



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COLEGIO DE GEOFÍSICA

**“EVALUACIÓN AEROMAGNÉTICA DEL POTENCIAL DE AU Y AG EN EL MUNICIPIO DE
SAN FRANCISCO DEL ORO, CHIHUAHUA.”**

MAYO 2026

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE:

LICENCIATURA EN INGENIERA GEOFÍSICA

PRESENTA

LAURA JUDITH RODRÍGUEZ LÓPEZ

DIRECTOR INTERNO

M. en C. JOSÉ SERRANO ORTIZ

DIRECTOR EXTERNO

M. en C. IGNACIO MUÑOZ MÁXIMO



BUAP

“HUP, 50 años de enseñanza y salud”

Oficio No. SAC/1437/2022

**C. Laura Judith Rodríguez López, -201315649-
Pasante de la Licenciatura en Ingeniería
Geofísica
Presente.**

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

**“EVALUACIÓN AEROMAGNÉTICA DEL POTENCIAL DE AU Y AG EN EL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO DEL ORO,
CHIHUAHUA”**

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor de tema al Ing. Isaac Raúl Soriano Garibo.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente
“Pensar bien para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a 16 de agosto de 2022

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora
Director



M'ACGZ/M'VGL/barv
C.c.p. Archivo

M. I. Ángel Cecilio Guerrero Zamora
Director de la Facultad de Ingeniería
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
P r e s e n t e.

El que suscribe: M. C. José Serrano Ortiz, asesor del tema de tesis:

“EVALUACIÓN AEROMAGNÉTICA DEL POTENCIAL DE AU Y AG EN EL MUNICIPIO DE SAN FRANCISCO DEL ORO, CHIHUAHUA”

Presentada por la C. Laura Judith Rodríguez López -201315649-, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/1437/2022 con fecha de emisión 16 de agosto de 2022, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión del mismo.

Sin otro particular, le reitero la seguridad de mi más atenta y distinguida consideración.

A t e n t a m e n t e
“Pensar bien, para vivir mejor”
H. Puebla de Z. a de 10 de marzo de 2026



M. C. José Serrano Ortiz
Asesor de Tema

I'RISG/BARV
C.c.p. Archivo

A Omi, a Borrego, a Conejo y a Bofo

*Porque las cosas buenas de mi vida
se hacen por el amor hacia ustedes.*

Agradecimientos

A mi madre, María Felipa Rodríguez López, por tanto amor y apoyo incondicional, por forjar una mujer segura e independiente.

A mis directores, M. en C. Ignacio Muñoz Máximo e Ing. Isaac Raúl Soriano Garibo (QEPD), y al M en C. José Serrano Ortiz, por su paciencia, y por compartir tantos conocimientos conmigo.

A la Facultad de Ingeniería y a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por forjar una estudiante que aspira convertirse en una profesionista que aporte al país algo de todo el conocimiento y apoyo que aquí se me brindó siempre.

A todos ustedes, GRACIAS.

LJ

Resumen

En este trabajo de investigación se muestran los resultados de un estudio geofísico basado en el tratamiento de datos aeromagnéticos de la carta G13-A57 del Servicio Geológico Mexicano, mediante algunos algoritmos matemáticos como Reducción al Polo, Primera Derivada Vertical, Segunda Derivada Horizontal y Señal Analítica para poder determinar la ubicación de las estructuras que ocasionan las anomalías presentes en la carta y con ello inferir la existencia de minerales de Au y Ag emplazados en estas.

A partir del estudio aeromagnético se designaron tres zonas de interés para una campaña de exploración y muestreo. Los ejemplares obtenidos en campo se analizaron en laboratorio mediante Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía de Barrido Electrónico (SEM) con Análisis de Energía Dispersiva (EDS) con la finalidad de conocer su composición química a partir de su estructura cristalina y con ello poder determinar de manera semi-cuantitativa la existencia de minerales de interés que pueden estar asociados con un yacimiento de Au y Ag.

Abstract

This work shows the results of a geophysical study based in the processing of aeromagnetic data of the map G13-A57 from the Mexican Geologic Service, where some algorithms were applied as Reduction to the Pole, First Vertical Derivative, Second Horizontal Derivative and Analytic Signal to define the location of the structures that cause the anomalies shown in the map and thus infer the presence of minerals of Au y Ag placed in the zone.

From the aeromagnetic study, we designated three areas of interest for an exploration and probing campaign. The specimens obtained in the place were subjected to laboratory test: Diffraction of X Rays (DRX) and Scanning Electron Microscopy with Energy Disperse Spectrometer (EDS) with the purpose of knowing its chemical composition from its crystalline structure and this determine semi-quantitatively the presence of minerals of interest that can be associated with an Au or Ag Deposit.

ÍNDICE

Resumen

Abstract

CAPÍTULO I. GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivo General.....	3
1.3.1 Objetivos Específicos	3
1.4 Hipótesis	4
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	6
2.1 Localización de la zona de estudio y vías de acceso.....	6
2.2 Clima	7
2.3 Suelo y vegetación.....	7
2.4 Temática	7
2.5 Geología local.....	8
2.6 Tectónica	10
2.7 Provincia Fisiográfica.....	11
2.8 Fundamentos de los principales procesos generadores de yacimientos minerales.....	12
2.8.1 Depósitos epitermales.....	14
2.9 Microscopías: Técnicas espectroscópicas de caracterización de minerales.....	17
2.9.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	17
2.9.2 Análisis de Energía Dispersiva (EDS)	20
2.9.3 Difracción de Rayos X (DRX).....	21
2.10 Fundamentos teóricos del Método Magnético.....	24
2.10.1 Campo Geomagnético	24
2.10.1.1 El Campo magnético principal.....	25
2.10.1.2 Campo de anomalías.....	26
2.10.1.3 Campo de variaciones pseudoperiódicas y transitorias.....	26
2.10.1.4 Distribución Del Campo Magnético En La Superficie Terrestre.....	27
2.10.1.4 Variaciones temporales del campo magnético terrestre.....	28
Variación secular.	28
Variaciones periódicas.	28
Variaciones no periódicas.	28

Variaciones diurnas	29
2.10.1.5 El Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)	29
2.10.1.6 Propiedades magnéticas de las rocas	30
Susceptibilidad (k).....	30
Mecanismos para la magnetización inducida.....	31
Diamagnetismo	31
Paramagnetismo	32
Ferromagnetismo	32
Ferrimagnetismo	33
Antiferromagnetismo.	34
2.10.2 Magnetometría aérea	34
2.10.2.1 Aplicaciones	36
2.10.2.2 Ventajas	37
2.10.2.3 Desventajas.....	37
2.10.1.6 Filtros matemáticos	38
Reducción al polo	38
Separación de anomalías regionales y residuales	39
Continuación analítica de campo	40
Métodos para la identificación de bordes de anomalías.....	41
Primera y segunda derivada vertical.....	42
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	44
3.1 Flujo de trabajo	44
3.2 Metodologías específicas.....	44
3.3 Muestreo en campo	47
3.4 Análisis de muestras en laboratorio	48
CAPÍTULO IV. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.	51
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN	61
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	67
REFERENCIAS.....	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 Localización de San Francisco del Oro, Chihuahua	6
Figura 2. 2 Geología del área de estudio.....	8
Figura 2. 3 Campo dipolar terrestre (tomado y modificado adaptado de Burger, 1992).	25
Figura 2. 4 Componentes del vector de campo magnético (tomado y adaptado de Kertz, 1986)	26
Figura 2. 5 Intensidad total del campo magnético principal (Tomado y adaptado de NOAA, 2015).....	27
Figura 2. 6 Ejemplos de registro de la variación diurna del campo magnético (Tomada de Breiner, 1999).	29
Figura 2. 7 Comportamiento de un material diamagnético	32
Figura 2. 8 Comportamiento de un material paramagnético.....	32
Figura 2. 9 Comportamiento de un material ferromagnético. (Gianibelli, 2014)	33
Figura 2. 10 Comportamiento de un material ferrimagnético.	33
Figura 2. 11 Modelo estándar para facilitar la eliminación de variación diurna y otros errores. Tomada y modificada de Dobrin, 1998.....	36
Figura 2. 12 Relación entre el campo magnético observado (a) y el campo magnético reducido al polo (b). (Tomada y modificada de Tchernychev, 2004).	39
Figura 3. 1 Flujo de trabajo general	44
Figura 3. 2 Flujo de trabajo específico para aeromagnetismo.	44
Figura 3. 3 Delimitación de la zona en la Carta Magnética. Tomado y adaptado de SGM, 2009.....	45
Figura 3. 4 Selección de zonas de interés.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 3. 5 Muestras tipo de las zonas de estudio (1. Calcita con amatista, 2. Calcita con amatista, 3. Galena, 4. Galena, 5. Estibinita, 6. Amatista, 7. Amatista y 8. Galena).....	47
Figura 3. 6 Flujo de trabajo específico para análisis de laboratorio	48
Figura 3. 7 Molturación grado talco.....	48
Figura 3. 8 Etiquetado de muestras.....	48
Figura 3. 10 Obtención del difractograma.....	49
Figura 3. 9 Difractor de Rayos X	49

Figura 3. 12 Obtención de imagen SEM	49
Figura 3. 11 Preparación de platina para SEM-EDS.....	49
Figura 4. 1 Mapa de Campo Magnético Total	51
Figura 4. 2 Mapa de Primera Derivada Vertical	52
Figura 4. 3 Mapa de Segunda Derivada Horizontal	52
Figura 4. 4 Mapa de Señal Analítica.....	53
Figura 4. 5 Espectro radial para la estimación de profundidades	54
 Figura 5. 1 Comparativa del mapa geológico de la zona de interés con la localización de diques y contactos encontrados a partir del Espectro Radial de Potencia.	 61
Figura 5. 2 Selección de puntos de interés para recolección de muestras.	62
Figura 5. 3 Trazo de uno de los perfiles geológicos.....	63
Figura 5. 4 Secciones Geológicas en la zona de interés	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1 Minerales de diagnóstico de varios estados de pH, estados de sulfuración y oxidación, usados para distinguir ambientes epitermales formadores de mineral (modificado de Einaudi et. al., 2003)..... 17

Tabla 2. 2 Minerales de diagnóstico de varios estados de pH, estados de sulfuración y oxidación, usados para distinguir ambientes epitermales formadores de mineral (modificado de Einaudi et. al., 2003)..... 31

Tabla 4. 1 Resultados del análisis por SEM-EDS y DRX 58

CAPÍTULO I

“El misterio es la cosa más bonita que podemos experimentar. Es la fuente de todo arte y ciencia verdadera”

Albert Einstein.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 Introducción

En México la minería es una actividad económica trascendente, y culturalmente arraigada desde épocas coloniales, teniendo una gran diversidad de estratos económicos en este sector (desde la pequeña minería, hasta las grandes empresas trasnacionales). La minería incorpora todos los trabajos de prospección, reconocimiento y exploración de los yacimientos minerales, y finalmente las labores necesarias para el funcionamiento de una mina (*p. ej.*, arranque, concentración, transporte, etc.). Sin embargo, existe un elevado riesgo económico durante la etapa de exploración (sobre todo cuando no se ha planificado adecuadamente) que requiere una gran inversión inicial (de dinero y tiempo). Pero una vez valorado de forma adecuada un prospecto minero con potencial de ser explotado es necesaria una fuerte inversión para la construcción y la operación minera, considerando aspectos técnicos, culturales y socioeconómicos, requiriendo además de un largo tiempo antes de que se recupere el capital invertido y se obtengan los beneficios económicos esperados.

Desde 1895, en el municipio de San Francisco del Oro (Estado de Chihuahua), se han extraído minerales de interés económico (*p. ej.* Au y Ag) acompañados de distintos minerales accesorios (*p. ej.* estibinita, galena y esfalerita) y de materiales de ganga (*p. ej.*, amatista, calcita, pirita) haciendo de la minería la principal actividad laboral de la región (SGM, 2016). Sin embargo, durante los procesos de exploración es preciso echar mano de diferentes estudios y técnicas (*p. ej.* análisis geológicos y geofísicos) que nos permitan conocer las direcciones de mineralización y con ello ubicar los sitios de interés, así como optimizar su explotación.

Los estudios geofísicos de exploración como la magnetometría constituyen un factor de relevancia para la localización de yacimientos metálicos y/o polimetálicos.

El Servicio Geológico Mexicano (SGM) ha puesto a disposición cartas aeromagnéticas de campo total de la República Mexicana. En esta investigación se hace uso de los datos aeromagnéticos de las anomalías detectadas en el yacimiento activo de San Francisco del Oro y de las áreas circunvecinas de potencial interés (El Parral, Santa Bárbara, Matamoros y Valle Altamirano).

Los métodos de exploración geofísica (*p. ej.*, eléctrico, magnético, radiométrico) son complementarios de estudios geológicos y geoquímicos soportados en técnicas de microscopía (*p. ej.* Difracción de Rayos X, Análisis de Energía Dispersiva) que permiten confirmar (o no) la existencia de minerales y su composición química en forma semi-cuantitativa en especímenes colectados en muestra de mano o *in-situ* (*p. ej.* Fluorescencia de Rayos X portátil), ya que al tener esta información es posible conocer las relaciones minerales asociadas a un potencial yacimiento mineral de escala regional o local.

1.2 Justificación

Las estructuras geológicas tienen una gran influencia en el emplazamiento de minerales (Goldestein & Reynolds, 1998) desempeñando un rol primordial al actuar como canales para el emplazamiento de vetas minerales. Para este trabajo de investigación, es de interés localizar los sitios asociados con la posible existencia de menas de Au-Ag, Au, Ag-Au y su distribución regional en San Francisco del Oro Chihuahua. Por lo cual, la utilización del método aeromagnético, acompañado de una campaña geológica de verificación en la región (que incluye la recolección de muestras) proporciona información que permite mejorar de forma sistemática y fehaciente la posible existencia de zonas mineralizadas, que puedan facilitar la selección de zonas de posible interés económico (para la exploración de Au-Ag, Au, Ag-Au).

Las técnicas de microscopía empleadas (microscopía óptica, SEM-EDS y DRX), de manera complementaria, permiten reconocer las estructuras

cristalinas de los minerales existentes en una muestra y conocer de forma semi-cuantitativa su composición química elemental.

1.3 Objetivo General

Evaluar la región de San Francisco del Oro (Chihuahua), a partir del estudio de datos aeromagnéticos y la aplicación de las técnicas de microscopía por SEM-EDS y DRX, para estimar las zonas asociadas con la posible existencia de Au - Ag ligadas con estructuras geológicas de orden regional y la mineralización asociada.

1.3.1 Objetivos Específicos

- Evaluar la relación de estructuras geológicas de carácter local y regional con las anomalías magnéticas, a partir del uso de datos de Campo Magnético Total 1:250,000 del Estado de Chihuahua proporcionados por Servicio Geológico Mexicano, para observar la distribución espacial de zonas asociadas a la existencia de minerales de interés.
- Conocer de forma detallada, la composición química elemental y fases minerales presentes asociadas a las estructuras geológicas identificadas en el estudio aeromagnético, de las muestras obtenidas durante la campaña de campo en la región de San Francisco del Oro, Chihuahua mediante las técnicas de SEM-EDS y DRX para estimar semi-cuantitativamente la existencia de minerales de interés (Au - Ag).

1.4 Hipótesis

En la región de San Francisco del Oro, Chihuahua, existe aún el potencial para explorar la existencia de yacimientos minerales de interés económico, asociado con estructuras geológicas de carácter regional, que pueden ser identificadas a partir del método aeromagnético.

CAPÍTULO II

*“La ciencia se compone de errores que a su vez, son pasos hacia la
verdad”*

Julio Verne.

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

2.1 Localización de la zona de estudio y vías de acceso

La zona de estudio se encuentra ubicada en extremo sur del Estado de Chihuahua (Figura 2.1). Al Norte colinda con los municipios de Huejotitlán e Hidalgo del Parral, al sur con el municipio de Santa Bárbara, el estado de Durango y el municipio de Balleza; al Oeste con los municipios de Balleza, El Tule y Huejotitán (INEGI, 2009).

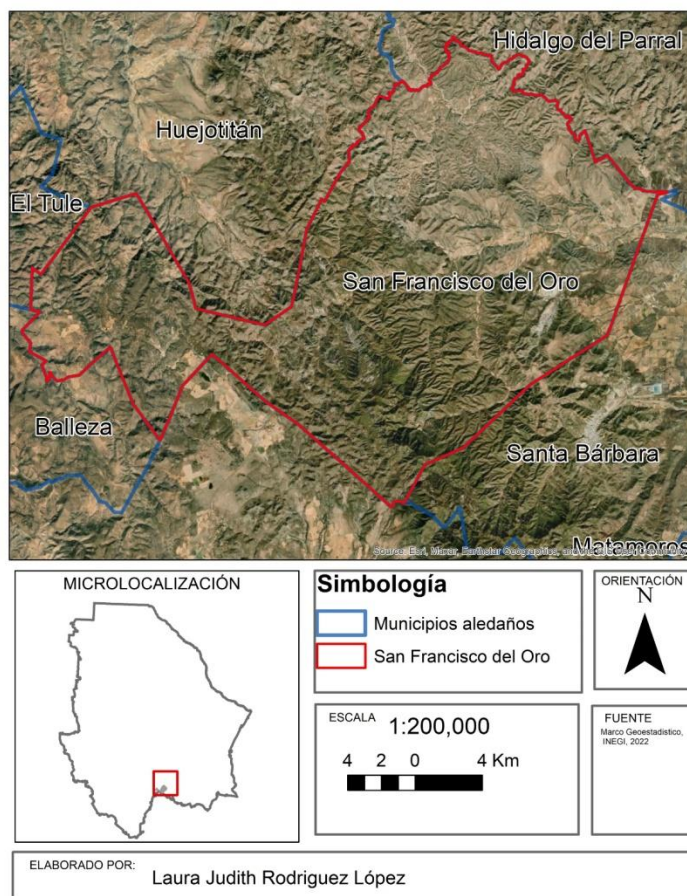


Figura 2. 1 Localización de San Francisco del Oro, Chihuahua

El principal acceso se efectúa partiendo del Municipio de Hidalgo del Parral hacia el noroeste por la carretera federal número 24, posteriormente, al llegar a la primera rotonda se tomará la carretera a Santa Bárbara. A la altura del Kilómetro 18.3 encontrando la desviación hacia San Francisco del Oro, llegando así a nuestra zona de estudio.

2.2 Clima

El clima en la región es semiseco templado con lluvias en verano (63.5%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (34.3%) y semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (2.2%) (INEGI, 2009).

2.3 Suelo y vegetación

El municipio de San Francisco del Oro, Chih. tiene un suelo con una composición en un 64.3% caracterizado como Leptosol, Phaeozem (26.0%), Regosol (5.7%), Cambisol (2.7%), Vertisol (0.6%) y Luvisol (0.1%). El uso de estos suelos parte de un 7.2 % para la agricultura y 0.6 % para la zona urbana, la vegetación restante se caracteriza por un 59.0 % de bosque y 33.2% de pastizal (INEGI, 2009).

