



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Magnetismo remanente de las rocas en el modelado

cuantitativo de anomalías magnéticas:

Caso 1) Yacimiento ferrífero El Laco, Chile;

Caso 2) Yacimiento Pb-Zn-Ag Naica, México

T E S I S

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

Presenta

Sergio Gómez Callejas



Director: Dr. Luis M. Alva Valdivia

Ciudad Universitaria, México, D. F., 2004



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-074

SR. SERGIO GÓMEZ CALLEJAS
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Luis Manuel Alva Valdivia y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

MAGNETISMO REMANENTE DE LAS ROCAS EN EL MODELADO CUANTITATIVO DE LA ANOMALÍA MAGNÉTICA: CASO 1) YACIMIENTO FERRÍFERO EL LACO, CHILE; CASO 2) YACIMIENTO Pb-Zn-Ag NAICA, MÉXICO

RESUMEN
INTRODUCCIÓN
I CONCEPTOS TEÓRICOS
II PLANTEAMIENTO
III MODELADO DE LA ANOMALÍA MAGNÉTICA EN 2D
IV INTERPRETACIÓN
CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

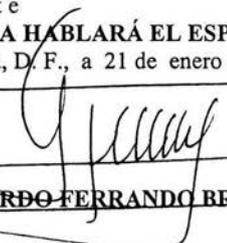
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, D. F., a 21 de enero de 2004

EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB/JAGC*gtg


A mi familia toda ella

***Por todo su apoyo
a veces intangible
y
otras veces
el puente necesario
en el camino***

A mi Universidad, por la oportunidad y las enseñanzas

A mis amigos, mis compañeros de vida, sin restricciones ni simulacros

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México

A la Facultad de Ingeniería

Al Instituto de Geofísica

Al Dr. Luis M. Alva Valdivia

A todos los Profesores que me Guiaron y Orientaron en mi Aprendizaje

Índice

Resumen	1
Introducción	3
I. Conceptos teóricos	9
II. Planteamiento	21
III. Modelado de la anomalía magnética en 2D	28
• Modelo: El Laco, Chile	
• Modelo: Distrito Minero de Naica, Chihuahua	
IV. Interpretación	35
Conclusiones	37
Bibliografía	41

Resumen

Para llevar a cabo la interpretación cuantitativa (modelado) de una anomalía magnética es de gran importancia conocer la susceptibilidad magnética (por ende el magnetismo inducido) así como los componentes de la remanencia magnética, pues generalmente estos parámetros son sólo estimados u obtenidos de la literatura según el tipo de roca para usarse en el momento del procesamiento e interpretación de las anomalías magnéticas. Las componentes (inducida y remanente) magnéticas son de relevancia crucial durante el proceso de modelado, haciendo la incertidumbre mayor o menor según el detalle en que se conozcan estos parámetros. De esta manera, cuando obtenemos estos datos directamente de mediciones efectuadas en rocas colectadas dentro del área de la anomalía a modelar, podemos obtener un modelo sumamente confiable de la anomalía observada cuya aproximación a la realidad geológica sea única.

El Laco, Chile (Fe)

El muestreo se llevó a cabo en los flancos del Pico Laco (5300 m.s.n.m.) en las zonas del Laco Norte, Laco Sur, El Laquito y cerca al campamento (4550 m.s.n.m.). Se obtuvieron 130 muestras de 16 sitios diferentes. Las rocas que se identificaron de acuerdo al muestreo fueron: mena de magnetita-hematita, andesitas e ignimbritas. En la magnetita se observó una susceptibilidad muy contrastante (muy alta) con respecto a las otras.

Los parámetros que se midieron en laboratorio fueron: susceptibilidad magnética (k), intensidad (J_r) y dirección de la magnetización remanente natural.

De acuerdo al mapa de campo total de "Antofagasta Toconao" en la zona sureste del mapa, se trazo un perfil "A-A'" sobre la anomalía magnética que muestra una respuesta magnética intensa.

El modelo realizado se basó en la utilización de los parámetros medidos en el laboratorio. El mejor modelo obtenido que mejor se ajusta a la anomalía observada se considera principalmente a un cuerpo de magnetita (posiblemente una serie de diques), de extensión aproximada de 30 km, que intrusión a la unidad andesítica como principal productor de la anomalía magnética.

Distrito minero de Naica, Chihuahua (Pb, Zn, Ag)

En este distrito se tomaron 89 muestras de 14 sitios diferentes. Los parámetros magnéticos medidos, fueron: la susceptibilidad magnética, la intensidad, inclinación y declinación de la magnetización remanente de cada una de las muestras. De acuerdo a los parámetros medidos de un dique muestreado en profundidad, considerado como representativo del batolito productor de la mineralización, el modelo realizado propone un cuerpo intrusivo con extensión aproximada de 40 Km, como respuesta a la anomalía digitalizada del plano aeromagnético.

Introducción

La composición mineralógica de las rocas determina la magnetización remanente natural (MRN) según los campos magnéticos presentes desde su génesis y a través de la historia geológica de la misma. Dicho magnetismo es originado por minerales de comportamiento ferromagnético

El magnetismo inducido en términos generales se considera paralelo y proporcional al campo geomagnético

$$J_i = kH$$

donde k es la susceptibilidad magnética, por otro lado la MRN presente aún en ausencia del campo magnético puede tener dirección, sentido y magnitud distintas de campo magnético en el lugar.

El magnetismo total observado en un estudio magnetométrico es la suma vectorial del J_i y el MRN

La interpretación cuantitativa de anomalías magnéticas usualmente no considera la contribución de la MRN o la supone colineal al campo geomagnético (no aplicable en muchos casos), por lo que en este trabajo se muestra la importancia de la determinación de la MRN para fines de modelado ¹.

Para el caso de El Laco (Chile) y el caso del Distrito Minero de Naica (México), se estudiaron las propiedades magnéticas de las rocas hospedantes y mena, y se revisaron las condiciones geológicas de las zonas en estudio.

En el depósito ferrífero El Laco, se describe un caso de mineralización metálica de supuesto origen volcánico. Se trata de coladas lávicas de magnetita presentes en la Cadena Andina chilena (Región de

Antofagasta) asociada a un complejo eruptivo andesítico-riodacítico, con actividad intermitente desde el Mioceno hasta la actualidad.

La mineralización en El Laco está formada principalmente por magnetita, que acusa un proceso de transformación parcial a hematita (alta temperatura) y un proceso supergénico de formación de goetita y magnetita². La lava normal contiene cerca de 15% de hierro, y la mineralización en el Laco Chile, puede llegar a contener hasta 54%.

En el yacimiento de Naica, los depósitos minerales de la Sierra Madre Oriental se encuentran encajonados generalmente en calizas y/o rocas clásticas carbonatadas³. Naica es una mina situada a 110 km al sureste de la ciudad de Chihuahua, Chihuahua, México. Es activo en las materias siguientes: Plomo, Zinc, Plata.

El Distrito Minero de Naica es uno de los más importantes de la zona, asociado a metasomatismo de contacto, con los depósitos de skarn. El emplazamiento de la mineralización en la zona está marcado por diques, sill, pequeñas fracturas inclinadas, mantos y chimeneas⁴.

Aproximadamente a 15 Km al suroeste del poblado de Naica, se obtuvo un perfil A-A' del plano de intensidad magnética total. La anomalía cubre una gran extensión y muestra baja frecuencia, lo que sugiere un gran cuerpo a profundidad como fuente de la misma.

La hipótesis de trabajo planteada es que la técnica de interpretación propuesta, nos ayude a:

- 1) Caso El Laco, determinar la geometría y posición en profundidad, a partir de los diversos parámetros de las propiedades magnéticas, de el o los cuerpos mineralizados productores de la anomalía magnética observada.

- 2) Caso Naica, definir la posible geometría y ubicación en profundidad del cuerpo intrusivo productor de la anomalía magnética y de la mineralización relacionada.

En ambos casos este tipo de interpretación será de gran valor para establecer y/o enfocar con mayor certidumbre los objetivos de exploración y explotación de los recursos minerales. En otros términos, la TESIS desarrolla una metodología de interpretación que considera la caracterización magnética de muestras tomadas in situ con el análisis e interpretación cuantitativa directa de las anomalías magnéticas observadas.

El Laco, Chile

Durante el Cretácico Inferior, la geología del complejo andino, en el Norte de Chile, estuvo caracterizada por la evolución de un arco volcánico, al Oeste: basaltos, andesitas y una cuenca marina al Este, recibiendo aportes volcánicos y facies



Fig. 1 Depósitos de Magnetita-apatita con asociaciones de Fe-Cu (Au,Ag)

sedimentarias principalmente carbonatadas. El conjunto arco-cuenca tras-arco en extensión, estuvo sujeto a la subducción de baja velocidad hacia el este, de la antigua placa Farallón⁵. En este período, el sistema arco-cuenca sufrió importantes intrusiones de dimensiones batolíticas, con cuerpos intrusivos de composiciones principalmente dioríticas y granodioríticas.

