



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS
AEROMAGNÉTICOS EN LA REGIÓN MINERA DE
BUENAVISTA DE CUÉLLAR,
ESTADO DE GUERRERO, MÉXICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

ESTRADA MARÍN JUAN CARLOS

DIRECTOR DE TESIS: DR. TOMÁS GONZÁLEZ MORÁN



CIUDAD UNIVERSITARIA
MÉXICO, D. F.

2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Me permito expresar en primer lugar mi franco agradecimiento al Dr. Tomás González Morán por la asesoría que me brindó para realizar el presente trabajo de tesis, así como por proporcionarme los datos magnéticos necesarios para su realización, junto con un espacio físico con equipo de cómputo, y por su apoyo para tener acceso al material de la Biblioteca Conjunta de Ciencias de la Tierra, de nuestra Universidad.

También manifiesto mi agradecimiento a Alejandro H. Ramírez Guzmán, de la Universidad Autónoma de Guerrero, quien me proporcionó la información topográfica del área de estudio y me enseñó a manejarla con agilidad. Además, me facilitó información de carácter geológico mediante boletines y revistas especializadas, permitiéndome así aumentar mi entendimiento de la zona de estudio y avanzar en el desarrollo de mi trabajo.

Fuera del ambiente académico, a nivel de amistad y familiar, debo dar gracias a un amplio grupo de personas, cuya relación personal conmigo, me ha permitido concluir la carrera y con ello alcanzar uno de mis objetivos personales.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

| | |
|----------------------------------|---|
| I.1 NATURALEZA DEL PROBLEMA | 1 |
| I.2 OBJETIVO GENERAL | 3 |
| I.3 OBJETIVOS PARTICULARES | 4 |
| I.4 ALCANCE DEL TRABAJO DE TESIS | 4 |

CAPÍTULO II

TEORÍA BÁSICA DEL MÉTODO MAGNETOMÉTRICO

| | |
|---|----|
| II.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 7 |
| II.1.1 Fuerza entre Polos Magnéticos | 8 |
| II.1.2 Campo Magnético de un Dipolo | 8 |
| II.1.3 Inducción Magnética y Magnetización Inducida | 10 |

| | | |
|---------------|--|----|
| II.1.4 | Momento Magnético y Magnetización Inducida | 13 |
| II.1.5 | Susceptibilidad Magnética | 14 |
| II.1.6 | Diamagnetismo, Paramagnetismo y Ferromagnetismo | 15 |
| II.1.6.1 | Diamagnetismo | 15 |
| II.1.6.2 | Paramagnetismo | 15 |
| II.1.6.3 | Ferromagnetismo | 16 |
| II.1.7 | Magnetización Remanente | 18 |
| II.1.8 | Demagnetización | 20 |
| II.1.9 | Sistema de Unidades | 21 |
| | | |
| II.2 | CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE | 22 |
| II.2.1 | Elementos y Componentes del Campo Magnético Terrestre | 22 |
| II.2.2 | El Campo Magnético Principal, su Variación Secular e Inversiones de Polaridad | 23 |
| II.2.3 | El Campo Magnético Externo, su Variación Diurna y Tormentas Magnéticas | 25 |
| II.2.4 | El Campo Magnético Anómalo | 25 |
| II.2.5 | Monitoreo del Campo Geomagnético | 26 |
| | | |
| II.3 | ADQUISICIÓN, CORRECCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS | 29 |
| II.3.1 | Adquisición y Corrección de Datos Aeromagnéticos | 29 |
| II.3.2 | Interpretación de Datos Magnetométricos | 30 |
| II.3.2.1.- | Interpretación Cualitativa | 31 |
| II.3.2.2.- | Interpretación Cuantitativa | 32 |
| II.3.2.3.- | Reducción al Polo | 33 |

CAPÍTULO III
MARCO GENERAL
DEL ÁREA DE ESTUDIO

| | |
|---|----|
| III.1 RASGOS GEOGRÁFICOS | 35 |
| III.1.1 Ubicación Geográfica del Área de Estudio | 35 |
| III.1.2 Infraestructura Carretera | 36 |
| III.1.3 Orografía | 37 |
| III.1.4 Hidrografía | 38 |
| | |
| III.2 RASGOS GEOLÓGICOS | 41 |
| III.2.1 Ubicación Tectonoestratigráfica del Área de Estudio | 41 |
| III.2.2 Estratigrafía del Terreno Mixteco | 41 |
| III.2.3 Formaciones del Terreno Mixteco | |
| en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar | 43 |
| III.2.3.1 Esquisto Taxco (Rocaverde Taxco Viejo) | 43 |
| III.2.3.2 Formación Morelos | 47 |
| III.2.3.3 Formación Mexcala | 48 |
| III.2.3.4 Formación Balsas | 49 |
| III.2.3.5 Riolita Tilzapotla | 51 |
| III.2.3.6 Andesita Buenavista | 52 |
| III.2.3.7 Aluvión | 53 |
| III.2.3.8 Cuerpos Intrusivos | 53 |
| III.2.4 Litología y Estructuras Geológicas en el Área de Estudio | 55 |
| | |
| III.3.-YACIMIENTOS MINERALES | 57 |
| III.3.1 Yacimientos de Fierro | 58 |
| III.3.1.1 Ubicación y Acceso | 58 |
| III.3.1.2 Forma, Dimensiones y Mineralogía | 60 |

| | |
|--|----|
| III.3.1.3 Estructuras Locales | 61 |
| III.3.1.4 Origen y Características de los Yacimientos | 62 |
| III.3.2 Yacimientos de Plata | 62 |
| III.3.2.1 Ubicación y Acceso | 62 |
| III.3.2.2 Forma, Dimensiones y Mineralogía | 64 |
| III.3.2.3 Estructuras Locales | 65 |
| III.3.2.4 Origen y Características de los Yacimientos | 65 |
| | |
| III.4 DATOS GEOFÍSICOS | 66 |
| III.4.1 Fuente de los datos aeromagnéticos | 66 |
| III.4.2 Parámetros y equipos utilizados en el levantamiento | 66 |
| III.4.3 Procesamiento de Datos Aeromagnéticos | 68 |
| III.4.4 Interpretación Cualitativa de Carácter Regional del Consejo de Recursos Minerales | 68 |

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

| | |
|--|----|
| IV.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS | 73 |
| IV.2 REDUCCIÓN AL POLO DEL CAMPO MAGNÉTICO OBSERVADO | 77 |
| IV.3 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA | 79 |
| IV.4 INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA | 81 |
| IV.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 92 |

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES
Y RECOMENDACIONES

| | |
|----------------------------|----|
| V.1 CONCLUSIONES | 95 |
| V.2 RECOMENDACIONES | 97 |

BIBLIOGRAFÍA

| | |
|---------------------|----|
| BIBLIOGRAFÍA | 99 |
|---------------------|----|

APÉNDICE 1

| | |
|--|-----|
| Sistema Internacional de Unidades | 107 |
|--|-----|

APÉNDICE 2

| | |
|---|-----|
| Ecuaciones Fundamentales para la Reducción al Polo de Datos Magnéticos | 109 |
|---|-----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1 – I.1 Ubicación preliminar del área de estudio.</i> | 3 |
| <i>Figura 2 – II.1.2 Representación esquemática de un dipolo magnético.</i> | 9 |
| <i>Figura 3 – II.1.3 Densidad de flujo magnético.</i> | 12 |
| <i>Figura 4 – II.1.6.3 Ciclo de histéresis de magnetización.</i> | 17 |
| <i>Figura 5 – II.2.1 Elementos del campo geomagnético.</i> | 22 |
| <i>Figura 6 – II.2.2 Inversiones de polaridad del campo geomagnético.</i> | 24 |
| <i>Figura 7 – II.2.5 Intensidad del Campo Magnético Principal (Jankowski et al., 1996).</i> | 27 |
| <i>Figura 8 – II.2.5 Inclinación del Campo Magnético Principal (Jankowski et al., 1996).</i> | 27 |
| <i>Figura 9 – II.2.5 Declinación del Campo Magnético Principal (Jankowski et al., 1996).</i> | 28 |
| <i>Figura 10 – III Topografía de la zona y principales rasgos geográficos.</i> | 39 |
| <i>Figura 11 – III.2.2 Columna Geológica (CRM, 1999-(b)).</i> | 42 |
| <i>Figura 12 – III.2.3 Región Minera de Buenavista de Cuéllar (CRM, 1999-(b)).</i> | 45 |
| <i>Figura 13 – III.2.4 Litología del área de estudio (INEGI, 1988-(a) y (b)).</i> | 56 |
| <i>Figura 14 – III.3.1.1 Detalle de la ubicación de los yacimientos de fierro (Corona-Esquivel, 1978).</i> | 59 |
| <i>Figura 15 – III.3.2.1 Detalle de la ubicación de los yacimientos de oro y plata (Carrizales-Aguillar, 1997).</i> | 63 |
| <i>Figura 16 – III-4-1 Mapa de anomalías magnéticas de campo total (CRM, 2001).</i> | 67 |
| <i>Figura 17 – III.4.4 Interpretación cualitativa de la carta magética E14-5 (Alam-Hernández et al., 2001).</i> | 69 |
| <i>Figura 18 - IV.1 Mapa de anomalías magnéticas de campo total.</i> | 75 |
| <i>Figura 19 - IV.2 Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo.</i> | 78 |
| <i>Figura 20 – IV.4 Zonas prospectivas seleccionadas con potencial de contener nuevos cuerpos con mineralización metálica.</i> | 83 |
| <i>Figura 21 – IV.4 Modelo geológico del perfil A-A'.</i> | 86 |
| <i>Figura 22 – IV.4 Modelo geológico del perfil B-B'.</i> | 88 |
| <i>Figura 23 – IV.4 Modelo geológico del perfil C-C'.</i> | 91 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| <i>Tabla 1 – II.1.5 Rango de susceptibilidad magnética de algunos tipos de roca.</i> | 14 |
| <i>Tabla 2 – II.3.2.1 Pautas para la interpretación cualitativa de perfiles y mapas magnéticos.</i> | 32 |
| <i>Tabla 3 – III.1.3 Orografía.</i> | 38 |
| <i>Tabla 4 – III.3 Minas y Prospectos de Interés en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar.</i> | 58 |
| <i>Tabla 5 – IV.3 Rango de susceptibilidades magnéticas asignadas a los bloques de las unidades litoestratigráficas presentes.</i> | 82 |
| <i>Tabla 6 – IV.4 Leyenda de bloques que representan unidades litológicas en el modelo geológico del perfil A-A'.</i> | 86 |
| <i>Tabla 7 – IV.4 Leyenda de bloques que representan unidades litológicas en el modelo geológico del perfil B-B'.</i> | 89 |
| <i>Tabla 8 – IV.4 Leyenda de bloques que representan unidades litológicas en el modelo geológico del perfil C-C'.</i> | 91 |

RESUMEN

Mediante el análisis e interpretación de los datos aeromagnéticos del área de estudio, ubicada en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar, en el estado de Guerrero, se infirió en el subsuelo la presencia de cuatro cuerpos plutónicos de composición ácida, que podrían estar asociados a cuerpos de mineralización metálica, constituyendo dos zonas prospectivas.

La primera zona se ubica a unos 4 Km al sur y sureste de los yacimientos de fierro de Buenavista de Cuéllar, donde las anomalías magnéticas reducidas al polo presentan valores de 170 nT y 260 nT respectivamente; en ésta se espera magnetita como mineral de mena, en un yacimiento de tipo metasomático. La segunda zona prospectiva, se extiende de 2 a 4 Km en las direcciones este y oeste, con respecto al cuerpo intrusivo de Coxcatlán, presentando el campo magnético reducido al polo, en ambos extremos, un valor de 40 nT, y un valor de 60 nT sobre el cuerpo plutónico aflorante; esta zona tiene posibilidad de contener cuerpos de mineral de plata con mena de origen hidrotermal.

Como parte de la interpretación se elaboraron tres modelos geológicos de carácter bidimensional, cuidando que fueran congruentes entre sí, que contuvieran las anomalías magnéticas de interés y las zonas prospectivas seleccionadas; y que lograran satisfacer, de la mejor manera posible para mí como intérprete, los datos geográficos, geológicos, mineros y magnéticos del área estudiada.

Finalmente, se incluye una síntesis de la teoría básica del método magnetométrico, con el fin de entender y justificar el uso de los procedimientos empleados en el desarrollo del presente trabajo de tesis.

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

I.1 NATURALEZA DEL PROBLEMA

Los yacimientos de fierro de Buenavista de Cuellar, localizados al norte del estado de Guerrero, prácticamente entre Taxco e Iguala, han motivado su estudio con el fin de entenderlos y aprovecharlos. La ubicación preliminar de esta zona, que constituirá el área de estudio, se presenta en la figura 1. Se sabe que en 1958, la compañía ERVYT instaló una pequeña fundición que trabajó en pequeña escala durante poco tiempo. Se tiene noticia también, que la fundidora Monterrey hizo un estudio del cuerpo conocido como El Capire. Por su parte Fries (1960) menciona, sin describirlo el mineral de fierro de Buenavista de Cuéllar.

En años recientes, Ramírez (1974) efectuó para Altos Hornos de México, S. A., un estudio preliminar del yacimiento “La Sorpresa”. Hacia fines de 1977, el Consejo de Recursos Minerales (CRM) se interesó en el yacimiento y realizó un reconocimiento geológico, de cuyo desarrollo se encargó el Ing. Enrique García

Sagredo. Posteriormente en 1978, el Ing. Rodolfo Corona Esquivel, de esta misma institución, fue comisionado para efectuar un estudio geológico y magnetométrico de las áreas del Capire y la Sorpresa, en el que estima reservas por 7,418,000 Toneladas. Finalmente, Aviléz Moreno (1989), retomó la zona para desarrollar el tema de tesis de licenciatura “Skarn asociado a los yacimientos de fierro de la Sorpresa y el Capire en el Municipio de Buenavista de Cuéllar, Guerrero”.

Por otro lado, el Consejo de Recursos Minerales (CRM) a través de su programa de Infraestructura Geológico-Minera, realiza el cubrimiento aeromagnético sistemático de las áreas con mayor potencial minero en el territorio nacional, con el propósito de proporcionar a los usuarios de esta institución la información que permita estudiar en forma indirecta las condiciones geológicas y estructurales del subsuelo que conlleven a seleccionar zonas prospectivas, para la búsqueda y descubrimiento de nuevos depósitos de yacimientos minerales ocultos. Parte del fruto de este programa, se tiene en un conjunto de cartas magnéticas de campo total en escala 1:250,000. Cabe destacar que esta institución cambió su nombre a Servicio Geológico Mexicano, por decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación el jueves 28 de abril del 2005 (SGM, 2005), sin embargo, en este trabajo de tesis nos referiremos a ella con su antigua denominación, es decir, CRM.

Es bajo este contexto, donde surge la inquietud y la oportunidad de desarrollar el presente trabajo de tesis profesional, como parte de mi formación como Ingeniero Geofísico, orientada a la exploración de yacimientos minerales en el territorio nacional, aportando un estudio magnetométrico de carácter regional, que complemente y contribuya al conocimiento de la región minera de Buenavista de Cuéllar, enfocado particularmente a la prospección y/o exploración de yacimientos de minerales metálicos. Esta intención resulta válida por el hecho de que en la explotación de los yacimientos minerales se requiere localizar nuevos recursos para reemplazar los que ya han sido extraídos del subsuelo.

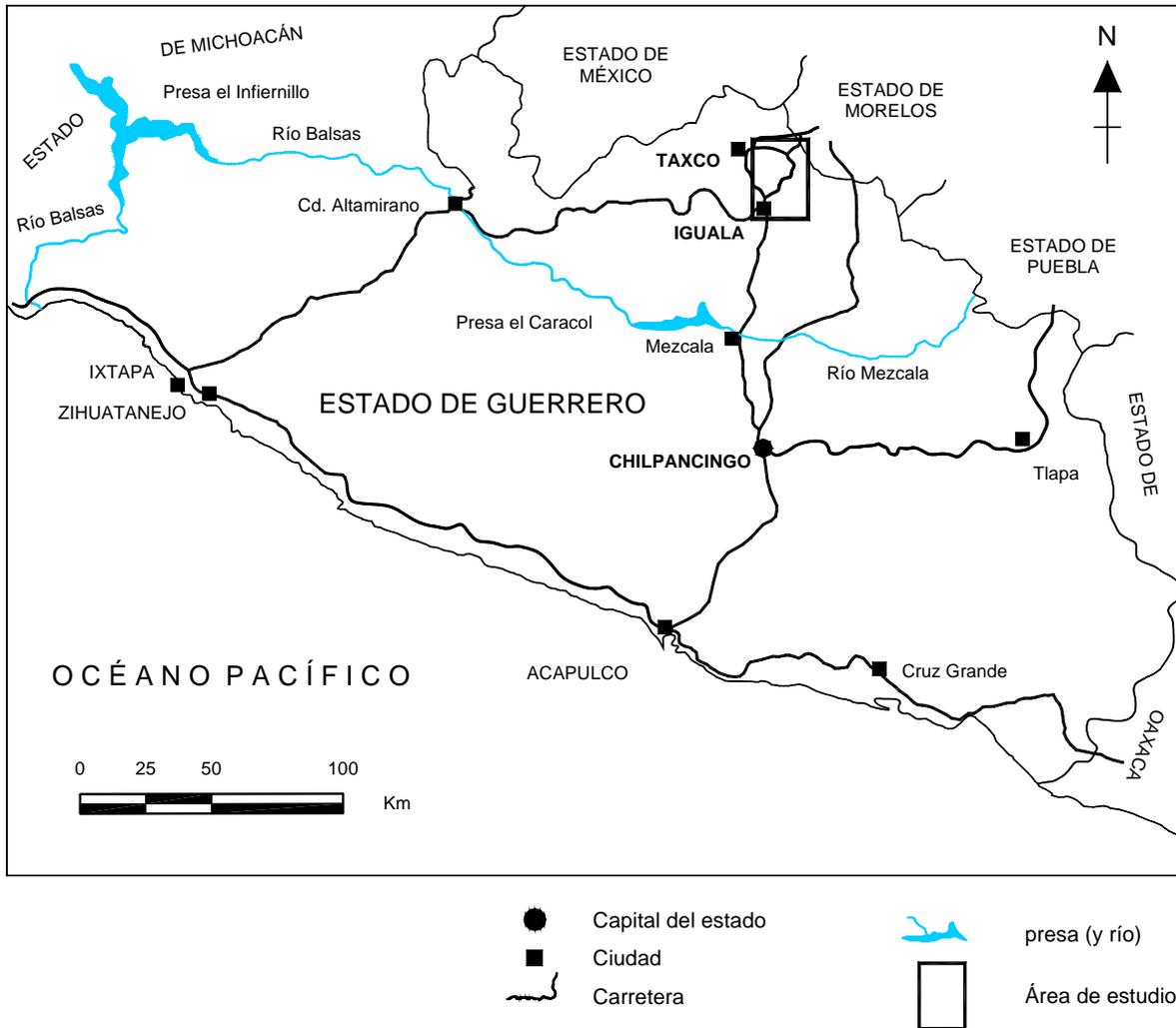


Figura 1 – I.1 Ubicación preliminar del área de estudio.

I.2 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al conocimiento de la Región Minera de Buenavista de Cuéllar mediante el análisis e interpretación de datos aeromagnéticos, orientado a definir zonas prospectivas con posibilidad de contener nuevos cuerpos de mineralización metálica.

I.3 OBJETIVOS PARTICULARES

Como objetivos particulares a la interpretación referida en el objetivo general, se establecieron los siguientes:

- Correlacionar los datos aeromagnéticos con las distintas unidades litoestratigráficas que afloran en el área de estudio, así como con las estructuras geológicas visibles, incluyendo los yacimientos conocidos de minerales metálicos.
- Identificar rasgos geológicos ocultos, de carácter estructural o litológico, y estimar si éstos pudieran estar asociados a uno o varios cuerpos con mineralización metálica.
- Estimar, a partir de la interpretación de los datos aeromagnéticos, la ubicación, profundidad, extensión y estructura de los cuerpos conocidos con mineralización metálica.
- Definir, a partir de la interpretación de los datos aeromagnéticos, zonas prospectivas que incluyan la ubicación, profundidad y estructura de los cuerpos inferidos con mineralización metálica.

I.4 ALCANCE DEL TRABAJO DE TESIS

En este trabajo de tesis se pretende satisfacer el objetivo general, junto con sus objetivos particulares, considerando la teoría básica del método magnetométrico. La interpretación mencionada, será realizada de tal manera, que los resultados satisfagan de la mejor manera posible, para mí como interprete, los antecedentes geográficos, geológicos, mineros y geofísicos de la superficie en estudio.

En consecuencia, enseguida a este capítulo introductorio se integran los siguientes capítulos:

- Capítulo II Teoría Básica del Método Magnetométrico.
Contiene una síntesis de los principios fundamentales del método de prospección, de las características del campo geomagnético, de la adquisición de datos aeromagnéticos y las correcciones que se les deben aplicar, así como los principios para la interpretación cualitativa y cuantitativa de datos magnetométricos.
- Capítulo III Marco General del Área de Estudio.
Comprende la definición precisa del área a tratar, así como la descripción de sus características geográficas, geológicas, mineras y geofísicas.
- Capítulo IV Análisis e Interpretación de los Datos Aeromagnéticos del Área de estudio.
Trata el análisis de los datos magnéticos observados, así como su interpretación cualitativa y cuantitativa, culminando con los resultados generados a partir del presente estudio e indicando cuales son sus aportaciones.
- Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones.
Expone de manera sistemática y concisa, el desenlace y consecuencias importantes del presente trabajo de tesis.

Concluyo el presente capítulo citando a Reedman (1979):

“La interpretación geofísica no puede ser automatizada y una buena interpretación dependerá siempre del interprete, el cual deberá tener buen conocimiento de la geología del área y un conocimiento completo de la aplicación y limitaciones de las técnicas matemáticas empleadas.”

CAPÍTULO II

TEORÍA BÁSICA DEL MÉTODO MAGNETOMÉTRICO

II.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los primeros fenómenos magnéticos observados estaban relacionados, sin duda, con los llamados imanes naturales, que son trozos de un mineral de hierro encontrado junto a la antigua ciudad de Magnesia (de donde viene el término magnético). Estos imanes naturales tienen la propiedad de atraer el hierro no imantado, siendo el efecto más pronunciado en ciertas regiones del imán llamadas polos. Todo imán posee un polo positivo y un polo negativo, y se les nombró así por los efectos opuestos en los polos de otro imán. Era conocido por los chinos, antes del año 121 de nuestra era, que una barra de hierro, después de haber sido colocada cerca de un imán natural adquiría y conservaba esta propiedad de los imanes naturales, y que si dicha barra se suspendía libremente de modo que pudiera girar alrededor de un eje vertical se colocaba aproximadamente en la dirección norte-sur.

II.1.1 Fuerza entre Polos Magnéticos

Los polos magnéticos siempre existen en pares de polaridad opuesta para formar un dipolo magnético. Si dos polos magnéticos de intensidad m y m' están separados por una distancia r , existe entre ellos una fuerza (\bar{F}), que será de repulsión o de atracción. La fuerza de repulsión se presenta cuando los polos tienen la misma polaridad, mientras que la fuerza de atracción ocurre cuando los polos poseen polaridades opuestas. Matemáticamente este fenómeno se expresó mediante la siguiente relación:

$$\bar{F} = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{m m'}{r^2} \hat{r} \quad (1 - II.1.1)$$

donde μ es la permeabilidad magnética absoluta del medio que separa los polos.

El concepto de dipolo magnético es básico para el entendimiento del comportamiento magnético de la materia, cuyas dimensiones comprenden desde pequeñas partículas magnéticas hasta la Tierra entera (Sharma, 1986).

II.1.2 Campo Magnético de un Dipolo

Como una barra magnética (un dipolo) tiene la capacidad de ejercer una fuerza sobre otros imanes u objetos de hierro no imantados sin tener contacto físico, se dice que está rodeada por un "campo de fuerza", el cual es llamado Campo Magnético.

Para un polo magnético de intensidad m , el campo magnético (\bar{H}) en un punto del medio se puede definir como la fuerza ejercida sobre un polo magnético de prueba de intensidad unitaria m' colocado en dicho punto, por unidad de

intensidad de polo magnético. Por lo que considerando la expresión matemática que define la fuerza entre dos polos, tenemos que el campo magnético queda expresado de la siguiente manera:

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m''} = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{m \hat{r}}{r^2} \quad (2 - II.1.2)$$

El campo magnético es representado convenientemente por “líneas de fuerza” y la intensidad del campo es representada por la densidad de estas líneas o por el número de líneas por unidad de área en una sección perpendicular a su dirección.

Para nuestro dipolo, es posible obtener la representación de su campo magnético mediante el cálculo de las fuerzas asociadas a cada uno de sus polos y posteriormente sumarlos vectorialmente. Las fuerzas resultantes de esa suma vectorial, indican la dirección del campo magnético y en consecuencia definen las líneas de fuerza. Así, a través de este procedimiento, se puede obtener su representación esquemática mostrada en la figura 2.

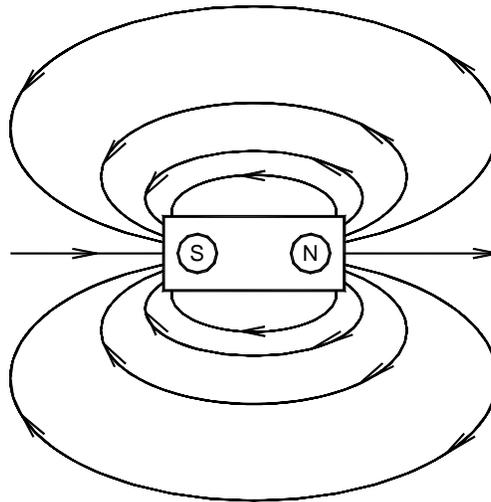


Figura 2 – II.1.2 Representación esquemática de un dipolo magnético.

II.1.3 Inducción Magnética y Magnetización Inducida

El hecho de que una barra de hierro no imantada, “suspendida” en el aire y con libertad de girar al rededor de un eje vertical, se oriente aproximadamente en la dirección norte-sur después de haber sido colocada cerca de un imán natural, se debe a que este último induce un campo magnético a la barra de hierro, es decir, la barra se magnetiza; y a que esta barra ya magnetizada se encuentra dentro del campo magnético de la Tierra, el cual posee una configuración muy parecida a la de un dipolo magnético localizado en el centro de la Tierra, con sus líneas de campo orientadas aproximadamente en la dirección norte-sur.

La intensidad de un campo magnético da lugar a un flujo magnético, así como la intensidad de un campo eléctrico da lugar a un flujo de carga eléctrica (corriente). La densidad de flujo magnético, esto es el flujo por unidad de área, también llamada Inducción Magnética, es indicada por B . Si H es la intensidad del campo, entonces

$$B = \mu H \quad (3 - II.1.3)$$

donde μ es la permeabilidad magnética absoluta del medio.