2.4 Temática

San Francisco del Oro se considera como uno de los principales distritos mineros de México, por lo cual se realizó una investigación considerando que las estructuras mineralizadas ofrecen leyes atractivas para su explotación en cuerpos de forma tabular encajonados en la Formación Parral que tiene una orientación N-S con flexiones al NE principalmente. Las minas más importantes

del distrito son: Planta Frisco, La Mesa y Granadeña con leyes reportadas de 45g/ton Ag, 2% de Pb y 3% de Zinc (SGM, 2001). La producción mensual es del orden de 90,000 toneladas (SE, 2001).

2.5 Geología local

San Francisco del Oro se localiza dentro de la región ocupada por la Formación Parral, caracterizada por conjuntos de rocas ígneas asociadas a distintos episodios magmáticos originados por la subducción de la placa Farallón bajo la placa de Norteamérica (Araujo et al., 1983).

Según McDowell y Mauger (1994), en la zona existen pequeños cuerpos intrusivos que habrían propiciado el emplazamiento de minerales de edades paleocénicas, particularmente hacia el norte de Parral en dirección al Valle de Zaragoza. Asimismo, se encuentran depósitos de tobas silíceas e ignimbritas con abundantes cristales, principalmente biotita.

En la región suroeste de Chihuahua, se observa un patrón discontinuo de lavas basáltico-andesíticas, emitidas después de cada episodio ignimbrítico (Ferrari et al., 2005). Los afloramientos más extensos de estas lavas se disponen en una franja de dirección noreste, extendiéndose hacia Chihuahua y Sonora (Figura 2.2).

Las estructuras mineralizadas se presentan generalmente como cuerpos tabulares, encajonados dentro de la secuencia de la Formación Parral. Su orientación predominante es norte-sur, con flexiones hacia el noreste. La mineralización típica incluye galena, esfalerita y calcopirita, acompañada en menor proporción de oro, plata y cobre. Los espesores de las vetas oscilan entre unos pocos centímetros y 0.50 m, mientras que sus longitudes varían desde 10 hasta 150 m.

En el borde oriental de la Sierra Madre Occidental, cerca de Durango, se han desarrollado fallas normales de alto ángulo que generan estructuras del tipo Cuencas y Sierras (Basin and Range), similares a las que se encuentran hacia el centro del estado de Chihuahua (Aranda-Gómez et al., 2000).

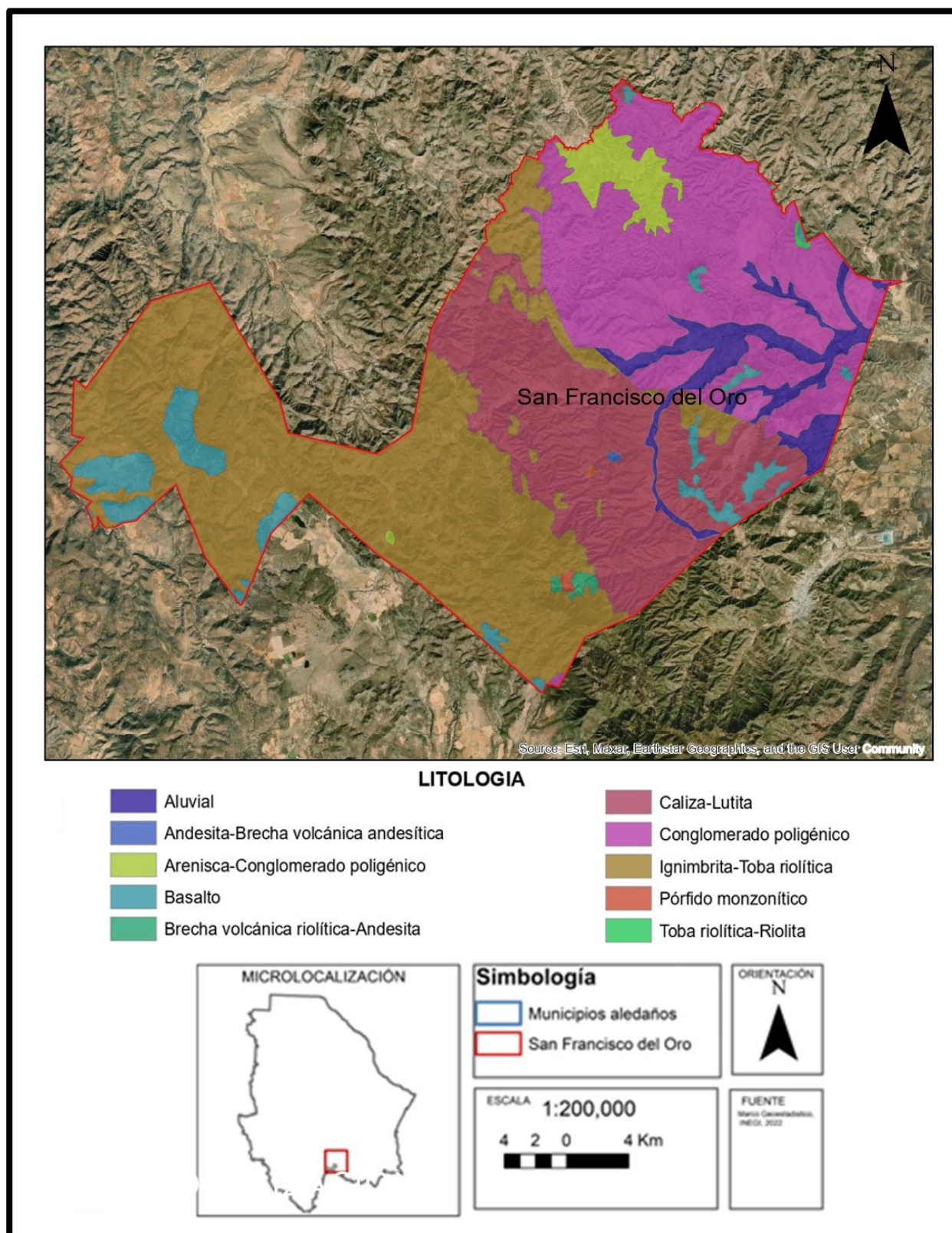


Figura 2. 2 Geología del área de estudio

2.6 Tectónica

El Municipio de San Francisco del Oro, Estado de Chihuahua, se localiza en los límites de la Provincia Fisiográfica Sierra Madre Occidental y la subprovincia de Sierras y Llanuras de Durango (Lugo, 1991). En esta localidad, se observan estructuras que evidencian los eventos compresivos vinculados con la Orogenia Laramide (Eguiluz, 2000), los cuales provocaron el plegamiento de la Formación Parral (Araujo et al., 1983). Dichos eventos resultan de múltiples episodios magmáticos y tectónicos ocurridos durante el Cretácico-Cenozoico, relacionados con la subducción de la placa Farallón bajo la placa Norteamericana (Ferrari et al., 2005).

Las deformaciones originadas por la orogenia Laramide afectaron de manera moderada a las rocas más antiguas del Complejo Volcánico Inferior, compuesto por rocas volcánicas andesíticas y riódacíticas del Eoceno (Nieto et al., 2005). Posteriormente, la tectónica extensional, iniciada en el Oligoceno, dio lugar a la formación de grábens limitados por fallas de alto ángulo, definidas como estructuras del tipo Basin and Range (Cuencas y Sierras) mexicanas (Ferrari et al., 2005).

El levantamiento de la Sierra Madre Occidental se desarrolló entre el Oligoceno tardío y el Mioceno medio (hace aproximadamente 25-15 millones de años), mientras que sus capas más recientes, del Plioceno y Pleistoceno (< 5 millones de años), están constituidas por ignimbritas (predominantemente riolíticas y tobas silíceas) y basaltos alcalinos. Las intrusiones graníticas del Cretácico Superior y las efusiones marinas del Cretácico-Paleoceno marcan el inicio del ciclo orogénico Laramídico, provocando el plegamiento de los sedimentos del geosinclinal y una serie de procesos efusivos continentales.

Además de la orogenia Laramide del Terciario Inferior, el evento geológico más significativo del Cenozoico en México ha sido el vulcanismo. Considerando los afloramientos de esta región de la Sierra Madre Occidental y la distribución de las rocas volcánicas, se identifican tres fases volcánicas

continentales principales (Demant, 1975): fase andesítica, fase riolítica y fase basáltica.

2.7 Provincia Fisiográfica.

San Francisco del Oro se sitúa dentro de la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental, que representa una de las mayores provincias ígneas silíceas del mundo y la más extensa del Cenozoico, así como en la subprovincia de Sierras y Llanuras de Durango (Ferrari et al., 2005). La cubierta ignimbrítica actual de esta región abarca aproximadamente 289,000 km² (Ferrari et al., 2005).

El área de estudio se caracteriza por un magmatismo silíceo, reflejado en la cubierta ignimbrítica. De igual importancia es el Complejo Volcánico Inferior (McDowell y Keitzer, 1977), constituido por rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico-Paleógeno, comparables en edad y composición con los batolitos que encajonan depósitos de plata y cobre, como los de Fresnillo (Zacatecas) y Cananea (Sonora) (Camprubí y Albinson, 2006).

Estratigráficamente, el Estado de Chihuahua presenta cinco conjuntos ígneos principales:

1. Rocas plutónicas y volcánicas del Cretácico Superior-Paleoceno.
2. Rocas volcánicas andesíticas y dacítico-riolíticas del Eoceno, agrupadas en el denominado Complejo Volcánico Inferior (CVI) (McDowell y Clabaught, 1979).
3. Ignimbritas silíceas emplazadas en dos pulsos principales: Oligoceno temprano (32-28 Ma) y Mioceno temprano (24-20 Ma), incluidas en el Supergrupo Volcánico Superior.
4. Coladas basáltico-andesíticas transicionales emitidas tras cada pulso ignimbrítico, correlacionadas con las Andesita-Basálticas del sur de la Cordillera Occidental (McDowell y Keitzer, 1977).
5. Volcanismo post-subducción, compuesto por coladas de basaltos alcalinos e ignimbritas de episodios del Mioceno tardío, Plioceno y

Cuaternario, asociados con la separación de Baja California del continente (Ferrari et al., 2005).

Los productos de estos episodios magmáticos, parcialmente superpuestos, cubren un basamento heterogéneo poco expuesto de edades Precámbrico y Paleozoico, y en la parte norte de Sonora y Chihuahua también cubren rocas del Mesozoico dentro del resto de la Sierra Madre Occidental (Ferrari et al., 2005).

En toda la región suroeste de Chihuahua, se observa un emplazamiento discontinuo de lavas basáltico-andesíticas tras cada pulso ignimbrítico (Ferrari et al., 2005), con los afloramientos más extensos distribuidos en una franja de dirección noreste, hacia Chihuahua y Sonora (Amezcuza, 2012).

En numerosos sitios, el volcanismo y el fallamiento ocurrieron simultáneamente o el fallamiento siguió poco después del volcanismo. Ambos fenómenos se registraron en al menos cuatro pulsos de actividad: 32-27 Ma, 24-20 Ma, 12-10 Ma y < 5 Ma (Amezcuza, 2012), aunque su intensidad y características variaron sistemáticamente de un lugar a otro. El frente del volcanismo subduccional y el fallamiento normal intenso se desplazaron de noreste a suroeste, siendo reemplazados hacia el interior del continente por actividad alcalina intraplaca y extensión de menor magnitud (Aranda-Gómez et al., 2000).

Estratigráficamente, San Francisco del Oro se encuentra dentro del Terreno de Parral, compuesto en su base por rocas sedimentarias con alternancias tipo flysch, integradas por lutitas, calizas, areniscas, margas y limonitas, correspondientes a la Formación Parral. Además, estas unidades pueden correlacionarse con las formaciones La Carbonera, Taraises, Cupido y Peña (SGM, 2009).

2.8 Fundamentos de los principales procesos generadores de yacimientos minerales.

Los depósitos minerales son resultado de procesos geológicos concentradores, que pueden ser de origen endógeno, exógeno o metamórfico (Smirnov, 1976), y están asociados con fenómenos de fraccionamiento geoquímico. La génesis de un depósito mineral implica la presencia de una fuente elemental y de procesos geológicos capaces de concentrar dichos elementos en niveles económicamente explotables (Álvarez, 2010).

De acuerdo con Brian K. Townley, la génesis de los minerales involucra tres procesos principales:

- Ígneos-Hidrotermales
- Metamórficos
- Sedimentarios

Dentro del primer grupo, los yacimientos se subdividen según la temperatura del depósito:

1. Alta temperatura (600°C – 300°C): comprende los yacimientos magmáticos de exsolución, cristalización fraccionada y separación gravitacional, caracterizados principalmente por depósitos de Cr, Cu, Ni, Co y Ti.
2. Yacimientos magmático-hidrotermales: se originan por la exsolución de agua y fases hidrotermales, destacando depósitos de pegmatitas y elementos de tierras raras (REE).
3. Depósitos hidrotermales-magmáticos: se forman por la migración de fluidos hidrotermales magmáticos y su enfriamiento mediante fluidos meteóricos, correspondiendo a metales base (Pb, Zn, Ba, Cu, F) y metales de alto valor económico (Au, Ag).
4. Hidrotermales de mezcla: involucran la interacción de fluidos hidrotermales con fluidos meteóricos, generando yacimientos a temperaturas menores (200°C – 50°C), denominados volcano-exhalativos, epitermales y tipo SEDEX (Sedimentarios Exhalativos), donde es común encontrar depósitos de Zn, Pb y Ag.

Por otro lado, los procesos metamórficos que contribuyen a la formación de minerales incluyen fallas de cizalle, bombeo tectónico y metasomatismo, mientras que los procesos sedimentarios abarcan erosión selectiva, migración física y química, así como mecanismos concentradores mecánicos que permiten acumular los minerales en zonas específicas.

2.8.1 Depósitos epitermales

Según Lindgren (1911), los depósitos epitermales son depósitos metalíferos formados cerca de la superficie por aguas termales en ascenso y conectados genéticamente con rocas ígneas; así mismo, estimó un rango de temperatura de 50°C a 200 °C (no siendo actualmente una limitante, abarcando rangos de temperatura hasta cerca de los 350°C) y una profundidad máxima de 1000 m. También incluyó numerosos yacimientos minerales de metales preciosos (con existencia o no de telururos o seleniuros), metales básicos, mercurio y antimonio (con estibina como mineral principal). En estudios posteriores (Buddington, 1935) se demostró que en ambientes cercanos a la superficie son posibles temperaturas mayores a las reportadas por Lindgren, de modo que el límite máximo de temperatura de formación de los yacimientos epitermales ascendió a 300°C. Actualmente, se considera que las condiciones de formación de la mayoría de yacimientos epitermales comprenden temperaturas entre <150°C y ~300°C (y eventualmente mayores), y a profundidades desde la superficie hasta 1 km ó 2 km (Camprubí, Albinson, 2006)

En un amplio sentido, los depósitos epitermales son definidos como productos relacionados a volcanismo con actividad hidrotermal a poca profundidad y bajas temperaturas, (Guilbert y Park, 1986). Un gran número de depósitos epitermales están asociados a estructuras de origen volcánico, en especial calderas y complejos andesíticos. Así mismo, existe un importante control de éste tipo de depósitos por parte de fallas de escala regional, en zonas de intenso fracturamiento dentro de un régimen extensional (Nieto-Samaniego

et.al, 2005). Dichas fallas determinan la localización de los depósitos y actúan como guía para el emplazamiento de la fuente de calor magmática necesaria para la subsecuente actividad hidrotermal, que controla la duración de dicha actividad.

Existen varios factores que controlan las condiciones físicas de un depósito epitermal, y que, a su vez, determinan el carácter y la localización de la mineralización:

- 1) La geología regional de la zona en la que se halla el depósito en cuestión, como su estructura, la estratigrafía, las intrusiones a las que se asocia la mineralización y la naturaleza de dichas rocas ígneas, factores que controlan directamente el tipo y el grado de permeabilidad, así como la reactividad de la roca o rocas encajonantes.
- 2) Las características hidrológicas de la zona, es decir, la relación existente entre la permeabilidad y la topografía que controla el movimiento de los fluidos, y las características de los fenómenos de recarga/descarga de fluidos, así como el acceso de aguas calentadas por vapor (“steam-heated waters”)
- 3) Las condiciones de presión y temperatura de los fluidos mineralizantes, en lo que es el ambiente epitermal, que se hallan estrechamente ligadas a la ebullición (cambios de presión litostática a hidrodinámica produciendo “boiling”), determinado a su vez por la composición de los fluidos.
- 4) Las características químicas y el contenido total en gas de los fluidos mineralizantes, que son los factores determinantes en su reactividad, en su capacidad para el transporte de metales y en la paragénesis mineral, tanto por lo que respecta a la alteración del encajonante como la mineralización entre sí.
- 5) El posible desarrollo de permeabilidad contemporáneamente al hidrotermalismo y/o cambios en el gradiente hidráulico de la zona. (White y Hedenquist, 1990).

La primera división aceptada para los depósitos hidrotermales con base en su alteración y mineralogía fue propuesta como epitermales de *baja*

sulfuración y epitermales de *alta sulfuración* (Hedenquist *et. al.*, 1987). Estas categorías son definidas con base en el criterio mineralógico que proceden dos diferentes fluidos, uno ácido y otro con pH cercano a neutro, respectivamente (Bonham, 1986).

Los depósitos epitermales de baja sulfuración son desarrollados en un ambiente geotermal, dominado por aguas cloruradas donde hay un fuerte flujo de circulación de aguas a profundidad (principalmente de origen meteórico), conteniendo CO₂, NaCl y H₂S. Los depósitos epitermales de alta sulfuración son desarrollados en un ambiente magmático-hidrotermal, dominado por fluidos hidrotermales ácidos, donde hay un fuerte flujo de líquido magmático y vapor, conteniendo H₂O, CO₂, HCl, H₂S y SO₂; con aporte variable de aguas meteóricas (Camprubí, Albinson, 2006). En ambos tipos de depósitos los fluidos circulan hacia la superficie a través de fracturas en las rocas y la mineralización a menudo se presenta en esos conductos, pero también pueden circular por niveles de rocas permeables y eventualmente mineralizar ciertos estratos.

Los fluidos de baja sulfuración (BS), generalmente forman vetas de relleno con metales preciosos o series de vetas/vetillas más finas, denominadas “stockwork” o “sheeted-veins” (Hedenquist *et. al.*, 2000). Los fluidos de alta sulfuración (AS) más calientes y ácidos penetran más en las rocas encajonantes originando cuerpos mineralizados vetiformes, pero también diseminación en las rocas.

Las características claves que distinguen a un depósito epitermal son particularmente mineralógicas, con los minerales de ganga y las alteraciones hidrotermales. Los minerales de ganga característicos del estado de AS son: alto contenido de pirita, enargita, luzonita, cuarzo residual, alunita, pirofilita y caolinita. (Arribas, 1995; Sillitoe, 1999). Los minerales de ganga característicos del estado de BS son: cuarzo (incluyendo calcedonia), pirita, esfalerita, arsenopirita y pirrotita; y una alteración argílica-sericítica caracterizada por cuarzo, adularia, illita y calcita (Tabla 2.1).

