



INFORME TRABAJO PROFESIONAL

PROCESO DE EXPLORACIÓN MINERA EN YACIMIENTOS DE FIERRO DENTRO DE LA EMPRESA MINERALES MONCLOVA SA DE CV

**QUE PARA OBTENER TITULO DE
INGENIERO GEOFISICO
PRESENTA
IVONNE MONTIEL ARAUJO**

AVAL: GEOFISICO FELIPE RAMIREZ LEINES



AGRADECIMIENTOS

- AGRADESCO A DIOS POR LA OPORTUNIDAD DE VIVIR Y APRENDER COSAS BUENAS E INTENSAS DE LA VIDA Y QUE ME HA PERMITIDO ACEPTAR VARIAS INTERESANTES, UNA DE ELLAS ESTUDIAR INGENIERIA GEOFISICA Y CONTINUAR CON MI CARRERA.
 - EN ESPECIAL A GRACIAELA CORONA (MI ABUE) Y MANUEL MONTIEL G (MI ABUE) QUE ELLA ME IMPULSO Y ME IMPULSA A SEGUIR CON LA GEOFISICA Y CON EL AMOR A MI SERES QUERIDOS
 - GERARDO TE AGRADESCO POR EL APOYO Y EL COMPLEMENTO QUE TENEMOS JUNTOS
 - GRACIAS TOTALES
 - A MIS PADRES , HERMANOS QUE SIEMPRE HAN ESTADO AHÍ CONMIGO APOYANDOME SIEMPRE, Y QUE GRACIAS A USTEDES SIEMPRE SOY LO QUE SIEMPRE HE QUERIDO SER Y MEJORAR CADA DIA DE MI VIDA.
 - A TODOS MIS PROFESORES DE LA CARRERA , YA QUE CON LA ENSEÑANZAS QUE ME DIERON EN CLASE Y NO SOLO DE LAS MATERIAS APRENDI MUCHO DE LO QUE NOS PERMITE CRECER Y EN ESPECIAL A M.C ESTEBAN HERNANDEZ Q., YA QUE ES UNA PERSONA CON GRAN CALIDAD HUMANA Y UNA HONESTIDAD QUE ME PERMITIO REALIZAR ESTE TRABAJO CON AMOR JUNTO CON EL ING. FELIPE RAMIREZ LEINES, PERSONA QUE ADMIRO Y RESPETO MUCHO POR SU DEDICACION Y PACIENCIA EN LA INCORPORACION DENTRO DE LA EMPRESA MINERALES MONCLOVA SA DE CV
 - AGRADESCO A LA EMPRESA QUE ME HALLA DADO LA OPORTUNIDAD DE LABORAR CON ELLOS Y SOBRE TODO POR LA CONFIANZA PARA LABORAR CON CONFIANZA Y SEGURIDAD SINTIENDOME RESPALDADO POR ELLOS.
-
- IVONNE MONTIEL ARAUJO

RESUMEN -----	1
I INTRODUCCIÓN -----	2
II OBJETIVOS -----	3
2.1 Técnico -----	3
2.2 Estratégico -----	3
III PROCESO DE EXPLORACIÓN -----	4
3.1 Etapa I (Selección de áreas) -----	6
3.2 Etapa II (Magnetometría Aérea) -----	13
3.2.1 Equipo Utilizado-----	15
3.2.2 Programación de levantamiento geofísico aéreo -----	18
3.2.3 Adquisición de datos -----	20
3.2.4 Procesado de datos -----	21
3.2.5 Interpretación lito-magnético-estructural -----	26
3.3.3 Etapa III (Verificación de anomalías) -----	27
3.3.1 Programación de levantamiento -----	29
3.3.2 Equipo utilizado -----	31
3.3.3 Adquisición de datos -----	33
3.3.4 Procesado -----	34
3.3.5 Interpretación -----	37
3.4 Etapa IV (Conceptualización del modelo Geológico) -----	39
3.4.1 Barrenación piloto-----	41
3.4.2. Geología y Geofísica a detalle -----	42
3.5 Etapa V (Modelo Geológico) -----	43
3.6 Etapa VI (Modelo Geoestadístico y Modelo de Bloques) -----	45
IV HÉRCULES UN EJEMPLO DE PROCESO DE EXPLORACIÓN -----	48
V CONCLUSIONES Y COMENTARIOS -----	68
VI RECOMENDACIONES -----	70
BIBLIOGRAFÍA -----	71

RESUMEN

Este informe explica claramente el proceso de exploración que se efectúa en la compañía MINERALES MONCLOVA SA DE CV (MIMOSA); compañía que pertenece al GRUPO ACERERO DEL NORTE (GAN), dentro del departamento de exploración en la búsqueda de prospectos mineros de fierro así como los prospectos mineros para polimetálicos.

Se detallan las etapas del proceso de exploración de una manera técnica y lo mas específico posible, donde se puntualiza el trabajo interdisciplinario (geoestadística, geoquímica, geología y geofísica) que se lleva a cabo para encontrar yacimiento minerales, considerando cual es el insumo de cada etapa así como el proceso que se requiere para llegar al producto final, el cual esta completamente ligado con la etapa siguiente; por lo que el proceso debe llevarse de una forma minuciosa y eficaz para tener los resultados óptimos en cada una de las etapas.

Para ejemplificar el proceso de exploración se menciona el ejemplo de proyecto Hércules, Coahuila; el cual da detalle de cada etapa indicando el insumo dejando en claro cual es la importancia de los trabajos para obtener un producto refinado

Cabe mencionar que el ingeniero de exploración, ya sea geólogo o geofísico de MIMOSA debe conocer la importancia de cada una de las etapas de exploración, ya que el proceso de exploración concluye en la certificación de reservas geológicas, para llegar a esto es necesario un buen trabajo interdisciplinario, es decir de una buena integración del trabajo en equipo.

Este informe finaliza con algunas recomendaciones y comentarios para los ingenieros Geofísicos que desean practicar la exploración e investigación de forma interdisciplinaria, que puedan servirles en un futuro.

La participación de mi persona en este proceso de exploración ha sido básicamente dentro de las etapas II magnetometría aérea, III verificación de anomalías y IV conceptualización del modelo geológico como apoyo en la interpretación geológica, no solo en el proyecto Hércules, sino también los proyectos Cerro del Mercado, Durango; Tepalcatepec, Michoacán; San Jerónimo Coatlán, Oaxaca.

I INTRODUCCION

Importancia de la geofísica en el proceso de exploración

La geofísica juega un papel trascendental en la búsqueda del mineral de hierro y de prospectos mineros polimetálicos, por lo que es primordial utilizar dos métodos geofísicos para obtener un resultado riguroso, ya que de ella se analiza información necesaria para este proceso, es decir;

- Obtiene la geometría del cuerpo mineralizado; estima su ubicación y dimensiones, o sea, longitud, sección transversal, rumbo, echado y toneladas potenciales.
- Localiza la profundidad de techo y centro de masa del evento geológico propicio a mineralización, incrementando así las reservas a partir de una ampliación comprobada debido a su respuesta geofísica.
- Obtención de información a partir de las propiedades físicas de los materiales. adquiriendo información del mineral en cuanto a su debilidad estructural y la calidad, es decir, el porcentaje total del mineral en la roca.
- Se puede desechar lotes mineros con la certeza que carece de mineralización económica importante.
- Ayuda a que el geólogo de mina y el minero no pierdan el cuerpo mineralizado, ya que se tiene un control de todo el evento geológico, hablando en el proceso de explotación del mineral.

Debido a estos puntos, es de suma importancia aplicar el proceso de geofísica con calidad, desde la adquisición de datos, su procesamiento, y dando así mayor énfasis a la parte interpretativa con la ayuda del conocimiento previo de la geología del lugar así como la aplicación de un método alternativo de geofísica, considerando que la zona de estudio tenga un alto contraste en la propiedad física que se esta midiendo, en este caso magnetometría y electromagnética con sus propiedades físicas la magnetización y su conductividad respectivamente.

Citando como ejemplo dos minerales de hierro que se pueden encontrar en el mismo evento geológico, es decir, metasomatismo de contacto: La magnetita es un mineral magnético y conductor donde su respuesta magnética presenta un alto contraste de intensidad; sin embargo la hematita es un mineral no magnético y conductor donde su respuesta magnética carece de contraste de intensidad e incluso se ha llegado a confundir con un valor de fondo; por lo que es importante que el geofísico aplique otro método alternativo y que tenga presente las propiedades físicas de las rocas y minerales que se involucran en el proceso de mineralización para dar mayor significado a la interpretación y a la correlación geológica.

Cabe mencionar que como método alternativo para este estudio se realizo electromagnética en la modalidad DIGHEM II, y por política de la empresa no se autorizó hablar de este método alternativo con detalle; sin embargo forma parte del proceso de exploración dentro de la compañía MINERALES MONCLOVA SA DE CV.

II OBJETIVOS

2.1 Técnico

- Aplicar métodos de exploración de manera interdisciplinaria con el propósito de localizar y evaluar yacimientos de rendimiento económico para proveer concentrado de mineral de hierro a la planta siderúrgica de AHMSA, satisfaciendo a los clientes con los mas altos estándares de calidad en la fabricación del acero y sus derivados; así como incrementar reservas debido a que la planta siderúrgica requiere cierto tonelaje diario para su fabricación.

2.2 Estratégico

- Emplear la técnicas de exploración geofísica tales como métodos potenciales, es decir, magnetométrica aérea y métodos electromagnéticos que permitan identificar el mineral de hierro a partir de los contrastes de propiedades físicas en cualquier contexto geológico en el que se encuentre localizado cierto yacimiento mineral.

III PROCESO DE EXPLORACION

El proceso de exploración en Minerales Monclova S.A. de CV consta de seis etapas; las cuales se encuentran ligadas a partir del objetivo consecutivo que se lleva en la metodología de estos estudios e investigaciones. Para que el resultado de este proceso sea exitoso, es decir, crear riqueza y fuentes de trabajo. Al identificar un prospecto minero con la suficiente viabilidad económica para ser explotado, es necesario realizar las etapas del proceso de exploración consecutiva y eficazmente.

La información requerida que se utiliza y el orden de las etapas son:

- ETAPA I; Selección de áreas. (Imágenes satelitales, ER mapper, geofísica regional, metalogénia, fotointerpretación, litología, geoquímica de rocas, estratigrafía, geología estructural, geocronología y petrografía)
- ETAPA II; Magnetometría aérea. (Imágenes satelitales, geofísica regional, fotointerpretación, magnetometría y/o VLF a detalle, litología, estratigrafía, geología estructural, Geosoft, oasis montaj)
- ETAPA III; Reconocimiento Técnico. (Imágenes satelitales, geofísica regional, metalogénia, fotointerpretación, magnetometría y/o VLF a detalle, gravimetría, magnetometría terrestre, paleomagnetismo, métodos eléctricos y electromagnéticos, litología, geoquímica de rocas, estratigrafía, geología estructural, análisis químico geocronología y petrografía)
- ETAPA IV; Conceptualización del modelo geológico. (fotointerpretación, gravimetría, magnetometría terrestre, paleomagnetismo, métodos eléctricos y electromagnéticos, litología, geoquímica de rocas, estratigrafía, geología estructural, análisis químico geocronología, petrografía y Minex)
- ETAPA V; Modelo Geológico. (Litología, estratigrafía, geología estructural, análisis químico, geocronología, petrografía, barrenación a diamante, minex)
- ETAPA VI; Modelo Geoestadístico. (Litología, geología estructural, análisis químico, barrenación a diamante y Minex)

En todas las etapas se considera el término “producto” al objetivo esperado, el término “proceso” consta de las herramientas y técnicas necesarias para llegar al producto; finalmente, el término “insumo” se refiere al elemento principal que se posee para conseguir el producto.

III PROCESO DE EXPLORACION

TECNOLOGIA APLICADA EN EL PROCESO DE EXPLORACION

ETAPA DE EXPLORACION		TECNOLOGIA DISPONIBLE																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
		IMÁGENES DE SATELITE	GEOFISICA REGIONAL	METALOGENIA	FOTOINTERPRETACION	MAG. VLF AEREA DE DETALLE	GRAVIMETRIA	MAG. TERRESTRE	PALEOMAGNETISMO	METODOS ELECTRICOS Y ELECTRO	MAGNETICOS	LITOLOGIA	GEOQUIMICA DE ROCAS	ESTRATIGRAFIA	GEOLOGIA ESTRUCTURAL	ANALISIS QUIMICO	GEOCRONOLOGIA	PETROGRAFIA	GEOSOFT	BARRENACION A DIAMANTE	MINEX	
I	SELECCIÓN DE AREAS	●	●	●	●						●	●	●	●		●	●					
II	MAGNETOMETRIA AEREA	●	●		●	●					●		●	●					●			
III	VERIFICACION TERRESTRE	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
IV	CONCEPTUALIZACION DEL MODELO GEOLOGICO				●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●
V	MODELO GEOLOGICO										●		●	●	●	●	●	●		●	●	●
VI	MODELO GEOESTADISTICO										●			●	●	●				●	●	●

En esta tabla se especifican gráficamente el tipo de tecnología y estudios que se aplican dentro de la compañía MINERALES MONCLOVA SA DE CV en cada una de las etapas del proceso de exploración.

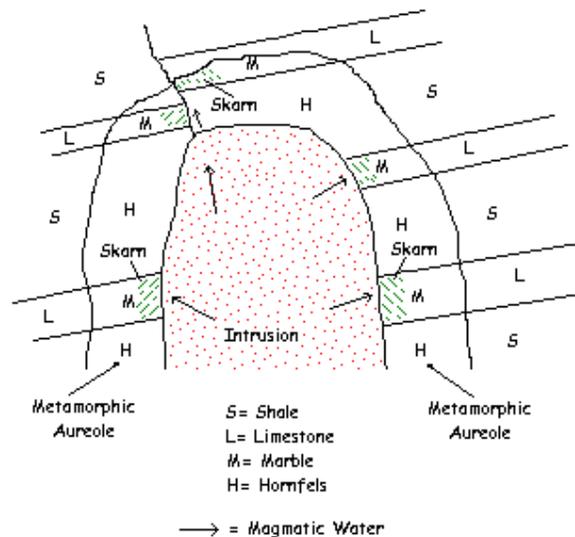
3.1 Etapa I (Selección de áreas)

El proceso de exploración comienza en la Etapa I a partir del conocimiento de eventos geológicos propicios a la mineralización. Se sabe que los yacimientos minerales de hierro se forman del siguiente evento geológico, por mencionar alguno:

- Metasomatismo de contacto

En general este tipo de evento se presenta en ambientes geológicos donde su edad varía del precámbrico hasta el terciario tardío. Se forma alrededor de los cuerpos plutónicos en contacto con rocas carbonatadas; la roca plutónica, emplazada a temperaturas muy elevadas, constituye una importante fuente de energía.

El cuerpo intrusivo, sirve como elemento preparador, es decir, provoca debilidad estructural en su periferia y dejando en la superficie el sílice y los elementos mas pesados incluyendo el hierro se depositan a mayor profundidad, con ello un segundo cuerpo intrusivo de menor edad geológica se enriquece de los elementos mas pesados que depositó otro cuerpo intrusivo, favoreciendo así la mineralización; el fluido mineralizante se va a zonas de debilidad estructural aportando la mineralización dentro de fallas o fracturas e inclusive en la periferia del cuerpo intrusivo. Donde se sabe que los minerales asociados al metasomatismo de contacto son el grupo de los silicatos, y los minerales de hierro son hematita, magnetita, pirrotita, ilmenita y siderita.



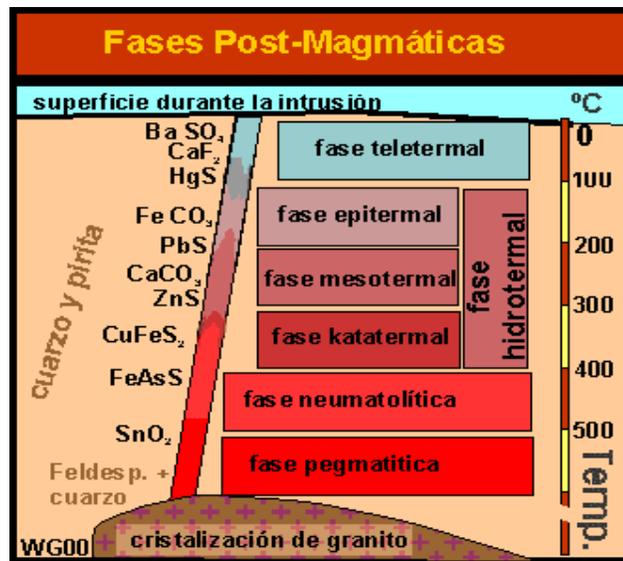
Ambiente de formación de los Skarn, referido a un arco magmático donde los intrusivos entran en contacto con rocas sedimentarias, generando el metamorfismo de contacto, Esquema tomado de <http://www.science.smith.edu/departments/Geology/Skarn/>

- Hidrotermalismo

La formación de otros depósitos minerales metálicos involucra la participación de soluciones acuosas calientes, esto como un proceso posterior al metasomatismo de contacto; que rellenan diversas estructuras como stockworks, mantos, vetas, entre otros. Los fluidos participantes en estos procesos se denominan soluciones hidrotermales que provienen de minerales precipitados a partir de alteración; estas soluciones tienen la capacidad de transportar una amplia variedad de materiales y depositarlos en otras rocas; estas soluciones también pueden provenir de:

- 1.- Aguas meteóricas: incluye aguas superficiales y subterráneas.
- 2.- Aguas de formación: aguas que quedan atrapadas en los espacios intersticiales de secuencias de rocas y aguas meteóricas de penetración profunda.
- 3.- Aguas metamórficas: aguas liberadas por cambios mineralógicos de minerales hidratados a minerales anhidros.
- 4.- Aguas magmáticas: aguas primarias derivadas de procesos ígneos que dan origen a rocas intrusivas y volcánicas.

La alteración hidrotermal es en general de carácter débil, siendo indistinguible hacia el metamorfismo; en algunos casos se puede observar alteraciones de diversos tipos como argilización, silicificación, albitización entre otros que dependerá de la roca huésped de las cuales se consideran una guía de mineralización para fierro; ya que todos los metales base y muchos otros son extraídos de un magma hacia una fase acuosa, esto siempre y cuando exista la suficiente agua para ser liberada y formar dichas alteraciones.



Esquema del sistema hidrotermal tomado de <http://www.science.smith.edu/departments/Geology>

Con el estudio de la geología histórica y con el entendido de los eventos geológicos propicios a la mineralización, como el metasomatismo de contacto e hidrotermalismo, por mencionar algunos; primero se localiza este tipo de evento, del cual se realiza una visita geológica virtual, es decir, se investiga la magnitud del evento geológico ubicando la zona con mapas de trabajos realizados.

- Imágenes satelitales
- Mapas geológicos
- Mapas geofísicos
- Mapas metalogenéticos.

Con la recopilación de esta información se genera un lote minero y/o concesión minera.

Concesión minera, se refiere al poder legal que faculta alguna personas físicas para realizar la exploración, explotación y aprovechamiento de las sustancias minerales contenidas dentro de un lote minero.

Lote minero, es un sólido de profundidad indefinida, limitado por planos verticales y cuya cara superior es la superficie del terreno, sobre el cual se determina por su perímetro

El lote minero y/o concesión minera debe abarcar todo el evento geológico del cual se obtendrán estudios geofísicos que optimicen las exploración, lo que se conoce como etapa II de exploración o magnetometria y electromagnética aérea, que como mencionamos no se hablara de detalle de este método de exploración. Es muy importante el papel del geólogo en esta etapa ya que no es factible realizar un estudio geofísico aéreo sabiendo que no existirá mineralización así que los tipos de yacimientos que se presentan pueden ser hidrotermales de tipo epitermal, en forma de vetas con mineralización de sulfuros polimetálicos y/o los yacimientos de metasomatismo de contacto tipo skarn en forma de mantos, chimeneas, cuerpos de reemplazamiento irregulares y relleno de cavidades cársticas asociados a troncos graníticos terciarios; donde existen ciertas evidencias de mineralización que incluyen intensa alteración hidrotermal y/o de otro tipo.

3.1 Etapa I (Selección de áreas)

INSUMOS

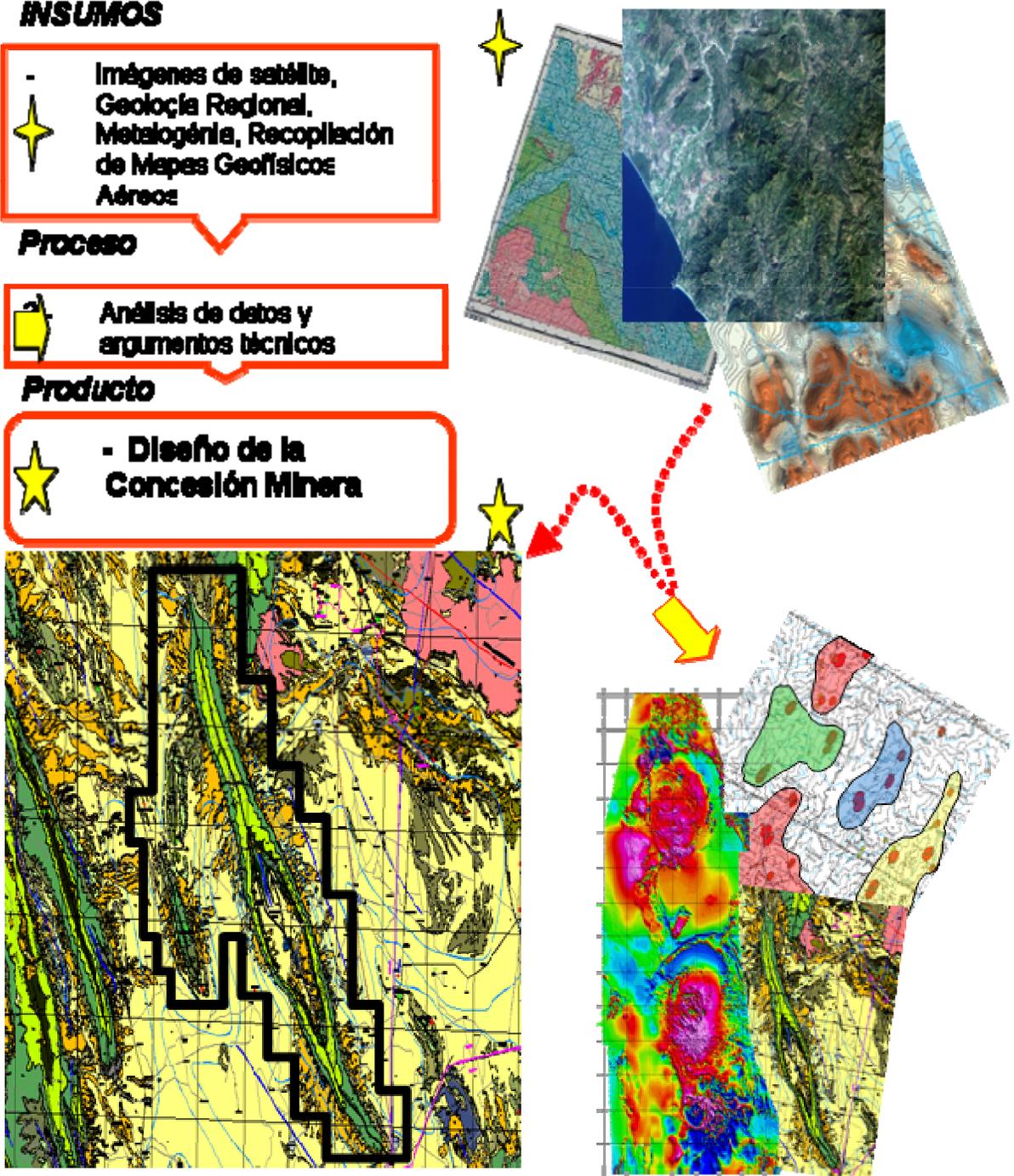
- Imágenes de satélite,
Geología Regional,
Metalogénia, Recopilación
de Mapas Geofísicos
Aéreos

Proceso

- Análisis de datos y
argumentos técnicos

Producto

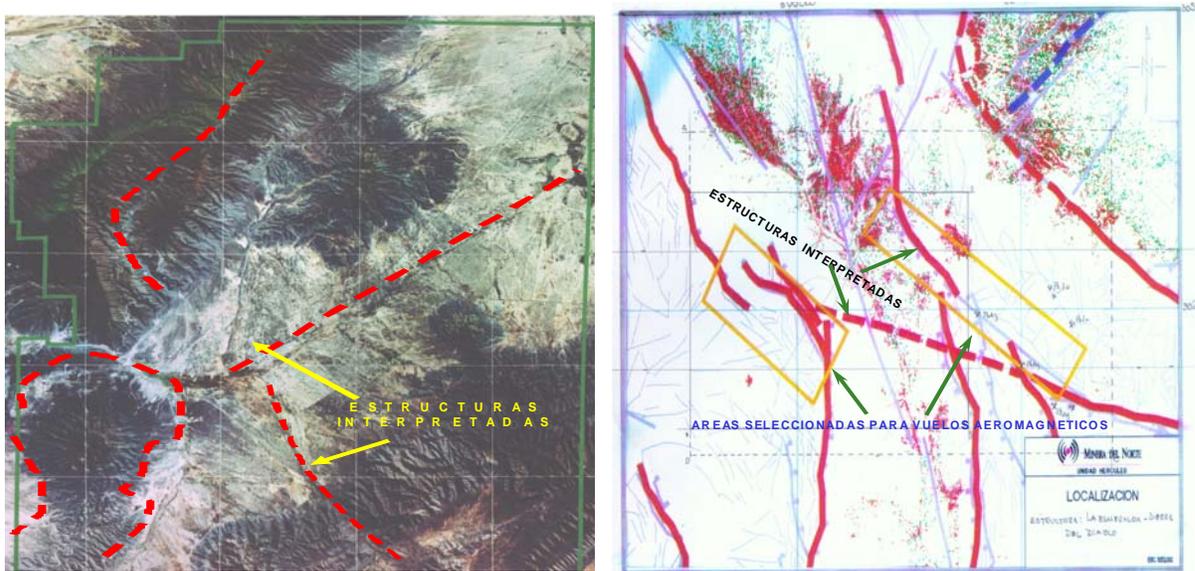
- Diseño de la
Concesión Minera



3.1 Etapa I (Selección de áreas)

Imágenes satelitales

La imagen satelital ayuda a diferenciar la litología y estructuras de forma superficial, dando así una visión general del marco geológico. Con imágenes satelitales de Landsat TM e ikonos de un área en específico, georeferenciadas con el elipsoide WGS84 a escalas de 1: 50,000 y 1: 250,000; se procesan con ER Mapper, software especializado en imágenes satelitales, del cual se obtienen firmas espectrales de los materiales de forma superficial y realiza composito de bandas, es decir, un traslape de bandas que ayudan a la interpretación y visualización de las imágenes, como por ejemplo:



Mapa de la izquierda: Imagen satelital interpretada, delimitando estructuras geológicas y debilidad estructurales, el mapa de la derecha muestra el resultado de un composito donde se visualizan las zonas de oxidación y otras estructuras.