El Cretácico Inferior y parte del Cretácico Medio, constituye un período de tiempo en el cual se desarrollaron importantes mineralizaciones cupríferas: por ejemplo Chuquicamata (el mayor). Además de la notable, Franja Ferrífera de Chile, que se extiende entre los 26° S y 32° S e incluye unos 50 yacimientos de hierro donde la mena principal es magnetita⁶ (**fig. 1**). Las dataciones radiométricas de los yacimientos, indican edades comprendidas entre los 128 Ma (Boquerón Chañar) y 110 Ma (Los Colorados). Estos yacimientos se encuentran de alguna manera asociados a la gran Zona de Falla de Atacama y a las intrusiones de cuerpos plutónicos que cortan las secuencias volcánicas. Los recursos de la franja del hierro se estiman en unos 1000 Mt a 50% Fe.

Respecto al origen de la mineralización, el emplazamiento de hierro necesita grandes cantidades de calor y de componentes volátiles.

El hierro derivado de una diferenciación magmática se separaría por densidad o por inmiscibilidad y sería inyectado dentro de la corteza terrestre en presencia de una fase fluida importante.

En el caso de un magma toleítico, el fraccionamiento tardío de magnetita puede dar dos fases: una de composición andesítica y otra, rica en óxidos; la composición de la magnetita de la mena sería pobre en titanio.

En el caso de un magma andesítico, el fraccionamiento de magnetita va a modificar su composición, las andesitas que encajonan los cuerpos mineralizados presentan una importante alteración hidrotermal.

Distrito minero de Naica, Chihuahua

La carta metalogenética de la República Mexicana⁷ indica la mayor parte de los afloramientos de la Sierra Madre Oriental, sin embargo es posible que no se encuentren mapeadas todas las localidades.

Las rocas intrusivas en contacto con las rocas sedimentarias encajonantes, son fuente potencial de soluciones mineralizantes, el proceso metalogenético es de tipo epitermal y de emplazamiento metasomático, de tal forma que en los depósitos minerales prevalece buena cantidad de plomo-argentífero, plomo-zinc, asociaciones de plomo, zinc, cobre. Las soluciones mineralizantes provienen de stocks o núcleos de roca intrusiva que no siempre afloran. Cuando estas soluciones se depositan a profundidades de cientos de metros, son abundantes los sulfuros de plata, plomo, zinc hierro, cobre, etc. y el mineral de ganga suele ser predominantemente cuarcífero.

El Distrito Minero de Naica se encuentra entre la provincia de Coahuila al este, el altiplano Mexicano al Sur y el Río Bravo al noreste⁸ (**fig. 2**), sitúa al estado de Chihuahua como parte de la mesa central del norte. Las amplias llanuras de drenaje endorreico a las que los colonizadores Españoles llamaron Bolsones, son típicas de la mesa del norte; estas llanuras están constituidas de material de acarreo, que fueron depositados durante el Terciario y Cuaternario⁹. En esta mesa del norte,

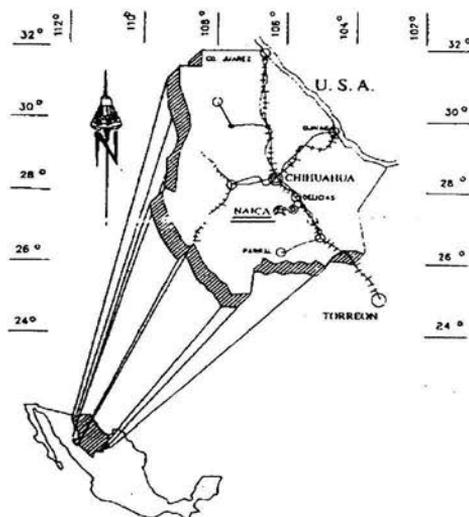


Fig. 2 Mapa de Localización Naica, Chihuahua

también se encuentran rocas intrusivas, así como extensos derrames lávicos terciarios.

En la provincia de Chihuahua, existen sedimentos de origen principalmente marino, que van en edad del Cámbrico al Cretácico Superior, con un espesor aproximado de 12,000 m, aflorando del Ordovícico al Cretácico Superior.

Los cuerpos mineralizados, principales del Distrito Minero de Naica son los skarns formados por metasomatismo cálcico de rocas silicatadas y minerales de hierro adyacentes a las calizas de las rocas de silicato de calcio.

Estos se presentan en forma de mantos con inclinaciones ligeras dentro de las capas que lo encierran¹⁰.

I. Conceptos teóricos

Magnetismo

Los átomos y las moléculas se encuentran formados por partículas cargadas positiva y negativamente, que en conjunto son eléctricamente neutros. Si suponemos que alguna de estas cargas se encuentra en movimiento constante, observado a grandes distancias estas cargas se ven como dipolos magnéticos, a tales corrientes se les denomina corrientes de amperio. Ampere postulo su existencia para explicar las propiedades magnéticas de la materia.

El campo de inducción magnética distante debido a un solo átomo se determina completamente especificando su momento dipolar magnético.

Multipolo magnético

El potencial vectorial en un punto p fuera de v' cuyo vector de posición r , es decir, en la dirección \hat{r} y a una distancia r del origen es:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{\vec{J}(r') dv'}{R} \quad \mathbf{1}$$

donde $R = |\vec{r} - \vec{r}'| = (r^2 + r'^2 - 2rr' \cos \theta)^{1/2}$

Se toma p lo suficientemente lejos de v de manera que $r > r'$ para cualquier posición de r se tiene entonces que

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} \sum_{\ell} \left(\frac{r'}{r} \right)^{\ell} P_{\ell}(\cos \theta) ;$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{\ell=0}^{\infty} \int_{v'} \vec{J}(r') r'^{\ell} P_{\ell}(\cos \theta) dr' \quad \mathbf{2}$$

El primer término para $\ell = 1$

$$\vec{A}_{dip}(r') = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \vec{J}(r') r' \cos\theta' dv$$

Cómo $r' \cos\theta = \vec{r} \cdot \vec{r}'_u$

$$\vec{A}_{dip}(r') = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \vec{J}(r') \vec{r} \cdot \vec{r}'_u dv'$$

$$\vec{A}_{dip}(r') = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\int_v \vec{J}(r') \vec{r} dv' \right] \cdot \vec{r}'_u$$

\vec{m} = momento magnético dipolar

$$\vec{m} = \left[\int_v \vec{J}(r') \vec{r} dv' \right] = \frac{1}{2} \int_v \vec{r} \times \vec{J}(r') dv'$$

$$\vec{m} = \frac{1}{2} \oint \vec{r} \times d\vec{\ell}$$

Momento dipolar magnético de la distribución de corrientes

\vec{A}_{dip} Es perpendicular al plano que forman \vec{m} y r su magnitud es:

$$\vec{A}_{dip} = \frac{\mu_0 \text{sen}\theta}{4\pi r^2}$$

Magnetización

Si $B=0$ es posible que las cargas que se encuentran circulando en la materia sean neutras, por el hecho que la suma vectorial de la carga neta circulando es igual a cero, es decir la suma de momentos dipolares es cero.

Si $B \neq 0$ la existencia de corrientes externas es tal que resultan en momentos de tensión sobre los dipolos que tenderán a alinearse en la dirección de la inducción. Podemos decir que un momento fue inducido por el campo R y que la materia fue **magnetizada** .

En ausencia de una inducción externa y si el material presenta un momento dipolar diferente de cero de modo que tuviera un momento dipolar magnético permanente.

Aun en ausencia de un campo, algunos materiales tienen la propiedad de que sus dipolos permanentes se encuentran parcialmente alineados

La magnetización M se define como el momento dipolar magnético por unidad de volumen para un pequeño volumen v en \vec{r} sera:

$$dm = M(\vec{r})dv$$

Asi el momento dipolar total de un volumen v sera:

$$m_{total} = \int_v M(\vec{r})dv \quad \text{ampere/metro} \quad \mathbf{3}$$

Todos los efectos magnéticos debidos al material pueden describirse en función de M o por sus derivadas

$$rotM = J_m \quad \mathbf{3a}$$

donde

J_m : densidad de corriente de magnetización

Si la magnetización es uniforme las corrientes en las diversas espiras tienden a eliminarse y no hay corriente neta efectiva en el interior del material.

Si no es uniforme la magnetización, la cancelación no será completa.

