

3  
2 Ejes



**Universidad Nacional Autónoma  
de México**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**METODOS DE INTERPRETACION EN  
PROSPECCION MAGNETOMETRICA**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO GEOFISICO  
P R E S E N T A**

**GERARDO FIGUEROA CORREA**

**MEXICO, D. F.**

**1985**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

# I N D I C E

RESUMEN.	PAGINA
I. INTRODUCCION.....	1
I.1. La Magnetometría en la Exploración.....	2
I.2. El Campo Magnético Terrestre.....	2
I.3. Variaciones del Campo Magnético Terrestre.....	5
I.4. Instrumentos de Medición del Campo Magnético.....	8
I.5. Técnicas de Operación de Campo.....	8
I.6. Reducción de Datos.....	10
II. INTERPRETACION CUALITATIVA.....	11
II.1. Identificación de Unidades Geológicas.....	13
II.1.a. Rocas Sedimentarias.....	14
II.1.b. Rocas Igneas en General.....	14
II.1.c. Rocas Plutónicas.....	14
II.1.d. Rocas Volcánicas.....	18
II.1.e. Rocas Metamórficas.....	18
II.2. Determinaciones Estructurales.....	20
II.2.a. Contactos.....	20
II.2.b. Rumbos.....	23
II.2.c. Fallas.....	23
II.2.d. Echados.....	27

	PAGINA
III. INTERPRETACION CUANTITATIVA.....	28
III.1. Métodos Empíricos.....	37
III.1.a. Método de la Tangente.....	37
III.1.b. Regla de la Amplitud Media.....	39
III.1.c. Regla de Peters.....	40
III.1.d. Regla de Tiburg.....	41
III.1.e. Regla de Hannel.....	42
III.1.f. Regla de Thalen.....	43
III.1.g. Regla de la Distancia de Pendiente...	44
III.2. Cálculos Simples por Computadora.....	46
III.2.a. Deconvolución Werner.....	46
III.3. Ajustes de Curvas por Computadora.....	51
III.3.a. Método de Talwani.....	54
III.3.b. Derivación de la Fórmula.....	58
III.4. Técnica Iterativa Mediante Computador Gráfico..	62
III.4.a. Tratado del Problema.....	65
III.4.b. Espacio Paramétrico.....	67
III.4.c. Método de Pasos Descendientes.....	68
III.4.d. Método de Gauss-Newton.....	71
III.4.e. Método de Marquardt.....	73
IV. INTEGRACION GEOLOGICA GEOFISICA.....	77
IV.1. Datos Aeromagnéticos.....	80
IV.2. Análisis de Datos Aeromagnéticos.....	81
IV.3. Datos Geofísicos Adicionales.....	82

IV.4.	Información Geológica y de Otras Disciplinas Afines.....	83
IV.5.	Interpretación Cualitativa de Datos Magnéticos....	83
IV.6.	Interpretación Cuantitativa de Datos Magnéticos...	84
IV.7.	Correlación General de Datos.....	84
IV.8.	Origen Geológico de las Anomalías Magnetométricas.	87
IV.9.	Levantamientos Adicionales.....	87
IV.9.10.	Integración de Datos Adicionales.....	87
V.	EJEMPLO.....	89
V.I.	Antecedentes y Trabajos Previos.....	90
V.2.	Geología.....	91
V.2.a.	Geología Regional.....	91
V.2.b.	Geología Local.....	93
V.3.	Geofísica.....	96
V.3.a.	Magnetometría Aérea.....	96
V.3.a.1.	Vuelos Barométricos.....	96
V.3.a.2.	Vuelos de Contorno.....	97
V.3.b.	Magnetometría Terrestre.....	101
V.3.b.1.	Verificación.....	101
V.3.b.2.	Levantamiento de Detalle.....	103
V.4.	Interpretación Cualitativa.....	103
V.5.	Interpretación Cuantitativa.....	106
V.6.	Integración Geológica-Geofísica.....	107
V.7.	Evaluación de Resultados.....	109
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	112
	BIBLIOGRAFIA.....	116
	APENDICES.....	121

" METODOS DE INTERPRETACION EN PROSPECCION MAGNETOMETRICA "

## R E S U M E N

El presente trabajo de Tesis denominado "Métodos de Interpretación en Prospección Magnetométrica", se enfoca al mineral de Hierro, ya que las características propias del método son más determinantes en la exploración del mencionado mineral.

El objetivo principal de este trabajo, es el de proporcionar una herramienta auxiliar a aquellas personas que se inicien en la comprensión del tema.

Los aspectos básicos se tratan de una manera sencilla en el capítulo I. En el capítulo II se da la interpretación cualitativa, considerada de gran importancia como apoyo a la interpretación cuantitativa tratada en el capítulo III y dividida en cuatro grupos, mencionando los avances más significativos que ha tenido hasta la fecha. La integración geológica-geofísica del capítulo IV se auxilia en un diagrama de flujo con las diversas etapas del proceso, resaltando la importancia del manejo sistemático de la integración y asociación de datos geológicos en el análisis, ya que éstos serán determinantes en la interpretación magnetométrica y geofísica en general.

Como ejemplo de aplicación se toma un estudio realizado en el Estado de Durango, dando finalmente referencias bibliográficas para quien desee profundizar en algún tema particular.

I.- I N T R O D U C C I O N



## I. INTRODUCCION.

### I.1. LA MAGNETOMETRIA EN LA EXPLORACION.

En la infraestructura y desarrollo de cualquier país los recursos naturales no renovables son de suma importancia, su exploración y explotación es apoyada por diversas ciencias entre las que se cuenta la Ingeniería Geofísica. Esta ha tenido un gran auge en las últimas décadas mediante la aplicación de sus diversos métodos que día a día utilizan equipo y métodos de interpretación más confiables.

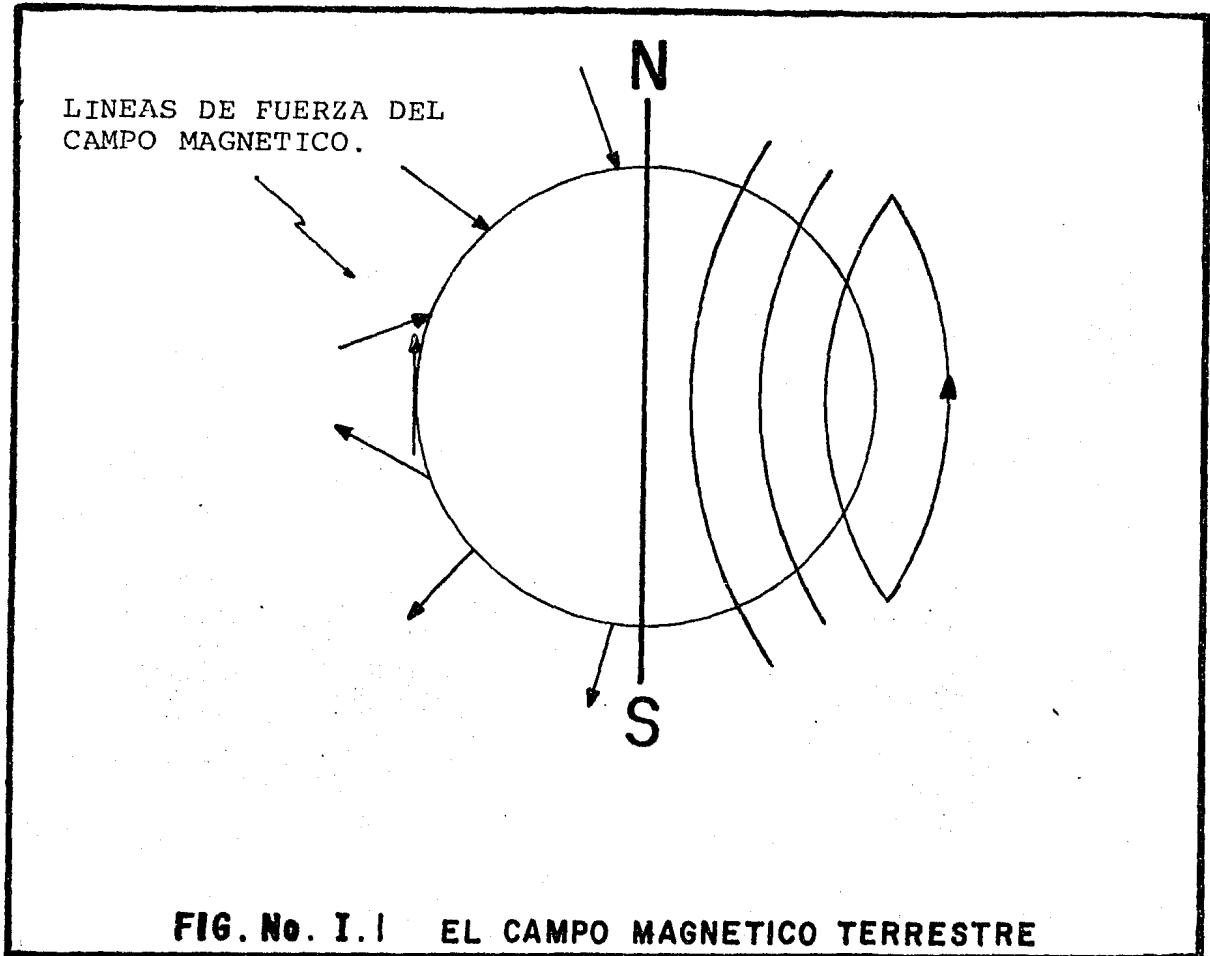
Entre las ramas de la Geofísica encontramos a la Magnetometría, cuyo objetivo principal es el de localizar formaciones rocosas con ciertas propiedades magnéticas capaces de producir disturbios o anomalías al campo magnético terrestre. Estos disturbios son debidos a contrastes en los valores de susceptibilidad magnética entre las unidades de roca o estructuras geológicas presentes en la zona de estudio.

La Prospección Magnetométrica además de tener una aplicación muy amplia figura entre los métodos más baratos de la Prospección Geofísica y exploratoria en general, siendo también desde el punto de vista operacional, rápido y sencillo.

### I.2. EL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE.

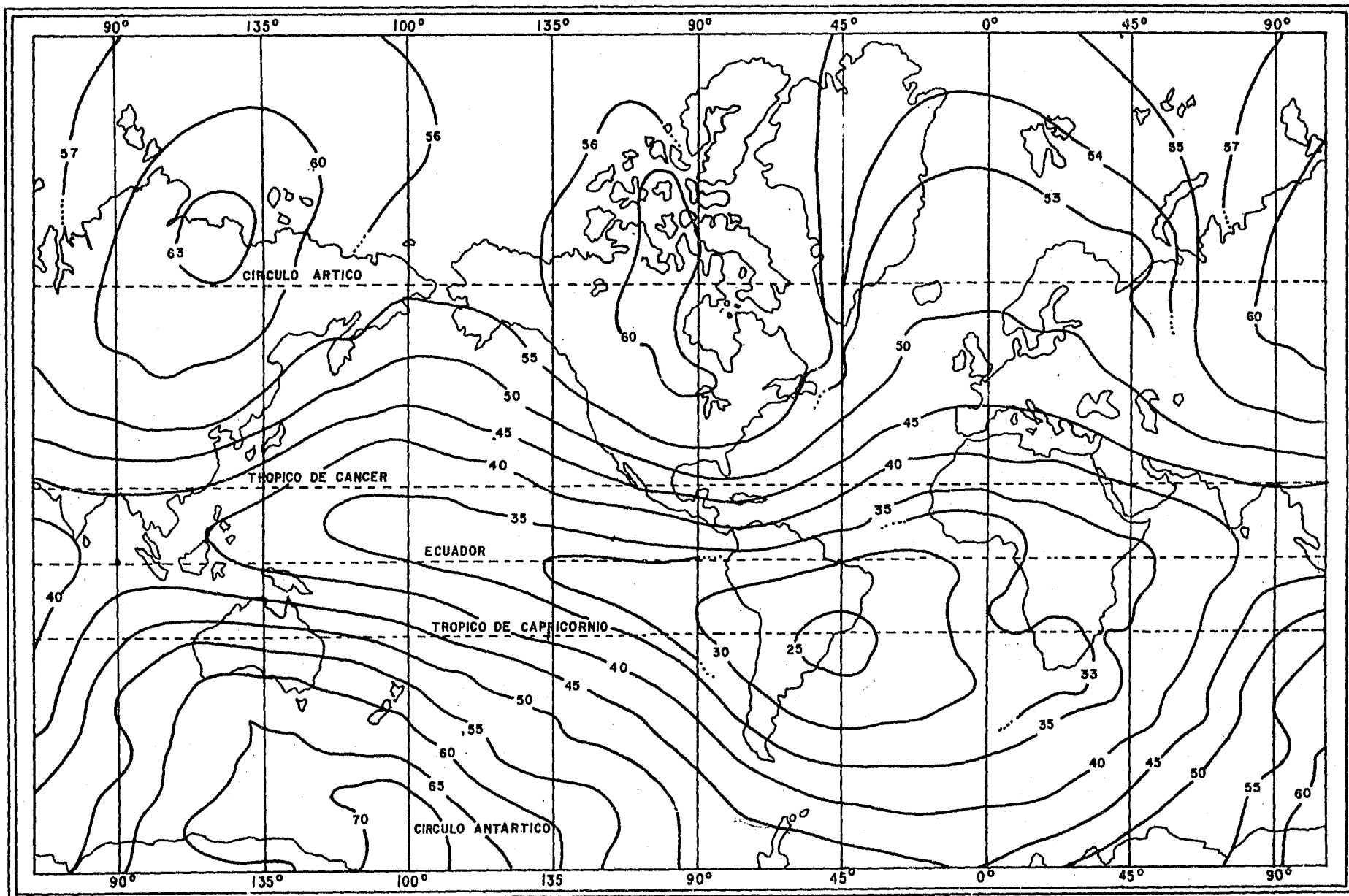
La tierra es una forma ideal, puede ser considerada como una esfera polarizada uniformemente generando su propio campo magnético. La dirección del campo con respecto a la superficie terrestre, cambia-

desde su posición vertical saliendo en el polo sur magnético, de donde pasa a una posición horizontal en el ecuador, para continuar cambiando hasta una posición vertical incidiendo en el polo norte magnético. Véase la Figura No. I.1.



La intensidad total del campo magnético terrestre varía dependiendo de la latitud sobre la tierra. Para el caso de México el rango de intensidad varía de sur a norte de 40000 a 50000 gammas aproximadamente.

La Figura I.2. representa las curvas de intensidad total del campo magnético terrestre para las diferentes coordenadas geográficas -- sobre la superficie de la tierra.



-EXPRESADO EN KILOGAMMAS-

INTENSIDAD TOTAL DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

( S. BREINER, 1973 )

FIG. 1.2

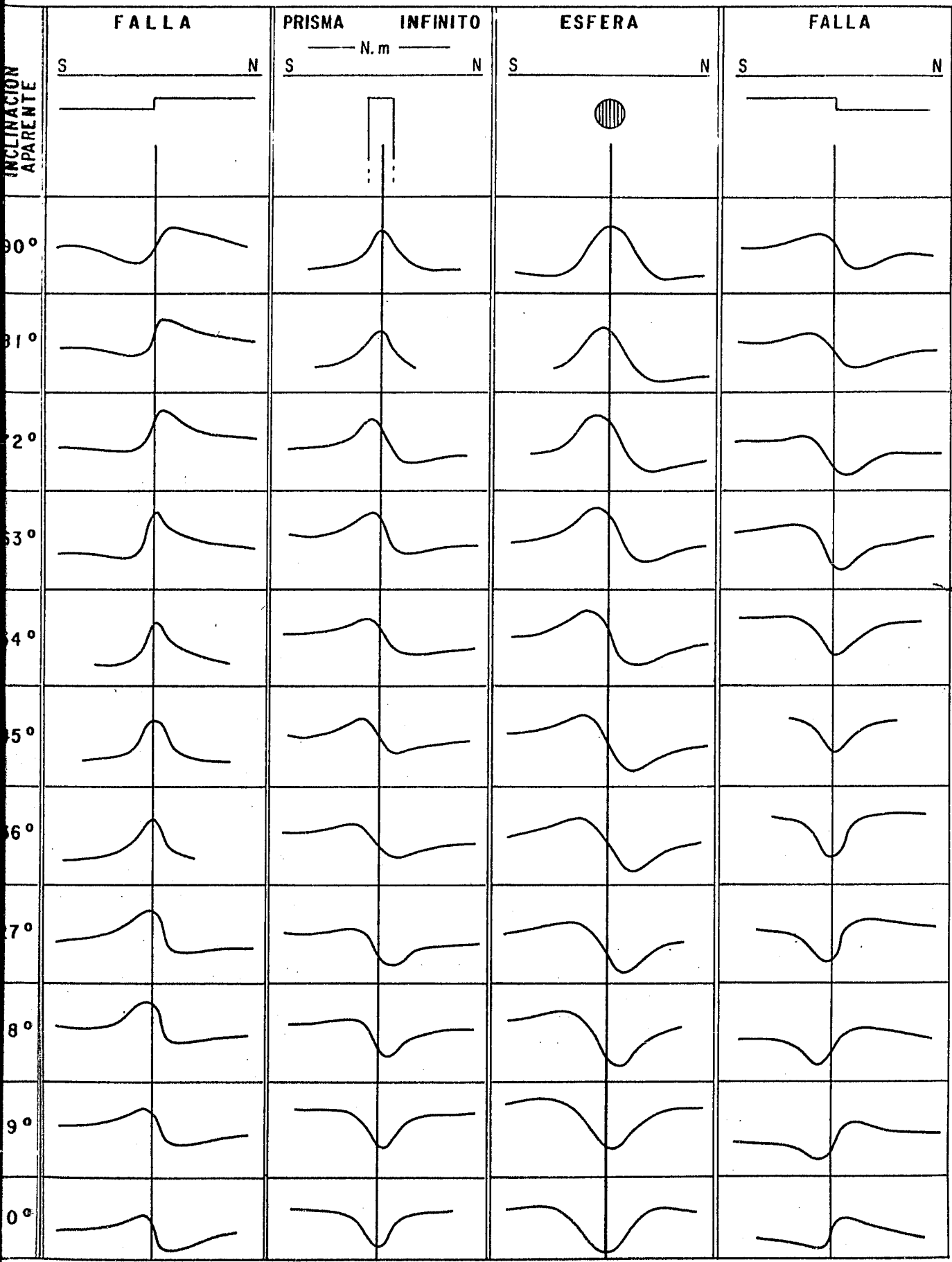
La variación de las líneas de campo o inclinación de las líneas magnéticas con respecto a la superficie terrestre, causa disturbios considerables en la naturaleza y en la forma de las anomalías magnéticas. La Figura I.3. muestra la respuesta magnética de fallas y cuerpos idealizados en diferentes latitudes sobre la tierra.

### I.3. VARIACIONES DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE.

El campo magnético terrestre también sufre variaciones que son periódicas y no periódicas causando dificultades en la planeación y ejecución de los levantamientos magnéticos, ya que debido a estas variaciones deberán corregirse cuando sea posible los datos obtenidos. Los efectos antes mencionados se relacionan a fenómenos astronómicos, a corrientes eléctricas en las placas ionizadas de la atmósfera o bien a fenómenos del interior de la tierra, se mencionarán a continuación algunos.

Variación Diurna.- Consiste en cambios diarios relacionados a movimientos y corrientes en la Ionósfera debidos probablemente a radiaciones solares. Se presenta con períodos de 24 horas y variaciones hasta de 60 gammas, está sujeta a influencias negativas en su comportamiento provocadas por tormentas magnéticas y micropulsaciones debidas a corrientes telúricas producidas en el interior de la tierra, cuyo registro magnético será inútil para la exploración geofísica.

Las tormentas magnéticas se dan principalmente en altas latitudes y regiones polares pudiendo presentarse también simultáneamente en todo el globo terrestre, pueden durar desde algunas horas hasta varios días causando disturbios en el campo hasta de 1000 gammas, se relacionan a fuertes explosiones corpusculares en el sol, su radio de acción es considerable y varía también el valor de la declinación de 1 a 2 grados, éstas variaciones hacen necesario suspender las operaciones magnetométricas de campo haciendo inútiles los datos recopilados durante su presencia.



GRUPO Nº 1.3 ANOMALIAS MAGNETICAS DE ESTRUCTURAS EN DOS DIMENSIONES (HEMISFERIO NORTE)

El campo magnético además de estar afectado por los cambios en el tiempo en forma periódica y aperiódica, se distribuye en forma irregular en el globo en base principalmente a la latitud y a la geología.

El factor latitud es debido a la simetría de los polos magnéticos con respecto a la tierra; la intensidad del campo magnético en un lugar depende en cierta proporción de la posición de éste en relación a los polos, donde la intensidad del campo duplica la del ecuador magnético. Esta variación por latitud se corrige en los levantamientos que cubren grandes áreas, calculando la variación por distancia horizontal con la ayuda de cartas isomagnéticas. En el factor geológico, como el campo magnético terrestre se origina en el interior de la tierra, sus líneas de fuerza sufren distorsiones al atravesar la litósfera debido a que sus características petrológicas y magnéticas son heterogéneas. Esto da lugar a irregularidades relacionadas con grandes masas continentales conocidas como anomalías geomagnéticas.

Variación Secular.- Es una variación cíclica del campo magnético terrestre que se origina en el interior de la tierra, esto propicia que la declinación o movimiento de los polos magnéticos cambie con un promedio de 0.18 grados por año.

Variación Lunar Diurna.- Es una variación que se presenta con períodos de 25 horas aproximadamente, causando disturbios de baja amplitud relacionados a la interacción Luna-Ionósfera y variando cíclicamente a través de los meses.

Variación Anual.- Se ha observado que existe un cambio en el campo magnético terrestre con periodicidad de un año, para Norteamérica es de 1' aproximadamente para la declinación, valor considerado exacto en la práctica.

Variación Cíclica.- Su duración es de 11 años y se relaciona a la actividad solar con una distribución marcada respecto a la latitud, indicando su origen externo.

#### I.4. INSTRUMENTOS DE MEDICION DEL CAMPO MAGNETICO.

En los levantamientos magnetométricos se mide la intensidad del campo magnético total, su componente horizontal o vertical originada por el campo magnético terrestre y el magnetismo propio ya sea residual o inducido de las rocas y concentraciones minerales. Para dichas mediciones se emplean diversos aparatos.

El avance de la tecnología electrónica ha producido cada vez equipos geofísicos más sofisticados, de una sensibilidad tal que permiten obtener datos de campo de gran confianza si la operación se efectuó correctamente. Entre los instrumentos de medición, podemos citar como los más representativos a los siguientes:

- Inclinómetros
- Magnetómetros tipo balanza de Schmidt
- Magnetómetros de Torsión
- Magnetómetros de Núcleo Saturable
- Magnetómetros de Prescesión Nuclear
- Magnetómetros de Bombeo Optico
- Magnetómetros Remanentes
- Magnetómetros Fluxgate
- Gradiómetros

#### I.5. TECNICAS DE OPERACION DE CAMPO.

Las técnicas de operación de campo para levantamientos magnetométricos deben tener un orden y una secuencia bien establecida. La selección de áreas de estudio se hace en base a estudios previos de geología y levantamientos aeromagnéticos, los cuales son efectivos, rápidos y económicos en la configuración geológica regional, permitiendo de esta manera evaluar las posibilidades de exploración a más-

detalle. Una vez escogida la zona a estudiar, se proyecta una línea base paralela a la dirección dominante de los cuerpos mineralizados o estructuras geológicas, y líneas de observación perpendiculares a la línea base, con el fin de cortar las estructuras o vetas. Los levantamientos terrestres se dividen en tres tipos principales:

- Preliminares o de Reconocimiento
- De Semidetalle
- De Detalle

Levantamientos de Reconocimiento.- El objetivo de este tipo de levantamiento es el de cubrir áreas relativamente grandes para comprobar la mayor de las veces, anomalías magnéticas detectadas por levantamientos aeromagnéticos anteriores. Estos levantamientos se realizan sin un patrón especial de caminamiento identificando las zonas más anómalas.

Levantamientos de Semidetalle.- Se realizan en áreas donde se conoce la existencia de cuerpos mineralizados o anomalías magnéticas importantes, con el fin de determinar su magnitud y continuidad. A partir de una línea base paralela a la dirección del supuesto cuerpo mineral se trazan líneas transversales, el espaciamiento entre líneas y estaciones depende la mayor de las veces del criterio y experiencia del Geofísico.

Levantamientos de Detalle.- Se efectúan sobre estructuras conocidas con el fin de obtener el máximo de información sobre su actitud, forma y extensión en el subsuelo. Las líneas del levantamiento forman una retícula con estaciones suficientes de tal forma que los cuerpos, estructuras mineralizadas o zonas anómalas queden cubiertas lo mejor posible.



## I.6. REDUCCION DE DATOS.

Una vez obtenidos los datos de campo se procede a llevar la depuración y reducción de éstos. Diversos operadores y técnicas son usados para este fin, como lo son el regional, residual,  $2^{\text{a}}$  derivada, reducción al polo, continuaciones hacia arriba y hacia abajo, planos de susceptibilidad, etc., hasta llegar finalmente a planos y perfiles magnéticos corregidos, listos para su interpretación cualitativa y cuantitativa mediante diversas técnicas, lo cual veremos en los capítulos a continuación.

## II. - INTERPRETACION CUALITATIVA

## II. INTERPRETACION CUALITATIVA.

Como se dijo anteriormente, el propósito inmediato de las exploraciones de magnetometría es el detectar rocas o minerales que posean propiedades magnéticas distintivas, que se harán notorias al causar disturbios o anomalías en la intensidad del campo magnético de la tierra. Los mapas de anomalías magnéticas son a menudo usados en forma cualitativa para ayudar a interpretar la Geología Regional, así pues, el conocimiento de la distribución de propiedades físicas tales como la susceptibilidad ferromagnética y la magnetización natural dentro de la corteza terrestre, proporcionará información de gran valor acerca de la Geología del subsuelo, aún cuando las rocas de dicha zona no puedan identificarse en otra forma.