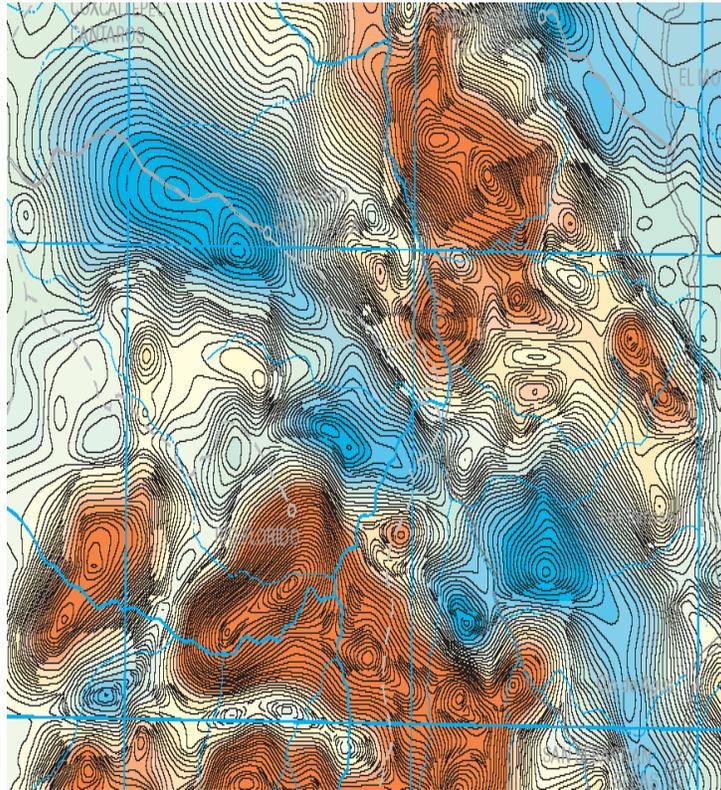
Utilizando las bandas 7-4-1 (IR reflejado - IR térmico - Visible); la banda 7 es de absorción causada por iones de hidroxilos en minerales, la banda 4 es adecuada para el mapeo de líneas de ribera y la banda 1 es adecuada para distinción de suelos y penetración de agua; aunque se utilizan otros compósitos dependiendo de lo que se requiera percibir.

La finalidad de interpretar estos mapas es la de ubicar estructuras, zonas de oxidación, y alteraciones, entre otros efectos superficiales; los cuales pueden enmascarar una respuesta magnética e incluso una respuesta conductora, por ejemplo, geológicamente se conoce una zona de arcillas húmedas, que magnéticamente no marcara un alto contraste de intensidad, sin embargo presenta un cuerpo conductor; esto es fácil de confundir debido a que es similar al comportamiento de la hematita, pero gracias a la interpretación de las imágenes satelitales se analiza si se trata de este tipo de mineral o de un efecto superficial de ciertos materiales tales como la alteración.

3.1 Etapa I (Selección de áreas)

Mapas aeromagnéticos (Vuelos barométricos)

La aeromagnétometría de gran altitud, hablando de 300m de altura (vuelo barométrico), permite interpretar estructuras profundas que indican cuerpos intrusivos de dimensiones batolíticas, los cuales son generadores secundarios de cantidades considerables de fluidos mineralizantes; donde cabe mencionar que los yacimientos minerales superficiales están desapareciendo, por lo que es esencial utilizar estos métodos de exploración indirecta. Estos mapas se pueden disponer con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), Petróleos Mexicanos (PEMEX), Dirección General de Minas, Instituto de Geología, Instituto de Geofísica, etc.



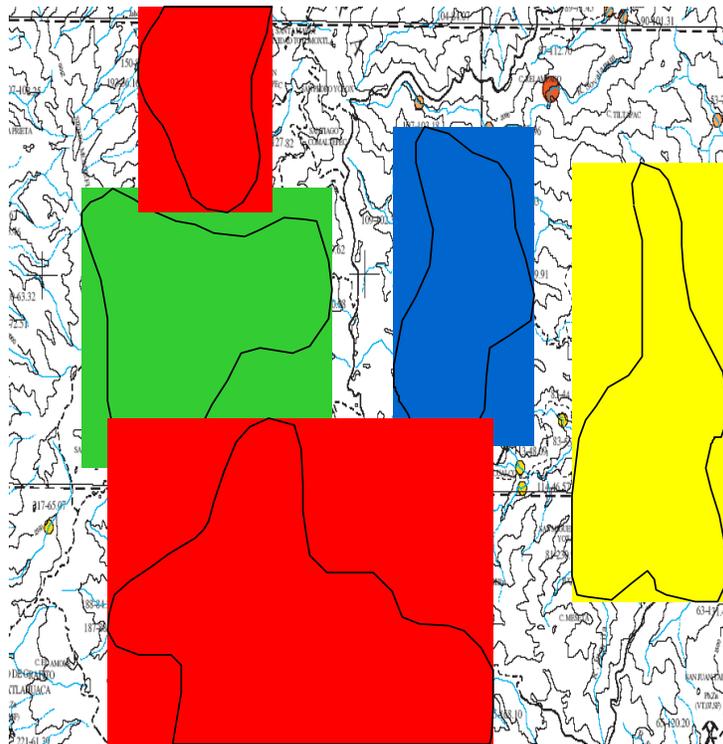
Ejemplo de mapa aeromagnético con una altura de 300 m donde las estructuras magnéticas se representan de forma general careciendo de detalle

Con la interpretación cualitativa del mapa barométrico se logra registrar efectos magnéticos regionales que corresponden a grandes estructuras, tales como manifestaciones magnéticas más evidentes como la distribución y configuración de las rocas, contactos litológicos ocultos y zonas de falla profundas.

3.1 Etapa I (Selección de áreas)

Mapas metalogénicos

La metalogénia es la ciencia que estudia los yacimientos minerales, basada en su origen evolución y relación con la geología, obteniendo de ello un mapa metalogénico que muestra las concentraciones minerales o trampas mineralógicas en base al ambiente de formación. Con el análisis de estos mapas, se extraen rasgos característicos asociados a eventos mineralizantes, agrupando e interpretando datos para delimitar la distribución y concentración de los minerales, siendo de utilidad para la definición de guías de mineralización.



El mapa muestra zonas potenciales es decir, la manifestación, distribución y concentración de minerales dentro de regiones haciendo una distinción en la paragénesis química de los minerales.

Con el análisis y la deducción de cada uno de los mapas que se utilizan en la etapa I se logra el reconocimiento del evento geológico, es decir, se conoce las estructuras magnéticas y conductoras a profundidad, el comportamiento de la debilidad estructural, el tipo de alteraciones asociadas así como la concentración y distribución del mineral. Si la zona resulta exitosa, se genera un lote minero que abarque toda el área de interés, como producto de la etapa I, donde se encamina el lote minero hacia la etapa II de exploración

3.2 Etapa II (Magnetometría aérea)

Aquí el insumo es la concesión minera generada en la etapa I, en consecuencia, se programa un estudio geofísico el cual involucre una propiedad física contrastante del objetivo deseado; en éste caso la magnetometría aérea de contorno y como método alternativo la electromagnética en su modalidad DIGHEM II, con este método se reducirá la ambigüedad propia de la interpretación.

La magnetometría área de contorno consiste en realizar el levantamiento a cierta altura no mayor de 50m; considerando esta distancia de la superficie de la Tierra al pájaro. El pájaro es el embalaje que desciende de la cabina del helicóptero a la altura deseada; donde viaja el magnetómetro y las bobinas electromagnéticas, cabe mencionar que el radar altímetro, el sensor barométrico de presión y temperatura, el estante que contiene el equipo de geofísica y el GPS (global positioning system) se encuentran en la cola del helicóptero, esto para operar el equipo desde la cabina y evitar ruidos en la señal.

Este levantamiento requiere de importantes consideraciones que favorecerán su respuesta, para lograr este objetivo se necesita de un gran control de sus parámetros y en los siguientes puntos:

- Primeramente es necesario conocer el funcionamiento del equipo así como sus características operacionales.
- Tomar en cuenta las consideraciones para la planeación del vuelo; logística, costos, área por cubrir, kilometraje lineal aproximado, relieve topográfico, dirección de líneas de vuelo, altura de vuelo, espaciamiento entre líneas, operación diaria, etc.
- Tener un control de calidad en la adquisición de datos, realizar una valoración preliminar del equipo y del campo magnético, así mismo la calibración del equipo, realizar un monitoreo continuo del campo magnético, entre otros.
- Contar con los requerimientos necesarios para el procesamiento; es decir poseer software especializado para procesar la cantidad de datos que se obtiene y aplicar las correcciones necesarias, obtener los datos de la estación base magnética con el menor ruido, entre otros.
- Retomar los argumentos de la etapa I para obtener una excelente interpretación junto con los mapas que resultan del procesado.

Este control riguroso es con el propósito técnico de registrar efectos magnéticos de estructuras locales y acentuar los efectos superficiales que no se lograron registrar durante el levantamiento barométrico, con ello se elabora una selección y jerarquización de anomalías magnéticas y conductoras de mayor interés que presenten un medio geológico para la formación de fierro; lo cual es el producto final de esta etapa; para posteriormente hacer un reconocimiento técnico de las anomalías, que forma parte de la etapa III.

3.2 Etapa II (Magnetometría aérea)

INSUMOS

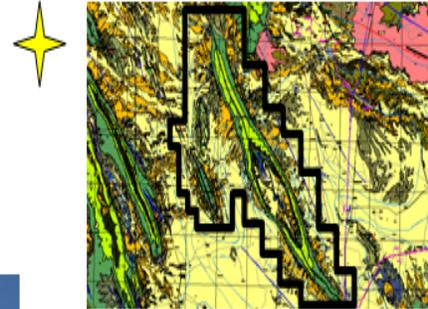
- ★ - Área seleccionada para volar

Proceso

- 1.- Aeronave (Avioneta y/ helicóptero)
- 2.- Toma de datos
- 3.- Procesado de los datos (Oasis Montaj)
- 4.- Mapas aeromagnéticos para trabajos a Semidetalle (Verificación de anomalías)

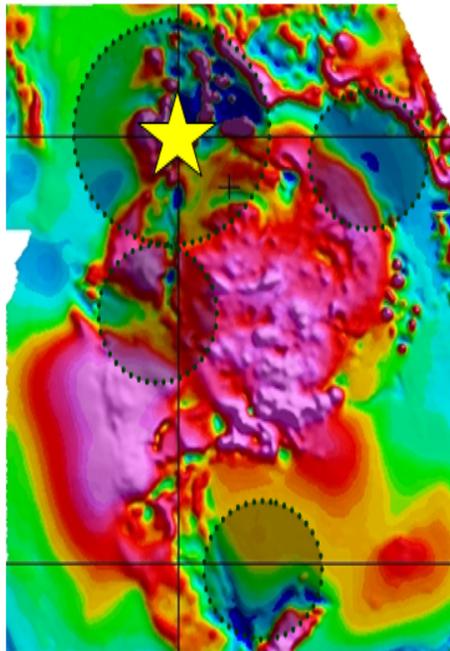
Producto

- ★ - Selección y Jerarquización de anomalías AeroMagnéticas



- HELICOPTERO CON:
- CONTROL GPS DE NAVEGACION
 - CAMARA DE CABLE
 - EQUIPO GEOFISICO (RACK)
 - MAGNETOMETRO CON SENSOR DE VAPOR DE CESIO

- DATOS DEL VUELO
- COORDENADAS X,Y,Z (GPS)
 - CAMPO MAGNETICO TOTAL
 - RADAR ALTIMETRO
 - VIDEO CINTA
 - TRAYECTORIA DE VUELO



3.2.1 Equipo utilizado

Aeronave



Magnetómetros

Se utilizan tres magnetómetros Scintrex CS2 durante el levantamiento, uno trabaja tomado lecturas en dirección de las líneas de vuelo y dos se utilizan para la estación base magnética; estos magnetómetros se basan en el principio de bombeo óptico:

Este método está basado en el efecto de Zeeman (es la interacción de los átomos que emiten luz, con el campo magnético y el momento dipolar que genera el movimiento del electrón). Empleando el vapor de cesio del cual reduce la absorción de luz por la influencia del campo magnético; donde el nivel energético queda en dos subniveles con diferente energía; la frecuencia de absorción al paso de un electrón de un nivel a otro puede ser calculada. Si simultáneamente con el campo magnético constante se crea otra variable perpendicular a él, entonces se puede excitar la resonancia nuclear al paso de un electrón de un nivel a otro, utilizando metales alcalinos como el cesio; en tal caso se produce una acumulación de átomos de energía superior; obteniendo con ello el momento magnético de los electrones que depende de la frecuencia de la corriente variable, donde existe la posibilidad de utilizar esta frecuencia para la medición de la intensidad del campo magnético.

Magnetómetro Aéreo

Modelo: Scintrex CS-2
Sensor: Bomba óptica de vapor de Cesio
Rango de medición: 15,000nT a 100,000nT
Sensibilidad: 0.01nT
Tolerancia del gradiente: 40, 000nT
Temperatura de funcionamiento: -40C a +50C
Voltaje de fuente: 27-35 Volts DC



Magnetómetro Estación base

Modelo: Scintrex CS-2
Sensor: bomba óptica de vapor de cesio
Precisión: $\pm 0.1\text{nT}$
Sensibilidad: 0.01nT
Rango de medición: $15,000\text{nT}$ a $100,000\text{nT}$
Voltaje de fuente: 27-35 Volts DC
Temperatura de funcionamiento: -40C a $+50\text{C}$



- Sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés)

Durante el levantamiento se utilizan 3 GPS:

- Un receptor aerotransportado para la recuperación de la trayectoria de vuelo modelo NOVATEL OEM4;
- Uno como estación base primaria para la corrección diferenciada posterior a las pruebas, NOVATEL MILLENNIUM
- Como estación base secundaria del GPS, un MARCONI ALLSTAR OEM.

El GPS Diferencial introduce mayor exactitud en el sistema. Este tipo de receptor, recibe y procesa información de los satélites y simultáneamente de una estación GPS terrestre. Esta información complementaria permite corregir las inexactitudes que se puedan introducir en las señales que el receptor recibe de los satélites. En este caso, la estación terrestre transmite al receptor GPS los ajustes que son necesarios realizar en todo momento.

El NOVATEL OEM4 esta enfocado al sistema de navegación global satelital, GLONAS, por sus siglas en ingles. El sistema GLONAS tiene 24 satélites distribuidos en sus respectivas órbitas de tal forma que siempre existen 4 - 5 de ellos a la vista de los receptores, cubriendo el 97% de toda la superficie terrestre. El NAVSTAR un sistema americano basada en estos satélites, junto con GLONAS, calculan la posición y proporcionar la dirección en tiempo real al helicóptero. Los datos crudos xyz del helicóptero y de la estación base son registrador, permitiendo así las correcciones diferenciadas posterior a una prueba llegando a una aproximación de 2m.

La estación base tiene su propio latitud y longitud. El GPS registra datos del elipsoide WGS84, posteriormente se pueden convertir estos datos a NAD27

GPS Aéreo

Modelo: Novatel OEM
Tipo: código y portador; frecuencia dual con 24 canales
Antena: montada en la cola del pájaro
Precisión: mas de un metro en modo diferencial
Muestreo: actualización cada 10 Hz.



Estaciones GPS

Modelo: Marconi Allstar,
Tipo: código y portador con 12 canales,
Sensibilidad 1.0 dato por segundo
Precisión: Por la corrección diferencial es de 2m.



Modelo: Novatel Millenium
Tipo: código y portador; frecuencia dual con 24 canales
Muestreo: actualización cada 10 Hz.
Precisión: mas de un metro en modo diferencial.



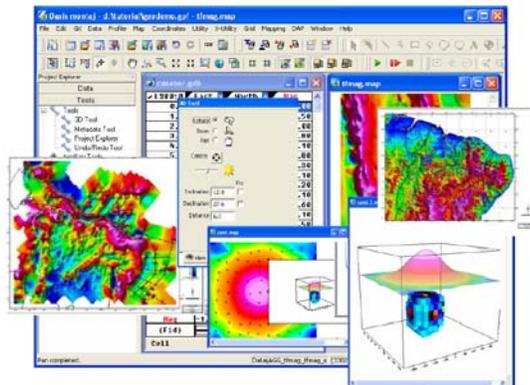
Software especializado

Oasis Montaj de Geosoft es un software especializado de gran alcance para la exploración minera, exploración de aceite y de gas, con módulos que están disponibles para la geofísica avanzada; sus características dominantes sirven para el procesado de magnetometría aérea y terrestre, las cuales son:

- Base de datos de alto rendimiento, hasta dos mil millones puntos de referencias por el canal, con su acceso en hoja de cálculo y su perfil.
- Proceso de Datos; se puede aplicar varios filtros aplicados a geofísica que puede ser tratado por puntos y hasta comparación de mapa.
- Proyección en marcha; El motor avanzado de la proyección de Geosoft proporciona la proyección en marcha. puede dirigir sobre 2.000 datos y proyecciones.
- Dynamic Linking; se trabaja ágilmente con vistas múltiples de las imágenes, los mapas, los perfiles, los datos y los meta datos, y los procesos de la creación del mapa e incluso para corregir.
- Mallas avanzadas; Maximiza su eficacia con los algoritmos rápidos, para los datos geofísicos de gran capacidad, interpola las rejillas de los datos usando varios métodos: curvatura mínima, bidireccional, kriging, entre otros. Realza y manipula las rejillas usando una variedad de ellas que procesa las herramientas y las utilidades avanzadas.
- Producción de mapas profesionales; plantillas modificadas para requisitos particulares del mapa, define los títulos, el texto, las insignias y las barras de color, e incluya los gráficos o las imágenes del fondo en cada visión. crea rápidamente los tipos múltiples y variados de mapas, incluyendo mapas cuadrículados, mapas superficiales, mapas fijados del valor, y mapas de la secundario-localización.

Visualización 3D ;visualiza los datos en 3D, envuelva una grid coloreada o un archivo de imagen sobre una superficie topográfica o sobre una malla de un modelo digital de elevaciones, cada uno con su propio relieve y contenido, y cada uno con su orientación en el espacio; despliega cualquiera mapa de geosoft, el cual debe contener un numero de imágenes, símbolos y características de interpretación, sobre una grid topográfica

despliega los voxels tridimensional; genera un formato voxel de geosoft desde cualquier conjunto de datos, incluyendo datos de perforación.



Ventana de trabajo de Oasis Montaj de Geosoft.

3.2.2 Programación del levantamiento geofísico aéreo.

La planeación de la magnetometría aérea depende directamente de la geometría propia de la concesión minera, ya que en el aspecto económico y técnico de la planeación deben considerarse los siguientes puntos:

- Área por cubrir
- Kilometraje lineal aproximado
- Relieve topográfico
- Dirección de las líneas de vuelo
- Espaciamiento de las líneas
- Altura de vuelo
- Velocidad media de operación
- Tipo de levantamiento geofísico

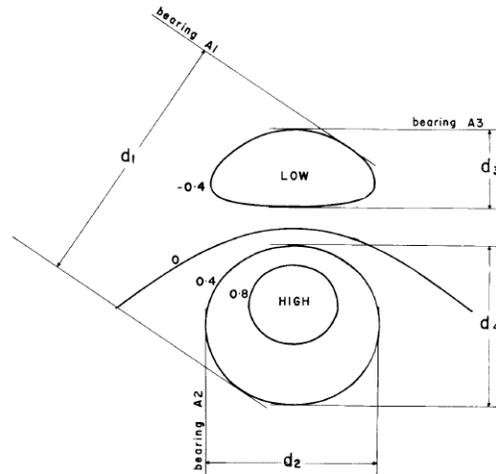
Estos puntos son la base para realizar el estudio, y crear un plan de trabajo, que presente una ruta crítica, la cual indique la operación diaria, el análisis de costos tales como:

Rendimientos: Producción diaria en kilómetros, producción por horas en kilómetros, traslados, número de vuelos, días de operación, días perdidos.

Análisis de costos: combustible, lubricantes y mantenimiento para vehículos aéreos y terrestres, gastos de la brigada de exploración.

Teniendo todos los parámetros listos, se realiza un vuelo preliminar con el propósito de reconocer el área para detectar zonas que eviten llevar la altura necesaria, esto es cables de alta tensión, vegetación, topografía muy accidentada, entre otros. Es muy importante seleccionar el lugar donde se instalaran las estaciones base magnética (Debe ser una zona con una variación del campo magnético mínima, lejos de ruidos culturales), y la estación base GPS (esta en una zona donde se puedan detectar la mayor parte de los satélites) alejada de cualquier tipo de perturbación.

Para la dirección de las líneas de vuelo se ha tomado como regla general, volar transversalmente al rumbo de las estructuras regionales; sin embargo, existen otros métodos para obtener la dirección óptima del vuelo, según FEM Lilley 1968, a partir de la proyección perpendicular de un dipolo normal con cierta inclinación, obteniendo su máxima amplitud, se toma el rumbo de esta proyección con ángulos medido en radianes para evitar confusión con los inclinación propia del dipolo; por citar un ejemplo, si se tiene la máxima amplitud al rumbo NW-SE, su dirección favorable es NW 45° SE a cualquier inclinación que presente el dipolo magnético.



Amplitud en tres direcciones, con una misma inclinación, esquema obtenido del artículo Optimum direction of Surrey line del Geophysics Vol. 33 No. 2 (Abril 1968)

Espaciamiento entre líneas

En la planeación del espaciamiento debe asegurarse que se tomaran lecturas atravesando los cuerpos que se analizaron en la etapa I, sin omitir pequeñas respuestas magnéticas, para esto es necesario conocer las dimensiones y la geometría aproximada de las estructuras geológicas de la concesión minera; por lo que es importante que el diseño de la concesión minera abarque todo el evento geológico, de la misma forma es necesario considerar un espaciamiento adecuado para una buena interpolación de los contornos magnéticos entre las líneas.

Altura del vuelo

La selección de la altura de vuelo esta relacionada con el espaciamiento de líneas, debido a la interpolación que se genera. Una altura baja brinda mas detalle y una altura alta generaliza la respuesta, según con las ecuaciones del potencial magnético, se deduce que la amplitud de un pequeño cuerpo o dipolo decae de acuerdo a la inversa del cubo de la distancia y que un cuerpo de dimensiones grandes seguirá la regla de la inversa del cuadrado. La altura del vuelo depende entonces del objetivo buscado, es decir la resolución necesaria para lo que se desea ver, es decir a que profundidad es posible localizar el evento, en este caso como se requiere de la búsqueda de mineral de fierro que no profundice a mas de 200m, es factible utilizar un altura de vuelo a 50m, para obtener mas detalle de la respuesta del campo magnético total.

3.2.3 Adquisición de datos aeromagnéticos

Antes del despegue se fija la estación base magnética y la estación base GPS, donde ambas bases toma dato cada minuto y se sincronizan los tiempos GPS de la estación base y de la aeronave. Después del despegue y antes de iniciar con el estudio; el geofísico y el piloto deben confirmar el buen funcionamiento de sus propios equipos, sobre todo el geofísico monitorear el comportamiento del campo magnético en tiempo real.

Iniciando la toma de datos, la función del geofísico consiste en cuidar y controlar la calidad de los datos, llevando un control conjunto con una bitácora, es decir anotando la información correspondiente al vuelo (hora, fecha, número de línea, etc.), así como cualquier irregularidad que se presente (topografía muy accidentada donde se realizan movimientos obligatorios con el helicóptero para mantener la altura concertada, mucho viento, vegetación muy alta, cables de alta tensión, torres de alta tensión, viento excesivo, etc.), esto es independiente al video del vuelo que se realiza durante el levantamiento. La función principal del piloto es de mantener el helicóptero sobre la dirección de la línea, llevar la altura concertada, así como mantener una velocidad constante durante el levantamiento. Cabe mencionar que a parte de tomar datos en dirección de las líneas; se toman datos en dirección perpendicular a las líneas con una mayor distancia entre ellas, las que se llaman líneas de amarre; estas tienen la finalidad de realizar ajustes y correcciones en las trayectorias de vuelo.

En la toma de datos es importante comprender el significado de las fiduciales, Las fiduciales son registros de coordenadas tomadas a cada minuto, mientras que el magnetómetro va tomando 10 lecturas por minuto, las lecturas son interpoladas posteriormente a cada fiducial, por lo que, la cantidad de datos en ciertos metros dependerá directamente de la velocidad de la aeronave. Entretanto el levantamiento se va visualizando los datos del campo magnético de forma digital, transferida al punto de trabajo del campo y se puede hacer un chequeo rápido de calidad de los datos.

Es necesario realizar el levantamiento de líneas completas, es decir, no tomar datos a mitad de línea y al día siguiente continuar, lo que se llama coloquialmente como “pick-up” para evitar uniones entre líneas, con la finalidad de tener un interpolado óptimo; en el caso de condiciones atmosféricas o de otro carácter que impidan la toma de datos, y afecten el levantamiento, se tiene que levantar la línea de tal forma que exista un traslape para evitar uniones que pueden afectar la interpolación. Esta parte del levantamiento es un control que lleva un papel importante, ya que puede haber cambios en la respuesta y no debidos a causas geológicas.

Esta rutina tiene que llevarse diaria y estrictamente hasta cubrir toda el área de la concesión minera establecida inicialmente. De la misma forma visualizar los datos diarios por perfiles antes de interpolar los datos con las demás líneas de vuelo, para realizar una correlación lateral. Terminada la fase de toma de datos y previo al procesamiento de datos se crea una base de datos generada en Oasis Montaj, donde el geofísico puede desplegar y verificar los datos posicionales, es decir, la trayectoria del vuelo y datos geofísicos, ya sea en el software especializado o en planos impresos; estos datos son examinados con precaución.

3.2.4 Procesado de datos

Los datos crudos obtenidos en el levantamiento incluye un conjunto de respuesta magnéticas, es decir, estos datos son el campo magnético total de la Tierra, que incluye algunas aportaciones ajenas a las fuentes magnéticas que se buscan, tales como ruidos culturales, ruidos locales, el campo regional, entre otros. Debido a esto es necesario procesar los datos crudos, esto es aplicando correcciones, para tener una respuesta mas aproximada a lo que se necesita descubrir.

En campo el proceso de los datos consiste en la corrección diferenciada a los datos del GPS de la aeronave, corrección de deriva a los datos aerotransportados del campo magnético, verificación de los vídeos del vuelo, corrección diurna, nivelación preliminar de datos magnéticos, corrección por lag o línea en desajuste, enlace entre líneas de vuelo – líneas de amarre y corrección por IGRF.

- Corrección por variación diurna

Los elementos del campo magnético están sometidos a cambios temporales sobre escalas de tiempo, variando de milisegundos a millones de años. Las variaciones de periodo corto (anuales o menores) son causadas en primer lugar por fuentes externas, como corrientes eléctricas en la ionosfera. Estos cambios temporales se manifiestan de diferentes formas, desde aquellos con comportamiento periódico, como los que varían diariamente o llamada variación diurna, hasta tormentas magnéticas.

Para esta corrección es importante que funcionen paralelamente dos magnetómetros con el fin de mantener registrado el campo magnético durante el desarrollo del levantamiento. Esta corrección consiste básicamente en eliminar la variación originada en la ionosfera que influye sobre los datos que se adquieren. Un magnetómetro fijo, permitirá conocer la variación del campo durante el tiempo de adquisición de información. Adicionalmente este instrumento se encargará de registrar cualquier cambio repentino que pueda influir negativamente sobre la información tal como una tormenta eléctrica.

Una forma de realizar este tipo de corrección, es calculando la diferencia entre los valores de la estación base y la regresión lineal de la estación base magnética con el método de mínimos cuadrados, esto es posible ya que la variación del campo magnético decae linealmente.

- Enlace de líneas de vuelo y líneas de amarre.

En el levantamiento aéreo se realizan líneas de vuelo y líneas de amarre, las líneas de vuelo llevan una dirección perpendicular a la estructura a estudiar con una separación entre ellas menor de 200 metros, las líneas de amarre llevan una dirección perpendicular a las líneas de vuelo con una separación entre ellas aproximadamente de 5 kilómetros.