En la práctica, la permeabilidad magnética del agua y del aire pueden considerarse iguales a la permeabilidad magnética del vacío, indicada con el símbolo μ_0 y cuyo valor es $4\pi \times 10^{-7}$ [Wb/(A*m)]. Para cualquier otro medio distinto al vacío, la proporción de permeabilidades de ese medio con respecto a la del vacío define la permeabilidad relativa μ_r de ese medio y en consecuencia es adimensional, así tenemos que:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4 - II.1.3)$$

Con el fin de visualizar en el vacío (en el aire) la magnetización de un medio cualquiera distinto al vacío y su efecto en la densidad de flujo del campo magnético, permitámonos considerar el siguiente artificio; sumar y restar la permeabilidad magnética del vacío a la permeabilidad magnética absoluta de nuestro medio general de interés, es decir:

$$B = (\mu + \mu_0 - \mu_0)H \quad (5 - \text{II.1.3})$$

$$B = \mu H + \mu_0 H - \mu_0 H \quad (6 - \text{II.1.3})$$

pero de la definición de permeabilidad relativa tenemos que: $\mu = \mu_r \mu_0$

$$B = \mu_r \mu_0 H + \mu_0 H - \mu_0 H \quad (7 - \text{II.1.3})$$

y agrupando convenientemente:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 (\mu_r - 1)H \quad (8 - \text{II.1.3})$$

haciendo $\mu_r - 1 = k$, tenemos:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 k H \quad (9 - \text{II.1.3})$$

$$B = \mu_0 (H + k H) \quad (10 - \text{II.1.3})$$

En esta ecuación vemos que la Densidad de Flujo Magnético Total en el vacío es producida por el campo magnético inductor (H), sumado a un campo magnético adicional de intensidad kH , el cual es llamado Magnetización Inducida o simplemente Magnetización (M), así,

$$M = k H \quad (11 - \text{II.1.3})$$

donde k se conoce como Susceptibilidad Magnética y es adimensional; además, M es paralelo y proporcional a H , ya que B es colineal y proporcional a H .

Finalmente, considerando lo anterior y que tanto B como H son vectores, tenemos que la Densidad de Flujo Magnético Total queda expresada más generalmente como:

$$\bar{B} = \mu_0 \left(\bar{H} + \bar{M} \right) \quad (12 - II.1.3)$$

De la teoría tratada hasta aquí, es posible ver que la Densidad de Flujo Magnético (\bar{B}) se distorsiona en el espacio donde coexisten el campo magnético inductor (\bar{H}) con el campo magnético inducido (\bar{M}) al cuerpo que fue magnetizado por el campo magnético inductor (\bar{H}), quedando el campo magnético total representado por la Densidad de Flujo Magnético (\bar{B}).

Con el fin de visualizar lo anterior, consideremos una sustancia ferromagnética colocada en el campo magnético uniforme representado en la figura 3 - (a). Tan pronto como se ha introducido la muestra, el campo se deforma grandemente, siendo, en cada punto, la resultante del campo magnético inicial y del campo magnético inducido (fig. 3 - (b)).

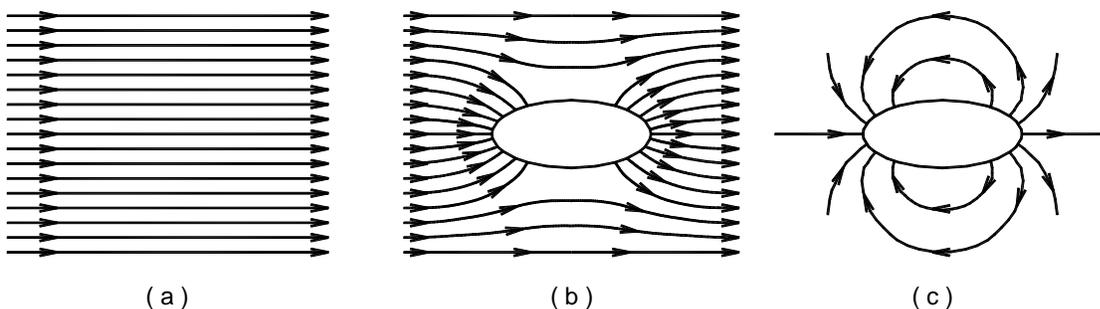


Figura 3 – II.1.3 Densidad de flujo magnético.

- (a) Campo magnético inicial uniforme.
- (b) Campo después de introducir una muestra de hierro.
- (c) Campo de una muestra imantada permanentemente.

Al separar la muestra de hierro del campo, desaparecerá el campo magnético inducido si el hierro no presenta histéresis, pero ordinariamente existe histéresis, y el hierro se convierte en un imán permanente con un campo magnético como el representado en la figura 3 – (c). Si se mide la densidad de flujo en varios puntos, fuera de la muestra, se encontrará que es muy pequeña en los puntos próximos al centro y grande junto a los dos extremos. El campo magnético creado en el espacio que rodea a la muestra aparece como si la causa del magnetismo estuviera concentrada en los extremos. En efecto, antes que se hubieran descubierto las relaciones entre los fenómenos eléctricos y los magnéticos, se supuso que el magnetismo era debido realmente a masas magnéticas o a polos magnéticos, según fueron denominados. A pesar de que no se cree en la existencia de masas magnéticas, es cómodo, sin embargo, en muchos ejemplos hacer uso del concepto de polos magnéticos y calcular el campo producido por un cuerpo imantado, utilizando los polos en vez de las corrientes eléctricas.

II.1.4 Momento Magnético y Magnetización Inducida

Un cuerpo dipolar que ha sido colocado dentro de un campo magnético \bar{H} , experimenta una fuerza que lo hace rotar hasta quedar alineado con el campo. El fenómeno de rotación se asocia a un concepto denominado Momento Magnético \overline{mm} , el cual se define como el producto de las intensidades de los polos magnéticos del cuerpo por la distancia que los separa; y se utilizó para definir a la Magnetización Inducida (\bar{M}) de un cuerpo sólido como el momento magnético por unidad de volumen V .

$$\bar{M} = \frac{\overline{mm}}{V} \quad (13 - II.1.4)$$

II.1.5 Susceptibilidad Magnética

La susceptibilidad magnética k , en esencia, es una medida de la facilidad con que un material puede ser magnetizado. Como tal, es un parámetro muy importante ya que es un factor de peso en la polarización (magnetización) de las rocas. Matemáticamente esta importancia se puede apreciar en las ecuaciones 11 y 10, donde se definen la magnetización (\bar{M}) y como esta contribuye en la Densidad de Flujo Magnético (\bar{B}) que representa el campo magnético total.

Los valores de susceptibilidad para las rocas y los minerales varían en un amplio rango, dependiendo de la intensidad del campo magnético empleado para medirlos, así como del contenido de magnetita y de ilmenita, e inclusive del tamaño de los granos que la constituyen.

En la tabla 1, se presentan, racionalizados al SI, los valores de susceptibilidad medidos en las muestras de algunos tipos de roca.

*Tabla 1 – II.1.5
Rango de susceptibilidad magnética de algunos tipos de roca.*

| Litología | No. de Muestras | Rango (SI) | | Promedio (SI) |
|--------------|-----------------|------------|----------|---------------|
| | | L. Inf. | L. Sup. | |
| Ígnea Básica | 78 | 0.000553 | 0.122032 | 0.032622 |
| Ígnea Ácida | 58 | 0.000038 | 0.082021 | 0.008130 |
| Metamórfica | 61 | 0.000000 | 0.073187 | 0.004386 |
| Lutita | 137 | 0.000063 | 0.018573 | 0.000653 |
| Arenisca | 230 | 0.000000 | 0.020923 | 0.000402 |
| Caliza | 66 | 0.000025 | 0.003519 | 0.000289 |
| Dolomita | 66 | 0.000000 | 0.000942 | 0.000101 |

Modificada de Dobrin and Savit (1988)

II.1.6 Diamagnetismo, Paramagnetismo y Ferromagnetismo

Finalmente, el hecho de que la barra conserve la propiedad ya mencionada de los imanes naturales, se debe a su composición. Esto se puede entender atendiendo a la clasificación de las sustancias terrestres en base a la manera en que se magnetizan. Así, las rocas (como todas las sustancias) se clasifican en tres categorías: Diamagnéticas, Paramagnéticas y Ferromagnéticas. Estos términos se explican brevemente a continuación.

II.1.6.1 Diamagnetismo

En una sustancia diamagnética la Magnetización Inducida (\bar{M}) ocurre en la dirección del Campo Magnético Inductor (\bar{H}), pero en sentido opuesto. Presenta polos positivos en los puntos de entrada de las líneas de fuerza del campo inductor (\bar{H}) y en consecuencia “dilata” las líneas de fuerza de la Densidad de Flujo Magnético (\bar{B}). La magnetización de estos cuerpos se pierde al desaparecer el campo magnético inductor y su susceptibilidad magnética k es negativa, por lo que se dice que su magnetización es negativa.

A esta categoría se afilian el agua, la mayor parte de los gases (salvo el oxígeno) y algunas rocas y minerales como son: el mármol, la sal de roca, el cuarzo, la anhidrita (yeso) y muchos metales como el oro, la plata, el mercurio, etc.

II.1.6.2 Paramagnetismo

En una sustancia paramagnética la Magnetización Inducida (\bar{M}) ocurre en la dirección del Campo Magnético Inductor (\bar{H}) y en el mismo sentido. Presenta polos positivos en los puntos de salida de las líneas de fuerza del Campo Inductor

(\bar{H}) y en consecuencia “contrae” las líneas de fuerza de la Densidad de Flujo Magnético (\bar{B}). La magnetización de estos cuerpos se pierde en el instante que el Campo Inductor (\bar{H}) desaparece y su Susceptibilidad Magnética k es positiva, por lo que se dice que su magnetización es positiva.

Las sustancias de esta categoría pueden ser sólidas y a veces gaseosas. Muchas rocas han sido reportadas como paramagnéticas: gneisses, pegmatitas, dolomitas, sienitas, etc. Sin embargo, parece cierto que su paramagnetismo no es intrínseco, sino que constituye una manifestación de ferrimagnetismo débil debido a cantidades variables de magnetita o ilmenita, o a un antiferromagnetismo debido a minerales como la hematita, el dióxido de manganeso, etc.

II.1.6.3 Ferromagnetismo

En una sustancia ferromagnética la Magnetización (\bar{M}) no es proporcional al campo Inductor (\bar{H}), y más aún, por lo general no tiene la misma dirección, excepto al acercarse a la saturación, esto es, a una intensidad de magnetización que prácticamente permanece sin cambio a pesar de que se incremente la intensidad del campo inductor, que es conocida como Magnetización de Saturación (\bar{M}_s). Hay aparición de polos positivos en los puntos de salida de las líneas de fuerza del campo magnético inductor (\bar{H}) y en consecuencia “contrae” las líneas de fuerza de la Densidad de Flujo Magnético (\bar{B}).

Estos cuerpos se caracterizan por retener cierto grado de magnetización cuando se elimina el campo magnético inductor, dicho efecto, puede apreciarse con claridad en una curva de histéresis para una magnetización cíclica, mostrada en la figura 4.

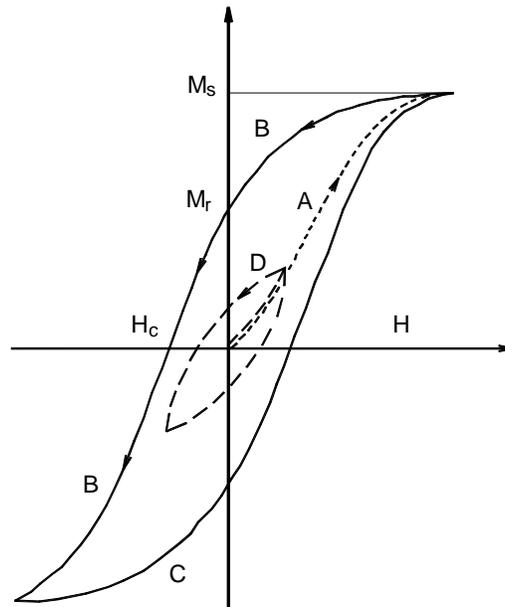


Figura 4 – II.1.6.3 Ciclo de histéresis de magnetización.

El espécimen es magnetizado hasta la saturación, \bar{M}_s , con un campo inductor, \bar{H}_s . Cuando se reduce el campo inductor a cero, el espécimen retiene algo de magnetización, la cual es conocida como Magnetización Remanente (\bar{M}_r). Para eliminar esta magnetización remanente es necesario aplicar un campo magnético negativo, \bar{H}_c , llamado “Fuerza Coerciva”. La coercitividad, \bar{H}_c , es una medida de la dureza de la magnetización remanente. Generalmente el espectro de coercitividad está en el rango de $10^3 - 10^5$ [A/m], dependiendo de los minerales magnéticos constituyentes y de su tamaño de grano.

Debido al fenómeno de histéresis, la susceptibilidad de un espécimen de roca es dependiente tanto del estado de magnetización “previo o actual” como de la Magnetización de Saturación \bar{M}_s de los minerales contenidos, e inclusive depende de parámetros como el tamaño de grano, el esfuerzo interno, etc. cuyos efectos están ampliamente representados por la fuerza coerciva, \bar{H}_c . Como regla general, a mayor tamaño de grano, mayor facilidad para ser magnetizado

(resultando en una susceptibilidad alta). Los granos pequeños tienden a tener baja susceptibilidad y una coercitividad relativamente alta.

Aunque la descripción hecha hasta aquí del ferromagnetismo es suficiente para los fines prácticos del presente trabajo de tesis, cabe señalar que las sustancias ferromagnéticas se subdividen en tres tipos: Ferromagnéticas “sensu stricto”, Antiferromagnéticas y Ferrimagnéticas. Se tienen ejemplos de cada uno de estos tres tipos en materiales que en geología son familiares. Por ejemplo, hierro metálico, níquel y cobalto, son sustancias ferromagnéticas. La magnetita (Fe_3O_4), la pirrotita (Fe_7S_8) y una forma de hematita conocida como maghemita ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$), son muestras clásicas de materiales ferrimagnéticos. De los materiales antiferromagnéticos probablemente el mejor conocido es la hematita ($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$), junto con la ilmenita (FeTiO_3).

II.1.7 Magnetización Remanente

La mayoría de las rocas que constituyen la parte superior de la corteza de la Tierra tienen una magnetización remanente, \bar{M}_r , adicional a la magnetización inducida, \bar{M}_i , inducida por el campo terrestre actual. \bar{M}_r , no está relacionada al campo terrestre actual, pero en cambio es gobernada por el campo magnético que existía cuando la roca fue formada.

La intensidad de \bar{M}_r , es particularmente grande en rocas ígneas y rocas metamorfoseadas térmicamente, excediendo frecuentemente por mucho a \bar{M}_i . La proporción de la magnetización remanente natural presente en una muestra de roca, con relación a la magnetización inducida por el campo de la Tierra en donde se ubica la muestra es llamada “Relación de Königsberger” (Q), y puede ser expresada como:

$$Q = \frac{\bar{M}_r}{\bar{M}_i} = \frac{\bar{M}_r}{k \bar{H}} \quad (14 - II.1.7)$$

Para un mismo tipo de roca esta proporción puede ser bastante variable. Sin embargo, puede ser útil mantener en mente las siguientes generalizaciones hechas por Nagata (1961):

- 1.-En rocas ígneas y rocas metamórficas (metamorfismo térmico) sobre áreas continentales, $Q = 1$ para rocas cristalizadas lentamente.
- 2.-Para rocas volcánicas $Q = 10$, y para rocas basálticas enfriadas muy rápidamente (basaltos oceánicos) $Q = 30 - 50$.
- 3.-En rocas sedimentarias y metamórficas, Q regularmente es < 1 , excepto en los casos especiales de menas o yacimientos de fierro.

En general, la magnetización total de una roca es expresada como una suma vectorial

$$\bar{M} = \bar{M}_i + \bar{M}_r \quad (15 - II.1.7)$$

donde \bar{M}_i y \bar{M}_r pueden tener cualquier dirección arbitraria. En el caso más simple, cuando la dirección de \bar{M}_r es casi paralela o antiparalela a aquella del campo geomagnético, \bar{B} , la magnetización resultante, \bar{M} , puede expresarse como

$$\bar{M} = \bar{M}_i \pm \bar{M}_r = k \bar{H} \pm \bar{M}_r \quad (16 - II.1.7)$$

Cuando $\bar{M}_r > k \bar{H}$ y antiparalelo a \bar{H} , la magnetización resultante de una roca producirá un campo anómalo antiparalelo a \bar{H} . Entonces, la posibilidad de la

presencia de rocas magnetizadas inversamente debe tomarse en consideración en la interpretación de anomalías magnéticas negativas.

II.1.8 Demagnetización

Para ver cómo es el campo en un espacio vacío rodeado por material magnetizado, hagamos en una pieza de material una cavidad cilíndrica larga comparada con su diámetro. Cuando el material está magnetizado homogéneamente en la dirección del eje de la cavidad, las cargas positivas y negativas de los dipolos se cancelan unas con otras, excepto en los extremos de la pieza de material. Sin embargo, estas últimas pueden despreciarse haciendo suficientemente pequeño el diámetro de la cavidad. En los extremos de la pieza de material la densidad superficial de carga magnética será proporcional a M (escalar) pero su dirección será opuesta a \bar{M} . Si llamamos \bar{H}_1 al Campo Demagnetizante en los extremos, entonces, el campo \bar{H}_1 en la cavidad es:

$$\bar{H}_1 = H + \bar{H}_1 = \bar{H} - \frac{4\pi N \bar{M}}{\mu_0} = \bar{H}_{mat} \quad (17 - II.1.8)$$

donde N es el factor de demagnetización y \bar{H}_{mat} denota el campo en el material magnetizado. De la ecuación 17 vemos que si no hay campo externo, como en el caso de un imán permanente, la intensidad del campo \bar{H}_1 así como la de \bar{H}_{mat} son iguales a $-4\pi N M / \mu_0$ y en consecuencia en dirección opuesta a la magnetización.

La separación de los polos inducidos y en consecuencia la intensidad del campo demagnetizante dependen también de la forma de la partícula. Esta dependencia está indicada por el factor de demagnetización N , el cual es diferente para formas diferentes de las partículas. Para una esfera, $N = 4\pi/3$, para formas a modo de aguja magnetizadas en la dirección de su eje, $N=0$; y para placas planas con magnetización transversal $N=4\pi$. Entonces, en general, $0 < N < 4\pi$. En el campo

magnético débil de la Tierra, las susceptibilidades magnéticas de las rocas rara vez son mayores a 0.01 y el efecto de demagnetización raramente es notado (D'arnaud, 1989).

II.1.9 Sistema de Unidades

Las expresiones matemáticas tratadas hasta aquí son correctas considerando el Sistema Internacional de Unidades (apéndice 1), conocido comúnmente como S.I., por lo que a la Densidad de Flujo Magnético (\bar{B}) le corresponde el Tesla [T] como unidad derivada, mientras que al Campo Magnético Inductor (\bar{H}) y a la Magnetización Inducida (\bar{M}) se les asigna como unidad derivada al ampere por metro [A/m]. Cabe destacar que el Tesla es una unidad muy grande para los trabajos de prospección magnética, por lo que comúnmente se emplea el nanoTesla [nT], donde $1[\text{nT}] = 10^{-9} [\text{T}]$.

En la práctica, la permeabilidad magnética del agua y del aire pueden considerarse iguales a la permeabilidad magnética del vacío, indicada con el símbolo μ_0 y cuyo valor es $4\pi \times 10^{-7} [\text{Wb}/(\text{A}\cdot\text{m})]$.

II.2 CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

II.2.1 Elementos y Componentes del Campo Magnético Terrestre

El campo magnético de la Tierra, conocido también como campo Geomagnético, es “representado” en cualquier punto de la superficie terrestre por la Densidad de Flujo Magnético (\vec{B}), la cual constituye un campo vectorial en el que cualquiera de sus vectores queda completamente definido mediante sus siguientes elementos: su intensidad (B), su inclinación (I) y su declinación (D); éstos se pueden apreciar en la figura 5, junto con otros elementos que también se emplean para describirlo.

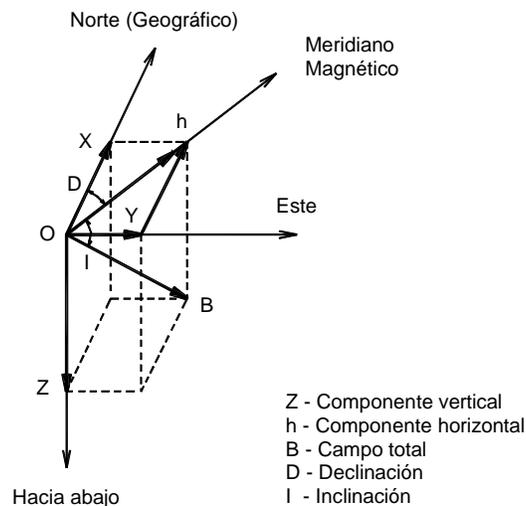


Figura 5 – II.2.1 Elementos del campo geomagnético.

Sin embargo, su configuración final en la superficie terrestre es resultado de la combinación de las siguientes tres partes que lo componen: el campo magnético principal, el campo magnético externo y el campo magnético anómalo.

Carl Friedrich Gauss demostró, en un tratado matemático publicado en 1838, que aproximadamente un 95 % del campo geomagnético debe originarse dentro de la Tierra, pero el 5 % restante debe ser producido por procesos externos. Investigaciones posteriores concluyeron que gran parte de este campo generado en el interior se forma en el núcleo y una porción menor en la corteza.

II.2.2 El Campo Magnético Principal, su Variación Secular e Inversiones de Polaridad

El campo magnético principal es generado en el interior de la Tierra, por corrientes eléctricas inducidas dentro del núcleo exterior, como resultado del lento movimiento convectivo del líquido conductor que lo constituye. Es por esta razón que se prefiere emplear la analogía de que esta componente del campo geomagnético es inducida por un electroimán ubicado en el centro de nuestro planeta e inclinado unos 11.5° con respecto a su eje de rotación, cuyo campo magnético es equiparable al campo dipolar de una barra magnética.

Se piensa que los mismos procesos internos del planeta que dan origen a esta componente del campo geomagnético son los causantes de un cambio lento y progresivo de este campo dipolar, tanto en su intensidad como en su dirección, que tiene lugar durante décadas e inclusive siglos, por lo que se le conoce como "Variación Secular". Este fenómeno presenta distintos patrones de movimiento en observatorios distintos.

En la figura 6 se pueden apreciar las inversiones de polaridad espontánea, que son una característica importante del campo magnético principal, reflejada en las direcciones de magnetismo remanente encontrada en granos de minerales ferromagnéticos, como magnetita, ilmenita y pirrotita, los cuales son parte de la composición de rocas ígneas recién formadas o de rocas que han sido recalentadas y enfriadas siguiendo un proceso de metamorfismo.

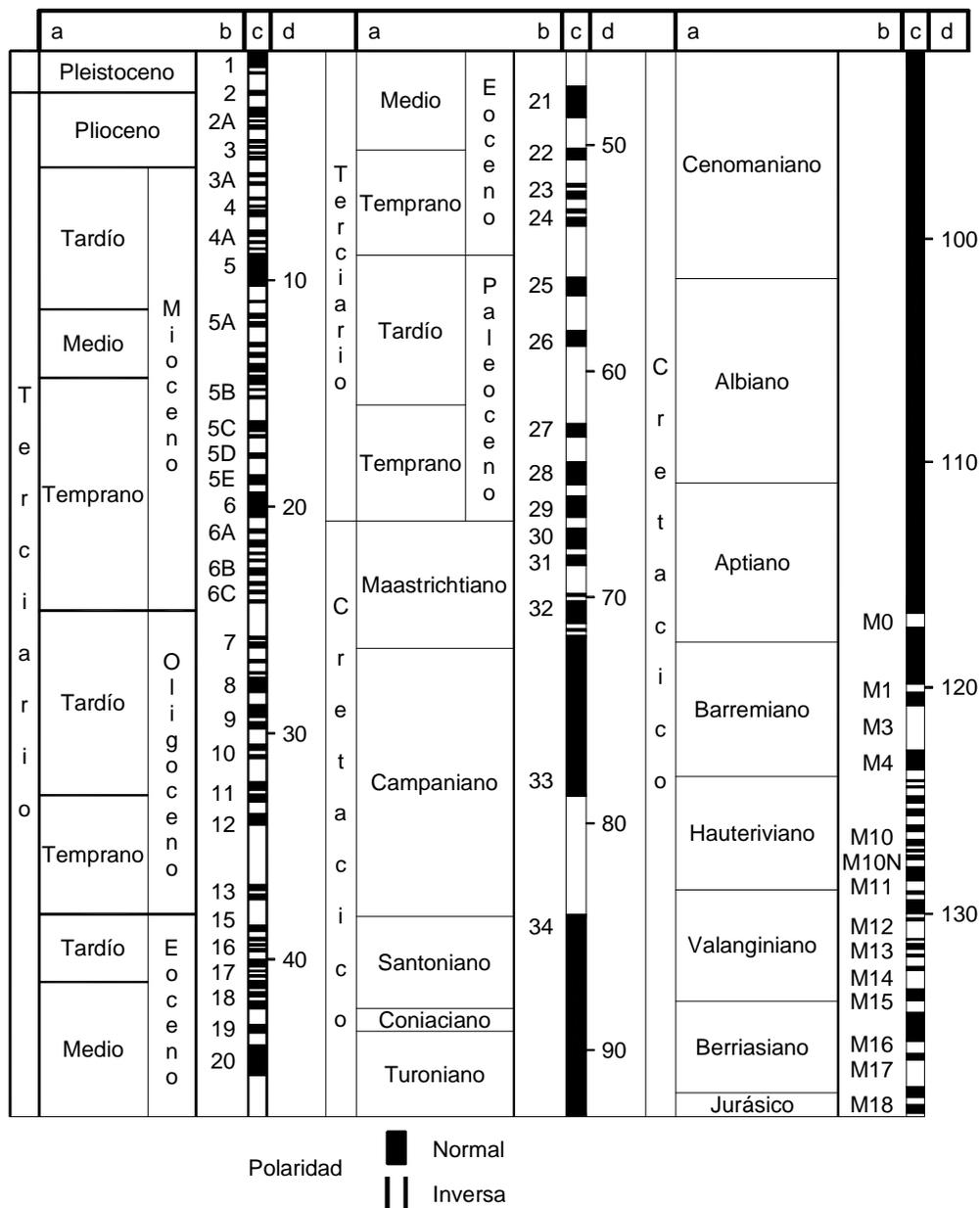


Figura 6 – II.2.2 Inversiones de polaridad del campo geomagnético (Sharma, 1986).

II.2.3 El Campo Magnético Externo, su Variación Diurna y Tormentas Magnéticas

El campo magnético externo es generado en la ionosfera de la atmósfera terrestre, por corrientes eléctricas producidas por el movimiento de partículas ionizadas por la radiación solar, las cuales reciben el nombre de viento solar.

El campo magnético asociado al movimiento de estas partículas cargadas varía hasta unos 200 nT con un período de 24 hrs, dependiendo de la latitud y de la estación del año. Este fenómeno ha recibido el nombre de “Variación Diurna”, puesto que es más acentuado durante las horas con luz de día.