El potencial vectorial producido por un objeto magnetizado en un punto r situado en el exterior de un cuerpo como de **1**

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{J(r') dv'}{R} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mu_0 m \times \hat{r}}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 m \times r}{4\pi r^3}$$

y de $dm' = M(r') dv'$

entonces

$$dA' = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dm' \times \hat{R}}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M(r') \times \hat{R} dv'}{R^2}$$

Si $R = r - r'$

Integramos sobre el volumen del material v'

$$\vec{A}(\vec{r}) = \int_V \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M(r') \times \hat{R} dv'}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V M(r') \times \nabla' \left(\frac{1}{R} \right) dv' \quad \mathbf{4}$$

Sabemos que $\nabla \left(\frac{1}{R} \right) = -\nabla' \left(\frac{1}{R} \right) = -\frac{\hat{R}}{R^2} = -\frac{R}{R^3}$

y utilizando la relación vectorial $\nabla \times (uA) = (\nabla u) \times A + u(\nabla \times A)$

Entonces $M \times \nabla' \left(\frac{1}{R} \right) = \frac{\nabla' \times M}{R} - \nabla' \times \left(\frac{M}{R} \right)$

Al sustituir en **4** y utilizando $\oint_S u dA = \int_V \nabla u dv$; $dA = da \hat{n}$

da : elemento de superficie

\hat{n} : vector normal unitario

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \frac{(\nabla' \times M) dv'}{R} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \left[-\nabla' \times \left(\frac{M}{R} \right) \right] dv'$$

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{(\nabla' \times M) dv'}{R} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S'} \frac{M \times \hat{n}' da'}{R} \quad \mathbf{5}$$

Si J_M = densidad de corriente de magnetización superficial

$$\text{Si } J_m = M \times n \quad \text{y} \quad R = |r - r'|$$

Podemos escribir la ecuación como:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V'} \frac{J_M(r') dv'}{|r - r'|} + \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{S'} \frac{J_M da'}{|r - r'|} \quad \mathbf{6}$$

Potencial vectorial producido por una distribución de corrientes

Sabemos que $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}(\vec{r}) = \text{rot}A$

También que $\text{rot}(A \times B) = a(\text{div}b) - b(\text{div}a) + (b \cdot \nabla)a - (a \cdot \nabla)b$

Si $a=M$ y $b = \frac{(r-r')}{|r-r'|^3}$ y derivamos con respecto a las coordenadas primas

$$\text{rot} = \left[M \times \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] = M \text{div} \left[\frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] - (M \cdot \nabla) \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \quad \mathbf{7}$$

$$B(r) = \underbrace{\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} M \text{div} \left[\frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] dv'}_{B_1} - \underbrace{\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} (M \cdot \nabla) \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} dv'}_{B_2} \quad \mathbf{8}$$

De B_1 y de $S = r' - r$ y si el volumen es muy pequeño M es constante sobre el Volumen de B_1

$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} M(r) \int_{V'} \text{div} \left[\frac{s}{s^3} \right] dv' = \frac{\mu_0}{4\pi} M(r) \int_{S'} \left[\frac{s \cdot n}{s^3} \right] da'$$

$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} M(r) \quad \mathbf{9}$$

De B_2 tenemos que:

$$B_2(r) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{V_0} (M \cdot \nabla) \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} dv' \quad \mathbf{10}$$

Utilizando una identidad vectorial

$$\nabla \left[M \cdot \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] = (M \cdot \nabla) \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} + M \times \text{rot} \left[\frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] \quad \mathbf{11}$$

Del último término de **11**

$$\text{rot} \left[\frac{(r-r')}{|r-r'|^3} \right] = -\text{rot}(\text{grad}) \frac{1}{|r-r'|} \quad \mathbf{12}$$

El término de la derecha se anula, por lo tanto

$$B_2(r) = -\frac{\mu_0 \nabla}{4\pi} \int_{V_0} M(r') \cdot \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} dv' \quad \mathbf{13}$$

Entonces de **13**

$$B_2(r) = -\frac{\mu_0 \nabla}{4\pi} \int_{V_0} M(r') \cdot \frac{(r-r')}{|r-r'|^3} dv' = -\mu_0 \nabla u(r) \quad \mathbf{14}$$

Ahora de **9** y **14** en **8**

$$B(r) = -\mu_0 \nabla u(r) + \mu_0 M(r) \quad \mathbf{15}$$

Campo Magnético

Si utilizamos la identidad matemática

$$M \cdot \frac{(r-r')}{(r-r')^3} = M \cdot \text{grad}' \frac{1}{|r-r'|} = \text{div}' \frac{M}{|r-r'|} - \frac{1}{|r-r'|} \text{div}' M \quad \mathbf{16}$$

De tal forma que en **13**

$$u(r) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \frac{M \cdot nda'}{|r-r'|} - \frac{1}{4\pi} \int_{S_0} \frac{\text{div}' M}{|r-r'|} dv' \quad \mathbf{17}$$

Donde S_0 es la superficie del volumen v_0 de **17** podemos definir dos cantidades escalares

$$\rho_m(r') = -\text{div}' M(r') \quad \mathbf{18}$$

Densidad de polo magnético

$$\sigma_m(r') = M(r') \cdot n \quad \mathbf{19}$$

Densidad superficial de la intensidad del polo magnético

Las unidades de ρ_m y σ_m son *ampere/metro²*

El campo H

La intensidad magnética definida por H se define por

$$H = \frac{1}{\mu_0} B - M \quad \mathbf{20}$$

De las ecuaciones de campo sabemos que

$$\text{div} B = 0; \quad \text{rot} B = \mu_0 J$$

El campo producido por la materia magnética también es derivable de un potencial por lo tanto B se puede escribir como el rotacional de A entonces la divergencia como consecuencia:

$$\text{div} B = 0 \quad \mathbf{20a}$$

La ecuación del rotacional es la forma diferencial de la ley circuital de Ampere

$$\text{rot} B = \mu_0 (J + J_M) \quad \mathbf{21}$$

Donde J es la densidad de corriente verdadera

J_M es la densidad de corriente de magnetización

De **3a** y **21** tenemos

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_0}B - M\right) = J \quad \mathbf{22}$$

De **20** y **22**

$$\operatorname{rot}H = J \quad \mathbf{23}$$

Por lo tanto el vector Magnético H está relacionado con la densidad de corriente verdadera por su rotacional

Con la ayuda del teorema de Stokes la ecuación **23** puede convertirse en

$$\begin{aligned} \int_S \operatorname{rot}H \cdot nda &= \oint_c H \cdot dl \\ &= \int_S J \cdot nda \end{aligned}$$

o

$$\oint_c H \cdot dl = I \quad \mathbf{24}$$

Esto es que la integral de línea es la componente tangencial de la intensidad magnética en una trayectoria cerrada c .

Del teorema de la divergencia **20a** tenemos que:

$$\oint_S B \cdot nda = 0$$

Concluimos que el flujo magnético en cualquier superficie cerrada es igual a cero.

Campo Geomagnético

Además de la magnetización inducida, resultado de la acción del campo magnético actual, un material también puede poseer magnetización remanente J_r , que es un registro de los campos magnéticos pasados que han actuado sobre el material.

En paleomagnetismo, la dirección de un vector tal como la superficie del campo geomagnético, esta usualmente definida por los ángulos D , I (**Fig.3**). La componente vertical H_v , de la superficie del campo geomagnético H , se define como positiva hacia abajo y está dada por

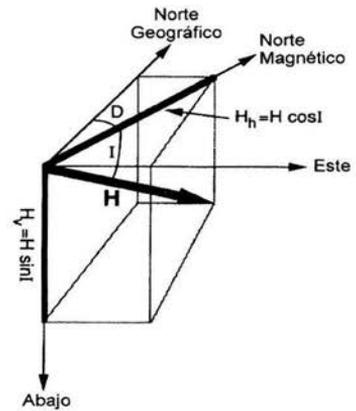


Fig. 3 Descripción de la dirección del Campo Magnético

$$H_v = H \operatorname{sen} I$$

H es la magnitud e I es la inclinación de H desde la horizontal, variando desde -90° hasta $+90^\circ$ y está definida como positiva hacia abajo. La componente horizontal H_h , está dada por

$$H_h = H \cos I$$

y las componentes norte y este son

$$H_N = H_h \cos D = H \cos I \cos D$$

$$H_E = H_h \operatorname{sen} D = H \cos I \operatorname{sen} D$$

respectivamente, donde D es declinación, ángulo medido desde el norte geográfico hasta la componente horizontal, variando desde 0° hasta 360° en sentido de las manecillas del reloj. Si se conocen los componentes D e

I , entonces es posible calcular la intensidad total del campo magnético por:

$$H = \{(H_N)^2 + (H_E)^2 + (H_V)^2\}^{1/2}$$

Modelo dipolar geocéntrico y axial (DGA):

Es el campo magnético producido por un dipolo magnético en el centro de la tierra y alineado con el eje de rotación (**Fig. 4**), El DGA tiene las siguientes propiedades:

$$H_h = (M \cos \lambda) / r e^3 ; \quad H_v = (2M \operatorname{sen} \lambda) / r e^3 ; \quad H = (M \{1 + 3 \operatorname{sen}^2 \lambda\}^{1/2}) / r e^3$$

M es el momento dipolar del dipolo geocéntrico axial, λ es la latitud geográfica (-90° en el polo geográfico sur y $+90^\circ$ en el polo norte), y $r e$ es el radio medio terrestre.

La longitud de los vectores de fuerza del campo magnético (**Fig. 4**), muestran que ésta aumenta del ecuador a los polos por un factor aproximado a 2. La inclinación del campo puede calcularse por:

$$\tan I = (H_v / H_h) = (2 \operatorname{sen} \lambda / \cos \lambda) = 2 \tan \lambda$$

I aumenta desde -90° en el polo geográfico sur hasta $+90^\circ$ en el polo norte. Líneas de igual I , son paralelas a las líneas de latitud y se relacionan por la expresión anterior, siendo referida como **ecuación dipolar**. Esta relación entre I y λ es esencial para comprender

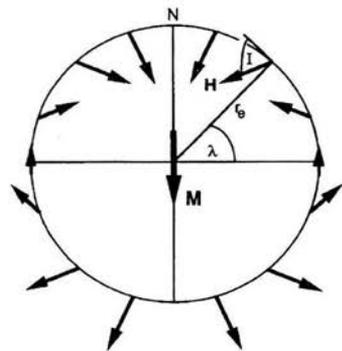


Fig. 4 Modelo dipolar geocéntrico y axial

las aplicaciones paleogeográficas y tectónicas del paleomagnetismo. Para un DGA, la $D = 0^\circ$ en todas partes.

