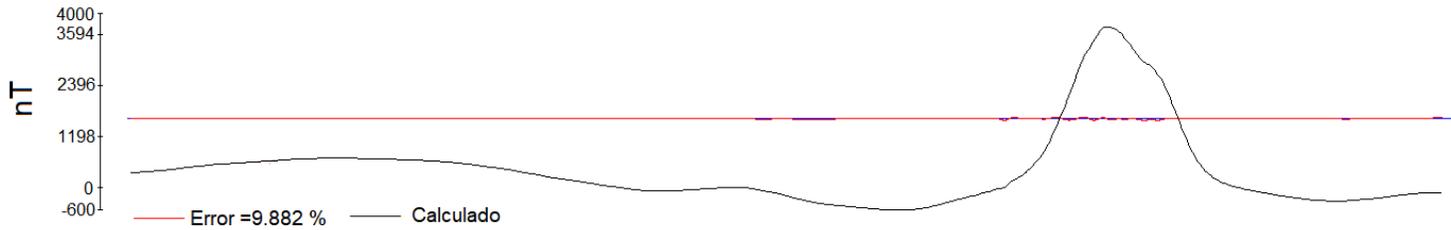
El perfil AA' de 48.2 km de longitud contenido en la zona de estudio (Figura 5.6) tiene una dirección N20°E que cruza algunas estructuras geológicas de interés geológico como la Sierra El Novillo, el Valle de la Paz, los sistemas de fallas El Carrizal y la Falla de La Paz, así como los máximos relativos magnéticos de los bloques localizados en la franja central y suroccidental de la región estudiada.

La señal magnética obtenida de la reducción al polo proporciona información sobre la geología regional presente desde la superficie hasta el basamento donde las rocas, principalmente de contenido ferromagnético, pierden sus propiedades magnéticas, dejando interpretar una profundidad de entre los 12 a los 16 km. La sección tiene como parámetros una declinación de 0 e inclinación de 45° por la señal reducida al polo.

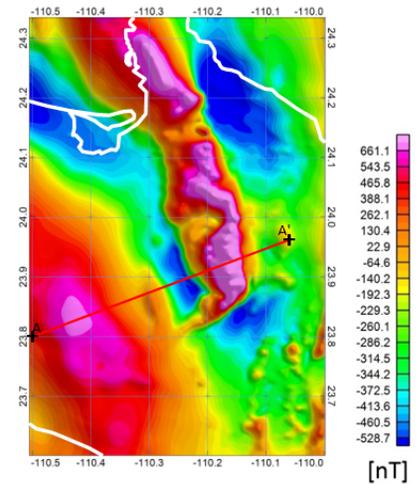
Un máximo relativo está sobreyaciendo sobre el intrusivo de *El Novillo* aproximadamente 31.1 km del inicio de la sección con un valor de 3777 nT y una altura máxima de 680 msnm. Así mismo un mínimo relativo yaciendo en el valle de la Paz con -542 nT de intensidad.

El modelo geológico realizado esta formado principalmente del contraste de susceptibilidad magnética de cinco litologías ya descritas en la Tabla 4.1: Tonalita Buena Mujer, Intrusivo Granítico de la Sierra las Cruces, Intrusivos de gabros localizados en *El Novillo*, así como rocas sedimentarias y relleno del Cuaternario.