Tabla 2. 1 Minerales de diagnóstico de varios estados de pH, estados de sulfuración y oxidación, usados para distinguir ambientes epitermales formadores de mineral (modificado de Einaudi et. al., 2003).

Alta Sulfuración	Baja sulfuración
Pirita, enargita, luzonita, covelita, digenita, famanita	Arsenopirita, pirrotita, esfalerita rica en Fe
pH ácido Alunita, caolinita, pirofilita, sílice residual, cuarzo	pH neutro Cuarzo, illita, calcita
Oxidado Alunita, hematita-magnetita	Reducido Magnetita-pirita-pirrotita, clorita-pirita

Actualmente, los términos alta y baja sulfuración son ampliamente usados para distinguir los dos extremos del estado de sulfuración. Estos términos modernos introducidos por Hedenquist (1987) son resultado de una evolución de la nomenclatura aplicada a sistemas epitermales (Tabla 2.4).

2.9 Microscopías: Técnicas espectroscópicas de caracterización de minerales

2.9.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

El análisis de muestras mediante la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), comprende el estudio de un material mediante un análisis visual característico para cada compuesto. Es un instrumento que permite observar muestras con resolución de hasta 4 nm (nanómetros). Las imágenes se obtienen mediante la detección, procesamiento

y visualización de señales de las interacciones entre un haz de electrones de alta energía con la materia.

El microscopio de barrido electrónico consta de un cañón electrónico en una columna de alto vacío del orden de 10^{-5} mm de Hg (Ipohorski & Bozzano, 2009), en la cual se genera una alta energía (5 Kv-390 Kv). El haz es colimado por una serie de lentes focalizando sobre la muestra. Los detectores registran las señales originadas por la interacción de la muestra y el haz que son procesadas y visualizadas en el monitor.

El cañón es el primer componente del tubo del microscopio consta de un filamento de tungsteno que emite electrones que son acelerados por un ánodo polarizado a una tensión variable entre 5 kV y 30 kV. El diámetro de este haz de electrones es uno de los factores que determina la resolución de la imagen.

En la parte final de la columna del microscopio está la cámara con cierre de vacío que contiene la platina donde se coloca la muestra. Un conjunto de controles permite desplazarla según los tres ejes x,y,z. Aquí se colocan los detectores para registrar las distintas señales obtenidas en la muestra.

La imagen se obtiene a partir de las señales emitidas y se va formando a medida que el haz se desplaza sobre una porción de superficie. Este barrido se realiza línea por línea sobre una pequeña zona rectangular (Ipohorski & Bozzano, 2009). El MEB no forma una imagen real del objeto, sino que construye una imagen virtual a partir de alguna de las señales emitidas por la muestra.

La resolución de una imagen MEB se define como la dimensión más pequeña que el microscopio puede detectar, se especifica en unidades de dimensión nanómetros (nm) o unidades de Angstrom ($\text{\AA}$); $1\text{\AA} = 0.1\text{ nm}$. El diámetro del haz es uno de los factores que determinan la máxima resolución en un microscopio.

Las señales utilizadas para la obtención de las imágenes provienen de un volumen debajo de la superficie de la muestra e interactúa con sus átomos.

Las señales de estas interacciones provienen del llamado “volumen de interacción” (Li *et. al.*, 2015). La forma y las dimensiones de este volumen son el factor que determina la resolución del microscopio electrónico.

La tensión de aceleración del haz es del orden de los 30kV y determina la energía con la cual coinciden los electrones con la muestra y por lo tanto las dimensiones del volumen de interacción (Olavarría & D'Angelo, 2012). La composición de la muestra afecta tanto la profundidad como la forma de volumen de interacción. Las muestras más densas o compuestas por elementos más pesados tienden a reducir la penetración del haz y reducir además la distancia que pueden atravesar las señales generadas sin ser absorbidas por la muestra (Ipohorski & Bozzano, 2009).

Según su energía, los electrones emitidos en una señal se agrupan en retodifundidos y secundarios. Los secundarios se caracterizan por una energía baja del orden de 20-50eV. Sólo pueden llegar a la superficie los originados por una pequeña zona contigua sobre la superficie de la muestra. Las pequeñas dimensiones de esta zona son las que permiten obtener imágenes de máxima resolución (Li *et. al.*, 2015). Los electrones retrodifundidos tienen una energía próxima a la del haz incidente (10-30keV), se originan en zonas más profundas del volumen de interacción. Permiten detectar variaciones de la composición en distintos puntos de la muestra analizada. Las colisiones entre el haz y la muestra pueden ser elásticas o inelásticas; las colisiones elásticas modifican la trayectoria de los electrones incidentes, mientras que las inelásticas provocan pérdida de energía. Los electrones secundarios son emitidos por la muestra durante colisiones inelásticas. Los electrones retrodispersados son aquellos del haz incidente reflejados por la muestra tras sufrir múltiples colisiones elásticas e inelásticas. (Ipohorski & Bozzano, 2009).

En una micrografía que se observa en el modo de electrones secundarios (modo emisivo) se observa un contraste que proviene de las variaciones en la topografía de la muestra. Se pueden coleccionar más electrones secundarios de una prominencia o escalón que de una cavidad. Las prominencias aparecerán en tonos más brillantes que las depresiones.

(Ipohorski & Bozzano, 2009). Las micrografías en modo electrones secundarios tienen los mismos efectos de luz y sombra que los de una imagen óptica.

En el modo de los electrones retrodifundidos (modo reflectivo) el potencial de grilla se lleva a cero y así sólo llegan al detector los electrones de alta energía (Li *et. al.*, 2015). Las micrografías son más contrastadas y presentan efectos de luz y sombra más definidos. Los minerales más pesados emiten más electrones retrodispersados que ligeros, los detectores captan mucha más intensidad y transmiten a la pantalla una imagen más brillante.

2.9.2 Análisis de Energía Dispersiva (EDS)

Durante las colisiones inelásticas (las que provocan pérdida de energía), los electrones incidentes pueden “arrancar” electrones de las capas más profundas de los átomos. Cuando un átomo tiene un espacio vacío en una capa interna se produce un salto de un electrón de una capa superior para llenar dicho espacio que dejará otro espacio en la parte superior. Este se llenará con un salto electrónico de una capa superior y así sucesivamente. Durante cada salto el átomo puede emitir rayos x característicos, su energía es característica de cada elemento químico. Como resultado del impacto electrónico, el átomo emite una familia de rayos x característicos. (Olavarría & D'Angelo, 2012)

En un análisis de Espectroscopia Dispersiva de Energía (Energy Dispersive Spectroscopy) los rayos x característicos emitidos por la muestra son detectados por un sistema que produce pulsos de altura proporcional a la energía de cada fotón incidente. Estos pulsos son procesados por un analizador multicanal y visualizados en un espectro que grafica la cantidad de pulsos en función de la energía característica de cada pulso (Melgarejo *et. al.*, 2010). De esta manera, se pueden identificar rápidamente los elementos presentes en una muestra si su concentración es $\approx 1\%$. El EDS tiene una mejor eficiencia de

la colección de fotones x; esto permite la detección simultánea de todos los elementos presentes (Olavarría *et. al.*, 2012).

Así, al espectro continuo de rayos x se le superpone una serie de picos que corresponden con radiaciones características de cada elemento presente en la muestra. Este espectro se genera en muy pocos segundos y la identificación del elemento que genera dicho pico es inmediata; por lo que el análisis cualitativo de todos los elementos químicos puede realizarse en escasos segundos, haciendo que este método sea práctico en costo y tiempo (Ipohorski & Bozzano, 2009).

Por otra parte, la intensidad de los rayos x producidos por cada elemento depende de la cantidad del mismo que haya en la muestra. La intensidad de cada pico es directamente proporcional a la cantidad de cada elemento presente en la muestra. (Chávez *et. al.*, 2014).

2.9.3 Difracción de Rayos X (DRX)

Los Rayos X son radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz pero de longitud de onda mucho más corta. La unidad de medida en la región de los Rayos X es el angstrom (Å), igual a 10^{-10} m y los Rayos X usados en difracción tienen longitudes de onda en el rango 0.5-2.5 Å mientras que la longitud de onda de la luz visible está en el orden de 6000 Å. (Del Olmo, 2013)

Los Rayos X se producen cuando una partícula cargada eléctricamente con suficiente energía cinética es frenada rápidamente. Los electrones son las partículas utilizadas habitualmente y la radiación se obtiene en un dispositivo conocido como tubo de rayos x. Los rayos x emitidos consisten en una mezcla de diferentes longitudes de onda y la variación de intensidad con λ depende del voltaje del tubo (Del Olmo, 2013). Cuando el voltaje de un tubo de rayos x supera cierto valor crítico, aparecen picos estrechos y agudos a ciertas longitudes de onda superpuestos sobre el espectro continuo. Estos picos se denominan líneas características. Estas líneas se agrupan en conjuntos

denominados K, L, M, etc. en orden de λ creciente y todas juntas forman el espectro característico del metal usado como blanco (Arana, 2012).

La Difracción de Rayos X en polvo cristalino es un método de análisis estructural que permite identificar los minerales por su estructura cristalina. Permite identificar de manera indirecta la composición de una muestra analizando el contenido de los elementos mayoritarios presentes en esta.

Todos los materiales cristalinos adoptan una distribución regular de átomos o iones en el espacio. La porción más simple de la estructura que al repetirse mediante traslación reproduce todo el cristal se define como celda unidad (Melgarejo *et. al.*, 2010).

La interacción de los rayos x con la materia esencialmente ocurre mediante dos procesos:

- a) Algunos fotones del haz incidente son desviados sin pérdida de energía, constituyen la radiación dispersada exactamente con la misma λ que la radiación incidente (es la que origina el fenómeno de la difracción).
- b) Los fotones pueden sufrir una serie de choques inelásticos al incidir sobre un blanco y su energía incrementa la T de la muestra o da lugar al fenómeno de fluorescencia. (Arana, 2012).

Un rayo difractado puede definirse como un rayo compuesto de un gran número de rayos dispersados que se refuerzan mutuamente. La difracción es, por tanto, esencialmente un fenómeno de dispersión (Del Olmo, 2013). Los átomos dispersan la radiación incidente en todas direcciones, y en algunas direcciones los rayos dispersados estarán completamente en fase y por tanto se refuerzan mutuamente para formar rayos difractados.

Los rayos dispersados estarán completamente en fase si esa diferencia de fase es igual a un número entero n de longitudes de onda:

$$n \lambda = 2d \sin \theta$$

Esta relación se conoce como Ley de Bragg y establece la condición esencial que debe cumplirse para que ocurra la difracción; n se denomina orden de difracción y debe ser un n° entero consistente con $\sin \theta$ menor o igual que 1 (Arana, 2012).

Una red cristalina contiene planos reticulares en orientaciones diversas que se denotan mediante tres enteros: “h, k, l”. El espacio que corresponde a cada sucesión de planos paralelos hkl se identifica mediante el símbolo d_{hkl} . La Ley de Bragg permite obtener para cada mineral los valores de sus espaciados y de este modo poder identificarlos (Melgarejo *et. al.*, 2010).

Una muestra policristalina contiene una gran cantidad de pequeños cristales (de tamaño entre 10^{-7} y 10^{-4} m) que adoptan aleatoriamente todas las orientaciones posibles. (Del Olmo, 2013) Algunos planos hkl en algunos de los cristales estarán orientados al ángulo de Bragg para la reflexión. Todos los planos de un espaciado d_{hkl} dado difractan al mismo ángulo 2θ respecto al haz incidente. Para cada conjunto de planos se producirá la difracción a un ángulo de Bragg diferente dando lugar a una serie de conos o picos de difracción.

Los Rayos x se generan en un dispositivo conocido como tubo de Rayos X. Un generador convencional consiste de un cátodo con un filamento de W que emite e- que son acelerados bajo vacío por un alto voltaje aplicado a lo largo del tubo (del orden de 30kV). El haz de electrones incide sobre un blanco metálico, ánodo o anticátodo (habitualmente Cu o Mo y menos frecuentemente Cr, Fe o Ag) y se emite el espectro de rayos x (Melgarejo *et. al.*, 2010).

2.10 Fundamentos teóricos del Método Magnético

2.10.1 Campo Geomagnético

El origen del campo magnético terrestre se remonta aproximadamente a 2600 millones de años (Elsasser, 1945). Esta estimación se obtuvo gracias al análisis paleomagnético de la roca más antigua identificada hasta la fecha, realizado por Heiland y Birch (1953). Diversos autores (Elsasser, 1945; Bullard, 1948) coinciden en que dicho campo se genera como resultado de las corrientes de convección presentes en el núcleo externo de la Tierra (Campbell, 2003). Actualmente, su monitoreo se lleva a cabo mediante una red global de observatorios magnéticos, complementada con información satelital (Langel; Hinze, 1998). El campo posee naturaleza dipolar, con una intensidad media cercana a 50,000 nanoTeslas (nT), y es dinámico, ya que su orientación varía a lo largo del tiempo (Langel; Hinze, 1998). En promedio, después de unos 10 millones de años suele producirse una inversión de polaridad.

En relación con su origen, Elsasser (1948) planteó que la fuerza electromotriz que lo genera se debe a fenómenos termoeléctricos, mientras que Bullard (1949) lo explicó mediante un mecanismo de tipo generador electrodinámico alimentado por la rotación y la convección del núcleo. A partir de estas propuestas, se ha sugerido que el campo observado en superficie corresponde a un dipolo magnético centrado en la Tierra. Aunque aún no existe consenso absoluto, la hipótesis más aceptada sostiene que se debe a las corrientes en un núcleo fluido conductor (Bullard, 1949).

En este sentido, el planeta puede considerarse como un imán permanente (Figura 2.3), cuyos polos se localizan próximos a los polos geográficos. Las líneas de flujo magnético siguen el patrón característico de un imán de barra, siendo verticales en las cercanías de los polos y horizontales en el Ecuador magnético. Comprender esta geometría es esencial para interpretar adecuadamente las anomalías magnéticas. Si bien en exploración geofísica el interés principal recae en el campo originado en la corteza, es indispensable

reconocer la influencia de los campos magnéticos externos, pues afectan las mediciones y deben corregirse en el procesamiento de los datos.

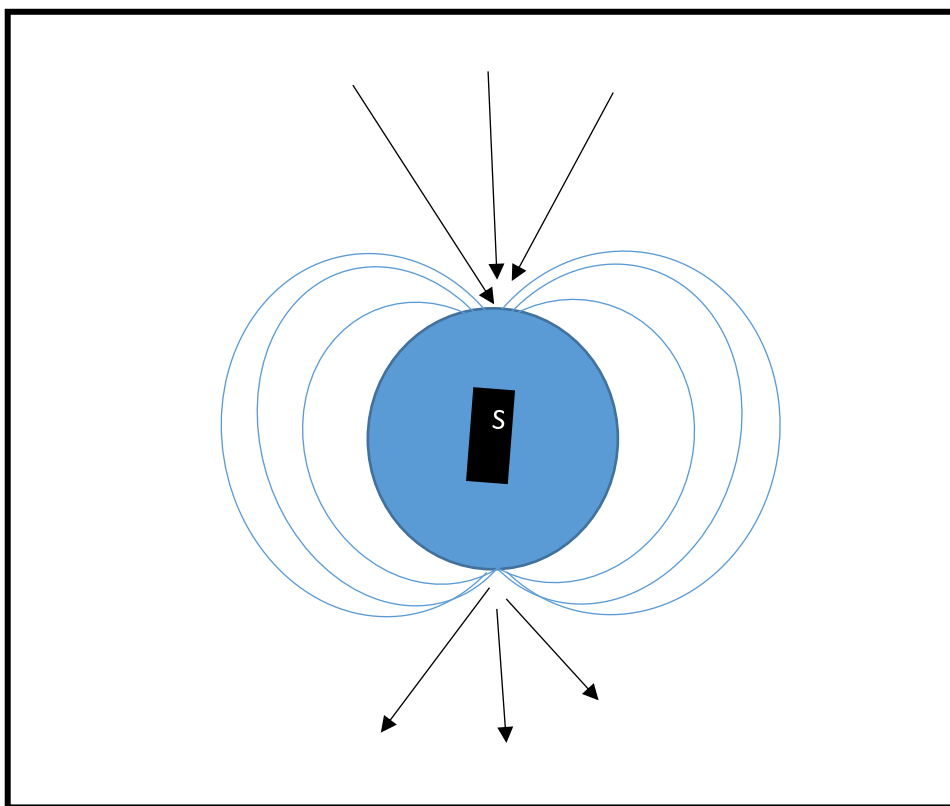


Figura 2. 3 Campo dipolar terrestre (tomado y modificado adaptado de Burger, 1992).

Dichas perturbaciones resultan de la interacción del campo principal con los efectos asociados al viento solar (Campbell, 1997). En términos generales, el campo magnético terrestre se compone de tres contribuciones: (1) el campo principal, (2) el campo de anomalías y (3) las variaciones transitorias o pseudoperiódicas (Campos Enríquez et al., 1999).

2.7.1.1 El Campo magnético principal

Este Campo constituye alrededor del 98% del campo total (Campos Enríquez et al., 1999) y se origina en el interior del planeta. Desde el punto de vista teórico, puede representarse como el efecto de múltiples dipolos magnéticos con distinta orientación situados en el núcleo fluido. Su variación secular alcanza aproximadamente 8 nT por año.

2.10.1.2 Campo de anomalías

El campo de anomalías tiene su origen en la corteza terrestre y se relaciona directamente con la distribución de minerales ferromagnéticos. Dichas anomalías constituyen el objetivo principal de la exploración geofísica.

2.10.1.3 Campo de variaciones pseudoperiódicas y transitorias

Estas variaciones provienen de corrientes eléctricas generadas en la ionósfera debido a la interacción con la actividad solar (Nettleton, 1971). Tales efectos producen la periodicidad diaria del campo magnético principal.

Un ejemplo sencillo de los elementos del campo geomagnético puede observarse con una aguja imantada libremente suspendida: si gira en el plano horizontal, se alinearán con el meridiano astronómico formando un ángulo denominado declinación (D), el cual varía según la ubicación geográfica (Hotchkiss, 1932). Si la aguja se orienta en el plano vertical, tomando la dirección de la declinación, formará con el horizonte un ángulo llamado inclinación (I). Ambos parámetros constituyen los elementos básicos del campo terrestre y se ilustran en la Figura 2.4.