Es importante para realizar la interpretación cualitativa, que la amplitud de todas las anomalías cercanas, esté directamente relacionada a diferencias en el contenido magnético de los depósitos minerales o de las rocas. La intensidad de una anomalía puede ser siempre expresada en términos de la desviación del campo magnético normal circundante.

Las propiedades magnéticas de las rocas pueden atribuirse directamente a la presencia de magnetita, y si ésta se encuentra uniformemente distribuida, los contornos magnéticos pueden indicar directamente las posiciones de los cuerpos causantes de tal anomalía. La magnetita es uno de los accesorios minerales más predominantes particularmente en rocas ígneas y metamórficas; cuando las concentraciones de magnetita son considerables causarán anomalías magnéticas importantes para ser estudiadas más detenidamente.

Un manejo apropiado de datos magnéticos en la interpretación cualitativa será de gran auxilio para el mapeo e identificación de unidades geológicas y lineamientos estructurales, jerarquizando así, zonas de interés exploratorio para estudios posteriores.

## II.1. IDENTIFICACION DE UNIDADES GEOLOGICAS.

Para hacer un reconocimiento geológico mediante mapas magnéticos; - se deben tener en cuenta algunos puntos importantes como son los -- siguientes:

- a) La amplitud de un campo magnético sobre una unidad parti-- cular de rocas.
- b) La forma de la anomalía usualmente referida a relieves - - magnéticos.
- c) La textura de las anomalías en el mapa magnético, el cual es gobernado por la tendencia, medida, forma, gradiente y - continuidad de las anomalías individuales.
- d) Areas de texturas y relieves similarmente magnéticos y - - correlacionados con unidades de rumbos conocidos, pueden - ser interpretados como el mismo tipo de roca.
- e) Espaciamiento entre las líneas del levantamiento de campo.
- f) Sensibilidad del equipo empleado.
- g) En magnetometría aérea, la elevación del vuelo y el mínimo intervalo de configuración usado en el mapa aeromagnético.

La determinación de una unidad de roca usualmente requiere que ésta tenga propiedades magnéticas distintivas respecto a las unidades -- adyacentes, que puedan distinguirse contactos entre unidades de roca debido a esas diferencias magnéticas, las cuales son fundamentales - junto con la experiencia del intérprete para hacer un buen reconoci - miento geológico en base a datos magnéticos.

De éste modo en una área donde no hay, o hay muy poco reconocimien - to geológico, rocas de tipo común pueden ser interpretados de una - manera general mediante levantamientos magnetométricos, los cuales - vienen a ser un apoyo vital en la interpretación geológica final.

Debe tenerse gran cuidado al hacer un reconocimiento geológico mediante mapas magnéticos, ya que muchas rocas poseen propiedades -- magnéticas difíciles de interpretar. Las siguientes observaciones-- pueden ser de gran ayuda para el intérprete.

#### II.1.a. ROCAS SEDIMENTARIAS.

Las rocas sedimentarias tienen en general una respuesta magnética - pobre y por lo tanto estudios magnéticos sobre rocas sedimentarias-- muestran anomalías debido a basamentos ígneos subyacentes (Fig. - - II.1)

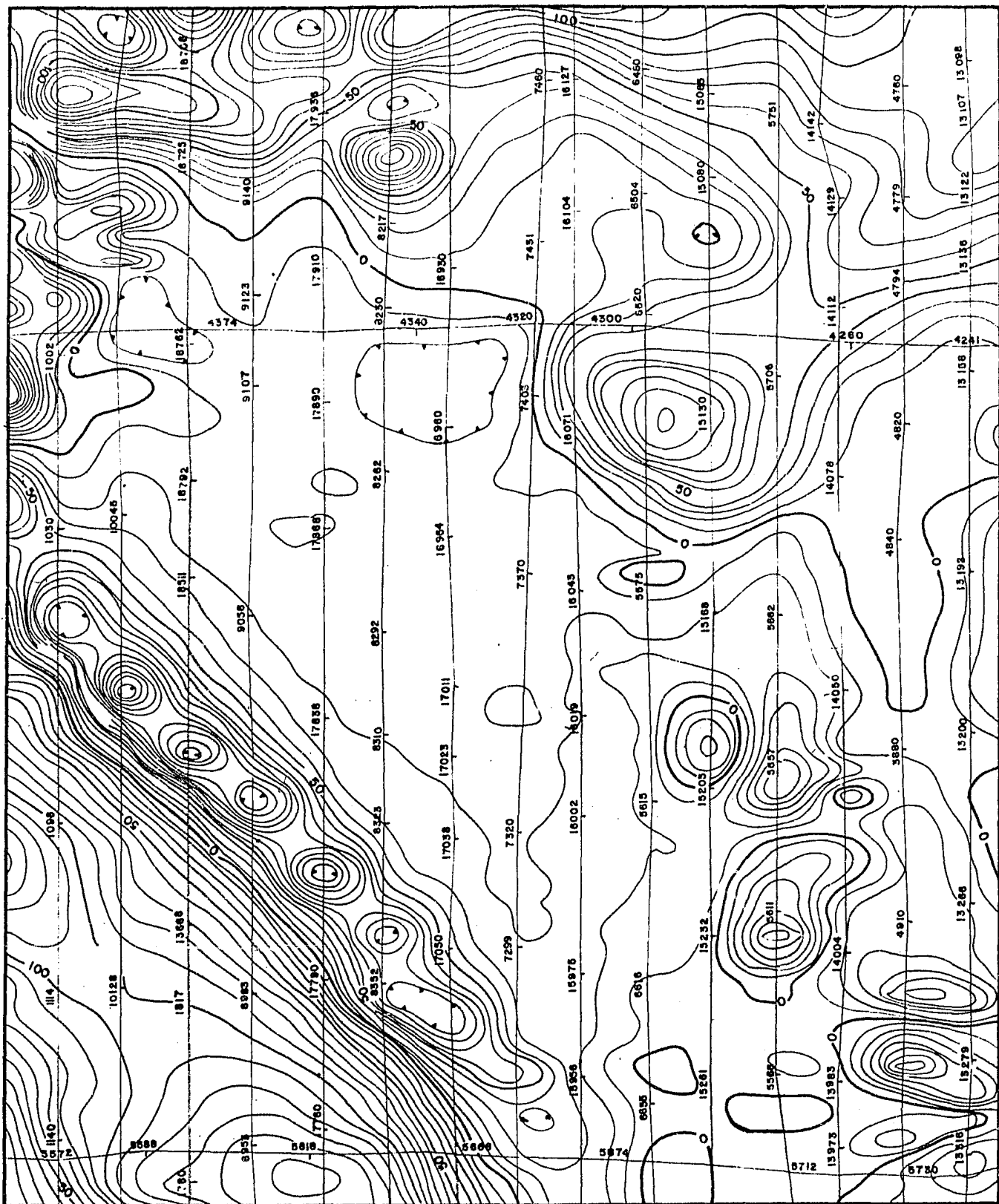
Relieves magnéticos suaves son indicadores de espesores considera-- bles en las rocas sedimentarias, de aquí que la suavidad del relie-- ve magnético detectado es indicativo del espesor que guardan dichas rocas.

#### II.1.b.. ROCAS IGNEAS EN GENERAL.

Las rocas ígneas tienen una gran variedad de propiedades magnéticas. Como una regla general las de tipo ácido tienden a ser pobres magné-- ticamente, mientras que las básicas son magnetométricamente más - - fuertes debido a su alto contenido de magnetita. (Ver la figura - - II.2)

#### II.1.c. ROCAS PLUTONICAS.

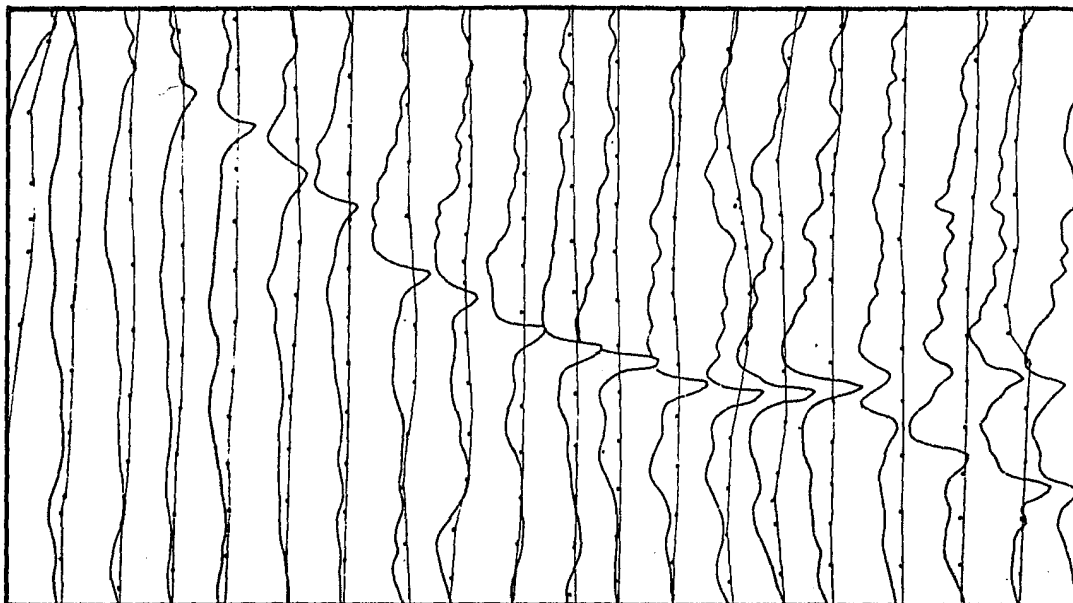
Los granitos son en algunos casos magnéticamente inertes, a medida que disminuye su contenido de cuarzo las propiedades magnetométri-- cas tienden a incrementarse, (Figura No.II.3.).Las sienitas son bas-- tante magnéticas al igual que los gabros, producen áreas magnéticas de forma oval con patrones magnéticos irregulares, no quedan exclu-- dos sin embargo una cantidad mínima de gabros con propiedades ---



**FIG. II. I** CONFIGURACION MAGNETICA DE ROCAS SEDIMENTARIAS AL NE. DE UNA FALLA REPRESENTADA POR BAJOS MAGNETICOS. NOTE LA RESPUESTA MAGNETICA POBRE DE LAS ROCAS SEDIMENTARIAS :

Escala Aprox. 1 : 50 000

(A)



(B)

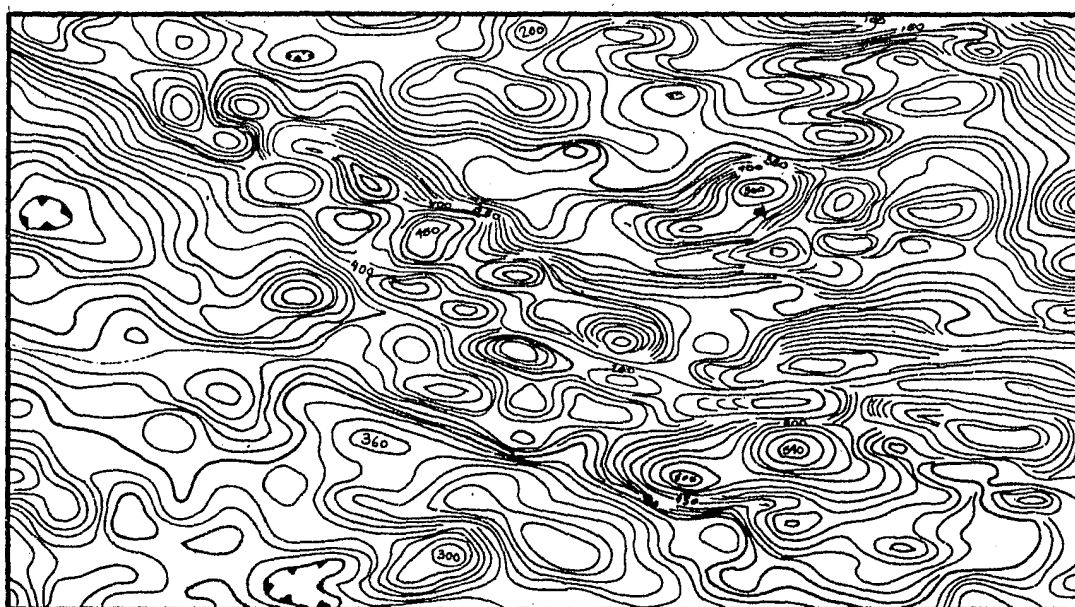
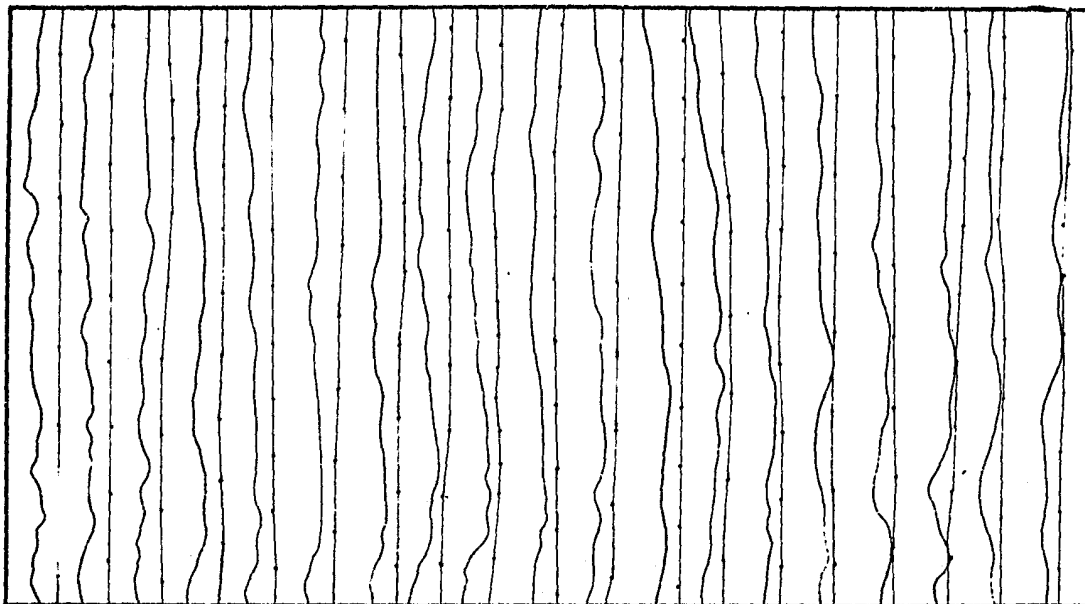


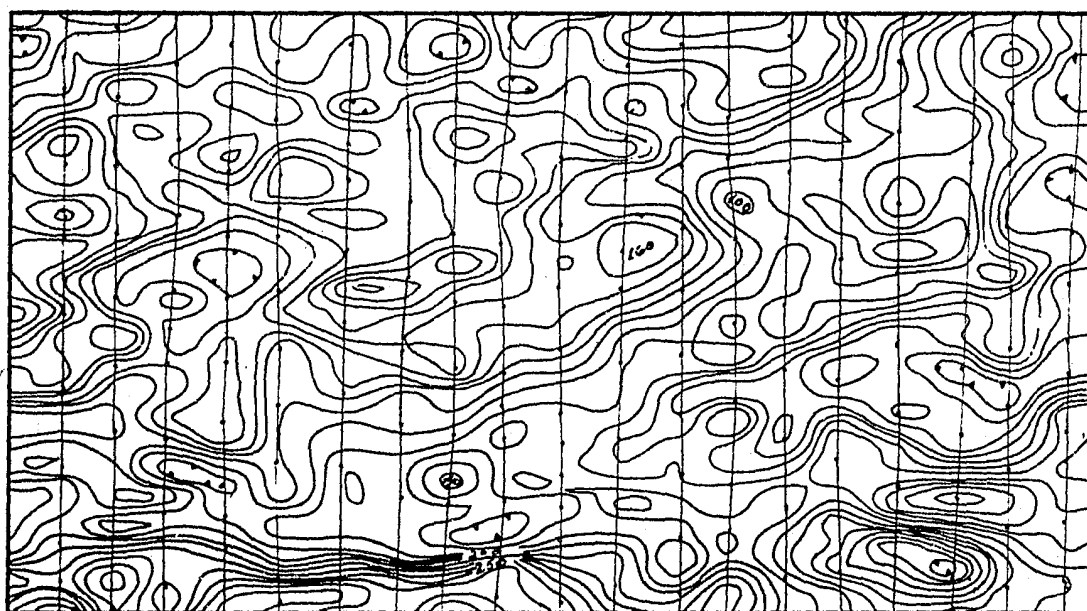
FIG. II. 2 EJEMPLO DE ANOMALIAS SOBRE CAPAS DE BASALTO  
(A) PERFILES (B) PLANOS

ESC. 1 : 500 000

(A)



(B)



**FIG. II. 3** MUESTRA UNA AREA DE BAJO RELIEVE MAGNETICO QUE NOS DEFINE VAGAMENTE DIRECCIONES DE RUMBO. ES - UNA EXPRESION MAGNETICA TIPICA DE UN GRANITO O GNEISS QUE EN ULTIMA INSTANCIA PARECE SER CUBIERTO POR SEDIMENTOS NO MAGNETICOS.

**(A) PERFILES (B) PLANOS**

ESC: 1 : 500 000



magnéticas bajas en respuesta. Las rocas ultrabásicas tienen usualmente propiedades magnéticas pronunciadas; los diques de diabasas son -- reconocibles debido a que producen anomalías alargadas y estrechas -- que pueden extenderse grandes distancias.

#### II.1.d. ROCAS VOLCANICAS.

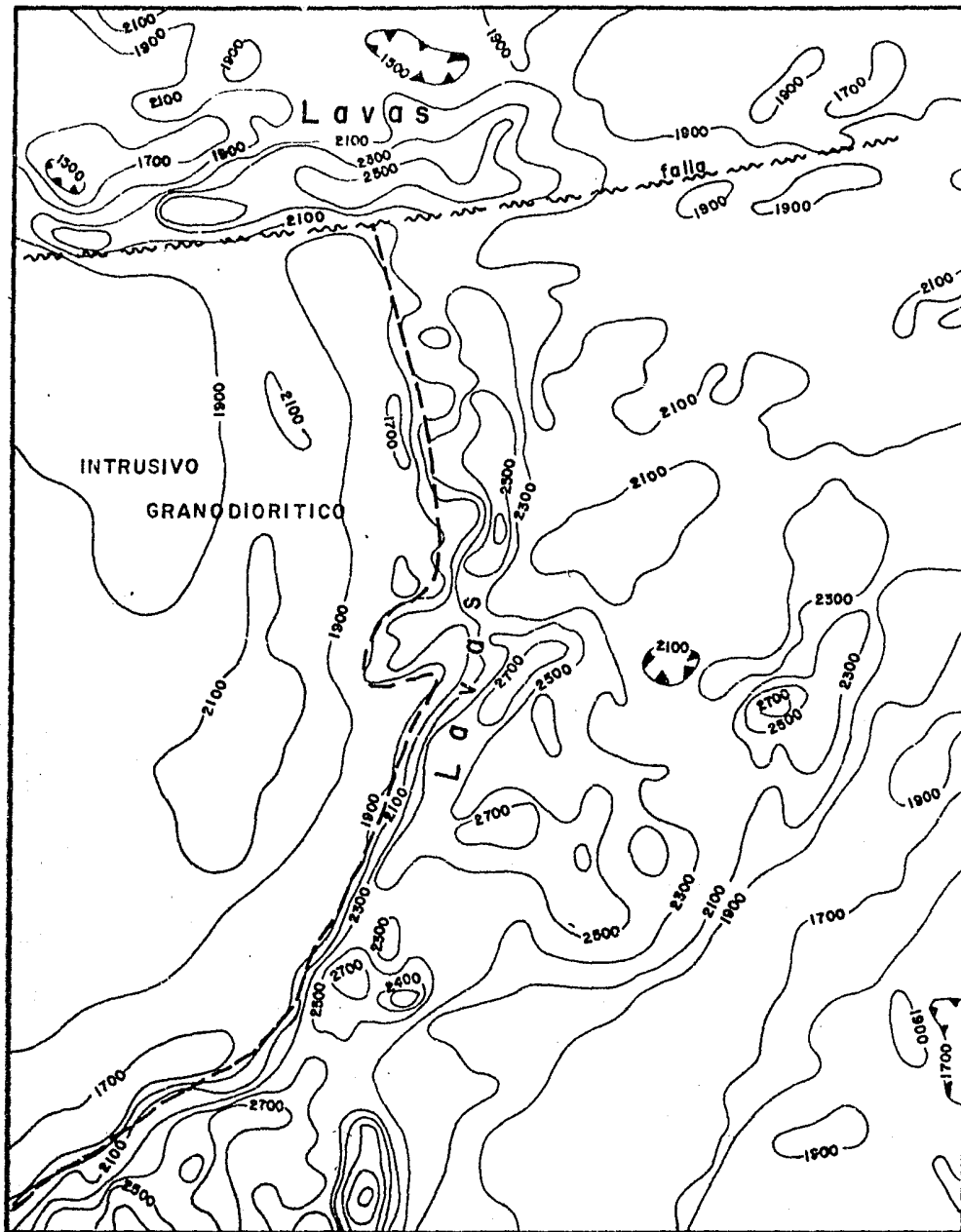
Los tipos básicos de lava tienden a ser magnéticamente fuertes respecto a los tipos ácidos, y sus patrones magnéticos son mucho más irregulares; los contactos de rocas volcánicas con rocas intrusivas son -- evidentes. La Figura II.4. ilustra un cuerpo granodiorítico encajado por lavas más magnéticas mostrando un contacto aparente.

Note que una aureola magnética fue formada por las rocas plutónicas, -- lo cual es una buena pista para detectar la presencia de un cuerpo -- plutónico.

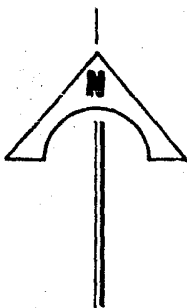
#### II.1.e. ROCAS METAMORFICAS.

Las rocas metamórficas tienen propiedades magnéticas variables, la -- dirección de su foliación es comúnmente indicada por paralelismo de -- las anomalías magnéticas asociadas.

Se encuentran excepciones a las reglas anteriormente dadas que sólo -- la experiencia nos indica. Por ejemplo una formación de hierro el -- cual es altamente magnético, puede ocurrir enteramente en series -- sedimentarias; rocas extrusivas ácidas pueden ser localmente muy magnéticas; los diques de diabasa pueden ser menos magnéticos que los -- areniscas adyacentes; los granitos en algunas áreas causan anomalías -- positivas pronunciadas, etc.



**FIG. No. II . 4**    **CONTORNOS MAGNETICOS MOSTRANDO UN GRAN INTRUSIVO GRANODIORITICO ; PUEDEN DISTINGUIRSE LAS LAVAS CIRCUNDANDO . EL ALINEAMIENTO MAGNETICO A TRAVES DEL MAPA ES INDICATIVO DE UNA FALLA .**



**CONTACTO GEOLOGICO - - - - -**  
**DEPRESION . **

## II.1.2. DETERMINACIONES ESTRUCTURALES.

En un mapeo estructural regional, el Geólogo responsable del estudio, deberá recopilar toda la información posible que haya sido obtenida en trabajos anteriores y que pueda auxiliar para tener mayores bases de evidencia que ofrezcan más seguridad al hacer la interpretación geológica final.

Un estudio geológico-estructural en muchos casos requiere años para tener información suficiente; en contraste con lo anterior mediante levantamientos de magnetometría\*, se pueden obtener resultados que den información de características estructurales a nivel regional en un lapso de tiempo corto, evidenciando además estructuras de importancia para la localización de depósitos minerales. Los datos magnéticos deben ser siempre estudiados en conjunción con fotografías aéreas y mapas geológicos cuando los haya, ya que la combinación de datos regularmente arroja excelentes resultados para la delineación de grandes estructuras, más aún cuando el intérprete está familiarizado con este trabajo, es decir cuenta con experiencia considerable.

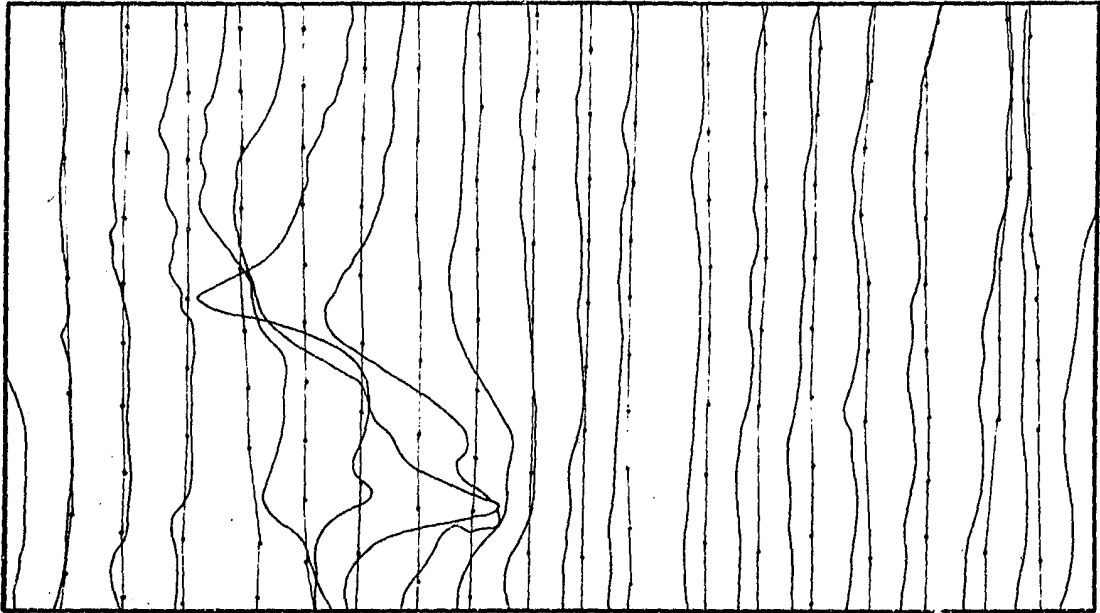
### II.2.a. CONTACTOS.