### Perfil AA' Magnético Reducido al Polo



### Localización del Perfil magnético



### Modelo Geológico - Estructural

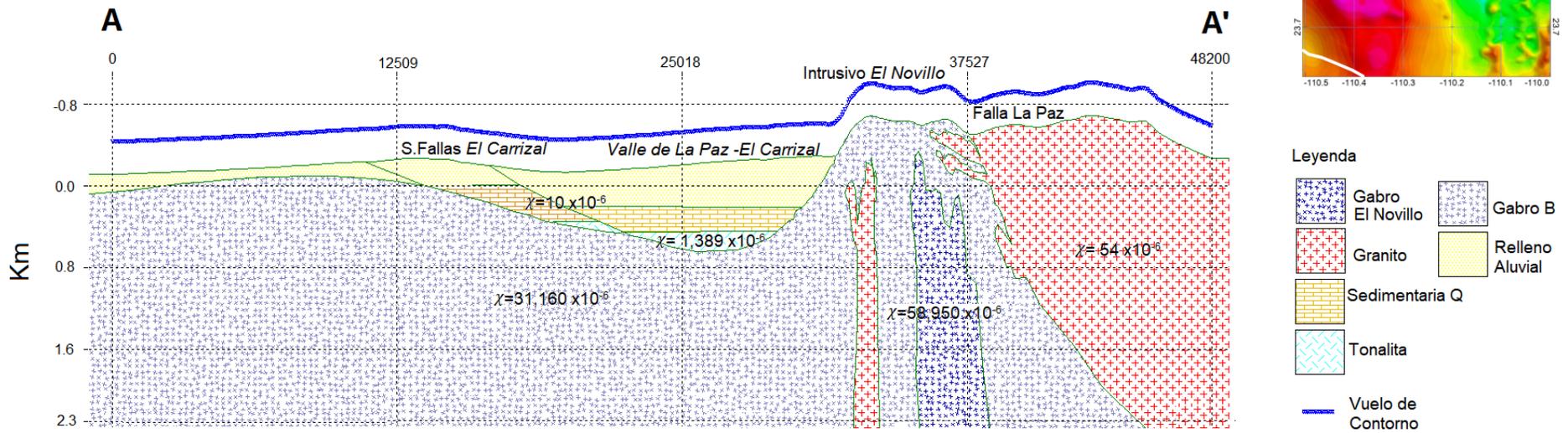


Figura 5.6. Modelo Geológico-Estructural creado a partir del perfil magnético reducido al polo AA'

En el modelo geológico se establecen seis unidades litológicas. La unidad principal trata de un intrusivo de gabro que yace sobre gran parte del perfil, desde la zona de *El Carrizal* y aflorando en la sierra de *El Novillo* donde diferentes intrusivos gabroícos también forman parte de la zona; algunos de ellos con mayores susceptibilidades logran modelar en el perfil AA' los máximos magnéticos como es el caso del Gabro B (Figura 5.3).

Las colindancias litológicas cercanas al perfil AA' posibilita inferir el material que puede yacer bajo la superficie del modelo; ejemplos claros son la tonalita *Buena Mujer* modelada parte más profunda del Valle de La Paz, de la cual se sabe que geológicamente es intrusionada por el gabro. Las rocas posteriores conforman el material sedimentario del cuaternario y el relleno aluvial sin información magnética relevante debido a su precedencia metamórfica.

En este modelo la zona más profunda se localiza en el *Valle de la Paz* al poniente de El Novillo con una profundidad estimada de 870m al basamento magnético indicado como Gabro; estudios geofísicos realizados al norte del Valle de La Paz con la finalidad de reconocer el basamento granítico (Cruz-Falcón et al. 2010) correlacionan estos resultados obteniendo una profundidad desde los 500m hasta los 1500m.

El oriente de la Sierra El Novillo está dominado por el Granito de la sierra *Las Cruces* que le ha intrusionado, su respuesta magnética es muy débil debido al poco contenido ferromagnético observado a microscopio, dejando mostrar contrastes bien indicados en el perfil magnético.

Entre las estructuras modeladas se encuentra la bifurcación del Sistema de Fallas El Carrizal, la falla oriental de El Novillo que da origen al Graben del valle y la Falla de La Paz al oriente de la sierra *El Novillo*.

# Conclusiones



En este trabajo se presentaron resultados de la interpretación magnética donde se lograron definir diversos cuerpos intrusivos en el área de estudio, lográndola explorar a profundidad; caracterizando rasgos estructurales y geológicos que son parte de los objetivos iniciales de esta tesis.

Dentro del procesamiento de datos magnéticos; la reducción al polo logro la modificación de las anomalías magnéticas desplazándolas directamente hacia la fuente que lo produce identificándolas directamente, ayudando significativamente a muestrear las rocas necesarias para el modelo bidimensional. La continuación ascendente ayudó en la identificación regional de los bloques magnéticos a profundidad, así como geometría de algunas estructuras como la curvatura del *Valle de la Paz* y su acuñamiento hacia el sur. Al aplicar la continuación descendente fue posible resaltar rasgos de presencia de intrusivos en toda la franja central de la zona de estudio, así como algunos intrusivos de la parte suroriente.