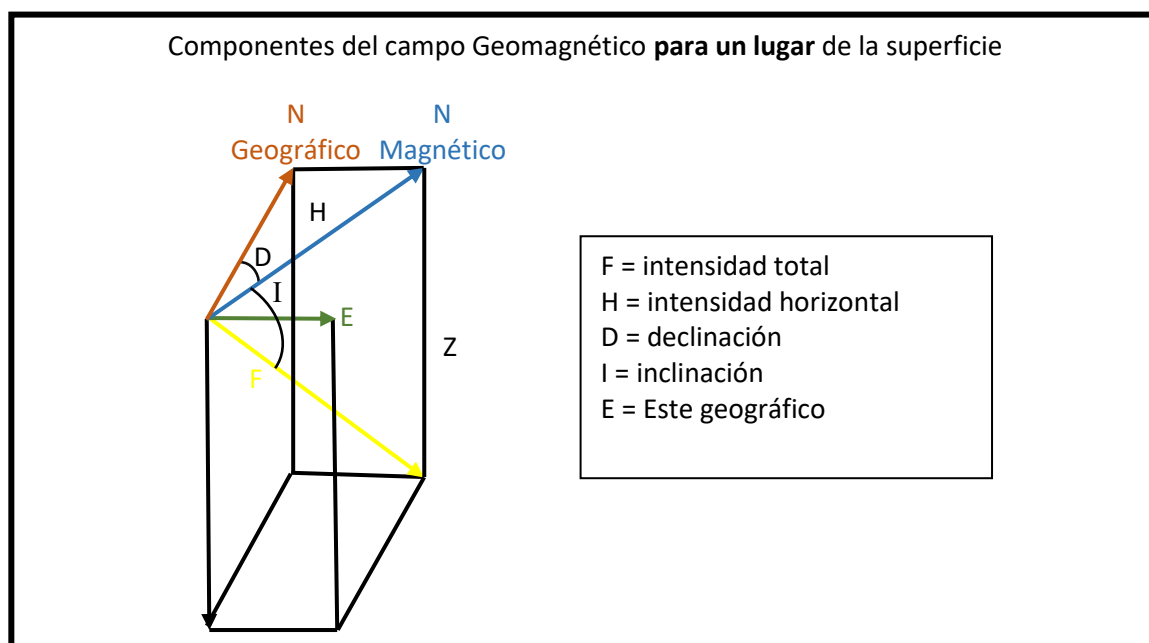


Figura 2. 4 Componentes del vector de campo magnético (tomado y adaptado de Kertz, 1986)

Donde:

D = declinación magnética ($0 < D < 360^\circ$)

I = inclinación magnética ($-90^\circ < I < 90^\circ$)

h = Componente horizontal del campo magnético

z = Componente vertical del campo magnético

H = Intensidad del campo magnético terrestre

y sus relaciones son:

En el ecuador magnético = 0 , luego $h = H$, $Z = 0$.

En los polos = 90° ,

luego $h = 0$, $Z = H$.

2.10.1.4 Distribución Del Campo Magnético En La Superficie Terrestre

El nano Tesla (nT) es la unidad utilizada en la exploración geofísica para medir la intensidad del campo magnético (H). La intensidad del campo magnético terrestre es del orden de los 25,000 nT en el Ecuador y 70,000 nT en los polos, y esta puede modelarse en un mapa de intensidad magnética (Figura 2.5) (Campos Enríquez *et, al.*, 1971).

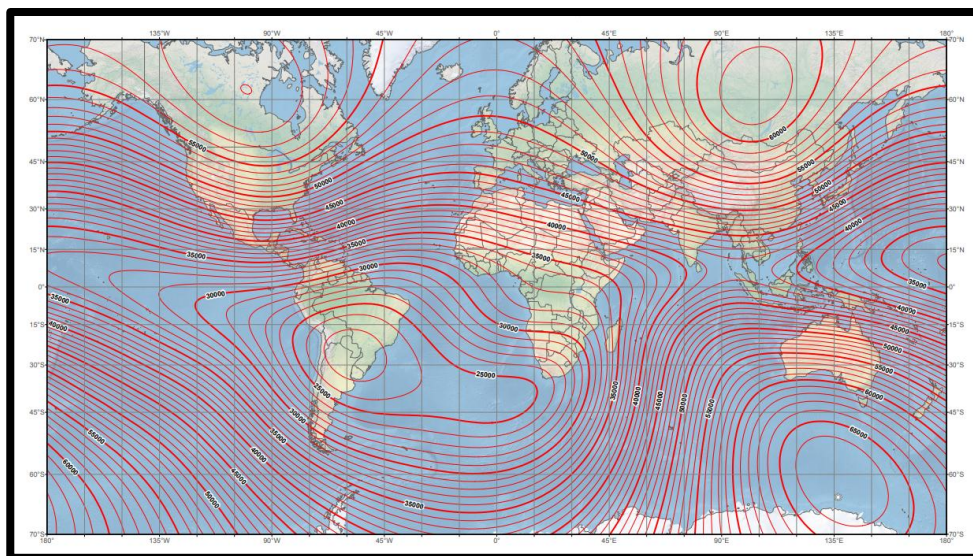


Figura 2. 5 Intensidad total del campo magnético principal (Tomado y adaptado de NOAA, 2015)

2.10.1.4 Variaciones temporales del campo magnético terrestre.

Cuando se considera que la susceptibilidad de las rocas subyacentes es nula o constante, el campo magnético en superficie presenta escasa variación. Con respecto a la latitud, en áreas reducidas (decenas de kilómetros cuadrados) los cambios son despreciables, y con la altitud apenas alcanza 0.03 nT por metro en los polos, siendo menor en el Ecuador (Campos et al., 1999). Por ello, estas variaciones no se toman en cuenta en el cálculo de anomalías, salvo aquellas de carácter temporal, que son las más relevantes.

Variación secular.

Esta variación corresponde a cambios en escalas anuales o superiores, asociados principalmente con la dinámica del núcleo externo. Sin embargo, también pueden reflejarse variaciones rápidas debidas a procesos en la ionósfera y magnetosfera. Entre sus causas se incluyen tormentas geomagnéticas y fluctuaciones en corrientes de convección (Jackson et al., 2000). En ciertos lugares se han registrado hasta 150 nT/año. Asimismo, la declinación e inclinación pueden modificarse entre 6 y 10 minutos por año (Calcina, 2009).

Variaciones periódicas.

Se originan debido a la influencia de campos externos y en general equivalen a menos de 100nT. Los periodos característicos son 12 h, 1 día, 27 días, 6 meses, 1 año, 11 años, 22 años, etc. Estas están relacionadas con la rotación de la tierra y la influencia del Sol y la Luna (Calcina , 2009).

Variaciones no periódicas.

Se asocian con tormentas magnéticas, en las que se han registrado fluctuaciones de hasta 500 nT. Incluyen pulsaciones de pequeña amplitud y corta duración, desde algunas horas hasta días. Su origen es externo, vinculado con

la llegada de partículas solares a la magnetosfera, lo que provoca perturbaciones en el campo terrestre (IGN, 2019).

Variaciones diurnas.

Las variaciones diurnas del campo geomagnético están relacionadas con la actividad solar y el calentamiento atmosférico, se manifiestan como ciclos irregulares cuya amplitud crece hasta alcanzar su máximo alrededor del mediodía y luego disminuye. Suelen ser más intensas en verano que en invierno, con valores entre 10 y 30 nT, aunque pueden superar los 100 nT (Telford et al., 1990). Estas variaciones son de especial importancia en la exploración magnética, por lo que deben considerarse en el procesamiento de datos (Figura 2.6).

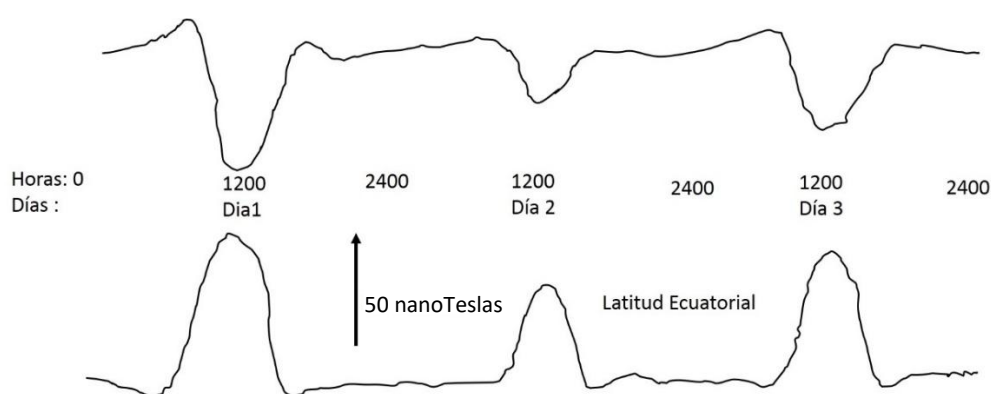


Figura 2. 6 Ejemplos de registro de la variación diurna del campo magnético (Tomada de Breiner, 1999).

2.10.1.5 El Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF)

El Campo Geomagnético Internacional de Referencia (IGRF) es un modelo matemático que describe el campo magnético terrestre y sus variaciones temporales. Fue elaborado en 1965 por la Asociación Internacional de Geomagnetismo y Aeronomía (IAGA), la cual actualiza sus parámetros cada cinco años, denominados “épocas”. El modelo asume que los coeficientes de Gauss varían linealmente con el tiempo (Blakely, 1996). De este modo, permite predecir el comportamiento del campo; no obstante, el término de deriva

asociado a cada coeficiente limita la precisión de predicciones superiores a cinco años.

2.10.1.6 Propiedades magnéticas de las rocas

Las rocas de la corteza exhiben comportamientos magnéticos distintos, determinados por la composición mineralógica y la presencia de campos magnéticos. Dichos campos se originan en el movimiento de cargas eléctricas, y a nivel atómico, en el desplazamiento de los electrones (Telford et al., 1990). En consecuencia, todas las sustancias poseen magnetismo y pueden clasificarse en diamagnéticas, paramagnéticas (con orbitales externos incompletos) y ferromagnéticas, categoría que incluye ferrimagnéticas y antiferromagnéticas (Contreras, 2004).

Susceptibilidad (k).

Se define como la facilidad con la que un material puede magnetizarse o, de manera equivalente, el grado en que responde a un campo aplicado. Matemáticamente, corresponde a la relación entre la magnetización de una sustancia y la intensidad del campo magnético terrestre (Chairman et al., 1942):

$$M = kH$$

Donde:

M es la magnetización

K es la susceptibilidad magnética

H es la intensidad de campo magnético

En la tabla 2.1 se muestran las susceptibilidades de algunas rocas.

Tabla 2. 1 Minerales de diagnóstico de varios estados de pH, estados de sulfuración y oxidación, usados para distinguir ambientes epitermales formadores de mineral (modificado de Einaudi et. al., 2003).

TIPO DE ROCA	Susceptibilidad x 10 ⁻³ (SI)
Sedimentarias	
Dolomía	0-0.9
Caliza	0-3
Arenisca	0-20
Lutita	0.01-15
Ígneas	
Granito	0-50
Riolita	0.2-35
Gabro	ene-90
Basalto	0.2-175
Diorita	0.6-120
Peridotita	90-200
Metamórficas	
Anfibolita	
Gneiss	0.1-25
Serpentina	mar-17

Mecanismos para la magnetización inducida

El comportamiento magnético de un material es complejo y depende de sus propiedades atómicas. Al someterlo a un campo externo, pueden observarse diferentes fenómenos:

Diamagnetismo

Se produce cuando varía el radio y la velocidad de giro de las cargas atómicas, modificando el momento magnético. Está presente en todos los átomos, aunque solo es evidente en aquellos con orbitales completos, donde no existen electrones desapareados (Figura 2.7). En estos casos, es la única forma de magnetismo observable (Caballero, 2011). Los materiales diamagnéticos poseen susceptibilidades pequeñas y negativas, siendo el campo interno menor que el aplicado, por lo cual $k \approx 0$ $\backslash$ $\text{approx } 0k \approx 0$. Ejemplos comunes son el cuarzo y la sal.

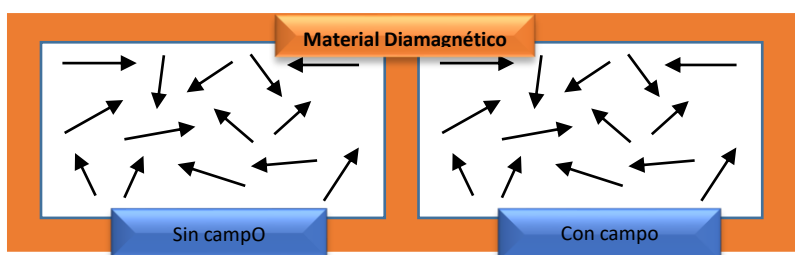


Figura 2. 7 Comportamiento de un material diamagnético

Paramagnetismo

Este fenómeno se presenta cuando en las sustancias el momento magnético del átomo no es nulo, está en todas las direcciones, con lo que las sustancias aparecen como no magnéticas pero en existencia de un campo exterior se ordenan de forma que refuerzan la acción de este (figura 2.8), y presentan susceptibilidad mayor a uno ($k > 1$) (Contreras, 2004). Este fenómeno depende de la agitación térmica de las moléculas y por lo tanto de la temperatura. Sólo puede observarse a temperaturas relativamente bajas. La temperatura sobre la que el paramagnetismo ya no se observa se llama la temperatura de Curie. Las susceptibilidades de sustancias paramagnéticas son pequeñas y positivas. Los materiales paramagnéticos son fáciles de magnetizar (Caballero, 2011).

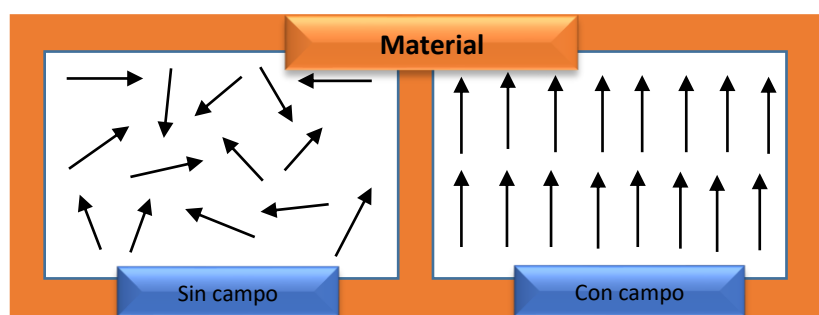


Figura 2. 8 Comportamiento de un material paramagnético

Ferromagnetismo

Es un caso especial del paramagnetismo, se presentan en sólidos interatómicos suficientemente grandes como para producir un paralelismo de los

momentos atómicos de un conjunto de átomos (dominios) próximos (Figura 2.9), los cuales se ordenan al someterlos a un campo exterior como sucede con el paramagnetismo, sólo se observa a temperaturas por debajo de la Temperatura de Curie (España, 2017). Los minerales magnéticos más importantes son los ferromagnéticos e incluyen la magnetita, titanomagnetita, ilmenita y pirrotita.

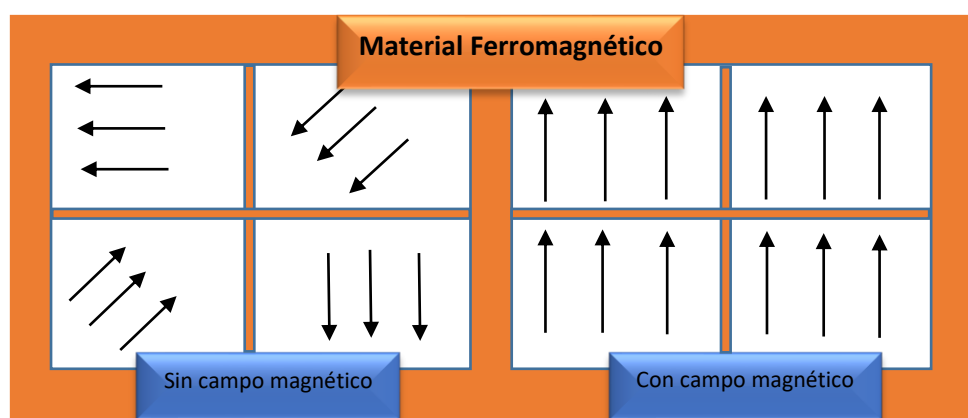


Figura 2. 9 Comportamiento de un material ferromagnético. (Gianibelli, 2014)

Ferrimagnetismo

En algunos materiales, los iones poseen distinta magnitud para sus momentos magnéticos y cuando estos momentos magnéticos se alinean de forma antiparalela bajo la influencia de un campo magnético inducido, se produce un momento magnético en una dirección (figura 2.10). Los materiales ferrimagnéticos óxidos como la magnetita que presentan propiedades magnéticas similares a los ferromagnéticos, aunque al tratarse de óxidos presentan una conductividad eléctrica mucho menor que los ferromagnéticos, que son metales.

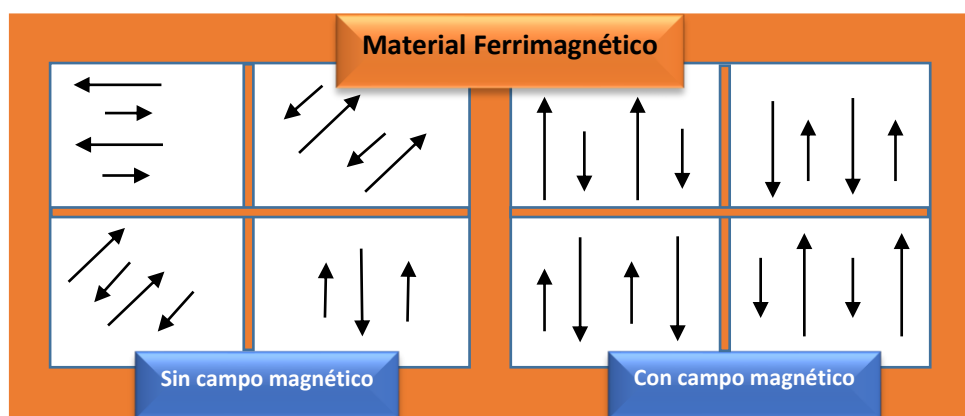


Figura 2. 10 Comportamiento de un material ferrimagnético.

Antiferromagnetismo.

Las direcciones de alineación de los electrones dentro de los dominios adyacentes están opuestas y la abundancia relativa de dominios con cada dirección del giro es aproximadamente igual. La intensidad magnética observada para el material es casi cero (figura 2.11). Así, las susceptibilidades de materiales antiferromagnéticos son casi cero. La hematita es un material antiferromagnético.