En altas latitudes magnéticas, un contacto con un buzamiento fuerte entre diferentes unidades de roca con propiedades magnéticas en contraste, será bien definido por el punto de un perfil donde la tangente de éste tiene la mayor inclinación; dicho punto es conocido comúnmente como punto de inflexión de la curva, esta regla tiene mayor aplicación cuando existen contactos verticales cercanos a la superficie a medida que la inclinación del campo magnético de la tierra se aproxima a la vertical. (Figuras II.5 y II.5.a.)

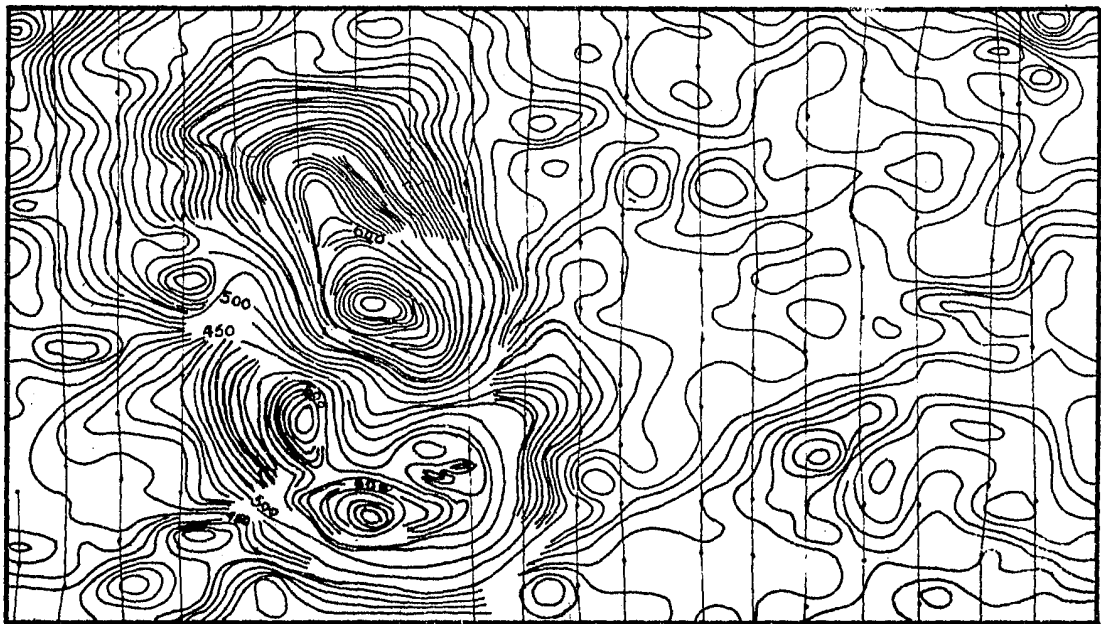
---

\* Magnetometría Aérea.

(A)

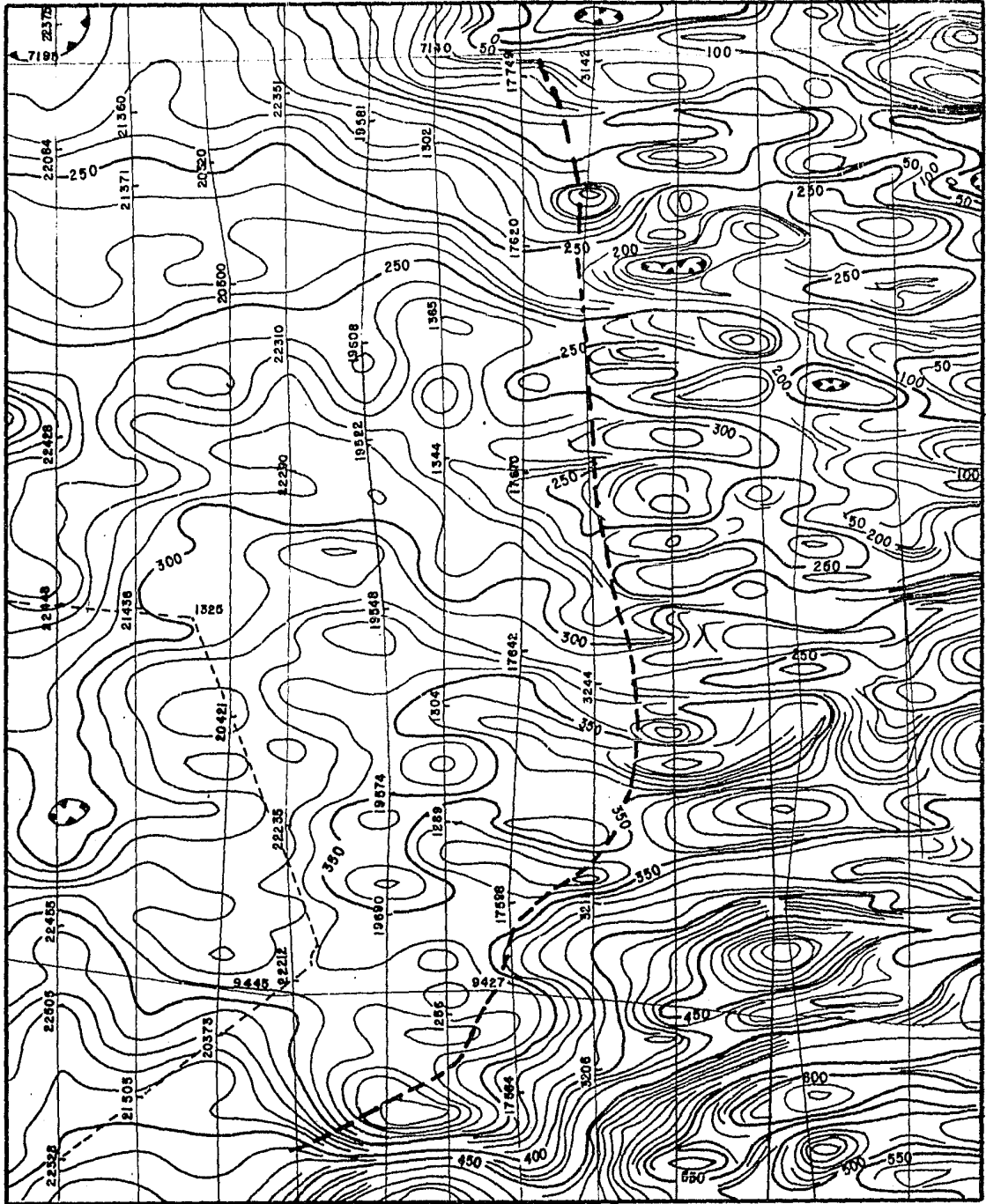


(B)



**FIG. No. II. 5** EJEMPLO DE LA DISCORDANCIA EN EL CONTORNO MAGNETICO DEBIDO A UN CUERPO INTRUSIVO EN UN AREA DE RESPUESTA MAGNETICA RELATIVAMENTE BAJA. ESTA DISCORDANCIA PUEDE SER PRODUCIDA POR UN INTRUSIVO BASICO O ULTRABASICO DE 15 KM. DE DIAMETRO EN UNA AREA DE GRANITO. (A) PERFILES (B) CONTORNOS. LA CONFIGURACION DE LOS RELIEVES MAGNETICOS INDICA EL CONTACTO ENTRE LITOLOGIAS DIFERENTES.

ESC. 1: 500.000



**FIG. II . 5 . a .** MOSTRANDO EL CONTACTO (Línea Discontinua) ENTRE BASALTOS Y ALUVION POR MEDIO DE CONTORNOS MAGNETOMETRICOS.

BASALTO AL E , ALUVION AL W .

ESC. 1 : 50 000

Hay zonas donde las unidades se encuentran profundamente cubiertas - localizándose los puntos fuera de los contactos.

#### II.2.b. R U M B O S

Los contornos magnéticos siguen comúnmente el rumbo de las unidades subyacentes (véase la fig. II.6.) La dirección del rumbo puede por lo tanto ser obtenida por medio de una línea a través de la dimensión mayor de la anomalía magnética.

#### II.2.c. F A L L A S

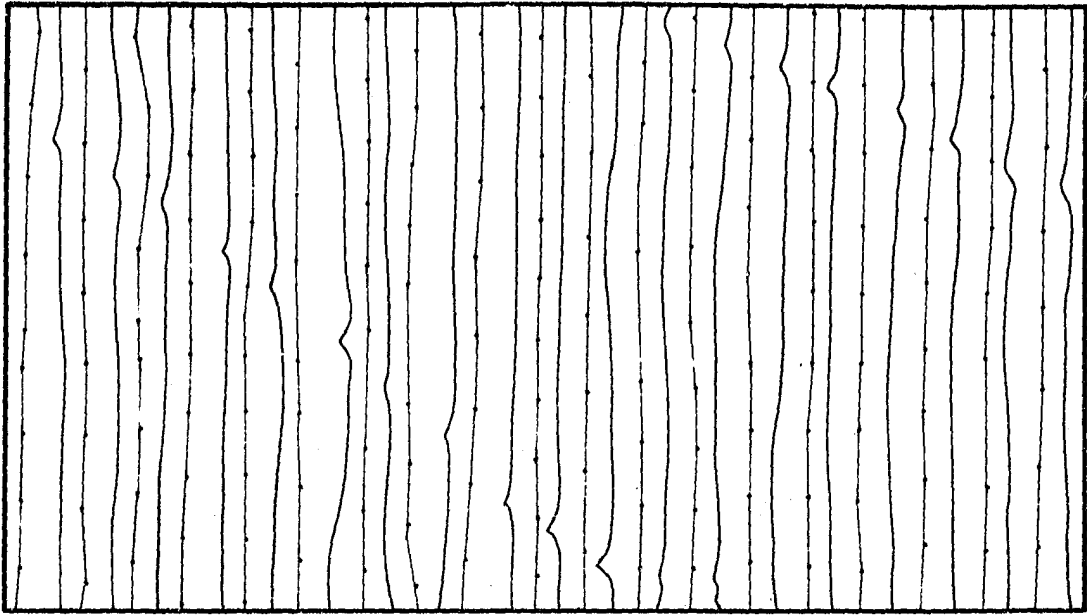
Las fallas pueden ser reconocibles ya que muestran cambios abruptos o dislocación en los contornos magnéticos. El alargamiento natural hacia los lados y la amplitud de cualquier desplazamiento horizontal puede medirse comúnmente. Si el desplazamiento horizontal es -- pequeño, la presencia de una falla puede ser indicada únicamente -- por inflexiones en los contornos magnéticos que se extienden sobre una distancia significativa. (Figuras II.7. y II.7.a.)

Para levantamientos de magnetometría aérea, es importante observarse si la falla interpretada de los contornos es paralela o alineada -- a la línea de vuelo, ya que dicha alineación bien pudo producirse por errores en el levantamiento, o en la reducción de datos.

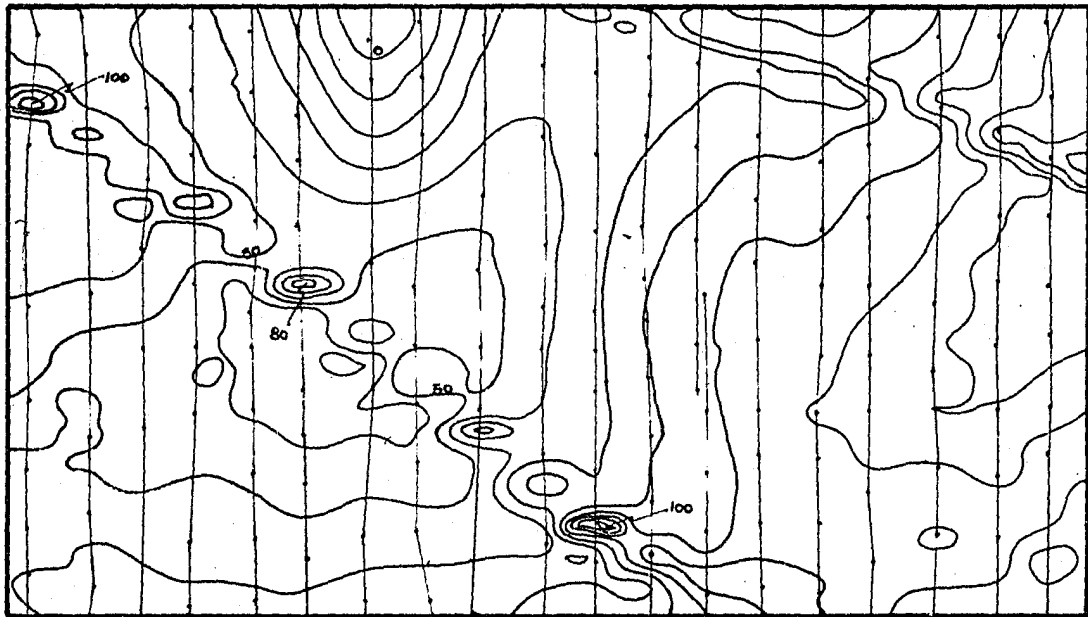
Un punto importante para la interpretación de fallas es el apoyo -- en fotografías aéreas y planos geológicos en los cuales deberá aparecer también dicho rasgo estructural.

El desplazamiento vertical de un dique por una falla puede causar -- que el bloque caído produzca una anomalía de baja amplitud, pero li-

(A)



(B)

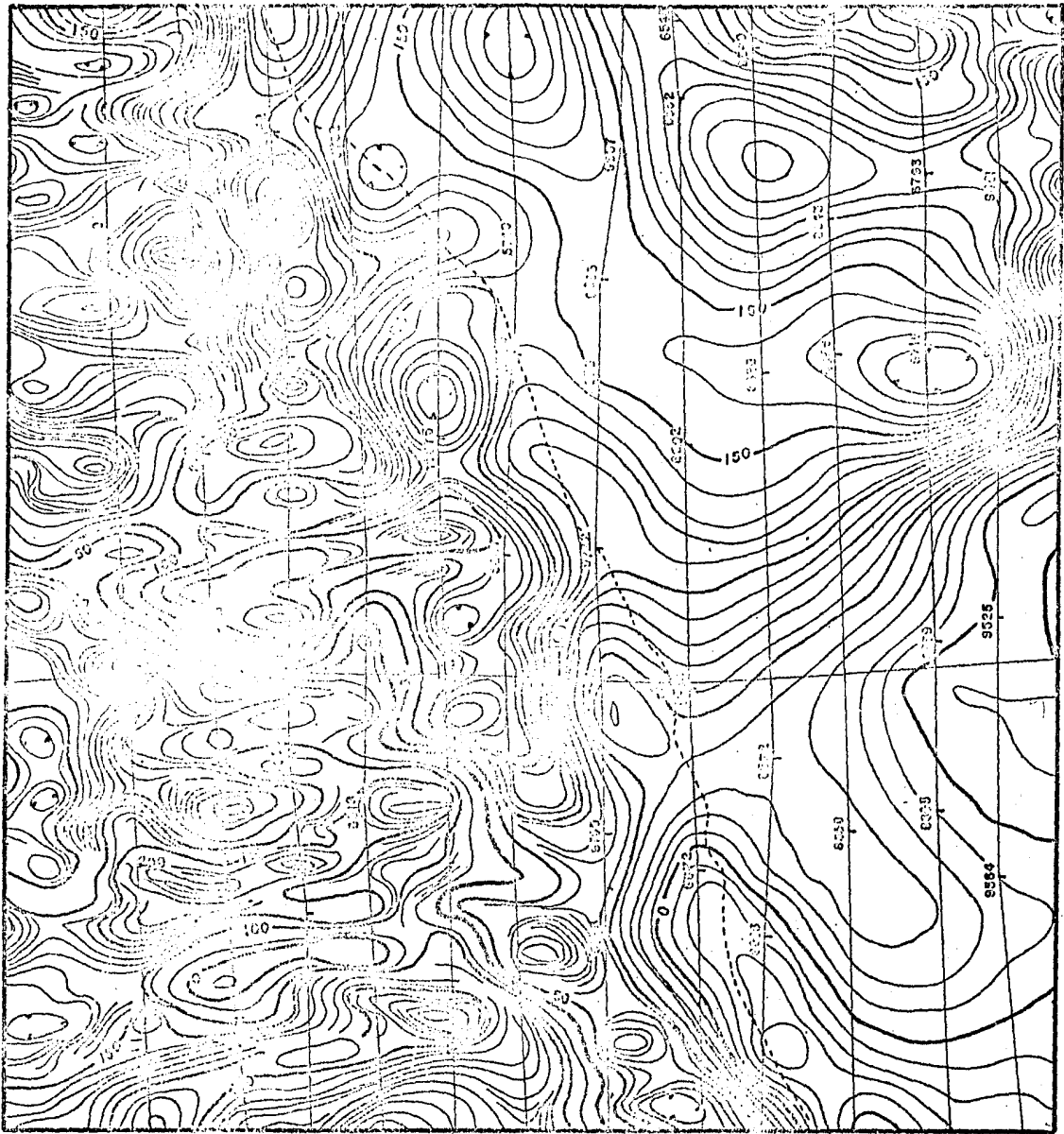


**FIG. No. II . 6** EJEMPLO DE ANOMALIAS CAUSADAS POR UN DIQUE

(A) PERFILES , (B) PLANOS

NOTE EL RUMBO BIEN MARCADO DEL DIQUE

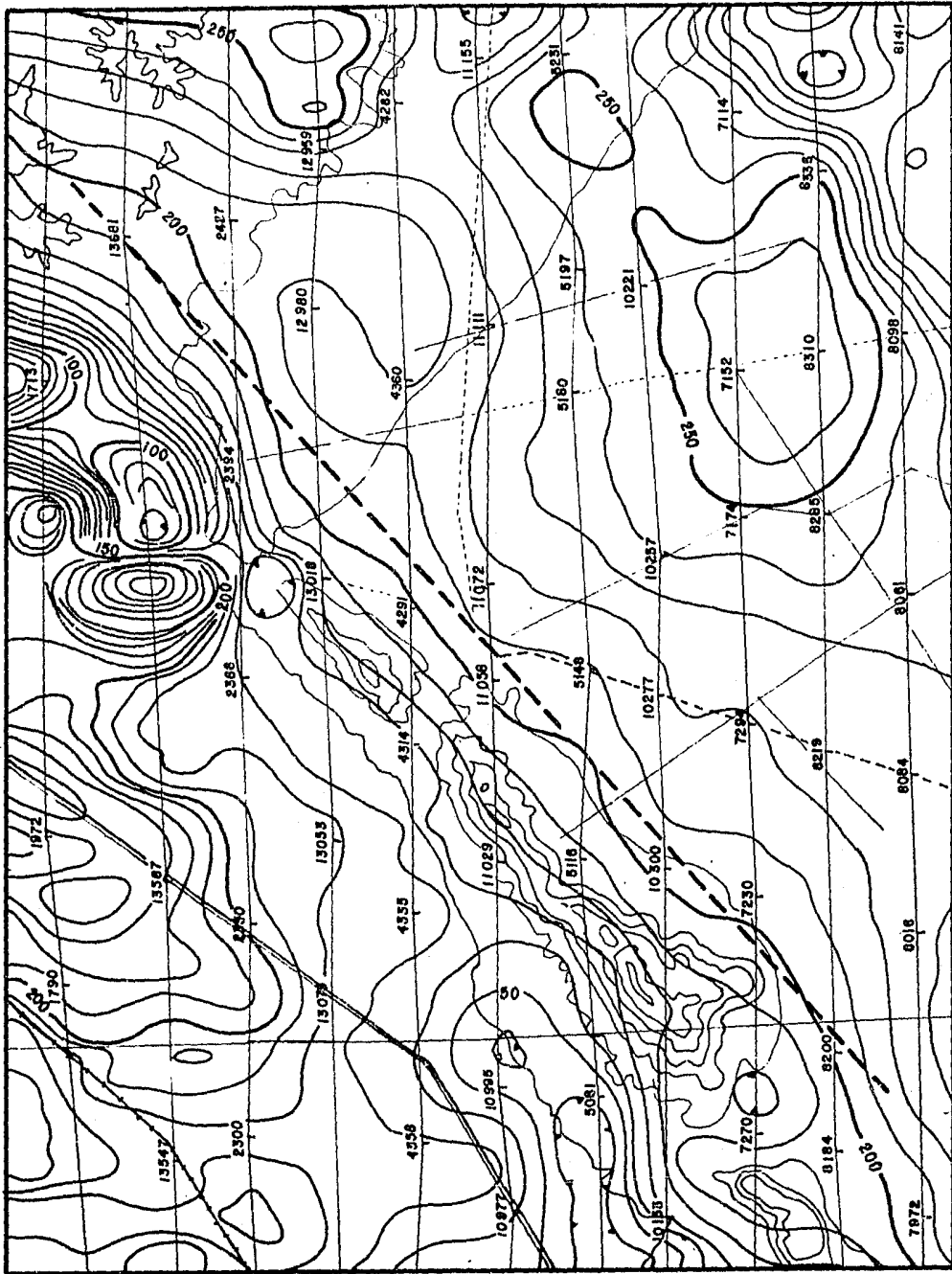
ESC. 1 : 500 . 000



**FIG. II . 7. - REPRESENTACION MAGNETOMETRICA DE UNA FALLA  
ALINEADA CASI SOBRE EL CAMINO Y LIMITANDO RO-  
CAS DIFERENTES, PROBABLEMENTE BASALTO AL W  
Y ALUVION AL E .**

**ESC : 1 : 50 000**





**FIG. II. 70.-** FALLA ALINEADA CON LA TOPOGRAFIA DEL AREA NOTESE QUE DIFIERE DE LA REPRESENTACION ANTERIOR EN LA CONFIGURACION MAGNETOMETRICA.

LAS CURVAS MAGNETOMETRICAS DE TENDENCIA MAS RECTA SIGUEN LA DIRECCION DE LA FALLA INFERIDA. ( Línea Punteada ).

ESC. 1: 50 000

geramente más ancha, así, la agudeza de una anomalía obtenida -- será indicativa de la profundidad del cuerpo causante.

#### II.2.d. ECHADOS

Para un cuerpo tabular tipo dique, la dirección general del echa--do puede ser deducido a partir de la asimetría de su anomalía --- magnética. Un cuerpo tabular se inclina hacia la porción de la -- anomalía que tiene un menor gradiente. Las secuencias de rocas -- estratificadas plegadas o inclinadas, particularmente aquellas -- que contienen miembros volcánicos, puede dar lugar a tendencias - magnéticas lineales.

El intérprete debe ser bastante cauto al dar su informe; en áreas donde no hay datos geológicos suficientes, debe indicar siempre - el grado en que su interpretación fue controlada por factores - - geológicos antes observados en el área de estudio, por mínimos -- que éstos sean, para considerarlos en su trabajo. Sin embargo - - en áreas donde no hay antecedentes geológicos, la interpretación-- por medio de datos magnéticos es práctica y eficaz.

Para tener más certeza sobre la interpretación, deberán recopilar se mayor cantidad de datos geológicos para hacer una reinterpretación sobre el área de estudio.

### III. - INTERPRETACION CUANTITATIVA

### III.- INTERPRETACION CUANTITATIVA.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los mapas magnetométricos son a menudo usados en forma cualitativa; este capítulo tratará -- lo que a la interpretación cuantitativa de datos magnetométricos se refiere.

Aún cuando hay veces que la gran cantidad de detalles complejos son una barrera para el uso de los métodos cuantitativos de interpretación, éstos han mejorado notablemente. Cuando anomalías magnéticas son encontradas, sobresaliendo tan claramente que pueden separarse de sus efectos vecinos y que pueden ser provocadas por un cuerpo -- magnetizado, se requiere de un análisis cuidadoso de interpretación cuantitativa sobre la cual se tratará más ampliamente en este capítulo.

Durante la última década se han publicado más de 130 artículos ---- sobre interpretación magnética, de aquí que es imposible efectuar -- una revisión detallada de la literatura de interpretación en el presente trabajo; debido a esto se da solo un esbozo general, destacando los que parecen ser los avances más significativos desde 1967. Quien quiera profundizar en cualquiera de los métodos a tratar, -- podrá recurrir a la bibliografía incluida al final de este trabajo.