Susceptibilidad magnética

Para la solución de problemas de la teoría electromagnética es esencial tener una relación entre B , H y M . Existe una relación aproximadamente lineal entre M y H si el material es isotrópico y lineal, tenemos que:

$$M = kH$$

Donde k es la susceptibilidad magnética y es una cantidad adimensional

Si el material es paramagnético entonces $k > 0$

Cuyos átomos poseen celdas incompletas, por lo que cada átomo tiene un momento magnético debido a los espines no compensados, por lo que los electrones preceden y el momento magnético se alinea en la misma dirección del campo aplicado. Sus susceptibilidades (magnetización adquirida por unidad de campo aplicado) son mayores que 10^{-3} a 10^{-5} SI, mientras que en los diamagnéticos son menores de 10^{-3} SI.

Si el material es diamagnético entonces $k < 0$

Debido a que poseen las celdas electrónicas completas y la presión de la órbita del electrón en un campo magnético, da como resultado la generación de un campo magnético en dirección opuesta al campo aplicado.

Si el material es ferromagnético entonces $k > > 1$

La interacción entre los momentos magnéticos de espines no apareados es muy intensa, pues son paralelos, razón por la cual,

presentan una magnetización espontánea muy fuerte, inclusive cuando no haya campo magnético externo. Los *antiferromagnéticos*, cuyos momentos se aparean en forma antiparalela, por lo tanto no presentan magnetización espontánea. Como un punto medio entre los anteriores, los *ferrimagnéticos*, en los que los momentos magnéticos son antiparalelos de diferente magnitud, presentan magnetización menor que la de los ferromagnéticos, pero adquirida aún en ausencia del campo aplicado. Cabe mencionar que todos los minerales magnéticos que se encuentran en las rocas terrestres son ferromagnéticos.

La susceptibilidad magnética k mide la capacidad de los momentos magnéticos microscópicos a alinearse con un campo externo

Magnetización remanente natural (MRN)

La magnetización de un material, para el caso de las rocas, es una suma vectorial de dos componentes.

$$J = J_i + J_r$$

Donde J_i , es la magnetización inducida y J_r , es la magnetización remanente natural.

Además J_i es paralela al campo geomagnético local y domina en la mayoría de las rocas, pero la adquisición es un proceso reversible sin memoria de campos pasados.

La magnetización remanente natural es una magnetización de la roca antes de que se le efectúe algún proceso en el laboratorio. La *MRN* depende del campo geomagnético y de procesos geológicos durante su formación e historia de la roca. Por lo tanto, normalmente cuenta con más de una componente, conociéndose como componente primaria la adquirida durante su formación y componentes secundarias, todas aquellas que adquirió después de que se formó.

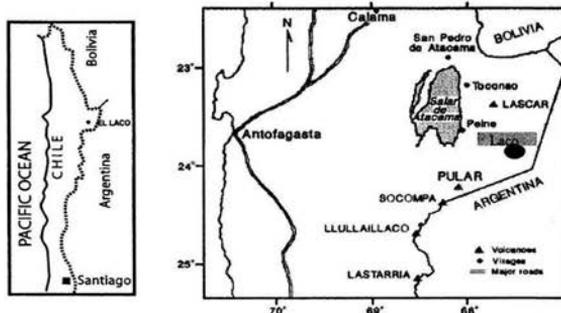
II. Planteamiento

Fundamentalmente el análisis de las susceptibilidades, intensidad y dirección de la MRN de las unidades muestreadas, se enfocó a su utilización como parámetros o condiciones iniciales durante el proceso de interpretación cuantitativa de las anomalías magnéticas respectivas. Esto, además de caracterizar magnéticamente a las unidades litológicas, nos permitiría proponer los modelos más adecuados (geometría y profundidad) que se ajusten a la realidad geológica en cada área.

La aportación fundamental de la Tesis fué proponer modelos geofísico-geológicos con la menor incertidumbre posible, con base en los datos magnéticos medidos y rasgos geológicos de cada área de estudio, que sirvieran de base para planear futuras estrategias de exploracion y/o explotación.

El Laco, Chile

El Laco Chile, se encuentra localizado en $23^{\circ} 48'$ latitud sur y $67^{\circ} 30' 15''$ longitud oeste, en la parte Norte de Chile. Al Norte colinda con Bolivia, al Sur con Argentina, al oeste con el Océano Pacífico y al Este con Argentina.



Croquis de Ubicación El Laco Chile

La información magnética fue tomada del Mapa aeromagnético de anomalía residual de campo total, los datos magnéticos fueron asignados con coordenadas y altura, a la vez que se corrigieron por variación diurna y campo magnético regional.

En la zona de El Laco, se muestrearon 16 sitios obteniéndose 130 muestras (núcleos de 10 cm^3) alrededor del Pico Laco que se encuentra a 5300 m.s.n.m. Se muestreo en la zona del Laco Norte, Laco Sur, Laquito y cerca del campamento a 4550 m.s.n.m.

Los registros que se tomaron in situ fueron: ubicación geográfica del sitio, altura del sitio, número de muestra, hora de la medición por muestra, azimuth solar de la muestra, azimuth magnético de la muestra, inclinación.

Los parámetros medidos en laboratorio fueron: Susceptibilidad Magnética (k), Intensidad de MRN (J_{MRN}), Inclinación de la MRN (Inc_{MRN}) y Declinación de la MRN (Dec_{MRN}).

Los datos corregidos en el laboratorio fueron, la declinación de la MRN de las muestras que eran afectadas por el entorno fuertemente

magnetizado de la zona, por medio del programa Sundec (*corrección solar*). Después de este proceso se corrigieron con el programa Fcorca.xls (*que calcula las coordenadas geográficas a partir de las coordenadas de núcleo*).

Posteriormente, se obtuvieron los valores medios por sitio de los valores de susceptibilidad magnética e intensidad de la MRN. Además se obtuvieron las direcciones medias para cada sitio utilizando la distribución sobre una esfera de Fisher (1953) (**Tabla 2**).

Los 16 sitios donde se recolectaron las muestras se marcan con número en la figura

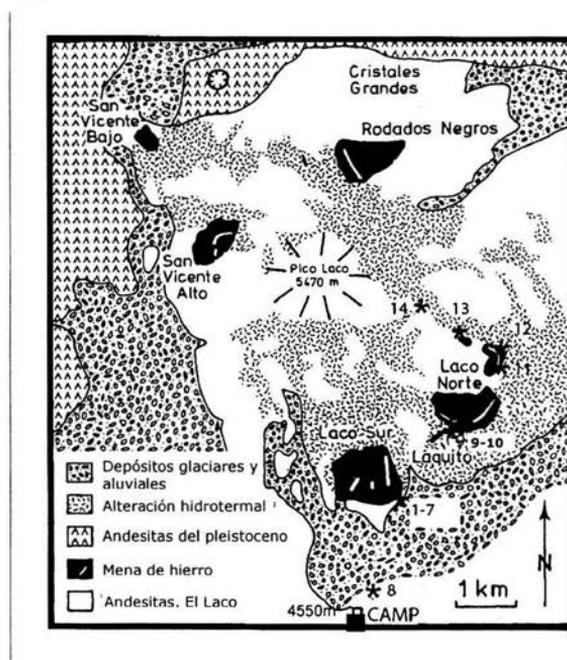


Tabla 2

sitio	Dec _{MRN}	Incl _{MRN}	J _{r promMRN} (A/m)	J _{r desv}	K (SI)	K desv	n	Tipo de Roca
1	43.00°	+27.80°	0.479	0.217	1.2445	0.0612	5	magnetita
3	138.20°	-34.30°	9.112	5.331	1.3559	0.2964	5	
4	140.00°	-05.50°	14.169	7.145	1.1312	0.1781	4	
5	176.50°	-22.30°	2.177	0.857	1.0722	0.4721	3	
6	277.30°	-42.00°	25.703	16.899	1.2270	0.7100	8	
7	189.40°	57.10°	0.102	0.091	0.0157	0.0097	4	
8	71.10°	46.20°	0.030	0.034	0.0338	0.0076	9	
10	284.20°	48.40°	0.360	0.290	0.0292	0.0384	6	hematita
12	298.70°	-26.90°	2.190	1.795	0.2612	0.3718	6	andesita
14	161.40°	-30.20°	0.024	0.016	0.0338	0.0078	6	andesita
15	337.70°	06.10°	0.017	0.018	0.0031	0.0014	5	Ignimbrita
16	154.50°	-32.90°	0.006	0.003	0.0049	0.0019	6	