Se logró la identificación de un conjunto de intrusivos y bloques alineados en dirección NW-SE que afloran en la sierra de *El Novillo*, la mayoría asociados a rocas máficas y ultramáficas con alto contenido ferromagnético que contrasta con cualquier litología de la zona. La magnetometría aérea también permitió localizar un cuerpo masivo al suroeste de la zona sepultado en sedimentos cuaternarios; es importante mencionar que el este estudio se limita a identificar cuerpos con dimensiones mayores a un kilómetro cuadrado de área, sin embargo, en estudios

posteriores la identificación magnética a detalle dependerá de la distancia entre los puntos de adquisición.

La zona de sedimentos, así como rocas metamórficas no lograron mostrar gran aportación magnética, por lo que el análisis de susceptibilidad magnética se llevó a cabo en las rocas ígneas para observar el contraste y así poder realizar un modelo geológico con el algoritmo de Talwani. Dentro del modelo; el cálculo de la anomalía magnética dependía en gran medida de dos aspectos; geometría (forma y tamaño de los polígonos) y el contraste de susceptibilidad magnética en cada polígono, permitiendo generar n número de perfiles que ajusten la señal magnética para ello se requirió de información preliminar y antecedentes, trabajando con un modelo simple que usualmente suele ser el más probable. El modelo permitió en buena medida delimitar el graben que da origen al valle de La Paz, así como la geometría del intrusivo *El Novillo* que regionalmente despliega una máximo magnético. Estructuras como la falla de *La Paz* y la falla de *El Carrizal* que cruza el perfil pueden ser modeladas, infiriendo fallas normales en ambos casos, el sistema de fallas *El Carrizal* trata de fallas lítricas que en profundidad tienden a orientarse horizontalmente cruzando el valle y el gabro. Para el modelo geológico fue necesario poseer los valores de susceptibilidad magnética de las rocas que modelan el perfil ya que cada cambio de estas propiedades afecta directamente al modelo.

Esta metodología puede ser aplicada a diversos campos de la exploración ya que se trata de un método de identificación de estructuras regionales y correlación geológica. En estudios más detallados se recomienda complementar la información con otro método geofísico a fin de delimitar de mejor forma los cuerpos de interés.

## Bibliografía

- Aranda Gómez, José Jorge and José Antonio Pérez Venzor. 1988. "Estudio Geologico De Punta Coyotes ,Baja California Sur." 1-21.
- Baranov, V. 1957. "A New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps: Pseudo-Gravimetric Anomalies." *Geophysics* 22(2):359-82.
- Baranov, V. and H. Naudy. 1964. "NUMERICAL CALCULATION OF THE FORMULA OF REDUCTION TO THE MAGNETIC POLE." *GEOPHYSICS* 29(1):67-79.
- Bhattacharyya, B. K. 1965. "TWO-DIMENSIONAL HARMONIC ANALYSIS AS A TOOL FOR MAGNETIC INTERPRETATION." *GEOPHYSICS* 30(5):829-57.
- Blakely, Richard J. 1996. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cantos Figuerola, José. 1974. "Tratado de Geofísica Aplicada." Madrid: Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Minas.
- Cruz-Falcón, A., R. Vázquez-González, J. Ramírez-Hernández, F. Salinas-González, E. Nava-Sánchez, and E. Troyo-Diéguez. 2010. "Depth Estimation to Crystalline Basement in the Valley of La Paz, Baja California Sur, Mexico." *Geofísica Internacional* 49(4):213-24.
- Cruz, Falcón, R. Vazquez, J. Ramirez, H. Nava, E. Troyo, J. Rivera, and J. Vega. 2011. "PRECIPITACIÓN Y RECARGA EN LA CUENCA DE LA PAZ , BCS , MÉXICO." 27(3):251-63.
- Dentith, Michael, Exploration Targeting, American Geophysical Union, Australian Society, Exploration Geophysicists, Exploration Geophysicists, Geological Society, and Stephen Mudge. 2014. *Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist*.
- Fletcher, John M., Marty Grove, David Kimbrough, Oscar Lovera, and George E. Gehrels. 2007. "Ridge-Trench Interactions and the Neogene Tectonic Evolution of the Magdalena Shelf and Southern Gulf of California: Insights from Detrital Zircon U-Pb Ages from the Magdalena Fan and Adjacent Areas." *Bulletin of the*