La idea principal en la interpretación cuantitativa de datos magnéticos es ajustar anomalías observadas con modelos; todas las anomalías magnéticas están relacionadas a 3 factores:

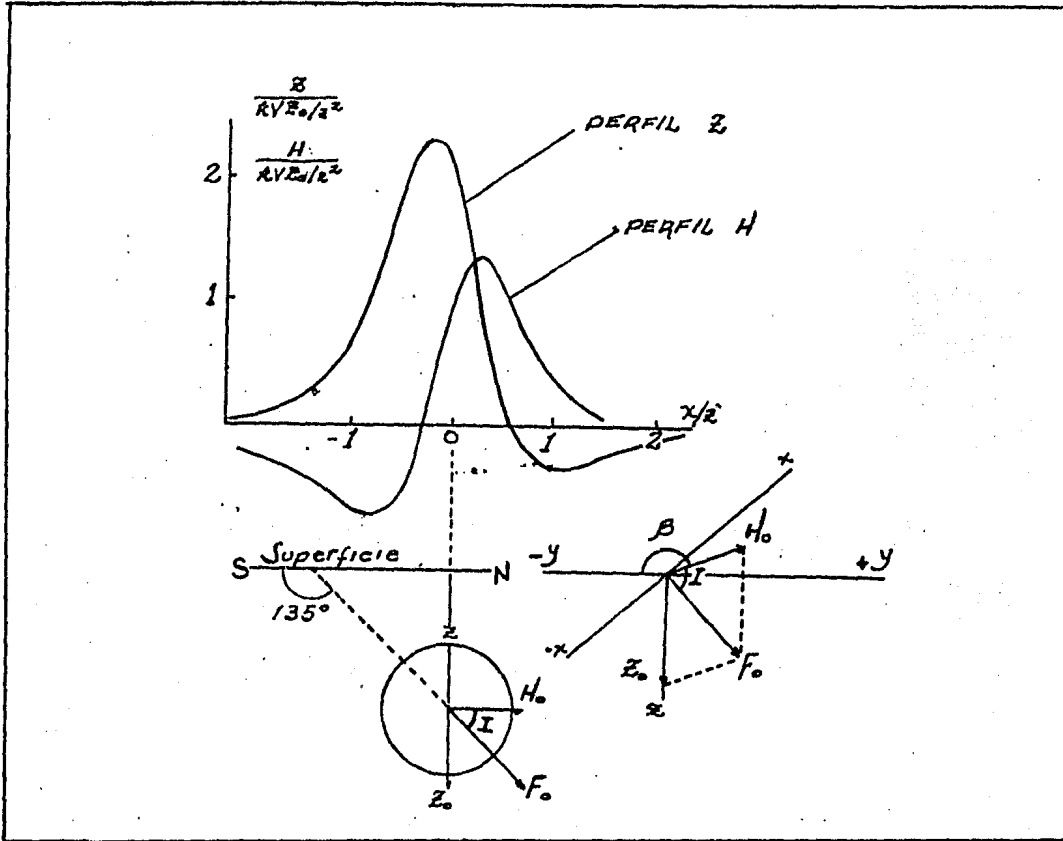
- a) El magnetismo del cuerpo
- b) La geometría del cuerpo y la distancia del -- nivel de observación.
- c) La inclinación y declinación magnética - - - locales.

En general la interpretación cuantitativa ha sido enfocada a cuatro grupos principales, los cuales se describen en este capítulo y son:

- Métodos Empíricos.
- Cálculos Simples por Computadora para Profundidades.
- Ajustes por Computadora.
- Ajuste Iterativo por Computador Gráfico.

Antes de detallar estos tipos de interpretación, se resumen algunas fórmulas para el cálculo de la componente horizontal, componente vertical o intensidad magnética total, de cuerpos de geometría regular idealizados (prisma, esfera, cilindro.....) . Estas formas se asemejan muchas veces a cuerpos reales en los estudios de proyección geofísica, por lo cual son utilizados como una primera aproximación para el cálculo de parámetros en la interpretación cuantitativa.

Las fórmulas indicadas para el cálculo de la profundidad de los diferentes cuerpos, debe tomarse cautelosamente y sólo como una idea preliminar para un cálculo posterior más confiable.



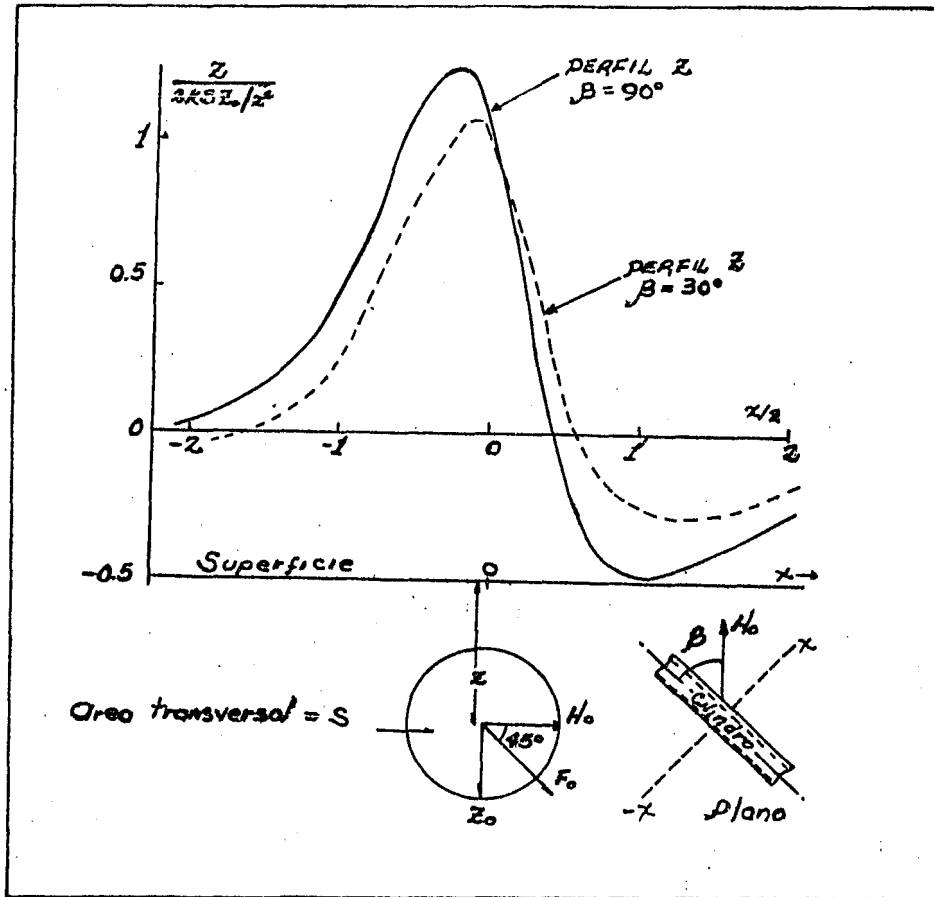
$$H = \frac{kVZ_0}{z^3} \left\{ \frac{(2x^2/z^2 - 1) \cot I + 3x/z}{(1 + x^2/z^2)^{5/2}} \right\} \dots \text{componente horizontal}$$

$$Z = \frac{kVZ_0}{z^3} \left\{ \frac{2 + 3(x/z) \cot I - x^2/z^2}{(1 + x^2/z^2)^{5/2}} \right\} \dots \text{componente vertical}$$

$x$  = Distancia en el Eje Coordinado Norte-Sur Magnético.

donde:  $K$  = susceptibilidad,  $V$  = Volumen de la esfera  $Z$  = Profundidad al centro,  $Z_0$  = Componente vertical,  $I$  = Inclinación.

La esfera se considera uniformemente magnetizada por inducción, - los perfiles son N-S para una inclinación de  $45^\circ$ . La profundidad al centro de la esfera puede estimarse como la amplitud del perfil a una distancia de  $Z_{max}/2$ .



$$Z = \frac{2KSY}{r^4(r^2+y^2)^{3/2}} \left\{ \frac{H_0(3r^2+2y^2)Xz \operatorname{sen} \beta + z_0}{1} \left\{ \frac{y^2(z^2-x^2) + r^2(2z^2-x^2)}{1} \right\} \right\}$$

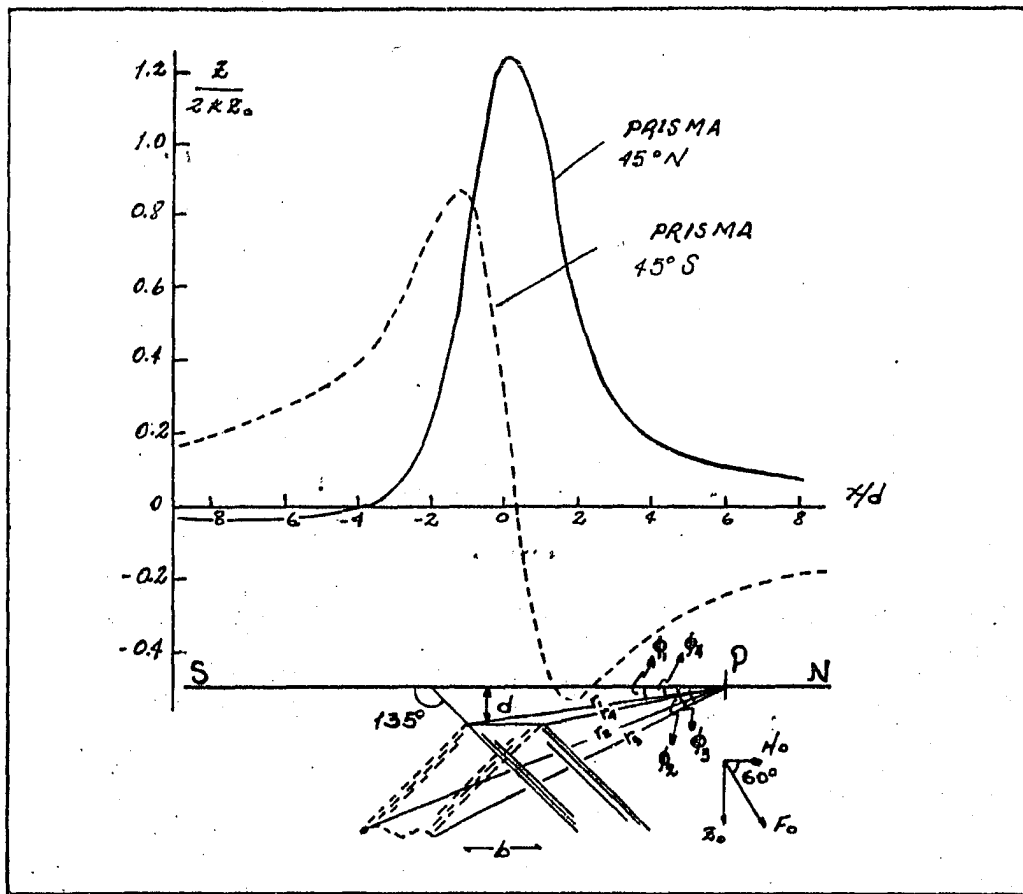
donde: S= Area de la sección transversal del cilindro

2y= Longitud del cilindro                      β= Rumbo

H<sub>0</sub>= Componente horizontal del campo.

La expresión anterior es la componente vertical del campo total, -- los perfiles se dan para 2 cilindros con rumbos diferentes.

Como en el caso de la esfera, la profundidad al centro del cilindro es aproximadamente igual a la máxima amplitud del perfil en Z<sub>max</sub>/2.



$$Z = 2k \operatorname{sen} \alpha \left\{ (H_0 \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \alpha + z_0 \cos \alpha) \log \left( \frac{r_2 r_3}{r_1 r_4} \right) + (H_0 \operatorname{sen} \beta \cos \alpha - z_0 \operatorname{sen} \alpha) (\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 + \phi_4) \right\} \dots$$

(componente vertical)

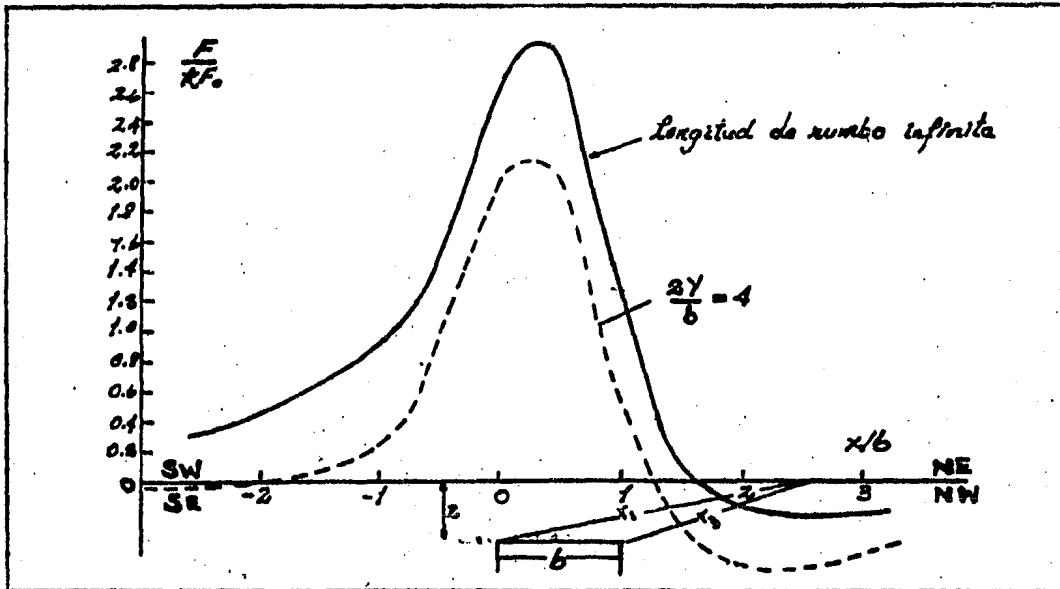
donde:  $\alpha$  = inclinación del prisma.

$r_1, r_2, r_3, r_4$  = distancias a las esquinas del prisma desde el punto "P"

$\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$  = ángulos con los puntos de medición a las esquinas -- del prisma.

El prisma se asocia principalmente a intrusiones ígneas que generan zonas favorables para mineralización. Las profundidades para diques magnéticos son difíciles de estimar, a menos que el perfil sea simétrico y el ancho del cuerpo no exceda la profundidad a la cima del mismo. Uno de los métodos empleados para calcular la profundidad es el de la amplitud media, el cual se dará más adelante.





$$I = 75^\circ \quad \beta = 45^\circ \quad z/b = 0.5$$

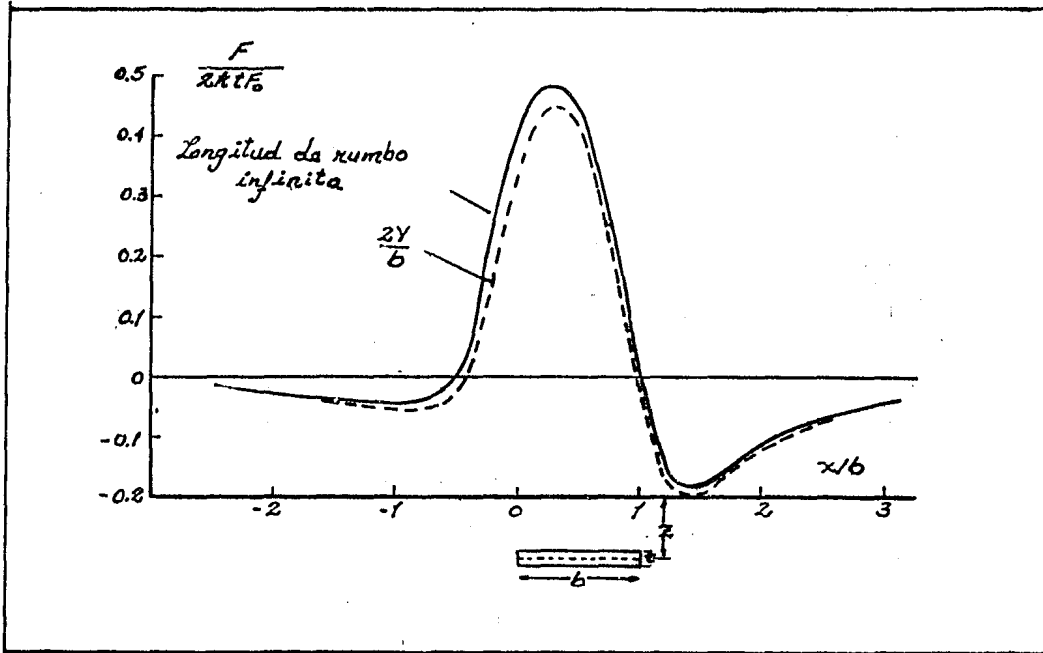
$$F = KF_0 \left\{ \sin I \cos I (1 + \sin \beta) \log \left\{ \frac{\sqrt{(r_1^2 + y^2) + y}}{\sqrt{(r_1^2 + y^2) - y}} \times \frac{\sqrt{(r_2^2 + y^2) - y}}{\sqrt{(r_2^2 + y^2) + y}} \right\} + \right.$$

$$+ 2(\sin^2 I - \cos^2 I \sin \beta) \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{y}{x-b} \right) - \tan^{-1} \frac{yz}{x\sqrt{(r_1^2 + y^2)}} + \right.$$

$$\left. \left. + \tan^{-1} \frac{yz}{(x-b)\sqrt{(r_2^2 + y^2)}} \right\} \right\}$$

Esta expresión representa la intensidad total de un prisma de extensión teórica infinita. Donde:  $b$  = Espesor del prisma,  $z$  = Profundidad a la cima,  $\beta$  = Rumbo,  $I$  = Inclinación,  $zy$  = Longitud de rumbo,  $r_1$ ,  $r_2$  = Distancia a las esquinas del prisma.

Para estimar la profundidad del basamento, el prisma vertical es comúnmente usado en interpretación aeromagnética.



Perfiles de Campo total sobre una Placa Horizontal de Espesor Finito.

$$F = 2KItF_0 \left( \sin I \cos I (1 + \sin \beta) \left[ \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{\sqrt{(r_1^2 + y^2)} \{ \sqrt{(r_1^2 + y^2)} + y \}} + \frac{1}{\sqrt{(r_2^2 + y^2)} \{ \sqrt{(r_2^2 + y^2)} + y \}} \right] z + \right. \\ \left. + (\sin^2 I - \cos^2 I \sin \beta) \left\{ \frac{x}{r_1^2 \sqrt{(r_1^2 + y^2)}} - \frac{x - b}{r_2^2 \sqrt{(r_2^2 + y^2)}} \right\} y \right)$$

Donde: t = Espesor de la lámina

b = ancho de la placa, z = Profundidad,  $\beta$  = Rumbo

I = Inclinación, Y = Longitud de Rumbo.

La placa delgada horizontal es el extremo geométrico opuesto del - - prisma vertical de profundidad infinita. Tanto para la placa hori- - zontal como para el prisma vertical, la profundidad se calcula principalmente mediante el uso de manuales de perfiles magnéticos, ----- también conocidos como "Enciclopedia de Modelos".

Estos perfiles se dan en la mayoría de casos para intensidad total - o cualquiera de sus componentes (vertical u horizontal). Los siguientes son algunos de los parámetros que intervienen en su uso:

Inclinación Magnética  
Declinación Magnética  
Azimut  
Profundidad a la fuente  
Espesor  
Echado  
Susceptibilidad Magnética... etc.

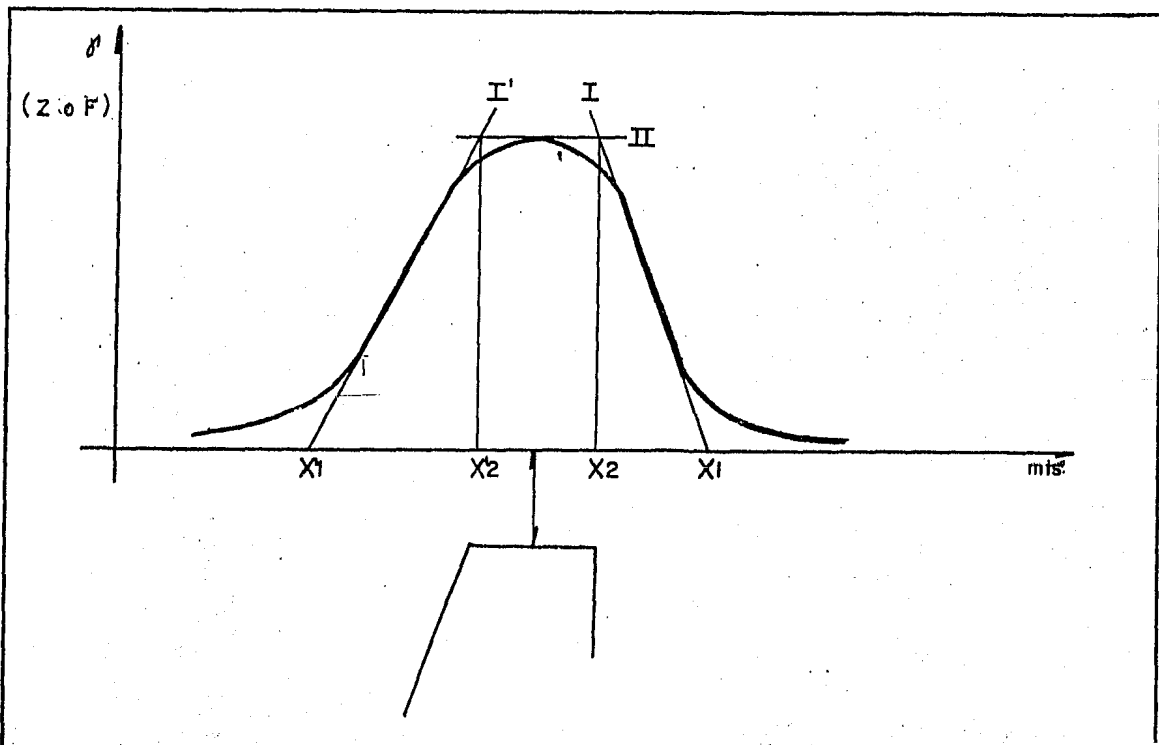
El uso de estos perfiles permite estimar las características del - - cuerpo generador de la anomalía magnética, esto se realiza por comparación entre los perfiles de campo con los perfiles del manual, - - analizando cada uno de los parámetros involucrados, hasta tener una semejanza óptima entre los perfiles.

### III.1. METODOS EMPIRICOS.

Estos métodos son los más tradicionales en la interpretación cuantitativa de anomalías magnéticas, de hecho estos métodos fueron los -- primeros en emplearse y por lo tanto se debe decir que son los menos confiables al hacer una interpretación, ya que ésta depende del -- criterio y la experiencia del intérprete, de cualquier forma son -- métodos bastante usados para tener ideas o aproximaciones de inter-- pretación más significativas. A continuación se dan algunas de las - técnicas más usadas para calcular los parámetros geométricos.

#### III.1.a. METODO DE LA TANGENTE.

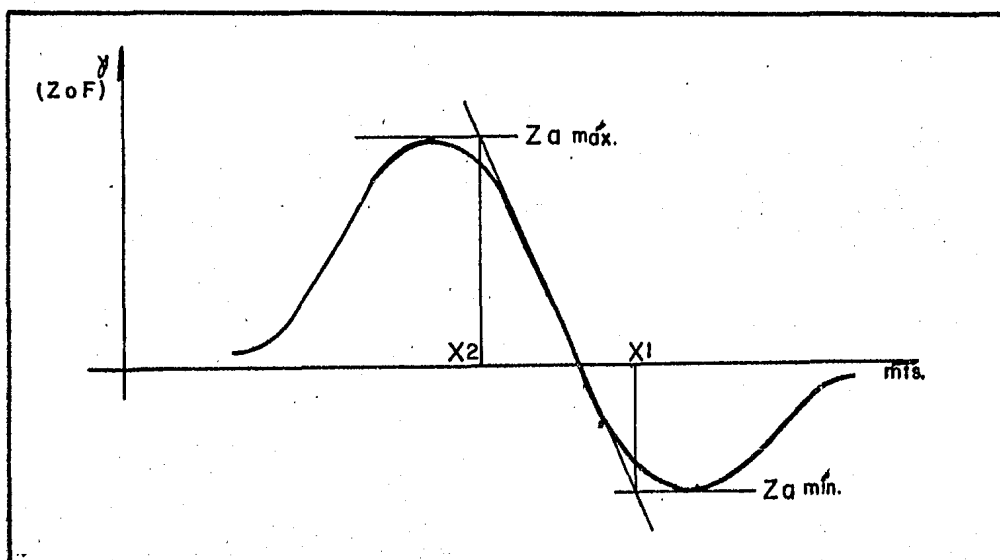
METODO DE LA TANGENTE.- El método de la tangente es usado para tener una aproximación inicial de la profundidad de un cuerpo que causa --- una anomalía magnética. Para tener mayor idea del método obsérvese el dibujo que aparece a continuación:



- a) En primer término se traza una línea tangente "I" al punto de inflexión de la curva; el punto donde se intersecta ésta tangente con el eje de las "X" tendrá una abcisa  $X_1$  .
- b) Ahora se traza una tangente "II" al punto máximo de la curva, ésta será horizontal y paralela al eje de las "X"; enseguida se debe proyectar la intersección de las dos tangentes trazadas -- hacia el eje de las "X", denotando a este punto  $X_2$  .
- c) Finalmente la profundidad "P" al cuerpo del cual se genera la anomalía podrá determinarse mediante la ecuación.

$$P = \frac{X_1 - X_2}{2}$$

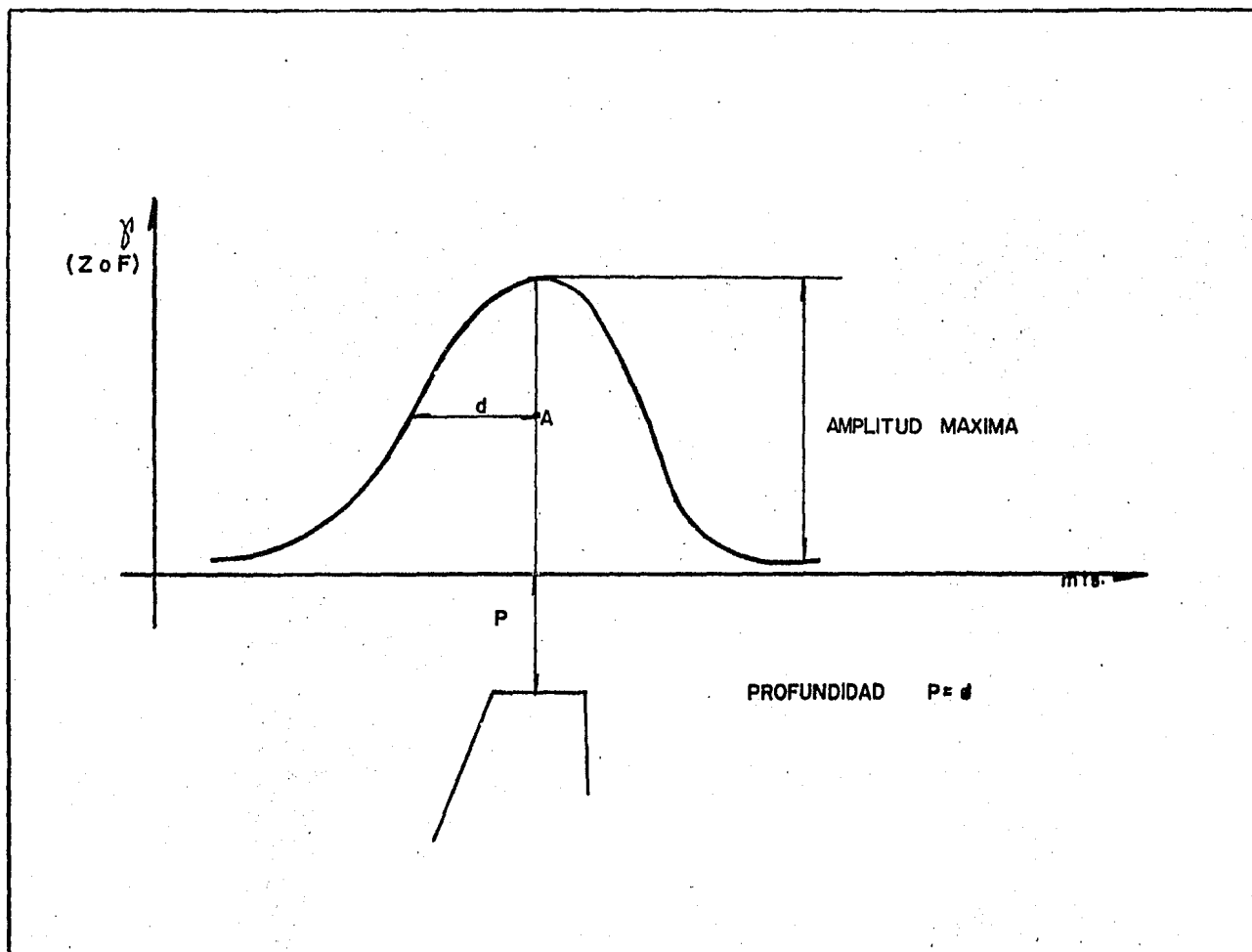
- d) Si la curva no es simétrica, entonces "P" es dada para cada lado de la curva y la profundidad "P" final se tomará como el valor -- promedio.
- e) Si la curva tiene un mínimo, entonces sobre éste se traza una -- tangente "Za mín" que será paralela al eje "X" . La profundidad "P" se determina entonces por la fórmula anterior, pero  $X_1$  debe ser la abcisa del punto de intersección donde la tangente inclinada encuentra a la tangente "Za mín", y  $X_2$  es la abcisa del -- punto de intersección de la tangente inclinada con la tangente -- "Za máx" , (Véase la siguiente figura).