Además de la variación diurna regular, se llegan a presentar fluctuaciones erráticas del orden de los 1000 nT, que reciben el nombre de “Tormentas Magnéticas”, y cuya duración varía desde unas cuantas horas, hasta días enteros y están asociadas a la actividad solar.

II.2.4 El Campo Magnético Anómalo

El campo magnético anómalo es generado en la corteza terrestre por los minerales ferromagnéticos que contienen las rocas, como consecuencia de su magnetización inducida o por el magnetismo remanente que pueden conservar.

Estas fuentes de anomalías magnéticas locales además de ser constantes en espacio y tiempo, deben ser poco profundas, porque a profundidades mayores a unos 40 Km bajo la corteza continental y a 6 Km bajo la corteza oceánica, la temperatura de las rocas debe estar por encima del punto de Curie (550°C), que es la temperatura a partir de la cual pierden sus propiedades magnéticas.

Inclusive, la isoterma correspondiente al punto de Curie, en distintas áreas continentales, se estima en un rango de 20 a 25 Km más superficial que el Moho (interfase manto exterior – corteza continental u oceánica) (Sharma, 1986).

Del carácter magnético de las rocas de la corteza, se infiere que prácticamente todas las anomalías magnéticas observadas sobre los continentes y los océanos deben ser atribuidas a las rocas ígneas y metamórficas, las cuales generalmente poseen tanto magnetización remanente como magnetización inducida.

II.2.5 Monitoreo del Campo Geomagnético

Debido al cambio constante del campo magnético principal por su variación secular y gracias al advenimiento de satélites dedicados a medir el campo total, se ha aumentado notablemente la cobertura global y se ha mejorado la calidad de los datos para el análisis del campo magnético terrestre. Un estándar aceptado ampliamente para proveer una distribución espacial teórica confiable del campo geomagnético es llamado “International Geomagnetic Reference Field” (IGRF), es calculado cada 5 años y al año del cálculo se le conoce como época.

Consecuentemente, es posible obtener el valor teórico de la intensidad del campo magnético de la Tierra en cualquier lugar de su superficie. Las irregularidades del campo terrestre pueden verse claramente al observar los mapas isomagnéticos, de las figuras 7, 8 y 9, que son mapas que muestran líneas de igual intensidad de campo total (isodinámico), inclinación (isoclínico) y declinación (isogónico); en los tres casos corresponden a la época de 1990.

En la figura 7, puede verse que hay cuatro máximos, en lugar de los dos que serían consistentes con un campo verdaderamente dipolar. En la figura 8 puede verse que el ecuador magnético (línea de 0° de inclinación) difiere del ecuador geográfico; y en la figura 9, se puede notar que los polos magnéticos (puntos de

90° de inclinación), además de no ser diametralmente opuestos, son distintos a los polos geográficos.

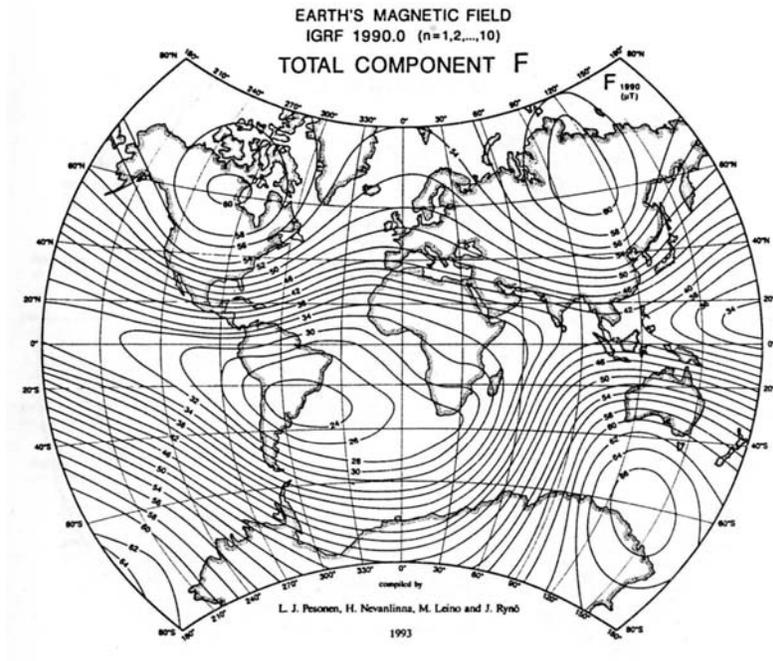


Figura 7 – II.2.5 Intensidad del Campo Magnético Principal (Jankowski, 1996).

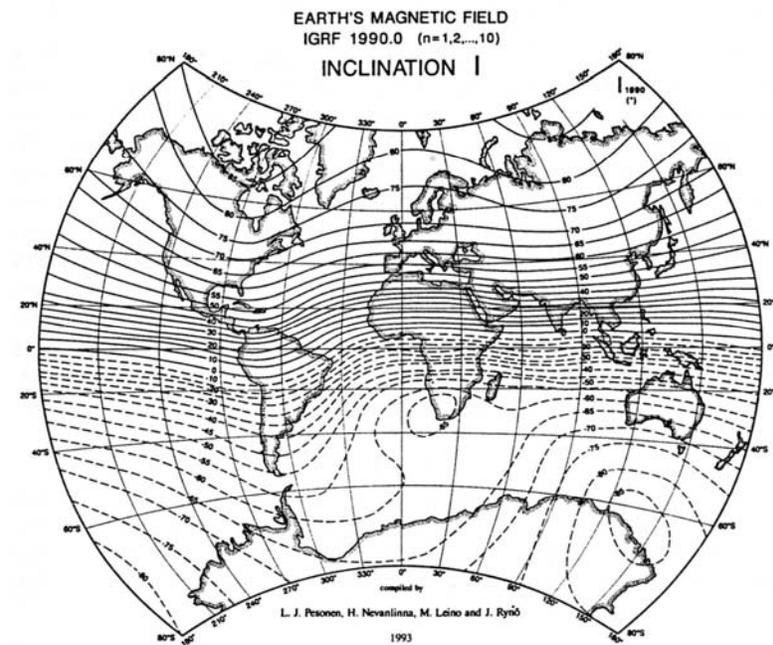


Figura 8 – II.2.5 Inclinación del Campo Magnético Principal (Jankowski, 1996).



Figura 9 – II.2.5 Declinación del Campo Magnético Principal (Jankowski, 1996).

II.3 ADQUISICIÓN, CORRECCIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS

II.3.1 Adquisición y Corrección de Datos Aeromagnéticos

Para cartografiar los datos aeromagnéticos, es necesario correlacionar todas las lecturas del campo total con la posición del avión en el momento en que son tomadas. La trayectoria de vuelo consiste de una serie de líneas paralelas con un espaciamiento de 400 a 2000 m, con líneas cruzadas conocidas como líneas de control, cuyo espaciamiento es de hasta 10 Km (Reedman, 1979).

Existen dos tipos de vuelos aeromagnéticos, el barométrico que se realiza a una altura constante sobre el nivel medio del mar y el vuelo de contorno, realizado a una altura constante sobre el relieve del terreno. El segundo, tiene la ventaja respecto al primero de ser más sensible en la detección de cuerpos someros por lo que su aplicación es la apropiada para exploración de yacimientos minerales. A mayores alturas el efecto de cualquier cuerpo magnético se atenúa en amplitud y se distribuye sobre un área más extensa.

Posteriormente, es necesario aplicar una serie de correcciones a los datos aeromagnéticos observados (Telford et al., 1990):

- De variación diurna
- Del campo normal (IGRF)
- De elevación
- De diferencias en la localización de líneas.

II.3.2 Interpretación de Datos Magnetométricos

Una vez concluido el levantamiento magnetométrico y realizadas las correcciones pertinentes se obtiene el mapa de anomalías magnéticas del área de estudio. Lo siguiente es la interpretación, es decir, concebir los datos magnéticos en términos de la geología del subsuelo. Conceptualmente el problema consiste en estimar uno o más parámetros de la fuente del campo magnético observado. La integración de información geológica, geofísica y geoquímica permite restringir las posibles soluciones geológico-geofísicas a un conjunto menor que sean geológicamente razonables (Blakely, 1995).

Los parámetros a estimar en la interpretación son la susceptibilidad magnética y la geometría (forma, tamaño y profundidad) de los cuerpos magnéticos causantes de un conjunto de anomalías (Parasnis, 1973). Dichos parámetros se pueden estimar realizando una interpretación cualitativa o pueden ser determinados cuantitativamente. Además, con la finalidad de facilitar el proceso, es posible hacer uso de algoritmos para transformar los datos magnéticos a una representación más conveniente (Blakely, 1995).

El uso del método magnetométrico es directo cuando el objeto de estudio posee magnetización propia o es susceptible de magnetizarse, e indirecto cuando estas propiedades no son una característica del cuerpo de interés, pero si de otros materiales que se les asocian directamente. Algunos yacimientos de fierro o titanio son ejemplos del uso directo, mientras que del indirecto lo son algunos yacimientos de oro y asbesto (Dobrin, 1969).

II.3.2.1.- Interpretación Cualitativa

Una forma de interpretar los mapas magnéticos consiste en reconocer y delinear los patrones de las anomalías. Naturalmente, los distintos patrones no ocurren aislados unos de otros; pueden encontrarse superpuestos. La experiencia muestra que cada patrón tiene su contraparte geológica distintiva, cuya naturaleza difiere de lugar a lugar (Parasnis, 1986).

Por ejemplo, los patrones circulares frecuentemente se asocian con intrusiones graníticas a básicas; mientras que los patrones alargados en una dirección y angostos en otra frecuentemente se deben a diques magmáticos, zonas de cizalla tectónica, estratos plegados isoclinalmente con impregnación magnética o a cuerpos minerales alargados. Las dislocaciones son indicativas de fallas geológicas (Parasnis, 1986).

En la tabla 2 se presentan algunas pautas o directrices para la interpretación cualitativa de mapas y perfiles magnéticos.

Normalmente, los levantamientos magnéticos regionales son realizados por agencias del gubernamentales con el objeto de proporcionar información de rasgos sobre grandes áreas. Estos levantamientos muestran la influencia de patrones geológicos regionales, el carácter magnético de los distintos grupos de rocas, e inclusive grandes rasgos estructurales, cuya observación no sería posible en levantamientos que sólo cubren un área muy limitada. Lo anterior es un aspecto de mucho valor en la interpretación de levantamientos de detalle subsecuentes realizados con propósitos especiales (Sharma, 1986).

Tabla 2 – II.3.2.1 Pautas para la interpretación cualitativa de perfiles y mapas magnéticos.

| Aplica a | Carácter Magnético | Posible Causa |
|--|---------------------------|--|
| Perfiles y mapas | Tranquilo | -- Rocas cerca de la superficie con susceptibilidad pequeña |
| | Ruidoso | -- Rocas cerca de la superficie con susceptibilidad moderada a grande |
| Anomalía magnética | Longitud de onda corta | -- Rasgo superficial |
| | Longitud de onda larga | -- Rasgo profundo |
| | Amplitud | -- Indicativo de la intensidad de magnetización |
| Perfiles* | Estructura** y forma | -- Indica posibilidad de echado y dirección del echado |
| | | -- Magnetización inducida indicada por negativo al norte y positivo al sur en el hemisferio norte, y viceversa en el hemisferio sur. |
| | | -- Si la pauta no se presenta, implica presencia de magnetización remanente |
| Mapas | Linealidad en la anomalía | -- Indica el posible rumbo del rasgo magnético |
| Mapas | Dislocación de contornos | -- Desplazamiento lateral por falla |
| * También puede ser determinado en mapas. | | |
| ** Composición de la anomalía, por ejemplo, sólo pico positivo, sólo pico negativo o juego de picos positivo y negativo. | | |

Tomada de Reynolds (1997)

II.3.2.2.- Interpretación Cuantitativa

La esencia de la interpretación cuantitativa es obtener información acerca de la forma, tamaño y profundidad de los cuerpos magnetizados, así como de otros detalles relativos a su magnetización, en dos posibles formas (Reynolds, 1997):

- Una directa, donde los datos de campo son interpretados para producir un modelo físico.
- La otra, donde los modelos son generados a partir de anomalías magnéticas sintéticas generadas y ajustadas estadísticamente contra los datos observados (método inverso).

En el método directo, el procedimiento común es proponer un modelo conveniente, calcular su campo en los puntos de observación y compararlos con los valores medidos. De este modo es posible ajustar la profundidad y los parámetros dimensionales del cuerpo, mediante prueba y error ó utilizando métodos de optimización automática hasta alcanzar una similitud aceptable entre los valores observados y calculados. Esta similitud, en casi todas las interpretaciones cuantitativas, sólo es obtenida en la práctica a lo largo de uno o más perfiles seleccionados, aunque es posible hacerlo sobre el área completa (Parasnis, 1986).

II.3.2.3.- Reducción al Polo

Puesto que los mapas de campo magnético total son difíciles de interpretar, por la distorsión que presentan las anomalías debido a la inclinación y a la declinación del campo magnético inductor, Baranov (1957) y Baranov and Naudy (1964), desarrollaron una metodología para transformar la señal de intensidad de campo total a una equivalente. Esta señal muestra las anomalías como serían observadas si la fuente geológica fuera desplazada al polo magnético. La transformación mencionada fue llamada “reducción al polo”. Bhattacharyya (1965), propuso un planteamiento alternativo que eliminó muchas de las restricciones del método de Baranov, expresando el campo magnético total como una doble serie de Fourier en una malla rectangular, sin embargo, el cálculo de los valores reducidos y el cálculo de los coeficientes de la doble serie de Fourier requería de

un excesivo número de cálculos trigonométricos. Finalmente, Patrick (1976) propuso un algoritmo que redujo significativamente la cantidad de cálculos.

La explicación y análisis del algoritmo de Patrick quedan fuera del alcance y de los objetivos del presente trabajo de Tesis. Sin embargo, en el apéndice 2 se exponen las expresiones del campo magnético total y del campo magnético reducido al polo, que sustentan la transformación de los datos con la ayuda de un programa de cómputo.

CAPÍTULO III

MARCO GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

III.1 RASGOS GEOGRÁFICOS

Con relación a los aspectos geográficos del área de estudio, sólo se tratarán aquellos que se consideraron prácticos y necesarios para desarrollar el presente trabajo de Tesis. Se presentan los siguientes puntos: ubicación geográfica, infraestructura carretera, orografía e hidrografía. En la figura 10, se pueden apreciar de manera gráfica los rasgos mencionados.

III.1.1 Ubicación Geográfica del Área de Estudio

El área de estudio se localiza en la región norte del estado de Guerrero, en el límite con el estado de Morelos. Comprende una superficie rectangular de 660 Km², cuyos lados son paralelos a las direcciones norte-sur y este-oeste. Sus esquinas inferior izquierda y superior derecha quedan definidas respectivamente por las siguientes coordenadas UTM: (440000, 2025000) y (462000, 2055000). En

el estado de Guerrero, el área cubre, prácticamente, la totalidad del municipio Buenavista de Cuéllar y pequeñas porciones de los municipios Taxco de Alarcón, Iguala de la Independencia y Huitzuc de los Figueroa; mientras que en el estado de Morelos alcanza la porción sur del municipio Amacuzac. Las poblaciones urbanas más importantes contenidas en el área son: Buenavista de Cuéllar, Gro. e Iguala, Gro., siendo ambas cabecera municipal y esta última localizada en el vértice suroeste. Dentro de la superficie de estudio se encuentran también las siguientes poblaciones: Acamixtla, Gro., en el vértice noroeste; Casahuatlán, Mor. y Rancho Nuevo, Mor., en el vértice noreste; Tuxpan, Gro., en la porción centro-sur y San Vicente Palapa, Gro., en el vértice sureste.

III.1.2 Infraestructura Carretera

El camino principal en el área de estudio está constituido por un tramo del segmento Cuernavaca-Iguala, de la Carretera Federal 95 de cuota México-Acapulco, el cual permite desplazarse desde Iguala hasta Casahuatlán, pasando por Buenavista de Cuéllar y por Zacapalco, Gro., en donde se bifurca para conducir a Taxco, Gro., (población a 3 Km al Oeste de Acamixtla). Además, desde Iguala parte esta misma carretera de Jurisdicción Federal, pero de tránsito libre, rumbo a Taxco, la cual permite llegar a Acamixtla. Junto a San Vicente Palapa, se tiene la carretera 51 de Jurisdicción Federal y tránsito libre, que viene de Ciudad Huitzuc de los Figueroa, Gro., y entronca con la 95.

En el área de estudio, se tienen también, dos carreteras pavimentadas, cuya jurisdicción corresponde a Guerrero. La primera une a Iguala con Tuxpan, mientras que la segunda conecta a San Vicente Palapa con Tlaxmalac, Gro. Esta última población está unida a Tuxpan mediante un camino de terracería. Otro camino de terracería importante, es el que parte de Buenavista de Cuéllar, para llegar prácticamente hasta Acamixtla, pasando por Coxcatlán, Gro. y por Tlamacazapa, Gro.

En la esquina superior derecha del área de estudio, se tiene otra carretera pavimentada, cuya jurisdicción corresponde al Estado de Morelos, la cual permite el acceso al poblado Rancho Nuevo.

III.1.3 Orografía

En el área de estudio, se tienen tres montañas. Las dos más grandes, se encuentran delimitadas en su mayor parte, por el tramo carretero Iguala-Casahuatlán de la Carretera Federal 95. La montaña ubicada al poniente de esta vía de comunicación (Montaña Poniente, en adelante), posee una forma cómica, con una elevación máxima de 2240 msnm. La montaña situada al oriente del mencionado camino (Montaña Oriente, en adelante), posee un carácter rectangular, con su punto más alto en los 2160 msnm, correspondiendo al cerro “Frío Chiquito”; esta montaña se extiende de manera elíptica hacia el oriente, más allá de nuestra superficie de interés. La tercer montaña (Montaña Sur, en adelante), con una elevación máxima de 1720 msnm en el cerro El Jumil, se halla al Norte de Tuxpan y al Sur de las dos prominencias anteriores. En la tabla 3 se presentan los cerros que las conforman, con sus respectivas elevaciones, representados en la figura 10.

Las zonas bajas que bordean las montañas tratadas son dos. La primera, que se identificará como Zona Baja Norte, inicia en Buenavista de Cuéllar, de donde a modo de franja de unos dos kilómetros de ancho se extiende hasta Zacapalco, y continúa ampliándose hasta el límite norte del área de estudio, en donde su menor cota tiene un valor de 1000 msnm; la segunda, con 720 msnm como elevación mínima, se localiza al Sur del área, alojando a Iguala, Tuxpan, Tlaxmalac y a San Vicente Palapa; ésta última la reconoceremos como Zona Baja Sur.

Tabla 3 – III.1.3 Orografía.

| Montaña | Cerro | Clave (fig. 9) | Coord. UTM | | Elevación [msnm] |
|----------|--------------------------|-------------------|------------|---------|---------------------|
| | | | X[m] | Y[m] | |
| Poniente | Tlacuanapa | c1 | 450600 | 2050200 | 1900 |
| | El Aguacate | c2 | 447900 | 2049300 | 2040 |
| | El Marmol | c3 | 454400 | 2046100 | 1520 |
| | El Jumil | c4 | 452400 | 2043700 | 1920 |
| | Silleta | c5 | 444200 | 2038400 | 1600 |
| | La Carbonera | c6 | 445300 | 2037300 | 1400 |
| Oriente | El Jumilar | c7 | 457800 | 2049500 | 1660 |
| | El Potrero de los Burros | c8 | 461900 | 2046300 | 1920 |
| | Frío Chiquito | c9 | 460500 | 2043500 | 2160 |
| | Terromote | c10 | 460900 | 2041900 | 2080 |
| | Apaxtepec | c11 | 460800 | 2038100 | 2140 |
| | Alto | c12 | 453300 | 2037800 | 1760 |
| | Tenaño | c13 | 455800 | 2034500 | 1600 |
| Sur | Embocadero | c14 | 445700 | 2035500 | 1320 |
| | Tuxpan | c15 | 449900 | 2033000 | 1700 |
| | El Jumil | c16 | 451200 | 2032100 | 1720 |
| | Chiltepec | c17 | 455100 | 2029300 | 1160 |

INEGI, 1988-(b) y (c)

III.1.4 Hidrografía

Los recursos hídricos subterráneos, en el área de estudio, se aprovechan de los acuíferos Buenavista de Cuéllar (de 3Km²) e Iguala-Cocula (de 70 Km²), ambos de la zona geohidrológica Iguala, perteneciente a la Cuenca Río Balsas-Mezcala, de la Región Hidrológica Río Balsas (RH-18).

En cuanto a los cuerpos de agua superficiales, destacan la Laguna Tuxpan y el extremo norte o final de la Presa Valerio Trujano (Tepecuacuilco), ambos ubicados en la parte sur de la zona de interés. Además, existe un bordo minúsculo, comparado con los cuerpos anteriores, ubicado entre los cerros Terromote y Apaxtepec, el cual se identifica con el nombre Los Ailitos; se tiene un bordo más, de dimensiones similares al anterior, localizado al Sur de Coxcatlán, el cual no posee nombre. En el estado de Morelos, junto a Rancho Nuevo, está el bordo Cahuacán (figura 10).

Análisis e Interpretación de Datos Aeromagnéticos en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar, Estado de Guerrero, México.

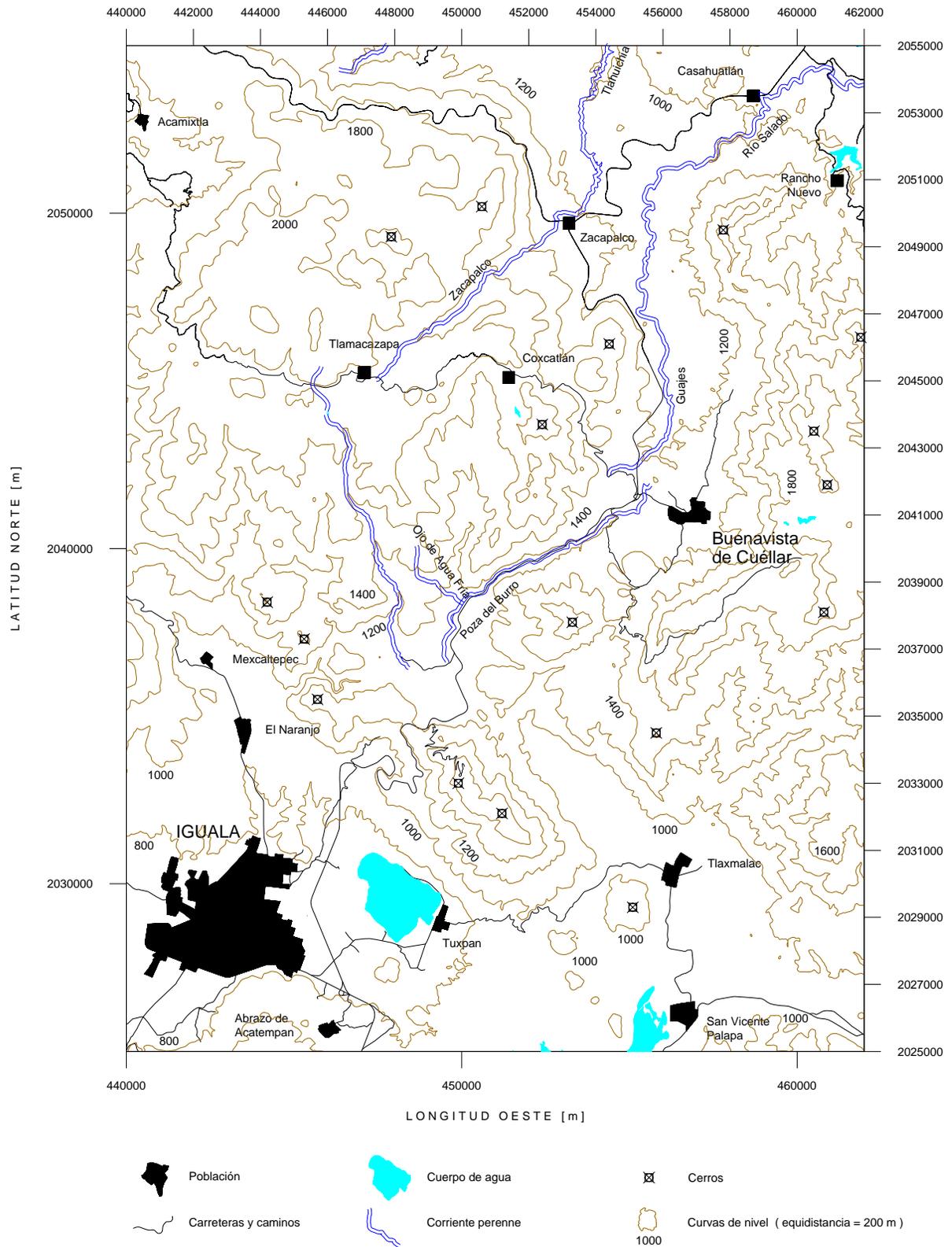


Figura 10 – III Topografía de la zona y principales rasgos geográficos.

El drenaje superficial, es de carácter dendrítico e intermitente con corriente divergente. Sin embargo, es más denso en la Montaña Oriente que en la Poniente, presentando en ambas un patrón radial, acorde a la forma del relieve. Estas mismas características se presentan en torno al Lago Tuxpan, sólo que con corriente convergente y con una dimensión menor que la correspondiente a las montañas. Cabe destacar que se presentan cuatro corrientes de carácter perenne. Dos de ellas, corren entre las montañas recién mencionadas, con los nombres: Poza del Burro y Guajes, aunque esta última tiene por nombre Río Salado en territorio de morelense. Las otras dos, se originan en la Montaña Oriente; una de estas se le identifica con el nombre Zacapalco y cambia su nombre a Tlahuichia, en el municipio de Amacusac. La otra, sin nombre, drena hacia el Sur.

III.2 RASGOS GEOLÓGICOS

III.2.1 Ubicación Tectonoestratigráfica del Área de Estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte noroeste del Terreno Mixteco, el cual se caracteriza por contar con un basamento metamórfico paleozoico y una cubierta sedimentaria de ambiente de plataforma (Plataforma Guerrero-Morelos). Esta unidad tectonoestratigráfica colinda al norte con el Eje Neovolcánico Transmexicano, al sur con el Terreno Xolapa, al este con el Terreno Oaxaca y al oeste se encuentra en contacto por falla con el Subterreno Teloloapan del Terreno Guerrero. Su extensión ocupa el cuadrante Noreste del estado de Guerrero, y parte de los estados de Oaxaca, Puebla y Morelos (Campa y Coney, 1983).