Resultados promedio de El Lago, Chile

Dec_{MRN}: Declinación de la MRNIncl_{MRN}: Inclinación de la MRNJ_{r prom MRN}: Intensidad magnética de la MRNJ_{r desv}: desviación estándar de la MRN

K: susceptibilidad magnética

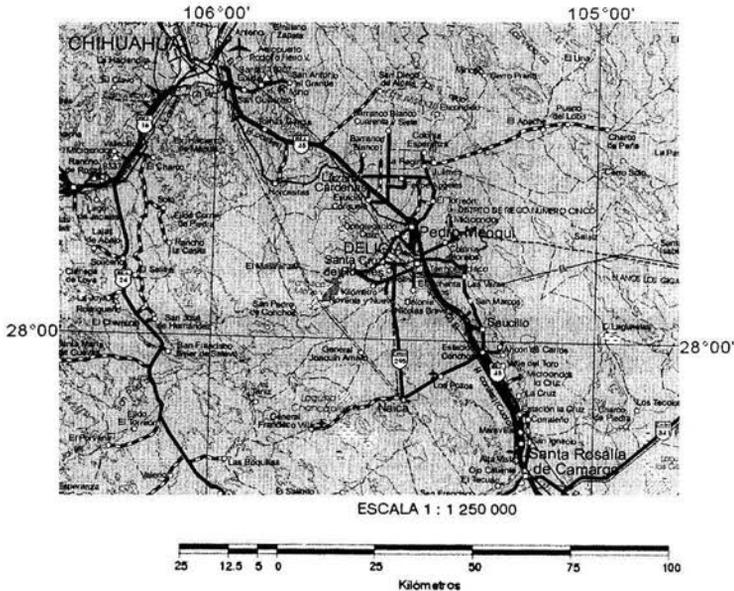
K_{desv}: desviación estándar de la susceptibilidad

n: numero de muestras

Para los sitios 2, 9, 11 y 13 el número de muestras no fue suficiente para obtener un promedio de la declinación e inclinación de la NRM por medio del programa de distribución Fisher.

Distrito minero de Naica, Chihuahua

El Distrito Minero de Naica, se encuentra localizado en el Estado de Chihuahua en $27^{\circ} 52' 00''$ Norte y $105^{\circ} 26' 15''$ Oeste, este se ubica en la parte central-sur del Estado, 100 Km. al Sureste de la capital de Chihuahua.



La información magnética fue tomada del plano aeromagnético de intensidad magnética total (efectuado por Minera Peñoles).

La zona del Distrito Minero de Naica fue muestreada en 14 sitios diferentes, obteniéndose 89 muestras orientadas (núcleos de 10 cm^3); los registros que se tomaron in situ fueron: ubicación geográfica del sitio, altura del sitio, número de muestra, hora de la medición por muestra, azimuth solar de la muestra, azimuth magnético de la muestra e inclinación del núcleo.

Los parámetros que se midieron en laboratorio fueron: susceptibilidad magnética (k), intensidad de magnetización remanente natural, Inclinación de la NRM (Inc_{MRN}) y Declinación de la NRM (Dec_{MRN}).

En 9 sitios se recolectaron las muestras que se marcan en el croquis, y otros 5 se tomaron en el interior de la mina (ver **Tabla 3**).

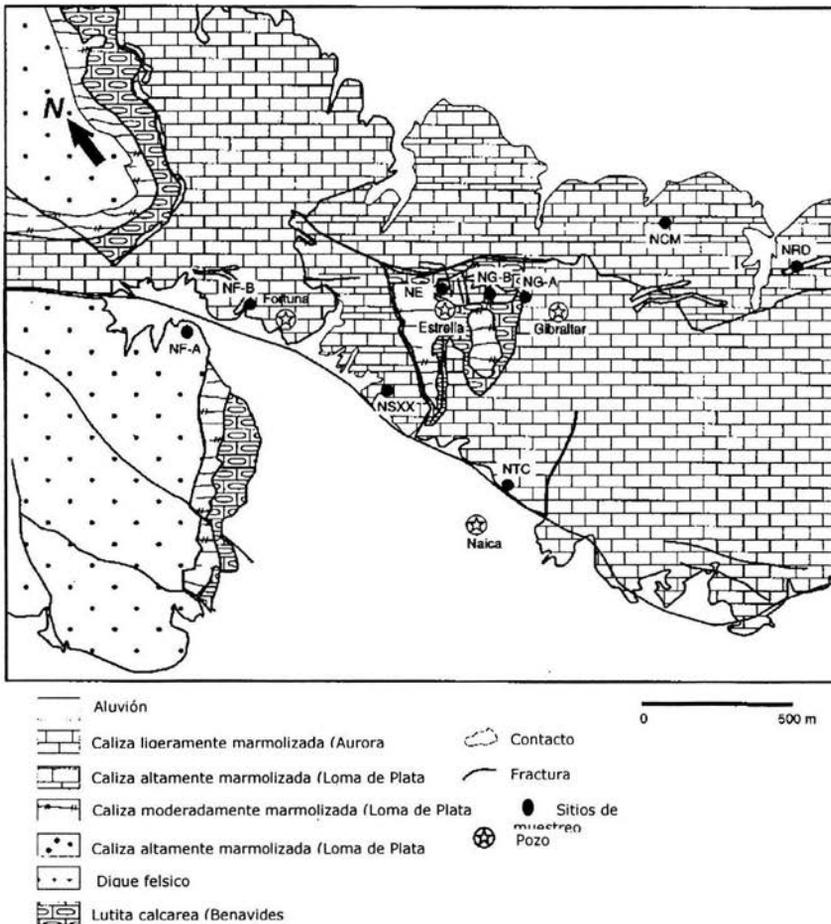


Tabla 3

Sitio	Inc _{MRN}	Dec _{MRN}	J _{rMRN} (A/m)	J _r desv	k (SI)	K desv	n	Tipo de Roca
NGa	46.50°	335.80°	0.3443	0.0732	0.001081	0.000494	6	Caliza Calcarea
NGb	41.50°	331.80°	0.0079	0.0044	0.0000345	0.0000193	6	Caliza Calcarea
NCM	45.00°	13.90°	0.0006	0.0002	-0.0000054	0.0000039	8	Caliza marmolizada
NE	67.50°	357.00°	0.0006	0.0003	0.0000079	0.0000019	6	Caliza ligeramente marmolizada
NFa	49.40°	49.00°	0.0005	0.0001	0.0000091	0.0000042	6	Caliza marmolizada
NFb	27.00°	341.50°	0.0005	0.0001	0.0000113	0.0000043	6	Caliza ligeramente marmolizada
NSXX	31.80°	57.20°	0.0005	0.0002	-0.0000114	0.0000113	7	Caliza fuertemente marmolizada
NTG	38.30°	23.50°	0.0005	0.0000	-0.0000134	0.0000049	8	Caliza ligeramente marmolizada
NFc	24.40°	25.00°	0.0017	0.0009	0.0001268	0.0000441	6	dique felsitico
ND	58.00°	310.80°	0.0046	0.0029	0.0000038	0.0000022	4	Dique felsico muestreado a 530 m de profundidad
NRD	-23.00°	105.90°	0.0026	0.0010	0.0000198	0.0000056	8	Dique felsico
NMT	85.00°	94.40°	0.0006	0.0003	0.0002964	0.0001172	6	Exoskam silicatado muestreo a 430 m de profundidad
NSK	49.80°	329.20°	0.0026	0.0012	0.00122	0.000406	8	Endoskam silicatado muestreo a 530 m de profundidad
NS	46.70°	322.20°	0.0412	0.0254	0.002907	0.001543	6	Mena de sulfuro masivo muestreo a 290 m de profundidad

Resultados promedio de los sitios del Distrito Minero de Naica, Chihuahua

Dec_{MRN}: Declinación de la MRN

Inc_{MRN}: Inclinación de la MRN

J_{r prom MRN}: Intensidad magnética de la MRN

J_{r desv}: desviación estándar de la MRN

K: susceptibilidad magnética

K_{desv}: desviación estándar de la susceptibilidad

n: numero de muestras

Los sitios NMT, NSK, NS, ND fueron muestreados a diferentes niveles de profundidad dentro de la mina.

III. Modelado de la anomalía magnética

El modelado de la anomalía se llevó a cabo usando el Software **GM-SYS Grav/Mag Modeling Software**. Este programa se basa en el algoritmo de Talwani^{11,12} para dos dimensiones de cuerpos con geometría irregular.

Para el programa **GM-SYS Grav/Mag Modeling Software**, la creación del modelo implica un análisis cualitativo de la anomalía que se establece por el conocimiento previo de la misma, así como de los parámetros magnéticos obtenidos de las diferentes unidades de roca que se muestrearon en el área de estudio. De esta forma, se obtendrá una respuesta magnética congruente a la anomalía magnética observada, el programa interactúa con el usuario de tal forma que podemos cambiar la geometría del modelo, así como los parámetros magnéticos y observar la respuesta magnética en tiempo real

Los parámetros que se ingresan al programa son: Susceptibilidad Magnética (**K**), Intensidad de magnetización remanente (**Jr**), Inclinación (**Inc**) y Declinación (**Dec**) de la Magnetización Remanente.