### III.1.b. REGLA DE LA AMPLITUD MEDIA.

En esta regla la profundidad a la cima del cuerpo a partir de un perfil magnético debe ser tomada de la siguiente manera:

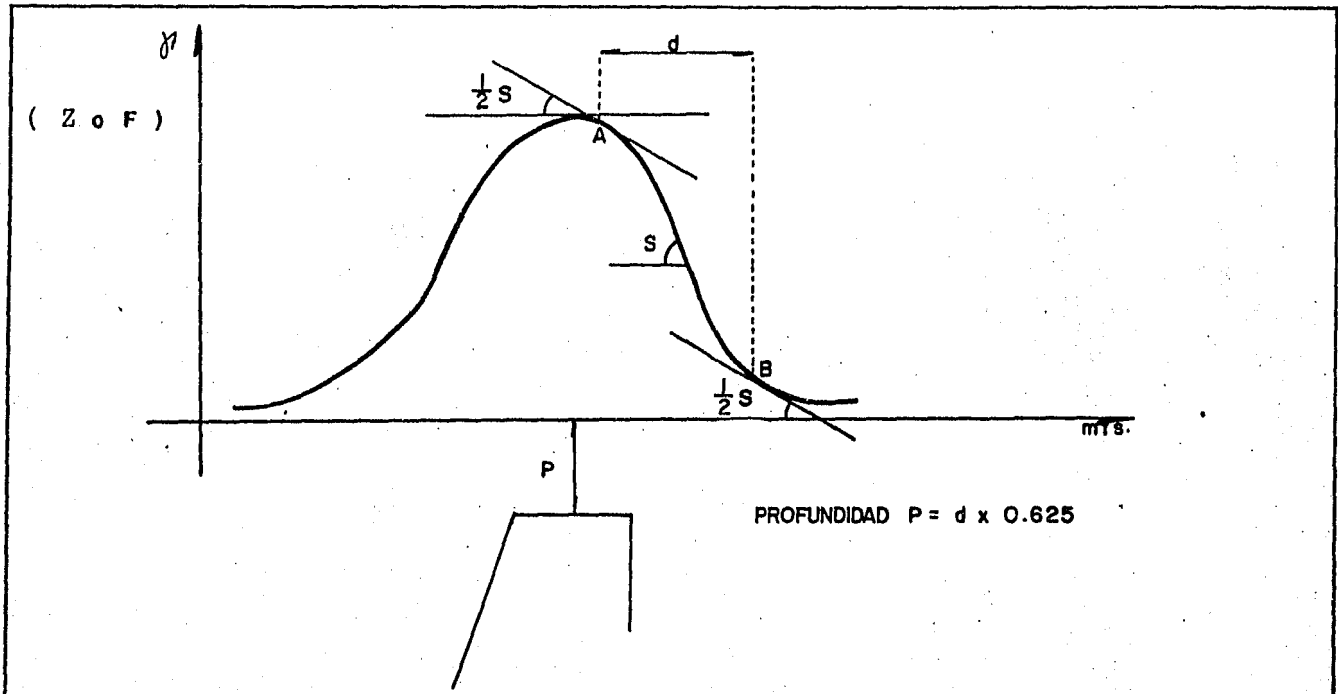
Tome  $1/2$  de la máxima amplitud del perfil como se muestra en la figura abajo, llame a este punto "A", entonces la profundidad del cuerpo será igual a  $1/2$  del ancho entre los flancos de la curva -- en una distancia tomada a  $1/2$  de la amplitud máxima; es decir el punto "A" a cualquier lado de la curva en una distancia tomada -- paralela al eje "X".



### III.1.c. REGLA DE PETERS.

En este método la profundidad del cuerpo vendrá dada como 0.625 por la distancia horizontal "d", que se obtiene de la siguiente manera:

Tome líneas tangentes a los puntos de inflexión (A y B), máximo y - - mínimo de la curva, la distancia "d" será la proyección horizontal de dichos puntos. Véase la figura siguiente:



Se debe tomar en cuenta de una manera especial la siguiente consideración:

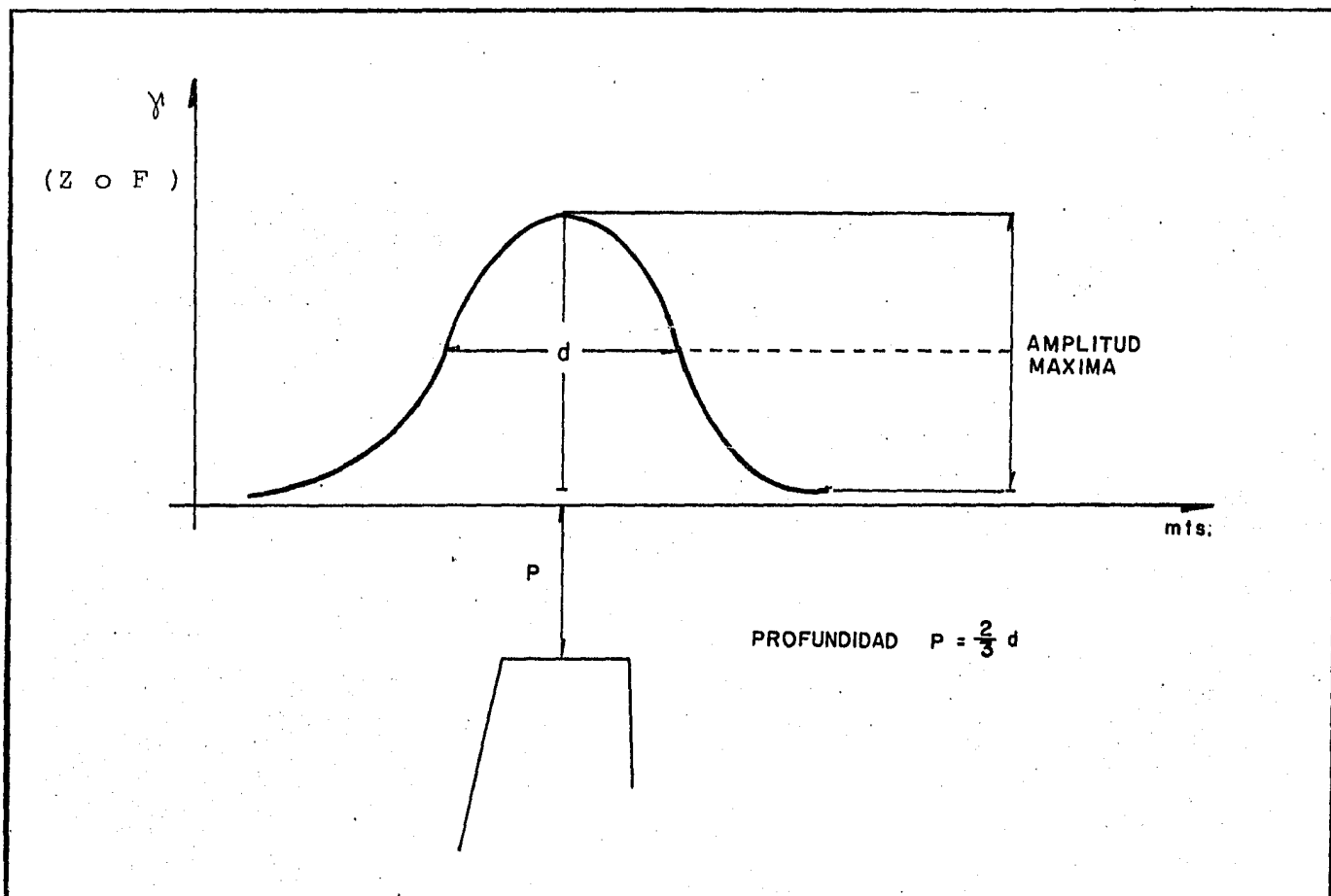
Estas líneas tangentes deberán tener  $\frac{1}{2}$  de la pendiente máxima de la curva, es decir si a ésta máxima pendiente se le llama "s", las pendientes de las líneas tangentes trazadas tendrán un valor de  $\frac{1}{2}$  de "s"

Se supone una placa o lámina vertical con profundidad infinita.

## III.1.d. REGLA DE TIBURG.

Mediante esta regla se podrá definir la profundidad a la cima del -  
 cuerpo, como  $2/3$  partes de la distancia horizontal "d" entre los - -  
 flancos de las curvas  $1/2$  de la amplitud máxima.

Para tener mayor idea del método véase la figura siguiente:

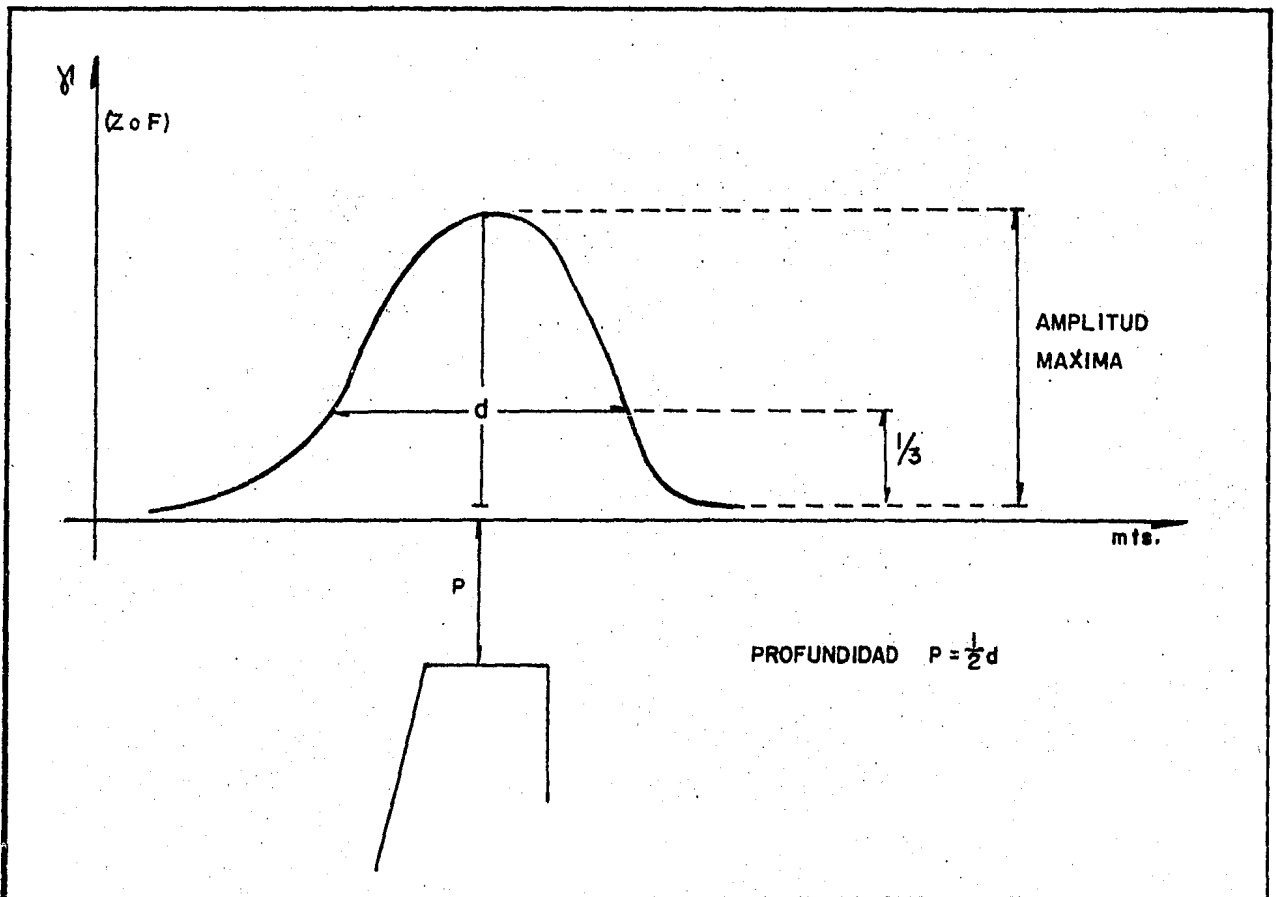




## III.1.e. REGLA DE HANNEL.

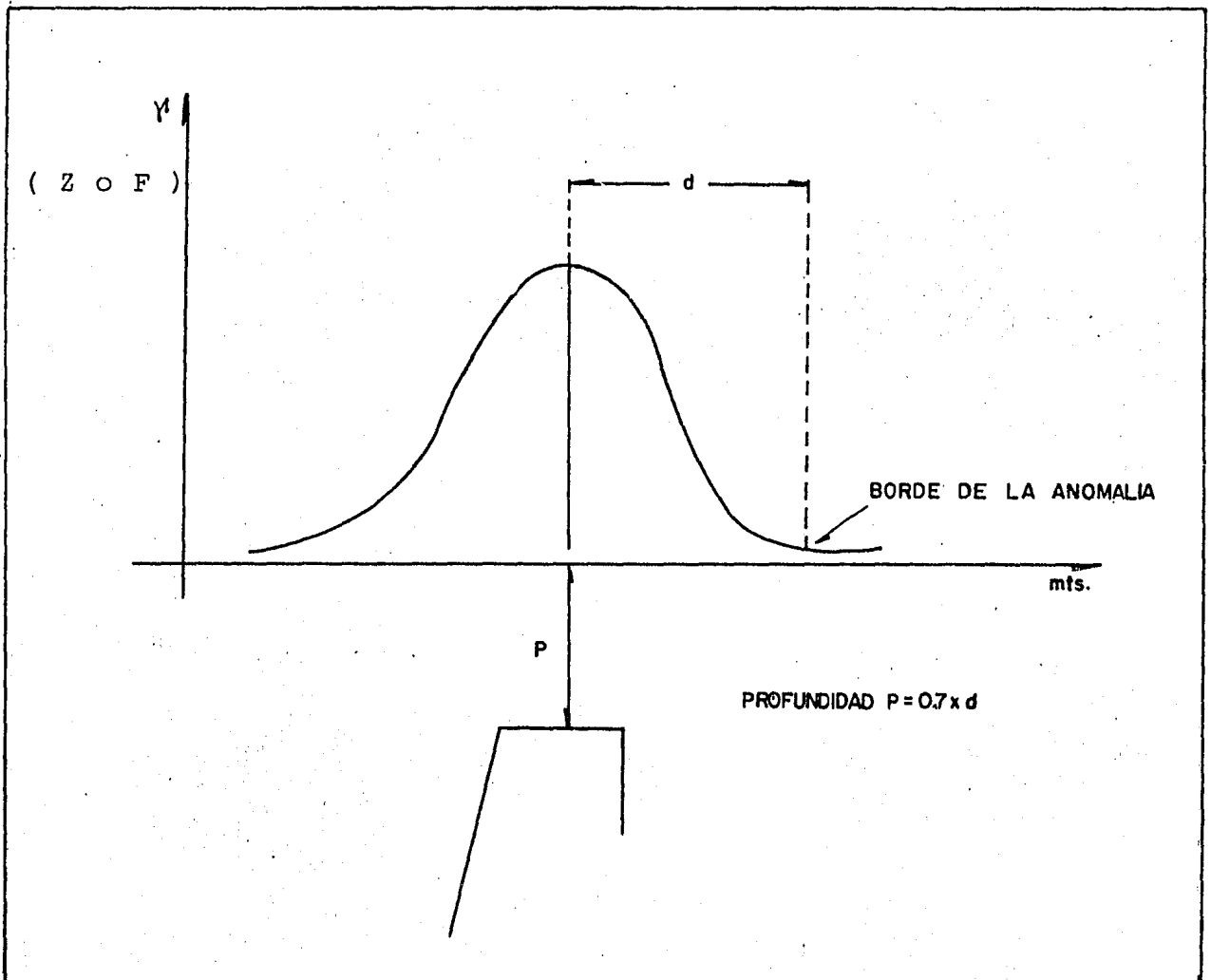
Para esta regla, la profundidad al cuerpo será  $P = \frac{1}{2} d$ , siendo "d" -- la distancia horizontal entre los flancos de las curvas a  $\frac{1}{3}$  de la distancia de la amplitud máxima.

Véase la siguiente figura:



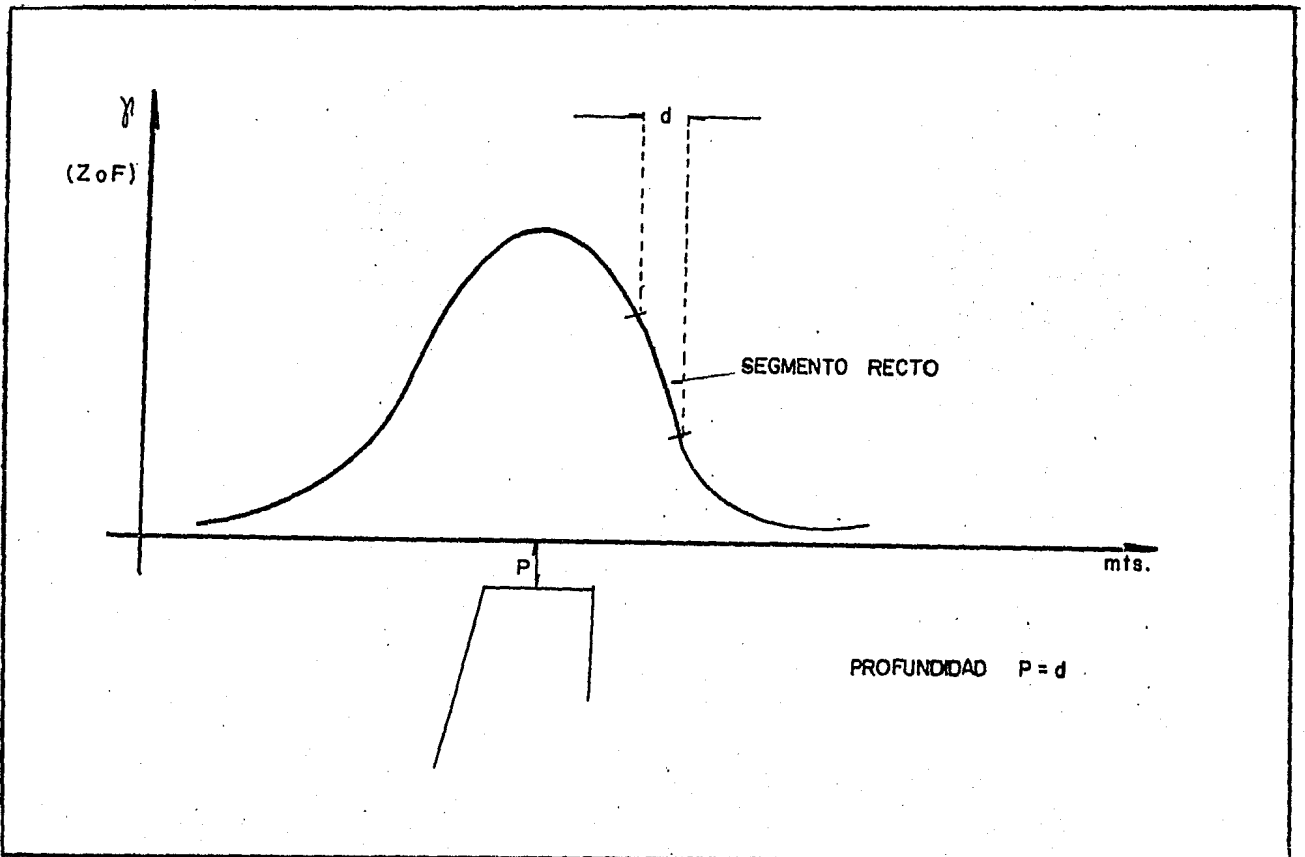
## III.1.f. REGLA DE THALEN

Mediante la Regla de Thalen, la profundidad al cuerpo vendrá dada por  $P=0.7 \times d$ , siendo "d" la distancia horizontal desde el borde de la anomalía al punto máximo "A", como se indica en la siguiente - figura.

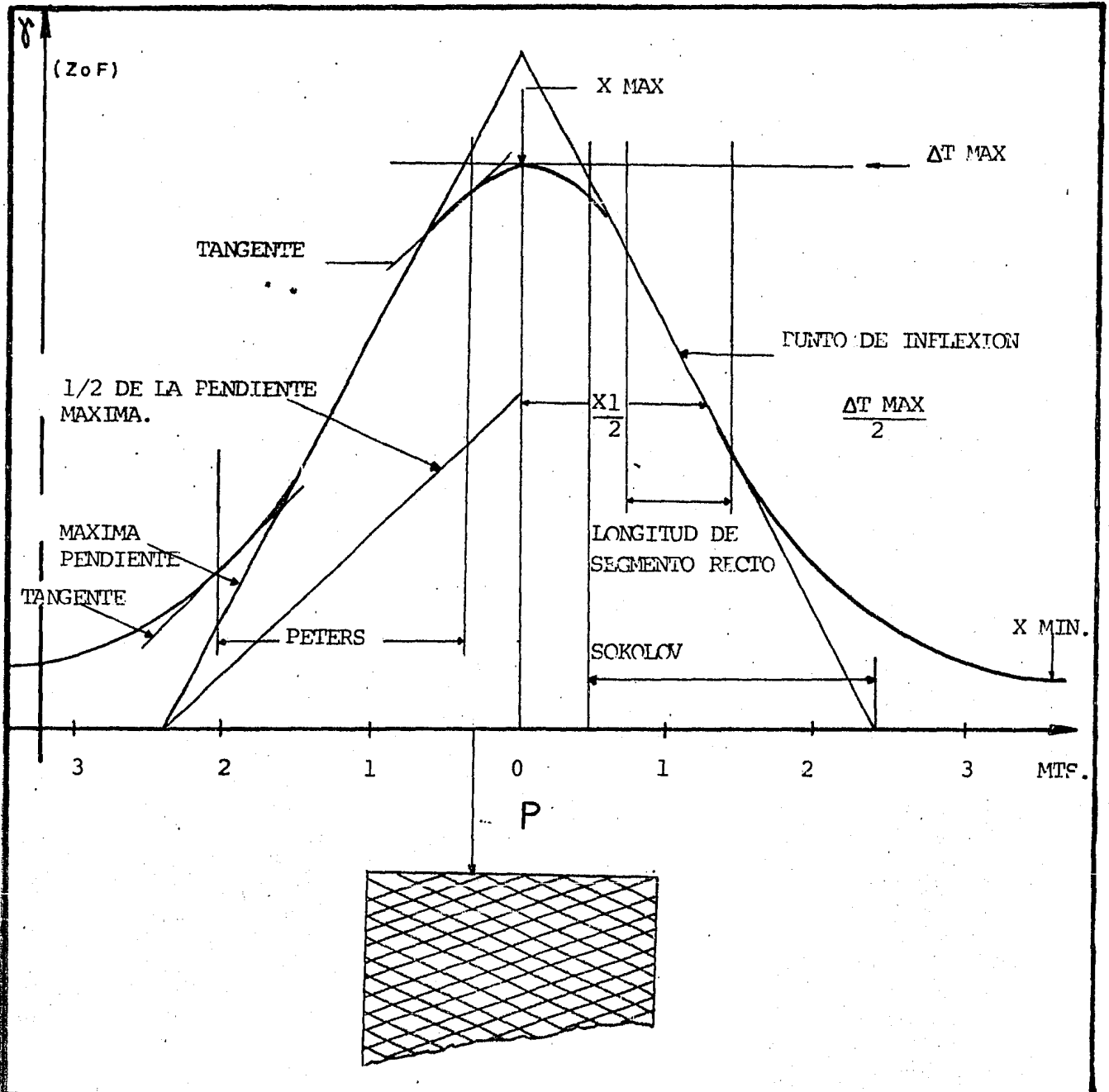


## III.1.g. REGLA DE LA DISTANCIA DE PENDIENTE.

La profundidad al cuerpo mediante esta regla será  $P=d$ , siendo "d" - la distancia horizontal entre el punto bajo y el punto alto del segmento "recto" de un flanco de la curva, véase la siguiente figura.