Este tipo de corrección enlaza las líneas de vuelo con las líneas de amarre, con la finalidad de ajustar los datos y llevar todas las líneas a un mismo nivel, una vez realizada esta corrección se puede aplicar la corrección por IGRF y a partir de ello se puede generar diferentes mapas magnéticos que nos den mayor respuesta y soluciones de zonas específicas

- Corrección por lag o línea en desajuste.

Cualquier sistema geofísico lleva un rastro en el tiempo, en este caso el levantamiento de datos tiene un retraso, debido a que la antena GPS va sobre la cola del helicóptero y el pájaro (embalaje de equipo de geofísica) lleva un retraso al sitio del GPS debido al viento y la velocidad propia del helicóptero, éste retraso posicional contribuyen a un retraso de tiempo. La posición final de los datos después de la corrección del retraso refleja la posición del receptor. Las pruebas magnéticas del retraso para el sistema necesitarán ser realizados antes de comenzar con la toma de lecturas. Las pruebas del retraso son realizadas generalmente en una altura de prueba sobre una anomalía con ruido cultural (puente, ferrocarril, etc.) o geología conveniente.

Esta corrección consiste en eliminar este retraso promedio en la primer fiducial y con ello generar una interpolación que ponga en yuxtaposición la antena del GPS con el pájaro.

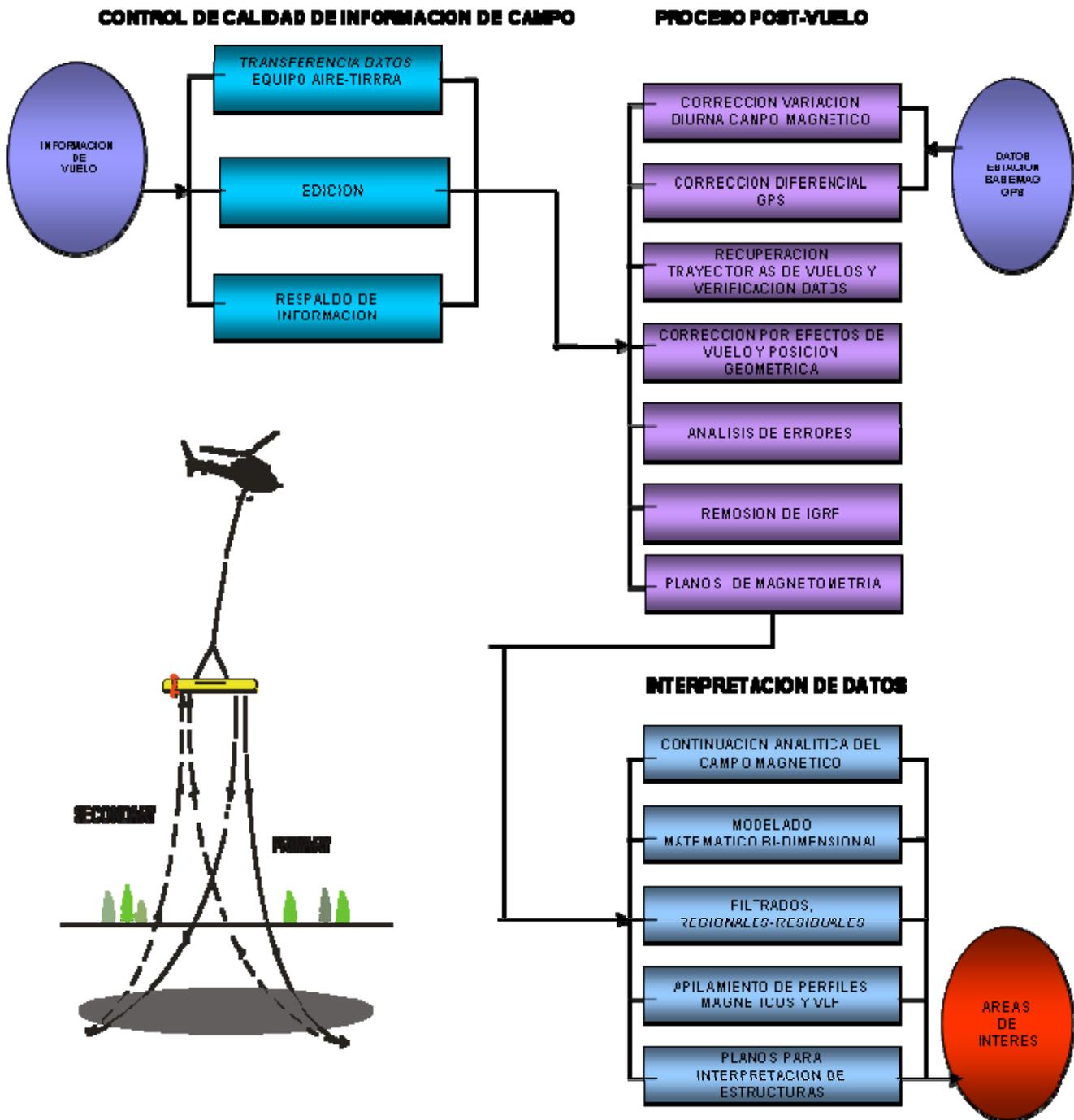
- Corrección por IGRF o corrección por longitud.

El campo geomagnético internacional de referencia (IGRF por sus siglas en inglés), es el campo magnético representado por los coeficientes armónicos de Gauss del orden y grado 10; $\nabla^2 B = 0$; que se determina cada 5 años por un acuerdo internacional a través de la asociación internacional de geomagnetismo y aeronomía (IAGA). El IGRF actúa como el campo magnético producido por el núcleo de la Tierra, con el cual se obtiene el campo magnético producido por las fuentes de la corteza.

Para obtener las componentes del IGRF se obtienen del sitio Web www.iaga.com, en la pagina se capturan las coordenadas en UTM y calcula el campo magnético obteniendo las componentes horizontales y verticales.

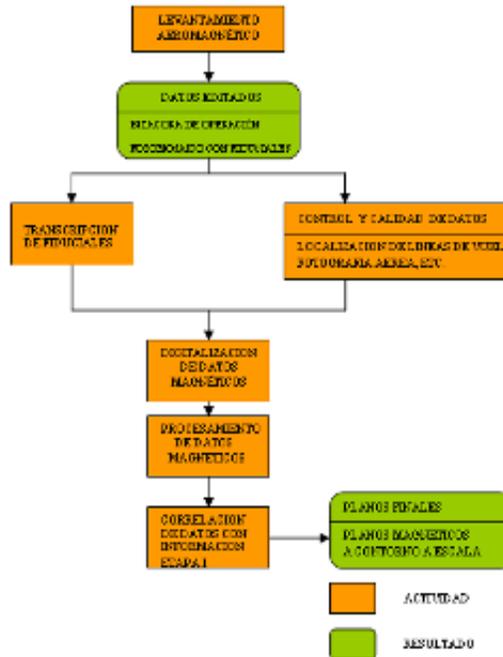
Esta corrección principalmente es la separación matemática del campo geomagnético, con el campo observado, es decir, se remueve el efecto del IGRF, se realiza con el fin de aislar el campo local observado, eliminando el campo magnético principal del planeta (campo bipolar originado en la frontera núcleo-manto) que se ve reflejado como un campo regional en el área de estudio.

3.2 Etapa II (Magnetometría aérea)

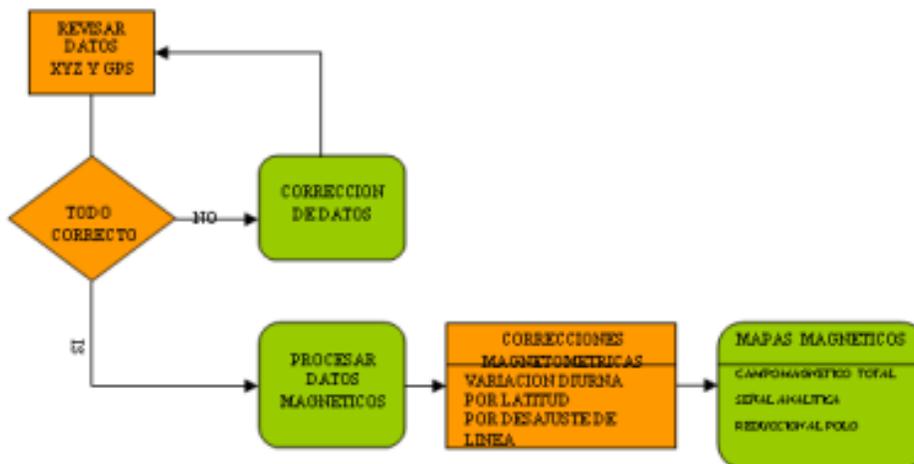


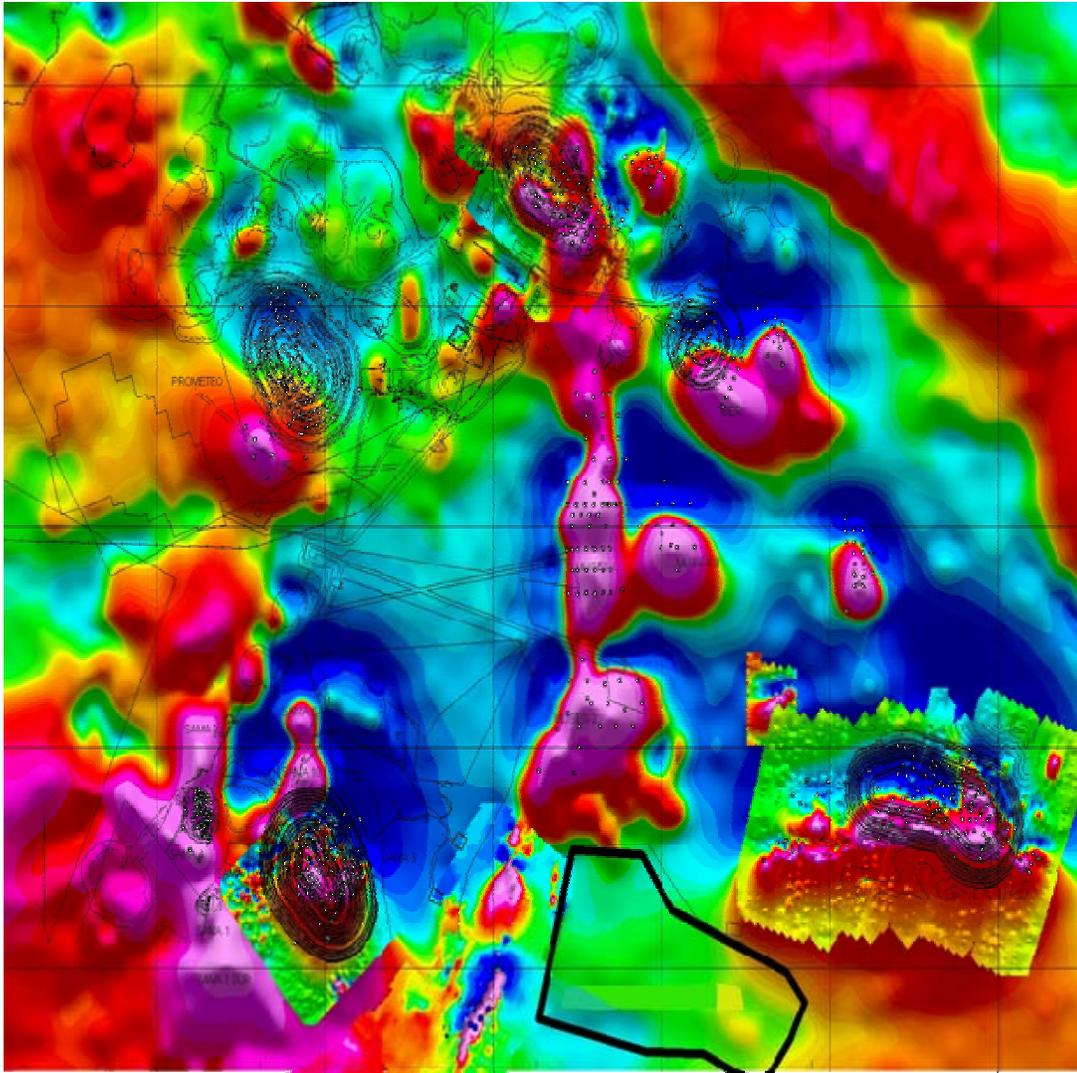
Rutas críticas de la etapa II de exploración

- Compilación analógica digital



- Sistema de recuperación de datos magnéticos





Los mapas geofísicos de detalle y semidetalle son el resultado del proceso de los datos magnéticos que permiten definir indirectamente las características litológicas y estructurales del subsuelo, así como la identificación de áreas para la exploración para la localización de posibles depósitos minerales.

Con esta tipo de levantamiento, en algunos casos es posible la detección directa de depósitos minerales asociados a minerales magnéticos, debido al fuerte contraste de intensidad del campo magnético en cierta zona. En este mapa se visualiza zonas con estas características.

3.2.5 Interpretación lito-magnético-estructural

La interpretación depende directamente de las correcciones que se le aplicaron a los datos crudos, es decir, por existencia de variaciones del campo geomagnético con el tiempo, diferencia de velocidad del vuelo a lo largo de todo el levantamiento, entre otros.

Para interpretar los vuelos de contorno, se parte de una observación regional, generando dominios magnéticos. El dominio magnético se considera una zona de respuesta con manifestaciones magnéticas afines, que por lo general esta ligado a cuerpo litológicos. Definiendo estos dominios se caracterizan de forma particular cada uno de ellos, sus debilidades estructurales, y los parámetros geofísicos de cada firma magnética, o sea, forma, distancia polar, contraste de intensidad, gradiente, buzamiento, profundidad y extensión; es decir, se parte de lo general a lo particular.

El campo magnético total medido proporciona información de características magnéticas de los materiales, esta información se puede utilizar para localizar cuerpos magnéticos del interés para la exploración. Las manifestaciones que pueden diferenciarse de diversas zonas del levantamiento son anomalías magnéticas que señalan presencia de contactos enriquecidos de magnetita, donde las interrupciones de las distorsiones magnéticas definen debilidad estructural, que al correlacionarlas geológicamente se infiere si es debido a una falla o fractura. Estas distorsiones asociadas a debilidades estructurales se definen por un tren de anomalías que presentan cierto lineamiento que geológicamente se asocian a rellenos de fractura, o por alguna alteración de la magnetita, así como también respuesta de diques.

Existen anomalías magnéticas débiles sobre minerales magnéticos y esto es debido a las siguientes causas; que la fuente magnética corresponde a magnetita, localizada a mayor profundidad; que la fuente magnética sea somera con menor concentración de magnetita y/o que la hematita predomine mas que la magnetita (la hematita es un mineral de fierro no magnético).

Las litologías máficas (alto contenido de ferromagnesianos) contienen generalmente más magnetita y son por lo tanto más magnéticas que muchas rocas sedimentarias que tienden a ser débiles magnéticos. El metamorfismo y la alteración pueden aumentar o disminuir la magnetización de una unidad de la roca; por ejemplo los cuerpos intrusivos graníticos aparecen como zonas circulares secundarias, y pueden tener metamorfismo debido del contacto en sus límites manifestando un gran contraste. Las fallas y las zonas de fractura pueden caracterizar zonas de alteración a causa de la propia alteración de la magnetita, que produce un contraste con el ambiente.

Teniendo identificada una firma magnética que presente condiciones propicias a mineralización se puede calcular las toneladas potenciales de las anomalías a partir del volumen (área, longitud y espesor; las cuales son calculadas por parámetros geofísicos con ayuda de la geometría de la señal magnética) y por la densidad del mineral de hierro que es de 3.5 - 5.0 g/cm³ esto con la finalidad de evaluar una posible reserva del área de estudio, sin perder de vista que son reservas potenciales y por ende es una interpretación cualitativa, la cual es muy importante realizar con minuciosidad para dar un resultado contundente.

3.3.3. Etapa III (Verificación de anomalías)

- Reconocimiento técnico

Esta etapa tiene como insumo los mapas magnéticos obtenidos del levantamiento aeromagnéticos con las anomalías seleccionadas; donde el proceso de la etapa consiste principalmente en el trabajo de campo, es decir, levantamiento geofísico a semidetalle, y mapeo geológico, realizando así un análisis de los datos y argumentos técnicos a partir de una correlación geológica-geofísica para conseguir finalmente como producto el diagnóstico técnico de anomalías con interés.

El reconocimiento técnico o la verificación de anomalías; es la visita de lugares estratégicos que presenten mayor posibilidad de mineralización, donde se sabe que estas zonas fueron seleccionadas en la etapa II de exploración.

Conociendo las coordenadas y todos los parámetros físicos de la anomalía, se prepara la brigada terrestre para la el reconocimiento técnico; la brigada de exploración terrestre consta de un geólogo, un geofísico y sus ayudantes. El trabajo de gabinete, es necesario para conocer a toda forma la anomalía en cuanto a su topografía con espectrometría, ubicar la litografía que se mapeo con la magnetometria aérea, conocer los accesos hacia la anomalía, caminos, carreteras, tercerías y preparar el campamento, es decir, disponer del equipo de geofísica terrestre, llevar con el equipo necesario para el campamento así como de toda la información del área.

Llegando a campo, la brigada terrestre se dispone a realizar el mapeo geológico y el levantamiento geofísico a semidetalle que permita percibir el ambiente geológico. Las muestras geológicas recolectadas se llevan al laboratorio para su análisis de químico ya sea de fierro total o de elementos polimetálicos, en el caso de que se encuentre un alto porcentaje de Fierro total en la roca, es decir mayor 25 ppm, se considera la zona de mayor interés para realizar un estudio geológico-geofísico a detalle.

La magnetometría terrestre es distinta al levantamiento aéreo, en varios factores, tanto en el equipo, la adquisición y el procesado, en este apartado veremos que equipo se utiliza para la verificación técnica, así como también que tipo de correcciones se aplican para este tipo de levantamiento y cuales no son necesarias aplicar. La magnetometria terrestre consta principalmente de 2 ó mas perfiles magnéticos que caractericen la zona, atravesando la estructura o evento geológico más importante; esto se lleva a una correlación geológica-geofísica, con ayuda del mapeo, muestreo geológico y el modelado matemático de los perfiles magnéticos.

Entonces como producto final tendremos el diagnóstico de cada anomalía, en caso de ser un diagnóstico efectivo la anomalía pasaría a la etapa IV de exploración que es el estudio a detalle de la zona.

3.3.3 Etapa III (Verificación de anomalías)

INSUMOS



- Planos con las Anomalias aeromagnéticas seleccionadas

PROCESO

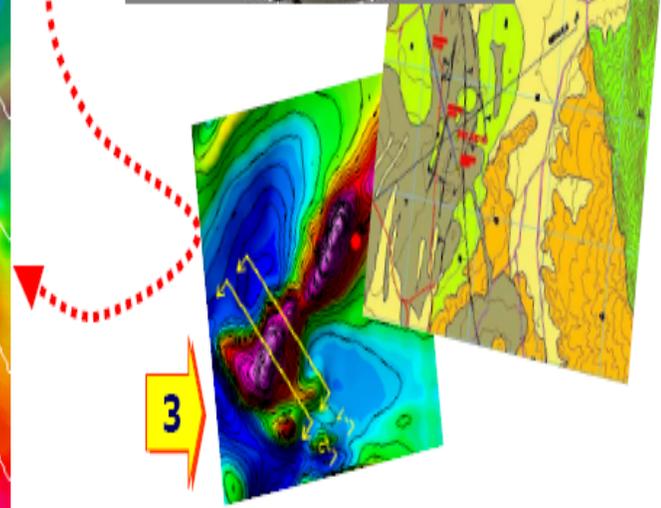
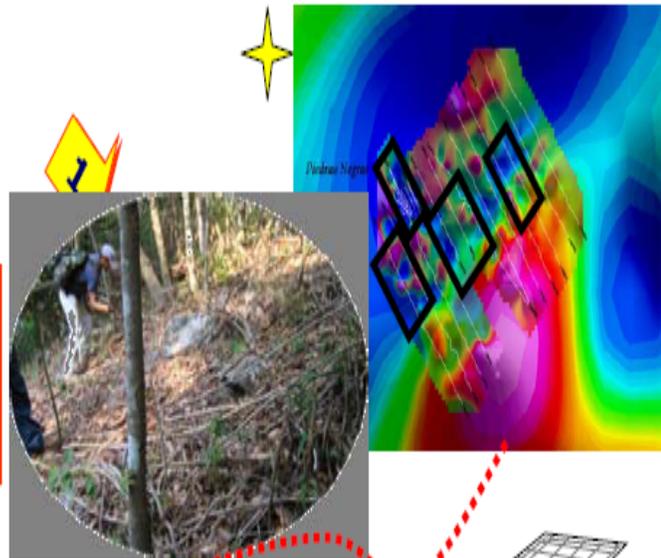
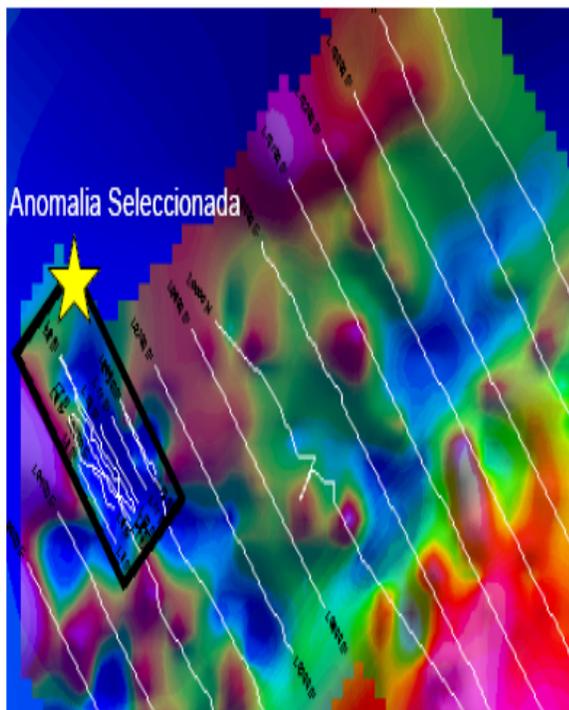


- 1) Trabajos de campo (Levantamiento Geofísico, Muestreo y Mapeo Geológico)
- 2) Analisis de datos y Argumentos Tecnicos
- 3) Correlacion Geologico-Geofisica

PRODUCTO



- Diagnostico tecnico de Zonas con fuentes (anomalias) magneticasa a profundidad.



3.3.1 Programación del Levantamiento

Finalizada la etapa II, es decir obteniendo los mapas aéreos de menor altura junto con su interpretación y la jerarquización de anomalías, se realiza un mapeo geológico como un reconocimiento general del área, a partir de ello se puede generar la programación de levantamiento geológico-geofísico. Entonces la programación del levantamiento depende de los trabajos realizados en gabinete, donde se tiene que tomar en cuenta que al llegar a campo es necesario tener un conocimiento total de la anomalía en varios aspectos:

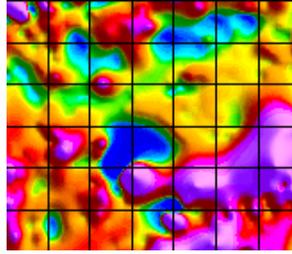
- Respuesta geofísica; seleccionar la anomalía a partir de la correlación geológica geofísica, calcular sus parámetros con exactitud, obtener mayor información a partir del procesado junto con un análisis e interpretación preliminar
- Geología regional; conocer el área a partir de imágenes aéreas que permitan conocer la geomorfología, la litología, ubicando la anomalía.
- Sociedad; conocer rutas y accesos, en que situación económica y social se encuentra el poblado al que se va a visitar, si será necesario acampar o si existe la posibilidad de montar el campamento en algún hotel.

El geólogo y el geofísico de la brigada de exploración terrestre tienen que realizar la programación de la verificación técnica, ya que ellos son los que realizarán el trabajo. El tercer punto no carece de importancia ya que es necesario saber donde se montara el campamento, ya que hay otros puntos a considerar tales como, si existe corriente eléctrica para cargar las pilas de los magnetómetros y de radio localizadores portátiles, la cantidad de víveres que se requieren así como la seguridad de la brigada terrestre, cabe mencionar que es primordial este punto ya que sin el no sería sencillo realizar el mapeo geológico y el levantamiento geofísico.

Tomando en cuenta estos puntos, el geólogo programa su mapeo, su muestreo, y levantamiento de secciones con los parámetros necesarios para obtener información imprescindible para el diagnóstico de la anomalía. El mapeo y el muestreo deben estar estratégicamente ligados con los perfiles magnéticos de manera estratégica para efectuar una excelente correlación de los datos de campo.

El geofísico al programar su levantamiento de perfiles magnéticos terrestres es necesario que tome en cuenta la información de las etapas anteriores para realizar la programación con exactitud.

Se toman los datos del rumbo de la anomalía; es decir se trazar un línea base, la cual se localizará sobre el gradiente magnético, con la línea base se programaran las líneas de producción o perfiles magnéticos, las cuales son perpendiculares a la línea base, pudiendo ser la separación entre ellas mayor de 200 metros, la densidad de muestreo será de mínimo 20 metros; estos parámetros dependerán directamente de la respuesta magnética que presente cada lugar, y de las características de las estructuras geológicas asociadas.



Esquema de línea base y línea de producción, sobre las líneas de producción se realiza el levantamiento magnetométrico terrestre

Teniendo todos los parámetros de la anomalía magnética; es decir, las dimensiones de la anomalía, distancia polar, contraste de intensidad, forma de la firma magnética, las coordenadas del centro de la anomalía, la dirección de la línea base y líneas de producción y sus respectivas coordenadas se programan perfiles magnéticos en la dirección de las líneas de dirección, de las cuales se decidirá de aquellas que muestren o caractericen toda la zona, por lo que será necesario levantar 2 o 3 perfiles para la verificación técnica a realizar.

Contando con todos los parámetros necesarios del geólogo y el geofísico se realiza la logística de campo considerando los días aproximados que se llevara el levantamiento considerar cuantos ayudantes se solicitaran, donde también es elemental considerar tres aspectos fundamentales antes de salir al campo;

- 1.- Realizar un chequeo de todo el equipo que se necesita; que los magnetómetros se encuentren en buen estado y contar con pilas de repuesto, pilas necesarias para el GPS, bolsas para el muestreo, cinta biodegradable para marcar las estaciones bases.
- 2.- Llevar información de la zona que se va a verificar; planos topográficos, planos aeromagnéticos y programa de trabajo
- 3.- Por último tener en cuenta el tiempo que tomara la verificación de la anomalía geofísica (Ruta crítica).

Es importante considerar en la logística de campo que es una verificación técnica, donde el objetivo es diagnosticar la anomalía para la formación de fierro, por lo que no deberá llevarse mucho tiempo realización de los levantamientos, sin embargo existen factores externos que pudiesen atrasar la verificación técnica, tales como clima, topografía muy accidentada así como vegetación muy cerrada, ya que los perfiles magnéticos llevan dimensiones lineales y no se ajustan a al topografía, entre otros.

3.3.2 Equipo utilizado

El magnetómetro de precesión protónica utiliza la precesión de protones alineados o núcleos de átomos de hidrógeno en una muestra de líquido para medir la intensidad magnética total. En una porción de líquido adecuado, tal como 500 cm³ de agua, el espín del protón se alinea paralela o antiparalelamente con el campo terrestre con un pequeño exceso en la dirección del campo. El líquido tiene, por tanto, un pequeño momento magnético en esta dirección. Si el campo aplicado se corta bruscamente, este momento magnético se relajará en pocos segundos en la dirección del campo geomagnético por un movimiento de precesión alrededor de él; la relación existente entre la frecuencia de este movimiento de precesión, f , y la intensidad del campo es:

$$f = \frac{\gamma_p F}{2\pi}$$

Donde γ_p es una constante conocida (el radio giro magnético del protón).