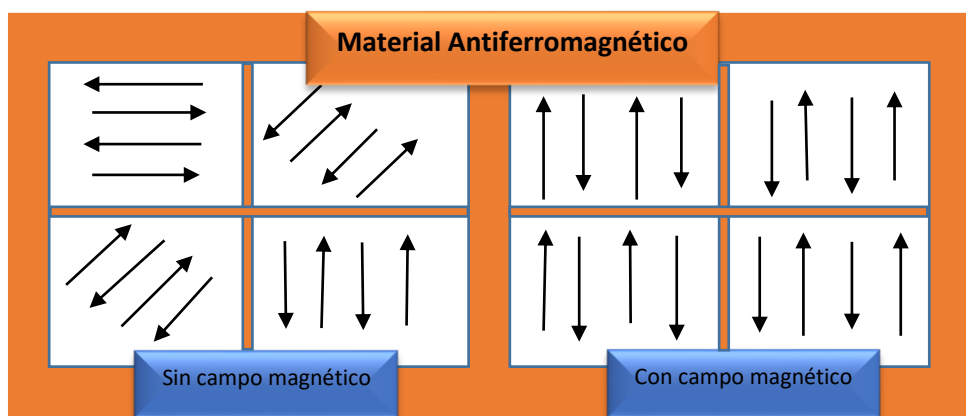


Figura 2.11.- Comportamiento de un material antiferromagnético.

2.10.2 Magnetometría aérea

La magnetometría aérea es una técnica basada en la medición de las variaciones espaciales del campo magnético total, las cuales son adquiridas por las rocas que contienen minerales magnéticos. Estas variaciones generan anomalías en la intensidad magnética, lo que permite, entre otras aplicaciones, mapear la distribución y extensión de rocas volcánicas y metamórficas con propiedades magnéticas.

Para llevar a cabo la adquisición, el magnetómetro se remolca mediante un cable de entre 24 y 30 metros de longitud, con el fin de minimizar la influencia magnética del avión. El instrumento se aloja dentro de un estuche aerodinámico con aletas, lo que proporciona estabilidad y evita que rote durante el vuelo (Reséndiz, 2010). La configuración de las líneas de adquisición depende de varios factores: la extensión superficial de las anomalías de interés, la variación diurna del campo magnético, la precisión requerida en el mapa final y la ubicación de las estaciones transmisoras utilizadas para la georreferenciación electrónica de las posiciones. Así, las líneas de vuelo se planifican de manera que las observaciones tomadas desde el avión puedan relacionarse con exactitud con su ubicación en terreno (España, 2017).

El patrón de vuelo consiste, por lo general, en líneas paralelas principales separadas a una distancia determinada, habitualmente la mitad de la altura del avión sobre el basamento rocoso, distancia que se mantiene constante incluso frente a variaciones importantes en la profundidad del basamento. Estas líneas primarias se complementan con líneas de cruce o amarre, perpendiculares a las primeras y separadas a mayor distancia, con el objetivo de obtener mediciones en los puntos de intersección en distintos momentos (Figura 2.12). Esto permite corregir los efectos de variaciones temporales del campo y de la deriva del instrumento (Ardizzone, 1996).

Para optimizar la adquisición aeromagnética, se recomienda orientar las líneas principales de manera perpendicular al echado geológico o a las tendencias tectónicas de la zona. De esta forma, las características magnéticas de origen geológico se cruzan de manera óptima, lo que reduce la magnitud de las correcciones de acimut necesarias para los cálculos de la profundidad del basamento y aumenta la precisión de los resultados (Nettleton, 1971).

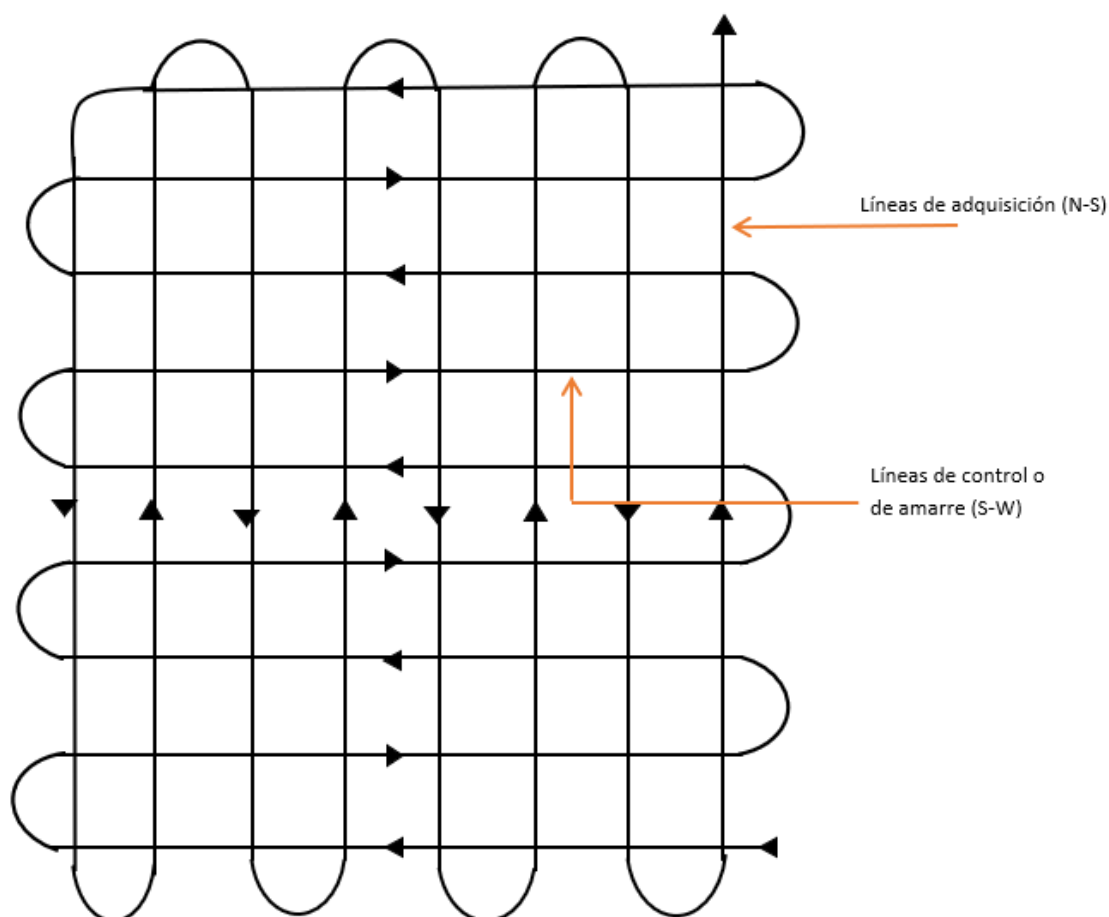


Figura 2. 12 Modelo estándar para facilitar la eliminación de variación diurna y otros errores. Tomada y modificada de Dobrin, 1998.

El espaciado ideal de las líneas de vuelo depende directamente de los objetivos del estudio. Por lo general, se adopta una distancia superior a la mitad de la profundidad de la estructura geológica que se desea investigar. En casos donde el enfoque se centra en el basamento, la profundidad puede conocerse de manera aproximada o incluso ser desconocida, debido a su alta variabilidad.

2.10.2.1 Aplicaciones

La magnetometría aérea permite realizar estudios preliminares de gran escala, facilitando la identificación de posibles yacimientos minerales, recursos de aguas subterráneas, campos geotérmicos e incluso yacimientos petrolíferos, delimitando de manera sistemática las áreas que luego pueden

ser exploradas mediante campañas terrestres. Asimismo, resulta útil para la localización de yacimientos magnéticos metalíferos y para la elaboración de mapas geológicos regionales.

2.10.2.2 Ventajas

1. La principal ventaja del método aeromagnético radica en su rapidez y en la reducción de personal necesario para la adquisición de datos.
2. Esto se traduce en un costo menor comparado con un levantamiento terrestre equivalente, siempre que la extensión del área justifique los gastos.
3. Los levantamientos aeromagnéticos pueden realizarse sobre cuerpos de agua o terrenos de difícil acceso, donde las operaciones terrestres son complicadas.
4. La velocidad de adquisición minimiza los efectos de la deriva del instrumento y las variaciones diurnas del campo magnético.
5. Debido a la altitud de vuelo, los campos magnéticos artificiales tienen un impacto mínimo sobre las mediciones, a diferencia de lo que ocurre en estudios realizados en tierra.

2.10.2.3 Desventajas

1. La precisión del levantamiento está limitada por la exactitud del mapa de referencia sobre el cual se transfieren los datos magnéticos.
2. El costo mínimo de un levantamiento aeromagnético sigue siendo elevado debido al uso de aeronaves; no obstante, actualmente se pueden emplear magnetómetros montados en drones para reducir gastos y aumentar flexibilidad.

2.10.1.6 Filtros matemáticos

Reducción al polo

La reducción al polo es un procedimiento matemático que transforma una anomalía medida bajo cualquier orientación del campo magnético en la que se mediría si el campo fuera vertical. Esto permite que las anomalías se ubiquen directamente sobre sus cuerpos causantes, logrando que los cuerpos con geometría simétrica produzcan anomalías simétricas (Escorza, 2010). Este proceso simula que el área de estudio se encuentra en el polo magnético, donde la inclinación es de 90° y la declinación es 0° , facilitando la ubicación precisa de los cuerpos anómalos en el modelo. La reducción al polo ($L(\theta)$) se realiza con base en la siguiente ecuación:

$$L(\theta) = \frac{[\sin(I) - I \cdot \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(I_a) + \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2(I_a) + \cos^2(I) \cdot \cos^2(D - \theta)]} \quad (1)$$

Donde:

I = inclinación

D = declinación

I_a = inclinación para corrección de amplitud

θ = latitud

La Figura 2.13 ilustra la relación entre el campo medido a la latitud magnética media (a) y el correspondiente al polo magnético (b) del mismo objeto. La curva (a) presenta una forma compleja, y la posición real del objeto se encuentra, en algunos puntos, entre el mínimo y el máximo de la señal.

La ubicación precisa depende de la inclinación y la declinación del campo terrestre, así como de la dirección de magnetización. En el polo magnético (b), el campo terrestre apunta verticalmente hacia abajo, al igual que la magnetización

inducida. De esta manera, el máximo principal del campo coincide con la ubicación del objeto, lo que facilita la determinación de su posición horizontal. encuentra sobre el objeto. Así, la posición horizontal puede encontrarse fácilmente.

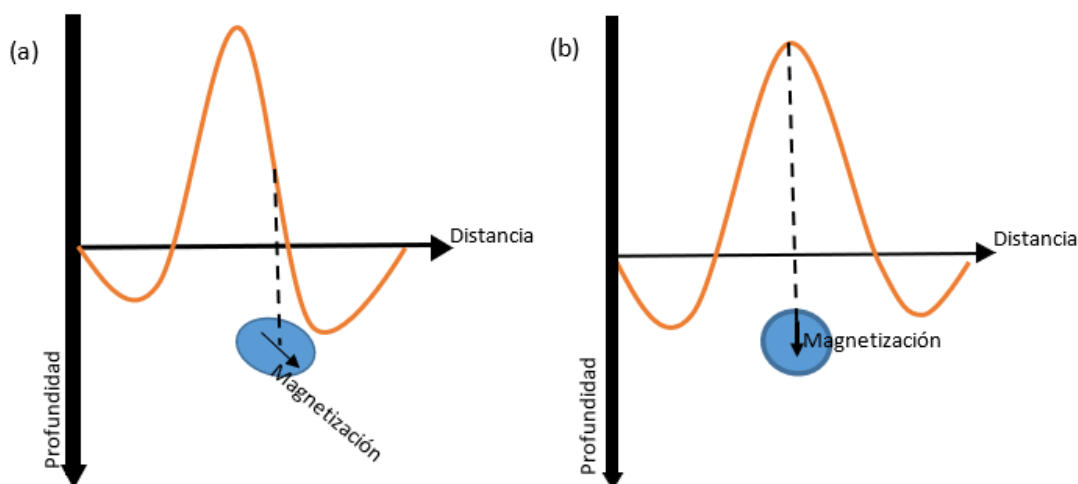


Figura 2. 13 Relación entre el campo magnético observado (a) y el campo magnético reducido al polo (b). (Tomada y modificada de Tchernychev, 2004).

Separación de anomalías regionales y residuales

Este procedimiento tiene como objetivo diferenciar los efectos generados por fuentes profundas de aquellos originados por fuentes superficiales, considerando que la amplitud y longitud de las anomalías dependen de la profundidad de los cuerpos rocosos, así como de su extensión, espesor y susceptibilidad magnética. En consecuencia, la técnica consiste en separar las longitudes de onda largas, asociadas a fuentes profundas, de las longitudes de onda cortas, vinculadas a fuentes someras (Reséndiz, 2010). Este análisis resulta especialmente útil, ya que permite aislar las anomalías magnéticas de los efectos provenientes del campo interno de la Tierra y de campos externos, enfocándose únicamente en los datos de interés generados por las heterogeneidades de la corteza terrestre. A continuación, se describen algunos métodos para estimar la profundidad de las anomalías.

Continuación analítica de campo

En ciertos casos, es relevante estimar el comportamiento que tendría el campo potencial si se midiera a una altura distinta de la del vuelo, ya sea superior o inferior. Para ello, se emplean técnicas de continuación del campo hacia arriba o hacia abajo.

Continuación ascendente

La continuación ascendente transforma el campo potencial medido en una superficie al campo que se registraría en otra superficie más alejada de la fuente. Esta transformación atenúa las anomalías de menor frecuencia y reduce los efectos de los cuerpos someros, permitiendo resaltar anomalías originadas por estructuras profundas (Verduzco et al., 2004). Este procedimiento facilita la identificación de anomalías y estructuras regionales, tales como los principales cuerpos magnéticos y lineamientos geológicos (fallas, fracturas y contactos). La función de transferencia de esta técnica se expresa como:

$$L(r) = e^{hr} \quad (2)$$

Donde:

h es la distancia a continuar hacia el plano de observación

r es en número de onda

Continuación descendente

La continuación descendente realza las anomalías someras de mayor frecuencia, siendo útil para resolver efectos de traslape de fuentes cercanas. Esta técnica permite trasladar el plano de observación a profundidades próximas al cuerpo anómalo. Sin embargo, si se realiza a profundidades

excesivas, el campo continuado puede presentar oscilaciones, las cuales sirven como criterio para estimar la profundidad de la fuente (Rivera, 2010). La función de transferencia correspondiente es:

$$L(r) = e^{-hr} \quad (3)$$

Donde:

h es la distancia a continuar hacia el plano de observación

r es en número de onda

Métodos para la identificación de bordes de anomalías

Las técnicas de detección de bordes se utilizan para diferenciar discontinuidades geológicas de distintos tamaños y profundidades. Por lo general, estas técnicas emplean derivadas horizontales y verticales de los datos magnéticos, con el propósito de definir con mayor precisión los bordes de las anomalías y mejorar la visibilidad de dichas características (Verduzco et al., 2004).

Entre los desafíos a superar al realzar los datos se encuentran:

- a) detectar anomalías finas que quedan atenuadas frente a anomalías de gran amplitud,
- b) mantener la continuidad de cuerpos individuales en presencia de variaciones laterales de susceptibilidad o profundidad de enterramiento, y
- c) asegurar que los bordes de las estructuras reflejen correctamente la naturaleza de la magnetización de las rocas.

Se han desarrollado técnicas de interpolación para delinear y mapear estas características, facilitando la estimación de bordes y profundidades de las fuentes magnéticas a partir de mallas de datos (Escorza, 2010). A continuación, se mencionan algunos de los métodos más usados en la detección de bordes.

Primera y segunda derivada vertical

Las derivadas verticales de primer y segundo orden se aplican principalmente para resaltar fuentes someras. Cuando varias fuentes magnéticas se encuentran próximas y sus anomalías se superponen, estas derivadas permiten diferenciar los efectos de cada una (Reséndiz, 2010).

La primera derivada vertical se calcula midiendo el campo magnético en dos puntos a diferentes alturas sobre la misma vertical, obteniendo la diferencia entre los datos y dividiéndola entre la separación vertical de los puntos. Este procedimiento elimina longitudes de onda largas y efectos regionales, ayudando a separar anomalías adyacentes asociadas a rocas cercanas a la superficie (Verduzco et al., 2004).

Las derivadas verticales amplifican la información de longitudes de onda corta a costa de la información de onda larga. Por ello, las derivadas de primer y segundo orden se emplean frecuentemente para resaltar gradientes y localizar bordes de cuerpos magnéticos someros, enfatizando las fuentes próximas a la superficie.

CAPÍTULO III

“Siempre parece imposible hasta que se hace”

Nelson Mandela.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

3.1 Flujo de trabajo

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se estableció una metodología general que consta de tres etapas primorciales:

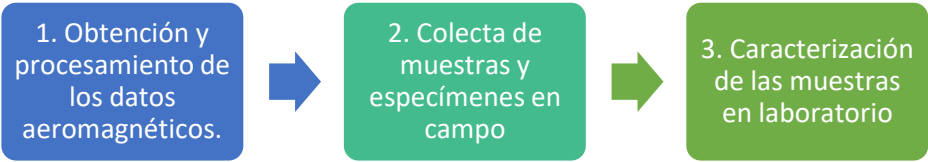


Figura 3. 1 Flujo de trabajo general

3.2 Metodologías específicas

1. Obtención y procesamiento de los datos aeromagnéticos.

En la fase inicial, el trabajo se estructuró con el objetivo de localizar las zonas de interés asociadas a posibles estructuras que pudieran servir como receptáculo de yacimientos minerales. Para ello, se planteó un flujo de trabajo específico para e4l método aeromagnético (figura 3.2).

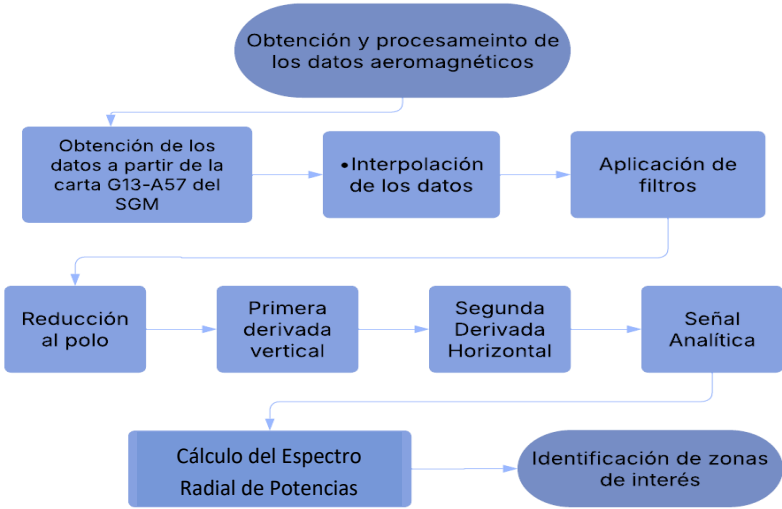


Figura 3. 2 Flujo de trabajo específico para aeromagnetismo.

1. Se obtuvieron datos aeromagnéticos de la zona de estudio en San Francisco del Oro, Chihuahua, a través de la carta G13-A57 del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Estos datos proporcionan información sobre las variaciones del campo magnético, permitiendo la identificación de estructuras geológicas como fallas, diques y fracturas (figura 3.3).