Como un resumen de los métodos empíricos de interpretación cuantitativa, se muestra la siguiente figura, en la cual aparecen los - - - parámetros usados en tales métodos para determinar la profundidad -- al cuerpo causante de la anomalía magnética.



### III.2. CALCULOS SIMPLES POR COMPUTADORA.

En este segundo grupo, uno de los artículos más notables referido a la técnica de estimación de profundidades a partir de perfiles promedio de computadoras, fue publicada por Hartman en 1971, aplicando la llamada "Deconvolución Werner" al gradiente vertical, gradiente horizontal y datos de campo total. Para desarrollar lo anterior, -- los modelos elementales utilizados fueron una simple lámina inclinada para un cuerpo con un espesor menor que su profundidad, o un -- grupo de éstas láminas para simular bloques más anchos o algún -- caso de contacto.

Con el propósito de reducir los efectos de interferencia en la ecuación de Werner, seis o siete puntos equidistantes son tomados para -- generar una serie de ecuaciones simultáneas que son resueltas por -- la computadora. La secuencia entera es movida un punto cada vez en -- el perfil y los cálculos son repetidos. Una corrección se debe aplicar para cada determinación anómala si el perfil no cruzó la direc-- ción del cuerpo causante de la anomalía en ángulos rectos.

La Deconvolución Werner es de gran aplicación en la interpretación -- de datos aeromagnéticos enfocados a determinar la profundidad y con-- figuración estructural del basamento.

El proceso matemático mediante el cual los puntos de profundidad, -- las direcciones de buzamiento, y los valores de susceptibilidad son -- calculados automáticamente de los datos magnéticos del perfil, es -- lo que se ha denominado: "Deconvolución Werner".

#### III.2.a. DECONVOLUCION WERNER.

Mucho se ha escrito sobre el proceso de Deconvolución Werner; en -- este tratado se dará una idea de lo que significa tal proceso sin -- ahondar en cuestiones matemáticas, con el fin de tener una compren--

si6n encaminada sobre todo a cuestiones pr6cticas.

El objetivo principal que persigue la Deconvoluci6n Werner, es el determinar la profundidad y configuraci6n estructural del cuerpo causante de anomalias aeromagn6ticas.

Un grupo de perfiles son el resultado de la Deconvoluci6n Werner, estos perfiles son llamados Perfiles Werner, los cuales son trazados de manera ideal a la misma escala que los mapas de curvas - - de nivel magn6tico.

Cada Perfil Werner se divide en las siguientes partes:

- 1.- Perfil magn6tico medido en el campo total.
- 2.- Perfil medido del gradiente vertical.
- 3.- Perfil magn6tico calculado de gradiente horizontal.
- 4.- Datos diurnos de la estaci6n terrestre.
- 5.- Lnea de nivel del mar.
- 6.- Valores de susceptibilidad y de buzamento calculados.
- 7.- Bloques de impresos de egreso, mostrando n6mero de - - trabajo, n6mero de lnea, e informaci6n sobre espaciamiento de operaci6n y filtro.
- 8.- Escala horizontal mostrando el n6mero de puntos de - - datos.

Diversos m6todos o t6cnicas de interpretaci6n han sido desarrollados, mencionando algunos, tales como Vacquier (1951), Reford (1964) y de una manera m6s sofisticada Grant y West (1965), se puede decir con respecto a ellos que un int6rprete con experiencia, de considerables conocimientos geol6gicos y con suficientes anomalias razonablemente aisladas, puede desempe1ar un buen trabajo de interpretaci6n; sin -- embargo cuando las condiciones magn6ticas y geol6gicas no son idea-- les, los m6todos antes mencionados est6n sujetos a una cantidad considerable de ambigüedades que introducen errores.

Werner dándose cuenta de que la necesidad más grande era la creación de un método para separar una anomalía de interferencias causadas -- por anomalías adyacentes, y además considerando la anomalía entera -- en el análisis y no sólo unos cuantos parámetros como en técnicas -- anteriores, desarrolló lo que actualmente conocemos como deconvolu-- ción Werner, el cual es un método de interpretación directa para -- determinar profundidades, susceptibilidades y buzamientos de las -- fuentes causantes de anomalías magnéticas.

El interés principal de Werner era el análisis de diques mineraliza-- dos, pero luego demostraría que su técnica se puede aplicar también-- a contactos, bordes, fallas y otros tipos de cuerpos.

La ecuación para un dique en el campo total ( figura página 34), se-- puede escribir en la forma de:

$$F(x) = \frac{A(x-X_0) + Bz}{(x-X_0)^2 + z^2} \dots (1)$$

En donde  $x$  representa la distancia a lo largo del perfil y  $F$  es la -- intensidad magnética total del campo en  $X_0$ , las cantidades  $A$  y  $B$  -- son funciones de las propiedades magnéticas que comprenden la fuen-- te tipo capa (susceptibilidad, remanencia natural), como también la-- posición de la capa en relación a la dirección del campo terrestre -- normal. El símbolo  $Z$  representa la profundidad hasta el extremo -- superior del dique, y  $X_0$  es la coordenada horizontal a lo largo de -- la poligonal en el extremo superior del dique. Luego entonces exis-- ten 4 cantidades físicas determinantes:

$A, B, X_0$  y  $Z$ .

En el simple caso en donde se hacen observaciones en un plano hori-- zontal sobre capas homogéneas confinadas horizontalmente, cuyo largo y profundidad son infinitas y cuyo rumbo es perpendicular a la -- -- dirección del perfil, la ecuación para un dique quedará representada de la siguiente forma:

$$a_0 + a_1x + b_0F + b_1xF = x^2 F \dots (2)$$

En esta ecuación,  $x$  y  $F$  quedan definidos de la misma forma que en la ec. (1) y por substitución podemos ver que:

$$\begin{aligned} a_0 &= -AX_0 + B_z \\ a_1 &= A \\ b_0 &= -X_0^2 - Z^2 \quad \dots \quad (3) \\ b_1 &= 2X_0. \end{aligned}$$

Inversamente, la profundidad y posición horizontal del extremo superior del dique como también los parámetros de magnetización  $A$  y  $B$ , son funciones de los parámetros de la ec. de interpretación (2).

$$\begin{aligned} X_0 &= 1/2 b_1 \\ Z &= \pm 1/2 \sqrt{-4b_0 - b_1^2} \quad \dots \quad (4) \\ A &= a_1 \\ B &= (2 a_0 + a_1 b_1) / \sqrt{-4b_0 - b_1^2} \end{aligned}$$

Como podemos ver tenemos 4 incógnitas, por lo cual la solución simultánea de la ecuación de interpretación (2) a cuatro valores de  $x$  y sus correspondientes valores de  $F$ , resultarán soluciones para  $a_0, a_1, b_0, b_1$ , y de la ecuación (4) para  $X_0, Z, A$  y  $B$ . La susceptibilidad magnética y el buzamiento geológico a su vez, son fácilmente calculados de  $A$  y  $B$ , así como la inclinación magnética terrestre, la declinación y el espesor de capa supuesto.

Si admitimos la posibilidad de interferencia mencionada anteriormente, y suponemos que ésta puede ser representada por un polinomio de algún grado, entonces lo podremos agregar a la ecuación (1) :

$$f(x) = \frac{A(x-X_0) + Bz + C_0 + C_1 x + \dots + C_n x^n}{(x-X_0)^2 + z^2} \dots (5)$$

En donde  $n$  es el orden del polinomio de interferencia y las  $C$  son los coeficientes, tendremos entonces un total de  $(n+5)$  incógnitas y por lo tanto  $(n+5)$  ecuaciones, requiriendo  $(n+5)$  puntos de datos --



para solucionar las incógnitas. En la práctica, un polinomio de - - primer orden es suficiente ( $n=1$ ) de manera que requerimos 6 puntos - para la solución.

Aunque esto represente el primer intento para tratar automáticamente la interferencia, todavía es necesario suponer el tipo de configuración de la fuente (por ejemplo un dique) para suponer la interferencia correctamente.

La teoría antes mencionada es válida para todo cuerpo tipo capa, - - que sea homogéneo y semifinito cualquiera que sea su rumbo o buza - - miento y a cualquier latitud magnética. Además el cálculo de profundidad y posición es independiente de la dirección de magnetización, - y por lo tanto no se ve afectado por la remanencia.

Para bordes o contactos debemos considerar a éstos como una interfase (o superficie de contacto). En términos geológicos una interfase es simplemente un contacto buzante. Todas las capas delgadas son - - limitadas por dos interfases, pero éstas están demasiado juntas - - como para distinguir sus anomalías de manera individual de capa - - delgada. Debido a que una anomalía magnética para una capa delgada, - es exactamente igual que aquella derivada de una anomalía magnética - para una interfase posicionada de la misma manera, se pueden convertir entonces en anomalías tipo interfase en los datos de campo total a anomalías tipo capa delgada, calculando simplemente la derivada\* - - del campo total. Este perfil derivativo o gradiente puede someterse de éste modo al tipo de análisis de Werner descrito anteriormente.

Finalmente mencionaremos que la potencia de las ecuaciones empleadas para la interpretación directa de las anomalías magnéticas, permite una solución singular aun cuando casi toda la anomalía se encuentre perturbada por anomalías adyacentes. Dichos efectos de interferencia son la regla en vez de la excepción, en la mayoría de levantamientos magnetométricos. Las soluciones se encuentran en cualquier conjunto de puntos equidistantes, y estos puntos no son ni máximos ni mínimos, ni puntos críticos, a lo largo del perfil, sino puntos suficientes - - para el proceso.

---

\* Derivada Horizontal.

### III.2.a. AJUSTES DE CURVAS POR COMPUTADORA.

En este tercer grupo de técnicas de interpretación cuantitativa -- llamado técnicas de ajuste de curvas por computadora, un modelo -- geométrico tridimensional es derivado mediante una técnica de ---- optimización cuya anomalía calculada ajusta mejor a una serie de - datos sobre una cuadrícula en un plano horizontal.

Las técnicas de ajuste de curvas por computadora han tenido un --- gran desarrollo durante la última década, algunas técnicas como -- las publicadas por Johnson en 1969 para estructuras bidimensiona-- les, y por Mc. Grath y Hood en 1970 y por Rao en 1973 para el - - dique inclinado, difieren de la Deconvolución Werner en el hecho - de que una simple solución para el cuerpo causante es obtenida a - partir de unos cuantos parámetros de la totalidad de la anomalía.

Naudy publicó una técnica de cálculo de profundidades a partir de los perfiles que utiliza el modelo del dique inclinado; en - - éste método una anomalía individual es dividida en sus componentes simétricas, el resultado final será una serie de símbolos coloca-- dos sobre una plantilla por la computadora que corresponden a las profundidades de las cimas de los cuerpos generadores correspon-- dientes.

En las pasadas décadas considerable esfuerzo ha sido dedicado para resolver el problema de cálculos en campos potenciales. Por ejem-- plo : A partir de una estructura geológica conocida, encontrar - - su correspondiente anomalía magnética y gravimétrica. Talwani, - - Worsel, Ladisman, (1959) dieron un método para encontrar la anoma-- lía a partir de una serie de prismas bidimensionales de tamaño - - arbitrario.

Programas de computación para el cálculo de anomalías magnéticas - causadas por estructuras bidimensionales arbitrarias han sido - - - publicadas por varios autores: Talwani y Heirtzler (1964), - - - Hoghson (1964), Bhattacharyya (1964), Issacs (1966). En 1973 Mc. - Grath y Hood publicaron una técnica de computadora para ajuste de curvas, utilizando una integración numérica de la ecuación para -- la anomalía magnética debida a una placa rectangular.

Cuando estos métodos son empleados en la interpretación se basan - en la técnica del ensayo y error, en el cual los parámetros del -- modelo son cambiados consecutivamente hasta que los datos del - - modelo y de campo sean lo más semejantes posibles. Dicha técnica - de ensayo y error puede ser muy tardada debido al tiempo entre --- ensayo y error, y el total de tiempo de computadora usado.

Otra desventaja de la técnica del ensayo y error, es el que se - - tiene al basarse en un modelo del espacio paramétrico que de la -- mejor coincidencia con los datos observados en campo, ya que en -- caso contrario el análisis se hace más difícil y tardado.

Después de seleccionar la anomalía de interés, el intérprete elige el modelo geométrico que ajuste lo mejor posible al modelo geológico, basándose en la forma de la anomalía conjuntamente con la - - información de geociencias disponibles para el área.

Con la selección de un modelo geométrico, el intérprete elige ---- implícitamente la ecuación matemática hacia la cual los datos alimentados serán ajustados mediante la técnica iterativa de mínimos-cuadrados.

La ecuación matemática para el modelo usado contiene los parámetros geométricos: profundidades, longitud, espesor, vertical, ancho del cuerpo generador y también su contraste de magnetización con - la roca encajonante.

La magnetización es un vector, ésto es, que posee magnitud y -- dirección; para obtener los valores de los parámetros procedentes en el programa de computadora, se varía cada uno de ellos hasta -- obtener el mejor criterio de convergencia.

Es también necesario que el intérprete decida los parámetros que se deben variar, así como los valores iniciales para éstos, los -- cuales son usualmente obtenidos por medio de métodos gráficos -- simples (Métodos Empíricos).

Los valores iniciales son alimentados a la computadora dentro de la ecuación y la curva del modelo resultante es generada corres-- pondiendo a cada serie de datos alimentados, de aquí la suma de -- las diferencias de mínimos cuadrados entre la anomalía y los valo-- res de la curva teórica es calculada.

Para calcular correcciones a los parámetros con la idea de minimi-- zar este valor residual de diferencias de mínimos cuadrados, los-- parámetros corregidos son alimentados a la ecuación y el proceso-- continúa hasta que el modelo óptimo es alcanzado, es decir cuando la computadora muestra los mejores valores de ajuste obtenidos -- para los parámetros; ésto significa que los valores de la anoma-- lía han sido ajustados tanto como sea posible con aquellos genera-- dos por el modelo geométrico utilizando los parámetros calculados.

Uno de los métodos más usados y representativos en este tercer -- grupo de técnicas de interpretación cuantitativa, es el desarro-- llado por M. Talwani por lo cual se profundizará en él para su -- mejor entendimiento.

## III.3.a. METODO DE TALWANI.

Talwani y Heirtzler (1964) presentaron un método conveniente para calcular anomalías magnéticas causadas por estructuras bidimensionales. En su método, la anomalía causada por un cuerpo de sección poligonal 1-2-3-4-5 (Figura III.3.1.) es evaluada para obtener -- las anomalías debido a prismas semejantes a 1-L-M-2.

Los efectos de las prismas para todos los lados del cuerpo son -- obtenidos y adheridos con las consideraciones propias como las -- indicadas.

Se procede alrededor de un cuerpo en una dirección del sentido -- del movimiento de las manecillas de un reloj, las intensidades -- del campo vertical V y del campo horizontal H en el origen están -- dadas por:

$$V = 2 (J_x QSUM - J_z PSUM) \dots\dots (1)$$

$$H = 2 (J_x PSUM - J_z QSUM) \dots\dots (2)$$

donde :

$$QSUM = \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \frac{(z_{i+1} - z_i) (x_i - x_{i+1})}{(z_{i+1} - z_i)^2 + (x_i - x_{i+1})^2} \cdot (\theta_i - \theta_{i+1}) - \right.$$

$$\left. - \frac{(z_{i+1} - z_i)^2}{(z_{i+1} - z_i)^2 + (x_i - x_{i+1})^2} \cdot \log \left[ \frac{\sqrt{x_{i+1}^2 + z_{i+1}^2}}{\sqrt{x_i^2 + z_i^2}} \right] \right\} \dots\dots (3)$$

$$PSUM = \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \frac{(z_{i+1} - z_i)^2}{(z_{i+1} - z_i)^2 + (x_i - x_{i+1})^2} \cdot (\theta_i - \theta_{i+1}) + \right.$$

$$\left. + \frac{(z_{i+1} - z_i) (x_i - x_{i+1})}{(z_{i+1} - z_i)^2 + (x_i - x_{i+1})^2} \cdot \log \left[ \frac{\sqrt{x_{i+1}^2 + z_{i+1}^2}}{\sqrt{x_i^2 + z_i^2}} \right] \right\} \dots\dots (4)$$

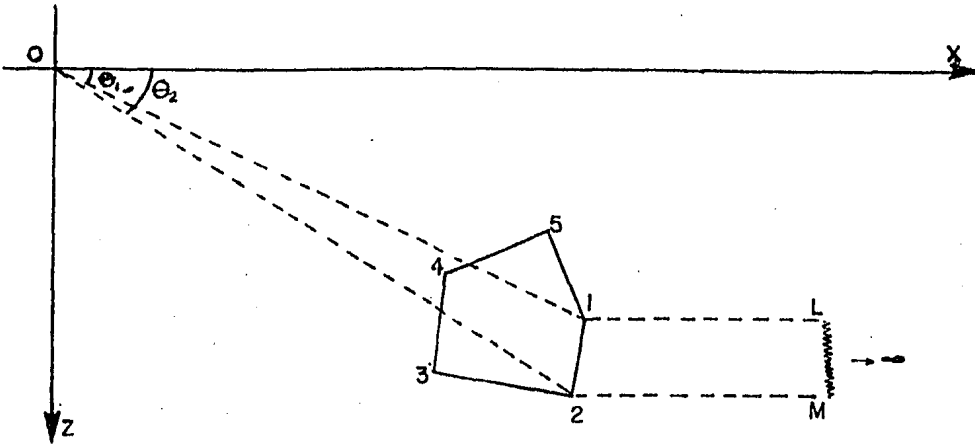
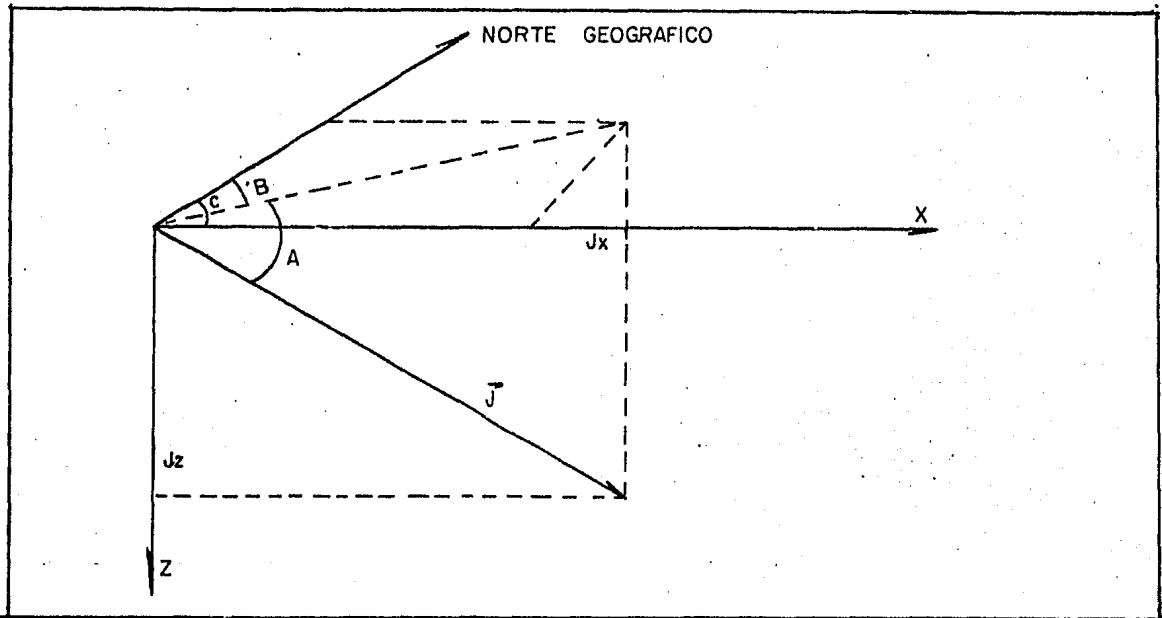


FIG. III.3.1. DEFINICION DEL SISTEMA DE COORDENADAS Y NOTACION.

Para evaluar  $J_x$  y  $J_z$  se adopta la siguiente convención (Fig. abajo.) La inclinación de  $\vec{J}$  es positiva debajo del horizonte representado -- por A, y B es el ángulo medido en dirección de las manecillas desde el norte geográfico.



"C" es el ángulo en el plano horizontal con la dirección positiva-- concordante con el eje positivo X y medido en dirección del movimiento de las manecillas del reloj desde el norte geográfico. - - - Entonces:

$$J_x = J \cos A \cos (C-B)$$

$$J_z = J \sin A$$

Las cantidades  $J_z$  y  $J_x$  son las componentes X y Z de la intensidad de magnetización  $J$ ;  $N$  es el número de puntos coordenados  $(X_i, Z_i)$  del cuerpo con el primer punto considerado para ser repetido como punto enésimo.

Por magnetización inducida  $J=KF$  donde  $K$  es la susceptibilidad y  $F$  es la intensidad del campo magnético de la tierra.

Para anomalías pequeñas respecto al campo magnético total, la intensidad total de la anomalía  $T$  es:

$$T=V \sin I+H \cos I \cos (C-D) \dots (5)$$

donde  $I$  es la inclinación magnética del campo,  $D$  es la declinación magnética, y  $C$  es el ángulo medido en una dirección del movimiento de las manecillas de un reloj entre el eje X y el norte geográfico. Obsérvese que  $T$  puede ser considerado no únicamente como una función del punto en que la anomalía es calculada, sino también en base a las coordenadas del cuerpo y a sus susceptibilidades.

Una sección a través de un cuerpo bidimensional de forma arbitraria es representado por un polígono irregular. Las expresiones se derivan para intensidades causadas por un cuerpo poligonal en dos dimensiones.

La computación de las anomalías de intensidad magnética causada por estructuras de forma y magnetización específica tiene dos aplicaciones principales.

La primera aplicación se relaciona a la compilación de perfiles anómalo<sup>s</sup> causados por cuerpos geométricos simples. Diferentes perfiles son computados para cuerpos cuyas profundidades, formas, o direcciones de magnetización varían.

En el proceso de interpretación, el perfil anómalo observado es -- comparado a un perfil modelo para estimar las características del cuerpo geológico que produce dicha anomalía.

La segunda aplicación usa anomalías que son derivadas de cuerpos reales para ser comparadas con las observadas en campo. Los cálculos son generalmente tediosos, pero con el desarrollo de programas de computadora, éstos métodos han sido cada vez más aceptables.

Cuando la forma y el tamaño de la anomalía producida por un cuerpo se conocen y se puede asumir una magnetización uniforme, los cálculos de la anomalía pueden ser utilizados para inferir tanto la dirección como la naturaleza de su magnetización, ya sea remanente o inducida.

Cuando la consideración de ajuste bidimensional inicial es pobre, su primer aproximación no dará una solución aceptable, sin embargo si dicha consideración es la apropiada derivará rápidamente en una solución que algunas veces será la más apropiada desde el primer cálculo.

La fórmula para la atracción de un prisma bidimensional seminfinito obtenido de los mismos principios, ha sido dado en forma ligeramente diferente por Heiland (1946), esta fórmula es usada para -- obtener la anomalía magnética causada por un cuerpo bidimensional con la sección através de un polígono irregular, esto puede ser -- aproximado por una sección transversal irregular de cualquier cuerpo bidimensional, y por lo tanto este método puede ser usado para obtener la anomalía causada por cualquier cuerpo con cierta facilidad.



## III.3.b. DERIVACION DE LA FORMULA

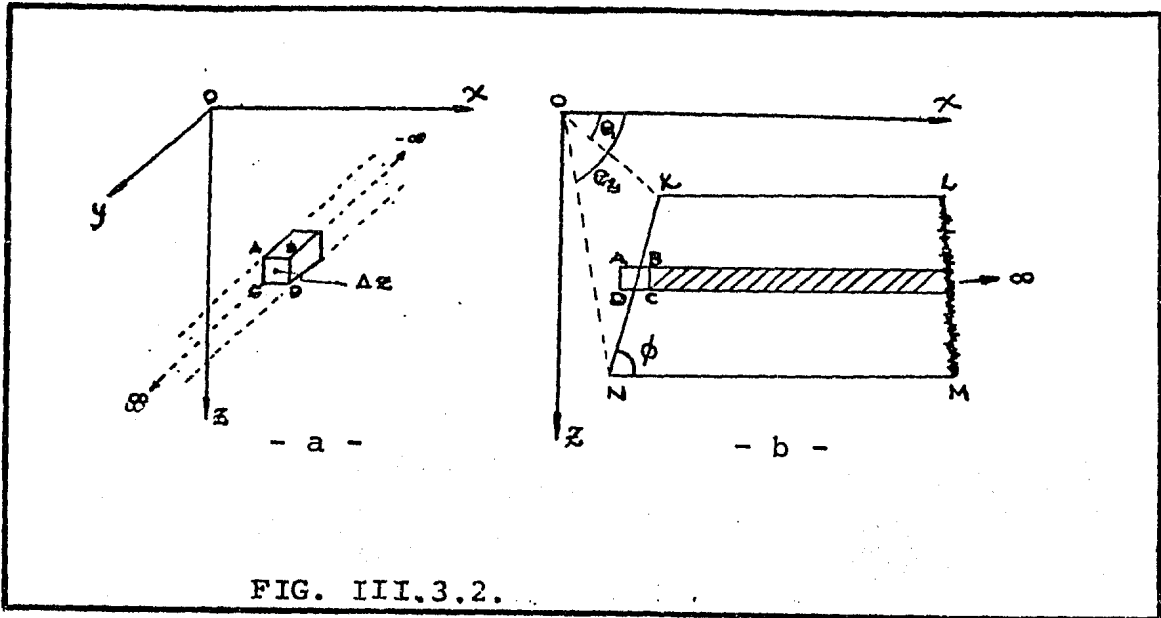


FIG. III.3.2.