Durante el tiempo de relajación, los protones inducirán una pequeña fuerza electromotriz (FEM) en una bobina que rodea la botella, y esta Fem. tendrá la misma frecuencia que el movimiento de precesión. Por consiguiente, se puede determinar el valor absoluto de la intensidad del campo a partir de la medida exacta de esta frecuencia; para determinar el valor del campo con una precisión de ± 1 nT es preciso medir la frecuencia con un error menor de 1:50000.

Magnetómetro scintrex modelo ENVI

Características Especiales

Resolución: 0.1 nT

Precisión: 0.5 nT

Reloj: día juliano, precisión 5 spm.

Sintonización: Auto o manual, rango 20,000 a 90,000 nT

Tolerancia de Gradiente: 1000 nT/metro

Ciclo de tiempo: 3 seg. a 999 seg.

Lectura: Manual o auto por ciclo de estación base.

Memoria: 5700 campo o 12500 lecturas por estación base.

Display: 6 dígitos de campo/tiempo, 3 dígitos auxiliares de numero de línea.

Salida digital: RS-232, 9600 baud.

Entrada: acepta cualquier dispositivo externo.

Físicas

Consola: (18 x 27 x 9 cm) y (2.7 Kg.)

Sensor: 3.5 x 5 pulgadas (9 x 13 cm) 4 lbs (1.8 Kg.)

Ambiente: Especificaciones dentro de 0 a 40 °C

Se puede operar satisfactoriamente de -20 a 50 °C

Power: 9 cada 1.5 "D" Celdas



Equipo utilizado

Sistema de posicionamiento global (GPS) - GPS12 GARMIN

El sistema de posicionamiento global (GPS) es un sistema de navegación compuesto de una red de 24 satélites colocados en órbita por el departamento de defensa de los Estados Unidos de America. Los 24 satélites se están moviendo en órbita alrededor de la tierra a 7.5 m. Cada satélite hace dos órbitas completas en menos de 24 horas. Estos satélites se mueven a una velocidad de aproximadamente 5 m por hora. Los satélites GPS son accionados por energía solar. Tienen baterías de reserva para mantenerlos funcionando en caso de un eclipse solar o para cuando están en lado de noche. Este equipo, entonces, es un receptor de señales de satélite con un software incorporado que interpreta las señales de telemetría enviadas desde distintos satélites y en base a esos datos calcula nuestra posición. Es necesario por lo menos recibir las señales de tres satélites para que el GPS pueda triangular y calcular con exactitud nuestra posición, ésta será mucho más exacta si estamos a la vista de mayor cantidad de satélites (4, 5 o 6).

El equipo utilizado es el GPS12 de GARMIN, receptor portátil de 12 canales paralelos. Características especiales:

- Alimentación: 1.5 V
- Recepción: 12 satélites simultáneos
- Memoria: 500 wpt. 20 rutas reversibles
- Dimensiones: 50 x 163 x 31 m/m
- Peso: 269 gramos con baterías incluidas



PS 12 Garmin

El equipo que se utiliza para la verificación técnica de las anomalías, es decir, el magnetómetro y el GPS obtienen respuesta similar, por ejemplo, el sistema de GPS en la área tiene precisión de ± 2.5 m mientras que el GPS en la terrestre tiene de precisión ± 5 m, la diferencia con el magnetómetro es en el principio físico para calcular el campo magnético de la Tierra que es la precesión de protones y no el bombeo óptico de vapor de cesio como en el caso de la magnetometría aérea, sin embargo la precisión es la necesaria para el levantamiento terrestre.

3.3.3 Adquisición de datos

La adquisición de datos se efectúa a partir de la programación que se realizó con anterioridad; previo al levantamiento es importante efectuar un chequeo del campo magnético, para ello es necesario mantener el sensor orientado al norte magnético de la Tierra; de acuerdo a la programación del levantamiento, se toman lecturas con el magnetómetro a cada 20 metros, esta densidad del muestreo puede variar según el objetivo de la planeación. Mientras tanto el geólogo comienza un muestreo de forma sistemática, así como el levantamiento de secciones geológicas en la misma distancia y dirección de los perfiles magnéticos, esto para su correlación para el diagnóstico de la anomalía.

Estos datos deben pasar un control de calidad, este control se lleva desde la adquisición de datos, el cual consiste en tomar como dato más certero, la moda de un conjunto de datos que se calcularon en la misma estación, considerando que el operador del equipo no lleve consigo objetos que pueden alterar la respuesta magnética, a lo que coloquialmente se le conoce como ruido, evitar las estaciones de medición aproximadas a objetos que causen ruido, como casas, coches, laminas, cercas de alambrado, etc.; así como también llevar un monitoreo del campo magnético total, en caso de que exista un presencia de alguna excursión magnética.

Un elemento primordial para la buena toma de datos, sobre todo para la correlación geológica-geofísica, es ubicar las lecturas del magnetómetro en dirección de las líneas de producción, para mayor facilidad se lleva un GPS, el cual va referenciado en coordenadas UTM WGS84, con este mismo GPS se va marcando el rumbo de la línea de producción y el punto de lectura, sin embargo también se puede efectuar esta densidad de muestreo con brújula y cinta, en caso de alguna falla con el GPS. Es necesario llevar tubos extensibles de aluminio para llevar una altura constante en el levantamiento, sin embargo, en algunas zonas es difícil realizarlo de esta manera, debido a topografía muy accidentada y vegetación muy cerrada.

La diferencia principal del levantamiento aéreo al terrestre es básicamente la respuesta de ambos levantamientos, es decir; con la magnetometría aérea se obtendrá una respuesta más generalizada de las estructuras a mayor profundidad, mientras que en la magnetometría terrestre la respuesta magnética será similar sin embargo, se enfatizan la respuesta de cuerpos y estructuras poco profundas. Otra diferencia más generalizada, es en la logística de campo, es decir, hablando de parámetros necesarios para el levantamiento, la altura, la posición del sensor en dirección del norte magnético, que esto se realiza por practicidad en el levantamiento aéreo, mientras que en el levantamiento terrestre es fundamentalmente que se oriente el sensor al norte geomagnético, que esto depende directamente del principio físico de ambos magnetómetros.

En el caso de la magnetometría terrestre, el control de calidad de datos depende directamente del operador; en el caso de la aérea se requiere de un buen trabajo de equipo, refiriéndome al buen desarrollo de la logística de campo, es decir, velocidad adecuada para el levantamiento, monitoreo del campo magnético, ubicación ideal para la estación base magnética, entre otros. El levantamiento terrestre necesita un operador para el magnetómetro por lo que es más controlable evitar ruidos que distorsionen la respuesta magnética, pero este levantamiento es exclusivamente para la verificación

técnica aunque en la compañía se realizan otros métodos alternativos para la verificación de la anomalía, sin embargo para ambos levantamientos es necesario el monitoreo del campo geomagnético.

3.3.4 Procesado

Los datos crudos obtenidos en el levantamiento terrestre comprende un conjunto de respuestas magnéticas, es decir, los datos del campo magnético total de la Tierra, que incluye algunas aportaciones ajenas a las fuentes magnéticas que se buscan, como el campo regional, campo residual, ruido, entre otros, sin embargo como el levantamiento terrestre es de baja altura es más sencillo controlar el ruido. En el procesado que se lleva a cabo en gabinete se omiten correcciones tales como IGRF y variación diurna, debido a que el objetivo es encontrar mineral de hierro y este presenta un alto contraste de intensidad, de lo que se sabe que al aplicar estas correcciones no afecta ese contraste de propiedad magnética.

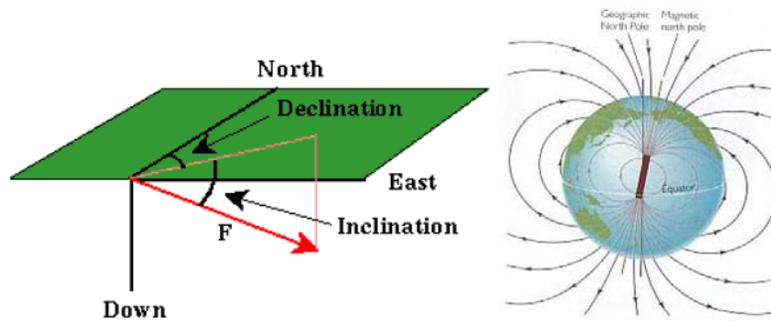
Las muestras de campo que se llevan a laboratorio por lo general se encuentran oxidadas aun así presenta una alta susceptibilidad magnética ya que estas muestras son meramente superficiales y es muy probable que se encuentren alteradas, entonces en el caso de existencia mineral a mayor profundidad se encontrarán menos alteradas por lo tanto tendrán mayor susceptibilidad magnética y por ende un mayor contraste de intensidad en la respuesta de magnetometría aérea, estos contrastes de propiedad se visualizan en los antecedentes la respuesta aérea a 30m e incluso de 300m de altura, con esto quiero decir que algunas anomalías magnéticas posiblemente pueden ser causadas por alteraciones de minerales magnéticos.

Con los datos adquiridos se obtienen mapas y perfiles magnéticos; en los perfiles magnéticos se efectúa una correlación geológica – geofísica junto con la sección geológica que emprendió la brigada terrestre, que es parte de la interpretación, a estos perfiles magnéticos no se les efectúan correcciones por las razones comentadas anteriormente.

Para crear los mapas magnéticos terrestres es necesario levantar varios perfiles y que éstos no se encuentren espaciados a más de 200 m, por la sencilla razón de formar un mapa aproximado a la realidad, ya que si tenemos más espaciamiento entre los perfiles, la interpolación será mucho más larga y la propiedad magnética se distinguirá distorsionada. La finalidad de procesar y corregir los datos es para que brinden mayor información de diversas formas y de un modo certero. A continuación se da una breve y clara explicación de cada uno de estos mapas:

Campo magnético total.

La tierra tiene un campo magnético originado por su estructura interna (campo principal), la influencia de la ionosfera con el viento solar (campo exterior) y el magnetismo de las rocas de la corteza (campo cortical). El 90% del campo magnético de la tierra parece un campo producido por un dipolo, el 10% restante tiene características complejas que hace que el polo norte no corresponda al norte geográfico por 11° de discrepancia.



Componentes vectoriales del campo magnético terrestre y campo geomagnético
<http://204.98.1.2/isu/science/9earth/maganimation.html>

La fuerza magnética F es un vector con dirección paralela a las líneas de fuerzas del campo magnético; en la superficie de la Tierra se miden las componentes horizontales y verticales del vector magnético F , que son la inclinación y declinación respectivamente. Las líneas de fuerzas convergen en el polo norte magnético y divergen en el polo sur, lo que origina que la inclinación del vector magnético sea 90° en los polos y cero grados en el ecuador magnético, debido a esto los valores de inclinación son diferentes en cada latitud.

Continuación analítica de campo.

Un campo potencial medido en una superficie puede prolongarse analíticamente, a partir de las ecuaciones de Dirichlet, es decir calcular el vector en todos los puntos de una superficie cerrada con respecto a un espacio exterior, esta continuación analítica se puede realizar de forma ascendente ó descendente.

La continuación ascendente o hacia arriba se considera un filtro limpio porque no produce casi ningún efecto secundario que pueda requerir el uso de otros filtros, debido a esto, es de uso frecuente para reducir al mínimo el ruido; la continuación de campo hacia arriba es un suavizado que proporciona las anomalías locales sin afectar los efectos regionales, esto es por que el suavizado de la señal esta asociado a fuentes relativamente profundas de extensión regional; es una herramienta útil en análisis de grandes estructuras debido a que indica el seguimiento de estructuras magnéticas; en otras palabras la continuación analítica se comporta como un filtro pasa bajas.

La continuación hacia abajo enfatiza las anomalías débiles y resalta efectos superficiales desapareciendo efectos de cuerpos vecinos donde su aplicación principal es la determinación de la fuente anómala; es decir, la continuación hacia abajo realiza las respuestas de fuentes en una profundidad baja, sin embargo, no es posible continuar con la prolongación, si los datos contienen ruido corto de la longitud de onda, este ruido puede aparecer como fuentes muy bajas en la continuación. Tal ruido debe ser removido antes de aplicar la continuación hacia abajo sobre los datos. Para ello se aplica un filtro paso bajas de Butterworth que es muy eficaz para remover el ruido antes de la continuación; es necesario realizar un diagrama del espectro de potencia para determinar el número de onda donde aparece el ruido en las profundidades más bajas.

El espectro de potencia es también una buena guía para determinar la profundidad a la cual se puede seguir haciendo la prolongación analítica de los datos hacia abajo. (Tutorial Oasis Montaj de Geosoft)

Este tipo de procesado no se aplica cuando existe mineral de magnetita ya que causa mucho ruido e impide ver las fuentes superficiales; sin embargo en la continuación hacia arriba si es posible la visualización de las estructuras; en caso de hematita si puede aclarar el seguimiento de las estructuras para la continuación hacia abajo.

Reducción al polo magnético

Las formas de las anomalías magnéticas son variable en forma y amplitud, para poder interpretar una anomalía es necesario calcular sus parámetros físicos como distancia polar, amplitud, contraste de intensidad, dimensiones, gradiente; vector del campo total terrestre, vector de polarización asociado a un cuerpo magnético y así como la influencia en la forma debido a su posición de latitud magnética.

Esta influencia de la posición de la latitud magnética actúa como una distorsión que se genera por oblicuidad del vector del campo magnético, por lo que a la respuesta del campo magnético total se omite esta distorsión y localizar la anomalía sobre el polo norte magnético, ésta transformación se logra, girando la dirección del campo magnético que esta determinado por la inclinación y declinación del campo magnético local a una polarización vertical; en otras palabras, la reducción al polo es transformar la anomalía del campo magnético total para localizarla en el polo magnético; lo cual convierte una anomalía simétrica que suprime la distorsión que se genera por la oblicuidad del vector de campo magnético; que representa una anomalía centrada sobre la fuente anómala; que es considerada como un símil a un gradiente vertical magnético, suponiendo una magnetización vertical, la cual es conocida como anomalía pseudogravimétrica, donde es posible obtener la distancia polar e inferir una profundidad promedio de las fuentes anómalas. (Tutorial Oasis Montaj de Geosoft)

Segunda derivada vertical.

La aplicación de filtros al campo magnético sirve para un análisis más específico y la visualización de las anomalías con enfoque característico. La segunda derivada vertical se aplica comúnmente a los datos del campo total magnético para realzar las fuentes geológicas superficiales; donde a menudo se aplican filtros de pasa bajas para remover el ruido de altas frecuencias. Este filtrado es muy útil debido ya que enfatiza fuentes pequeñas y someras que a su vez dependen de características regionales, de la cual se puede determinar la profundidad del basamento, esto es por que se acentúa el alto y bajo magnético de la anomalía, delimitando con buena precisión la extensión horizontal del prisma o estructura magnética. (Tutorial Oasis Montaj de Geosoft)

Señal Analítica

Una de los parámetros físicos necesarios para obtener una buena caracterización de una anomalía, es conocer las dimensiones de las estructuras o cuerpo magnéticos que se ven involucrados en la formación de mineral de fierro.

Para conocer estas características de las anomalías y firmas magnéticas es aplicable la señal analítica de la reducción al polo y del campo magnético total; ya que de este proceso se obtiene la correspondiente a la envolvente de energía de las anomalías magnéticas que no depende de la dirección de magnetización de las fuentes; es decir, la amplitud de la señal analítica tiene una relación directa con la intensidad de la magnetización, y presentará valores máximos sobre los bordes de las fuentes magnéticas.

La señal analítica es un filtro que depende de otros procesos tales como la derivada horizontal que se calcula usando la transformada rápida de Fourier y un filtro de convolución en el dominio de las frecuencias, donde la señal analítica evalúa estos dos sistemas de datos, teniendo como resultado la caracterización de los bordes de estructuras magnéticas posiblemente mineralizadas.

3.3.5 Interpretación

Para una interpretación consistente de las anomalías es necesario realizar la interpretación cualitativa y cuantitativa de plano del campo magnético total así como los mapas obtenidos del procesado y sus perfiles magnéticos. El objetivo final de la interpretación magnética es la deducción geométrica de la fuente anómala; donde los parámetros de un cuerpo que produce la anomalía son: profundidad, longitud, anchura, buzamiento, etc.; mientras que los parámetros que se pueden suministrar de un posible yacimiento son:

- Geometría
- Profundidad
- Propiedad física de las rocas, en este caso susceptibilidad magnética

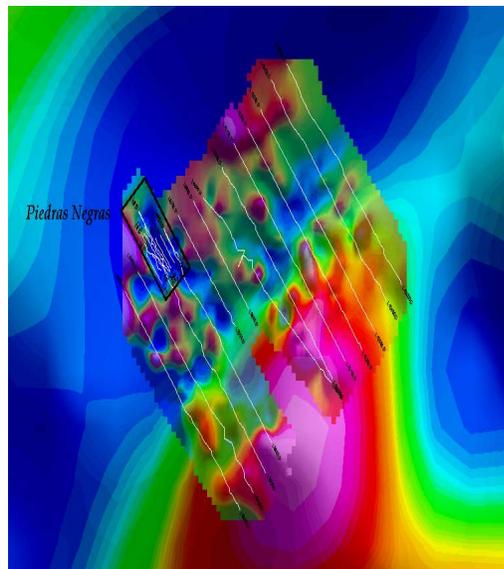
La interpretación cualitativa se basa primordialmente en la forma e intensidad de las anomalías, cabe mencionar que una anomalía, firma o una manifestación magnética no indica directamente la presencia o concentraciones de mineral; lo que se obtiene es un mapeo geológico de las estructuras a profundidad donde se puede inferir la presencia de mineral, por lo que es importante que el criterio del geofísico considere la geología como la guía fundamental para la interpretación, tomando en cuenta la correlación geológica – geofísica.

Primeramente se inicia la interpretación cualitativa en los mapas, iniciando con la forma de la anomalía, se caracteriza normal cuando se manifiesta el bajo magnético al norte y el alto magnético al sur; de forma opuesta, la anomalía se caracteriza inversa. Donde se pueden calcular sus parámetros a partir del procesado de datos, es decir obtener una profundidad aproximada a partir de la distancia polar que se obtiene de manera certera con la reducción al polo así como el centro real de la anomalía, calcular sus dimensiones

a partir del mapa de la señal analítica, caracterizar manifestaciones anómalas debida a posibles alteraciones de las rocas con la respuesta de la segunda derivada vertical, realizar un análisis del cuerpo a mayor profundidad e incluso inferir su buzamiento a partir de la continuación analítica de campo.

Con el análisis de los perfiles magnéticos podemos calcular con mayor precisión los datos vistos en planta, es decir dar un carácter mas fino al tipo de estructura que se encuentre, debido a su firma magnética ya que puede tener variantes, donde se puede obtener la dirección del cuerpo, indicar con claridad fallas y fracturas, ya que se realiza como una correlación geológica – geofísica; es importante considerar que la geometría real de los cuerpo es de forma irregular, sin embargo podemos conocer el comportamiento de los cuerpo de manera aproximada de forma tabular, cilíndrica, conos y mantos. Con la interpretación cuantitativa, se obtiene una interpretación más completa de las anomalías junto con el apoyo de métodos geométricos para el cálculo de los parámetros; existen varios métodos para el cálculo de profundidad: método de la pendiente y media pendiente, método de deconvolución de Werner (Hartman 1971), entre otros.

El calculo de las toneladas potenciales, se realiza en función de los parámetros físicos del cuerpo que se presente características propicias a mineralización. Las toneladas potenciales se refieren a las toneladas del cuerpo o los cuerpos que pueden presentar mineral, no representa la cantidad de mineral en la zona. La interpretación final de los datos terrestres ayudara para localizar los indicios de la mineralización con mayor exactitud.



Traslape de mapas aeromagnéticos y terrestre donde se visualiza la generalidad de uno y del detalle de otro levantamiento, respectivamente

En la interpretación se asocian varios trabajos técnicos, por ejemplo el trazado, muestreo, topografía, geofísica terrestre, con la finalidad de definir las condiciones geológicas para localizar el cuerpo mineral, para continuar con la etapa IV

3.4 Etapa IV (Conceptualización del modelo geológico)

CONCEPTUALIZACION DEL MODELO GEOLÓGICO

El insumo en esta etapa es el diagnóstico de la anomalía que se efectuó en la etapa III, a partir de esta información, se efectúan trabajos a detalle en geología y geofísica, donde se elabora una integración de datos para proponer coordenadas de puntos estratégicos para una barrenación evaluativa ó piloto; de tal manera que corte el cuerpo de forma perpendicular con la finalidad de:

- Corroborar los resultados del laboratorio;
- Obtener mayor información de evento geológico, es decir ubicar con exactitud los bordes de las estructuras así como definir el comportamiento del cuerpo mineralizante.
- Realizar pruebas metalúrgicas

Con la interpretación de estos datos se realiza un composito de información, para tener una percepción del cuerpo mineralizante; donde la conceptualización del modelo geológico es el producto de esta etapa IV. Cabe mencionar que la importancia de la geofísica es elemental para la selección de coordenadas en la barrenación evaluativa ya que con el análisis geofísico que se realice se conocerá el comportamiento del cuerpo a mayor profundidad; con este conocimiento del cuerpo es posible indicar la dirección del barreno de una forma estratégica tal, que brinde mayor información del cuerpo mineralizante y que este se corte en perpendicular para lograr una conceptualización del modelo geológico efectiva ya que de ello vienen las etapas V y VI de exploración.

3.4 Etapa IV (Conceptualización del modelo geológico)

INSUMO

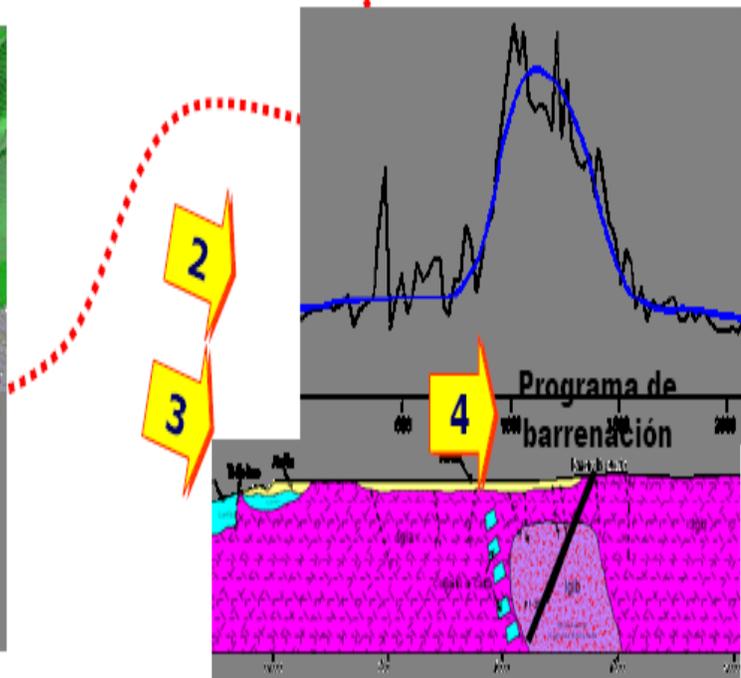
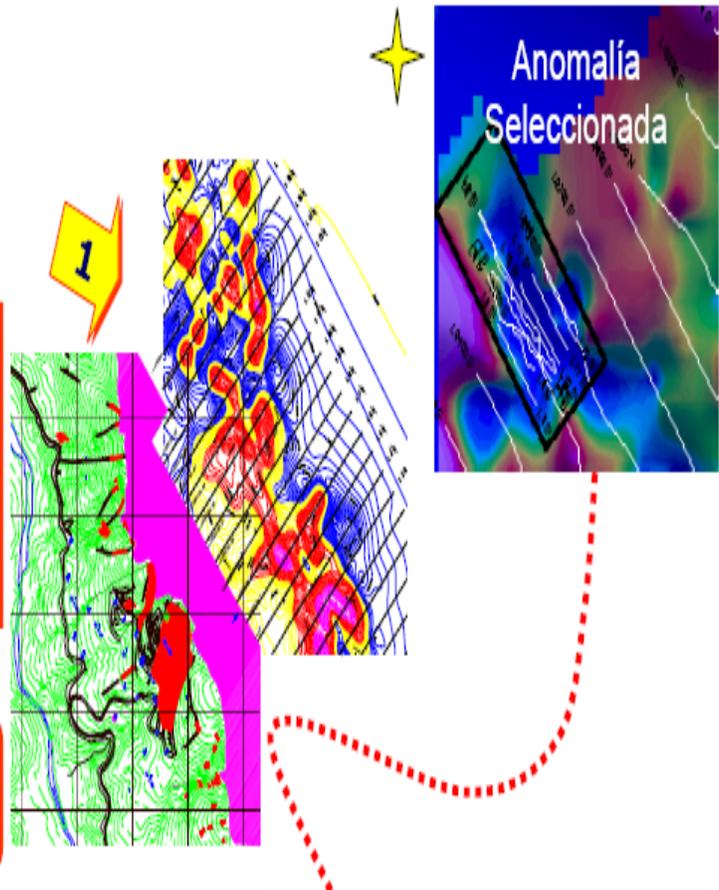
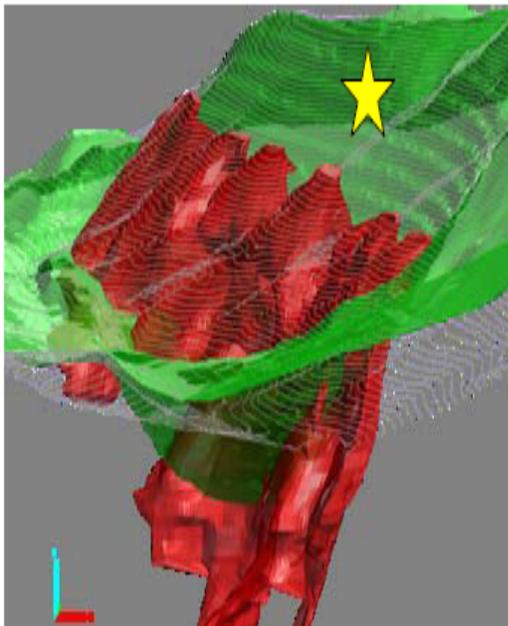
- Anomalías magnéticas seleccionadas

PROCESO

- 1) Trabajos a detalle (Levantamientos Geofísicos, Muestreo y Mapeo Geológico)
- 2) Integración de datos geológicos, geofísicos y genéticos
- 3) Interpretación de secciones
- 4) Barrenación Piloto a Diamante

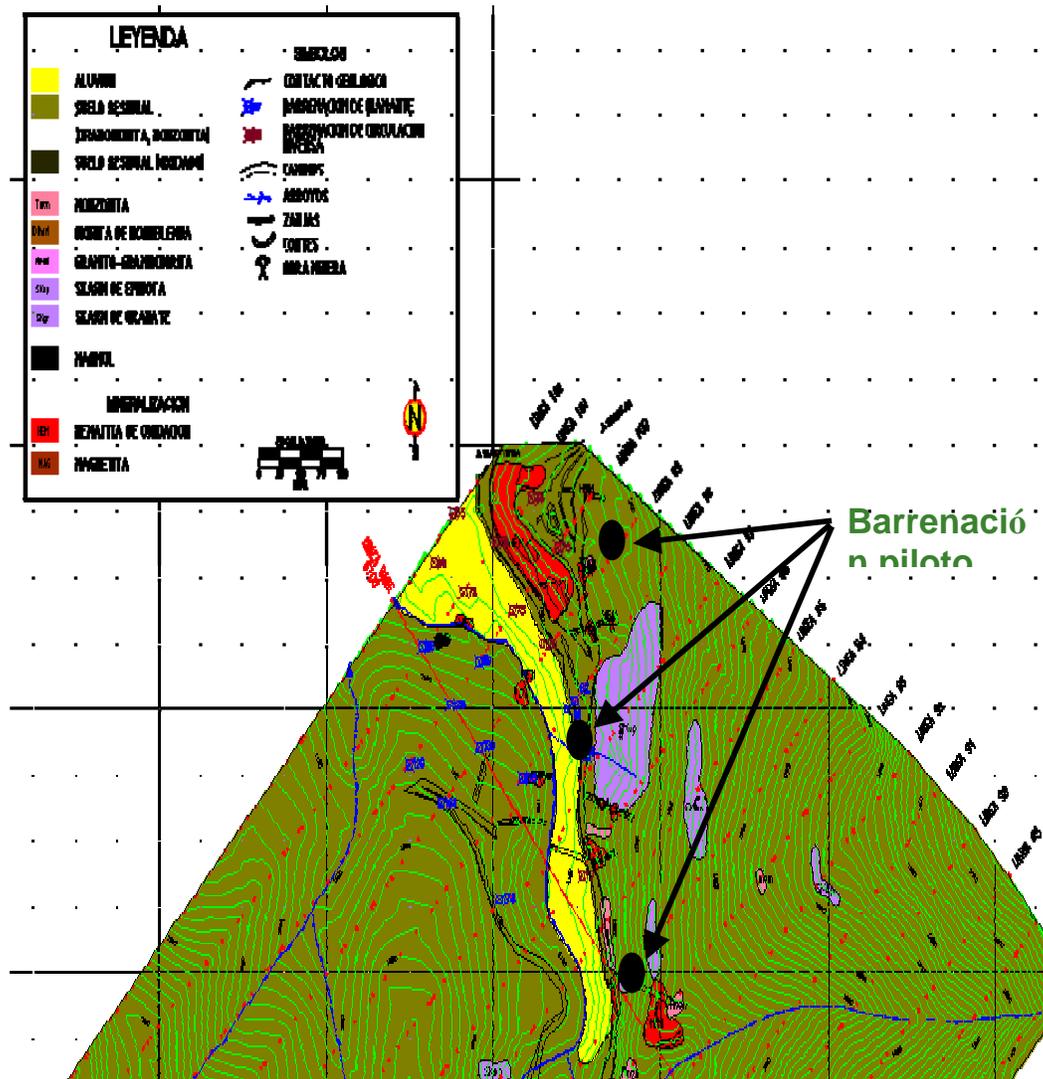
PRODUCTO

- Conceptualización del Modelo Geológico



3.4.1 Barrenación Piloto

La geología y la geofísica a detalle consisten en el mapeo mas cerrado, es decir, el muestreo geológico debe levantarse cercana al sitio donde se encontró evidencia mineral y levantando secciones en forma de cubrir esa evidencia y saber donde acaba; mientras que el levantamiento geofísico a detalle consiste en el levantamiento de los perfiles en la dirección preferencial donde su espaciamiento entre cada perfil sea de 50m ó un espaciamiento menor al levantamiento de verificación técnica.