III.2.2 Estratigrafía del Terreno Mixteco

El Terreno Mixteco presenta como basamento al Complejo Acatlán, del Paleozoico inferior, el cual es cubierto en forma aislada por sedimentos del Pérmico (Formación Olinalá), aisladamente por una unidad de rocas volcánicas y metamórficas y sedimentarias (Formación Chapolapa) y, más extensamente, por una secuencia sedimentaria del Jurásico (Conglomerado Cualac y Grupo Tecocoyunca). Enseguida, a partir del Albiano, se tiene una unidad de capas rojas continentales con intercalaciones de caliza marina (Formación Zicapa) y una secuencia de rocas carbonatadas (Formación Chilacachapa, Formación Xochicalco, Formación Morelos, cuya base, en algunas partes, es un miembro de anhidrita pura; Formación Teposcolula, Formación Yeso Tlaltepexi, Formación Cuautla y Formación Mexcala). Por último, en el Cenozoico se depositaron sedimentos continentales y rocas volcánicas cubriendo a las unidades antes

mencionadas (Formación Balsas, Formación Telcelingo, Riolita Tilzapotla, Andesita Buenavista, y las Formaciones Chiaucingo, Oapan, Chilpancingo y Cuernavaca). Este terreno cuenta también con afloramientos de Aluvión y de rocas intrusivas. La secuencia de estas unidades, así como su edad, se indican en la columna geológica de la figura 11.

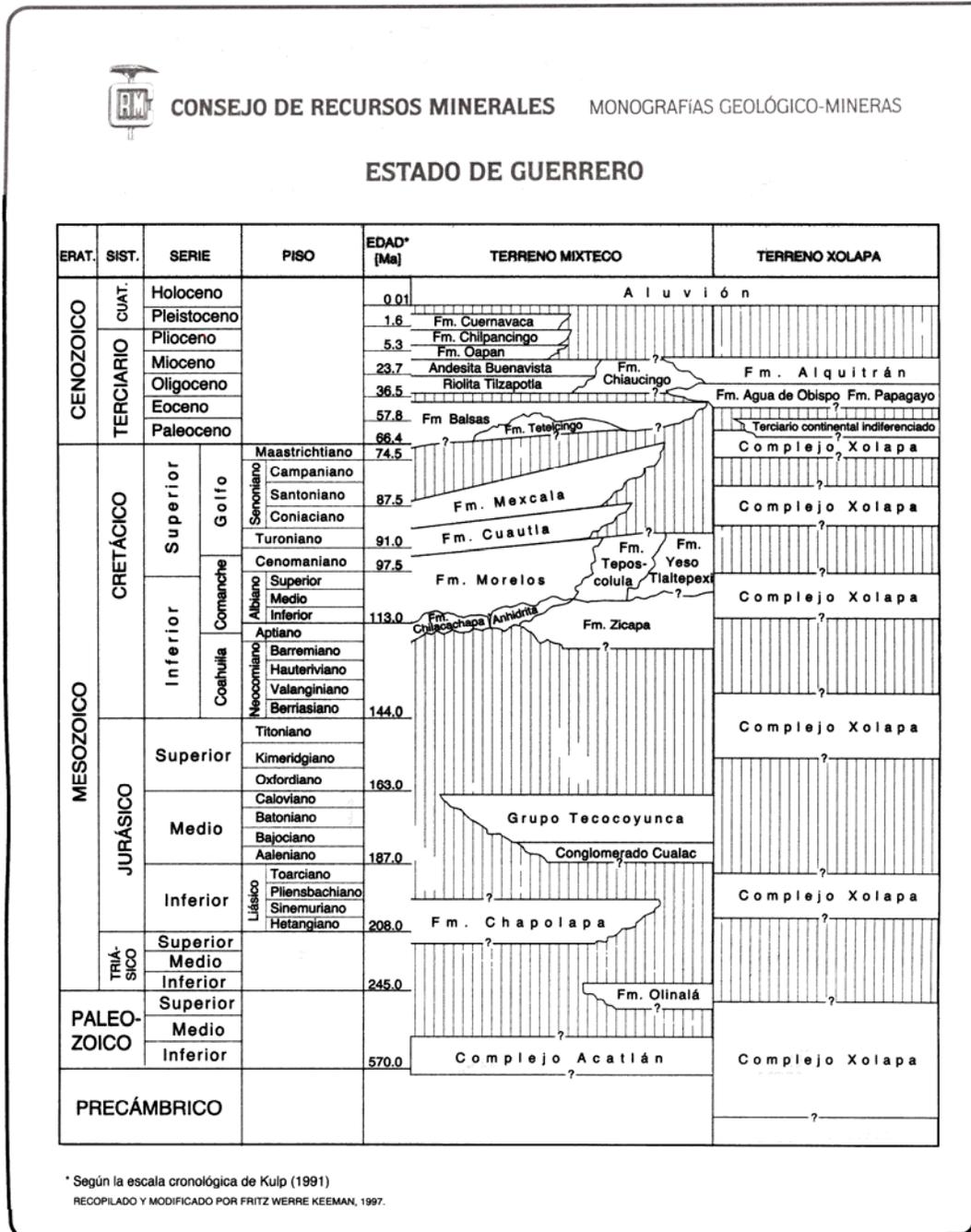


Figura 11 – III.2.2 Columna Geológica (CRM, 1999–(b)).

III.2.3 Formaciones del Terreno Mixteco en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar

El CRM ha realizado diversos estudios en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar, cuya extensión se establece en la figura 12, misma que muestra las unidades estratigráficas que en ella afloran, incluyendo información de carácter estructural y minero. Considerando el área de estudio, trataremos en orden cronológico las siguientes unidades del Terreno Mixteco:

- Esquisto Taxco
- Formación Morelos
- Formación Mexcala
- Formación Balsas
- Riolita Tilzapotla
- Andesita Buenavista
- Depósitos de Aluvión
- Cuerpos Intrusivos

A continuación se describen en detalle cada una de las unidades litoestratigráficas anteriores.

III.2.3.1 Esquisto Taxco (Rocaverde Taxco Viejo)

Sus componentes litológicos, estructura y grado de metamorfismo, guardan ciertas semejanzas con algunas unidades del Complejo Acatlán del Paleozoico (Ortega Gutiérrez, 1978) que aflora extensamente hacia el oriente en los estados de Puebla y Oaxaca, con un espesor que se asume en 15,000 m.

Afloramientos de la unidad Esquisto Taxco se encuentran en las cercanías de la ciudad de Taxco, donde cubre una superficie de 5 Km².

Constituido por una secuencia de rocas pelíticas, psamíticas y volcánicas, que constituyen tres conjuntos litológicos mayores. El conjunto litológico inferior consiste principalmente en rocas pelíticas que se presentan como esquistos de sericita y cuarzo de grano fino a mediano. Estas rocas afloran en áreas topográficamente bajas, generalmente en las partes inferiores de las laderas y fondos de las barrancas. Una secuencia de cuarcitas y pizarras las sobreyacen, constituyendo el conjunto intermedio. Estas rocas generalmente forman los parteaguas entre las barrancas. El tercer conjunto litológico, que pudiera ser el más reciente del Esquisto Taxco, consiste en rocas volcánicas, tanto de composición andesítica y traquiandesítica como riolítica, que se presentan como metalavas, metatobas y metaignimbritas (De Cserna y Fries , 1981).

Al Esquisto Taxco se le estima una edad del Paleozoico Superior. El espesor del conjunto litológico inferior se desconoce, mientras que el del segundo se estima en unos 350 m. Esta unidad es cubierta discordantemente por la Rocaverde Taxco Viejo, aunque en el área de la Región Minera de Buenavista de Cuéllar los afloramientos entre estas dos unidades no están en contacto.

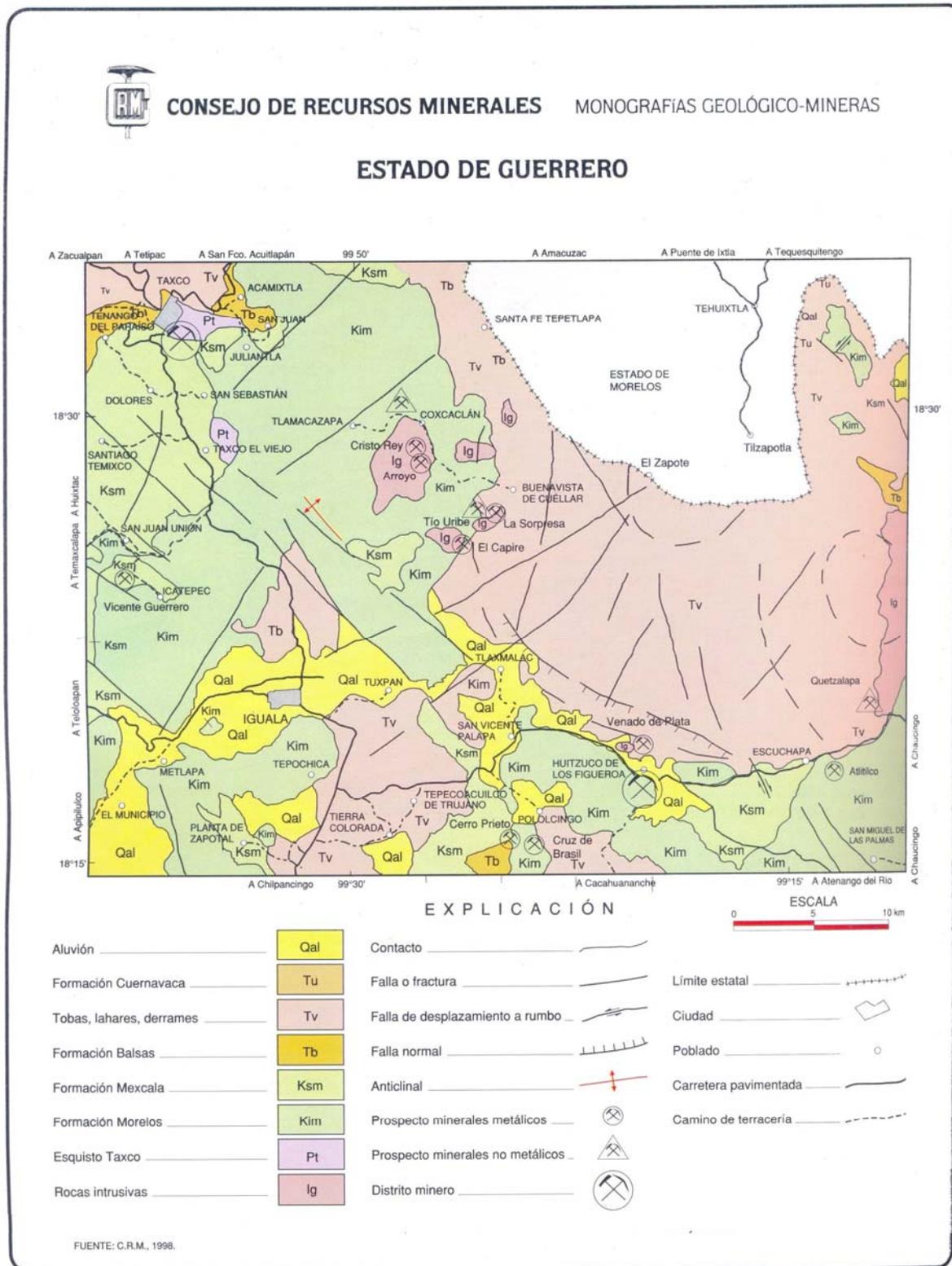


Figura 12 – III.2.3 Región Minera de Buenavista de Cuéllar (CRM, 1999-(b)).

En cuanto a la unidad Rocaverde Taxco Viejo, se localiza en las cercanías del poblado Taxco El Viejo. Está compuesta por una secuencia de derrames de lava, tobas y lahares, con intercalaciones de grauvacas y pizarras negras. Las rocas volcánicas de esta unidad son predominantemente andesitas; no obstante, se han notado algunos derrames de lava que parecen ser basaltos o andesitas basálticas. En la base de esta unidad se observan vetillas de cuarzo. El color de estas rocas es gris mediano a oscuro, con distintas tonalidades de verde, debido a la presencia de clorita y epidota. La superficie intemperizada tiene generalmente un color café rojizo oscuro que, en parte, se debe a la presencia de granos minúsculos de pirita oxidada. La grauvaca es de color gris medio a verde olivo (De Cserna y Fries, 1981).

No existen dataciones de la Rocaverde Taxco Viejo. Debido a la relación angular que guarda su base encima del Esquisto Taxco, el cual se considera por lo menos perteneciente al Paleozoico, y por su relación semejante con la Formación Acuitlapan (no tratada en esta tesis), cuya base se extiende al Jurásico Superior, se puede concluir con razonable certeza que la Rocaverde Taxco Viejo representa el Mesozoico Temprano, probablemente el Triásico Tardío y quizá el Jurásico Temprano. El espesor máximo aproximado de esta secuencia es de unos 400 m (De Cserna y Fries, 1981).

Sus relaciones discordantes con las rocas sobreyacentes del Jurásico Superior y/o Cretácico Inferior (Neocomiano) reflejan un periodo de deformación y metamorfismo leve, que probablemente tuvo lugar hacia fines del Jurásico Temprano o principios del Jurásico Medio que, a su vez, presentó erosión durante el resto del Jurásico Medio y principios del Jurásico Tardío (De Cserna y Fries, 1981).

En los alrededores de Taxco El Viejo las características del terreno no ofrecen buenos afloramientos y han propiciado cierta confusión en cuanto a la distinción entre esta unidad litoestratigráfica y el Esquistos Taxco (De Cserna y Fries, 1981).

III.2.3.2 Formación Morelos

Está constituida por una potente sucesión de calizas y dolomitas interestratificadas, con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos, lentes y granos, y con fragmentos de fósiles silicificados. La base de la formación la constituye, en algunas partes, un miembro de anhidrita pura que al hidratarse se convierte en yeso. El color cambia marcadamente de una capa a otra, variando de gris cremoso claro a negro. Las capas oscuras contienen material bituminoso en cantidad variable. Las capas dolomitizadas presentan colores grisáceos con tintes parduscos por meteorización, y están separadas de las capas contiguas, formando contactos bien definidos en los planos de estratificación. La textura de la caliza varía de calcilita a calcirrudita, pero el tipo textural más común es el de calcarenita. Los estratos son por lo general bastante gruesos, variando de 20 cm a más de 1 m (CRM, 1999-(b)).

Aunque la edad de esta unidad varía ampliamente de una parte a otra, es posible afirmar que en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar corresponde al Cretácico Inferior. El espesor varía considerablemente. Cerca de Iguala, se le estima en 400 m; hacia el norte, en las cercanías de Buenavista de Cuéllar, en 600 m, mientras que en la parte central del estado de Morelos el espesor probablemente llega cuando menos a 900 m, siendo desconocida la cifra exacta porque no está expuesta la base. Su contacto inferior con el Esquistos Taxco y otras unidades más antiguas es tectónico (CRM, 1999-(b)); mientras que su contacto superior, en las

partes central y meridional del estado de Guerrero, es con la Formación Mexcala, siendo concordante y presentando una transición gradual, lo que sugiere que en estas partes no se depositó la Formación Cuautla (CRM, 2000).

En el área de estudio la Formación Mexcala es la unidad estratigráfica suprayacente a la Formación Morelos (figura 12). Sin embargo, tenemos que esta última unidad de calizas presenta contactos con la Formación Balsas, con la Andesita Buenavista y con la Riolita Tilzapotla; todas estas unidades cenozoicas cubren discordantemente a la Formación Morelos (Morán-Zenteno, 1985).

Las características litológicas que presentan los sedimentos de la Formación Morelos, indican un depósito en ambiente de plataforma somera, sin aportes de terrígenos, con mares abiertos de aguas cálidas y transparentes (CRM, 2000).

III.2.3.3 Formación Mexcala

Se caracteriza por una sucesión de estratos de caliza, lutita, limolita, arenisca y conglomerado, de espesores desde unos pocos centímetros, para las rocas de grano más fino, hasta más de un metro, para las areniscas. La componente basal es de naturaleza calcárea, con cantidades considerables de materia carbonosa. Hacia la superficie los estratos de arenisca aumentan en número y aparecen también capas de conglomerado de grano más fino, que en la parte superior contienen mayor cantidad de granos de cuarzo y de otros minerales de origen ígneo. El color es variable tanto lateral como verticalmente, aunque predominan los tintes oscuros. El color más común en roca sana es gris olivo oscuro, aunque localmente aparecen capas de color púrpura,

rojizas y verdosas. En general el color de los afloramientos meteorizados, es pardo claro y oscuro (CRM, 1999-(b)).

La edad de esta unidad parece tener límites variables dependiendo del lugar de afloramiento. Al sur de Iguala, la base es del Turoniano tardío (CRM, 2000), así que en la Región Minera de Buenavista de Cuéllar, podemos afirmar que su edad corresponde al Cretácico Superior. Por la deformación que sufrió la formación es difícil medir su espesor, pero se estima en unos 600 m como máximo (Fries, 1960; De Cserna y Fries, 1981). Su contacto superior es discordante debajo de las formaciones de cobertura terciaria (CRM, 1999-(b)).

La Formación Mexcala muestra poca resistencia a la erosión y tiende a formar planicies bajas, con excepción de los sitios donde queda protegida por afloramientos calizos contiguos con mayor altura (CRM, 2000).

III.2.3.4 Formación Balsas

Constituida por conglomerados formados por clastos de caliza, de rocas volcánicas y metamórficas, con interestratificaciones de arcosas, margas, areniscas, limolitas, lutitas, brechas y tobas volcánicas, derrames lávicos (andesitas y basaltos), caliza lacustre y/o yeso. La mayoría de las capas están bien compactadas, pero hay otras que casi no muestran compactación. En unos sitios, la estratificación es difícilmente perceptible; en otros, los estratos pueden variar de delgados a masivos. La distribución de las diferentes litologías no es uniforme en sentido horizontal ni vertical. Las grandes variaciones de su litología se deben a la procedencia de los clastos. El color predominante es el rojo y violeta ó morado, sin embargo, algunas partes muestran color crema claro o verde

pistache; éste último, corresponde a depósitos tobaceos acumulados en lagos o aguas estancadas (CRM, 1999-(b)).

La edad de esta formación es variable. Hasta la fecha no se ha recolectado ejemplar fósil alguno en ella, por lo que el criterio determinante es su posición estratigráfica. Para la Región Minera de Buenavista de Cuéllar, podemos afirmar que pertenece al Terciario Inferior. Su espesor varía desde unos cuantos metros hasta 2,500 m, pero por lo general, se encuentra entre 300 y 500 m. Descansa en discordancia angular y erosional encima de todas las rocas más antiguas (De Cserna y Fries, 1981). La siguiente formación suprayacente es la Riolita Tilzapotla, que en donde quiera que se encuentra, está en relación concordante con las capas más altas de la Formación Balsas, siempre que no haya intervenido la erosión. En sitios donde no existe la Riolita Tilzapotla por falta de depósito o por erosión, la siguiente unidad suprayacente puede ser cualquiera de las formaciones volcánicas del Terciario medio, así como la Formación Cuernavaca del Terciario tardío, o aun rocas de edad cuaternaria. Donde esto sucede, la unidad más joven generalmente descansa con marcada discordancia angular y erosional sobre la Formación Balsas, aumentando ésta a medida que aumenta la diferencia de edad (Fries, 1960).

La Formación Balsas, casi sin excepción, presenta inclinaciones que van de moderadas a fuertes (de 10° a 70°), siendo muy raras las capas horizontales (CRM, 1999-(b)).

III.2.3.5 Riolita Tilzapotla

Cerca del pueblo de Tilzapotla, Mor., aflora esta unidad consistente en una brecha tobacea riolítica de color pardusco rojizo oscuro, muy bien cementada, grano grueso y fragmentos hasta de 30 cm de diámetro. La pseudoestratificación es tan gruesa o masiva que difícilmente se distingue en unos pocos kilómetros de distancia hacia el sur; sin embargo, no se identificaron verdaderas corrientes lávicas en la zona. La unidad continúa en forma de toba soldada o corriente piroclástica hacia el sur y suroeste, casi hasta Buenavista de Cuellar, donde cambia a toba, brecha tobacea y corrientes lávicas bien estratificadas (CRM, 2000).

La edad de esta unidad va del Oligoceno temprano al Oligoceno tardío. El espesor máximo de la unidad, cerca de Tilzapotla, es del orden de 250 m. Disminuye de espesor y se acuña en corta distancia hacia el poniente de la carretera en las cercanías de Santa Fe, Gro. y hacia el sur de este punto. La Riolita Tilzapotla generalmente descansa en concordancia sobre las capas más jóvenes de la Formación Balsas. En todos los sitios donde la serie descansa sobre rocas más antiguas, las relaciones con la unidad infrayacente son de discordancia angular. El contacto superior de la Riolita Tilzapotla es casi siempre una discordancia erosional. La siguiente sucesión volcánica, la Andesita Buenavista, cubre en concordancia a la riolita, al sur del río Amacuzac (casi paralelo al límite norte de la Región Minera de Buenavista de Cuellar, a unos 5 Km) (CRM, 2000).

El vulcanismo riolítico fue contemporáneo con el cese de la sedimentación del tipo representado por la Formación Balsas. Parecen haber existido centros de extravasación a corta distancia al norte de Buenavista y otros pueden haber existido asimismo al oriente de este

pueblo en la zona cubierta actualmente por la Andesita Buenavista (Fries, 1960).

III.2.3.6 Andesita Buenavista

Constituye predominantemente una potente sucesión volcánica compuesta por corrientes lávicas, brechas y tobas de composición andesítica, aunque las capas individuales varían en composición desde basalto a dacita y, en la parte superior, se presentan rocas riolíticas (CRM, 2000).

Por su posición estratigráfica discordante encima de la Riolita Tilzapotla, del Oligoceno, y por estar cubierta discordantemente por la Formación Cuernavaca, considerada del Plioceno tardío, esta formación fue considerada como del Mioceno y, quizá, de principios del Plioceno (Fries, 1960) (De Cserna y Fries, 1981). No obstante, dataciones isotópicas K-Ar recientes arrojaron edades de 30.5 ± 1.1 Ma (parte alta del Oligoceno temprano) en hornblenda de un derrame dacítico de la parte inferior de la unidad, y de 24.8 ± 1.3 Ma (parte alta del Oligoceno tardío) en plagioclasa de un derrame dacítico de la parte superior, al poniente de Buenavista de Cuellar, cerca del límite con Morelos (Alba-Aldave et al., 1996). Estas dataciones condujeron a considerar a la Andesita Buenavista como producto de la fase resurgente de la caldera oligocénica cuyo producto inicial fue la Riolita Tilzapotla. También consideran que el magmatismo del norte de Guerrero y sur de Morelos cesó a finales del Oligoceno, lo que descarta una edad miocénica para la Andesita Buenavista (Morán-Zenteno et al., 1998).

Se desconoce el espesor original de la formación debido a la erosión. El espesor estimado de esta secuencia volcánica es de unos 66 a 1,000 m.

Las capas basales descansan sin discordancia angular visible sobre la Riolita Tilzapotla. En los lugares donde falta la Riolita Tilzapotla, la relación entre la Andesita Buenavista y las formaciones más antiguas está caracterizada por una discordancia angular. La unidad suprayacente es la Formación Cuernavaca (CRM, 2000).

III.2.3.7 Aluvión

Estos depósitos pertenecen al Cuaternario. Se hallan relleno de las partes más bajas de los valles, como el de Iguala. En su mayor parte son depósitos fluviales, como arenas, gravas, limos y arcillas, aportados por las corrientes que drenan los valles, y en cantidades minúsculas precipitaciones químicas por evaporación (CRM, 1999-(b)).

III.2.3.8 Cuerpos Intrusivos

En la región minera de Buenavista de Cuéllar, se tiene la presencia de cuerpos intrusivos. Conviene destacar el de Coxcatlán, al noroeste y el de Buenavista de Cuéllar al suroeste, así como el de Huitzuc de los Figueroa, ubicado al noroeste del poblado identificado con el mismo nombre, en el Estado de Guerrero (figura 12) . A continuación, se describen brevemente estos cuerpos.

El intrusivo de Coxcatlán aflora al SE de Taxco de Alarcón, cortando a las calizas de la Formación Morelos. Presenta una forma elíptica irregular, con su eje mayor de unos 5 Km de largo en la dirección Norte-Sur y su eje menor de 4 Km en el sentido Este-Oeste. Está constituido por rocas ígneas intrusivas de composición ácida: granito calcoalcalino, en la zona interna; cuarzomonzonita y cuarzodiorita, en la zona externa.

Sus minerales esenciales son: cuarzo, plagioclasa sódica (oligoclasa y andesina) y feldespato potásico (ortoclasa). Sus minerales accesorios son: biotita, hornblenda, augita y apatito. Sus minerales secundarios son: calcita, clorita, sericita, epidota, minerales opacos y minerales arcillosos. El emplazamiento de este tronco según Fries (1960) debe haber tenido lugar entre el Cenomaniano y el Turoniano (Carrizales-Aguilar, 1997). Sin embargo, fechamientos realizados por De Cserna et al., (1975) para una muestra recolectada en la parte meridional del tronco indican una edad correspondiente al Eoceno Medio (50 ± 10 Ma) (Avilez-Moreno, 1989). Aparentemente, algunas partes de este tronco contienen diseminación de pirita singenética que posteriormente estuvieron expuestas a procesos hidrotermales produciendo mineralización de oro y plata, alojándose a lo largo de fracturas (CRM, 1999-(b)).

El intrusivo de Buenavista de Cuellar, ubicado al SW del poblado del mismo nombre, tiene una composición que varía de granito a granodiorita. Probablemente fue contemporáneo al Tronco de Coxcatlán considerando su distribución espacial, así como sus relaciones estratigráficas con otras rocas (Avilez-Moreno, 1989). La extensión completa de este intrusivo se desconoce porque una parte del cuerpo esta cubierta por la Riolita Tilzapotla (Corona-Esquivel, 1978). En el contacto de las calizas con estas masas ígneas intrusivas se presentan fenómenos de metamorfismo de contacto, permitiendo la formación de Mármol; y fenómenos de metazomatismo de contacto, generando un skarn (Carrizales-Aguilar, 1997). Se trata de un skarn de granate con mineralización de hierro principalmente de magnetita y hematita (CRM, 1999-(b)).

El intrusivo de Huitzucó es de composición ácida. Se trata de pequeños cuerpos de pórfido granítico inyectados en la caliza, produciendo casi ningún metamorfismo de contacto (CRM, 1999-(b)).

Finalmente, se indica la presencia de un intrusivo al noroeste de Buenavista de Cuéllar, mapeado por el INEGI como un cuerpo de composición básica (INEGI, 1988-(c)).

III.2.4 Litología y Estructuras Geológicas en el Área de Estudio

En la figura 13, se presenta la litología correspondiente a la totalidad del área de estudio, la cual se correlaciona aceptablemente con las unidades estratigráficas indicadas en la figura 12, con excepción de la unidad de arenisca y conglomerado ubicada al sur de Tuxpan.

Las areniscas y conglomerados que afloran en la porción morelense, corresponden a la Formación Balsas, mientras que la unidad ígnea extrusiva forma parte de la Andesita Buenavista o de la Riolita Tilzapotla. Además, se aprecia otro cuerpo intrusivo de composición intermedia al noroeste de Cazahuatlán (figura 13).

Respecto a las estructuras geológicas, en la región se puede señalar la existencia de un grupo de fallas de orientación SW-NE, distribuidas en la unidad de caliza y otras cercanas al contacto meridional entre las rocas extrusivas y las sedimentarias. También se observa otra falla presente en la caliza, desde Tlmacazapa hasta Zacapalco, y otra más, en el contacto de la Andesita Buenavista con la caliza de la Formación Morelos, a la altura del afloramiento de mármol, ambas con orientación SE-NW (figura 13), aunque la última no se muestra gráficamente. Finalmente, observando la figura 12, destaca un pliegue anticlinal, con orientación SE-NW, cuyo extremo sur está en contacto con los sedimentos de la Formación Mexcala, al sur del Tronco Coxcatlán.