También se ingresaron al Software los parámetros del Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF): Campo Total, inclinación magnética (con respecto al plano horizontal) y declinación magnética (respecto al norte geográfico).

El Lago, Chile

Se seleccionó el perfil A- A' (**Fig. 8**), con una distancia aproximada de 35 km, donde se encuentra el dipolo, con una orientación noreste-suroeste y con este mismo rumbo se digitizaron los datos sobre el perfil; los valores en su parte positiva son de (+135 gamas) y en su parte negativa de (-160 gamas). Para desarrollar el modelado de la anomalía se llevaron a cabo varias configuraciones geométricas, tomando en cuenta los valores medios de las propiedades magnéticas medidas (**Tabla 4**). Los valores calculados basados en la configuración geométrica propuesta (**Fig. 9**) dieron una respuesta muy cercana a los valores digitizados de la anomalía observada.

Cuerpos propuestos	Suceptibilidad (K) SI	Intensidad de magnetización remanente (J_{MRN}) A/m	Inclinación de la magnetización remanente (Inc_{MRN})	Declinación de la magnetización remanente (Dec_{MRN})	Tipo de roca
1	1.0601	11.110	-37.00°	167.00°	magnetita
2	0.1326	9.713	-26.90°	298.70°	hematita
3	0.0338	0.030	46.20°	71.10°	andesitas
Campo Geomagnético de Referencia Internacional					
Campo total			24,320 gamas		
Inclinación Magnética			- 19° 02'		
Declinación Magnética			0° 57'		

Tabla 4 Valores que se tomaron para el modelo, El Lago Chile

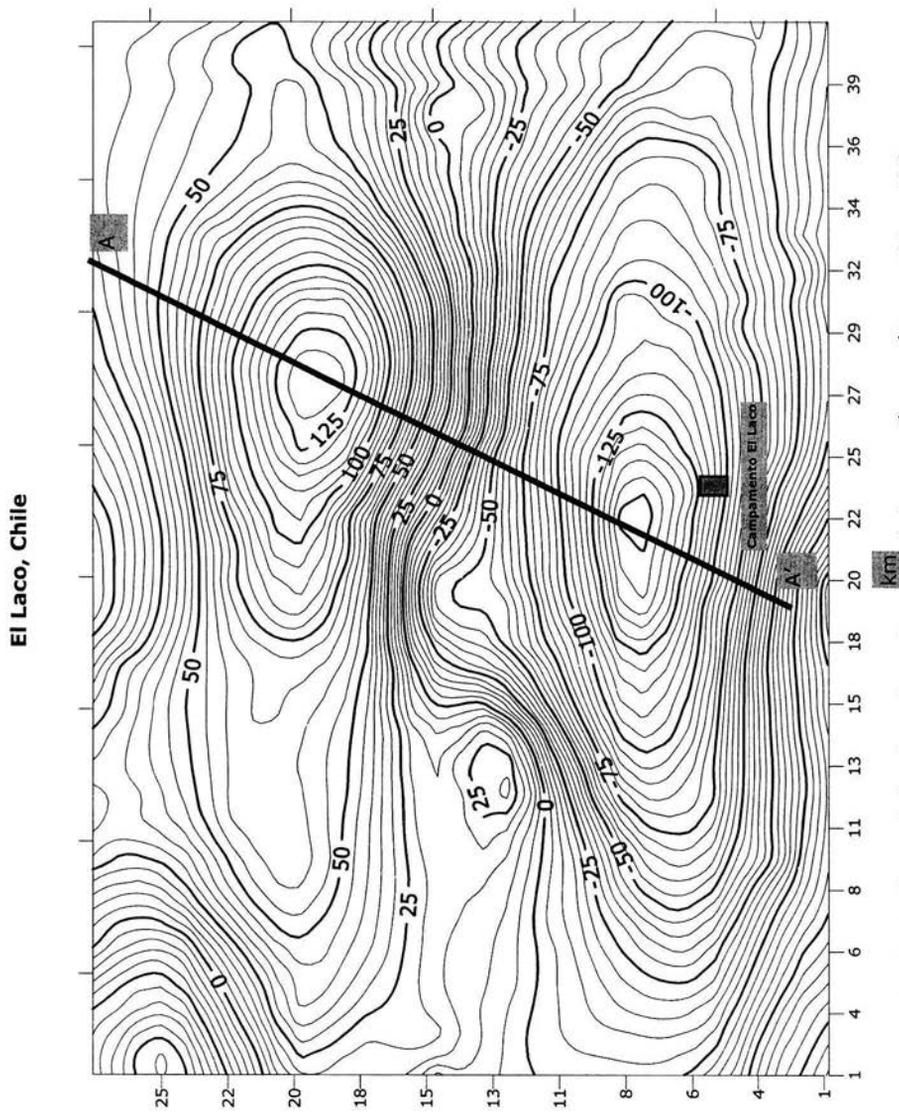


Fig. 8 Perfil trazado (A-A'), en la configuración de la anomalía magnética en El Lago Chile

Gráfica de la anomalía observada, anomalía calculada y modelo geológico

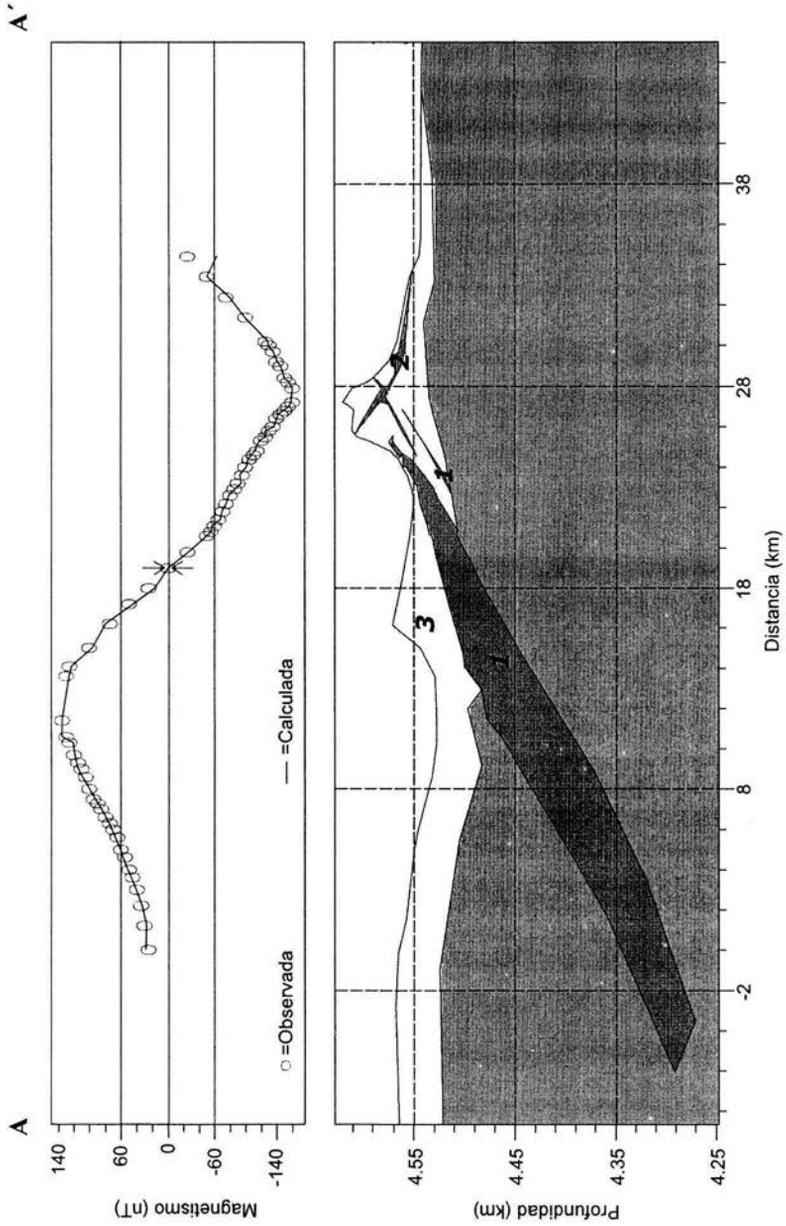


Fig. 9

Distrito Naica, Chihuahua

La anomalía en el área de estudio corresponde a un dipolo orientado casi Norte-Sur, del cual se digitizaron los valores sobre n perfil A- A', con una extensión aproximada de 30 km. El dipolo de la anomalía registró en su valor mayor 48,350 gamas y en su valor menor 48,020 gamas (**Fig. 10**).

Para desarrollar el modelado de la anomalía se llevaron a cabo varias configuraciones geométricas tomando en cuenta el conocimiento detallado de la geología de la zona y los valores medios de las propiedades magnéticas medidas en el laboratorio (**ver Tabla 5**). Esto arrojó como resultado una respuesta muy cercana (anomalía calculada) a los valores digitizados de la anomalía observada (**Fig. 11**).