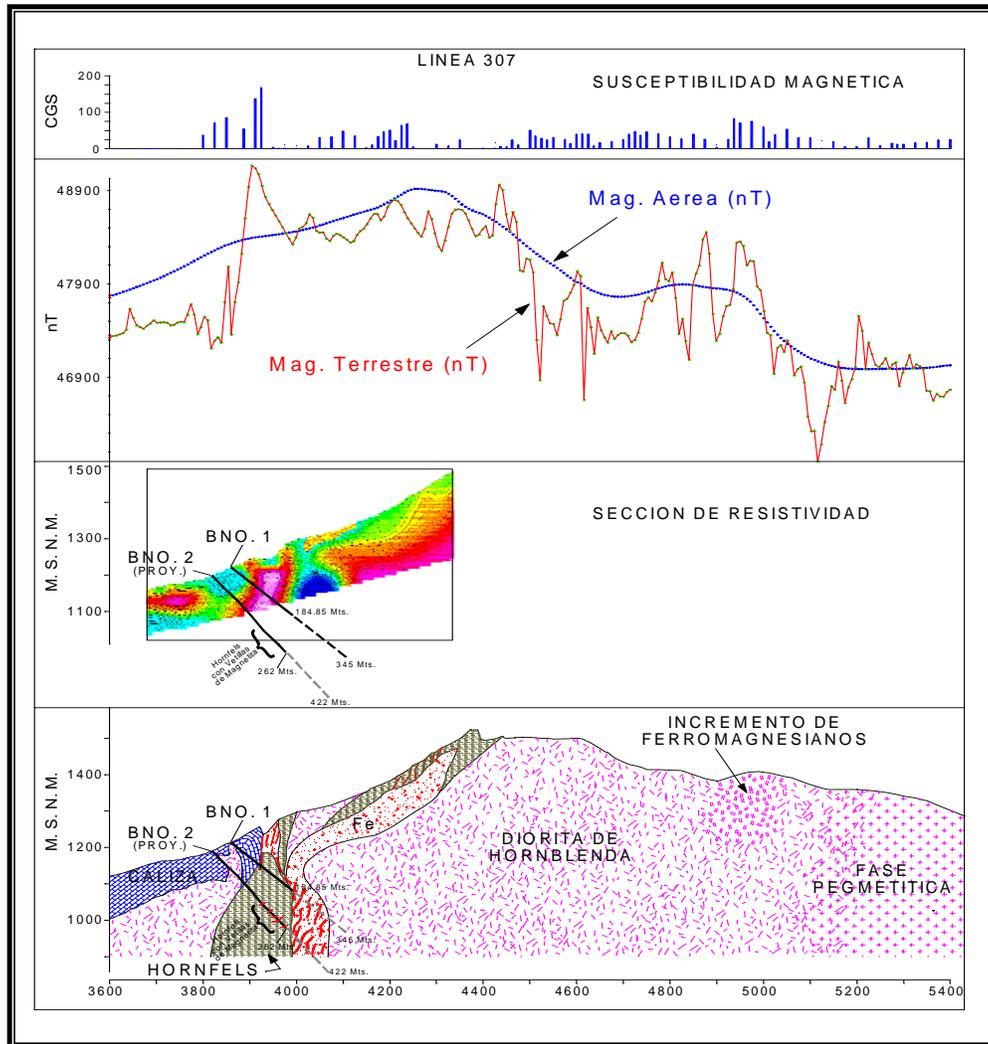


Esquema de composito de datos, magnetometria terrestre a cada 50 metros, donde se plasma el mapeo geológico, las secciones geológicas, la topografía así como las muestras de mano que se llevaron a laboratorio y presentaron alta ley en fierro

Todos los datos disponibles son integrados, analizados y con ellos se elaboran secciones geológicas, que de aquí se parte con un programa experimental de la perforación; en este programa se realiza un análisis conjunto de geofísica con los resultados de laboratorio de las muestras que se obtuvieron en la etapa III, se localiza las muestras que obtuvieron alta ley en mineral de fierro, es decir las muestras que presentaron mayor porcentaje de fierro, asociándolas a estructuras magnéticas para seguir el cuerpo a mayor profundidad.

3.4.2 Geología y Geofísica a detalle

El modelo conceptual entonces se prueba con una nueva parte del programa con más perforaciones de mina con la ley del mineral que se obtuvo en laboratorio



Ejemplo de correlación geológica-geofísica de una concesión minera de MIMOSA.

La distancia para todos los perfiles esta dada en metros que se encuentran georeferenciadas en coordenadas UTM, el perfil de la susceptibilidad su eje vertical esta dado en CG S sabiendo que la susceptibilidad magnética es adimensional; Los perfiles magnéticos aéreo y terrestre presentan en su escala vertical el campo magnético en nT. El perfil de resistividad en su eje vertical manifiesta metros sobre nivel del mar, así como el perfil geológico; donde cada uno de ellos tiene correlación lineal ya que los levantamientos se llevaron en la misma dirección y distancia. En este mapa se visualiza la importancia de la geofísica en la exploración minera, donde la magnetometria marca los cambios litológicos importantes, que a partir de ello se eligen la dirección y coordenadas junto con la resistividad de las rocas, para garantizar una buena barrenación que permita corroborar información adquirida anteriormente y seguir el la mineralización, sin perderla.

3.5 Etapa V (Modelo Geológico)

En esta etapa el insumo es el modelo geológico conceptual que se obtuvo a partir de los análisis geofísicos, geológicos y la barrenación piloto de la etapa IV; con este insumo se elabora un proceso que depende del resultado que se obtienen de la barrenación es decir:

- Descripción de la litología y posible ambiente geológico en el cual se presenta la mineralización
- Resultados de laboratorio; porcentaje de fierro, comprobar si se habla de alta ley, que tipo de minerales se presentan: de mena, ganga y/o accesorios
- Verificación de fallas y fracturas en el núcleo que representan al medio, que son de suma importancia para la formación de fluidos mineralizantes.

Obteniendo un resultado exitoso, es decir, una alta ley o un alto porcentaje de fierro, se incrementa la cantidad de barrenos siguiendo el cuerpo mineralizante según los cuerpos que se visualizan en magnetometría.

Teniendo los resultados de los nuevos barrenos y de nuevas secciones geológicas; se realiza una integración de datos para mapear el cuerpo mineralizante tanto en sección como en planta. De esta manera es como se genera el producto final de esta etapa V. El modelo geológico.

Es importante tener en cuenta que en esta etapa aunque hayan finalizado los análisis geofísicos, se sigue trabajando con su interpretación para dar un resultado óptimo para obtener el modelo geológico; por lo que el trabajo del geofísico se plasma más allá de las etapas I, II, III y IV de exploración.

Debido a que los cuerpos mineralizantes no llevan una forma perfecta, la geofísica juega un papel fundamental para la descripción de los modelos geológicos, ya que algunas veces aunque se tenga la barrenación es complicado definir los bordes del cuerpo, donde el apoyo de las respuestas geofísicas es fundamental para generar el modelo geológico.

3.5 Etapa V (Modelo geológico)

INSUMO



- Modelo Geológico Conceptual

PROCESO

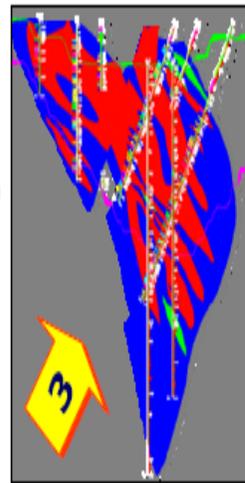
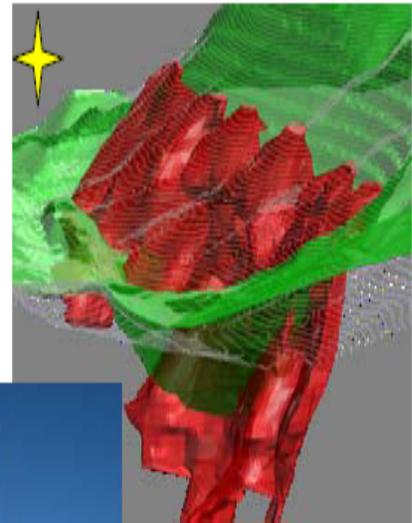


- 1) Incremento en la densidad de barrenos
- 2) Integración de Datos
- 3) Interpretación de Secciones y Plantas

PRODUCTO



- Geológico Modelo



3.6 Etapa VI (Modelo geoestadístico y modelo de bloques)

Esta es la etapa final del proceso de exploración, donde el insumo de esta etapa es el modelo geológico, el cual se obtuvo a partir de la integración de datos de barrenos junto con la geología y geofísica de las etapas anteriores. A partir de este insumo se realizará un proceso estadístico exhaustivo para generar un modelo de bloques que indique la distribución de la geología y de la litogeoquímica el cual consta de los siguientes puntos:

- Estadística básica
- Configuración de dominios litológicos, variogramas
- Modelo de bloques
- Pruebas metalúrgicas
- Pruebas de diseño

El propósito de obtener el modelo geoestadístico es de analizar la información integrada y cuantificar el depósito mineral, donde el producto final de esta etapa es la certificación de reservas, es decir se legalizan a partir del modelo de bloques con el grado de distribución de la geología e indiscutiblemente la litogeoquímica, es decir, la distribución del mineral así como el tonelaje y ley que manifieste el yacimiento mineral.

La importancia de esta etapa VI de exploración no solo radica en la certeza de los datos sino también en que es el punto de partida para la planeación de la mina, de que manera se llevara el desarrollo de la mina y la explotación del mineral, es decir, aquí es punto donde termina la exploración para pasar a la explotación y darle tiempo de vida a la mina.

El modelo geoestadístico, se emplea para el diseño de la mina y la explotación del mineral, es decir, se decide si el mineral se puede explotar a tajo abierto o si es necesario diseñar una mina subterránea, en estas decisiones es necesario que el ingeniero de exploración intervenga en el diseño ya que conoce la geología del lugar y brindara información útil para que el diseño de la mina se genere con seguridad para los trabajadores, considerando las características físicas de la roca, ya que esto puede favorecer al diseño de la mina o si es necesario aplicar técnicas de seguridad necesarias para su planeación y explotación, así como indicar que tipo de minerales se encuentran asociados al fierro donde se realizan pruebas de metalurgia para la separación de estos minerales.

3.6 Etapa VI (Modelo geoestadístico y modelo de bloques)

INSUMO

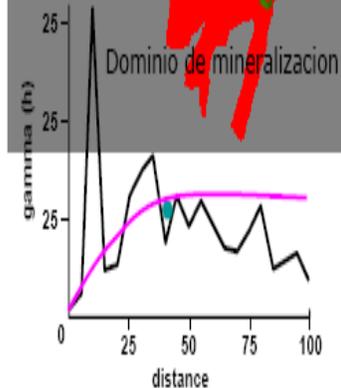
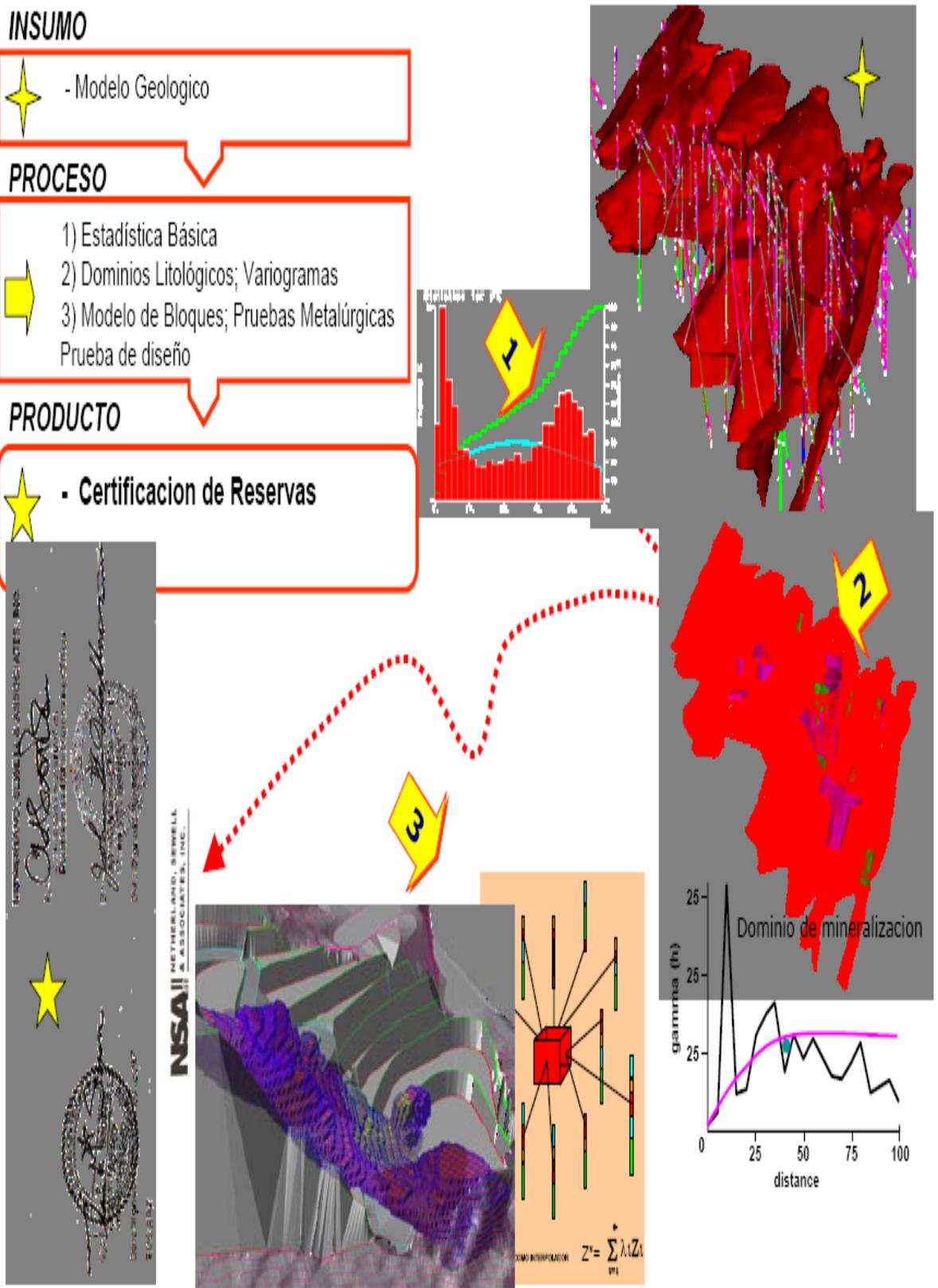
✦ - Modelo Geológico

PROCESO

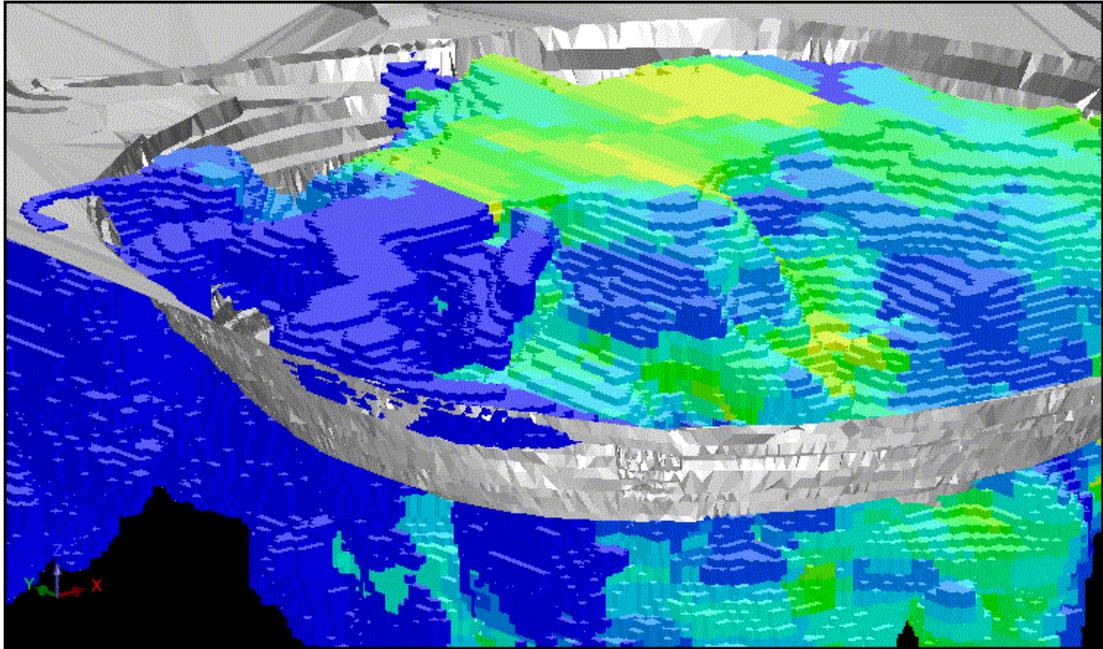
- ➡
- 1) Estadística Básica
 - 2) Dominios Litológicos; Variogramas
 - 3) Modelo de Bloques; Pruebas Metalúrgicas Prueba de diseño

PRODUCTO

★ - Certificación de Reservas



$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_i$$



Distribución de la litogeoquímica de una concesión minera de MIMOSA.

Para generar el modelo geoestadístico es necesario disponer de la información de perforación, control de ley, litogeoquímica, interpretación geofísica, sistema de fallas y fracturas, geología regional y a detalle, en pocas palabras la información integrada que se obtuvo de las etapas anteriores y llevarla a una base de datos generalizada donde se efectúa un análisis de datos con su diagrama de flujo que facilite el modelado de datos.

Con el modelado de datos se realiza una estimación de recursos generando modelos de bloques para la preparación de modelos geoestadísticos donde se determina los límites y expansiones del cuerpo mineralizado; el yacimiento se divide en bloques tridimensionales, los cuales tienen asignadas coordenadas, tamaño, densidad, leyes de distintos minerales, topografía, etc. éstos forman el modelo de bloques a partir de una representación gráfica, donde se utiliza una escala de colores que depende de una variable litogeoquímica, cabe mencionar que la base de datos es enorme y a partir de este modelo se estiman costos y utilidades, donde el objetivo del modelo es optimizar la extracción del mineral por bloques.

La representación del modelo de bloques y su estudio mediante isosuperficies constituye un punto de partida para la planeación de minas, ya que es un poderoso medio para el proceso de planificación de la mina y su explotación.

IV HERCULES, UN EJEMPLO DEL PROCESO DE EXPLORACION

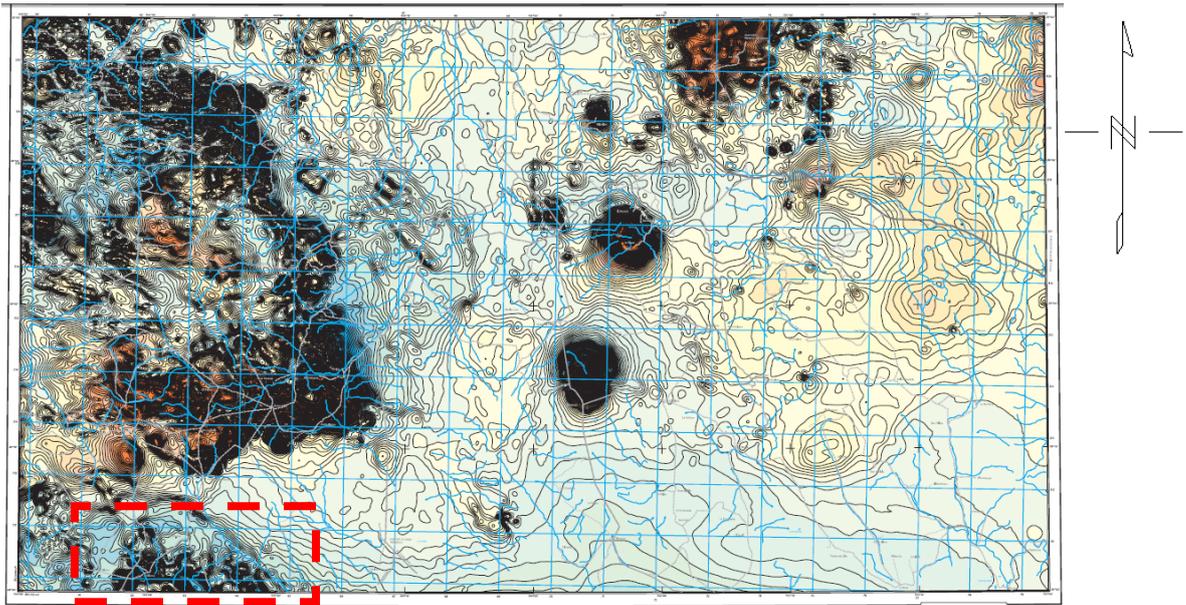
En este apartado se analiza las etapas de exploración dando mayor énfasis a las etapas II, III y IV de exploración ya que dentro de ellas la responsabilidad de obtener un producto de calidad en cada etapa depende directamente del trabajo óptimo del geofísico, considerando que métodos son mas resolutivos para el objetivo buscado; prospección magnetométrica, y electromagnética.

Todo el análisis parte de lo general a lo particular; el prospecto de Hércules, Coahuila comienza con las respuestas magnéticas de gran contraste de intensidad magnética dentro de los resultados de levantamiento aeromagnetométrico del servicio geológico mexicano (SGM) , que con sus parámetros físicos de la anomalía se consideraba de gran importancia, sobre el cuerpo intrusivo que se manifestaba, de tal forma que se emprendió Hércules hacia el proceso de exploración; se realiza un programa de infraestructura geológico-minera, el cual se lleva a cabo el cubrimiento de las áreas con mayor potencial minero con el propósito de investigar sus condiciones geológicas y estructurales del subsuelo que permita descubrir nuevos yacimientos minerales, para alimentar la planta con el tonelaje necesario para la producción del acero y así como darle mayor tiempo de vida a la planta.

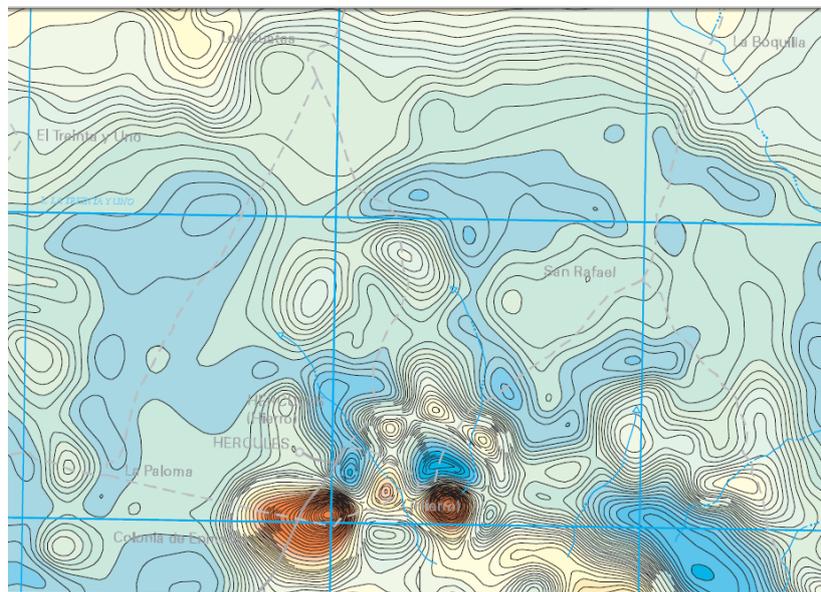
Al principio del proceso de exploración, es decir la etapa I de exploración, indicaba que la información de mayor importancia radicaba en los cuerpos intrusivos; durante el transcurso del proceso de exploración, en las etapas II, III se analizó y verifico que la respuesta magnética de gran importancia no solo radicaba en los intrusivos sino en las respuestas cercanas a estos cuerpos ya que manifestaba diferentes contrastes en sus propiedades magnéticas. Cada etapa fue brindando mayor información donde se visualizo el rol de los cuerpos intrusivos, sin embargo el mineral de hierro no se localizaba dentro de los cuerpos intrusivos, sino en zonas aledañas a ellos, entonces junto con la correlación geológica-geofísica se realizaron estudios a detalle donde se explica la formación de mineral cercana a estos cuerpos intrusivos que en algunos casos no tiene la misma génesis, no obstante, con estos estudios a detalle de una forma clara se propusieron barrenos para el seguimiento de estructuras y zonas mineralizadas; donde cabe mencionar que la magnetometría tiene el alcance para mapear estas diferencias, pero es de suma importancia que el criterio del geofísico se encuentre enfocado a la búsqueda de mineral de hierro considerando todas las ventajas y desventajas de los métodos así como tener en cuenta todas las características geológicas a mineralización, también, conocer las propiedades físicas y alteraciones de la variedad de mineral de hierro.