Considere en primer término la anomalía magnética causada por un -- prisma seminfinito bidimensional KLMN mostrado en perfil en la -- figura III.3.2.b.

El prisma se extiende a infinito a lo largo del eje positivo de las "X" y a lo largo de las partes positivas y negativas del eje "Y" .

Se deriva a continuación la anomalía magnética causada por este --- prisma en el origen. Considere primero la anomalía causada por una --- barra elemental de sección transversal ABCD mostrada en perfil en --- la figura III.3.2.b. y en tres dimensiones en la figura III.3.2.a. Siendo el vector  $\vec{J}$  la intensidad de magnetización, entonces el ---- momento magnético "m" del elemento de volumen  $\Delta x \Delta y \Delta z$  está dado por:  $\vec{m} = \vec{J} \Delta x \Delta y \Delta z$  y su potencial magnético en el origen es:

$$\Omega = - \frac{\vec{m} \cdot \vec{r}}{R^3} = \frac{J_x X + J_y Y + J_z Z}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \Delta x \Delta y \Delta z$$

y donde la barra infinita de sección transversal ABCD es:

$$\Omega = \Delta x \Delta z \int_{-\infty}^{\infty} \frac{J_x X J_y Y J_z Z}{(X^2 + Y^2 + Z^2)^{3/2}} dy = 2 \Delta x \Delta z \frac{J_x X J_z Z}{X^2 + Z^2}$$

La fuerza magnética vertical V es:

$$V = - \frac{\partial \Omega}{\partial z} = 2 \Delta x \Delta z \frac{2 X Z J_x - J_z (X^2 - Z^2)}{(X^2 + Z^2)^2}$$

y la fuerza del campo horizontal H medido en la dirección X es:

$$H = \frac{\partial \Omega}{\partial x} = 2 \Delta x \Delta z \frac{J_x (X^2 + Z^2) + 2 X Z J_z}{(X^2 + Z^2)^2}$$

Los valores de V y H para la lámina sombreada que se muestra en la figura III.3.2.b. son obtenidas integrando (1) y (2) con respecto a "X", siendo los límites de integración de X a  $\infty$ .

Para esta lámina entonces se obtiene:

$$V = 2 \Delta z \cdot \frac{J_x Z - J_z X}{X^2 + Z^2} \qquad H = 2 \Delta z \frac{J_x X + J_z Z}{X^2 + Z^2}$$

Para el prisma KLMN las expresiones han sido integradas respecto a Z pero no a lo largo de Kn,  $x = (X_1 Z_1 \cot \phi) - Z \cot \phi$

$$V = 2 \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{J_x Z - J_z X}{X^2 + Z^2} dz = 2 \operatorname{sen} \phi \left[ J_x \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \cos \phi + \operatorname{sen} \phi \log \frac{r_2}{r_1} \right\} \right. \\ \left. - J_z \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \operatorname{sen} \phi - \cos \phi \log \frac{r_2}{r_1} \right\} \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$H = 2 \int_{Z_1}^{Z_2} \frac{J_x X + J_z Z}{X^2 + Z^2} dz = 2 \operatorname{sen} \phi \left[ J_x \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \operatorname{sen} \phi - \cos \phi \log \frac{r_2}{r_1} \right\} \right. \\ \left. + J_z \left\{ (\theta_2 - \theta_1) \cos \phi + \operatorname{sen} \phi \log \frac{r_2}{r_1} \right\} \right] \dots \dots \dots (4)$$

Como continuación a su método en dos dimensiones M. Talwani - - - desarrolló el método tridimensional, éste se trata sin profundizar debido a su extenso proceso matemático. Se considera la anomalía magnética causada por un cuerpo finito de forma arbitraria y magnetizado homogéneamente, como un conjunto limitado de láminas poligonales irregulares (Figura III.3.3.). El método trabaja con intensidad magnética total sin restricción en la dirección del magnetismo del cuerpo, el cual generalmente difiere del magnetismo mostrado por la tierra. En la figura III.3.3., "KL" es el iésimo lado del polígono, "Pi" es la distancia perpendicular desde "P" hasta "KL", "gi" es la intersección de "KL" con el eje "X" y "Ci" es la intersección de "KL" con el eje "Y". Si  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  y  $\delta_i$  son los ángulos y  $r_i$ ,  $r_{i+1}$ ,  $R_i$  y  $R_{i+1}$  son las distancias mostradas en la figura, --- entonces las superficies del elemento cúbico se resuelven para - - obtener por integración el volumen total del cuerpo.

$$S_1 = - \sum_i \frac{1/(1+\eta_i^2)}{z^2 + p_i^2} \left\{ \frac{g_i y_{i+1} - \eta_i z^2}{R_{i+1}} - \frac{g_i y_i - \eta_i z^2}{R_i} \right\}$$

$$S_2 = \sum_i \frac{1/(1+\eta_i^2)}{z^2 + p_i^2} \left\{ \frac{g_i^2 + z^2 + g_i y_{i+1} \eta_i}{R_{i+1}} - \frac{g_i^2 + z^2 + g_i y_i \eta_i}{R_i} \right\}$$

$$S_3 = - \sum_i \frac{z \{1/(1+\eta_i^2)\}}{z^2 + p_i^2} \left\{ \frac{y_{i+1} (1+\eta_i^2) + g_i \eta_i}{R_{i+1}} - \frac{y_i (1+\eta_i^2) + g_i \eta_i}{R_i} \right\}$$

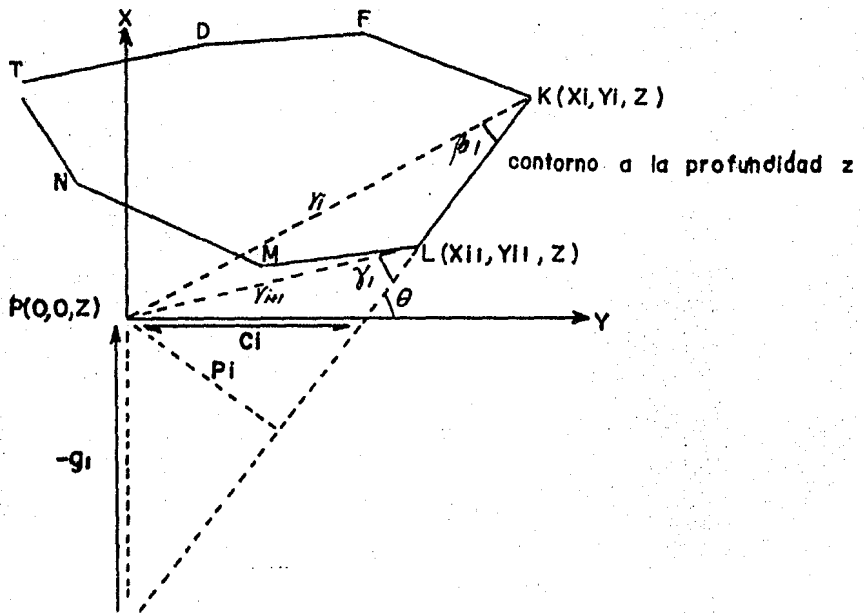
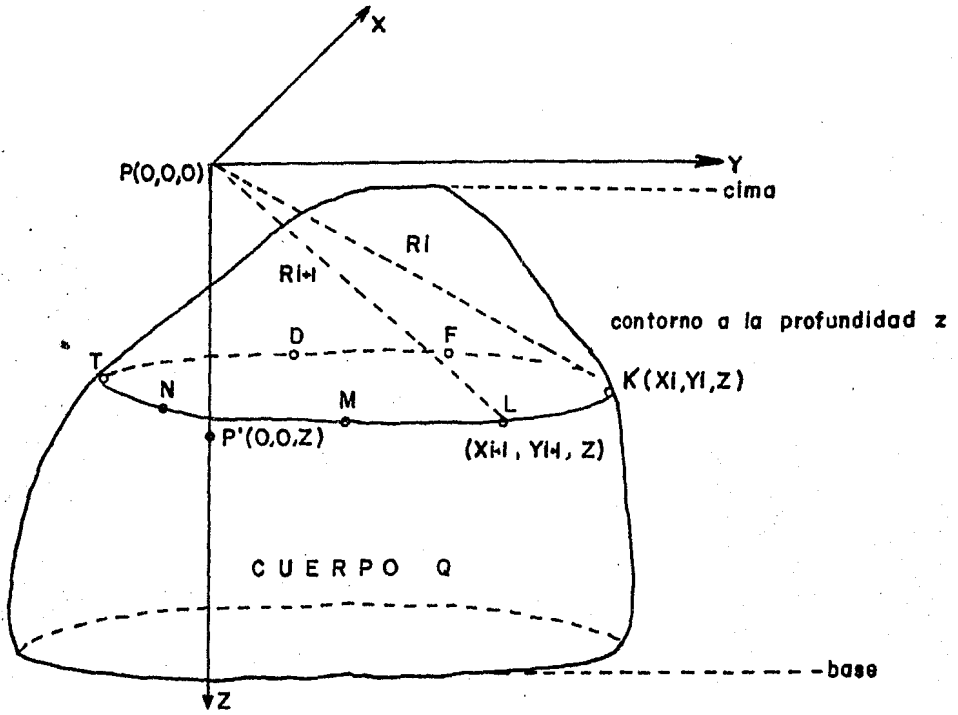
$$S_4 = \sum_i \frac{1/(1+m_i^2)}{z^2 + p_i^2} \left\{ \frac{c_i x_{i+1} - m_i z^2}{R_{i+1}} - \frac{c_i x_i - m_i z^2}{R_i} \right\}$$

$$S_5 = \sum_i \frac{z^2 \{1/(1+m_i^2)\}}{z^2 + p_i^2} \left\{ \frac{x_{i+1} (1+m_i^2) + c_i m_i}{R_{i+1}} - \frac{x_i (1+m_i^2) + c_i m_i}{R_i} \right\}$$

Para resolver  $S_6$  se hace la transformación a coordenadas cilíndricas  $r \psi z$ .

$$S_6 = - \sum \frac{p_i^2}{p_i^2 + z^2} \left\{ \frac{r_{i+1} \cos \delta_i}{R_{i+1}} - \frac{r_i \cos \beta_i}{R_i} \right\}$$

Los ángulos  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  y las distancias  $p_i$ ,  $r_i$ ,  $r_{i+1}$  se muestran en la figura III.3.3.



CONTORNO A LA PROFUNDIDAD "Z" Y SU REPRESENTACION MEDIANTE UN POLIGONO.

### III.4. TECNICA ITERATIVA MEDIANTE COMPUTADOR GRAFICO.

Para el cuarto de los métodos de interpretación cuantitativa, se hace una extensión del 3° grupo de métodos antes descrito al adaptar el método a una terminal gráfica iterativa.

Ogawa y Tsu (1976) han descrito este sistema, en el cual una combinación ya sea manual o automática de ajuste de curvas puede ser empleada para interpretar perfiles o mapas de contorno.

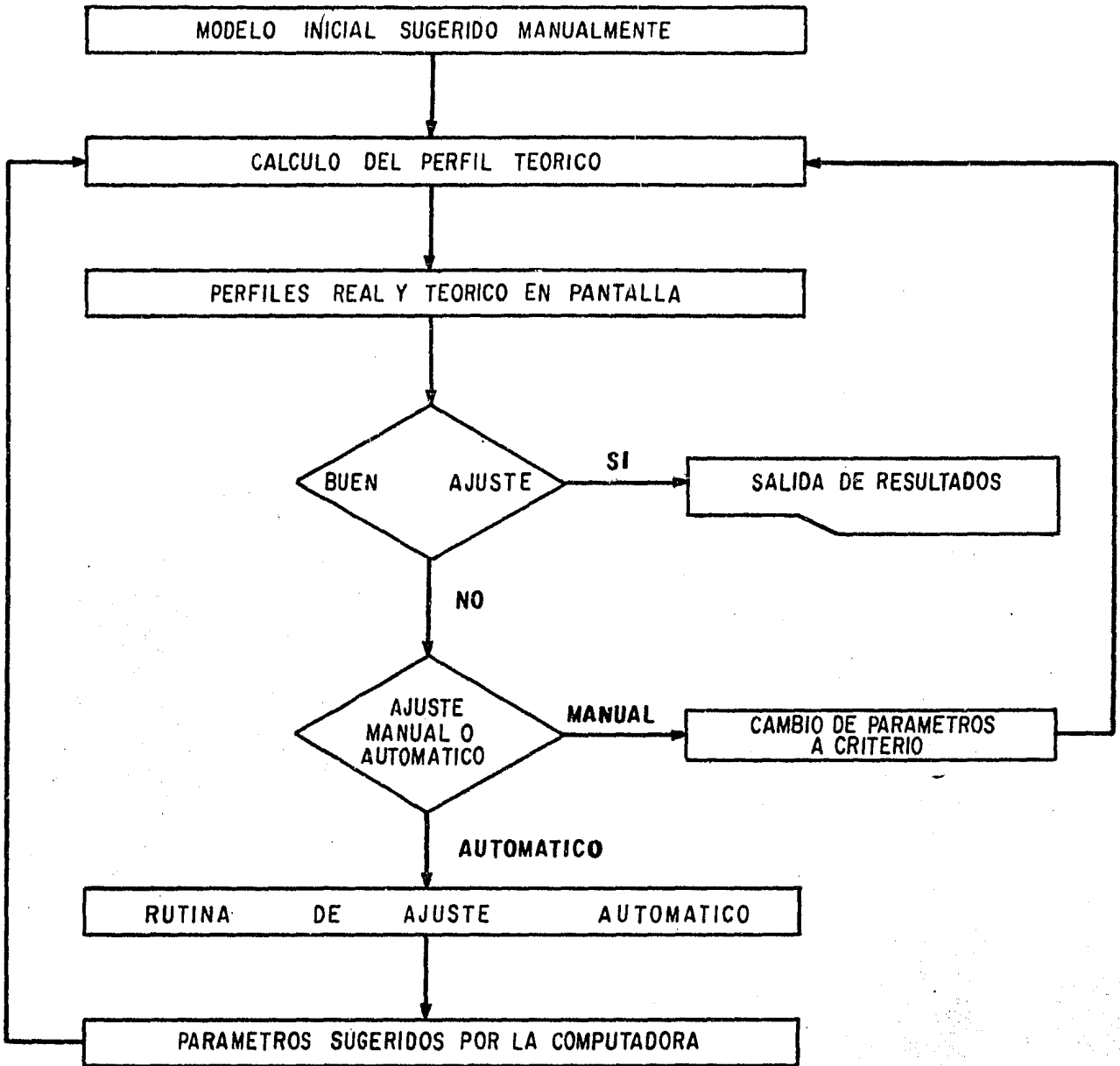
La figura III.4.1. ilustra el diagrama de flujo que sigue la interpretación cuantitativa de iteración mediante un computador gráfico.

Como se ha venido diciendo en este trabajo, los estudios geofísicos son de importancia primordial en los estudios de geología, por lo cual una de las partes más importantes en cualquier método geofísico es la interpretación geológica que de los datos obtenidos y recopilados se haga.

En el resultado final, ésta interpretación en conjunto con una metodología y una operación técnica de campo correcta, determina el suceso geológico causante utilizando métodos geofísicos.

El uso de computadoras en el proceso e interpretación de datos magnéticos mediante la automatización de operaciones hace posible obtener rápidamente los cálculos más complicados.

En años recientes un gran número de métodos han sido desarrollados para tratar el problema de interpretar la forma y medida de la fuente generadora de alguna anomalía magnética; la idea de esta técnica consiste en estimar los parámetros del cuerpo real generan



**INTERPRETACION ITERATIVA MEDIANTE COMPUTADOR GRAFICO**

Figura III.4.1.-

do una anomalía teórica la cual es comparada con las anomalías de campo.

Estudios como los realizados por Nettleton (1942) Henderson y Zietz (1948), Bhattacharyya (1964), han tratado de calcular efectos magnéticos en diferentes formas.

La solución al problema inverso es usualmente obteniendo por la optimización de parámetros en la siguiente forma:

Un modelo geológico teórico se supone como el causante de la anomalía; de este modelo idealizado se calcula su correspondiente anomalía teórica la cual es comparada con la obtenida de los datos de campo, de una primera comparación se usan los residuales entre ambos para cambiar los parámetros del modelo inicial generando una nueva anomalía teórica, la cual también es comparada a la anomalía de campo. El proceso es repetido cuantas veces se estime necesario hasta obtener el mejor ajuste entre ambas anomalías.

La consideración principal en el método de optimización de parámetros, es que el procedimiento de optimización puede llevarse mucho tiempo de consumo de computadora cuando los cambios requeridos a partir del modelo inicial son una cantidad considerable, de aquí que la experiencia del intérprete será fundamental en la elección del modelo inicial para la optimización del análisis.

Los procedimientos de iteración automática han tenido un gran impacto en las técnicas de interpretación cuantitativa durante los últimos años, los métodos son basados en la técnica de ensayo y error mediante una curva idealizada y la curva de campo obtenida, hasta estimar el grado de comparación y semejanza óptima para los fines perseguidos.

Las ecuaciones que relacionan las anomalías para los cuerpos generadores no son lineales respecto a sus parámetros.

Para el proceso de iteración automática, se han tomado como bases -- las mejores características de los métodos de Gauss-Newton, de -- pasos descendientes, y el método sugerido en 1963 por Marquardt.

### III.4.a. TRATADO DEL PROBLEMA.

Minimizando una suma de promedios no lineales.

Tomando una serie de datos geofísicos de campo, se debe utilizar -- un proceso lógico a partir de las medidas obtenidas para generar -- una anomalía magnética la cual deberá ser interpretada, ésto equi-- vale a obtener valores numéricos de los parámetros de la forma -- geométrica correspondiente, los cuales deberán aproximarse a una -- geología real específica. Es de vital importancia conocer las -- características geológicas del área donde la anomalía se localiza -- para proponer una buena estimación del modelo inicial, lo cual con-- duce al modelo final razonable en un lapso de tiempo más corto que -- el requerido si el modelo inicial no es el más apropiado.

Otra consideración para la mejor computación del procedimiento es -- acerca de los parámetros, los parámetros considerados han sido -- obtenidos previamente de métodos geológicos y geofísicos más sencil-- llos (Métodos Empíricos), algunos de estos parámetros varían libre-- mente durante el proceso de iteración de la computadora.

Se toma en primer lugar los "M" valores observados para la anoma-- lía obtenidos de un modelo inicial:

$$\{g_i\} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M.$$

computando la anomalía dada para este modelo inicial se obtiene:

$$g_i \{p_j\} \quad j = 1, 2, 3, \dots, N$$

$$g_i \{p_j\} = \{g_{i1}(p_j), g_{i2}(p_j), g_{i3}(p_j), \dots, g_{im}(p_j)\}, \quad \text{los cuales}$$



son datos calculados en función de los parámetros  $P_j$ , donde  $P_j$  - son parámetros "libres".

El criterio matemático que se sigue para hacer el ajuste de parámetros consiste en minimizar una suma de cuadrados no lineales -- de la forma:

$$S = \sum_{i=1}^M \{g_i \{P_j\} - G_i\}^2$$

donde  $g_i \{P_j\} - G_i$  es el residual (Valores de la anomalía teórica - Valores de la anomalía de campo).

El problema específico consiste en minimizar la función "S" de una manera objetiva en cada iteración, dada la medida de discrepancia entre los valores de la anomalía de campo ( $G_i$ ) y los -- valores teóricos  $g_i \{P_j\}$  por optimización del vector  $\{P_j\}$ , al considerar  $n$  parámetros de ajuste  $P_1, P_2 \dots P_n$  y un número  $M$  de -- parámetros fijos. Figura No. III.4.2.

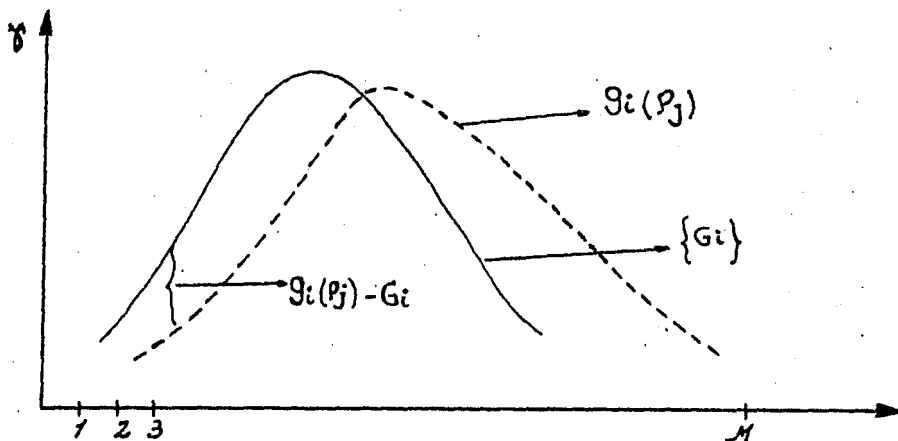


FIG. III.4.2. MINIMIZACION DE UNA FUNCION "S" CORRESPONDIENTE A UNA SUMA DE PROMEDIOS NO LINEALES.

EL PROBLEMA: 
$$S = \sum_{i=1}^M \{g_i \{P_j\} - G_i\}^2$$

MINIMIZAR "S", DONDE  $g_i \{P_j\} - G_i$  es el residual.

$G_i$  = Valores de la anomalía de campo.

$g_i \{P_j\}$  = Valores de la anomalía teórica.

### III.4.b. ESPACIO PARAMETRICO.

El concepto de espacio paramétrico debe ser entendido antes de discutir sobre la solución del problema. Debe pensarse sobre el problema original de minimizar una suma de residuales al cuadrado con respecto a los parámetros independientes, para esperar que acontezca en -- nuestra búsqueda la solución óptima.

La cantidad "S" que es una función de los parámetros puede ser definida como una superficie. Por similitud, si se tienen dos parámetros, esta superficie será similar a un valle topográfico con un mínimo -- y un máximo absoluto y un mínimo y máximo local a lo largo de la -- superficie (Figura No. III.4.3.)

Se genera una superficie con valles y cimas donde los dos parámetros  $P_1$  y  $P_2$  juegan el papel de coordenadas geográficas.

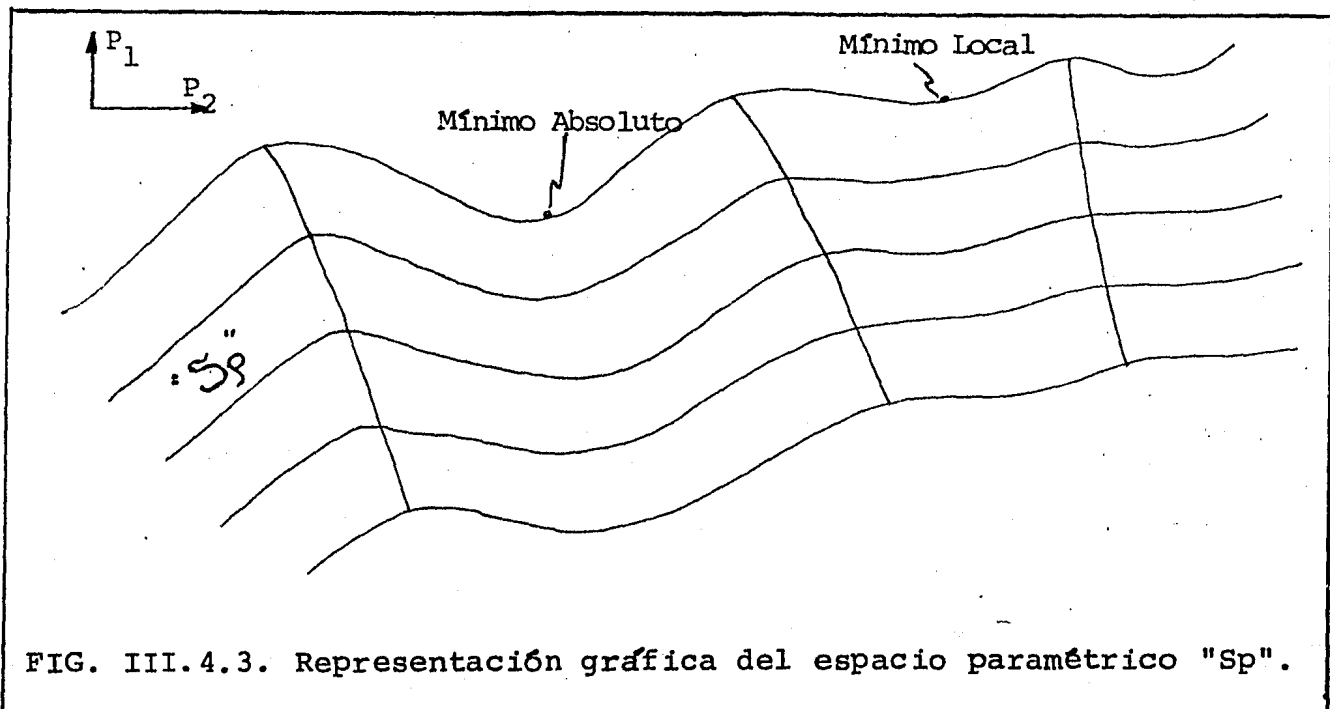


FIG. III.4.3. Representación gráfica del espacio paramétrico "Sp".

El proceso de optimización consiste en observar para los "valles" - las partes profundas en la superficie del espacio paramétrico.