- Geological Society of America* 119(11-12):1313-36.
- Hausback, P. Brian. 1984. "Cenozoic Volcanic and Tectonic Evolution of Baja California Sur, México." 219-36.
- Kearey, P., M. Brooks, and I. Hill. 2013. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Wiley.
- Lowrie, William. 2007. *Fundamentals of Geophysics*. Vol. 91. 2nd Editio. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mario, González E., Sergio Mayer, and Alfredo G. 2004. "Reporte de Un Enjambre Sísmico de Febrero-Abril de 2004, En La Bahía de La Paz, Baja California Sur, México." 24(3):451-56.
- Nettleton, L. L. 1990. *Gravity and Magnetics in Oil Prospecting*. University Microfilms.
- Parasnis, D. S. 1962. *Principles of Applied Geophysics*. Vol. 84.
- Pérez Venzor, José Antonio. 2013. "Estudio Geológico-Geoquímico Del Borde Oriental Del Bloque de Los Cabos Baja California Sur, Méxco." Universidad Nacional Autónoma de México.
- Portilla Pineda, Rodrigo. 2012. "Estructura y Cinemática de La Apertura Del Golfo de California, Por Medio de Experimentos Físicos de Extensión Cortical y Litosférica." Universidad Nacional Autónoma de México.
- Reeves, Colin. 2005. "Aeromagnetic Surveys." *Earthworks* 1-155.
- Talwani, Manik. 1965. "COMPUTATION WITH THE HELP OF A DIGITAL COMPUTER OF MAGNETIC ANOMALIES CAUSED BY BODIES OF ARBITRARY SHAPE." *GEOPHYSICS* 30(5):797-817.
- Talwani, Manik, J. Lamar Worzel, and Mark Landisman. 1959. "Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone." *Journal of Geophysical Research* 64(1):49-59.
- Tarback, E. J., F. K. Lutgens, M. P. Rodríguez, and J. M. G. Casado. 2005. *Ciencias de La Tierra: Una Introducción a La Geología Física*. Pearson Educación.
- Thébault, Erwan, Christopher C. Finlay, Ciarán D. Beggan, Patrick Alken, Julien Aubert, Olivier Barrois, Francois Bertrand, Tatiana Bondar, Axel Boness, Laura Brocco, Elisabeth Canet, Aude Chambodut, Arnaud Chulliat, Pierdavide

Coïsson, François Civet, Aimin Du, Alexandre Fournier, Isabelle Fratter, Nicolas Gillet, Brian Hamilton, Mohamed Hamoudi, Gauthier Hulot, Thomas Jager, Monika Korte, Weijia Kuang, Xavier Lalanne, Benoit Langlais, Jean Michel Léger, Vincent Lesur, Frank J. Lowes, Susan Macmillan, Mioara Manda, Chandrasekharan Manoj, Stefan Maus, Nils Olsen, Valeriy Petrov, Victoria Ridley, Martin Rother, Terence J. Sabaka, Diana Saturnino, Reyko Schachtschneider, Olivier Sirol, Andrew Tangborn, Alan Thomson, Lars Tøffner-Clausen, Pierre Vigneron, Ingo Wardinski, and Tatiana Zvereva. 2015. "International Geomagnetic Reference Field: The 12th Generation International Geomagnetic Reference Field - The Twelfth Generation." *Earth, Planets and Space* 67(1).

W.M. Telford, L. P., Geldart, and Sheriff R.E. 1991. *Applied Geophysics (Second Edition)*. Vol. 69.

Young, H. D., F. W. Sears, R. A. Freedman, M. W. Zemansky, A. L. Ford, J. E. Brito, V. A. F. Flores, and R. G. Leal. 2009. *Física Universitaria Con Física Moderna*. 12th ed. Mexico: Pearson Educación.

Cartas SGM:

Carta Geológico-Minera y Carta Magnética de campo Total Escala 1: 250 000 La Paz G12-10-11

Carta Geológico-Minera y Carta Magnética de campo Total Escala 1: 250 000 San José del Cabo G12-10-11