Cuando se inicia la conceptualización del modelo geológico ya se cuenta con todos los estudios a detalle, y de manera directa se conocen las respuestas magnéticas o resistivas del mineral a partir de las muestras del núcleo, por lo que es de manera mas sencilla seguir el mineral en los mapas magnéticos y evitar costos innecesarios en la incrementación de barrenación; donde ya se especifica el modelo geológico. En la etapa final del proceso de exploración se cuantifican las toneladas de mineral, especificando la ley del cuerpo mineralizante del modelo geológico. Cabe mencionar que Hércules es una concesión mineral que alimenta la planta para la fabricación del acero y que ciertas zonas de ésta concesión han cubierto el todo proceso de exploración dando resultados exitosos y benéficos, por lo que se ha descubierto que el proceso de exploración en MIMOSA es confiable para el objetivo planteado.

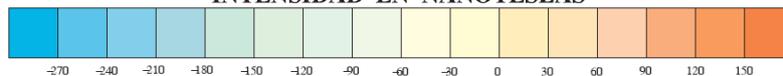
ETAPA I – PROYECTO HERCULES, VUELO BAROMETRICO



Carta magnética del campo total, del servicio geológico mexicano (SGM); carta san miguel Coahuila H13-12. La altura del vuelo sobre el nivel del terreno 450m, con escala de 1:250 000; que es parte de los insumos de la Etapa I. la zona marcada en roja es el intrusivo Hércules, que se visualiza en la siguiente imagen; sin embargo no es toda la concesión minera.

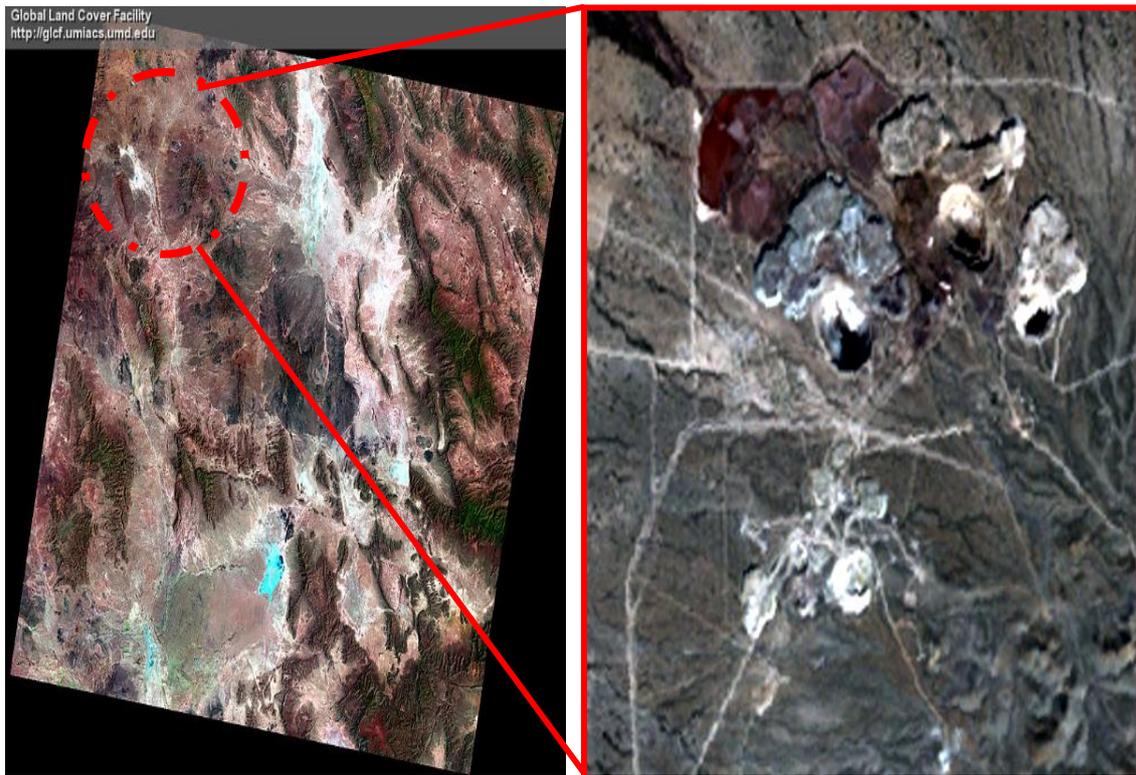


INTENSIDAD EN NANOTESLAS



Se manifiestan dos firmas magnéticas que caracterizan un cuerpo intrusivo de forma normal similar a la respuesta de un dipolo magnético, que presentan un alto contraste de intensidad, que se encuentran sumergidos dentro de un valor de fondo de 30nT

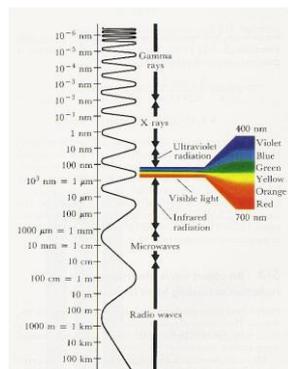
ETAPA I – PROYECTO HERCULES, IMÁGENES SATELITALES



Con estas imágenes satelitales, se localizaron zonas de mineralización y alteración, de manera superficial cerca de los intrusivos de Hércules Coahuila y zonas aledañas, a partir de cociente de bandas y firmas espectrales;

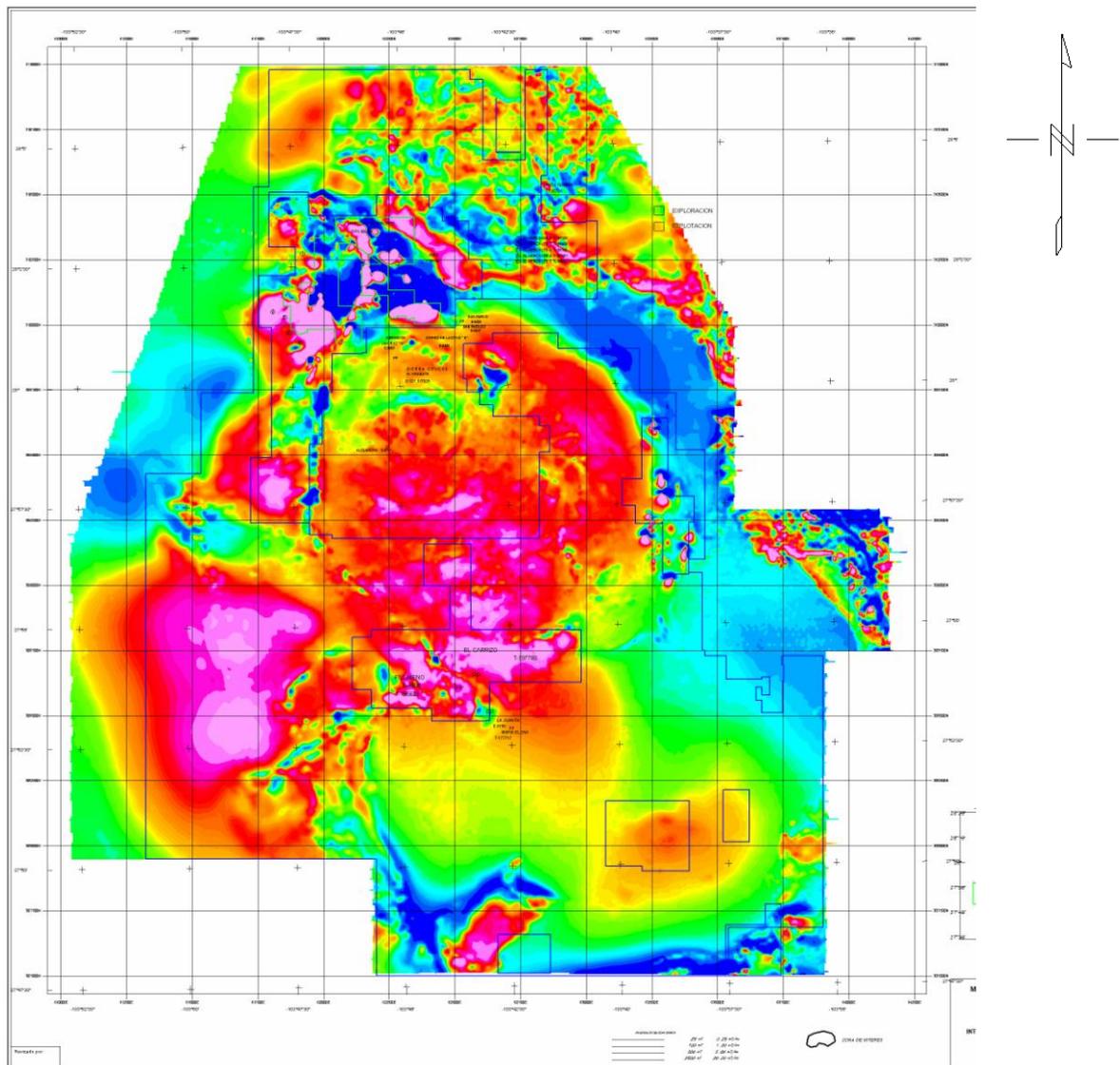
Aplicando un cociente de bandas del infrarrojo reflejado; es decir; banda 5 ($1,55\mu\text{m} - 1,75\mu\text{m}$) y banda 7 ($2,08\mu\text{m} - 2,35\mu\text{m}$) del espectro electromagnético. Donde se encontraron firmas espectrales de hematita cercanas y dentro del intrusivo que presentaban un porcentaje de reflectancia en la banda 5 y 7, no mayor del 55% también se encontraron zonas de alteración de tipo caolinización y oxidación en zonas alejadas del cuerpo intrusivo que presentaban una reflectancia del 33% en la banda 5 mientras que en la banda 7 manifestó 0% de reflectancia; también se encontraron firmas espectrales de hierba seca en toda el área de manera dispersa, así como grandes extensiones de conglomerado.

Espectro electromagnético,
Tomado del libro Sabins,
F. Jr. (1978)



ETAPA I – PROYECTO HERCULES

DISEÑO DE LA CONSECIÓN MINERA



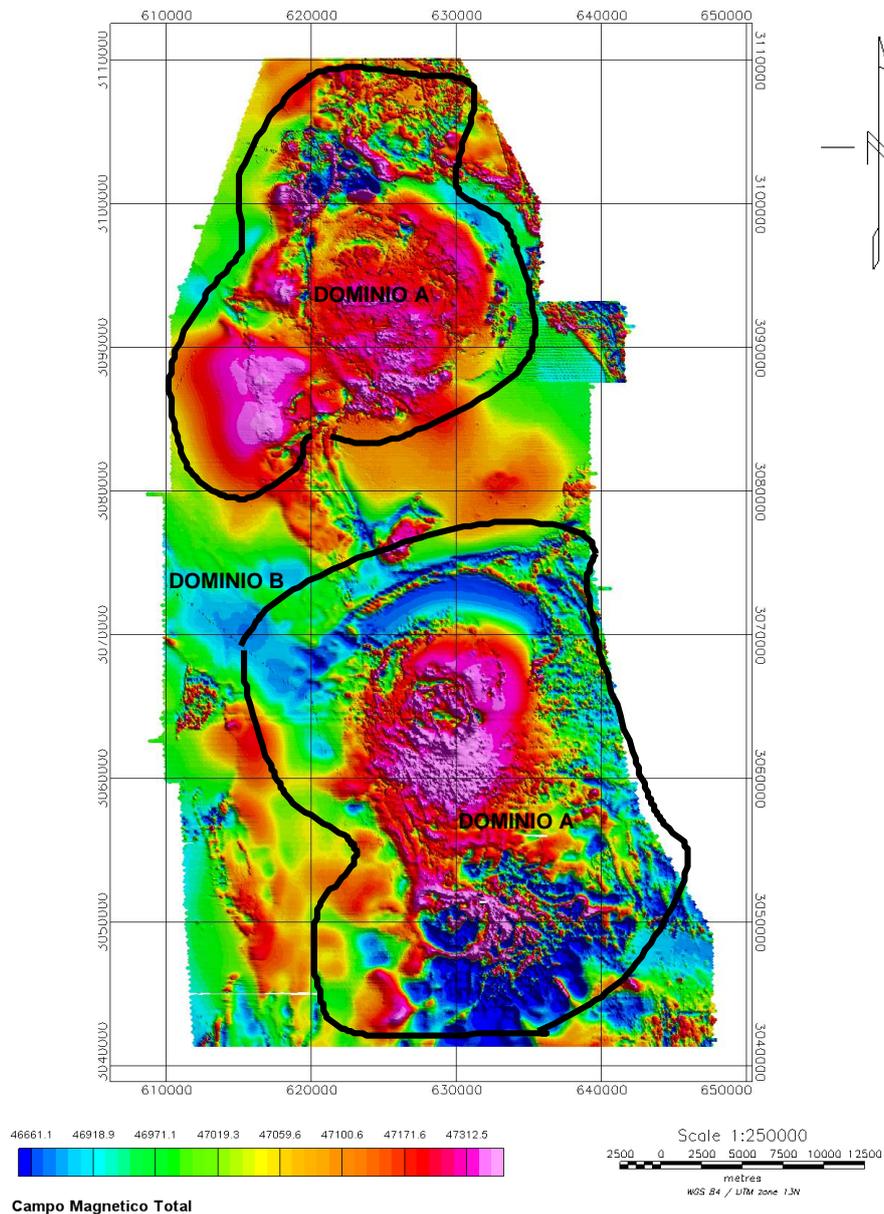
Para definir el diseño de la concesión minera, se toman en cuenta todos los resultados de los análisis de cartas geológicas, geofísicas y metalogenéticas junto con el análisis de las imágenes satelitales; ajustando el diseño de la concesión de tal forma que abarque toda la zona de interés dejando una zona de incertidumbre que rodee el evento geológico principal; esto con la finalidad de impedir que se omitan zonas con alguna mineralización posible.

ETAPA II – PROYECTO HERCULES

Con la concesión minera diseñada se programo la magnetométrica aérea de contorno, con altura de 30m, la dirección de vuelo N-S, y la distancia entre las líneas a cada 200m, después del levantamiento aéreo se obtuvo como resultado del campo magnético total, el cual se interpreto con dominios geomagnéticos de la siguiente manera:

Dominio A; zona con mayor manifestación de respuestas magnéticas de alto contraste de intensidad 1000 nT; principalmente se visualizan dos firmas magnéticas asociadas a respuestas de posibles cuerpo intrusivos, que en su periferia presenta pequeñas firmas y dipolos magnéticos que llevan cierta dirección preferencial; estas respuestas se encuentran encajadas dentro de un valor de fondo 47 000nT.

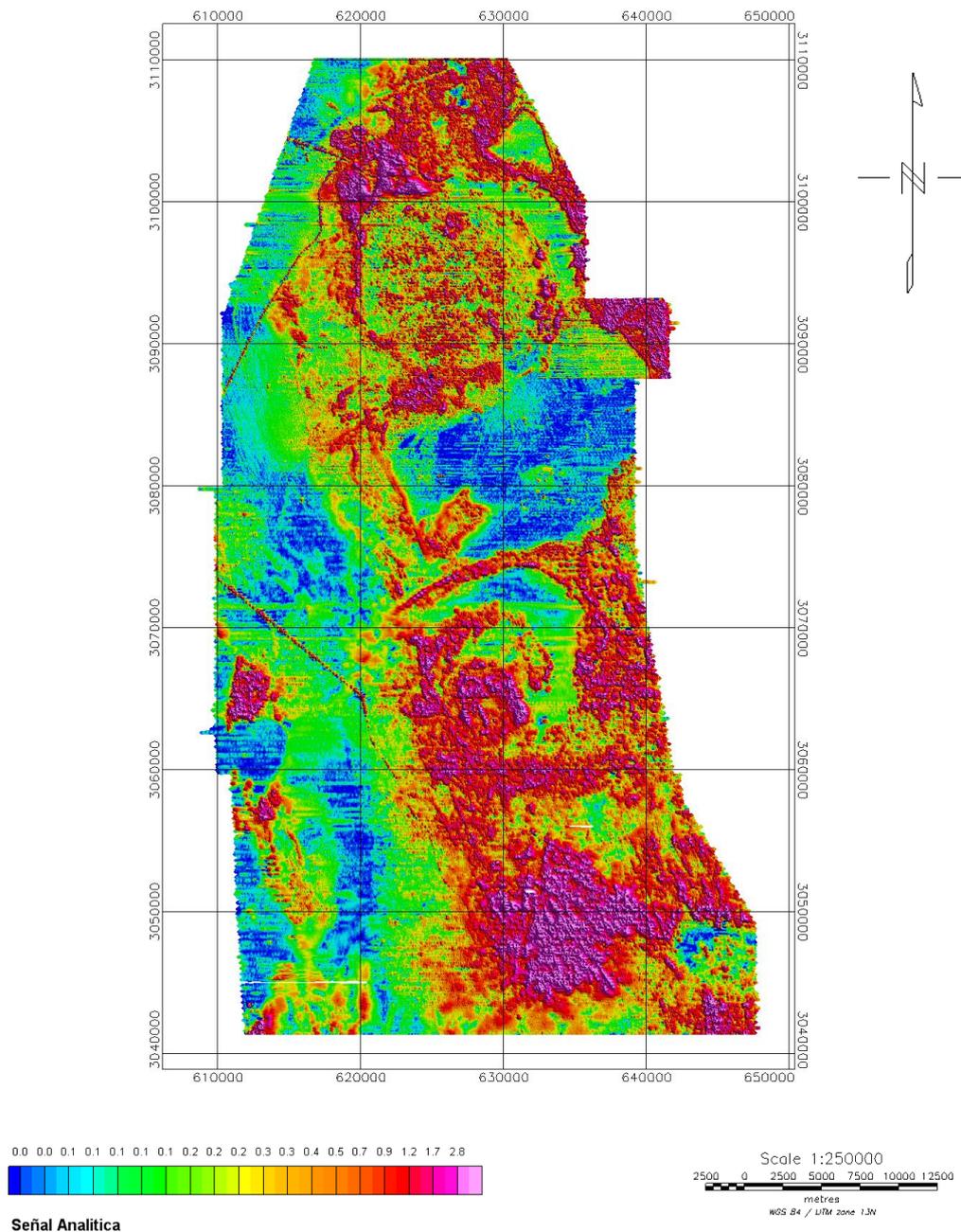
Dominio B; este dominio se caracteriza básicamente por la respuesta de valor de fondo, es decir, mayor estabilidad magnética, sin embargo presenta unas zonas de pequeños dipolos magnéticos con un contraste de intensidad considerable, los cuales podrían estar ligados a las respuestas del dominio A



ETAPA II – PROYECTO HERCULES

Resultado del procesamiento de datos del campo magnético total, Señal Analítica:

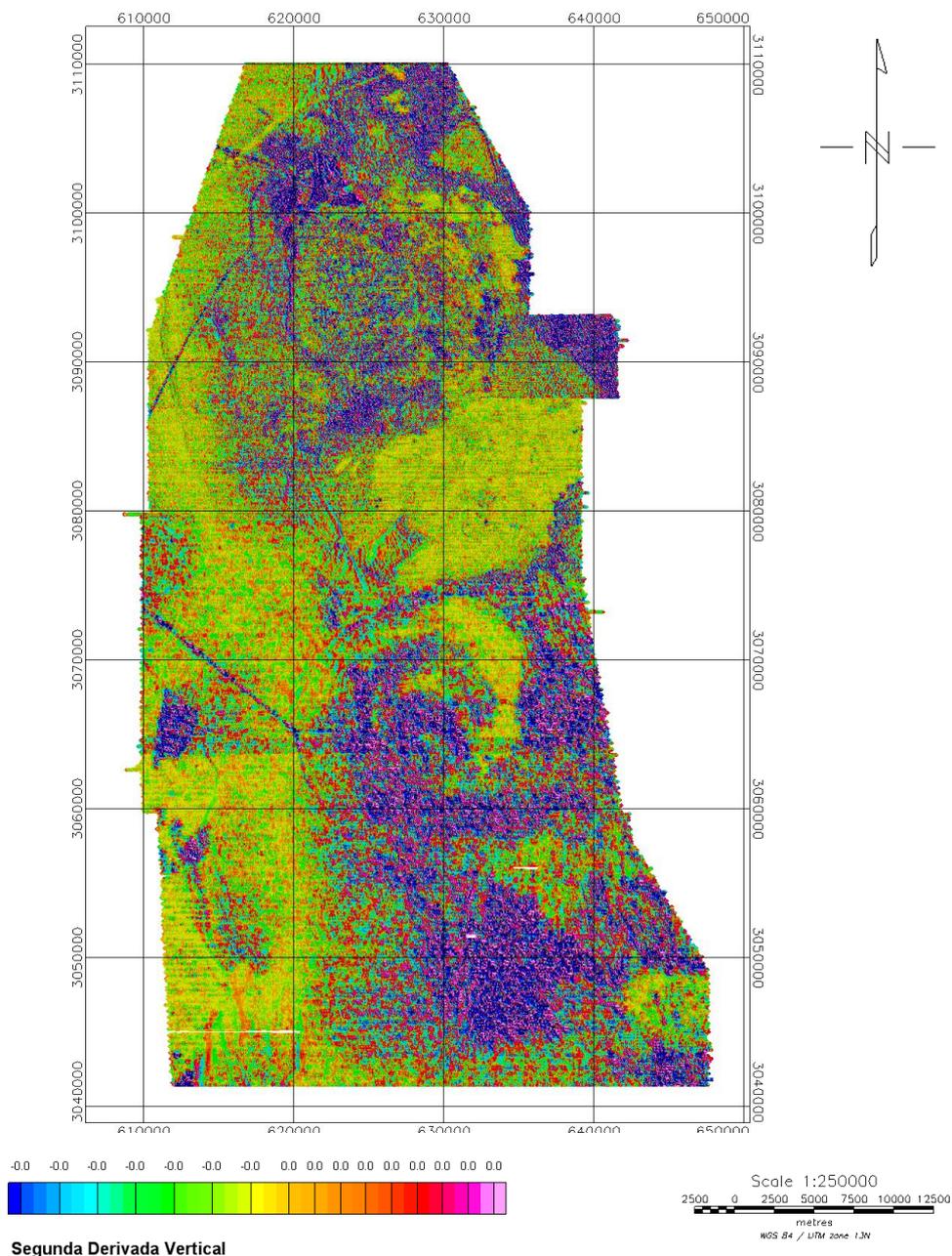
Este filtrado está caracterizando las estructuras de mayor interés, es decir la señal analítica del campo magnético total enfatiza las estructuras magnéticas con alto grado de magnetización, que se asocian geológicamente a evidencia de mineral; las cuales se encuentran en la periferia del intrusivo de la parte norte del levantamiento en algunos casos con tendencias o curvo lineamientos que llevan alguna dirección preferencial. En el intrusivo de parte sur presenta la evidencia de estructuras magnéticas también se encuentran zonas alejadas a dicho intrusivo el (circulo punteado) que manifiestan estructuras magnéticas posiblemente mineralizadas. Algunas de estas estructuras magnéticas se manifiestan de forma similar a la respuesta de campo magnético total.



ETAPA II – PROYECTO HERCULES

Resultado de la segunda derivada vertical

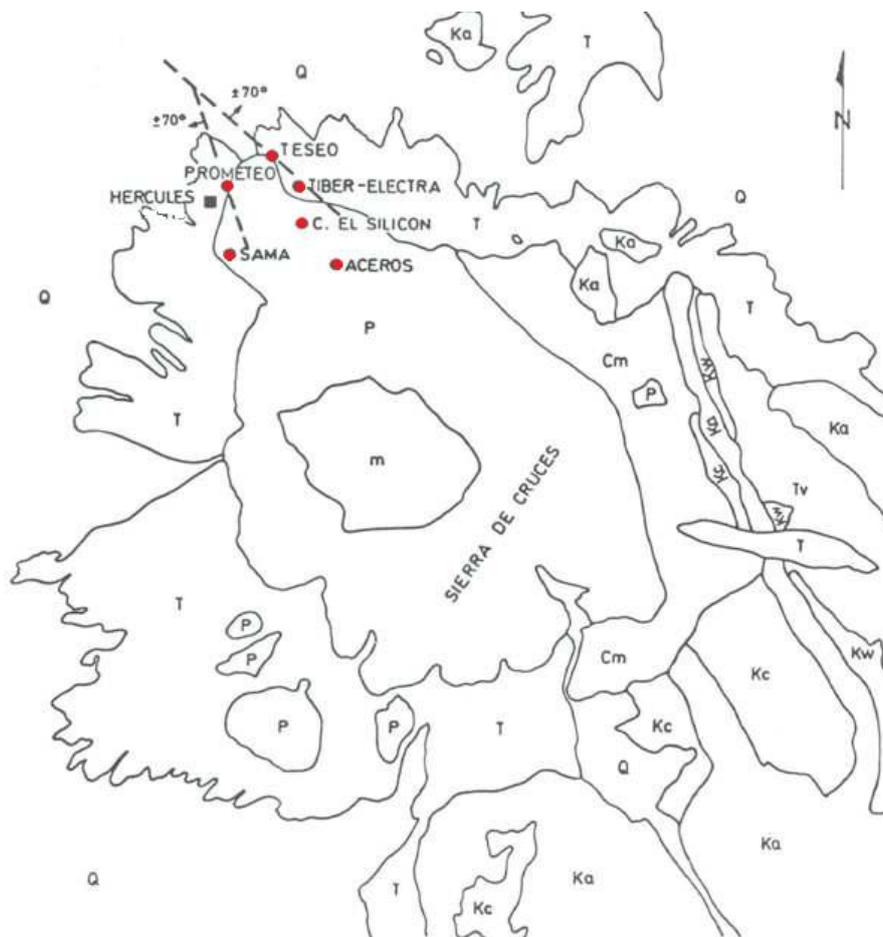
Este mapa enfatiza las fuentes magnéticas someras asociadas a la geología superficial con mineral magnético las cuales vemos que se manifiestan dentro de lo que asigno el dominio A, visualizando la periferia y el intrusivo mismo, carece de fuentes magnéticas someras de gran importancia. Lo que permite visualizar que la mayor concentración de fuentes someras o mineral magnético se encuentra en las zonas aledañas al intrusivo de la parte norte del levantamiento. El intrusivo de la parte sur del levantamiento manifiesta mayor presencia de fuentes magnéticas someras, dentro y fuera del intrusivo, no obstante presenta mayor unificación de dichas fuentes al sur del intrusivo. Los cuerpos intrusivos manifiestan una diferenciación magmática importante, por lo que es necesario analizar esta concesión por 2 zonas, intrusivo norte e intrusivo sur.



ETAPA II – PROYECTO HERCULES

Debido a la diferenciación magmática que presentan ambos intrusivos, se comenzó con el análisis de intrusivo norte, debido a que las firmas magnéticas asociadas al el, conocido como cerro de cruces, manifiesta estructuras magnéticas posiblemente mineralizadas con fuentes magnéticas muy superficiales, presentando alta debilidad estructural en la periferia del cuerpo intrusivo, el cual se maneja como un ambiente geológico tipo metasomatismo de contacto e incluso relleno de fracturas, por lo que es muy probable que estas manifestaciones magnéticas sean debido a que la aureola de contacto se encuentre alrededor del cerro de cruces. Por lo tanto es conveniente verificar las firmas magnéticas aledañas al cuerpo intrusivo y al intrusivo mismo para descartar cualquier evento favorable o desfavorable para la búsqueda de hierro.