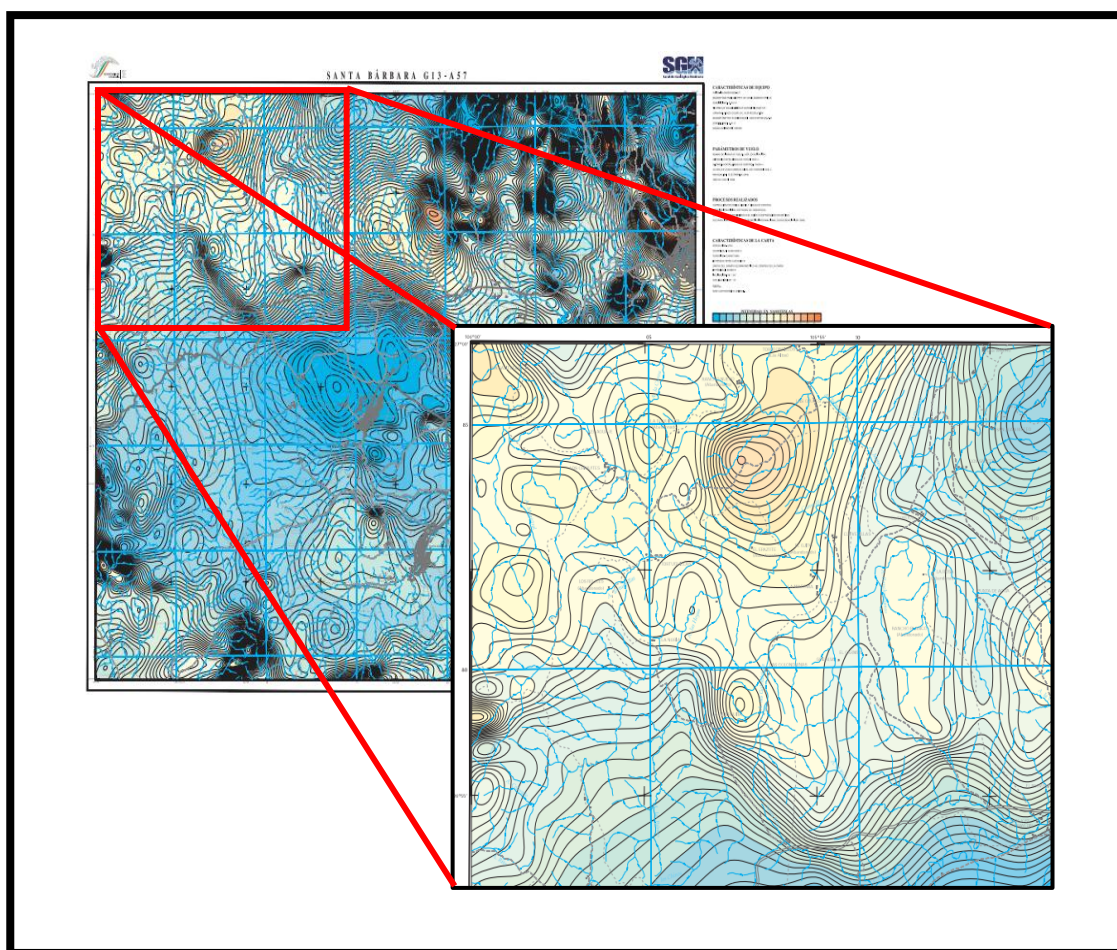


Figura 3. 3 Delimitación de la zona en la Carta Magnética. Tomado y adaptado de SGM, 2009

Se dividió toda el área en una cuadrícula de aproximadamente 0.50 cm de lado por cada cuadro. Para cada uno se obtuvo la coordenada x,y, así como el promedio de los valores de las curvas de intensidad magnética. Con el valor de

los promedios se obtuvo la coordenada z, la cual representa la magnetización utilizada posteriormente en el procesamiento de los datos.

2. Procesamiento de los datos

Se utilizó el método de interpolación *kridging* para generar un grid continuo con resolución adecuada para el análisis.

3. Aplicación de filtros.

Con el objetivo de resaltar las anomalías magnéticas y resaltar características geológicas de interés, se aplicaron diferentes filtros a los datos:

- Derivada vertical: Para identificar cambios abruptos en el campo magnético que podrían estar asociados con fracturas o límites de cuerpos geológicos.
- Derivada horizontal: Para destacar las estructuras más profundas y determinar los contactos entre unidades litológicas.
- Señal analítica: Para combinar la información de la derivada total del campo magnético y facilitar la identificación de cuerpos magnéticos en diferentes profundidades.

4. Sustracción del espectro radial de potencia (ERP)

Con el propósito de determinar la profundidad de las fuentes magnéticas y estructuras como diques, se utilizó la técnica de sustracción del espectro radial de potencia. Este método permite distinguir entre anomalías magnéticas superficiales y profundas, identificando las variaciones espectrales correspondientes a diferentes profundidades. La profundidad de las anomalías fue estimada a partir de la pendiente de la curva espectral obtenida de los datos procesados.

5. Selección de zonas de interés.

Se analizaron los mapas resultantes para identificar estructuras geológicas relevantes, como fallas, fracturas, y posibles diques, que podrían actuar como receptáculos de minerales de interés económico (oro, plata, y cobre).

3.3 Muestreo en campo

En función de las anomalías magnéticas detectadas y las estructuras geológicas inferidas, se seleccionaron puntos de interés para la recolección de muestras geológicas.

Se realizó una campaña de exploración y muestreo, recolectando tres muestras de cada uno de los puntos: SFO_A, SFO_B y SFO_C.



Figura 3. 4 Muestras tipo de las zonas de estudio (1. Calcita con amatista, 2. Calcita con amatista, 3. Galena, 4. Galena, 5. Estibinita, 6. Amatista, 7. Amatista y 8. Galena).

3.4 Análisis de muestras en laboratorio

Las muestras fueron procesadas y molturadas a grado talco (figura 3.7), posteriormente fueron etiquetadas y preparadas (figura 3.8) para su análisis mediante técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Análisis de Energía Dispersiva (EDS) para determinar la mineralogía asociada.

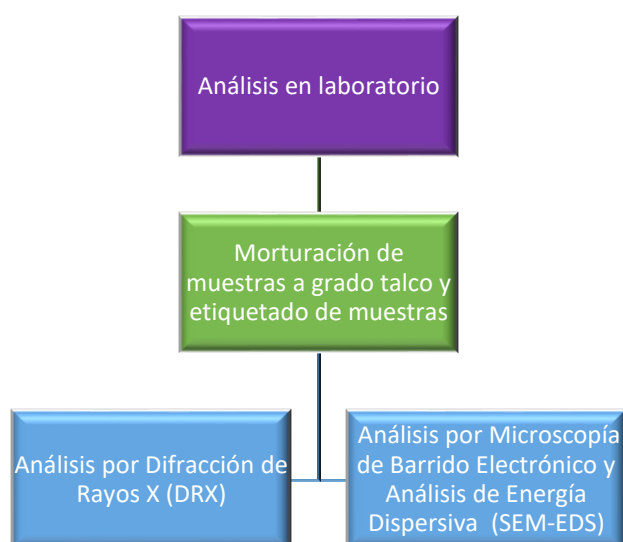


Figura 3. 5 Flujo de trabajo específico para análisis de laboratorio

1. Preparación de las muestras

Se procedió a molturar y etiquetar las muestras a grado talco.



Figura 3. 6 Molturación grado talco



Figura 3. 7 Etiquetado de muestras

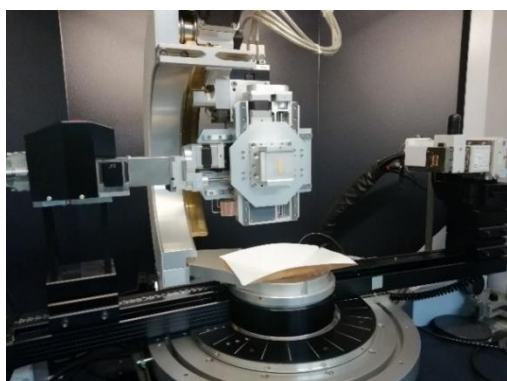


Figura 3. 9 Difractor de Rayos X

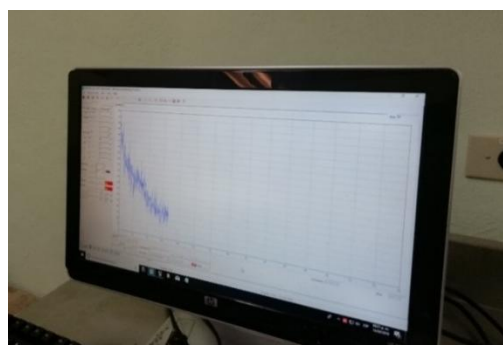


Figura 3. 8 Obtención del difractograma



Figura 3. 11 Preparación de platina para SEM-EDS



Figura 3. 10 Obtención de imagen SEM

CAPÍTULO IV

*“Aprender sin pensar es inútil. Pensar sin aprender, peligroso”
Confucio.*

CAPÍTULO IV. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.

Con el fin de delimitar estructuras geológicas de interés y zonas potenciales de mineralización en el área de estudio, se aplicaron diversos filtros a los datos aeromagnéticos obtenidos. A continuación, se presentan los mapas resultantes de las transformaciones aplicadas, tales como primera derivada vertical, segunda derivada horizontal y señal analítica, que permiten resaltar las características estructurales y magnéticas más relevantes.

En la figura 4.1 se muestra el resultado del Campo Magnético Reducido al polo. En este mapa es posible observar los rasgos magnéticos predominantes de la región, los cuales pueden ser concordantes con estructuras de carácter regional, como fallas o fracturas.

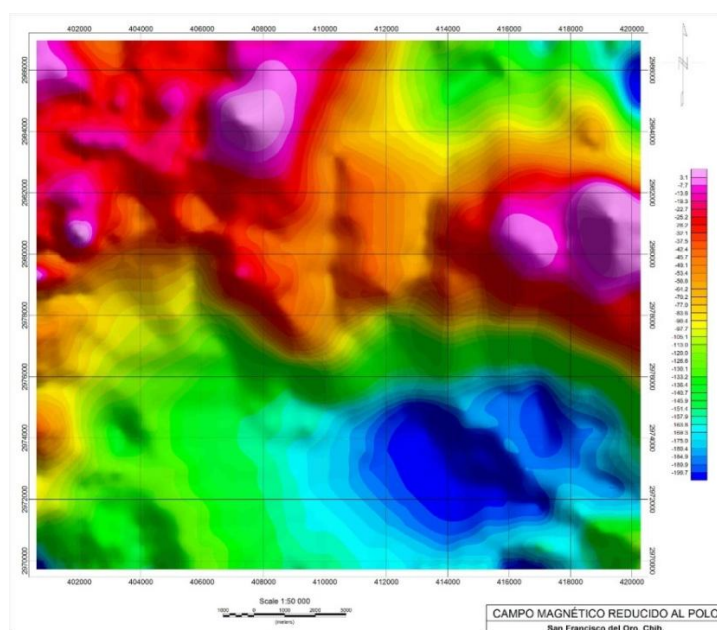


Figura 4. 1 Mapa de Campo Magnético Reducido al Polo

La figura 4.2 muestra el mapa de Primera Derivada Vertical donde los altos magnéticos resaltan zonas con fuertes gradientes verticales del campo. Estas anomalías pueden estar asociadas a los techos de cuerpos magnéticos o a estructuras someras. De la misma forma, las zonas donde se generan algunos dipolos en este mapa concuerdan espacialmente con altos magnéticos

observados en el mapa de segunda derivada horizontal (Figura 4.2), los cuales, de acuerdo con Reeves, C. (2005), pueden indicar bordes laterales, así como el contacto entre dos unidades con susceptibilidades contrastantes.

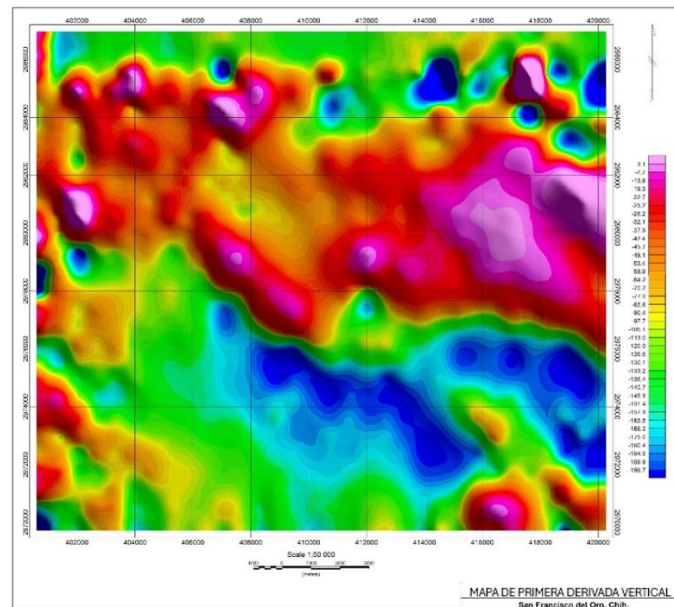


Figura 4. 2 Mapa de Primera Derivada Vertical

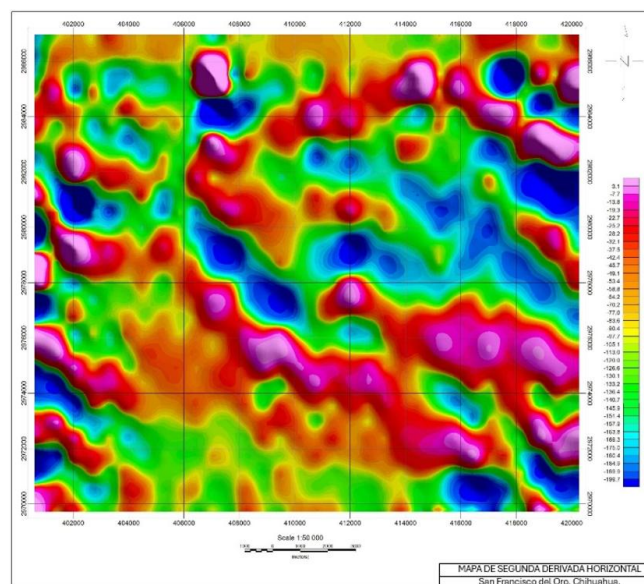


Figura 4. 3 Mapa de Segunda Derivada Horizontal

La correlación entre ambos filtros puede sugerir la existencia de contrastes bruscos de susceptibilidad, probablemente asociados a bordes litológicos,

fallas o límites de intrusión. Por, mientras que en la Primera Derivada Vertical los dipolos observados pueden sugerir cambios abruptos de susceptibilidades, con los altos magnéticos de la Segunda Derivada Horizontal, se pueden inferir los bordes laterales de cuerpos magnéticos.

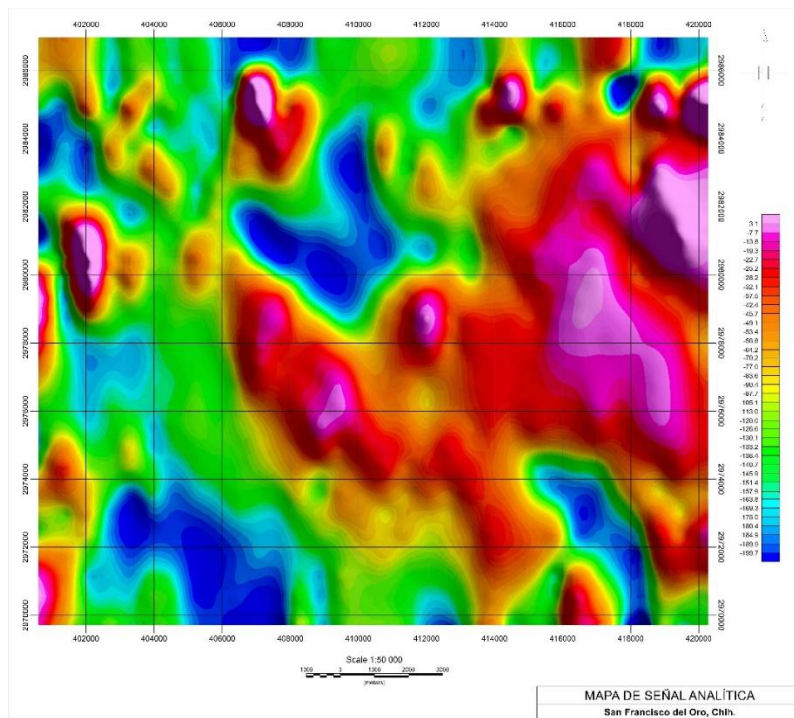


Figura 4. 4 Mapa de Señal Analítica

La figura 4.4 muestra el mapa de Señal Analítica, calculada a partir de las derivadas parciales en las tres direcciones espaciales. En el área de estudio, se observa correlación espacial entre los dipolos observados en el mapa de Segunda Derivada Horizontal y los altos magnéticos del de Señal Analítica, lo que otorga mayor consistencia a la delimitación de bordes y contactos magnéticos.

Una vez realizado el filtrado de los datos, se procedió a la obtención del Espectro Radial de Potencias (ERP), con la finalidad de estimar la profundidad de las fuentes magnéticas.

En la figura 4.5 se observa el ERP, donde resaltan: en color rojo la pendiente más pronunciada ($m_1 = -18445.04$), asociada con fuentes magnéticas profundas; en amarillo la pendiente medianamente pronunciada ($m_2 = -10.669.22$), asociada a fuentes de profundidad media; y en verde la pendiente menos pronunciada ($m_3 = -50006.94$), asociada con fuentes más someras.

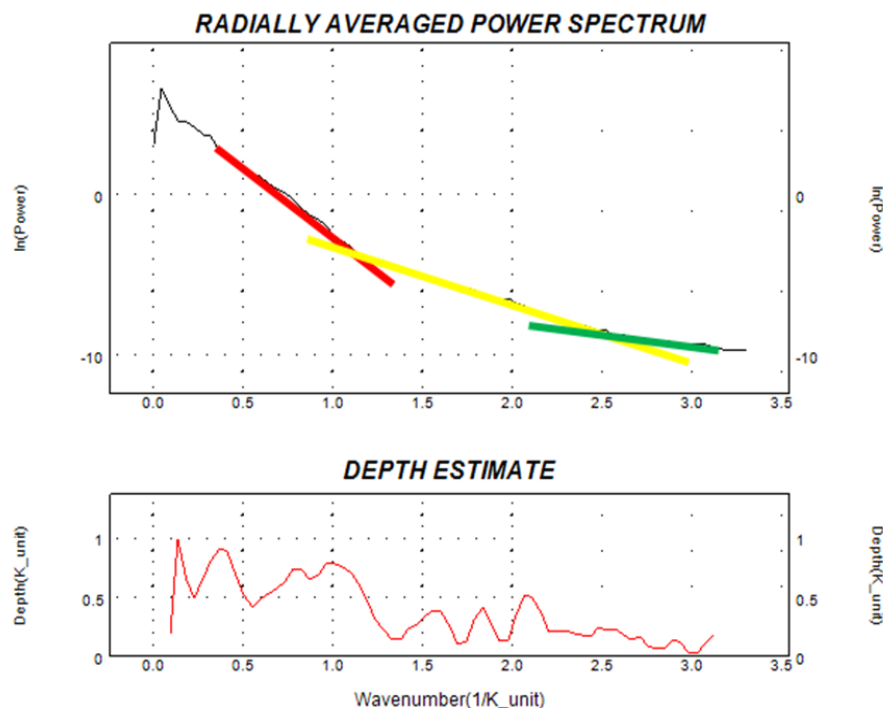


Figura 4. 5 Espectro radial para la estimación de profundidades

A partir del cálculo de las pendientes, se estimaron las profundidades mediante la ecuación $z = \frac{m}{4\pi}$, obteniendo: $Z_1 = -1467$ m, $Z_2 = -398.44$ m, y $Z_3 = -849.03$ m.