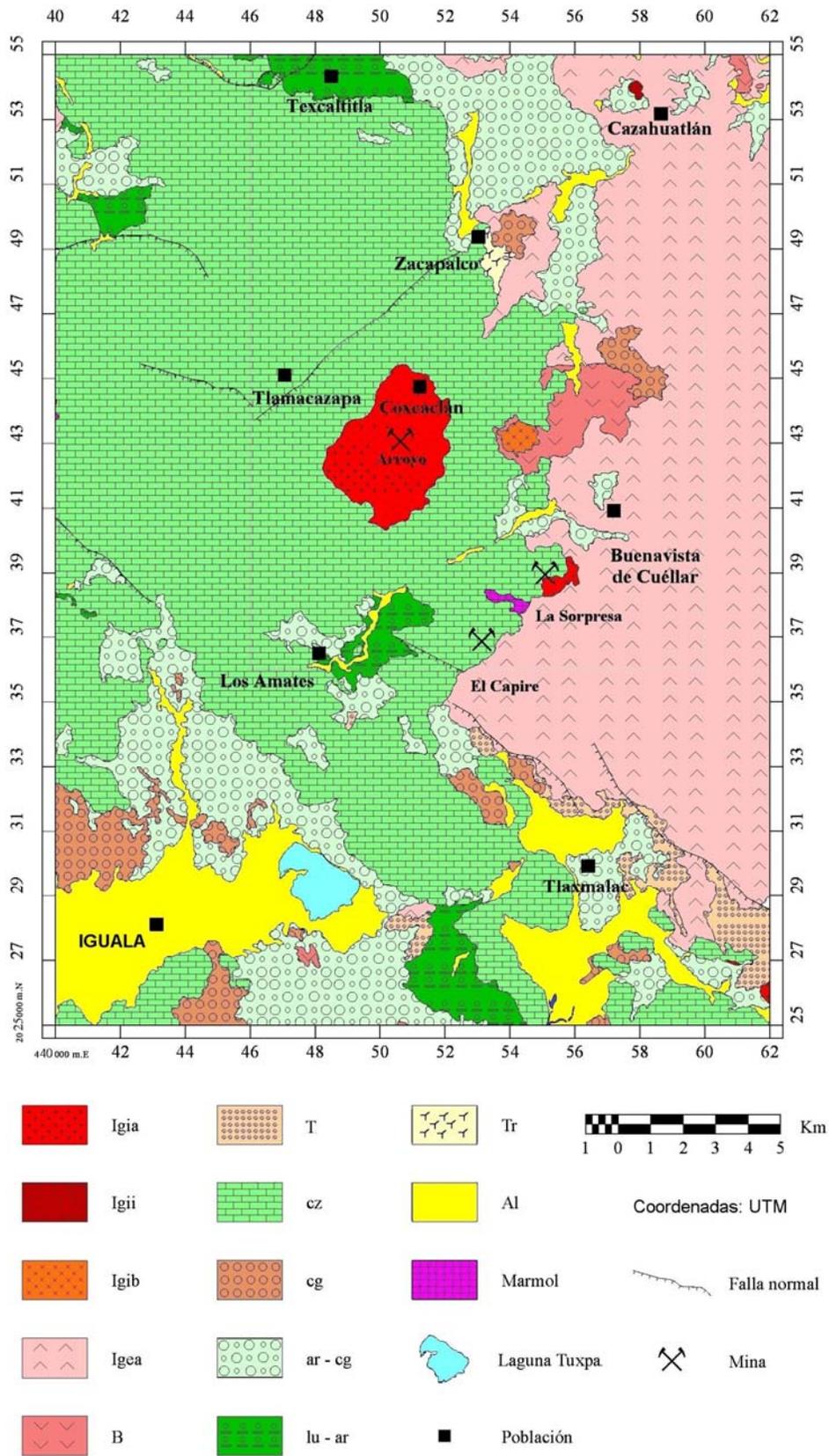


Figura 13 – III.2.4 Litología del área de estudio (INEGI, 1988-(b) y (c)).

III.3.-YACIMIENTOS MINERALES

En la Región Minera de Buenavista de Cuéllar, se ubican los distritos mineros Taxco y Huitzuco, que presentan una alineación NW-SE. Además de éstos, la región tiene minas y prospectos de cierta importancia, cuya localización y características se indican en la figura 12 y en la tabla 5. Los cuerpos con mineralización metálica presentes, en el área de estudio, se pueden clasificar en dos grupos:

- Los que presentan mineral de hierro asociado al cuerpo intrusivo granodiorítico de Buenavista de Cuéllar, conformado por los yacimientos La Sorpresa y El Capire. Este primer grupo, reviste cierta importancia por el volumen estimado de sus reservas (7,418,000 toneladas), sin embargo, tiene un bajo contenido de hierro, que varía de 41.7% a 50.1% (CRM, 1999-(b)), y
- Los de mineral de plata, asociado al cuerpo intrusivo granítico de Coxcatlán, conformado por los lotes mineros Cristo Rey, Arroyo y Arroyo 2, cuyos valores más altos de plata se registran en las obras El Treinta (1,090 gr/ton), El Cincuenta (267 gr/ton), Mina Rica (421 gr/ton), La Campana (314 gr/ton) y Agua Dulce 2 (345 gr/ton); sin embargo, no se puede hablar de reservas pues no se tiene una estructura visible con continuidad (Carrizales-Aguilar, 1997).

Tabla 4 – III.3 Minas y Prospectos de Interés en la Región Minera de Buenavista de Cuellar.

| Nombre | Mineral | Tipo y Forma de Yacimiento | Roca Encajonante | Obras Mineras | Ley | Dimensiones y Reservas Potenciales (RP) |
|---------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--|--------------------------|---|
| La Sorpresa (fierro) | Magnetita y Hematita | Metasomático de contacto. | Contacto calizas y granodiorita | Tajos | Fe = 41.65 % | Sup. = 71,775 m ² |
| | | Cuerpos Irregulares. | | | | Esp. = 120 m RP = 6,636,874 ton |
| El Capire (fierro) | Magnetita | Metasomatismo de contacto. | Contacto calizas y granito | Tajos | Fe = 50 % | Sup. = 12,028 m ² |
| | | Cuerpos lenticulares y estratiformes. | | | | Esp. = 17.7 m RP = 781,046 ton |
| Cristo Rey (plata) | Hematita, Limonita y Pirita | Hidrotermal: singenético. | Granito (Cuarzomonzonita) | 5 Obras mineras, casi todas aterradas. | Au = N.D. - 0.5 gr/ton | Cuerpo granítico de 4 x 5 Km |
| | | Tabular, irregular. | | Socavón Murciélago = 93 m. | Ag = 1 - 468 gr/ton | |
| Arroyo y Arroyo 2 (plata) | Pirita, Galena, Hematita y Limonita | Hidrotermal: singenético. | Cuarzomonzonita, granito y calizas | Tiro El Treinta = 30 m. | Au = N.D. - 0.74 gr/ton | En superficie no afloran estructuras |
| | | Irregular. | | Socavón Veta Rica = 50 m. | Ag = N.D. - 1,090 gr/ton | |
| | | | | | Pb = 0.01 - 5.68 % | |

CRM, 1999-(b)

III.3.1 Yacimientos de Fierro

III.3.1.1 Ubicación y Acceso

Las zonas mineralizadas están formadas por los cuerpos conocidos como La Sorpresa y El Capire. Ambos se localizan al SW del poblado Buenavista de Cuellar, a una distancia en línea recta de 2.5 Km y 5 Km respectivamente, entre los paralelos 18° 25' y 18° 27' de latitud norte y los meridianos 99° 25' y 99° 27' de longitud oeste. El acceso desde Buenavista de Cuellar, es por brecha de terracería que a los 4.2 Km nos lleva hasta el yacimiento La Sorpresa. La brecha continúa hacia el SW, por espacio de 3 Km, para llegar al yacimiento El Capire. La figura 14, muestra su localización en un plano geológico.

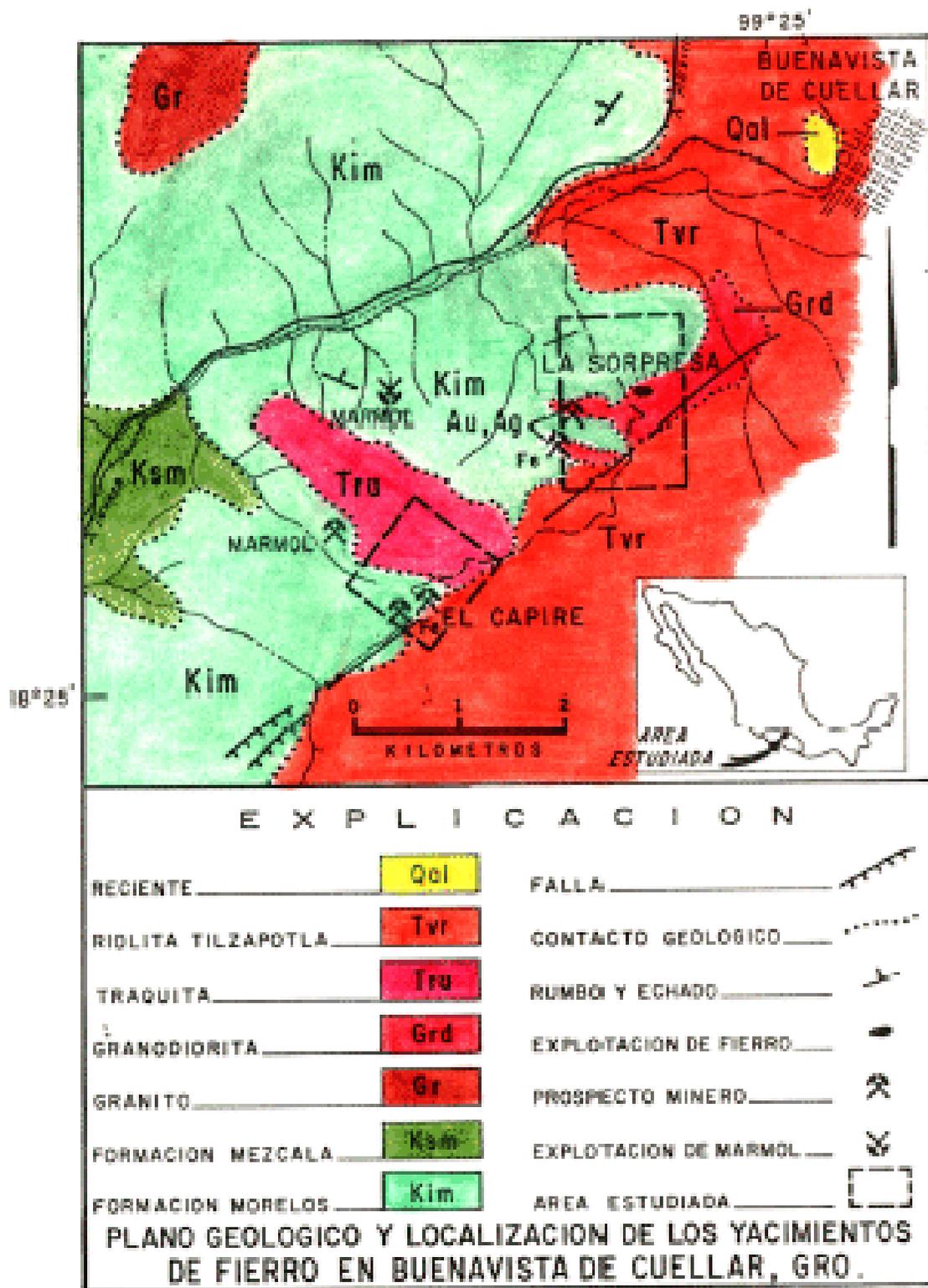


Figura 14 – III.3.1.1 Detalle de la ubicación de los yacimientos de fierro (Corona-Esquivel, 1978).

III.3.1.2 Forma, Dimensiones y Mineralogía

Por tratarse de un skarn de hierro, se consideran la magnetita, hematita y limonita como los minerales de rendimiento económico. La magnetita es el mineral de mena más abundante, y ocurre en dos formas de acuerdo al cuerpo donde se encuentra emplazado (Avilez-Moreno, 1989).

Yacimiento La Sorpresa

Es un cuerpo irregular, constituido en el skarn que muestra textura de grano muy grueso en la que se distinguen a simple vista los cristales bien desarrollados de diópsida y magnetita. El cuerpo de magnetita se encuentra reemplazando al skarn de granate en la zona adyacente a la granodiorita. El área mineralizada cubre de 150 a 200 m² respecto a lo que está expuesto por obras de extracción (Avilez-Moreno, 1989). Un poco más al sureste, paralelo a la zona de tactitas (skarn), existe también un suelo residual de color café rojizo con abundantes fragmentos de magnetita que cubre parcialmente a la granodiorita. Al sur del cuerpo mineralizado fueron detectadas algunas lentes de magnetita de aproximadamente 0.40 m de diámetro, muy próximas al contacto con el intrusivo granodiorítico y alojadas en las andesitas (Corona-Esquivel, 1978).

La magnetita se encuentra formando cristales euhedrales e inclusive diseminada. Los minerales de ganga más abundantes son el piroxeno, diópsida y calcita, observándose en menor proporción la andradita, cuarzo y vesuvianita. Como minerales secundarios, posteriores a la formación del skarn, se tienen calcedonia, adularia, clorita y minerales arcillosos. Debido a la alteración de la magnetita se forman hematita y limonita en la parte superficial de la mena (Avilez-Moreno, 1989).

Yacimiento El Capire

El mineral de hierro, se observa en forma de cuerpos lenticulares y semitabulares de magnetita en tres tajos. En uno de estos, puede distinguirse una estratificación del fierro N45°W con echado de 30° al NE, presentando 30 m de espesor en la porción central y una longitud de 45 m. Los otros dos tajos, se encuentran sobre una misma estructura mineralizada, con el cuerpo de fierro paralelo a la estratificación de las calizas (N10°W con echado de 27° al SW), con un espesor promedio de 7.5 m y una longitud del afloramiento de 80 m (Corona-Esquivel, 1978).

En este yacimiento, la magnetita se observa formando un cuerpo masivo de textura muy fina con pequeños cristales diseminados de pirita y calcopirita. También se presentan alteraciones tales como epidotización, cloritización y carbonatación. El cuarzo jasperoidal se muestra como pequeñas vetillas en los márgenes de los cuerpos de magnetita, siendo estas las estructuras que probablemente propiciaron la silicificación de las rocas carbonatadas (Avilez-Moreno, 1989).

III.3.1.3 Estructuras Locales

En el área de La Sorpresa las capas de la caliza marmorizada presentan un ligero levantamiento causado por el empuje de la masa intrusiva, observándose echados de 10 a 22°. Existen también los prospectos mineros de San Antonio y Pinagua (actualmente abandonados), localizados en dos fallas orientadas E-W (Corona-Esquivel, 1978).

En el El Capire existe un sistema de fallas orientadas NW-SE, mismas que forman las dos cañadas principales que ponen en contacto por falla a la Formación Morelos con el intrusivo granodiorítico y con la traquita. Es probable que estas fallas se deban al empuje de la masa intrusiva sobre la Formación Morelos. Otras estructuras, las representan los relieves de falla con la misma orientación N25°W, que se localizan en la parte alta del Cerro Alto (Corona-Esquivel, 1978).

III.3.1.4 Origen y Características de los Yacimientos

Los yacimientos de magnetita de Buenavista de Cuéllar están considerados depósitos de tipo pirometasomáticos. Su origen es, por metasomatismo de contacto, originado por un intrusivo granodiorítico que afectó a las calizas de la Formación Morelos. En El Capire al igual que el yacimiento La Sorpresa, los cuerpos de hierro son resultado del reemplazamiento metasomático del carbonato de calcio por el hierro (Avilez-Moreno, 1989).

III.3.2 Yacimientos de Plata

III.3.2.1 Ubicación y Acceso

Los lotes Cristo Rey, Arroyo y Arroyo 2 se localizan a 8 Km en línea recta al N80°W de la cabecera municipal de Buenavista de Cuéllar, Estado de Guerrero. Su acceso partiendo de la ciudad de Iguala, hacia México, es por la carretera de cuota hasta el Kilómetro 75, para de ahí continuar por caminos de herradura (vereda) por una distancia de 4.5 Km. Las coordenadas de los puntos de partida de los polígonos que definen a estos lotes son: 18° 28' 21" Latitud Norte y 99° 28' 42" Longitud Oeste, para el lote Cristo Rey; 18° 27' 59" Latitud Norte y 98° 28' 39" Longitud Oeste, para el lote Arroyo; 18° 28' 00" Latitud Norte y 98° 28' 39" Longitud Oeste, para el lote Arroyo 2. Estos lotes se muestran en la figura 15,

junto con sus obras mineras y sus leyes; estas últimas, determinadas en el Centro Experimental Zona Sur del CRM.

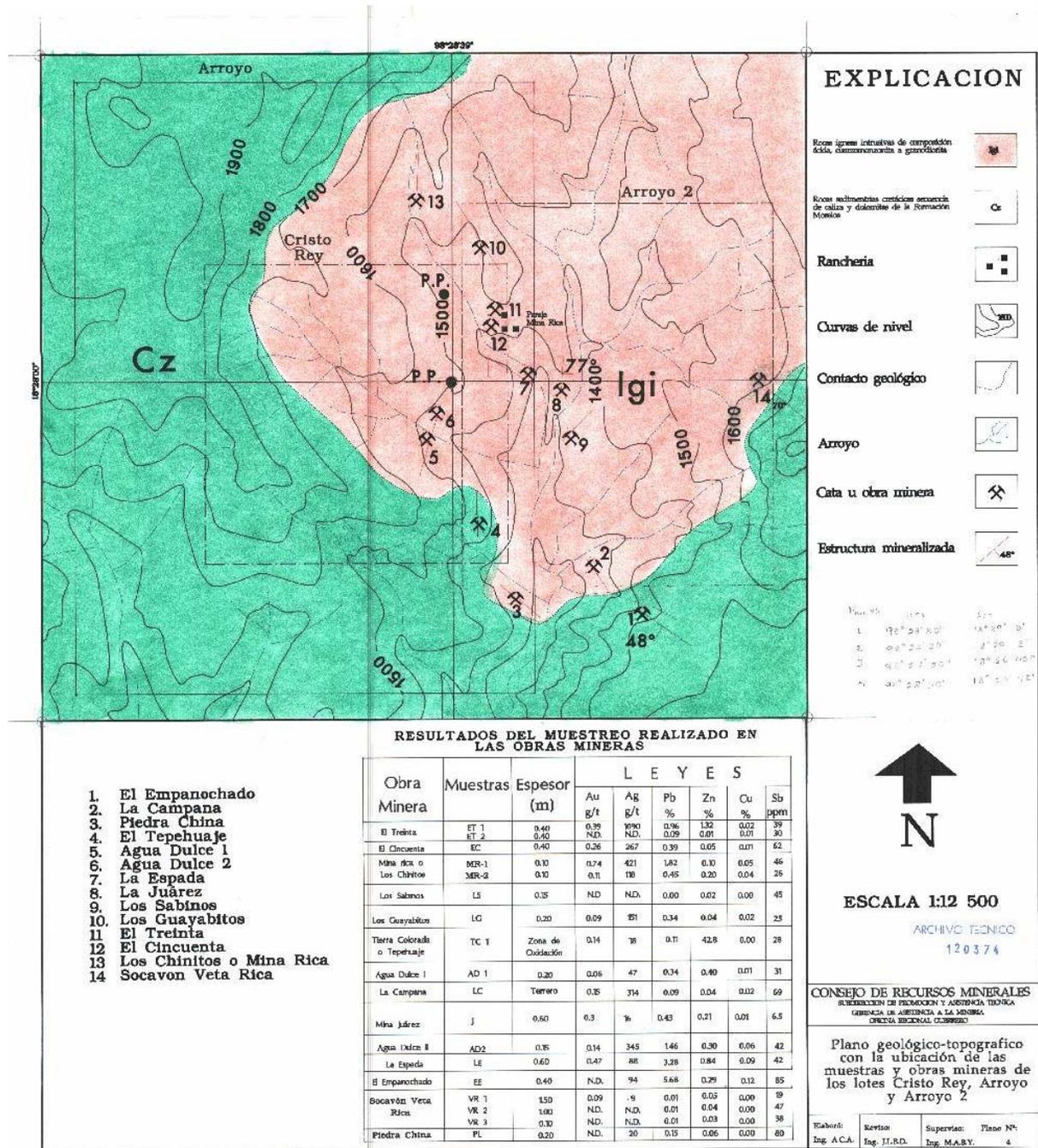


Figura 15 – III.3.2.1 Detalle de la ubicación de los yacimientos de oro y plata (Carrizales-Aguillar, 1997).

III.3.2.2 Forma, Dimensiones y Mineralogía

Consiste de cuerpos tabulares prácticamente verticales con espesores de 0.10 a 1.50 m, que se formaron por relleno de fracturas en el interior del cuerpo granítico. En general, las fracturas mineralizadas pertenecen al sistema N10°-70°W (Díaz-Olvera, 1972). Todas las estructuras mineralizadas no se pueden seguir a rumbo en superficie. Únicamente se pueden obtener datos dentro de las obras mineras y en las que la mayor parte de ellas sólo son pequeñas catas u obras aterradas e inaccesibles (Carrizales-Aguilar, 1997).

Entre las catas y rebajes destacan algunas zonas con fuerte oxidación. Sin embargo, no se puede asegurar su continuidad, aunque hay algunas partes con zonas de muy fuerte oxidación como al este de la obra Los Chinitos. En estas zonas no se ve ninguna estructura o forma bien definida que nos pueda indicar su origen y se pueden clasificar como cuerpos irregulares (Carrizales-Aguilar, 1997).

Megascópicamente, los únicos sulfuros observados son la pirita y en menor proporción la galena; los óxidos están representados casi en su totalidad por óxidos de hierro (hematita, limonita) (Carrizales-Aguilar, 1997). Sin embargo, en muestras analizadas en el microscopio minerográfico, provenientes de calcos hechos en el tronco granítico, fueron identificados los siguientes minerales de Fe, Zn, Cu y Pb: pirita, blenda, calcopirita, covelita y galena. La mena, además de quedar constituida por los anteriores minerales metálicos, incluye fluorita (CaF_2). La ganga está formada por cuarzo, calcita, magnetita, granate, hematita y epidota (Díaz-Olvera, 1972).

III.3.2.3 Estructuras Locales

El emplazamiento del cuerpo de Coxcatlán causó plegamientos y fracturamientos en las rocas intrusionadas, dando lugar a anticlinales (fuera de los lotes), cuyos ejes son paralelos al eje mayor del tronco. También originó un sistema de fracturas y fallas de rumbo variable que van de N-S a NE y NW, con echados de 54° SE a la vertical, que dieron origen a la mineralización dentro del tronco (Carrizales-Aguilar, 1997).

III.3.2.4 Origen y Características de los Yacimientos

La pirita diseminada en las zonas de oxidación sugiere una formación singenética con el cuerpo intrusivo, pero hay grandes áreas de este cuerpo donde se observa pirita diseminada. En algunas obras, la pirita está restringida por el fracturamiento imperante, teniendo poca penetración en las tablas (roca encajonante), de las estructuras mineralizadas. Probablemente, se trate de dos eventos de mineralización, uno singenético que dio lugar a las zonas de pirita diseminada y otro evento hidrotermal donde soluciones ascendentes, mineralizaron zonas de fracturamiento. Los depósitos pueden ser hipotermales y mesotermales (Carrizales-Aguilar, 1997).

III.4 DATOS GEOFÍSICOS

III.4.1 Fuente de los datos aeromagnéticos

En el presente estudio se utilizó información magnética de campo total, prospectada por el Consejo de Recursos Minerales (CRM), plasmada en la “Carta Magnética de Campo Total, Cuernavaca E14-5, escala 1:250,000” (CRM, 2001). En la figura 16, se muestra el mapa de anomalías magnéticas del área de interés.

III.4.2 Parámetros y equipos utilizados en el levantamiento

Los datos magnéticos prospectados por el CRM se obtuvieron de tres levantamientos aeromagnéticos, en los años 1977, 1997 y 1999. La altura de vuelo fue de 300 m sobre el nivel del terreno (vuelo de contorno), con líneas de dirección N-S equidistantes a cada 1,000 m, y con líneas de control a cada 10,000 m. Las trayectorias de vuelo se identificaron mediante navegación visual, en el levantamiento de 1977; y con un sistema de navegación por satélite (GPS), para los levantamientos de 1997 y 1999. Los magnetómetros, utilizados en avión Islander, tienen una precisión de 0.25 nT (Geometrics, G-803 de protón) y 0.001 nT (Scintrex CS2 y Geometrics G822-A, ambos de bombeo óptico) (Alam-Hernández et al., 2001).

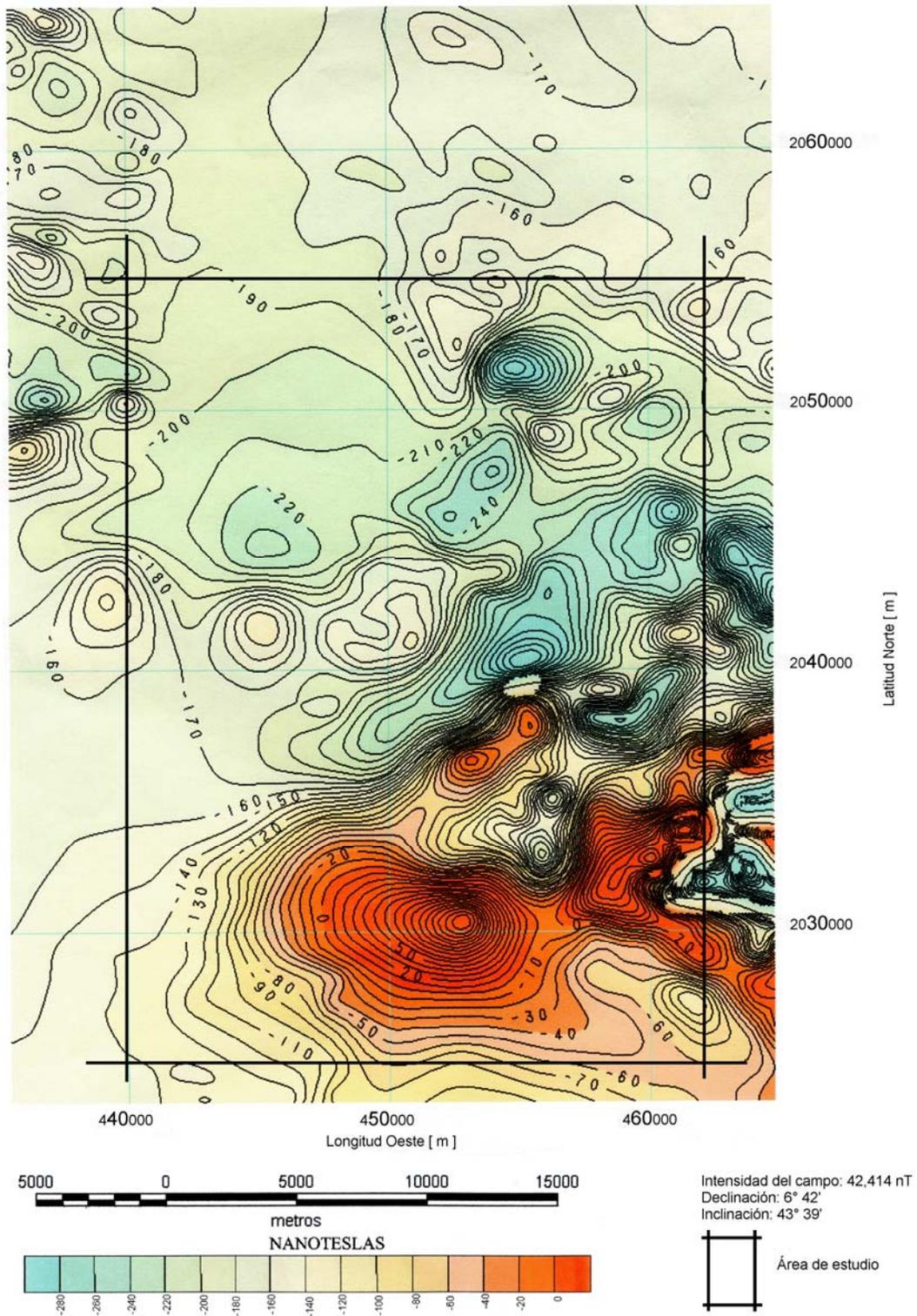


Figura 16 – III-4-1 Mapa de anomalías magnéticas de campo total (CRM, 2001).