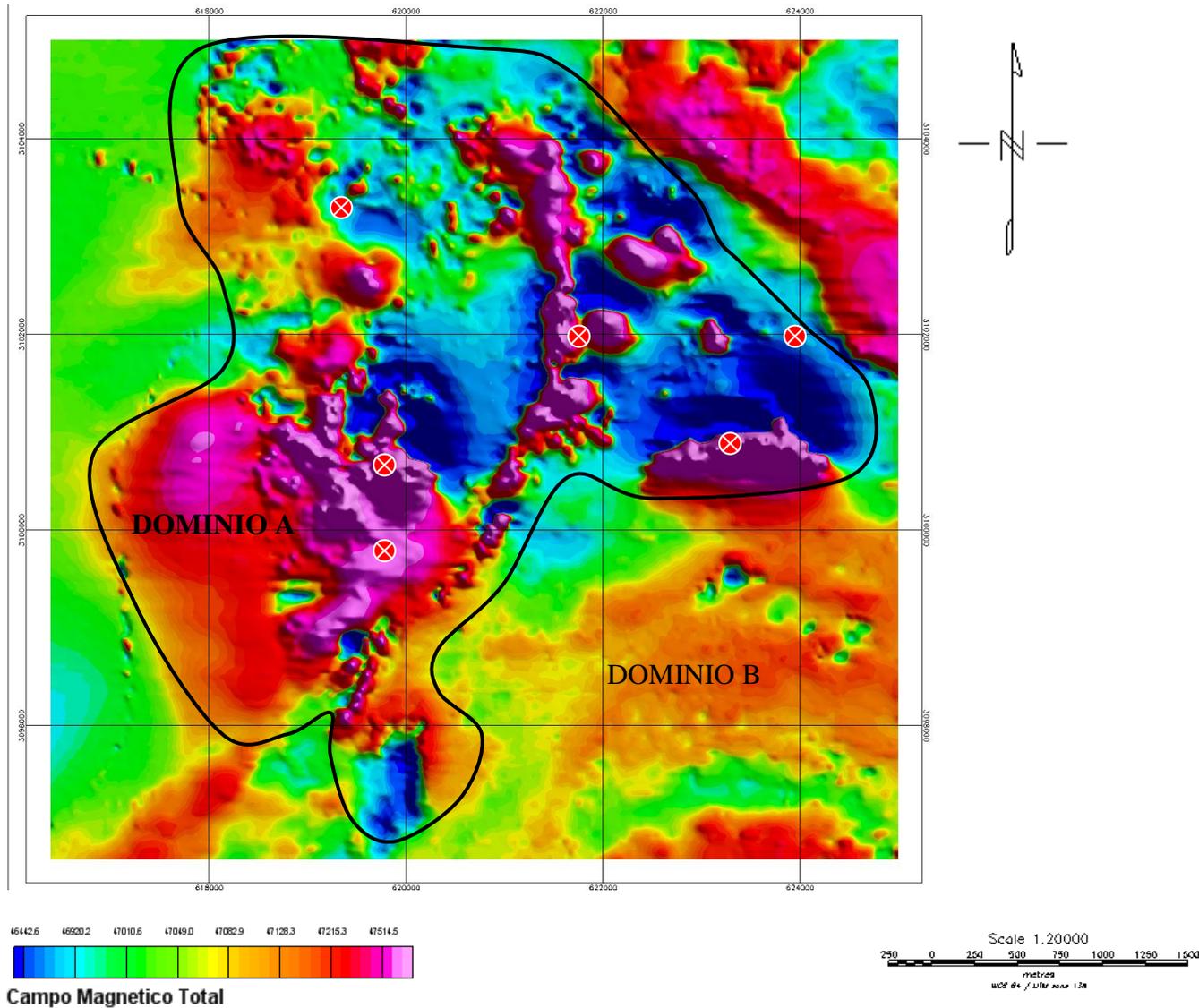
La verificación de firmas magnéticas se realizara en las localidades marcadas en rojo en el siguiente mapa geológico de cerro de cruces, que son anomalías jerarquizadas de primer orden debido a su respuesta geológica y magnetométrica; las cuales tienen definido sus parámetros necesarios para el levantamiento. Dentro de la concesión minera existen otras anomalías a verificar, solo se muestran las anomalías de primer orden.



Mapa geológico del cerro de cruces, es decir del intrusivo norte en la magnetometría aérea, con la localización de las anomalías magnéticas de primer orden

ETAPA III – PROYECTO HERCULES

Verificación de anomalías, campo magnético total.



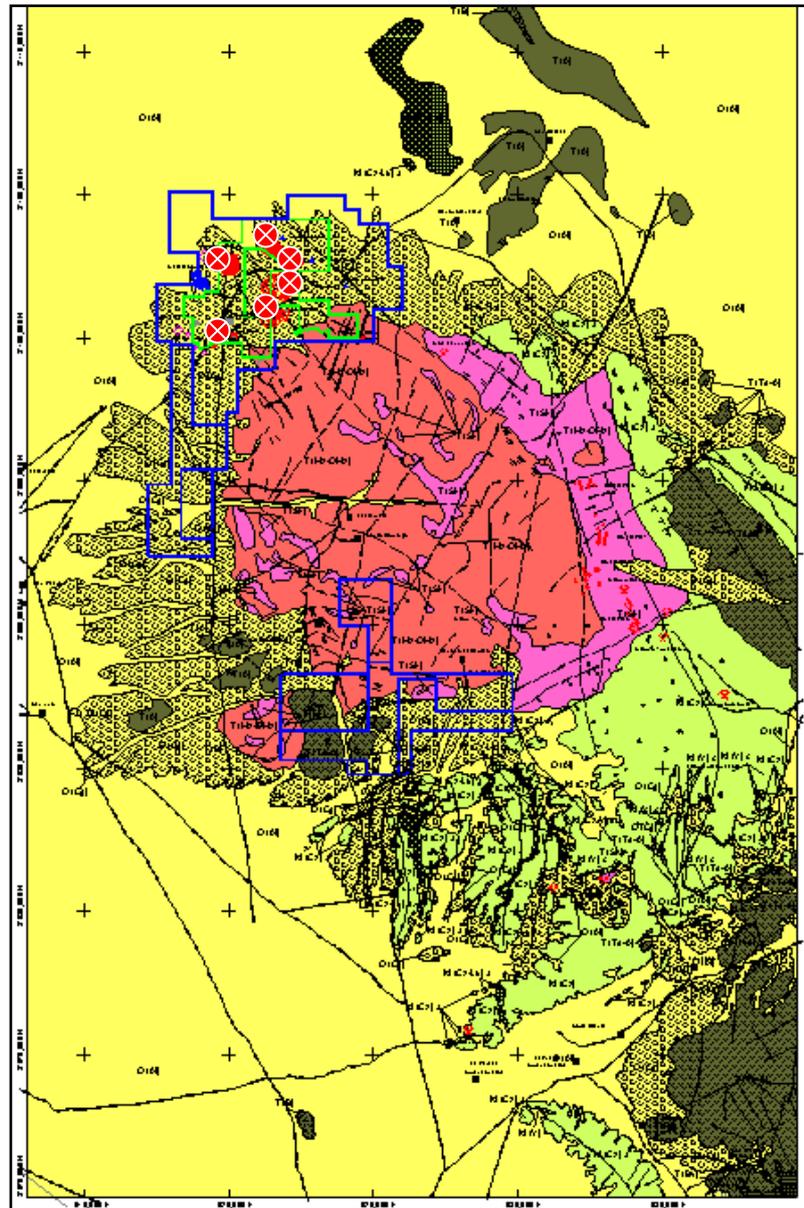
Mapa magnético de recopilación de verificación terrestre donde indica presencia de mineral de Fe.

Dominio A; respuesta magnética con alto contraste de intensidades definiendo 3 zonas de mayor importancia como firmas magnéticas normales; la estructura central manifiesta varios dipolos magnéticos formando un tren magnético, mientras que en la parte Este del mapa se manifiesta un dipolo magnético normal; y en la parte Oeste del mapa se visualiza una firma magnética normal con un gran contraste de intensidades de 9000 nT, el cual se localiza en la periferia del intrusivo de cerro de cruces.

Dominio B; se encuentra un valor de fondo 47500 nT así como valores intermedios a bajos donde no se manifiesta alguna firma o dipolo magnético, sin embargo se encontró evidencia mineral en algunas zonas cercanas al valor intermedio y de anomalías muy contrastantes.

ETAPA III – PROYECTO HERCULES

GEOLOGIA REGIONAL

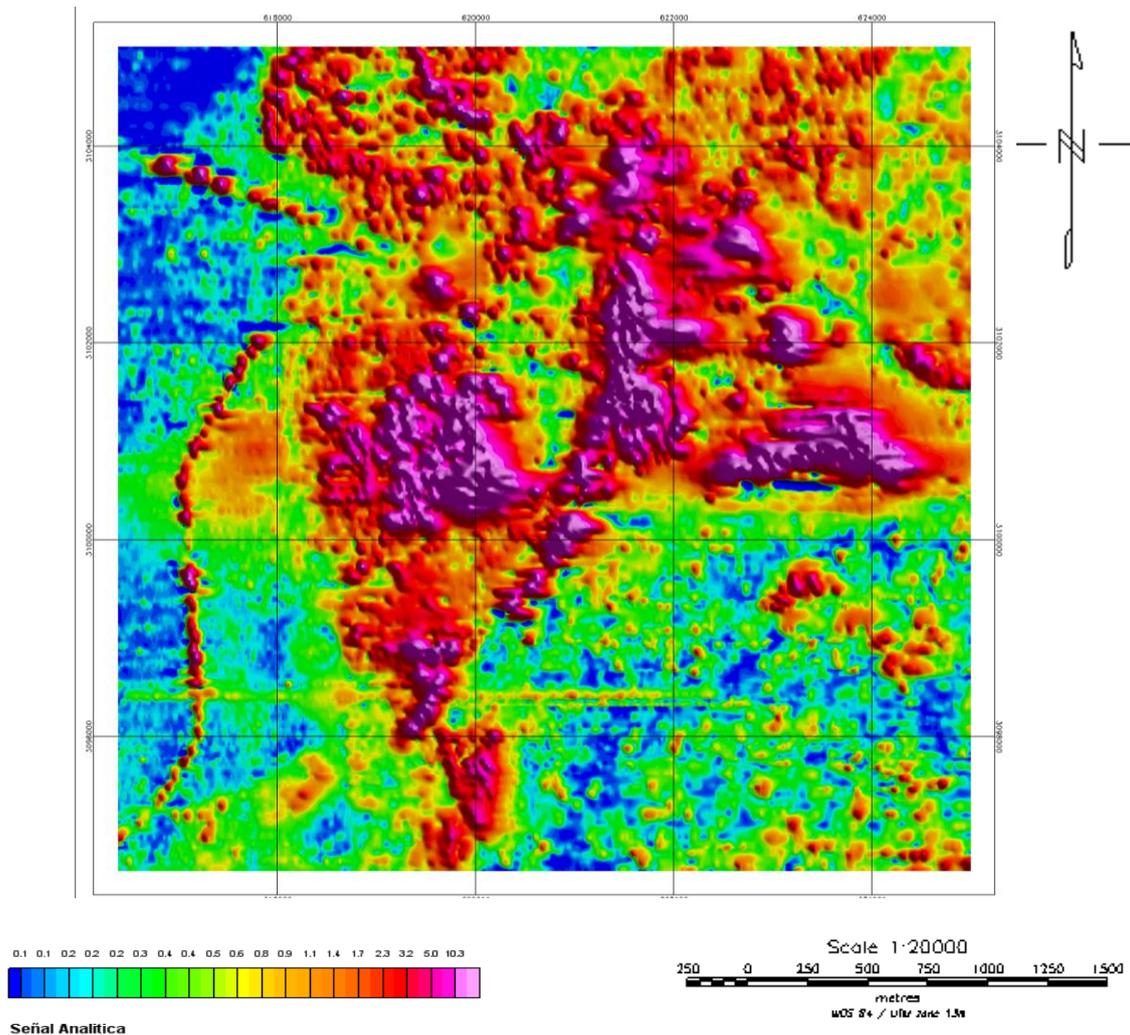


Mapa geológico del intrusivo sierra de cruces donde  indica evidencia de mineral de Fe

El marco geológico para el área de Hércules y sus alrededores es que las rocas más antiguas que afloran en la sierra de cruces se localizan en la porción central de un anticlinal, mostrando un rango amplio en el ambiente de depósito marino que existió durante el cretácico de la región. La formación y evolución de la estructura geológica de la sierra de cruces está relacionada con las diferentes etapas de actividad magmática en la región, y en general pueden estar representadas por las siguientes unidades de rocas: dioritas, cuarzomonzonitas-granodioritas, traquiandesitas, riolitas y basaltos. La actividad magmática del intrusivo de la sierra de cruces produjo, al afectar a las rocas sedimentarias las rocas metamórficas que incluyen principalmente skarn de diversas composiciones, así como hornfels y mármol.

Durante el levantamiento y mapeo geológico, se observaron varios afloramientos de mineral de Fe, los cuales se indican en rojo en el mapa geológico y geofísico; la presencia de hematita ha sido considerada tradicionalmente como efecto supergénico de la oxidación de la Magnetita, debido a que en los afloramientos se encuentra la magnetita que subyace a la hematita, donde la mineralización es claramente de origen supergénico y puede ser clasificada como magmático tardío a hidrotermal temprano.

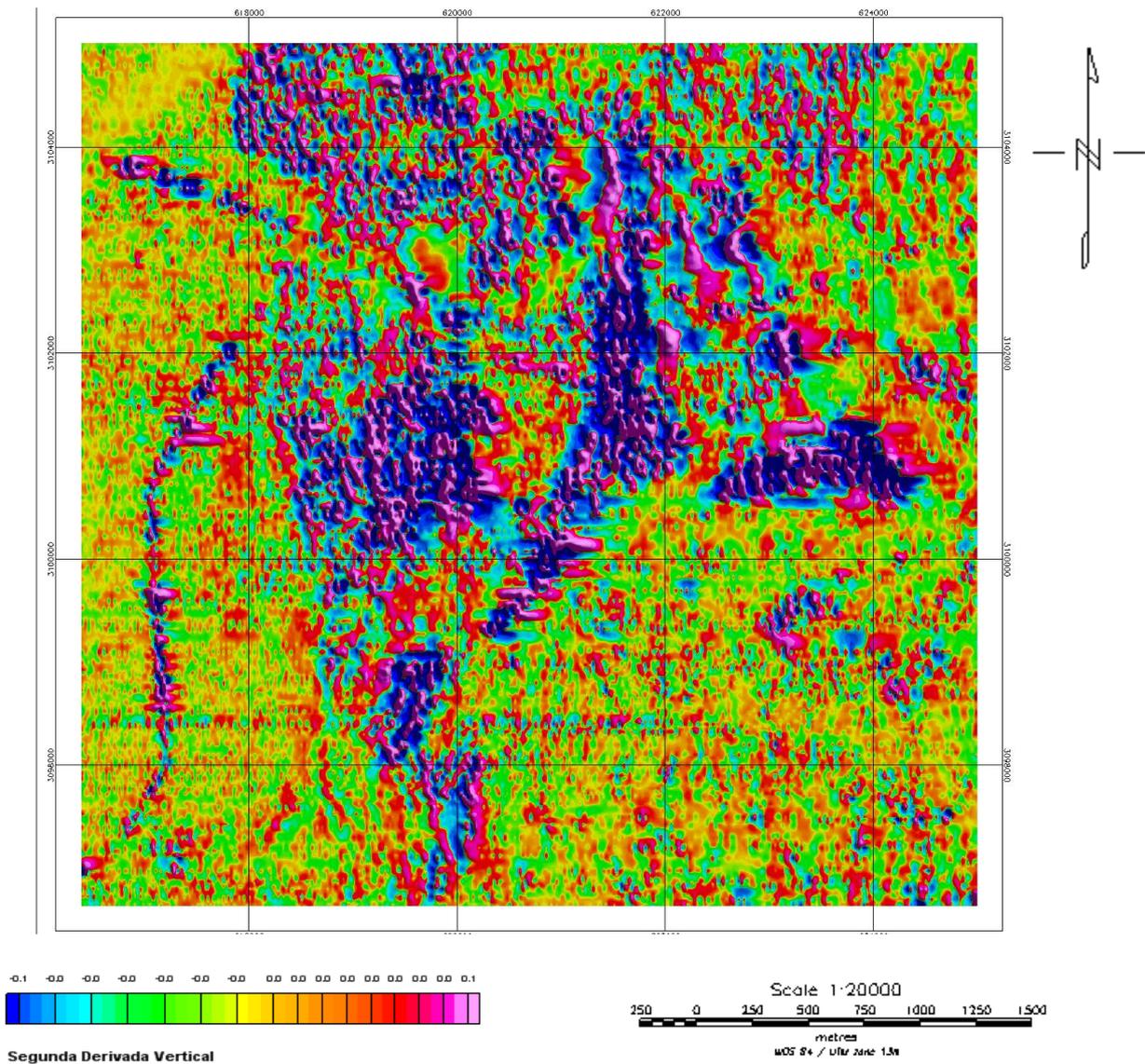
Señal analítica de la reducción al polo



Con la Señal analítica se visualiza los bordes de las estructuras magnéticas, donde dichas estructuras pueden estar mineralizadas; los cuerpos que se manifiestan con este filtro se presentan de una manera similar a la firma magnética en el campo total. En la parte NE del mapa se localizan remanentes de esta señal; así como al SE del mapa, la cual presenta mayor intensidad sin carecer de importancia; sin embargo la parte central manifiesta varias estructuras magnéticas posiblemente mineralizadas.

Estas estructuras magnéticas aunque se encuentren cercanas, debido a sus condiciones geológicas manifiestan diferentes respuestas magnéticas.

Segunda derivada vertical.



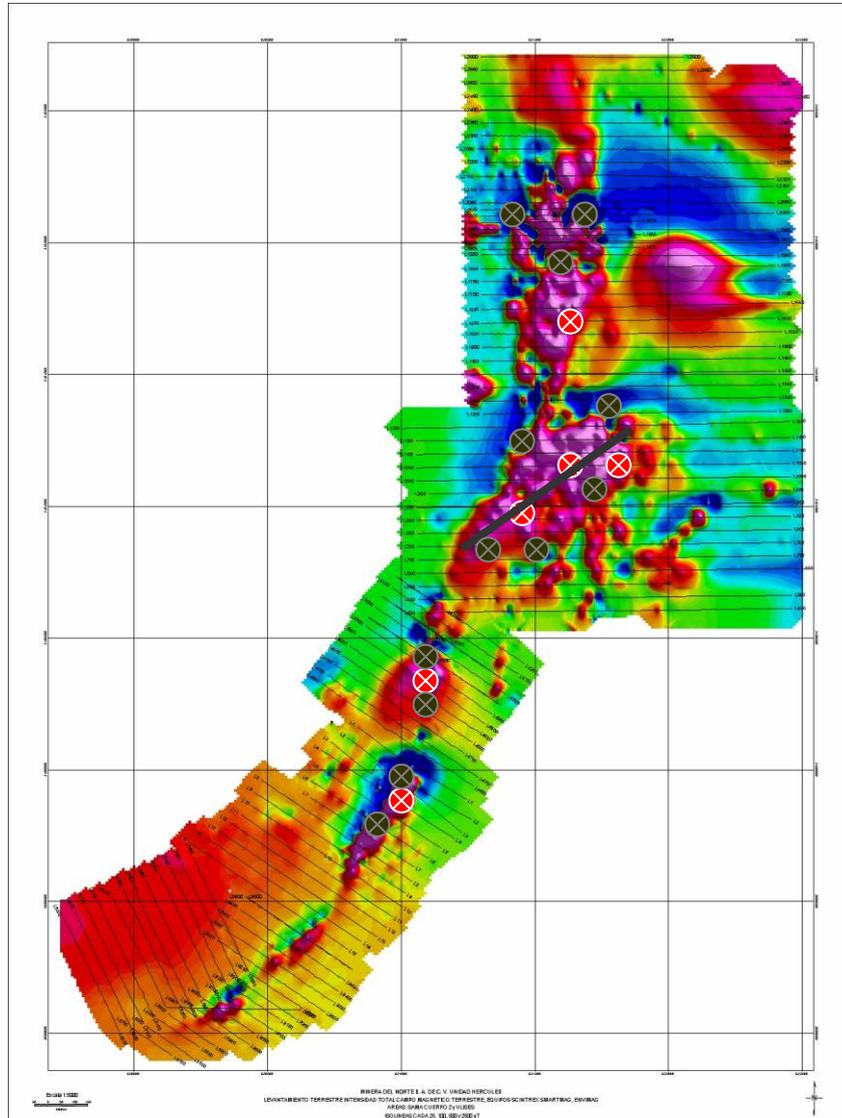
Con este procesado se visualiza las fuentes magnéticas someras, las cuales se manifiestan con una geometría similar en el campo total, también así en la señal analítica, sin embargo aquí no se manifiesta superficialmente alguna fuente magnética poco profunda en zona aledañas a estas anomalías principales; con esto es sencillo distinguir que es importante no omitir las pequeñas respuestas en los demás filtrados ya que nos ayudan a caracterizar con mayor información toda el área.

Debido a las respuestas de la verificación técnica de campo y las discrepancias que existen en cada una de las anomalías de primer orden, por lo que se pasaron varias anomalías a la etapa IV de exploración es decir, se realiza un mapeo geológico y geofísico a detalle junto con barrenos propuestos para la identificación del cuerpo con posible mineralización así como generar la conceptualización del modelo geológico.

ETAPA IV – PROYECTO HERCULES

CONCEPTUALIZACION DEL MODELO GEOLÓGICO

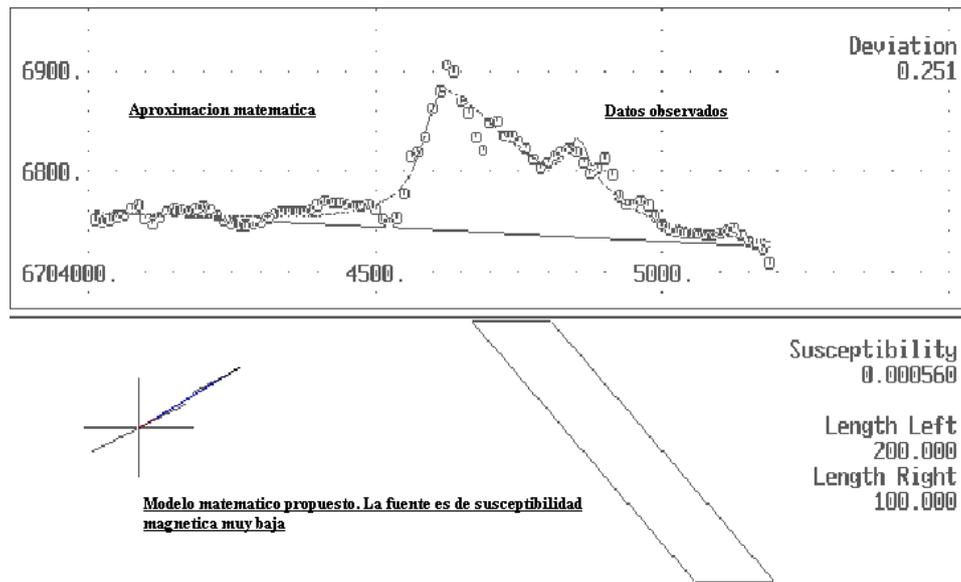
Se realizaron trabajos a detalles del levantamiento geofísico así como, mapeo y muestreo a detalle de geología de las anomalías que pasaron a esta etapa:



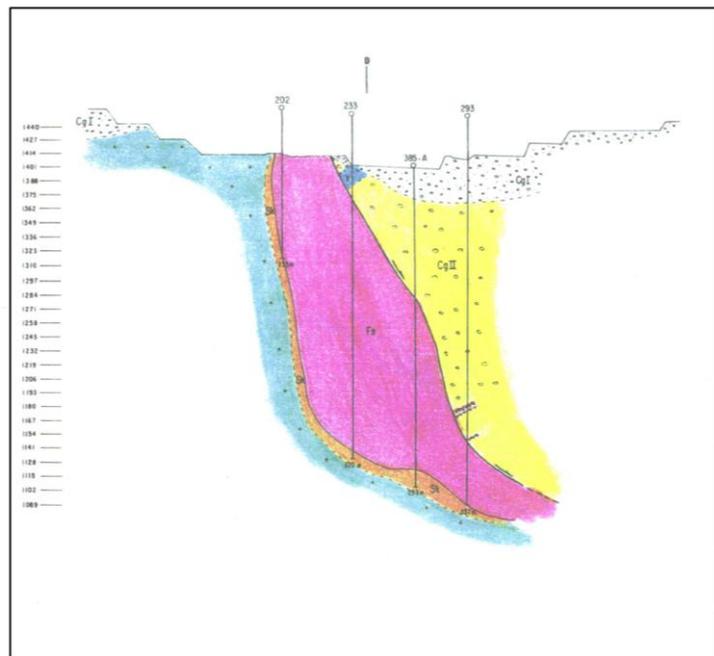
Levantamiento magnético terrestre donde indica puntos propuestos de barrenación y evidencia mineral y ---- indica perfil magnético

Anomalía titulada Ulises la cual se manifiesta como un curvoneamiento, los perfiles magnéticos se levantaron a cada 50 m con una densidad de muestreo a cada 20m, donde la presencia del mineral magnético se presenta con mayor repetición en el alto magnético, lo cual se infirió a partir de la correlación lateral y por la evidencia de mineral de hierro masivo que presento una alta ley de mineral es decir arriba del 50% de fierro total, debido a esto se propusieron barrenos en sitios estratégicos para conceptualizar el modelo geológico, cabe mencionar que algunos de ellos son direccionados y otros verticales, los cuales abarcan tanto el bajo y alto magnético, los cuales manifiestan un alto contraste de intensidad de 5,000 nT.