Posteriormente, se procedió a la estimar la localización de los contactos litológicos. Para ello, se utilizó el método de Werner, el cual asume que las fuentes son estructuras verticales con contraste de susceptibilidad en relación con su entorno. En la figura 4.6 observamos las coordenadas y la profundidad estimada de algunos diques y contactos.

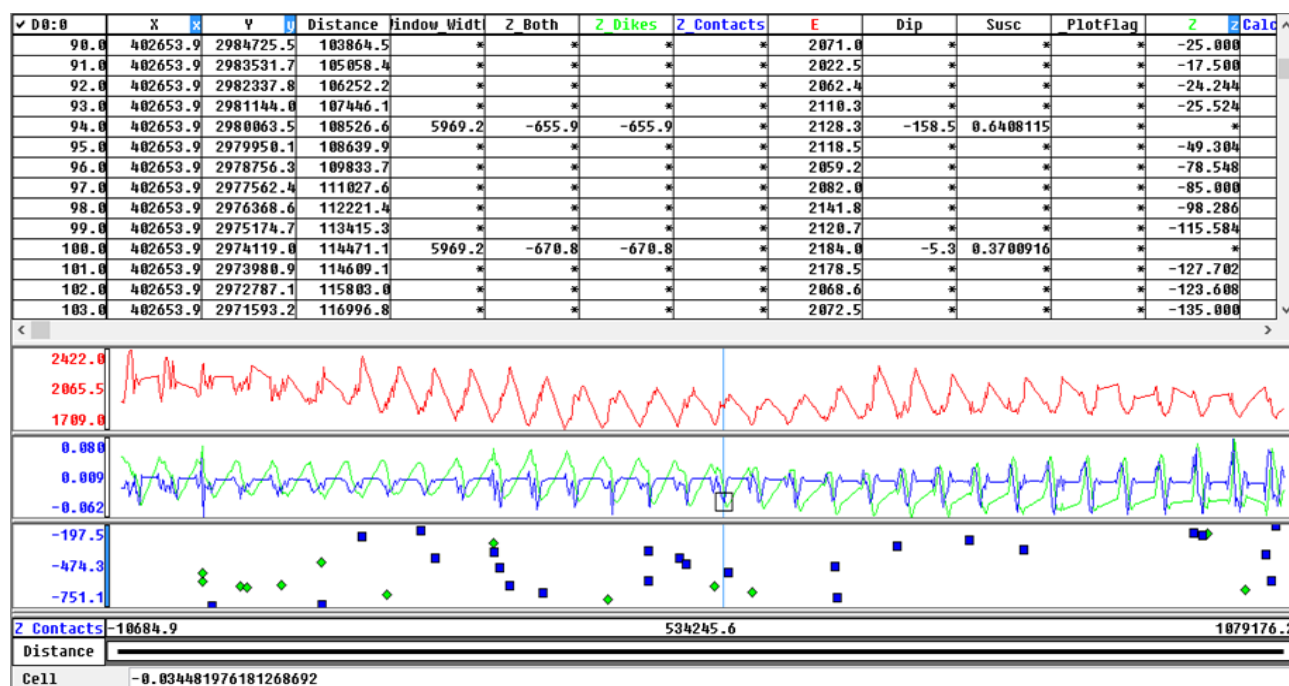


Figura 4. 6 Estimación de la localización de diques y contactos por el método de Werner.

Los resultados obtenidos mediante el método de Werner, aplicado en Oasis Montaj, generaron un conjunto de coordenadas correspondientes a la posible posición de diques y contactos. Dichos puntos fueron exportados a ArcGIS, donde se realizó su georreferenciación y posterior superposición sobre el mapa de Señal Analítica (Figura 4.7). Esta integración permitió verificar la correspondencia espacial entre los puntos de Werner (▲) y las anomalías magnéticas resaltadas en el procesamiento. Como resultado, se observó que gran parte de los puntos coinciden tanto con dipolos presentes en la Señal Analítica como con altos magnéticos predominantes, lo que otorga mayor robustez a la delimitación de estructuras de interés.

Durante la campaña de exploración y muestreo se recolectaron un total de nueve muestras, priorizando aquellas que tuvieran texturas metálicas o alteraciones hidrotermales evidentes.

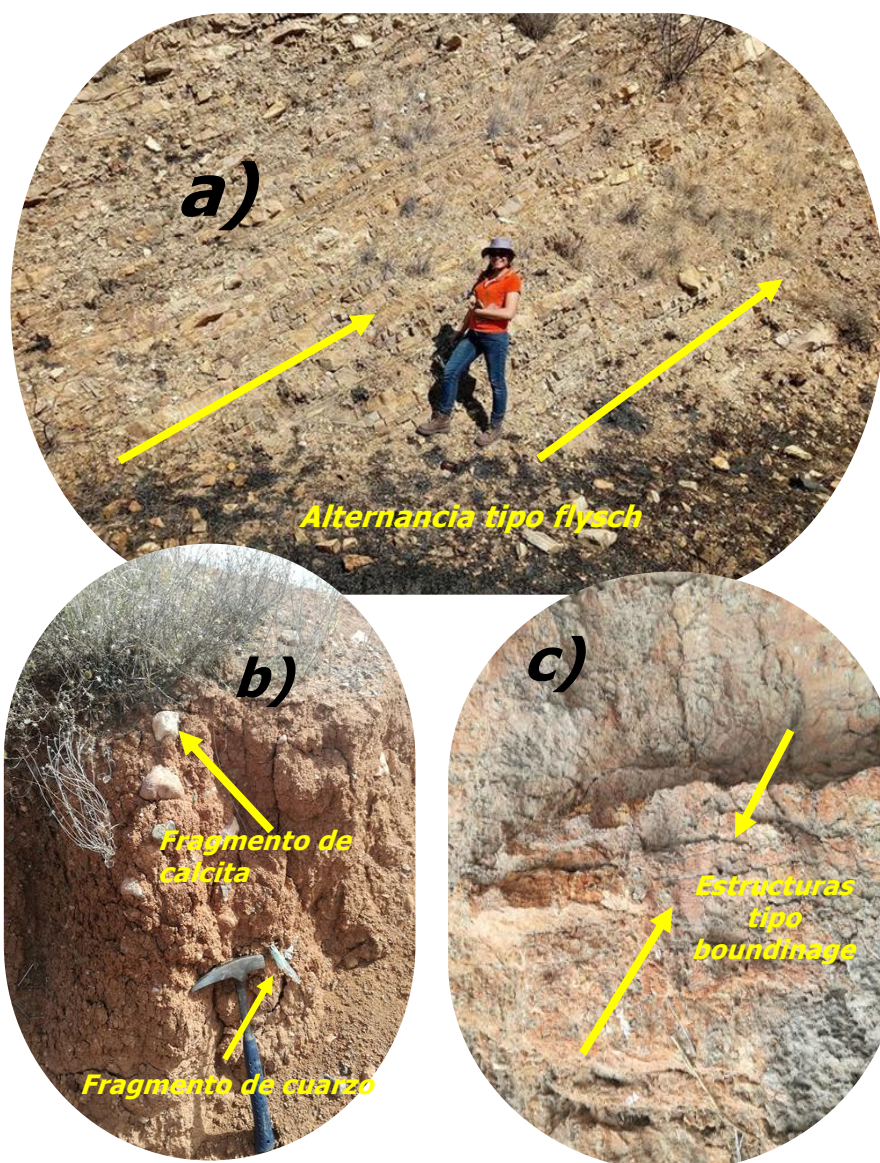
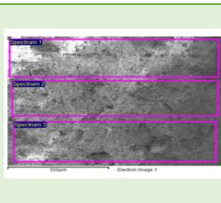
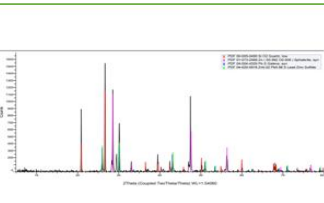
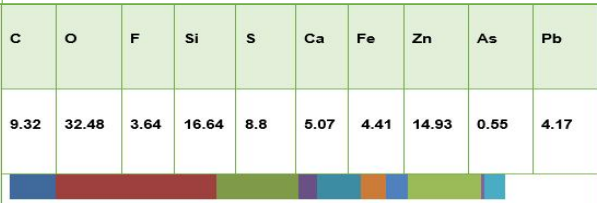
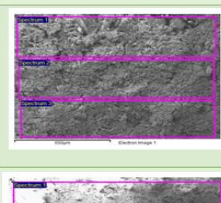
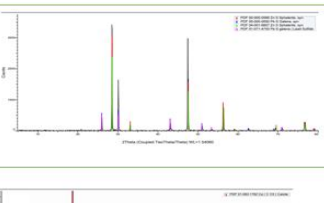
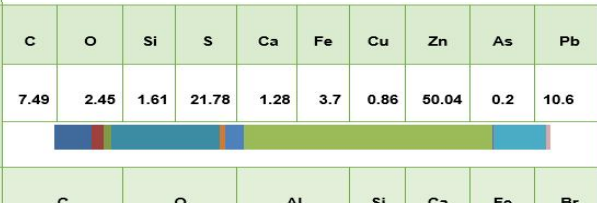
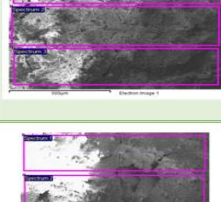
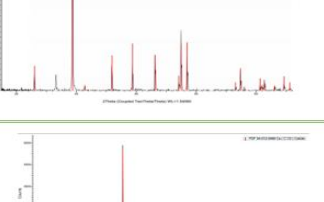
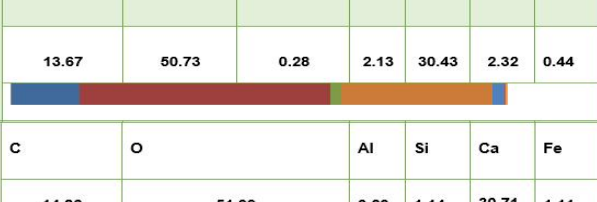
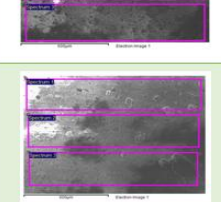
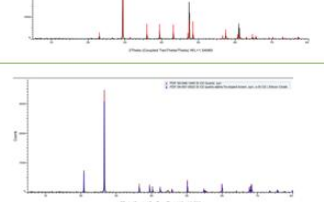
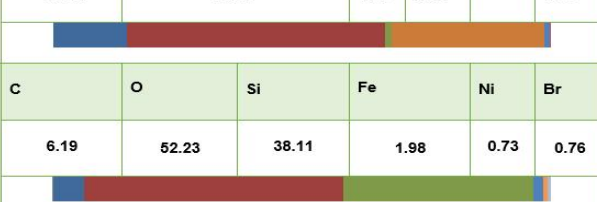
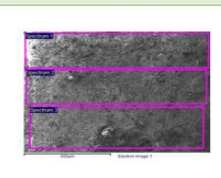
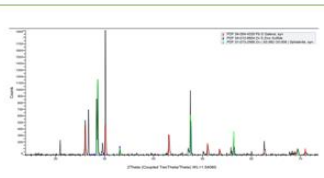
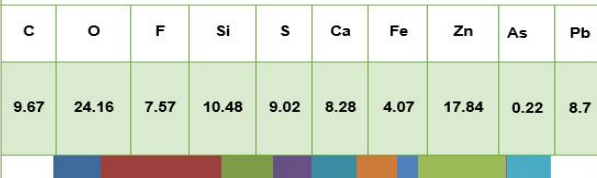


Figura 4. 9 Fotografías de los afloramientos tipo, visitados durante la campaña de exploración.

En A, se observa una intercalación rítmica de calizas y lutitas (Flysch) con una intensa oxidación y alteración argílica. En B, se observa a escala de afloramiento suelo aluvial con numerosos fragmentos minerales (cuarzo y calcita) dispuestos erráticamente en superficie. En la fotografía C, se pueden observar boudinage producto de la intensa deformación que experimentó la región de estudio.

En la tabla 4.1 se presentan los resultados obtenidos a partir de las muestras colectadas en los puntos seleccionados de acuerdo con criterios de accesibilidad, y dando prioridad de recolección a aquellas que presentaran texturas metálicas y evidencia macroscópica de alteración hidrotermal.

Tabla 4. 1 Resultados del análisis por SEM-EDS y DRX

CLAVE	PETROLOGIA	IMAGEN MEB	CONTENIDO ELEMENTAL EDS (%)											DIFRACTOGRAMA
SFO_A2			C	O	F	Si	S	Ca	Fe	Zn	As	Pb		
			9.32	32.48	3.64	16.64	8.8	5.07	4.41	14.93	0.55	4.17		
														
SFO_A3			C	O	Si	S	Ca	Fe	Cu	Zn	As	Pb		
			7.49	2.45	1.61	21.78	1.28	3.7	0.86	50.04	0.2	10.6		
														
SFO_B1			C	O	Al	Si	Ca	Fe	Br					
			13.67	50.73	0.28	2.13	30.43	2.32	0.44					
														
SFO_B2			C	O	Al	Si	Ca	Fe						
			14.82	51.99	0.23	1.14	30.71	1.11						
														
SFO_B3			C	O	Si	Fe	Ni	Br						
			6.19	52.23	38.11	1.98	0.73	0.76						
														
SFO_C1			C	O	F	Si	S	Ca	Fe	Zn	As	Pb		
			9.67	24.16	7.57	10.48	9.02	8.28	4.07	17.84	0.22	8.7		

Para cada muestra se incluyen: la fotografía de mano, la micrografía SEM, el espectro EDS con los principales elementos detectados, y el difractograma de rayos X correspondiente. Esta integración de técnicas tiene como propósito contrastar las observaciones de campo con la caracterización microscópica y mineralógica, ofreciendo una base para inferencias sobre la petrología y la posible asociación con procesos mineralizantes (Camprubí, 2013; González-Partida et al., 2018).

Las muestras recolectadas corresponden principalmente a amatista, galena con presencia subordinada de calcopirita, y calcita con evidencias de alteración hidrotermal. En particular, las muestras 3 y 4 exhiben texturas compatibles con recristalización y procesos de alteración, mientras que las muestras 1 y 5 presentan estructuras características de cuarzo en su variedad amatista. La presencia de galena fue confirmada mediante DRX en las muestras 2 y 6, en tanto que la detección de calcopirita en la muestra 2 refuerza la posibilidad de un ambiente mineralizante polimetálico, de acuerdo con lo descrito por Camprubí (2013) en depósitos tipo vetas hidrotermales.

Los análisis EDS muestran altos contenidos de oxígeno en las muestras de amatista, lo cual es esperable considerando que el cuarzo (SiO_2) es la fase dominante. Sin embargo, debe señalarse que en algunos casos los porcentajes detectados por EDS pueden estar influenciados por la calibración del equipo o por la propia naturaleza superficial del análisis, por lo que estos valores deben considerarse como indicativos más que absolutos.

En cuanto al bromo detectado en las muestras 3 y 5, su presencia resulta atípica para el contexto geológico local. El Br puede encontrarse en ambientes sedimentarios o evaporíticos, así como en algunos fluidos hidrotermales residuales (González-Partida et al., 2018), pero no suele ser un componente mayor en sistemas epitermales de Au–Ag–Pb–Zn. Por ello, su detección puntual en este estudio podría estar asociada tanto a trazas naturales como a limitaciones del análisis por EDS.

CAPÍTULO V

*“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado.
Un esfuerzo total es una victoria completa”*

Mahatma Gandhi.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis geofísicos y geoquímicos fueron integrados para identificar posibles zonas con potencial económico, asociadas con la existencia de estructuras (diques o contactos) que pudieran albergar mineralización de interés. La interpretación se apoyó en la correlación de las anomalías magnéticas con las características geológicas de la zona.

En el mapa de señal analítica se observan altos magnéticos que están directamente relacionados con los cambios litológicos descritos en el mapa geológico de la región de San Francisco del Oro (figura 5.1).

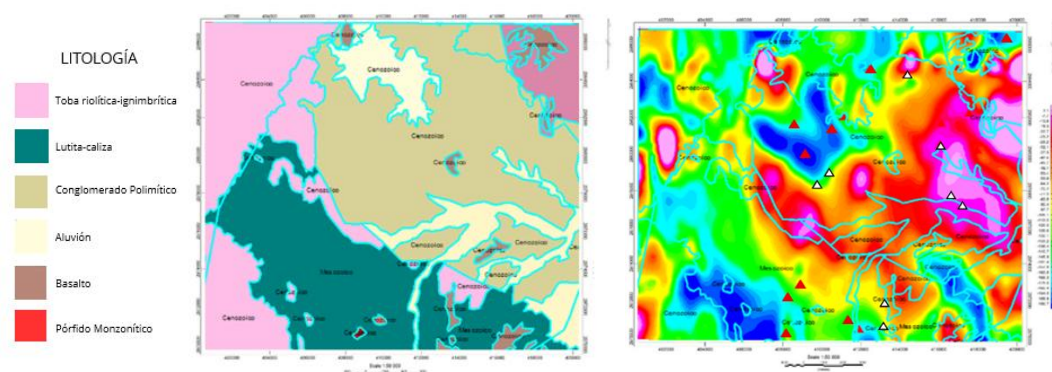


Figura 5. 1 Comparativa del mapa geológico de la zona de interés con la localización de diques y contactos encontrados a partir del Espectro Radial de Potencia.

Las zonas de altos magnéticos indican la existencia de cuerpos con alta intensidad magnética, que pueden estar relacionados con rocas intrusivas o estructuras mineralizadas.

Estas áreas coinciden en gran medida con dipolos observados en los mapas de derivada vertical y horizontal (Figuras 4.2 y 4.1), lo que refuerza la idea de que pueden sugerir estructuras importantes en el subsuelo.

Por medio de la estimación de pendientes del espectro radial de potencia y la estimación de profundidades mediante el procesamiento en Oasis por el método Werner, se pudieron establecer las coordenadas donde se infiere la existencia de diques y contactos. Estas coordenadas se superpusieron en el

mapa geológico y el mapa aeromagnético para establecer una correlación entre los resultados de ambos mapas y la localización de las posibles estructuras de interés (diques y contactos) (Figura 5.2).