III.4.3 Procesamiento de Datos Aeromagnéticos

Los datos magnéticos obtenidos por el CRM en tres vuelos fueron integrados y corregidos por variación diurna, líneas de control, por movimiento del avión (compensación magnética), por micronivelación y por campo normal, utilizando para ésta última, los coeficientes del IGRF de las épocas 1975 y 1995. Finalmente, se empleó el algoritmo de interpolación de Briggs (1974) de mínima curvatura con rejilla de 50 x 50 m, para generar las curvas de contorno de intensidad de campo magnético total.

III.4.4 Interpretación Cualitativa de Carácter Regional del Consejo de Recursos Minerales

El Consejo de Recursos Minerales realizó una interpretación cualitativa de carácter regional para la carta magnética E14-5. Se señalan los rasgos magnéticos mediante dominios magnéticos, indicados con las letras A₁, A₂, B₁, B₂ y C, diferenciados de acuerdo a su intensidad de magnetización, gradiente magnético y amplitud dipolar (figura 17). En el área de estudio se presentan los dominios magnéticos A₂, B₁, B₂ y C (Alam-Hernández et al., 2001).

Dominios magnéticos A₂

Se atribuyen en general a rocas intrusivas de composición intermedia a máfica. Corresponden a anomalías monoplares de alto gradiente, con una intensidad de varía de -60 a 170 nT.

En la región poniente de la carta, aproximadamente a 5 Km al oriente del poblado de Iguala, Gro., se detectó el dominio magnético identificado como A₂₋₂, que presenta una respuesta magnética monopolar, con una intensidad máxima de 170 nT. Las unidades litológicas que se correlacionan superficialmente con este

dominio son principalmente sedimentarias (Formación Morelos), así como riolitas de la Formación Tilzapotla.

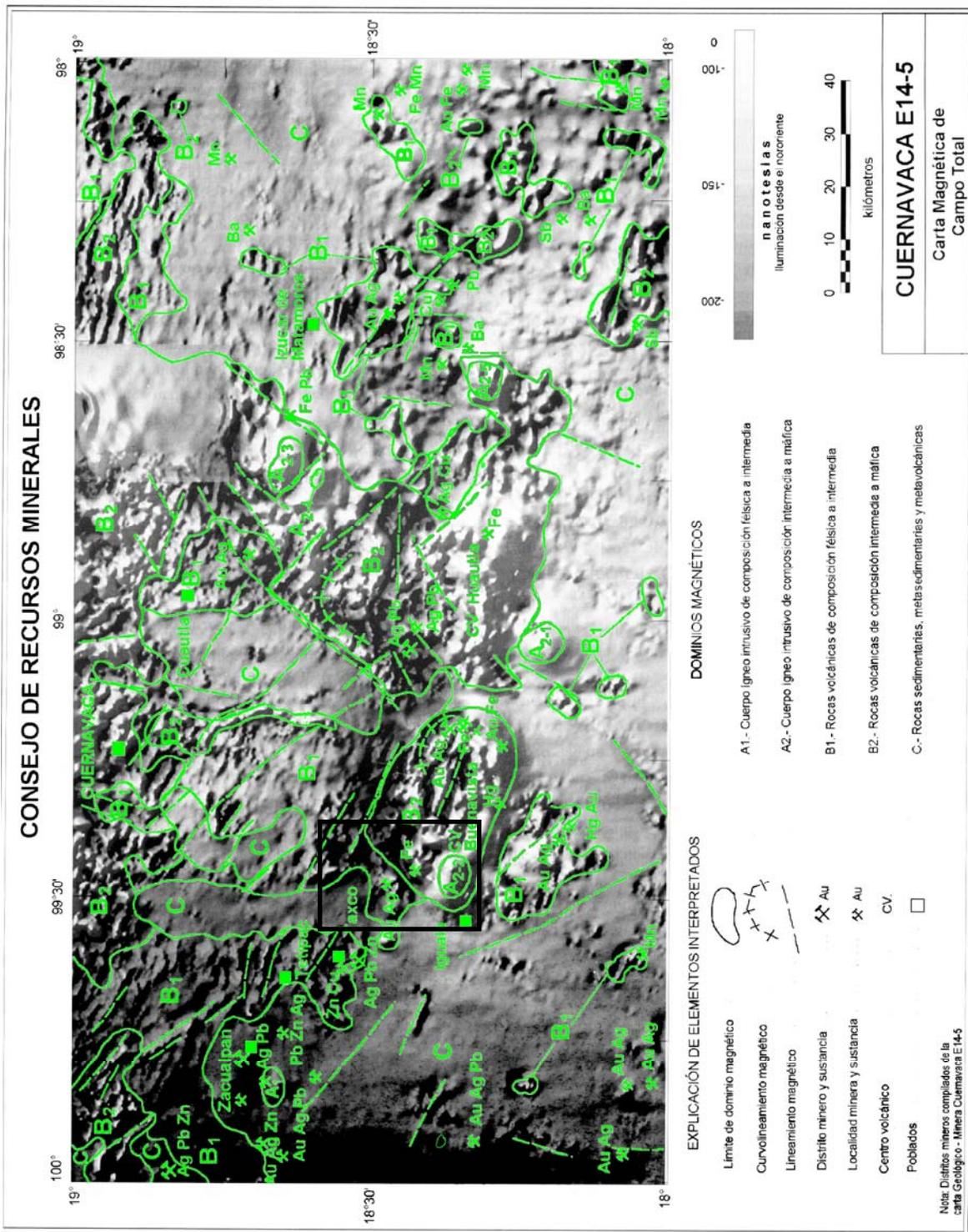


Figura 17 – III.4.4 Interpretación cualitativa de la carta magnética E14-5 (Alam-Hernández et al., 2001).

Al norte de este dominio magnético se tienen evidencias de mineralización de Fe (producido por metasomatismo de contacto), así como algunas minas en donde se extrae mineralización de Au y Ag, asociadas a un cuerpo intrusivo que se encuentra aflorando.

La respuesta magnética que se presenta en este dominio es interpretada como un cuerpo intrusivo a profundidad, el cual de haber intrusionado a las unidades sedimentarias de la Formación Morelos, presentaría una zona con condiciones favorables para contener mineralización similar a la descrita (Alam-Hernández et al., 2001).

El dominio magnético A_{2-2} constituye una zona de interés geológico-minero por localizarse en el extremo suroriente de una franja mineralizada, que presenta un rumbo NW-SE, en donde se encuentran los principales yacimientos minerales que existe n en la carta, como son : Sultepec, Tetipac-Zacualpan y Taxco (Alam-Hernández et al., 2001).

Dominios Magnéticos B1

Se atribuyen generalmente a rocas volcánicas de composición félsica a intermedia. Se caracterizan por presentar distorsiones, altos y bajos magnéticos que se agrupan formando zonas de bajo gradiente y baja intensidad magnética (-250 a -70 nT).

Este dominio se encuentra distribuido en toda la carta, presentando zonas de mayor extensión en la región norte. Se correlaciona en superficie con lahares (Formaciones Tepoztlan y Formación Cuernavaca), con unidades riolíticas, así como con algunas corrientes lávicas de composición basáltica y andesítica, que conforman parte del Sistema Neovolcánico Transmexicano (Alam-Hernández et al., 2001).

Dominios Magnéticos B2

Se atribuyen generalmente a rocas volcánicas de composición intermedia a máfica. Están representados por monopolos y dipolos magnéticos, distribuidos en forma caótica, con intensidades que varían de -1200 a 600 nT; presentan pequeña distancia dipolar y forman zonas de alto gradiente. Se correlacionan en superficie principalmente con cuatro extensas unidades litológicas: andesitas del Grupo Buenavista, Riolita Tilzapotla, basaltos del Sistema Neovolcánico Transmexicano y lahares de la Formación Tepoztlán (Alam-Hernández et al., 2001).

Al oriente del poblado de Iguala, este dominio está asociado a un curvoneamiento magnético, así como a una zona de alta intensidad magnética, interpretándose que esta respuesta puede ser debida al centro volcánico que aportó en gran medida los materiales que conforman la Riolita Tilzapotla.

Es importante mencionar que en algunos casos existen afloramientos de cuerpos intrusivos, los cuales no reflejan una respuesta magnética definida que permita diferenciarlos de las unidades volcánicas, esto es debido a la mayor susceptibilidad magnética que presentan las rocas volcánicas, lo que ocasiona un enmascaramiento de la respuesta magnética de las rocas intrusivas (Alam-Hernández et al., 2001).

Dominios magnéticos C

Representan distorsiones magnéticas suaves que forman zonas de bajo gradiente. Presentan intensidades que varían de -240 a -110 nT. Se atribuyen en general a rocas sedimentarias y metamórficas. Este dominio magnético se manifiesta como un dominio magnético de fondo.

En la región poniente, se correlaciona con las unidades de rocas volcano-sedimentarias metamorfizadas que forman al subterreno Teloloapan. En la zona central se correlaciona con las rocas sedimentarias que constituyen la Plataforma Morelos-Guerrero; y en el sector oriental se asocia con las rocas metamórficas del Complejo Acatlán (Alam-Hernández et al., 2001).

A pesar de que las unidades con que se correlaciona este dominio magnético son muy diferentes desde el punto de vista geológico, la respuesta magnética que presentan es muy similar (debido a la susceptibilidad magnética que presentan dichas unidades es muy pequeña), motivo por el cual, al nivel de la presente interpretación regional, se agruparon en un solo dominio magnético. Los límites de estas unidades litológicas no se pudieron identificar, por encontrarse bajo la respuesta de las rocas volcánicas en ambos casos.

Con base en lo expuesto anteriormente, este dominio se puede interpretar como el área de influencia que comprende a las unidades sedimentarias y metamórficas que constituyen al subterreno Teloloapan, la Plataforma Morelos-Guerrero y al Complejo Acatlán. Los cuales se han visto afectados por diferentes eventos ígneos, tanto intrusivos como extrusivos (Alam-Hernández et al., 2001).

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS DEL ÁREA DE ESTUDIO

IV.1 ANÁLISIS DE LOS DATOS AEROMAGNÉTICOS

Considerando el objetivo general, la dimensión y los aspectos geográficos de la superficie a estudiar, así como los antecedentes generales en cuanto a geología y yacimientos minerales, se consideró que deberían existir contrastes de susceptibilidad magnética entre los elementos involucrados, por lo que se eligió el método de prospección magnética para llevar a cabo el presente estudio.

Puesto que el mapa de anomalías magnéticas del área de estudio (figura 16), fue generado con base en una rejilla, cuyas celdas son de 50 x 50 m, debe tenerse en mente que es poco factible detectar estructuras cuyas dimensiones físicas sean menores o iguales a la mitad de una celda de la rejilla. Sin embargo, debe considerarse que existe una distancia de un kilómetro entre líneas de muestreo, con dirección norte-sur, lo cual hace que en la dirección este-oeste, nos sea posible descubrir únicamente cuerpos o estructuras cuya dimensión física, en ésta dirección, sea mayor o igual a 500 m.

Se desconocen los datos de campo magnético total recabados directamente en campo, así como el detalle de los procesos aplicados a éstos, desde su corrección hasta su presentación final. Sin embargo, su producto final, esto es, nuestro mapa de anomalías magnéticas (figura 16), es la base de nuestro trabajo.

Con el fin de aplicar transformaciones al campo magnético total, mediante algoritmos y equipo de cómputo, requerimos tener la información en formato digital. Para ello, se trazó una retícula equidistante en las direcciones horizontal y vertical (norte y sur), con una distancia de 2 Km entre cada línea; y se estimó el valor del campo anómalo correspondiente en cada intersección. Posteriormente, se empleó el método de Kriging contenido en la versión 8.0 del software Surfer (Golden Software, Inc. 1993-2002), para crear un mapa de contornos a partir de las lecturas estimadas. Este mapa se muestra en la figura 18, mismo que resulta ser aceptable para realizar la transformación del campo, ya que reproduce adecuadamente las anomalías del mapa editado por el CRM.

Los valores de inclinación y declinación de $43^{\circ} 39'$ y $6^{\circ} 42'$, respectivamente, fueron proporcionados por el CRM. Estos valores deben ser un promedio representativo para la totalidad de los datos magnéticos de la carta magnética de campo total E14-5, generada con los levantamientos aeromagnéticos de 1977, 1997 y 1999. Nos es imposible asignar valores más apropiados para la superficie de interés del presente estudio, puesto que desconocemos la extensión de los levantamientos.

Analizando el mapa de anomalías magnéticas de campo total, generado a partir de datos digitales (figura 18), reconocí tres patrones en la configuración de las curvas que corresponden al campo magnético anómalo, con base en la intensidad del campo, la densidad de curvas de intensidad del campo, la forma y la estructura de las anomalías.

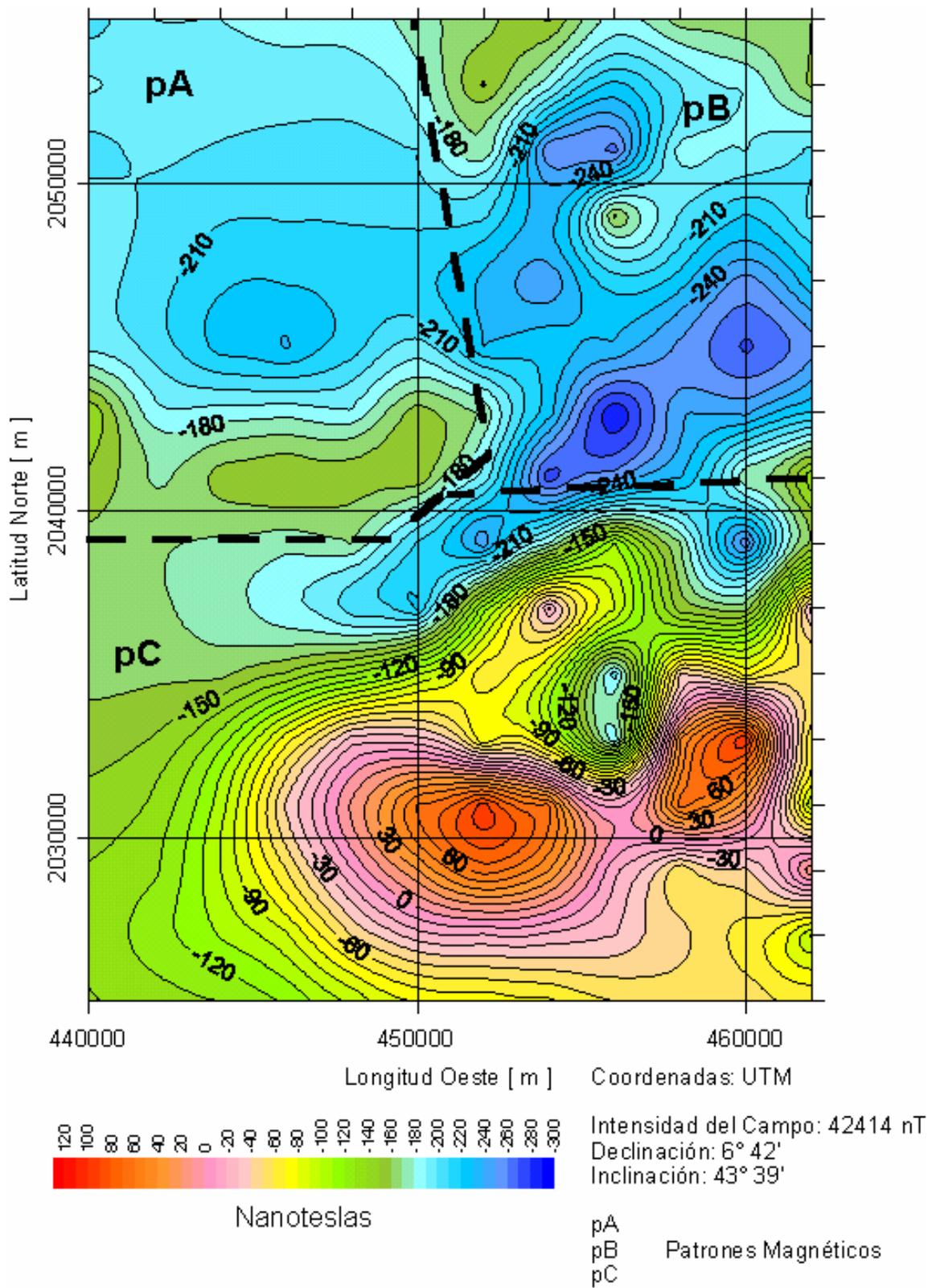


Figura 18 - IV.1 Mapa de anomalías magnéticas de campo total.

El primer patrón (pA, figura 18), cuyos contornos de intensidad presentan la menor densidad, esta representado por una anomalía de valores negativos. Se localiza en el cuadrante superior izquierdo del área de estudio, definido aproximadamente por las coordenadas (440000, 2039000) y (451000, 2055000). El máximo valor de la anomalía corresponde a unos -160 nT, mientras que el mínimo es de -220 nT. La posición espacial de esta anomalía coincide con la ubicación geográfica de la Montaña Poniente, en donde aflora roca caliza de la Formación Morelos y, en menor extensión, el cuerpo intrusivo granítico de Coxcatlán, que aloja en su interior cuerpos tabulares verticales sin continuidad aparente con mineralización de oro y plata.

El segundo patrón (pB, figura 18), cuyos contornos de intensidad presentan una densidad intermedia, se encuentra en el cuadrante superior derecho del área de estudio, entre las coordenadas (452000, 2040000) y (462000, 2055000). En el extremo norte de este sector, se distingue una anomalía con valores negativos de -170 y -260 nT, alojada principalmente sobre afloramientos de conglomerados de la Formación Balsas; mientras que en el extremo sur, se tiene una zona elongada de orientación aproximada $N45^{\circ}E$, de valores negativos con intensidad de -270 nT, abarcando las rocas extrusivas de la Andesita Buenavista y correlacionándose con un afloramiento elongado de basaltos, con la misma orientación.

El tercer patrón (pC, figura 18), de la mayor densidad en los contornos de intensidad, se encuentra en la mitad inferior del área de estudio, entre las coordenadas (440000, 2025000) y (462000, 2039000). En la porción centro norte de este sector, se tiene una anomalía con valores de -30 y -230 nT, correlacionable con los cuerpos intrusivos de Buenavista de Cuéllar que alojan a los yacimientos de fierro La Sorpresa y El Capire, ambos con mena de magnetita. En la porción sur, se tiene una anomalía de 80 nT, coincidiendo con la Montaña Sur constituida de roca caliza en su superficie y rocas sedimentarias a su

alrededor. Finalmente, en la porción sureste, se tiene una anomalía de 90 nT, ubicada al pie de la Montaña Oriente, extendiéndose sobre rocas sedimentarias y volcánicas.

IV.2 REDUCCIÓN AL POLO DEL CAMPO MAGNÉTICO OBSERVADO

Con el fin de facilitar la interpretación y ubicar la posición de los cuerpos causantes de las anomalías magnéticas, se aplicó el algoritmo de Patrick (1976) a los datos digitales del campo magnético total (figura 18), para obtener el campo magnético reducido al polo, mostrado en la figura 19.

Analizando el mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo (figura 19), reconocí tres patrones en la configuración de las curvas que corresponden al campo magnético anómalo, con base en la intensidad del campo, la densidad de las curvas de intensidad del campo y la forma de las anomalías.

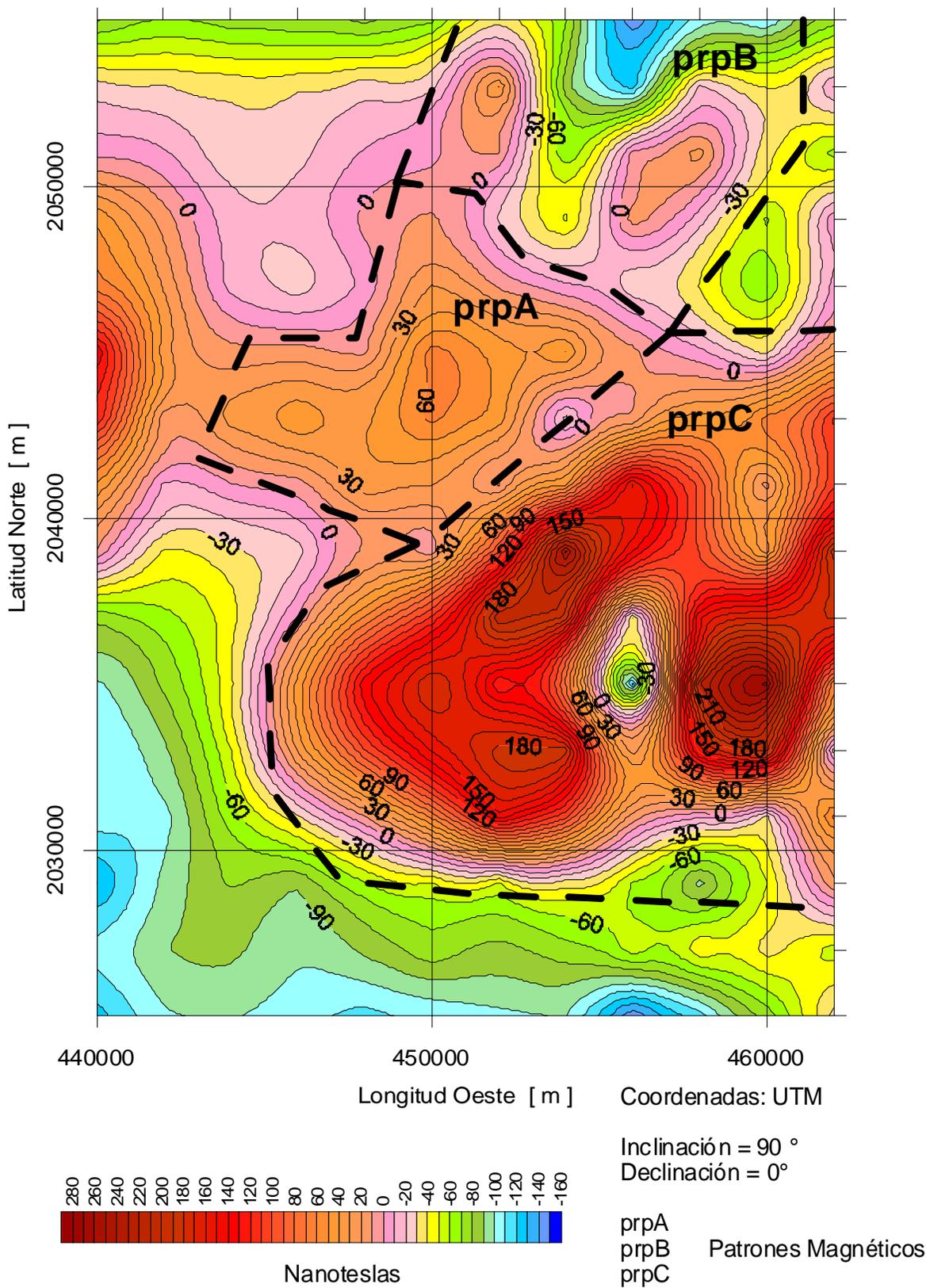


Figura 19 - IV.2 Mapa de anomalías magnéticas reducidas al polo.

El primer patrón (prpA, figura 19), coincide con el afloramiento del cuerpo intrusivo de Coxcatlán, presentando valores de 40 a 60 nT. Abarca la porción sureste de la Montaña Poniente, sin cubrir la parte más alta de la misma.

El segundo patrón (prpB, figura 19), se observa en la esquina superior derecha del área de estudio, compuesto por dos anomalías, una con valor de 20 nT alojada en la Zona Baja Norte, en el límite entre las rocas volcánicas y los conglomerados de la Formación Balsas, destacando la pequeña exposición de roca intrusiva de composición intermedia, cerca de Cazahuatlan, justo al noreste del rasgo anómalo; la segunda anomalía, con valor de 30 nT, se encuentra en el límite entre la Zona Baja Norte y la Montaña Poniente, sobre rocas sedimentarias.

El tercer patrón (prpC, figura 19), con una intensidad mayor o igual a los 180 nT, se presenta sobre los yacimientos La Sorpresa y El Capire, extendiéndose hacia el sur y sureste sobre afloramientos de roca caliza en la Montaña Sur, y de roca volcánica en el extremo sur de la Montaña Oriente.

IV.3 INTERPRETACIÓN CUALITATIVA

Todas las anomalías que presentan dos polos identificables parecen ser congruentes con magnetización inducida en el hemisferio norte, es decir, presentan en su extremo norte valores más negativos que los de su respectiva contraparte en su extremo sur.

Dada la correlación de la anomalía del patrón pA (figura 18) con el cuerpo intrusivo de Coxcatlán y considerando la baja susceptibilidad de la roca caliza, es posible atribuir la respuesta anómala del subsuelo al cuerpo granítico; además, del patrón prpA (figura 19), cuyos contornos de 40 y 60 nT coinciden muy bien con el afloramiento de dicho cuerpo, es posible intuir que éste se extiende en sus

extremos este y oeste, donde se presentan dos picos de 40 nT, pero es cubierto por la roca calcárea. Otra opción factible, es que se trate de dos cuerpos independientes y sepultados asociados a estos picos.

Cabe la posibilidad de que en los extremos sepultados, ya sean cuerpos independientes o una extensión del cuerpo de Coxcatlán, exista mineralización de oro y plata, con características similares a las que se presentan en el interior de la parte aflorante de este cuerpo plutónico, fundamentando esta aseveración únicamente en una similitud por la cercanía de cuerpos, puesto que los yacimientos minerales en este caso existen sin manifestarse magnéticamente.