ETAPA IV – PROYECTO HERCULES



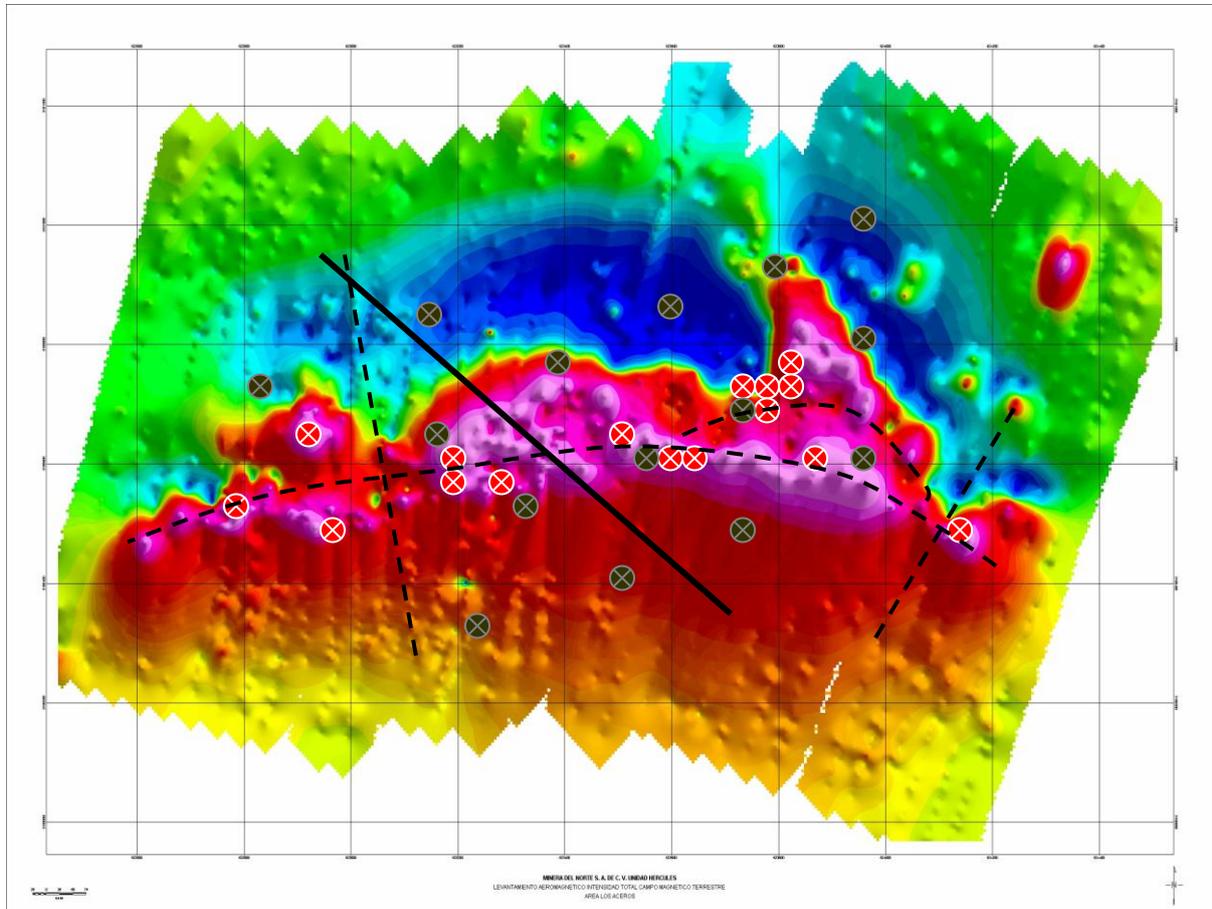
Este perfil magnético es de la estructura Ulises, que se comporta como una anomalía dipolar con forma asimétrica positiva, donde se obtuvo su profundidad aproximada a partir de los parámetros para caracterizar la forma de la anomalía, con $2w_{1/2}$ se obtiene su profundidad donde se evalúa aproximadamente a partir de la distancia entre dos puntos, uno a cada lado de del máximo, en los cuales la anomalía cae a la mitad del máximo y mínimo. (Parasnis 1971).



Perfil geológico, generado a partir de la geología superficial y de la descripción de barrenos, donde la estructura mineral, se manifiesta de manera similar al perfil geofísico que se realizó en la zona, donde el mineral de hierro se encuentra masivo teniendo alto porcentaje de magnetita 60% y 20% de hematita

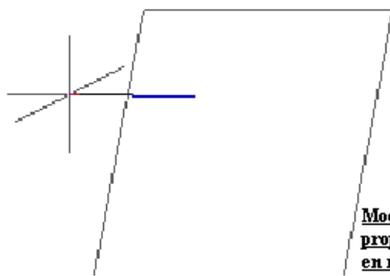
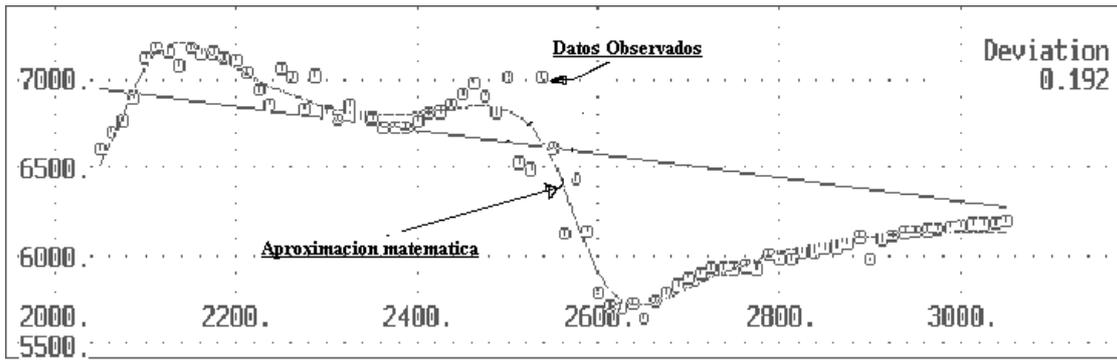
ETAPA IV – PROYECTO HERCULES

GEOLOGIA Y GEOFÍSICA A DETALLE



Levantamiento terrestre a detalle donde indica puntos propuestos de barrenación indica evidencia superficial mineralización - - - indica tendencias y debilidad estructural y ----- indica perfil magnético

Anomalía dipolar llamada aceros, de forma normal, en dirección N – S donde existe bastante cantidad de mineral de hierro que aflora en la superficie, curiosamente correspondiendo al alto magnético, mientras que no existe evidencia mineral sobre el bajo magnético donde su menor intensidad radica en los 45, 500 nT, por lo que se propuso una plantilla de barrenación tipo bolillo, para caracterizar con claridad el alto y bajo magnético. Analizando las distorsiones magnéticas de esta anomalía se encuentran una debilidad estructural de forma consecutiva en el curvoneamiento que se manifiesta en el alto magnético, el cual se encuentra asociado a una estructura de grandes dimensiones a la que le corresponde evidentemente a mineral de hierro encontrando superficialmente mineral de hierro tipo hematita, el cual se encuentra muy fracturado, y a mayor profundidad mineral de hierro tipo magnetita masiva; se presenta material estéril como una andesita porfídica.



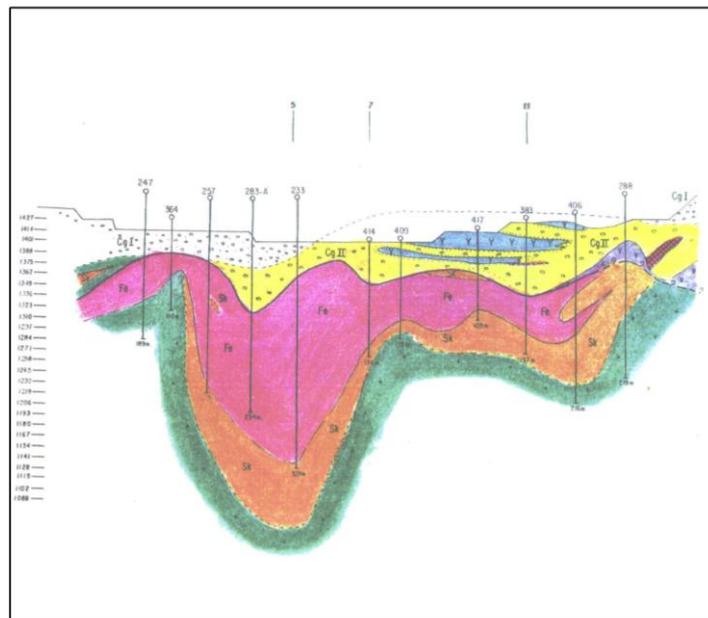
Susceptibility
0.015022

Length Left
250.000

Length Right
250.000

Modelo matematico directo. Area MAR2, Line 2000. Opcion A. Este modelo propone una fuente magnetica de susceptibilidad baja. Parametros del modelo en m212000a.dat

Perfil magnético de la anomalía aceros que actúa como una anomalía dipolar con forma simétrica positiva, donde se caracterizo a partir del análisis geométrico para obtener su profundidad dimensiones, dirección y rumbo del cuerpo magnético mineralizado, donde se infiere que el alto magnético es debido al mineral magnético, así como debilidades estructurales que se asocian a fallas y fracturas, los cuales se sitúan sobre el alto magnético.



Perfil geológico con datos integrados de geología superficial y descripción de núcleo de barrenos, donde se confirma la existencia de fracturas, fallas con mineral de hierro magnético y hematítico, presentando mayor presencia de mineral magnético en todo el cuerpo mineralizado, manifestándose de alta ley a mayor profundidad.

ETAPA IV – PROYECTO HERCULES

CONCEPTUALIZACIÓN DEL MODELO GEOLOGICO

Incorporando el análisis a detalle de todas las anomalías que pasaron a la etapa IV se llegó a la conclusión de que el cuerpo intrusivo, sierra de cruces, fue el primer cuerpo intrusivo, que sirvió como elemento preparador de los eventos geológicos, es decir fracturando las rocas preexistentes y generando en algunas zonas flujos mineralizantes. Posterior a este evento llegó un evento intrusivo de edad más joven el cual traía mayor enriquecimiento de mineral, el cual se fue depositando en las fracturas y debilidades estructurales que causó el primer cuerpo intrusivo de edad más antigua, por lo que el mineral magnético de alta ley se encuentra en la periferia del cuerpo intrusivo sierra de cruces ya que en esa zona se presentó mayor debilidad estructural; manifestando en algunas zonas hidrotermalismo y alteraciones propias del hidrotermalismo como la silicificación entre otras.

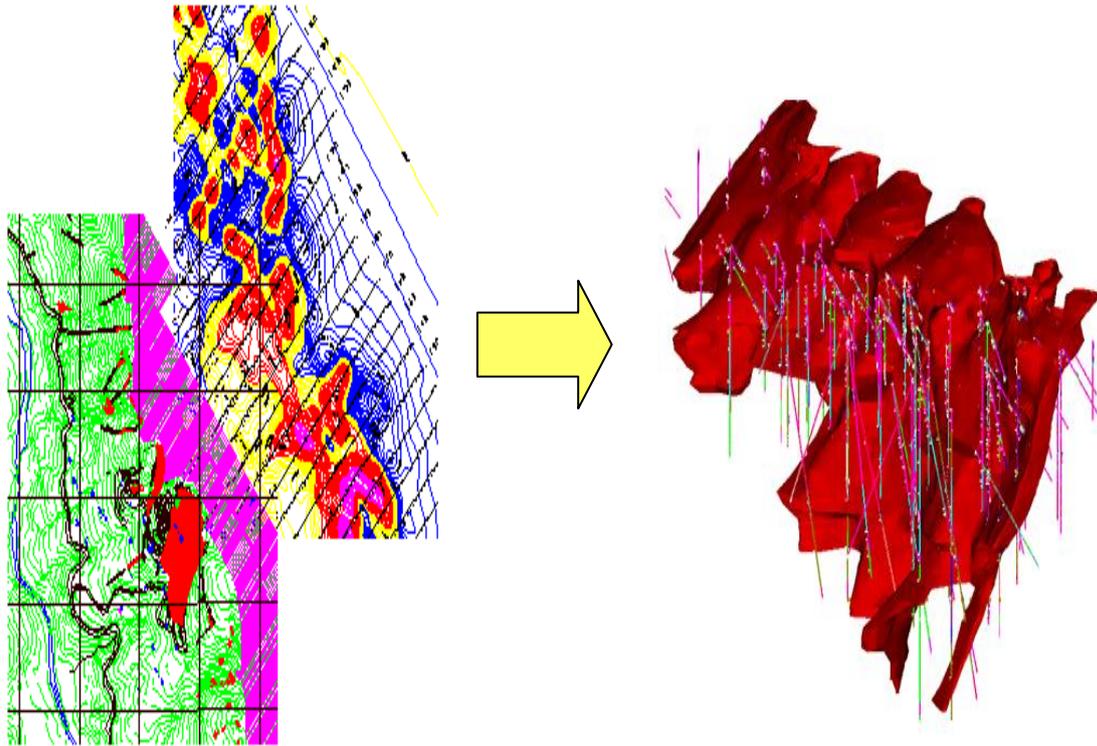
Por lo que la magnetometría es un buen método geofísico que ayuda con claridad a la conceptualización del modelo geológico ya que la magnetométrica se percibe de un enfoque general a particular, donde se puede visualizar en este caso los cuerpos intrusivos y cambios litológicos, así como debilidades estructurales como fallas y fracturas que se asocian a posibles pliegues de ciertas unidades litológicas.

Donde el geofísico tiene que estar conciente de que respuestas similares se asocian a diversos eventos geológicos, es decir, encontrar con claridad que efectos de magnetización se superponen y se enmascaran todas las respuestas, como por ejemplo, un cuerpo con mineral de magnetita diseminado puede marcar un alto contraste de intensidad, sin embargo otro cuerpo mineralizado de magnetita en forma masiva, con una gran presencia de fallas en diversas direcciones o direcciones preferenciales, manifestara una respuesta similar, y para diferenciar estos eventos se puede hacer un tratamiento de señal manifestando la señal de cada uno de esos eventos, sin embargo con el mapeo geológico superficial, si aflora la roca encajonante o alguna evidencia que sirva para caracterizar la respuesta geofísica que será la única forma más certera de interpretar la magnetometría ya sea en planta o en perfil.

ETAPA V – PROYECTO HERCULES

MODELO GEOLÓGICO

Se cita un ejemplo de una anomalía que ha pasado por el análisis de las etapas de exploración donde se aumenta la densidad barrenos.



Información de etapas anteriores

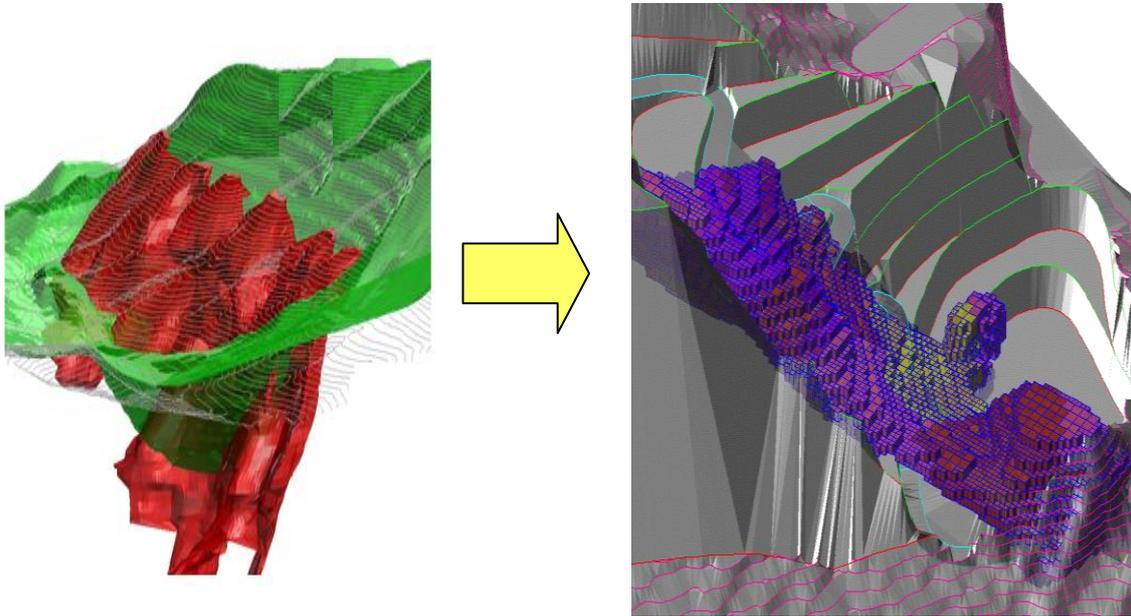
Cuerpo mineralizado con información de barrenos

Con los datos integrados de la anomalía Ulises, se generó un modelo geológico, donde se identificó con claridad las dimensiones del cuerpo mineralizado, donde todas las anomalías se encuentran asociadas a un mismo evento geológico donde la formación del mineral difiere debido a las características de las rocas encajonantes y al sistema de fractura que presenta en cada área, sin embargo en otras anomalías de la concesión minera de Hércules, Coahuila, se presenta de manera similar, es decir, el mineral de hierro hematítico se localiza de manera superficial mientras que el mineral magnético se encuentra a mayor profundidad y de tipo masivo.

La imagen de la derecha es un modelo en 3D del concentrado del mineral, el cual se estimó con software especializado Surpac, donde es importante manejar el concentrado mineral para la etapa VI de exploración debido a que se tiene que brindar información necesaria y enfocada al mineral al departamento de planeación y explotación.

ETAPA VI – PROYECTO HERCULES

MODELO GEOESTADISTICO



Modelo Geológico

Modelo de bloques

La imagen de la izquierda es el modelo geológico que se estimó con el producto de cada una de las etapas de exploración. La imagen de la derecha es el modelo geoestadístico que se estimó a partir de la integración de información basada en geoestadística básica, dominios litogeoquímicos, variogramas, pruebas metalúrgicas y pruebas de diseño. La geoestadística es una herramienta imprescindible para analizar la distribución espacial de las variables litogeoquímicas, a partir de resultados anteriores y de resultados de laboratorio donde incluyen pruebas metalúrgicas, se utilizan métodos de estimación geoestadísticos conocidos como kriging que permite la mejor interpolación para la realización de mapas sobre la distribución del concentrado mineral y la litología.

Como esta etapa es el punto de partida para la planeación de la mina, se tiene que dejar en claro a los ingenieros mineros, como es el comportamiento del mineral, como se encuentra la distribución de la ley del mineral y como se comporta el mineral de hierro, es decir en qué parte se manifiesta magnético y en otras zonas como no magnético, e indicar cuáles son las características físicas de la roca encajonante y la roca de encape, para la planeación de la mina y la explotación de mineral, con la finalidad de explotar la mayor cantidad posible del mineral y considerando siempre la seguridad de los trabajadores de la mina.

Esta etapa es muy importante debido al modelo geoestadístico, ya que es donde se materializa todo el trabajo realizado en exploración mientras se encuentre bien ejecutado con facilidad se obtendrá la certificación de reserva; cabe mencionar que existen varias compañías certificadoras de reservas mineras tales como Netherland & Associates, INC, entre otras.

V CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El trabajo interdisciplinario que se desarrolla en este proceso de exploración en búsqueda del mineral de hierro de alta calidad, deben realizarse desde un inicio los estudios de manera metódica y minuciosa ya que cada materia brinda información clave y fundamental la cual debe ser certera y confiable, si en un principio se tiene información calificada y ordenada será mas sencillo continuar con el estudio interdisciplinario y con resultados efectivos.

La aplicación de métodos potenciales para la búsqueda del mineral de hierro, es decir electromagnética; magnetométrica aérea y terrestre han dado resultados exitosos, debido a las dos propiedades físicas que se comparan y se ligan para dar una mejor interpretación, ya que en esta zona se encontró mineral de hierro mezclado la magnetita con hematita, donde la magnetita es un mineral susceptible a la magnetización y se comporta como un conductor mientras que la hematita es un cuerpo que no es susceptible a la magnetización sin embargo se comporta como un cuerpo conductor, es decir que con la magnetometria es poco probable inferir una mineralización debida a la hematita no obstante con la resistividad obtenida de los métodos electromagnéticos es fácil detectarla debido a su conductividad o resistividad, sin embargo en este informe no se detalla la información del método electromagnético debido a políticas de la empresa.

Es muy importante que en empresas como MIMOSA acceda a que el geofísico efectúe todo el proceso de geofísica, lo cual permite tener siempre en cuenta el objetivo, y con ello considerar cualquier tipo de evento que se presente durante todo el proceso, sobre todo que exista una interacción con la geología para dar mayor significado a la geología a mayor profundidad. Es trascendental que el geofísico conozca el proceso de exploración y esté conciente de la importancia de cada una de las etapas que lo conforman, para saber en cuales se involucra directamente la geofísica y reconocer el alcance y proyección que tiene el resultado de una buena interpretación de la geofísica, ya que con la falta de la geofísica pueden ocurrir errores no solo en la exploración sino también en la explotación, lo cual lleva a costos elevados innecesarios.

El proceso de exploración también ha proporcionado resultados exitosos en otros proyectos del GAN tales como Las pilas, Jalisco; Palos bobos, Michoacán; Cerro del Mercado, Durango; Zaniza, Oaxaca; El patao, Tamaulipas; etc. Debido a las dimensiones de estas concesiones mineras unas zonas se encuentran en exploración, planeación de minado y otras en explotación, por lo que los la objetivo estratégico planteado es muy eficiente para alcanzar el objetivo técnico.

En el caso del proyecto de Hércules Coahuila, la parte norte se encuentra en explotación, donde se sigue suministrado mineral de hierro de alta calidad a la planta de AHMSA, donde los resultados del proceso de exploración han sido exitosos en varios aspectos, primordialmente que se suministra el tonelaje necesario para la fabricación de acero, socialmente hablando en el pueblo minero de Hércules la compañía MIMOSA a beneficiado a los hijos de sus trabajadores con escuela de nivel primaria a preparatoria, así como clínicas medicas exclusiva para sus trabajadores, por mencionar algunos ejemplos.

La parte sur de vuelo de Hércules se encuentra en la etapa IV de exploración donde se han generado una gran cantidad de barrenos, a partir de la correlación geológica geofísica y se siguen obteniendo resultados efectivos con el proceso de exploración.

Donde se ha verificado que la parte sur no es precisamente un cuerpo intrusivo, ya que con los estudios posteriores que se sometió dicha zona y se visualizo que el alto contraste de intensidades es debido al cambio brusco de propiedad física entre un picacho y rocas sedimentarias, calizas, por lo que es necesario la interpretación geológica, es decir solo con respuesta de la geofísica, no es posible encontrar mineral ya sea fierro o yacimientos polimetálicos.

Es necesario saber que este proceso de exploración, se creo a partir de un trabajo profundo lleno de experiencias positivas y negativas que permitieron conocer las ventajas y desventajas de métodos que se aplicaron con anterioridad con los geólogos y geofísicos en tiempos anteriores dentro de minerales Monclova SA de CV, como por ejemplo saber cuales son los métodos geofísicos mas resolutivos para la detección de mineral de fierro y cuales para la búsqueda yacimientos polimetálicos, reconocer cual es el mejor método que correlaciona la información geológica y geofísica que permita conocer las características del cuerpo mineralizadas; a partir de estas respuestas se jerarquizaron resultados para la optimización de resultados.

El proceso de exploración es un método generalizado que ha funcionado de manera exitosa en lugares fuera de Hércules, Coahuila, pero no por ello quiere decir que es un remedio para la detección de un yacimiento mineral. El éxito de cada etapa va a depender de varios factores, a los que les corresponde directamente a las condiciones geológicas del lugar, la experiencia de los geólogos y geofísicos para su interpretación, las posibilidades económicas de la empresa para desarrollar las etapas con tiempos establecidos; así como las condiciones sociales que se encuentre el poblado mas cercano a la localidad para efectuar los trabajos necesarios. El factor mas importante e indiscutiblemente es la condición geológica del lugar, ya que dependiendo de su respuesta y bondad permitirá el avance exitoso en cada etapa.

Cabe comentar que mi participación dentro de este proyecto de Hércules, Coahuila ha sido en etapas posteriores a la exploración es decir, en la re-interpretación de anomalías, donde se dio el caso curioso al perder el cuerpo mineralizante; mientras que mi participación en el proyecto de Tepalcatepec Michoacán ha sido en la etapa III de exploración; dentro del mercado, Durango mi participación ha sido en re- interpretación de anomalías, con el proyecto San Eduardo, ha sido en la etapa I en selección de áreas y procesamiento de datos aeromagnéticos.

VI RECOMENDACIONES

Es muy importante que el Ingeniero Geofísico que se encuentre encaminado a la exploración siempre considere los siguientes puntos para consolidarse como un excelente profesionalista

- Conocer la importancia de cada método geofísico y su proceso (adquisición, procesamientos, interpretación así como las propiedades físicas de las rocas y minerales); es decir, la propiedad física que se está midiendo, el alcance que brinda para la geología, que efectos pueden causar ruido a la señal, así como conocer que tipo de método ha sido más resolutivo en ciertos objetivos.

- Ejecutar los levantamientos de geofísica con la mayor exactitud posible; es decir, considerar aspectos que se requieren para un buen levantamiento (método, dirección del levantamiento, estaciones, ruido, en caso de fuente natural considerar el valor promedio del lugar, etc.)

- Conocer el tipo de procesamiento que requiere según el método y distinguir entre las correcciones y el tratamiento de la señal geofísica; donde las correcciones se enfatiza la señal “eliminando” efectos no deseables o que impiden ver la señal con claridad; y el tratamiento de la señal es el tipo de filtrado que nos puede brindar mayor información sobre el área, considerando que con ello se puede caracterizar estructuras, estimando sus características geométricas y su propiedad física.

- Conocer varios métodos de interpretación por ejemplo para el modelado matemático de perfiles magnéticos y no casarse con uno solo, por así decirlo, sino más bien utilizar el método más apropiado al tipo de señal que se obtenga e incluso si se cuenta con tiempo disponible aplicar varios métodos solo con la finalidad de comprobar dichas interpretaciones.

- Considerar que la interpretación se encuentra totalmente ligada con la Geología ya que son las condiciones de frontera del problema ya que nos permite definir con claridad el objetivo, en este caso la magnetometría no definirá los yacimientos minerales sino encontraremos estructuras que se encuentren ligadas a rocas intrusivas y sedimentarias que con su interacción (metasomatismo de contacto, zonas de hidrotermalismo, fallamiento, etc.) dan lugar a la mineralización.

- Expresar con sinceridad el alcance de la geofísica y del geofísico; es decir que tan resolutivo puede ser un método según el objetivo; con las condiciones y características que presente el lugar y en caso del geofísico que si la adquisición de datos es defectuosa, el procesamiento y la interpretación así será; sin embargo no por el hecho de que se tenga un buen levantamiento quiere decir que la interpretación así será, esto depende de la calidad del procesado; por lo que es muy importante conocer la geología del lugar para dar la interpretación con un enfoque geológico siempre.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCIAS

- PARASNIS D.S; GEOFISICA MINERA, editorial paraninfo, Madrid, 1971
- LOGACHEV A.A. Y ZAJAROV V. P EXPLORACION MINERA; editorial reverté sa, Barcelona 1978
- CANTOS FIGUEROLAS, JOSE; TRATADO DE GEOFISICA APLICADA; editorial, ciencia-industria, S.L
- SLEEP NORMAN H.; FUJITA KAZUYA, PRINCIPLES OF GEOPHISICS Blckwell Science 1997
- ANAYA RENOVATO CARLOS; GARCIA ABDESLEM JUAN INTERPRETACION MAGNETOMÉTRICA MEDIANTE TÉCNICAS DE FOURIER EN LA REGION DE PEÑA COLORADA Tesis UNAM Facultad de ingeniería México, D.F. 1979
- FLORES ARREDONDO CESAR; SANCHEZ QUIROZ SAUL, LA MAGNETOMETRIA Y LA GRAVIMETRIA APLICADA A LA EXPLORACION FERRIFERA EN EL PROSPECTO LAZARO CARDENAS, MICHOACAN Tesis IPN Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura México, D.F. 1980
- LASFARGUES PIERRE; MAGNETISMO EN GEOLOGIA Y PROSPECCION MAGNETICA TERRESTRE; Instituto Politécnico Nacional México, 1995.
- JANKOWSKI, JERZY., SUCKSDORFF CHRISTIAN; GUIDE FOR MAGNETIC MEASUREMENTS AND OBSERVATORY PRACTICE; Warsaw 1996.
- WALTER T. HUANG, PH. D; PETROLOGIA; editorial unión tipográfica hispanoamericana, España 1968.
- REYNOLDS J, AN INTRODUCTION TO APPLIED AND ENVIRONMENTAL GEOPHISICS, John Wiley & Sons, Book co.
- TELFORD, W., L. GELDART, R. SHERIFF; APPLIED GEOPHYSICS, Cambridge University Press, Book Co.
- SABINS, FLOYD, F. REMOTE SENSING, PRINCIPLES AND INTERPRETATION, third edition, editorial Freeman 1997.
- <http://www.fugroairborne.com>
- <http://www.coremisgm.gob.mx>
- <http://www.scintrex.com>
- <http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/Declination.jsp>

- <http://www.science.smith.edu/departments/Geology/Skarn/>
- <http://204.98.1.2/isu/science/9earth/maganimation.html>
- <http://www.geofisica.unam.mx/~cecilia/cursos/DinInt1b.pdf>