Cuerpos propuestos	Suceptibilidad (K) SI	Intensidad de magnetización remanente (J_{rMRN}) A/m	Inclinación de la magnetización remanente (Inc_{MRN})	Declinación de la magnetización remanente (Dec_{MRN})	Tipo de roca
1	0.05001000	0.005	58.00°	311.00°	Intrusivo
2	0.00010000	0.005	67.00°	357.00°	Caliza marmolizada
Campo Geomagnético de Referencia Internacional					
Campo total			47,800 gamas		
Inclinación Magnética			58°		
Declinación Magnética			9.8°		

Tabla 5 Valores que se tomaron para el modelo, Distrito Minero de Naica

Distrito Minero de Naica, Chihuahua

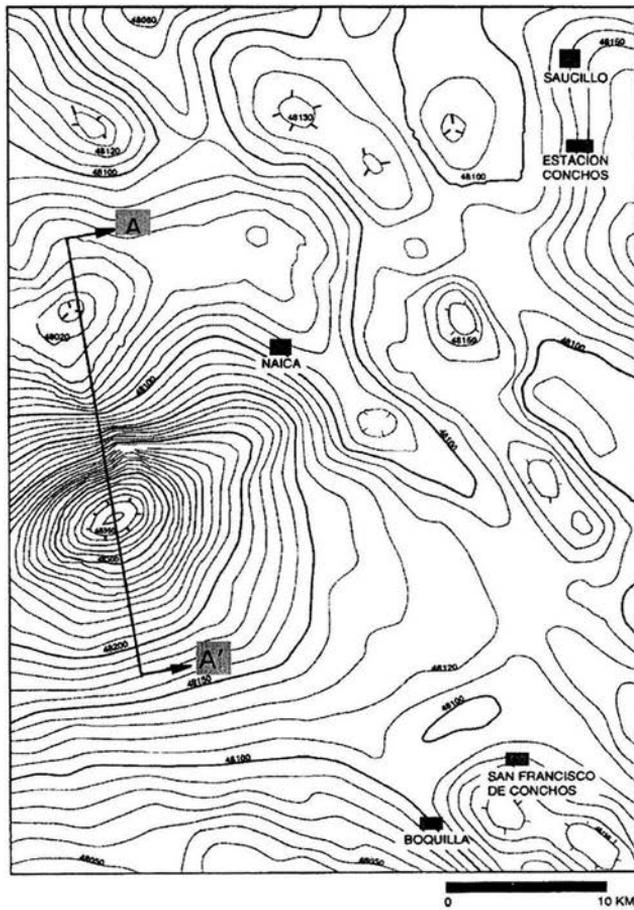


Fig. 10 Perfil trazado (A-A'), en la configuración de la anomalía magnética, Distrito Minero de Naica, Chihuahua

Gráfica de la anomalía observada, anomalía calculada y modelo geológico

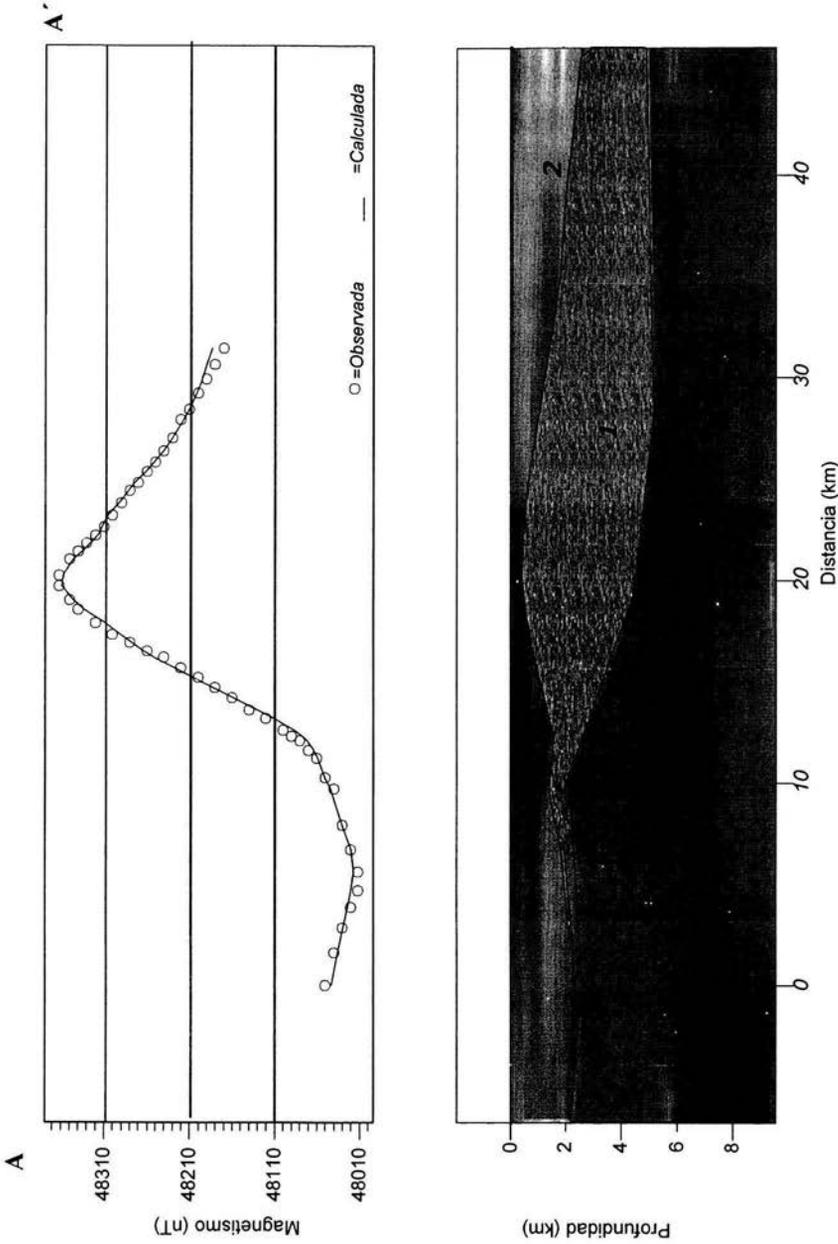


Fig. 11

IV. Interpretación

El Laco Chile

En las muestras colectadas se identificaron principalmente: mena de magnetita-hematita, andesitas e ignimbritas. **(Tabla 4)**

Para el modelo, el cuerpo de andesita se ubicó en la parte superior de la configuración, debido a los sitios de muestreo, sitio 8 y 14 que se marcan en el plano de ubicación de sitios.

Los valores usados para el cuerpo de andesita **(3)** son: $k= 0.0338$ SI, $J_r_{MRN} = 0.030$ A/m, $Inc._{MRN} = 46.20^\circ$, $Dec_{MRN} = 71.10^\circ$. Este cuerpo tiene una extensión que cubre todo el cuerpo principal de magnetita.

El cuerpo de mena de hematita **(2)** se encuentra aflorando al norte y al sur, debajo del Pico Laco, con una geometría de forma tabular que intrusión a la andesita, sitio 1 al 7, donde los valores son: $K=0.1326$ SI, $J_r_{MRN} = 9.713$ A/m, $Inc._{MRN} = -26^\circ$, $Dec_{MRN} = 298^\circ$, siendo el valor de J_r_{MRN} el que más influye en la respuesta magnética.

El cuerpo de magnetita **(1)** en la configuración, corresponde a una geometría de extensión aproximada a 26 km en forma de dique tabular inclinado (no obstante la exageración vertical en la escala), disminuyendo su ancho hacia el sur donde aflora, con una profundidad en la parte norte de 4.8 km y espesor aproximado de 0.4 km, es el cuerpo que afecta mayormente a la anomalía por sus valores medidos, que son: $K=1.0601$ SI, $J_r_{MRN} = 11.110$ A/m, $Inc._{MRN} = -37^\circ$, $Dec_{MRN} = 167^\circ$.

Distrito Minero de Naica, Chihuahua

Se identificaron en los sitios de muestreo, lutita calcárea, caliza marmolizada, endoskarn, exoskarn, y diques félsicos intrusivos (**Tabla 5**).

Para llevar a cabo el modelado del perfil A-A' se consideró al dique félsico como el sitio muestreado más representativo del batolito a profundidad, desde el punto de vista magnético, para considerar los valores medidos como condiciones iniciales en el proceso de modelado.

El cuerpo intrusivo (**1**) (batolito) es el que contribuye mayormente a la anomalía, debido a sus propiedades magnéticas. Éste se ubicó en la parte media del perfil por debajo de la caliza marmolizada, debido al sitio de muestreo colectado a 530 m de profundidad. Los valores que se tomaron para modelar el cuerpo intrusivo fueron: $K= 0.05$ SI, $Jr_{MRN} = 0.005$ A/m, $Inc._{MRN} = 58.00^\circ$, $Dec_{MRN} = 311^\circ$. Éste cuerpo tiene una extensión aproximada de 40 km, y profundidad en su base de 4.5 km con un espesor de 2 km en la parte Norte, y al Sur termina acuñaándose.

El cuerpo de caliza marmolizada (**2**) en la configuración, corresponde a una geometría de extensión aproximada a 50 km, en forma de depósito estratificado, de 2 km de profundidad. En la parte somera del intrusivo, se tiene un espesor de 400 m de caliza marmolizada, sus valores medidos son: $K=0.0001$ SI $Jr_{MRN} = 0.005$ A/M, $Inc._{MRN} = 67^\circ$, $Dec_{MRN} = 357^\circ$.