Debido a la correlación del patrón pB (figura 18) con las rocas de baja susceptibilidad magnética de la Formación Balsas y con las rocas volcánicas ácidas, es razonable atribuir la anomalía magnética a la presencia de un cuerpo intrusivo sepultado. Sin embargo, con base en los patrones prpB (figura 19), podemos afirmar que se trata de dos cuerpos, estando uno de ellos respaldado por el pequeño afloramiento del cuerpo intrusivo cercano al poblado Cazahuatlán, justo al noreste de la anomalía de 20 nT. Cabe la posibilidad de que estos cuerpos no presenten mineralización, ya que no se cuenta con antecedentes geológicos y mineros que indiquen lo contrario.

Finalmente, la porción centro norte del patrón pC (figura 18) además de correlacionarse con los yacimientos minerales de hierro con magnetita como mena, puede ser asociada a los cuerpos intrusivos de Buenavista de Cuéllar. Las otras dos anomalías contenidas en este patrón pueden deberse también a cuerpos intrusivos, puesto que se hayan sobre rocas de baja susceptibilidad magnética. Este último argumento es reforzado por el análisis del patrón prpC (figura 19), donde por la intensidad de más de 160 nT y las características de la anomalía, es posible pensar que se trata de un gran cuerpo o un conjunto de cuerpos cercanos, en cuyo contacto con la caliza deben existir depósitos de magnetita, siendo los yacimientos de La Sorpresa y El Capire, solo una parte.

Cabe destacar que la presencia de los cuerpos minerales de magnetita se evidencia por a amplitud de las anomalías, sin embargo, su posición detallada y forma es imperceptible dado el muestreo y escala regional del presente estudio.

IV.4 INTERPRETACIÓN CUANTITATIVA

A partir de la interpretación cualitativa, se seleccionaron dos zonas de anomalías de interés, de acuerdo los objetivos del presente estudio.

- una, asociada al intrusivo de Coxcatlán que aloja cuerpos tabulares verticales con mineralización de oro y plata.
- la otra, asociada con los intrusivos de Buenavista de Cuéllar que se vinculan con los yacimientos de fierro con mena de magnetita.

Como resultado del análisis realizado y del conocimiento geológico de la superficie estudiada, estas zonas constituyen dos áreas prospectivas con buena posibilidad de contener nuevos cuerpos de mineralización metálica. En la figura 20, se delimitan las dos zonas y se presentan los tres perfiles seleccionados para llevar a cabo una interpretación cuantitativa, y proponer modelos geológicos estructurales, que contemplen las características geológicas de la zona y se ajusten a la señal de campo magnético. El proceso se realizó empleando el software GM-SYS versión 4.6 (Northwest Geophysical Association, 1999), que calcula la respuesta magnética en dos dimensiones utilizando el algoritmo de Talwani et al., 1959, y Talwani and Heirtzler, 1964, haciendo uso de los algoritmos descritos por Won and Bevis, 1987.

La síntesis de las susceptibilidades asignadas a los bloques, con que se representaron las unidades litoestratigráficas, empleados en los modelos de cada perfil (figura 20), se presentan en la tabla 5. Para cada perfil, el modelo intenta ser congruente con la información geológico-minera conocida y satisfacer los datos magnéticos observados, reducidos a polo. Además, se intentó que exista coherencia en la susceptibilidad magnética de los bloques que representan a una misma formación o cuerpo ígneo, dentro de un perfil e inclusive entre perfiles distintos.

Tabla 5 – IV.3 Rango de susceptibilidades magnéticas asignadas a los bloques de las unidades litoestratigráficas presentes.

| UNIDAD | Perfil A-A' k [SI] (figura 21) | Perfil B-B' k [SI] (figura 22) | Perfil C-C' k [SI] (figura 23) |
|---------------------------------|--|--|--|
| Esquisto | 0.002212 - 0.008746 | 0.003305 - 0.008206 | 0.003305 - 0.005001 |
| Fm. Morelos | 0.001005 - 0.001558 | 0.001005 | 0.001005 |
| Fm. Balsas | 0 | ----- | -0.020408 |
| Riolita Tilzapotla | 0.00005 | 0.00005 | 0.00005 |
| Andesita Buenavista | 0.00005 | 0.00005 | 0.00005 |
| Intrusivo Coxcatlán | 0.007753 | 0.007753 | ----- |
| Intrusivo Buenavista de Cuéllar | 0.01601 | ----- | 0.023047 |
| Intrusivos Inferidos | 0.019 | 0.010216 - 0.012315 | ----- |

----- No presente en el perfil
k = Susceptibilidad Magnética

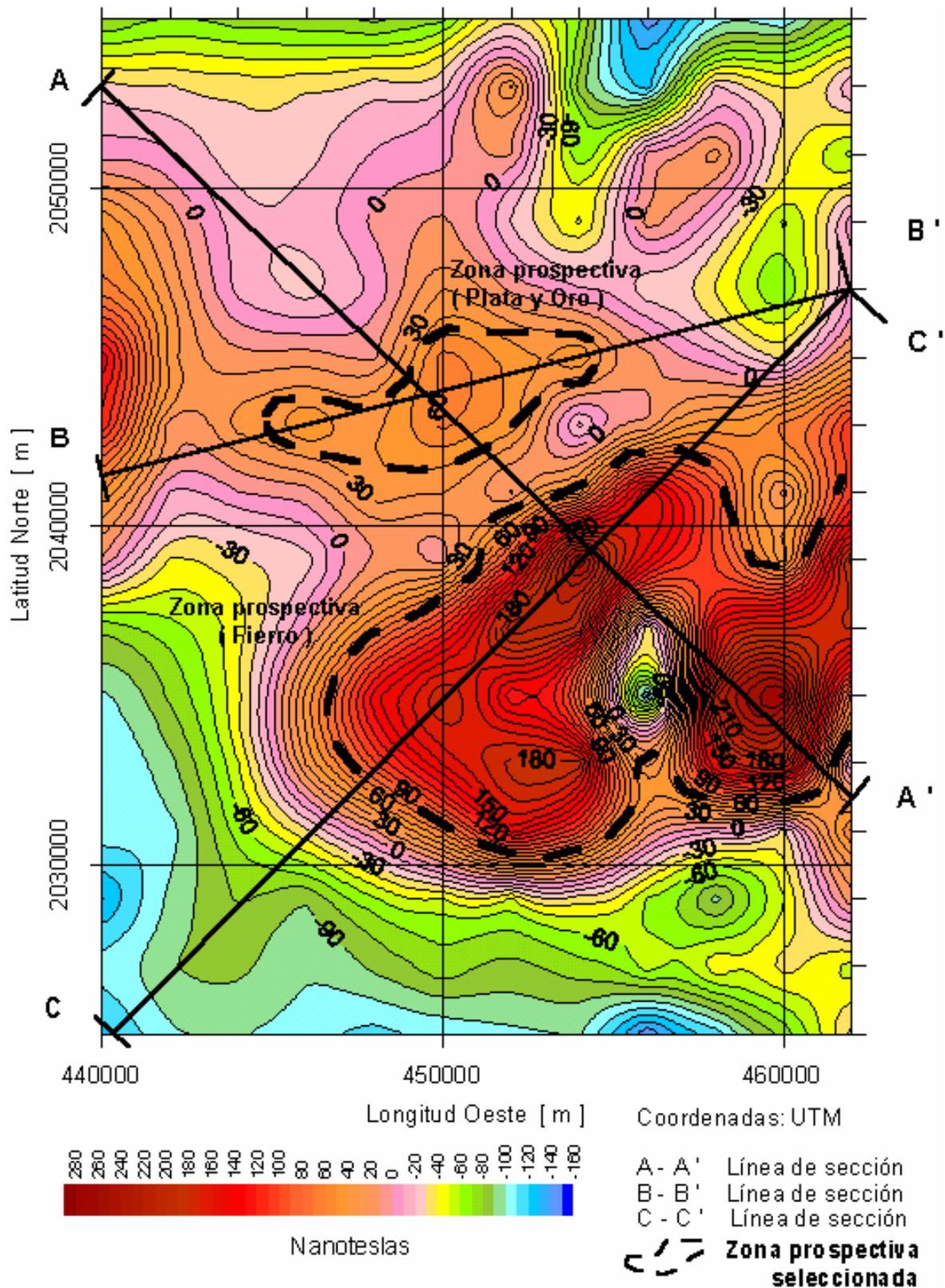


Figura 20 – IV.4 Zonas prospectivas seleccionadas con potencial de contener nuevos cuerpos con mineralización metálica.

Las figuras 21, 22 y 23, junto con las tablas 6, 7, y 8 corresponden respectivamente a los perfiles A-A', B-B' y C-C'. Los bloques que definen sus modelos, están identificados con letras, correspondiendo la primera al perfil a que pertenece y la segunda a la unidad litológica que representa; una tercer letra en la leyenda, significa que se trata de un cuerpo en el interior del bloque o de cuerpos relacionados con el bloque definido por la segunda letra. Finalmente, un numero en la leyenda significa que una misma unidad fue representada con varios bloques, excepto con relación a los cuerpos minerales, que aunque son unidades distintas, se consideran como una sola unidad, es decir, cuerpos minerales. Por ejemplo, el bloque con la clave AQM2, corresponde en el perfil A-A', a la representación del cuerpo de fierro, asociado al cuerpo intrusivo donde se encuentra el yacimiento La Sorpresa, estando esta masa ígnea identificada con la letra Q.

Perfil A-A' (figura 21)

Elaborado sobre la línea de sección A-A', de rumbo S47°E, abarca tres anomalías:

- la primera, identificada con la clave AI, pertenece al patrón prpA (figura 19). Representa un pico cuya amplitud y longitud son poco mayores de 60 nT y 5 Km, respectivamente. Se correlaciona con el cuerpo intrusivo de Coxcatlán (AP) y con cuerpos minerales de oro y plata (APM1) de los lotes Cristo Rey, Arroyo y Arroyo 2.
- la segunda, de clave AII, pertenece al patrón prpC (figura 19). Identifica un pico cuya amplitud alcanza los 210 nT, en una longitud aproximada de 5 Km. Se ubica sobre un afloramiento de roca caliza (AD2) y sobre una pequeña porción del intrusivo de Buenavista de Cuéllar (AQ) relacionado con el yacimiento de fierro La Sorpresa (AQM2).

- la tercera, con la clave AIII, pertenece al patrón prpC (figura 19). Localizada sobre afloramientos de rocas volcánicas de la Andesita Buenavista y/o Riolita Tilzapotla (AH), tiene una amplitud de 250 nT, con longitud de 7 Km.

Puesto que la anomalía AI, abarca el afloramiento de roca caliza (AD1), se infirió la continuidad del intrusivo (AP) por debajo de la roca sedimentaria. El bloque APM1 simula la presencia de cuerpos minerales distribuidos en el intrusivo, por lo que no se debe considerar como un cuerpo mineral, sin embargo, su introducción al modelo con las dimensiones mostradas (figura 21) permitió ajustar satisfactoriamente la anomalía.

La amplitud de 210 nT de la anomalía AII, se debe al yacimiento de fierro La Sorpresa (AQM2), cuya mena esta constituida de magnetita. La ubicación de esta anomalía sobre afloramientos de roca caliza de baja susceptibilidad (AD2), implica que la anomalía debe ser originada por el cuerpo intrusivo (AQ) y por el tipo de mineralización que se le asocia.

La anomalía AIII, presenta una amplitud de 250 nT, encontrándose sobre rocas volcánicas aflorantes (AH). Por su intensidad, se piensa en la existencia de magnetita, constituyendo otro cuerpo mineral de fierro (ARM3), sepultado por las rocas volcánicas (AH), cuyo espesor modelado varía de 200 a 600 m, y por rocas calizas (AD3), cuyo espesor alcanza los 700 m. La profundidad máxima modelada al yacimiento de fierro inferido es de 1.3 Km, con 200 m de espesor y más de 4 Km de longitud.

Las rocas sedimentarias de la Formación Balsas comprendidas en la línea de sección, se representan con el bloque AG, mientras que las rocas de basamento correlacionables con el Esquisto Taxco se representan con los bloques BE1 a 4.

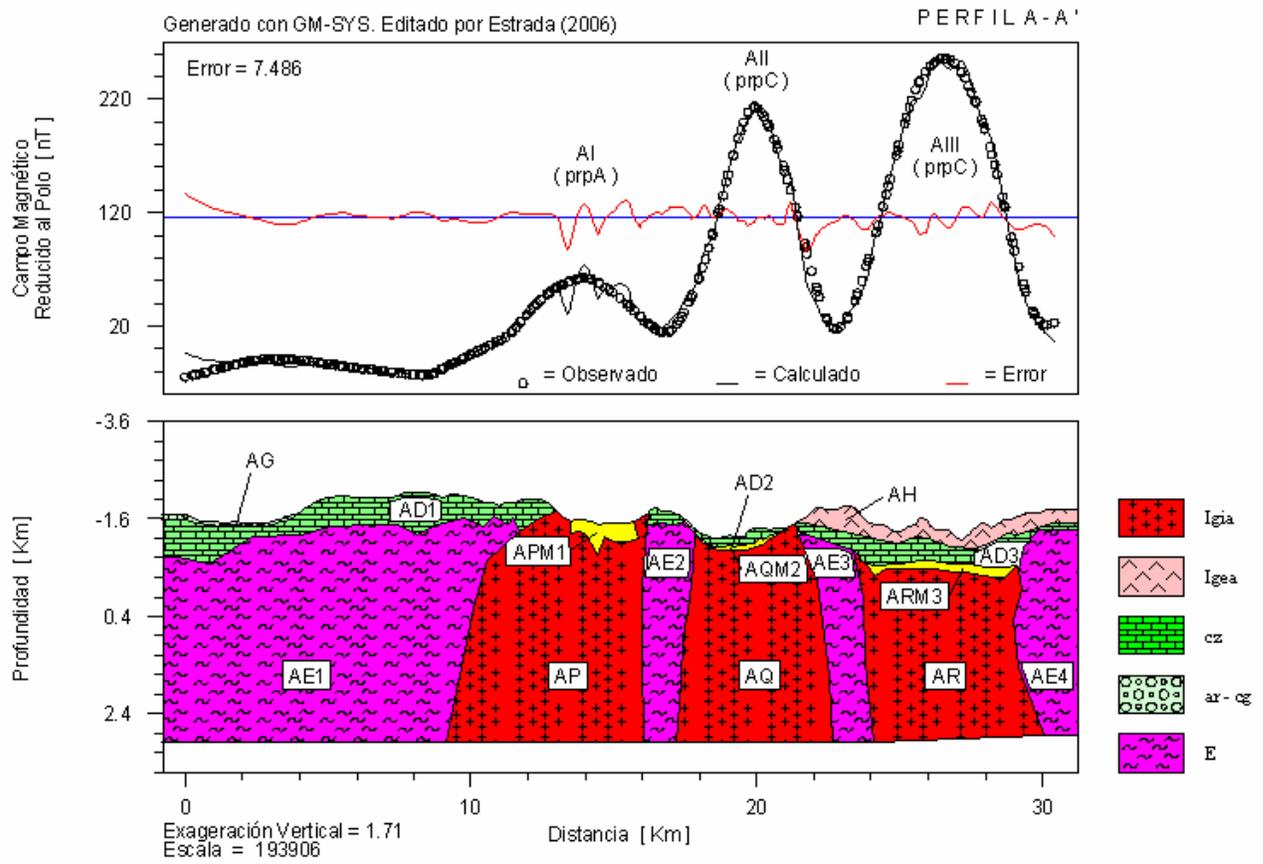


Figura 21 – IV.4 Modelo geológico del perfil A-A'.

Tabla 6 – IV.4 Leyenda de bloques que representan unidades litológicas en el modelo geológico del perfil A-A'.

| TIPO DE ROCA | UNIDAD | BLOQUE | k [SI] |
|---------------------|------------------------------|--------|----------|
| Metamórfica | Esquisto (E) | AE1 | 0.002212 |
| | | AE2 | 0.007402 |
| | | AE3 | 0.008746 |
| | | AE4 | 0.008005 |
| Sedimentaria | Fm. Morelos (cz) | AD1 | 0.001005 |
| | | AD2 | 0.001558 |
| | Fm. Balsas (ar-cg) | AG | 0 |
| Ígnea Extrusiva | Riolita Tilzapotla (Igea) | AH | 0.00005 |
| | Andesita Buenavista (Igea) | AH | 0.00005 |
| Ígnea Intrusiva | Coxcatlán (Igia) | AP | 0.007753 |
| | Buenavista de Cuéllar (Igia) | AQ | 0.01601 |
| | (Inferido) (Igia) | AR | 0.019 |
| Cuerpos "minerales" | Cuerpos Au, Ag | APM1 | 0.016613 |
| | Cuerpo Fe (La Sorpresa) | AQM2 | 0.096271 |
| | Cuerpo Fe (Inferido) | ARM3 | 0.133907 |

k = Susceptibilidad Magnética

Se consideró que la respuesta magnética calculada para el modelo geológico propuesto para el perfil A-A' (figura 21), se ajustó aceptablemente a los datos magnéticos observados, por lo que dicho modelo resulta válido.

Perfil B-B' (figura 22)

Construido en la línea de sección B-B', de rumbo N76°E, incluye una amplia anomalía magnética con tres picos, que pertenecen al patrón prpA (figura 19):

- el primero, identificado como BI, se asocia a rocas calizas de la Formación Morelos (BD1), con amplitud mayor a los 40 nT y longitud de aproximada de 3 Km.
- el segundo, reconocido con la clave BII, tiene una amplitud mayor a los 60 nT y longitud aproximada de 4.5 Km. Se correlaciona con el cuerpo intrusivo de Coxcatlán y con cuerpos minerales de oro y plata (BPM1 y BPM2) de los lotes Cristo Rey, Arroyo y Arroyo 2.
- el tercero, identificado como BIII, se ubica sobre roca caliza de la Formación Morelos (BD2), con amplitud mayor a los 40 nT y longitud aproximada de 1.6 Km.

Debido a la correlación del pico BII con la roca intrusiva de Coxcatlán (BP) y por la forma de la anomalía, se pensó originalmente en un sólo cuerpo plutónico con extremos sepultados. Sin embargo, el modelado fue satisfactorio considerando cuerpos plutónicos independientes (BPI y BPD) para los picos BI y BIII, ambos cubiertos por la caliza de la Formación Morelos (BD1 y BD2). En esta sección, la anomalía con sus picos, se atribuye principalmente a la presencia de los cuerpos plutónicos.

Los bloques BPM1 y BPM2 representan los cuerpos minerales distribuidos en el intrusivo, por lo que no se deben considerar como dos cuerpos minerales únicos, sin embargo, su introducción al modelo con las dimensiones mostradas (figura 22) permitió ajustar satisfactoriamente las anomalías presentes.

Las rocas extrusivas aflorantes comprendidas en la línea de sección, se representan con el bloque BH, mientras que las rocas de basamento correlacionables con el Esquisto Taxco se representan con los bloques BE1 a 5. En el modelo se incluye un bloque BW, considerado como cuerpo intrusivo, para satisfacer los datos magnéticos observados, que podrían constituir a una anomalía medio presente en el área de estudio, y que no se le considera comprendida en algún patrón por estar cortada y ubicada en el límite vertical oeste del área de estudio.

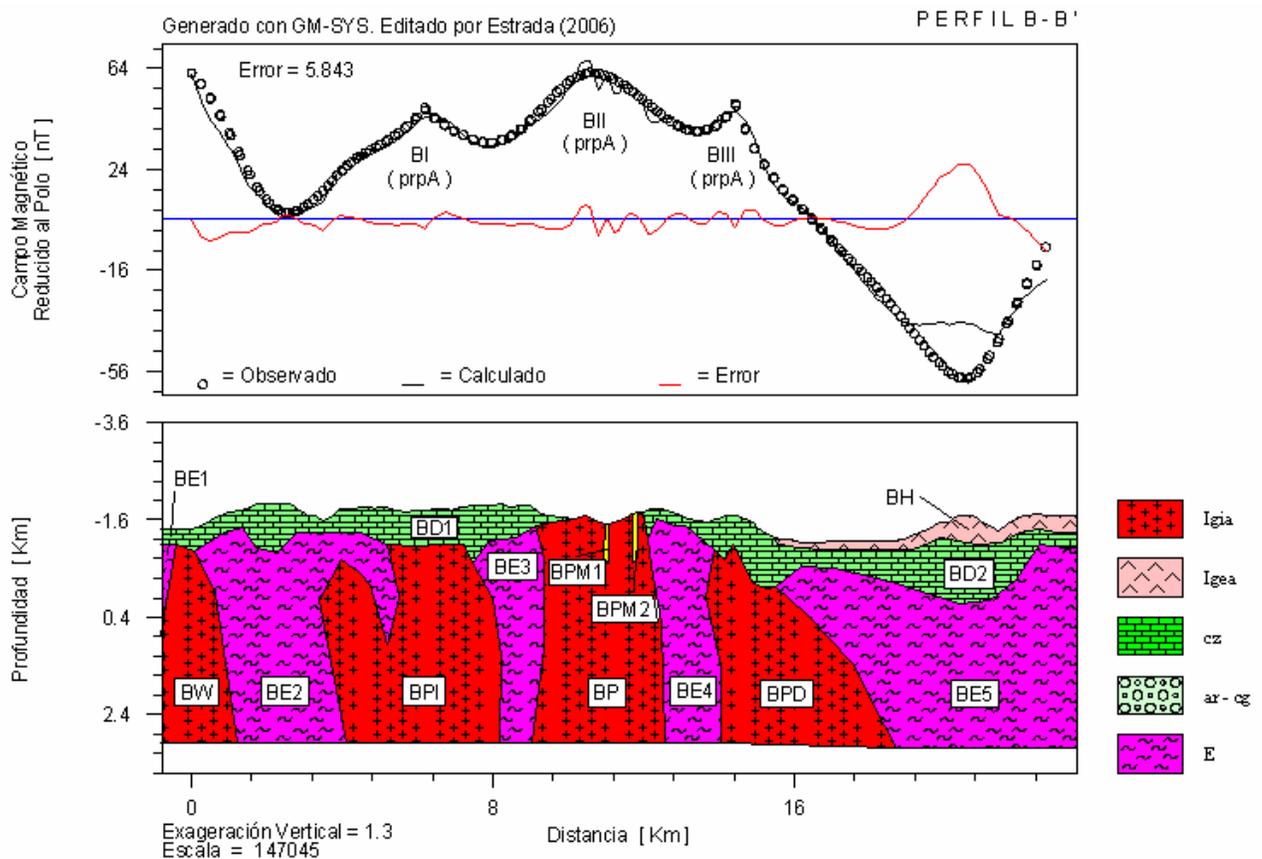


Figura 22 – IV.4 Modelo geológico del perfil B-B'.

Tabla 7 – IV.4 Leyenda de bloques que representan unidades litológicas en el modelo geológico del perfil B-B'.

| TIPO DE ROCA | UNIDAD | BLOQUE | <i>k</i> [SI] |
|---------------------|----------------------------|--------|---------------|
| Metamórfica | Esquisto (E) | BE1 | 0.003594 |
| | | BE2 | 0.005001 |
| | | BE3 | 0.008206 |
| | | BE4 | 0.006472 |
| | | BE5 | 0.003305 |
| Sedimentaria | Fm. Morelos (cz) | BD1 | 0.001005 |
| | | BD2 | 0.001005 |
| Ígnea Extrusiva | Riolita Tilzapotla (Igea) | BH | 0.00005 |
| | Andesita Buenavista (Igea) | BH | 0.00005 |
| Ígnea Intrusiva | Coxcatlán (Igia) | BP | 0.007753 |
| | (Inferido) (Igia) | BPI | 0.010216 |
| | (Inferido) (Igia) | BPD | 0.012315 |
| | (Inferido) (Igia) | BW | 0.01366 |
| Cuerpos "minerales" | Cuerpos Au, Ag | BPM1 | 0.022946 |
| | Cuerpos Au, Ag | BPM2 | 0.002802 |

k = Susceptibilidad Magnética

Se consideró que la respuesta magnética calculada para el modelo geológico propuesto para el perfil B-B' (figura 22), se ajustó aceptablemente a los datos magnéticos observados; ésto a pesar de que en el extremo oeste del perfil, los valores magnéticos calculados difieren unos 16 nT con respecto de los observados. Sin embargo, dicho rasgo se ubica fuera de las zonas prospectivas seleccionadas, por lo que resulta tolerable, y en consecuencia, el modelo es válido.

Perfil C-C' (figura 23)

Construido en la línea de sección C-C', de rumbo N45°E, abarca una gran anomalía magnética regional, donde se pueden apreciar cuatro picos, que pertenecen al patrón prpC (figura 19):

- el primero, identificado como C1, con amplitud mayor a los 170 nT, se encuentra sobre roca caliza de la Formación Morelos (BD).

- el segundo, reconocido con la clave CII, tiene una amplitud mayor a los 200 nT. Se encuentra sobre roca caliza de la Formación Morelos (BD) y se correlaciona con los cuerpos intrusivos de Buenavista de Cuéllar (CQ) y con el yacimiento de fierro El Capire (CQM2)
- el tercero, identificado como CIII, con una amplitud mayor a los 210 nT. Se encuentra sobre roca caliza de la Formación Morelos (BD) y se correlaciona con los cuerpos intrusivos de Buenavista de Cuéllar (CQ) y con el yacimiento de fierro La Sorpresa (CQM3).
- el cuarto, reconocido como CIV, tiene una amplitud poco mayor a los 150 nT. Se encuentra sobre rocas extrusivas (CH)

El modelo geológico considera un cuerpo plutónico, de unos 20 Km de longitud en la dirección del perfil (CQ), para ajustar los datos magnéticos calculados a los observados. El ajuste entre la anomalía observada y la calculada, se logra completamente al integrar, en la parte superior del intrusivo, pequeños bloques (CQM1 a 4) para ajustar los picos contenidos en la anomalía. Puesto que los picos CII y CIII se ajustan con los bloques CQM2 y CQM3 que corresponden a cuerpos con mineral de fierro, se considera que las anomalías CI y CIV también pueden estar relacionadas a cuerpos con mineral de fierro.

Los bloques CG, CH y CE1 a 2, representan respectivamente a las rocas de la Formación Balsas, a las rocas extrusivas y a las rocas de basamento correlacionables con el Esquisto Taxco.