En las zonas de altos magnéticos (colores rojo y lila) se pueden observar algunos puntos que se interpretan como contactos o diques, esto debido a que los diques, al estar formados por rocas magmáticas, frecuentemente tienen propiedades magnéticas más altas que las rocas adyacentes. En algunas zonas donde es posible observar la formación de dipolos magnéticos, también se localizan puntos sugeridos como contactos. Esto debido a que un dipolo magnético sugiere la existencia de un cuerpo geológico que tiene un contraste en sus propiedades magnéticas respecto a su entorno.

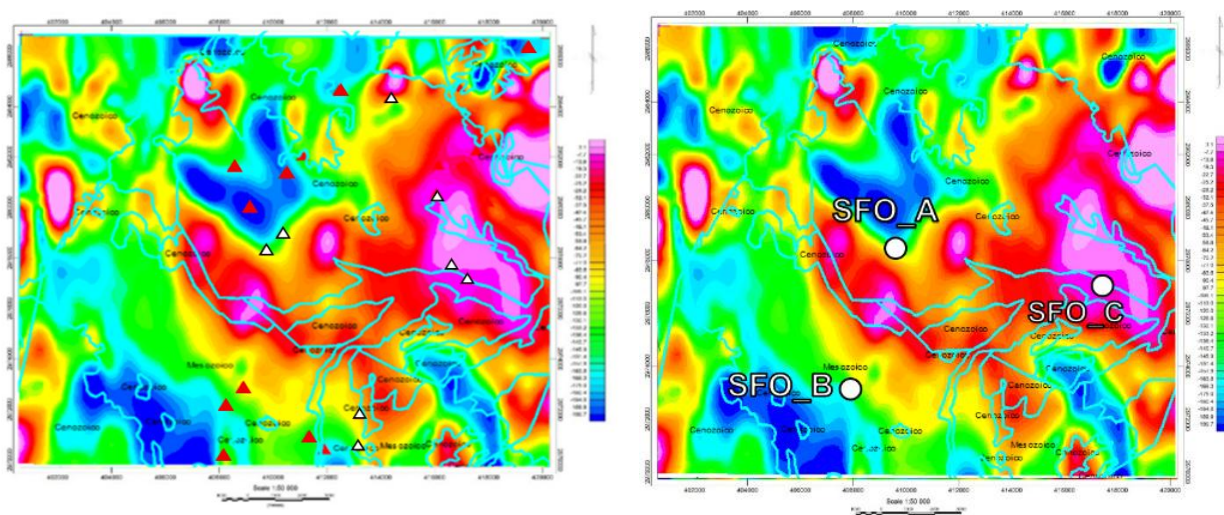


Figura 5. 2 Selección de puntos de interés para recolección de muestras.

En el mapa geológico (Figura 5.3), la línea azul corresponde a cambios en la litología de la zona de estudio. Sobre este mapa se realizaron tres secciones o perfiles geológicos (Figura 5.4) para analizar la posible existencia de fallas, así como para corroborar que los efectos de las fallas existentes pueden observarse en el mapa magnético.

La realización del primer perfil geológico (Figura 5.4) permitió inferir una falla que coincide con el cambio abrupto de alternancia Lutita-Caliza a toba-riolítica igmimbrítica.

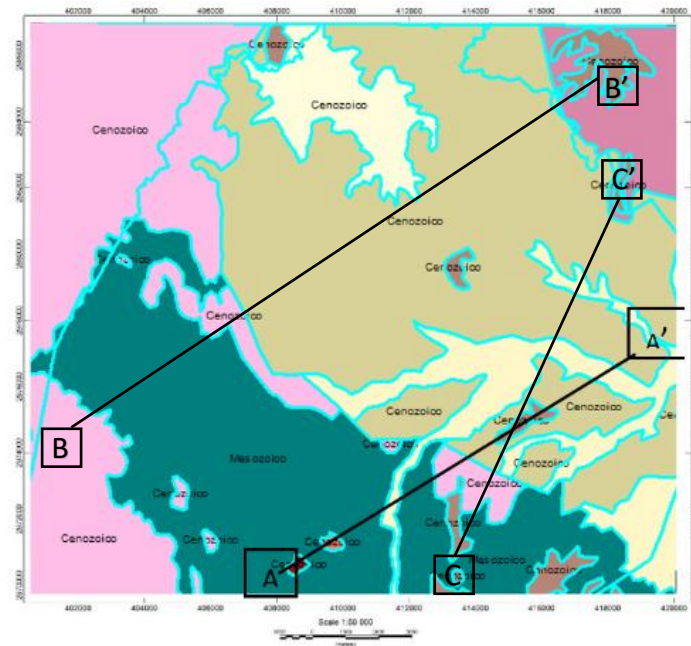


Figura 5. 3 Trazo de uno de los perfiles geológicos.

Las tobas riolíticas en esta área son indicativas de un entorno volcánico extenso, común en la Sierra Madre Occidental (Ferrari, 2005). En San Francisco del Oro, estas tobas podrían estar asociadas lateralmente con vetas mineralizadas de oro y plata, especialmente debido a la existencia de estructuras tectónicas que han facilitado la circulación de fluidos hidrotermales.

El conglomerado en la región podría estar cubriendo depósitos ricos en minerales, particularmente si ha sido afectado por la actividad tectónica y fallas cercanas.

La repetición de las tobas en este intervalo podría indicar la continuidad de un entorno volcánico favorable para la mineralización. Las estructuras tectónicas y fallas en estas tobas, que podrían estar vinculadas a la actividad magmática del pórfido.

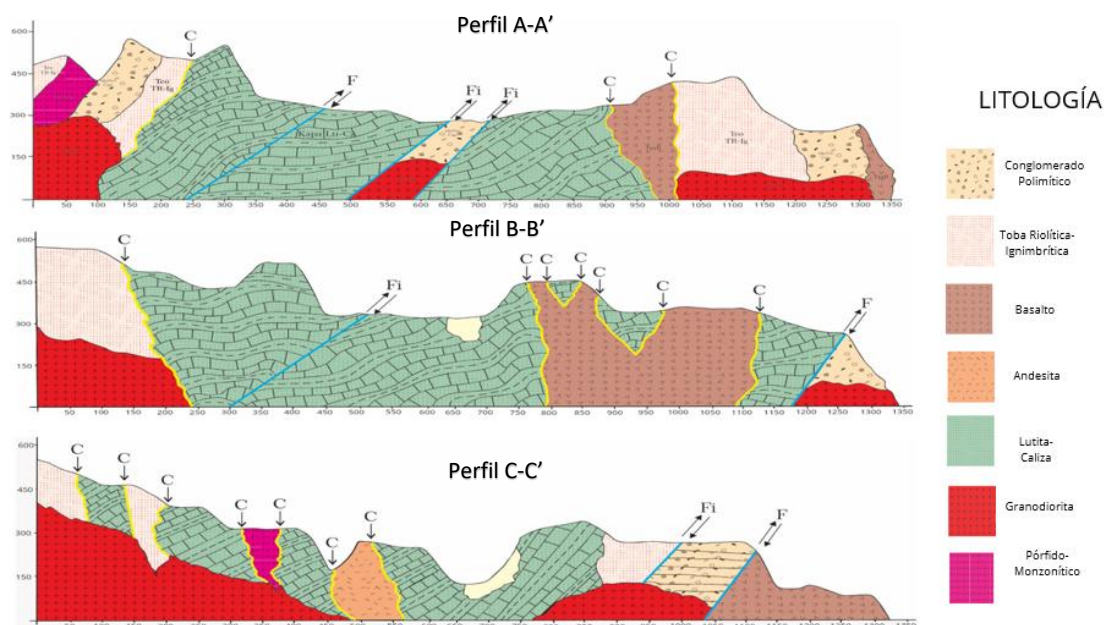


Figura 5. 4 Secciones Geológicas en la zona de interés

Los basaltos intercalados con la alternancia lutita-caliza podrían estar asociados con eventos volcánicos que generaron sistemas hidrotermales, conduciendo a la formación de depósitos de sulfuros masivos o vetas de metales preciosos. Los contactos entre basalto y rocas sedimentarias pueden ser zonas de mineralización debido a la diferencia en la reactividad química entre las rocas volcánicas y sedimentarias.

Las muestras caracterizadas por DRX y SEM-EDS muestran la existencia de minerales en bajos porcentajes (0.03-0.1), que no se encuentran registrados en la carta geológica del SGM, pero que, a su vez, pueden servir como criterio para inferir la existencia congénita de minerales de interés económico (Au, Ag, Cu).

CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió evaluar, a partir del procesamiento e interpretación de datos aeromagnéticos, la posible existencia de estructuras de carácter regional con interés mineral en el área de estudio. La aplicación secuencial de filtros (reducción al polo, primera derivada vertical, segunda derivada horizontal y señal analítica) así como el análisis espectral mediante el espectro radial de potencias, proporcionó una visión regional de los contrastes de susceptibilidad magnética. Estos resultados, coherentes entre sí, sugieren la existencia de cuerpos magnéticos someros, contrastes litológicos y posibles discontinuidades estructurales, los cuales podrían funcionar como canales de ascenso de fluidos de interés, y por lo cual constituyen zonas de interés para futuras investigaciones.

Es importante subrayar que el método aeromagnético, por su naturaleza, tiene un alcance regional. Sus resultados son inferenciales y permiten delinear tendencias estructurales y zonas potenciales, pero no precisan con exactitud la ubicación ni la mineralización. En este sentido, el estudio constituye una aproximación preliminar para guiar investigaciones posteriores, más detalladas, con técnicas de carácter local como muestreo sistemático, geoquímica instrumental de alta sensibilidad o estudios geofísicos de mayor resolución.

Los análisis SEM-EDS y DRX proporcionaron información detallada sobre la composición mineralógica de las muestras de superficie, permitiendo la identificación de fases como cuarzo, calcita y minerales sulfurados, así como la caracterización de sus relaciones texturales. La existencia y asociación de estas fases es coherente con ambientes hidrotermales, lo que aporta evidencia mineralógica para sustentar la interpretación del modelo genético del yacimiento propuesto. No obstante, su alcance es complementario respecto al objetivo central de esta investigación, que fue la evaluación aeromagnética del área.

La integración del análisis aeromagnético con la caracterización mineralógica permitió establecer un modelo estructural consistente con la evidencia geológica y geoquímica obtenida, en el que la geometría y profundidad de los cuerpos inferidos muestran coherencia entre los distintos métodos aplicados.

En conjunto, ambos enfoques permitieron obtener una caracterización preliminar del subsuelo, en la que se identificaron contrastes magnéticos asociados a posibles estructuras profundas e intrusivos, así como zonas con comportamiento magnético diferenciado que podrían estar relacionadas con procesos de alteración y mineralización. Estos resultados sientan bases sólidas para trabajos futuros que integren con mayor detalle la geología, la geoquímica y la geofísica local. En consecuencia, los resultados aquí presentados deben entenderse como un marco regional que orienta la exploración hacia sectores con mayor potencial mineral.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con analizando la zona mediante análisis que contemplen estudios geoquímicos como la técnica ICP-MS, petrografía clásica, petrografía por catodoluminiscencia, análisis químicos, microsonda Raman y espectroscopia de fluorescencia con el propósito de profundizar en el estudio de la zona para comprender el comportamiento de la mineralización presente en ella.

Asimismo, se sugiere complementar el estudio con métodos geofísicos y de percepción remota, como gravimetría aérea e interpretación de imágenes satelitales, los cuales permitirían identificar contrastes de densidad asociados a estructuras profundas, así como reconocer lineamientos estructurales, alteraciones hidrotermales y patrones regionales que podrían estar relacionados con la distribución de la mineralización. La integración de estos métodos contribuiría a refinar la interpretación estructural del área y a delimitar con mayor precisión zonas potencialmente favorables para futuras campañas de exploración.

REFERENCIAS

- Álvarez, R. R. (2010). *Procesos Mineralizadores*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <http://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/LECTURAS/procesos-mineragenesis.htm>
- Amezcuca, A. (2012). *Yacimientos minerales del Estado de Chihuahua*. Obtenido de Intituto Tecnológico de Ciudad Madero.
- Arana Lozano, C. (2012). *SÍNTESIS, DETERMINACIÓN ESTRUCTURAL POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE MONOCRISTAL, ESTUDIO SUPRAMOLECULAR Y ANÁLISIS TEÓRICO DE COMPLEJOS MOLECULARES*. Santiago de Cali: Universidad de Valle, Facultad de ciencias Naturales y Exactas.
- Ardizone García, J. P. (1996). *ANÁLISIS DE DATOS AEROMAGNÉTICOS. METODOLOGÍAS Y APLICACIÓN AL LEVANTAMIENTO AEROMAGNÉTICO DE ESPAÑA PENINSULAR*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Blakely, R. (1996). *POTENTIAL THEORY IN GRAVITY AND MAGNETIC APPLICATIONS*. Cambridge: Cambrigde University Press.
- Bullard, E. (1948). The Magnetic Field within the Earth. *Royal Society of Mathematical and Physics Sciences of London*, 434.
- Caballero Miranda, C. (2011). *LA FÁBRICA MAGNÉTICA A PARTIR DE LA ANISOTROPÍA DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA (ASM)*. Ciudad de México: UNAM, Instituto de Geofísica.
- Calcina , M. (2009). UN MODELO DINÁMICO PARA EL CAMPO MAGNÉTICO. *Revista Boliviana de Física*, 44-62.
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to Geomagnetic Fields*. Cambridge: University Press.
- Campos Enríquez, J., Campos Enríquez, J., & Urrutia Fucugauchi, J. (1971). Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético en México . *Geofísica Internacional*, 107-116.
- Campos Enríquez, J., Campos Enríquez, J., & Urrutia Fucugauchi, J. (1999). Variación secular reciente y cartas de los elementos del campo geomagnético de México. *Geofísica Internacional*, 107-116.
- Camprubí, A., & Albinson, T. (2006). Depósitos Epitermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 27,82.
- Chairman, F., Schairer, J., & Spicer, H. (1942). *Handbook of Physcal Consants*. U.S.A.: The Geological Society of America.

- Chávez Rivas, F., Rodríguez Iznaga, I., & Petranovskii, V. (2014). Caracterización por SEM, EDS y micro-Raman de la influencia de la relación molar SiO₂/Al₂O₃ y temperatura de reducción sobre el sistema CuZSM5. *Revista Mexicana de Física*, 340-349.
- Contreras Flores, R. (2004). *Paleomagnetismo de rocas intrusivas de Baja California: Implicaciones tectónicas*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional, ESIA.
- Del Olmo, M. (2013). *Universidad Politécnica de Cartagena*. Obtenido de Difracción de Rayos X para minería: https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf
- Eguiluz de Antuñano, S. A. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 1-26.
- Eguiluz, S. (2000). *Tectónica de la Sierra Madre Oriental*. Obtenido de Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- Eleasser, W. M. (1945). Trans American Geophysics. *Union*, 584.
- Escorza Reyes, M. (2010). *MAGNETOMETRÍA DE LA ISLA SOCORRO, ARCHIPIÉLAGO DE LAS REVILLAGIGEDO*. Ciudad de México: UNAM, Facultad de Ingeniería.
- España Bernardino, J. (2017). *Análisis Aeromagnético del complejo dómico "Las Derrumbadas", en el estado de Puebla*. San Luis Potosí: IPICYT.
- Gianibelli, J. C. (2014). *La actividad del campo magnético terrestre*. La Plata, Argentina: Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP.
- Goodacre, A. K. (1985). A perspective on the evidence for periodic cometary impacts on Earth. *Earth and Planetary Science Letters of Amsterdam*, 76.
- Hendequist, J. I. (1996). Epithermal Gold Deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Society of Resource Geology*, 16.
- Hendequist, J. L. (1994). The role of magmas in the formation of hidrothermal ore deposits. *Nature*, 519-527.
- Hendequist, J., Arribas, A., & González-Urien, E. (s.f.). Exploration for Epithermal Gold Deposits. *SEG Reviews*, 245-277.
- Instituto Geográfico Nacional. (24 de agosto de 2019). *Geomagnetismo*. Obtenido de Madrid, España: <http://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/GMT-Teoria-Geomagnetismo.pdf>
- Ipohorski, M., & Bozzano, P. B. (2009). *Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de minerales*.
- Jackson, A., Jonkers, A., & Walker, M. (2000). Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records. *The Royal Society of Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 957-990.

- Langel, R. A., & Hinze, W. J. (1998). *The Magnet Field of the Earth's Lithosphere*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Li, C., Jun, X., & Jing, C. (2015). Applications of scanning electron microscopy in earth sciences. *Science China. Eath Sciences*, 11.
- López Loera, H., & Tristán González, M. (2013). Geología y magnetometría del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: Implicaciones tectónicas y eohidrológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 137-156.
- Lugo, J. (8 de Julio de 1991). *Regionalización geomorfológica e la República Mexicana*. Obtenido de Boletín del Instituto de Geografía UNAM.
- Melgarejo, J. C., Proenza, J. A., Galí, A., & Llovet, X. (2010). Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 23.
- Mendieta, J. A. (Abril de 2018). *Estudio tectónico-sedimentario en el Mar Mexicano, Estados de Chihuahua y Durango*. Obtenido de Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- Nettleton, L. L. (1971). *ELEMENTARY GRAVITY AND MAGNETICS FOR GEOLOGIST AND SEISMOLOGY*. HUSTON: Society of Exploration Geophysics.
- Olavarría, C. P., & D'Angelo, J. A. (2012). Caracterización SEM-EDS de inclusiones piroclásticas y de minerales opacos de la cerámica Viluco (Mendoza, Argentina). En F. d. Sociales, *Intersecciones en Antropología* (pág. 493). Mendoza, Argentina: UNCPBA - Argentina.
- Ortíz, P. A. (2015). *Identificación de estructuras hidrogeológicas con apoyo de la técnica geofísica de magnetometría aérea*. Ciudad de México: UNAM.
- Piña, J. M. (2014). *Delimitación aeromagnética del Bloque Jalisco. Implicaciones Geohidrológicas en Tequila, Jalisco*. San Luis Potosí: IPICYT.
- Reséndiz Ortiz, P. A. (2010). *Indentificación de estructuras hidrogeológicas con apoyo de la técnica geofísica de magnetometría aérea*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería UNAM, División de Ciencias de la Tierra.
- Rivera, D. G. (2010). *La exploración magnética aérea en la prospección de yacimientos de oro y plata: caso Peña de Bernal, Querétaro*. San Luis Potosí, México: IPICYT.
- SGM. (Diciembre de 2016). *PANORAMA MINERO DEL ESTADO DE CHIHUAHUA*. Obtenido de <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/CHIHUAHUA.pdf>
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *APPLIED GEOPHYSICS*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Townley, B. K. (2011). *Yacimientos Minerales y Procesos Geológicos*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia.

Verduzco, B., Fairhead, J., Green, C., & Mackenzie, C. (2004). *New insights into magnetic derivatives for structural mapping*. Reino Unido: The Leading Edge.



BUAP