Conclusión

Es conocida la ambigüedad que presentan los estudios geofísicos, en cuanto a que el ajuste de los datos (anomalías) calculados con los observados puede hacerse utilizando una variedad amplia de propiedades magnéticas, geometrías, profundidades y tamaños de los cuerpos propuestos. En este trabajo la aportación principal es que se muestra la forma de disminuir al máximo dicha incertidumbre, que en el caso de interpretación de datos magnéticos se basa en la introducción de los datos de susceptibilidad magnética, intensidad y dirección de la remanencia como parámetros iniciales para el proceso de modelado de las anomalías observadas. Obteniendo una gran precisión y confiabilidad del modelo propuesto que considero se aproxima mucho más a la realidad geológica para ambos casos presentados en este trabajo.

El Laco Chile

Para este caso encontramos que la susceptibilidad así como la intensidad de la remanencia del cuerpo principal (**1**), (**figura 9**), nos aporta valores que contrastan fuertemente respecto a las otras unidades que se modelaron. Éste cuerpo aflora en algunos sitios (muestreados), en forma de diques tabulares, que se encuentran intrusionando a la andesita.

En la parte sur del perfil se modeló un cuerpo (**2**), (**figura 9**) de hematita, que aflora en varios sitios de los flancos del Pico Laco, y de igual

manera el cuerpo (2) intrusiona a la andesita (3) (**figura 9**). La geometría de este cuerpo es en forma de diques acuñaados aflorando al Norte y Sur del Pico Laco. La susceptibilidad de este cuerpo es considerablemente más baja que la de la magnetita, pero la intensidad de remanencia es muy parecida, por lo que podemos deducir que ambos cuerpos pertenecen al mismo evento mineralizante, con la diferencia que el cuerpo de magnetita se encuentra aflorando en algunas áreas y su posición se encuentra por encima del cuerpo intrusivo.

El modelo se fundamenta por los valores de propiedades magnéticas medidas en el laboratorio y los estudios geológicos previos¹³.

La configuración que presentan estos autores es acorde con el arreglo de las unidades geológicas sugeridas. Todo esto permite asegurar que el modelo propuesto presenta la mejor aproximación a la realidad geológica y la incertidumbre del proceso de interpretación cuantitativa de la anomalía magnética disminuye al máximo.

Distrito Minero de Naica, Chihuahua

El Distrito Minero de Naica esta compuesto por algunas sierras de rumbo NW-SE y planicies de grandes extensiones, el perfil realizado se localiza a 13 km al Oeste de Naica, en esta zona encontramos una planicie, a lo largo del perfil solo algunas elevaciones topográficas afectan el terreno, debidas a la Sierra de La Perla y al Cerro Solo.

En la zona se encuentra un complejo de venas y de pequeños diques que afloran principalmente en la Sierra Monarca y la Sierra de Naica, estas serranías se deben al efecto de un cuerpo intrusivo de grandes dimensiones (batolito?) que se encuentra por debajo del estrato de Caliza marmolizada¹⁴. Del mapa de anomalía magnética cualitativamente constatamos que el cuerpo se ubica en la parte Oeste de la Sierra Monarca.

La susceptibilidad y la intensidad de la remanencia del cuerpo principal **(1) (figura 11)** nos aporta valores que contrastan fuertemente sobre las otras unidades. Este cuerpo se encuentra en forma de intrusivo que se acuña al Sur. El valor de la susceptibilidad del intrusivo usado fue mayor que los valores promedio que se obtuvieron, pues en el muestreo que se llevo a cabo a 530 m de profundidad, apenas llegando a la superficie del cuerpo. Pensando que en el centro del cuerpo intrusivo la composición mineralógica se mantiene menos alterada sugiere que los

valores de magnetización remanente son mas altos que los del dique que se encuentra mas cercano a la superficie.

En la parte superior de la configuración se encuentra el cuerpo de caliza marmolizada cuerpo (2) (**figura 11**). Las propiedades magnéticas de este cuerpo realmente son muy bajas de tal forma que su aportación a la anomalía es mínima al igual que la intensidad de remanencia. Se llevaron a cabo varias configuraciones para este caso, y encontramos que el valor de la caliza marmolizada no afecta de manera significativa a la anomalía.

Notas

- 1 Urrutia F. J., Importancia del Magnetismo Remanente en la Interpretación de Anomalías Magnéticas, AMGE, México, UNAM, Vol. XVIII, 1977

- 2 Kwak Tenuis A.P., Hydrothermal alteration in carbonate-replacement deposits; ore skarns and distal equivalents, Vol. 11, Austria, Geological association of Canada, 1994, p. 381-402

- 3, 8, 10, 14 Stone John G., Ore genesis in the Naica district, Chihuahua, Mexico, Vol. 54, Stanford California, Economic Geology, 1959, p. 1002-1034

- 4, 7 Salas Guillermo P., Carta y Provincias Metalogeneticas de la Republica Mexicana , México, Consejo de Recursos Minerales, 1980, p. 45-60

- 5, 13 Nystrom Olov Jan, Magmatic fractures of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden ore textures and magnetite geochemistry, Vol. 89, Economic Geology, 1994, p. 820-839

- 6 Alva- Valdivia L. M. et al, Rock-Magnetic and oxide microscopic studies of the El Laco iron-ore deposits, Chilean Andes and implications for magnetic anomaly modeling, Vol. 45, International geology Review, 2003, p. 1-15

- 9 González Jenaro Reyna, La mineralogía terciaria de México, Vol. II, ICAITI, 1969, p. 8-17

- 11 Talwani Manik, Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape, Vol. XXX, No 5, Geophysics, 1965, p. 797-817

- 12 Talwani Manik et al, Rapid gravity computations for two dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, Vol. 64 No 1, journal of geophysical research, 1959, p. 49-59

Bibliografía consultada

- Alva- Valdivia L. M. et al, Magnetic mineralogy and properties of the Peña Colorado iron ore deposit Guerrero terrane: implications for magnetometric modeling, Vol. 13, Journal of South American Earth Sciences, 2000, p. 415-428
- Alva- Valdivia L. M. et al, Rock-Magnetic and ore microscopy of the magnetite-apatite ore deposit from Cerro de Mercado, Mexico, Vol. 53, Earth Planets Space, 2001, p. 181-192
- Amalendu Roy, Ambiguity in geophysical interpretation, Vol. XXVII No 1, Geophysics, 1962, p. 90-99
- Clark D. A., Interpretation of magnetics using magnetic property data-case histories from Australia, ASEG/SEG, 1988, p. 249-254
- Clark D. A., Notes on rock magnetization characteristics in applied geophysical studies, Vol. 22, Exploration Geophysics, 1991, p. 547-555
- Dobrin M. B., Introducción a la prospección geofísica, Segunda edición, España, Omega, 1975, p. 337-375
- Einaudi M. T., A special issue devoted to skarn deposits, Vol. 77 No 4, Stanford California, Economic Geology, 1982, p. 745-754
- Emerson D. W., Physical properties of skarns, Vol. 17, Exploration Geophysics, 1986, p. 201-212
- Emerson D. W., The petrophysical and petrologic characteristics of the magnetic igneous intrusion at Mt Derriwong, N.S.W., Vol. 10 No 1, Australia, Bull. Aust. Soc. Explor. Geophys., 1979, p. 67-78
- Fedi M., On the interpretation of anomalies for strong remanent magnetizations, Vol. 130, No 4, Italy, PAGEOPH, 1989, p. 721-733

- Figuerola Canto José, Tratado de Geofísica Aplicada, Segunda edición, España, IGME, 1974, p.105-124
- INEGI , Plano geológico de la Sierra de Naica, Compañía Fresnillo S. A., Escala: 1:2500
- INEGI 1991 , Carta Geologica, G13-2, Ciudad Camargo, Escala: 1:250,000
- INEGI 1998 , Carta Topográfica, G13-2, Ciudad Camargo, Escala: 1:250,000
- Northwest Geophysical Associates; Inc., User's Guide, Version 4.6, USA, NGA, p. 84
- Plano aeromagnético de intensidad magnética total, Minera Peñoles
- Rasmussen R. et al, End corrections in potential field modeling, Vol. 27, Geophysical prospecting, 1979, p. 749-760
- Russell Michael J., A history of theoretical developments in carbonate-hosted base metal deposit and a new tri-level enthalpy classification, Monograph 8, Economic Geology, 1991, p. 96-116
- Sánchez Nara Jorge, Perspectivas en el abastecimiento nacional de minerales para la industria siderurgica, VIII, AIMMG, 1969, p. 212-216
- Schwarz Erik J., Magnetic expressions of intrusions including magnetic aureoles, No 92, Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 1991, p. 191-200
- SENAGEOMIN 1986 , Carta Magnética de Chile, Hojas Antofagasta-Toconao, Salar de Atacama Escala: 1:250,000
- Steenland Nelson C. et al, basement mapping with aeromagnetic data blind river basin, Vol. XXV, No 3, Geophysics, 1960, p. 586-601