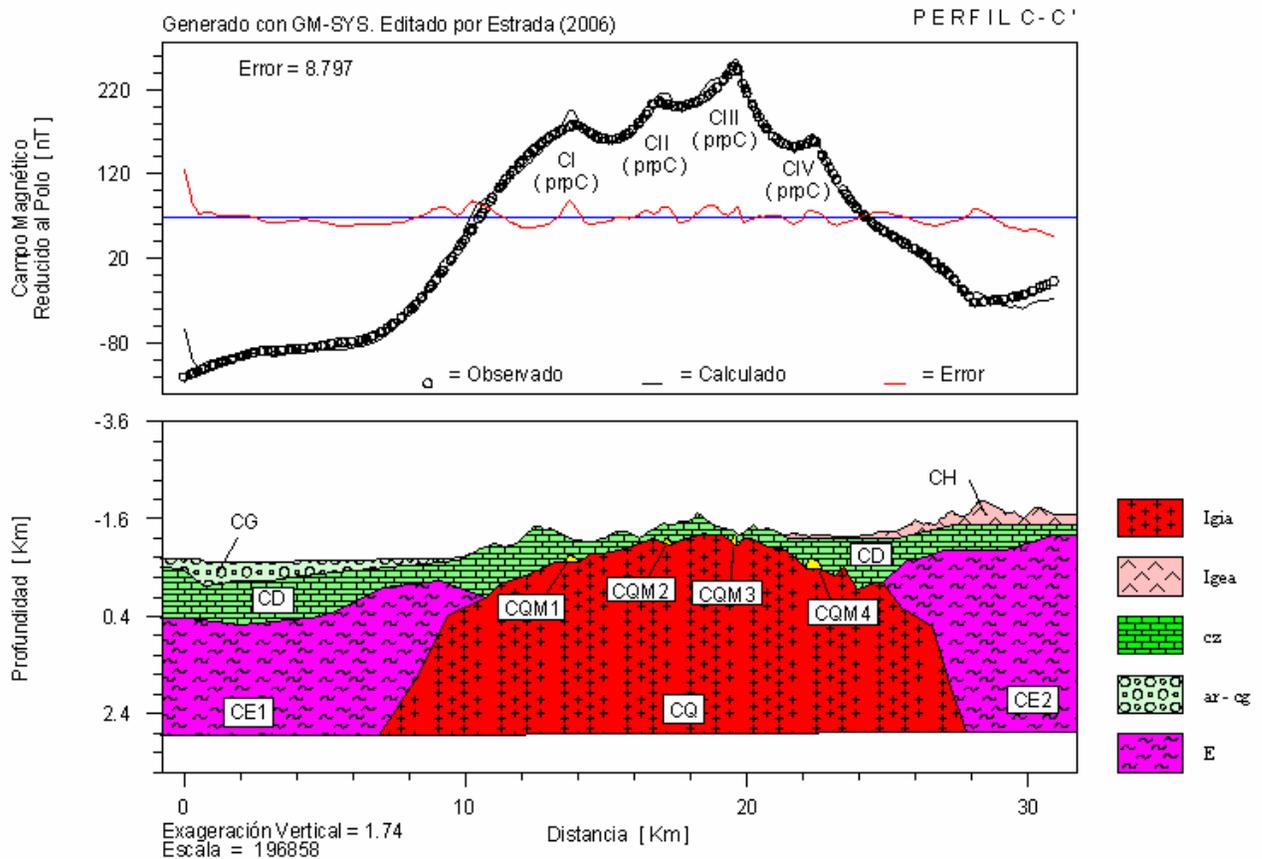


Figura 23 – IV.4 Modelo geológico del perfil C-C'.

Tabla 8 – IV.4 Leyenda de bloques que representan unidades litológicas en el modelo geológico del perfil C-C'.

| TIPO DE ROCA | UNIDAD | BLOQUE | k [SI] |
|---------------------|----------------------------------|--------|-----------|
| Metamórfica | Esquisto (E) | CE1 | 0.003305 |
| | | CE2 | 0.005001 |
| Sedimentaria | Fm. Morelos (cz) | CD | 0.001005 |
| | Fm. Balsas (ar-cg) | CG | -0.020408 |
| Ígnea Extrusiva | Riolita Tilzapotla (Igea) | CH | 0.00005 |
| | Andesita Buenavista (Igea) | CH | 0.00005 |
| Ígnea Intrusiva | (Buenavista de Cuéllar) (Igia) | CQ | 0.023047 |
| Cuerpos "minerales" | Cuerpo Fe (Inferido) | CQM1 | 0.060004 |
| | Cuerpo Fe (El Capire) | CQM2 | 0.069995 |
| | Cuerpo Fe (La Sorpresa) | CQM3 | 0.079998 |
| | Cuerpo Fe (Inferido) | CQM4 | 0.069995 |

k = Susceptibilidad Magnética

Se consideró que la respuesta magnética calculada para el modelo geológico propuesto para el perfil C-C' (figura 23), se ajustó aceptablemente a los datos magnéticos observados, por lo que dicho modelo resulta válido.

IV.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados significativos derivados del análisis e interpretación de los datos geológicos y geofísicos del área de estudio son los siguientes:

- La definición de dos zonas prospectivas por minerales metálicos (figura 20). Una de fierro, en la parte sur del área estudiada; y otra de oro y plata, en la parte norte.
- Tres modelos del subsuelo, sustentados en el análisis e interpretación de los datos geológicos y geofísicos conocidos, mostrados en las figuras 21, 22 y 23.

En cuanto a las zonas prospectivas, debe tenerse en cuenta que la resolución de los datos magnéticos originales empleados, permitió reconocer únicamente estructuras de carácter litológico; por lo mismo, resultó imposible reconocer o inferir los cuerpos minerales, como mantos o vetas, que constituyen los yacimientos conocidos y probables.

Un intervalo de muestreo menor a 2 Km para obtener el campo magnético total en formato digital, no modifica la resolución de los datos magnéticos, por lo que las secciones o perfiles A-A', B-B' y C-C' conservan el carácter regional, aunque en el proceso de modelado si fue viable y necesario el suponer cuerpos pequeños para

lograr ajustar las anomalías magnéticas calculadas a las observadas. Lo cual, refuerza la extensión de las zonas prospectivas definidas en la figura 20, y en consecuencia hacen posible concebir la extensión de las zonas mineras conocidas, aunque ello implica superar aspectos importantes como la profundidad al yacimiento.

En el proceso de modelado se consideró que la magnetización remanente es nula, ya que no se contaba con muestras. Los valores de susceptibilidad magnética asignados a los bloques, que representan unidades litológicas en los modelos, fueron tomados de la literatura, cuidando que estuvieran dentro de un rango teórico adecuado. Esto podría implicar un error en la interpretación, pero es despreciable para los fines prácticos de este estudio.

Los yacimientos esperados o inferidos serían del mismo tipo que los yacimientos conocidos, es decir, los de oro y plata serían de carácter hidrotermal, mientras que los de fierro serían del tipo metasomático. Esto se concluye considerando la cercanía de cuerpos y condiciones geológico estructurales similares.

Un resultado más de este estudio, es la inferencia de los cuerpos intrusivos no aflorantes en la porción norte del área de estudio. Afirmar o descartar la presencia de cuerpos minerales en ellos es aventurado, pues se considera que esta zona ha sido poco o nada estudiada en detalle y que los cuerpos pequeños fueron imperceptibles.

El mapa magnético de anomalías reducidas al polo muestra la posición de los cuerpos que originan las anomalías magnéticas. Sin embargo, debe tenerse cuidado en cuanto a las inferencias relativas a la profundidad de las fuentes, ya que el método de transformación considera que los datos deben estar contenidos en un plano, mientras que en la realidad se encuentran contenidos en una superficie irregular concordante con la superficie del terreno, que presenta una diferencia de elevaciones de más de mil metros.

Los modelos presentados son susceptibles de mejorarse, mediante la integración de información nueva, como son datos gravimétricos, pozos perforados con recuperación de núcleo, registros geofísicos de pozos, etc. Finalmente, las estructuras geológicas como fallas y pliegues parecen no manifestarse magnéticamente.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Y RECOMENDACIONES

V.1 CONCLUSIONES

Se definieron dos zonas prospectivas por minerales metálicos, de fierro, y de oro y plata (figura 20).

La zona prospectiva de fierro, se ubica a unos 4 Km al sur y sureste de los yacimientos de fierro de Buenavista de Cuéllar. Se relaciona con un par de cuerpos plutónicos sepultados, que se manifiestan magnéticamente mediante anomalías de 170 nT, en la Montaña Sur; y 250 nT al pie de la Montaña Oriente. En esta zona se espera encontrar yacimientos de tipo metasomático, debajo de calizas de la Formación Morelos, con base en la cercanía y similitud de condiciones geológicas con respecto a los yacimientos de El Capire y La Sorpresa.

La zona prospectiva por oro y plata, se ubica en torno al cuerpo intrusivo de Coxcatlán, que forma parte de la Montaña Poniente. Se relaciona con dos cuerpos plutónicos sepultados, que se manifiestan magnéticamente mediante anomalías de 40 nT. Si existieran cuerpos minerales, se esperan de tipo hidrotermal, con base en la cercanía y similitud de condiciones geológicas con respecto a los yacimientos de los lotes mineros Cristo Rey, Arroyo y Arroyo 2.

Por las características regionales y de semidetalle del estudio, con los datos magnéticos empleados, solo fue posible observar e inferir estructuras de carácter litológico, mediante interpretación cualitativa. Sin embargo, mediante interpretación cuantitativa, apoyada en el algoritmo de Talwani, se requirió integrar bloques pequeños que representaran los cuerpos minerales existentes para ajustar satisfactoriamente los valores magnéticos calculados a los observados. Esto mismo ocurrió en anomalías donde se supuso la existencia de mineralización asociada a cuerpos sepultados.

Los modelos geológicos elaborados para los perfiles A-A', B-B' y C-C' (figuras 21, 22 y 23), muestran los cuerpos inferidos mediante interpretación cualitativa, la existencia de cuerpos minerales mediante bloques pequeños, y las unidades litológicas expuestas en el área de estudio. Su mejor descripción se tiene en la observación directa de la figura correspondiente.

Se identificaron dos cuerpos intrusivos en la parte norte del área de estudio a partir del patrón de contornos prpB (figura 19). No están contemplados en los modelos geológicos, ni se afirma o descarta la existencia de mineralización relacionada con ellos. Lo anterior, por considerar que han sido poco o nada estudiados en detalle y que el método sólo nos permitió observar e inferir estructuras de carácter litológico.

V.2 RECOMENDACIONES

Las recomendaciones siguientes están orientadas a valorar con más certeza la existencia y características de los posibles yacimientos de minerales metálicos en la zona de estudio.

- Seleccionar zonas más reducidas, para llevar a cabo levantamientos de datos magnéticos que permitan observar estructuras pequeñas. Así como complementar la información magnética, con datos gravimétricos o de algún otro método geofísico.
- Obtener valores de susceptibilidad magnética de las rocas del área de estudio, para asignar valores reales durante el proceso de modelado.
- Contemplar el efecto de la magnetización remanente.
- Evaluar el efecto de la altura de vuelo con relación a la transformación de los datos magnéticos reducidos al polo, puesto que la ecuación (20-Ap.2), se origina, de acuerdo con Bhattacharyya (1965), de una expresión completa del potencial reducido al polo magnético, el cual ha sido obtenido de los valores conocidos de la anomalía de campo total en un plano horizontal.

BIBLIOGRAFIA

Alam-Hernández, C.; Vélez-López, J. y Hernández-Pérez, I. (2001). "Carta Magnética Cuernavaca E14-5 Escala 1:250 000". Boletín Técnico COREMI (CRM), Año VIII, Núm. 43, julio-agosto, p. 2 - 17.

Alba-Aldave, L. A.; Reyes-Salas, M. A.; Morán-Zenteno, D. J.; Ángeles-García, S. y Corona-Esquivel, R. (1996). "Geoquímica de las rocas volcánicas terciarias de la región de Taxco-Huautla". Instituto Nacional de Geoquímica, Congreso Nacional de Geoquímica, 6th., San Luis Potosí, Actas INAGEQ, v. 2, p. 39 - 44.

Avilez-Moreno, M. y Bernardita-Gómez-Cruz, I. (1989). "Skarn Asociado a los Yacimientos de Fierro de La Sorpresa y El Capire en el Municipio de Buenavista de Cuéllar, Gro.". Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, 57p.

Baranov, V. (1957). "A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies". Geophysics, V. 22, No. 2, p. 359-383.

Baranov, V. and Naudy, H. (1964). "Numeric calculation of the formula of reduction to the magnetic pole". Geophysics, V. 29, No. 1, p. 67-69.

Bhattacharyya, B. (1965). "Two-dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation". Geophysics, V. 30, No. 5, p. 829-857.

Blakely, R. (1995). "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications". Cambridge University Press, New York, USA. 417 p.

Blanco, X. (2005). "El Sol y su interacción con la Tierra". Instituto de Geofísica, UNAM, Geofisicosas, Num. 22, enero.

Bori, E. y Cuevas, A. (1997). "Sistema de Cartografía Magnética (SICAMA) del Consejo de Recursos Minerales". Memorias de Trabajos Técnicos, Tomo 1 de la XXII Convención Nacional A.I.M.M.G.M., A.C, Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C., p. 117 - 126.

Briggs, I. C. (1974). "Machine contouring using minimum curvature (spline)". Geophysics, Vol. 39, No. 1, p. 32-42.

Campa, F. and Coney, P. (1983). "Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in México". Canadian Journal of Earth Sciences, Vol. 20, Num. 6, p. 1040 – 1051.

Carrizales-Aguilar, A. (1997). "Informe de la Visita de Reconocimiento a los Lotes Mineros Cristo Rey, Arroyo y Arroyo 2, Ubicados en el Ejido Tlamacazapa, Municipio de Buenavista de Cuéllar, Estado de Guerrero". Informe Técnico, CRM, 22 p.

Consejo de Recursos Minerales (CRM) (1998). "Carta Geológico-Minera, Cuernavaca E14-5, Mor., Pue., Gro., Edo. de Mex. y Oax.". Escala 1:250 000, CRM.

Consejo de Recursos Minerales (CRM) (1999)-(a). "Catálogo de Cartas y Publicaciones". CRM.

Consejo de Recursos Minerales (CRM) (1999)-(b). "Monografía Geológico-Minera del Estado de Guerrero". Publicación M-19e, CRM, 262 p.

Consejo de Recursos Minerales (CRM) (2000). "Monografía Geológico-Minera del Estado de Morelos". Publicación M-23e, CRM. 209 p.

Consejo de Recursos Minerales (CRM) (2001). "Carta de Campo Magnético total, Cuernavaca E14-5, Mor., Pue., Gro., Edo. de Mex. y Oax.". Escala 1:250 000, CRM.

Corona-Esquivel, R. (1978). "Estudio Geológico-Magnetométrico de los Yacimientos Ferríferos de Buenavista de Cuéllar, Estado de Guerrero". Informe Técnico, CRM, 37 p.

D'Arnaud, J. (1989). "Foundation of Exploration Geophysics". Elsevier, The Netherlands. 667 p.

De Cserna, Z.; Fries C. Jr.; Rincón-Orta, C.; Silver, L. T.; Westley, H.; Solorio-Munguía, J. y Schmitter-Villada, E. (1975). "Datos geocronométricos terciarios de los estados de México, Morelos y Guerrero". Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 26, p. 263 – 273.

De Cserna, Z. y Fries C. Jr. (1981).- "Hoja Taxco 14Q-h(7) y resumen".- Carta Geológica de México, Serie de 1:100 000. UNAM, Instituto de Geología, México.

Díaz-Olvera, A. (1972). "Estudio Geológico Minero del Área de Coxcatlán, Municipio de Buenavista de Cuéllar, Gro.". Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería, UNAM, 71 p.

Dobrin, M. (1969). "Introducción a la Prospección Geofísica". Ediciones Omega, Barcelona, España. 483 p.

Dobrin, M. and Savit, C. (1988). "Introduction to Geophysical Prospecting". 4th edition. McGraw Hill Book Co., 867p.

Fries, C. (1960). "Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, Región Central Meridional de México". Instituto de Geología, UNAM, Boletín 60, 236 p.

García-Sagredo, E. (1978). "Exploración por Hierro en Buenavista de Cuéllar, Gro.". Informe Técnico, CRM. (Inédito).

Golden Software, Inc. (1993-2002). "Surfer Version 8.00".

Grant, F. and West, G. (1965). "Interpretation Theory in Applied Geophysics". McGraw Hill Book Company, New York, USA. 381p.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1988)-(a). "Carta Topográfica, Cuernavaca E14-5". Escala 1:250 000, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1988)-(b). “Carta Topográfica y Carta Geológica, Iguala E14-A78”. Escala 1:50 000, Segunda edición, INEGI.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1988)-(c). “Carta Topográfica y Carta Geológica, Taxco E14-A68”. Escala 1:50 000, Segunda edición, INEGI.

James, W. R. (1966). “The Fourier model in map analysis”. Technical Report No. 1, ONR Contract NONR-1228(36), Office of Naval Research, Geography Branch, 37 p.

Jankowski, J. and Sucksdorff, C. (1996). “Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice”. International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA).

Lasfarges, P. (1995). “Magnetismo en Geología y Prospección Magnética Terrestre”. Instituto Politécnico Nacional, 182 p.

Milsom, J. (2003). “Field Geophysics”. Third edition, John Wiley and Sons.-England. 221 p.

Morán-Zenteno, D. (1985). “Geología de la República Mexicana”. Segunda edición, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática y Facultad de Ingeniería de la UNAM, 87 p.

Morán-Zenteno, D. J.; Alba-Aldave, L. A.; Martínez-Serrano, R. G.; Reyes-Salas, M. A.; Corona-Esquivel, R. y Ángeles-García, S. (1998). “Stratigraphy, geochemistry and tectonic significance of the Tertiary volcanic sequences of the Taxco-Quetzalapa region, Southern Mexico”. Instituto de Geología, UNAM, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 15, núm. 2, p. 167 – 180.

Nagata, T. (1961). "Rock Magnetism". Maruzen, Tokyo, Japan. 350 p.

Nettleton, L. (1940). "Geophysical Prospecting for Oil". McGraw-Hill Book Company, New York, USA. 443 p.

Northwest Geophysical Association (1999). "GM-SYS Ver. 4.6 [Extended]".

Ortega-Gutiérrez (1978). "Estratigrafía del Complejo Acatlán en la Mixteca Baja, Estados de Puebla y Oaxaca". Instituto de Geología, UNAM, Revista V. 2, p 112-131.

Parasnis, D. (1973). "Mining Geophysics". Second edition, Elsevier, New York, USA. 385 p.

Parasnis, D. (1986). "Principles of Applied Geophysics". Fourth edition, Chapman and Hall, New York, USA. 402 p.

Patrick, C. (1976). "Reduction to the magnetic pole using a fast fourier series algorithm". Computers & Geosciences, Vol. 2, p. 211-217.

Ramírez, M. (1974). "Informe sobre Yacimientos de Hierro de los Estados de Guerrero y Veracruz". Departamento de Exploración, A.H.M.S.A. (Inédito).

Reedman, J. (1979). "Techniques in Mineral Exploration". Applied Science Publishers. LTD, London, England. 533 p.

Reynolds, J. (1997). "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics". John Wiley & Sons, England. 796 p.

Robinson, E. (1988). "Basic Exploration Geophysics". John Wiley & Sons, New York, USA. 562 p.

Sears, F. y Zemansky, M. (1969). "Física General". Cuarta Edición, Ediciones Aguilar, Madrid, España. 1040 p.

Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2005).- "Nace el Servicio Geológico Mexicano".- Boletín Técnico, SGM, Año XI, Núm. 65, marzo-abril, p 2 - 3.

Sharma, P. (1986). "Geophysical Methods in Geology". Second Edition, Elsevier, New York, USA. 442 p.

Talwani, M.; Lamar-Worzel, J. y Landisman, M. (1959). "Rapid Gravity Computations for Two-Dimensional Bodies with Application to the Mendocino Submarine Fracture Zone". Journal of Geophysical Research, Vol. 64, No. 1, p. 49 – 59.

Talwani and Heirtzler (1964). "Computation of magnetic anomalies caused by two-dimensional bodies of arbitrary shape", en Parks, G. A., Ed., Computers in the mineral industries, Part I.- Stanford Univ. Publ., Geological Sciences, 9, 464-480.

Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. and Keys, D. (1990). "Applied Geophysics". Second edition, Cambridge University Press, USA. 770 p.

Won, I. J. and Bevis, M. (1987). "Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran Subroutines". Geophysics, Vol. 52, p. 232-238.

APÉNDICE 1

Sistema Internacional de Unidades

El sistema internacional de unidades, conocido comúnmente como SI, contempla cantidades tratadas directa e indirectamente en la tesis, por lo que a continuación se presentan las cantidades y unidades pertinentes.

| Sistema Internacional de Unidades (SI) | | |
|---|--------------------------|-----------------------|
| Cantidades Fundamentales | Unidad | Símbolo |
| Longitud | Metro | m |
| Masa | Kilogramo | Kg |
| Tiempo | Segundo | s |
| Temperatura | Kelvin | K |
| Corriente Eléctrica | Ampere | A |
| Cantidad de Sustancia | Mol | mol |
| Intensidad Luminosa | Candela | cd |
| Ángulo Plano | Radián | rad |
| | | |
| Cantidades Derivadas | Unidad Derivada | Símbolo |
| Fuerza | Newton | N |
| Flujo Magnético | Weber | Wb =V s |
| Densidad de Flujo Magnético (B) | Tesla | T = Wb/m ² |
| Inducción Magnética (M) | Ampere / Metro | A / m |
| Campo Magnético Inductor (H) | Ampere / Metro | A / m |
| Inductancia | Henry | H = Wb / A |
| Diferencia de Potencial | Volt | V = W / A |
| Intensidad de Polo Magnético | Ampere Metro | A m |
| Flujo de Energía | Watt | W = J / s |
| Energía de Trabajo | Joule | J = N*m |
| Momento Magnético (mm) | Amper Metro ² | A m ² |

D'Arnaud, (1989)

APÉNDICE 2

Ecuaciones Fundamentales para la Reducción al Polo de Datos Magnéticos

Se presentan las expresiones del campo magnético total y del campo magnético reducido al polo, que sustentan la transformación de los datos con la ayuda de un programa de cómputo (Patrick, 1976).

La doble serie de Fourier para una malla rectangular es:

$$T_{ij} = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left[\begin{aligned} &A_{mn} \cos\left(\frac{2\pi mi}{K}\right) \cos\left(\frac{2\pi nj}{L}\right) + B_{mn} \sin\left(\frac{2\pi mi}{K}\right) \cos\left(\frac{2\pi nj}{L}\right) \\ &+ C_{mn} \cos\left(\frac{2\pi mi}{K}\right) \sin\left(\frac{2\pi nj}{L}\right) + D_{mn} \sin\left(\frac{2\pi mi}{K}\right) \sin\left(\frac{2\pi nj}{L}\right) \end{aligned} \right] \quad (18 - \text{Ap. 2})$$

donde T_{ij} = campo magnético en el punto (i, j)

K = número de renglones en la malla (dirección i)

L = número de columnas en la malla (dirección j)

M = número máximo de armónicos en la dirección i

N = número máximo de armónicos en la dirección j

A, B, C, D = coeficientes de la doble serie de Fourier

Los coeficientes están dados por (James, 1966)

$$A_{mn} = \left(\frac{w}{KL}\right) \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{L-1} T_{ij} \cos(a) \cos(b)$$

$$B_{mn} = \left(\frac{w}{KL}\right) \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{L-1} T_{ij} \sin(a) \cos(b) \quad (19 - \text{Ap. 2})$$

$$C_{mn} = \left(\frac{w}{KL} \right) \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{L-1} T_{ij} \cos(a) \sin(b)$$

$$D_{mn} = \left(\frac{w}{KL} \right) \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{L-1} T_{ij} \sin(a) \sin(b)$$

donde $a = \frac{2\pi mi}{K}$

$$b = \frac{2\pi nj}{L}$$

$w = 1$, si $m = 0, M$ y $n = 0, N$

$w = 2$, si $m = 0, M$ o $n = 0, N$

$w = 4$, si $m \neq 0, M$ y $n \neq 0, N$

La ecuación (18) es una representación del campo en el plano de datos. Antes de que el campo pueda ser reducido al polo, la doble serie debe ser multiplicada por el término de atenuación $\exp\left\{- (d - z)(K_m^2 + K_n^2)\right\}^{1/2}$, donde la fuente está a una profundidad d , el plano de observación esta en z (*positivo hacia abajo*),

$$K_m = \frac{2\pi m}{K(\Delta x)}, K_n = \frac{2\pi n}{L(\Delta y)} \text{ y } \Delta x, \Delta y \text{ son los intervalos de la malla en las direcciones}$$

i, j , respectivamente. Como d generalmente es desconocida, constante y separable, se le incluye normalmente como parte de los coeficientes de la serie, quedando el factor de atenuación como $\exp\left\{z(K_m^2 + K_n^2)\right\}^{1/2}$.

Si las anomalías magnéticas están limitadas sólo a fuentes de inducción, la ecuación de Battacharyya para el campo reducido al polo es equivalente a

$$T_{ij} = \left(\frac{1}{2} \sin^2 \theta \right) \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N (K_m^2 + K_n^2) \begin{bmatrix} P_{mn} (\cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b)) \\ + Q_{mn} (\sin(a)\cos(b) + \cos(a)\sin(b)) \\ + R_{mn} (\cos(a)\cos(b) + \sin(a)\sin(b)) \\ + S_{mn} (\sin(a)\cos(b) - \cos(a)\sin(b)) \end{bmatrix} \quad (20 - \text{Ap. 2})$$

donde

$$P_{mn} = \left\{ \frac{1}{(G_{mn}^2 + Y_3^2)^2} \right\} \left\{ (G_{mn}^2 + Y_3^2)(A_{mn} - D_{mn}) + 2G_{mn}Y_3(B_{mn} + C_{mn}) \right\}$$

$$Q_{mn} = \left\{ \frac{1}{(G_{mn}^2 + Y_3^2)^2} \right\} \left\{ -2G_{mn}Y_3(A_{mn} - D_{mn}) + (G_{mn}^2 - Y_3^2)(B_{mn} + C_{mn}) \right\}$$

$$R_{mn} = \left\{ \frac{1}{(G_{mn}^2 + Y_4^2)^2} \right\} \left\{ (G_{mn}^2 - Y_4^2)(A_{mn} + D_{mn}) + 2G_{mn}Y_4(B_{mn} - C_{mn}) \right\}$$

$$S_{mn} = \left\{ \frac{1}{(G_{mn}^2 + Y_4^2)^2} \right\} \left\{ -2G_{mn}Y_4(A_{mn} + D_{mn}) + (G_{mn}^2 - Y_4^2)(B_{mn} - C_{mn}) \right\}$$

$$G_{mn}^2 = K_m^2 + K_n^2$$

$$Y_3 = \text{ctn}\theta(K_m \cos \phi + K_n \sin \phi)$$

$$Y_4 = \text{ctn}\theta(K_m \cos \phi - K_n \sin \phi)$$

ϕ = declinación del campo inductor

θ = inclinación del campo inductor

y, m y n no pueden ser ambas iguales a cero.

En cuanto a la estabilidad de la transformación para la reducción al polo de los datos magnéticos, debe tenerse en cuenta que el método es aplicable a datos de cualquier latitud magnética, salvo para los casos especiales en que $\theta = 0^\circ$ y $\theta = 180^\circ$, cuyas ecuaciones no son incluidas (Patrick, 1976). Sin embargo, durante la aplicación del algoritmo de Patrick, a datos pertenecientes a latitudes bajas, debe tenerse precaución, puesto que el término $\sin^2 \theta$, tendería a cero; mientras que el término $\text{ctn} \theta$, tiende a infinito. Por lo cual, es posible que el método de transformación sea inestable al aplicarlo a datos correspondientes a latitudes bajas, muy cercanas al ecuador magnético.