La convergencia es obtenida cuando la búsqueda encuentra el mínimo - absoluto, pero existe el peligro de llegar a un mínimo local y en - éste caso el proceso no converge a una respuesta correcta; sin - - - embargo la posición del punto de búsqueda inicial, generalmente - - determina el mínimo al cual la búsqueda debe converger. Muchas posi- bles soluciones pueden existir en el espacio paramétrico representa- dos por puntos mínimos "buenos" iguales en el valle, sin embargo - - alguno de estos puntos equivale a modelos que pueden ser rechazados - por ser geológicamente irreales y otros más pueden rechazarse al - - tomar como bases la comparación de cuerpos anómalos conocidos.

Si se tienen más de dos parámetros el espacio paramétrico puede no - ser representado visualmente, sin embargo el procedimiento de búsque - da es similar al que se tiene para dos parámetros. Un mínimo absolu- to es buscado existiendo también el peligro de llegar a un punto - - mínimo local.

#### III.4.c. METODO DE PASOS DESCENDIENTES.

El propósito original dado por Cauchy en 1848 para la solución de -- sistemas de ecuaciones no lineales, fue hacer uso del gradiente de - la función bajo cierta consideración, ésta es la llamada el método - de pasos descendientes y simplemente indica: "Encuentra el gradiente y dirígete hacia abajo a través de éste".

Debemos tomar un modelo inicial  $g_i$   $\{PJ\}$  y su anomalía correspondien- te, computando los residuales se obtiene la suma de cuadrados  $S$ , - - este valor  $S$  es representado como un punto en el espacio paramétrico  $S_p$  pudiendo estar alejado del mínimo absoluto.

Para ir hacia la solución deben tomarse pasos en la pendiente de -- manera lógica hasta llegar a la parte mínima del valle. Conociendo la primer derivada de una función dado el gradiente, y teniendo -- para encontrar este gradiente que cada vez se necesita en el proceso un nuevo paso. .

La máxima derivada de una función de dos o más variables se encuentra a lo largo del gradiente; observando nuevamente para nuestro -- ejemplo particular, tenemos que las componentes del gradiente son las derivadas de la función "S" con respecto a cada parámetro  $P_j$  -- que inicia con la relación:  $S(p) \text{ nueva} < S(p) \text{ anterior}$  para -- cada iteración; suponiendo  $t =$  paso de longitud a lo largo del -- gradiente:  $s(p-tr) < s(p)$  donde  $R(p)$  es el gradiente; esta expresión es verdadera excepto para un mínimo local o un punto silla, -- o si la longitud del paso que cambia es larga también. El método -- de pasos descendientes reemplaza  $P$  por  $P=tr$  cada vez y repite el -- proceso para cada nuevo punto en el espacio paramétrico hasta que la nueva  $tr$  satisfaga la relación.

La componente  $J^{tr}$  del gradiente es: 
$$\frac{\partial S}{\partial P_j} = \frac{\partial}{\partial P_j} \sum_{i=1}^M (g_i\{P_j\} - G_i)^2 =$$

$$= \frac{\partial S}{\partial P_j} = 2 \sum_{i=1}^M (g_i\{P_j\} - G_i) \frac{\partial g_i}{\partial P_j} = 2 \sum (\text{RESIDUAL } i) \frac{dg_i}{dP_j}$$

La cantidad  $J_{ij} = dg_i/dp_j$  es el elemento  $(i, j)$  de la matriz jacobiana, y es la derivada parcial de la  $i^{\text{th}}$  del punto calculado con respecto al parámetro  $J^{\text{th}}$ .

Si se agrupan los residuales  $(g_i\{P_j\} - G_i)$  en un vector columna  $F$  y conociendo la matriz jacobiana  $J$  que contiene las derivadas de -- cada dato con respecto a cada parámetro, la columna matriz  $R$  que -- representa el gradiente es dada por:

$$R = J^t F.$$

Habiendo calculado R del método de pasos descendientes substraído del vector paramétrico P.

El vector tr, donde t como se ha visto es la longitud del paso --- que controla en alto grado los pasos dados a lo largo del gradiente. En una forma componente se puede escribir el cambio qj para el parámetro  $J^{tr}$  como:  $q_j = -tR_j = -2t \sum_{i=1}^m J_{ij} F_i = -2t (J^T F)_j$   
y  $P_j \text{ nueva} = P_j \text{ anterior} + q_j$

El proceso es repetido calculando la nueva anomalía para los nuevos parámetros, los nuevos residuales, la nueva matriz jacobiana y la nueva suma de cuadrados S. Otro cambio Q para el vector P es aplicado y la nueva suma es comparada con la anterior y así sucesivamente. La iteración es otra vez repetida hasta que la relación  $s(p-tr) < s(p)$  sea satisfecha.

El método de pasos descendientes generalmente converge a una solución, en la práctica sin embargo un gran número de iteraciones son requeridas y por esta razón la convergencia es más tardada.

La causa de esta lentitud es la tendencia del método a tomar --- pasos en pares, los cuales son virtualmente opuestos y son esencialmente perpendiculares a la dirección en que el mínimo se ha -- establecido. En un ejemplo en dos parámetros se puede imaginar un valle estrecho con el mínimo en alguna parte de su longitud (Figura No. III.4.4.)

Suponiendo que el punto de comienzo  $S_1$  en  $S_p$  se encuentra en algún sitio sobre el lado del valle pero no cercano al mínimo. El gradiente debe ser tal, que la dirección de los pasos descendientes -- se dirija hacia el piso del valle, sin embargo los pasos dados -- pueden fácilmente cruzar el valle.

La situación es similar para un modelo original, ya que al tomar -- un punto inicial, el paso de regreso casi siempre atravieza el -- valle con movimientos cortos dirigidos al punto de la solución, --

por lo tanto ésta tendencia de cruzar el valle en lugar de llevar -  
de una manera directa al punto mencionado anteriormente para hacer -  
mínimo el proceso, hace que éste sea lento cada que se busca la - -  
convergencia tomando por lo tanto un tiempo considerable.

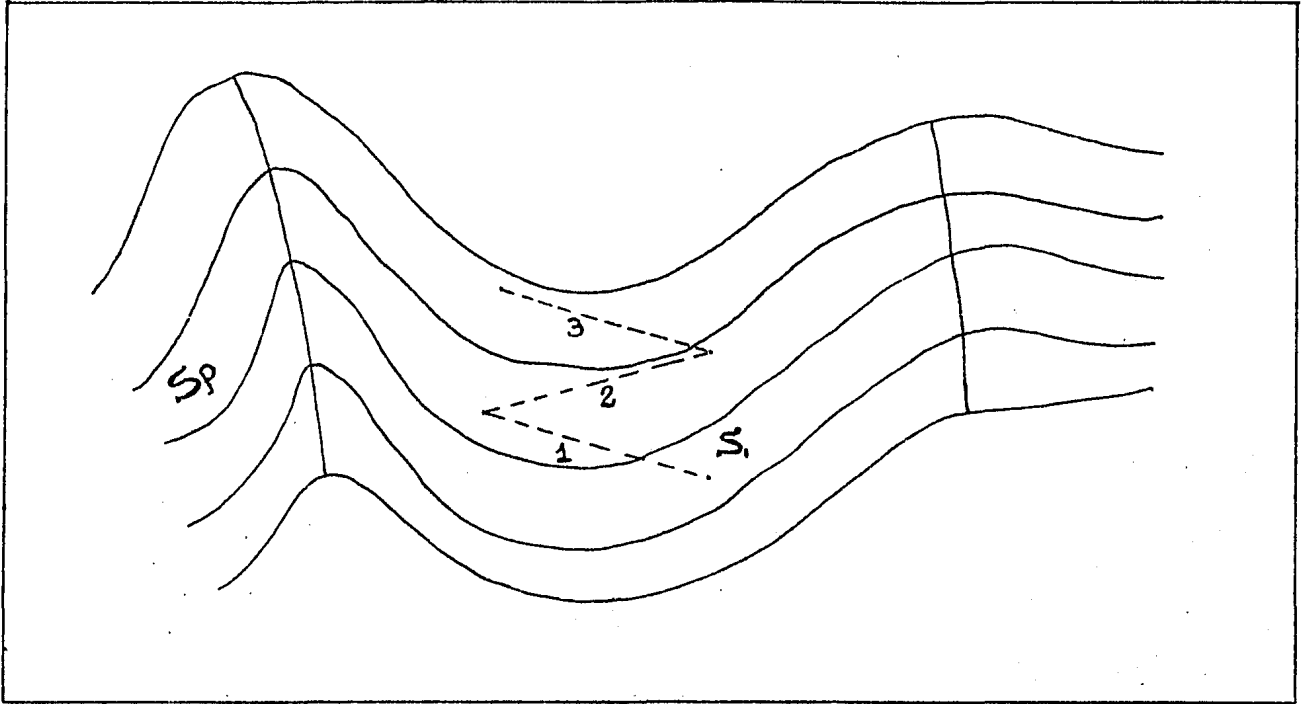


FIG. III.4.4. Método de pasos descendientes en el espacio paramétrico.

#### III.4.d. METODO DE GAUSS NEWTON.

Cerca del mínimo de la función "S", el gradiente se acerca a cero -  
y las cantidades  $g_i \{P_j\}$  son cercanas a los valores observados - -  
 $G_i$ , entonces se tiene que la suma debida al último paso de los - -  
parámetros es:

$$S (P_{j+q}) \ll S (P_j)$$

Por lo tanto se pueden expresar las pequeñas diferencias como  $F_i = G_i \{P_j\} - G_i$ , en series de potencias de la expansión de Taylor en las diferencias de los parámetros  $q_j$ .

$$F_i = \{g_i \{P_j\} - G_i\} = - \sum_{j=1}^n \frac{\partial g_i \{P_j\}}{\partial p_j} q_j + \text{términos de orden } q^2$$

En forma matricial se tiene  $F = JQ + E$ , donde  $E$  representa términos de alto orden y tiende a ser una cantidad pequeña.

Se tiene entonces un sistema de ecuaciones para  $Q$ ; el modelo de solución de mínimos cuadrados usando operaciones de matrices -- para un sistema de ecuaciones similar a ésta será:

$$\text{si: } Y = XA + E \quad : \quad A = (x^t x)^{-1} x^t y$$

la solución para  $F = -JQ + E$  es

$$Q = -(J^t J)^{-1} J^t F$$

El método de Gauss-Newton consiste en el cálculo de  $Q$  teniendo  $J$  y  $F$  para la primera aproximación  $P$ ; cuando se obtiene el vector paramétrico  $P$  se reemplaza este por  $P + Q$  para calcular las -- nuevas  $F, J$  y  $S$ ; el proceso es repetido las veces que sea necesario hasta que la iteración sucesiva es terminada cuando el criterio de convergencia particular sea obtenido.

Para el procedimiento de salida de  $P$  se introduce nuevamente el parámetro  $t$  (parámetro de longitud de paso), a la misma escala -- que el parámetro de salida del vector  $Q, t$  debe ser cambiada cada recorrido hasta que la relación  $s(P - tQ) < s(P)$  se satisfaga, -- entonces en lugar de reemplazar  $p$  por  $p + Q$  se usa  $P + tQ$ , ésta -- modificación del algoritmo de Gauss-Newton siempre conduce hacia un mínimo trabajando de una manera más eficiente, en muchos -- casos debe preverse que  $J$  sea de rango máximo ( $J^t J$  es definitivamente positivo y por consiguiente no singular).

El resto del problema consiste en que la matriz  $J^t J^{-1}$  puede ser -- casi singular y por lo tanto computacionalmente singular; ésto -- hace que el método diverja en algunos casos.

#### III.4.e. METODO DE MARQUARDT.

El problema para la escala del vector  $Q$  y la singularidad del producto matricial  $J^t J$  son resueltos simultáneamente por Marquardt -- aprovechando el reemplazamiento de la ecuación de Gauss Newton por la ecuación de Marquardt.

$$Q = - (J^t J + \lambda I)^{-1} J^t F$$

donde:

$\lambda$  = Parámetro de Marquardt ... (escalamiento) -

$I$  = Matriz diagonal identidad

Si tenemos que  $\lambda$  es relativamente grande a la norma de  $J^t J$



$$\lambda \gg \text{a la norma de } J^t J \rightarrow Q \approx \frac{1}{\lambda} J^t F,$$

tendiendo hacia la dirección de los pasos descendientes con pasos muy pequeños; cuando  $\lambda$  es muy pequeño comparado con esta norma -- entonces:

$$Q \approx - (J^t J)^{-1} J^t F \quad \text{y la solución de Gauss -- Newton es obtenida.}$$

Además la selección de un factor de escala para los parámetros es -- dada implícitamente introduciendo la matriz diagonal escalada  $D^2$ , -- cuyos pequeños elementos positivos de la diagonal multiplicados por  $\lambda$  son sumados a la diagonal de  $J^t J$ ; por lo tanto :

$$Q = - (J^t J + D^2)^{-1} J^t F$$



Esta última es la ecuación de Marquardt donde  $D^2$  es una matriz -- diagonal (de escala) cuyos mínimos elementos diagonales positivos multiplicados por  $\lambda$  (Parámetro de Marquardt), son adheridos a la diagonal de  $J^t J$ ; donde  $D^2$  se escoge de tal forma que:

1) Convierta a la inversa de  $J^t J + \lambda D^2$  en no singular.

2) Escale el problema de tal forma que los ajustes del -- largo de paso tomen cuidado de que los elementos diagonales de  $D^2$  se tomen como:

$$D_{ii}^2 = (J^t J)_{ii} + \phi$$

la primer selección sugerida es:

$$D_{ii}^2 = (J^t J)_{ii} \quad (\text{Marquardt 1963})$$

Sin embargo el procedimiento se hace falible cuando uno de los -- elementos diagonales de  $J^t J$  es computacionalmente cero, entonces usamos:

$$D_{ii}^2 = (J^t J)_{ii} + \phi$$

donde  $\phi$  es algún número elegido para asegurar que la escala no sea tan pequeña.

Se ha encontrado que los cálculos proceden satisfactoriamente aún para tratar los problemas más complicados cuando  $\phi = 1$  y cuando un valor inicial de  $\lambda = 10^{-4}$  es tomado, así la matriz  $J^t J + \lambda D^2$  se define siempre positiva (Nash 1978).

Implementando el algoritmo de Marquardt la suma de los elementos  $(J^t J)_{ii}$  con  $\lambda D^2$  pueden darse como sigue:

$$(J^t J)_{ii} \text{ se convierte en } (J^t J)_{ii} + \lambda \left( (J^t J)_{ii} + \phi \right)$$

de modo que:

$$(J^t J)_{ii} \text{ se convierte en } (\lambda + 1) (J^t J)_{ii} + \lambda \phi$$

La estrategia del método de Marquardt se basa en aplicar iterativamente la ecuación de Marquardt, tomando ventaja de su rápida convergencia respecto al método de Gauss Newton por la reducción de  $\lambda$ .

El procedimiento se da como sigue:

Se empieza por aplicar la ecuación modificada de Marquardt para evaluar  $Q$  habiendo calculado el vector  $F$ , la matriz  $J$  y la suma  $S$  con el primer vector paramétrico " $P$ ", entonces se cambia  $P$  por  $P+Q$  y se computa el nuevo vector  $F$  y la nueva suma  $S$  debida a  $P+Q$ ; si  $s(P+Q) < s(P)$  se reduce  $\lambda$  por un factor de 0.4 \* reemplazando  $P$  por  $P+Q$  para comenzar una nueva iteración.

Si  $s(P+Q) \geq s(P)$  se incrementa  $\lambda$  por un factor de 10\* para recalcular los elementos de la diagonal de  $J^t J$  cambiando la anterior  $\lambda$  por la nueva  $10 \lambda$  (incrementando  $\lambda$ , decrece el módulo de  $Q$ ), habiendo calculado  $Q$  otra vez se reemplaza  $P$  por  $P+Q$  para que proceda una nueva iteración.

Para  $\lambda$  muy grandes se tiene:

$$Q \approx - (\lambda D^2)^{-1} J^t F = \frac{1}{\lambda} (D^2)^{-1} J^t F$$

Como  $D^2$  es una matriz diagonal, su inversa es también una matriz diagonal. Se ha probado que si los elementos diagonales de  $D^2$  no son demasiado desiguales, el resultado para  $Q$  es aproximadamente el del método de pasos descendientes con pasos muy cortos.

Para valores pequeños de  $\lambda$  regresamos al método de Gauss-Newton.

Usualmente las iteraciones sucesivas son terminadas cuando una serie particular de pasos se selecciona dependiendo del criterio de convergencia.

\* Los factores 0.4 y 10 usados para incrementar y disminuir el parámetro de Marquardt, se han dado en base a trabajar eficientemente en el método de optimización- (Nash 1978).

METODOS	PRINCIPIOS	VENTAJAS	DESVENTAJAS	OBSERVACIONES
<b>EMPIRICOS</b> Tangente Peters Hannel Thalen...	Basados en la experiencia de interpretaciones. La pendiente del perfil se deriva de la profundidad del cuerpo magnetizado.	Rápida aplicación para obtener parámetros preliminares del cuerpo generador para interpretaciones más confiables.	Difíciles de aplicar en anomalías asimétricas. Los resultados obtenidos son poco confiables.	Son los métodos más tradicionales en la interpretación cuantitativa, su aplicación y resultados deben tomarse con cautela, ya que dependen del criterio y experiencia del intérprete.
<b>CALCULOS SIMPLES POR COMPUTADORA</b>  ( Werner )	Cálculo del gradiente horizontal o vertical a partir del perfil de campo total para el cálculo de profundidades.	Reduce los efectos de interferencia producidos por anomalías adyacentes, al considerar la anomalía entera en el análisis.	Su aplicación se da principalmente para datos aeromagnéticos, siendo de poco uso en la interpretación de datos terrestres.	La deconvolución Werner tiene gran aplicación para determinar la profundidad y configuración estructural del basamento.
<b>AJUSTES DE CURVAS POR COMPUTADORA</b>  ( Talwani )	Minimización de valores residuales de diferencias de mínimos cuadrados entre la anomalía teórica y la anomalía de campo.	Después de cada cálculo los resultados pueden observarse directamente para ajustarlos en la siguiente interacción.	La convergencia del método puede ser tardada debido al tiempo de ensayo y error y el tiempo de máquina usado.	Este método es de los más utilizados en la interpretación de datos, genera buenos resultados cuando el modelo inicial está basado en datos geológicos confiables.
<b>METODOS ITERATIVOS MEDIANTE COMPUTADOR GRAFICO</b>  ( Marquardt )	Mismos principios que para el tercer grupo, adaptando el método a una terminal gráfica iterativa.	El ajuste puede ser automático o manual. Los cálculos de cada interacción pueden ser observados para hacer los ajustes pertinentes.	No siempre el intérprete puede contar con una terminal gráfica para el proceso.	La elección de un modelo geológico inicial apropiado hará converger el método a su solución en menor tiempo.

**RESUMEN DE CARACTERISTICAS DE LOS METODOS DE INTERPRETACION CUANTITATIVA**

#### IV.- INTEGRACION GEOLOGICA GEOFISICA

#### IV. INTEGRACION GEOLOGICA GEOFISICA.

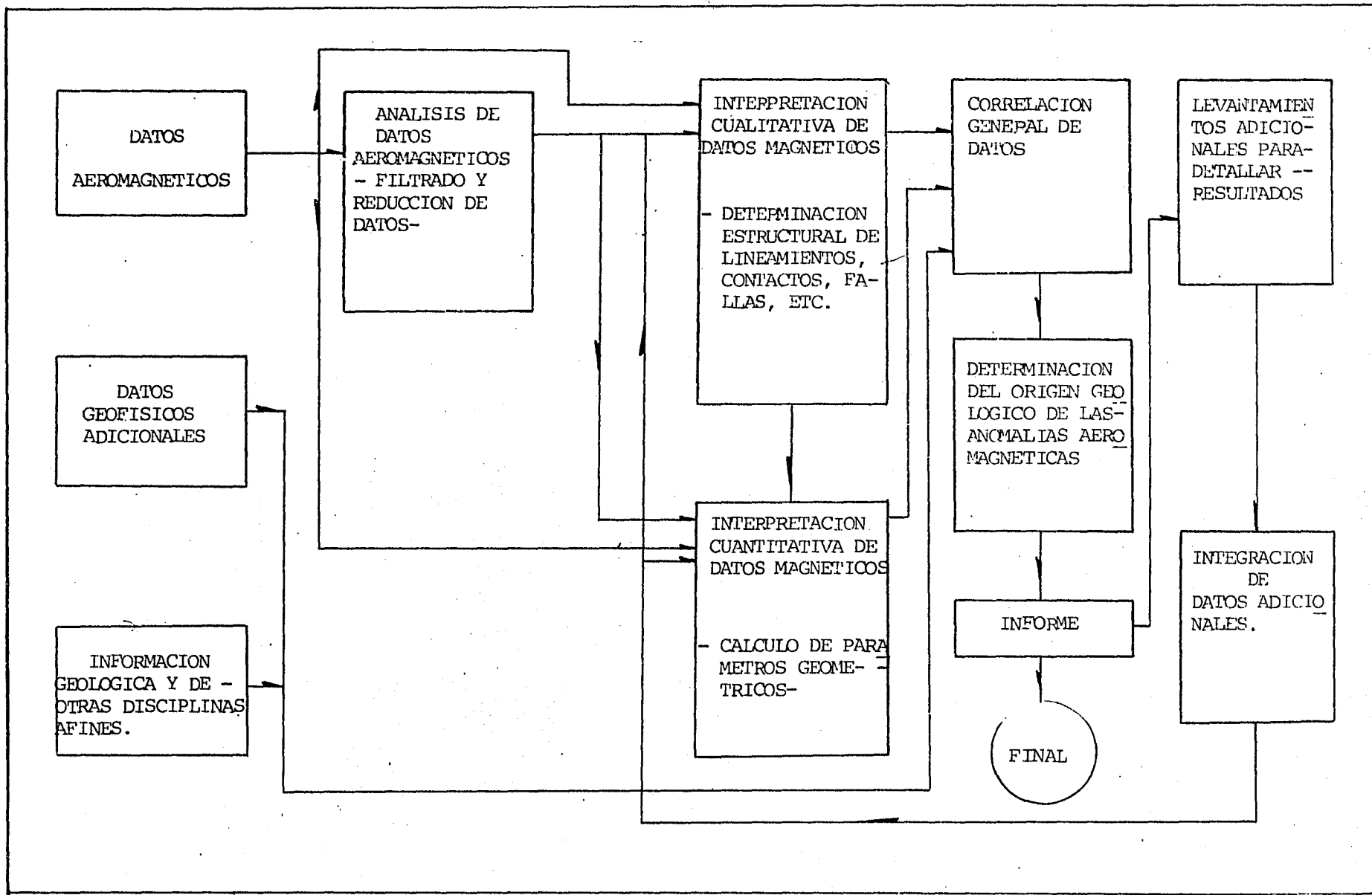
Una de las etapas más importantes en la exploración y en la toma de decisiones para trabajos posteriores, es a la que se refiere este capítulo.

La integración geológica-geofísica, es un proceso que se lleva a cabo desde el inicio del análisis de datos generales con que se cuenta para determinado estudio de exploración. Para tener mayor confianza en los resultados, se deben analizar los datos en una secuencia bien establecida, la cual se desglosa de una manera sencilla de acuerdo con el diagrama denominado: "Esquema general de integración e interpretación de datos geológicos-geofísicos", dado más adelante.

Se toma como base que para cualquier estudio exploratorio, los datos con que se cuenta en un principio no son suficientes para dar resultados satisfactorios, sin embargo muchas veces sin contar con una geología o una geofísica bien detallada, se pueden desechar áreas o anomalías que no ofrezcan un buen panorama para estudios adicionales más resolutivos. La discriminación dependerá mucho de la experiencia de intérprete y de la recopilación general de datos en que se ha apoyado su interpretación, tales como:

Planos de levantamientos geológicos, fotografías aéreas, imágenes de satélite, reportes de trabajos de minería, levantamientos espectrométricos y radiométricos, trabajos de geoquímica, etc., todo lo cual dará mayores bases en los resultados.

La recopilación de datos deberá ser lo más completa posible, tratando de investigar todo lo relacionado a la zona de interés en cuanto a trabajos anteriores; tal vez a este punto no se le ha dado la importancia debida, sin embargo la experiencia ha demostrado que por no asignarle la atención que merece, en ocasiones se realizan levantamientos geológicos-geofísicos que ya se han llevado a cabo por otras compañías o instituciones, con el concebido desperdicio de tiempo y dinero sin haber necesidad de ello. Lo anterior aunado -



ESQUEMA GENERAL DE INTEGRACION E INTERPRETACION DE DATOS GEOLOGICOS-GEOFISICOS

a que no hay una debida comunicación entre los encargados de realizar trabajos de prospección enfocados muchas veces al mismo fin.

En el proceso para la integración geológica-geofísica, los datos -- se van incrementando hasta contar con un grado de resolución que permita desechar la zona de prospección, o bien en el mejor de los casos proseguir con estudios adicionales subsecuentes hasta que se estimen suficientes, dependiendo de los objetivos perseguidos. Por ejemplo: definir sólo áreas favorables para estudios de exploración a más detalle, o bien para establecer puntos para perforación en sitios específicos, con el fin de constatar de una manera directa la veracidad -- de las interpretaciones y cuantificar el potencial económico-minero -- del área.

En este capítulo se proporcionarán también algunas técnicas y formas establecidas para hacer la integración de datos geológicos-geofísicos, así como su consecuente evaluación.

Para los fines del presente trabajo de tesis, la secuencia de integración de datos se enfoca a la prospección magnetométrica, sin embargo para otros tipos de prospección puede adaptarse llevando una secuencia similar a la que a continuación se describe, con sólo cambiar -- algunas actitudes y/o actividades para cada rama en particular.

Como se dijo anteriormente, el análisis se realizará con el auxilio -- del diagrama anterior, explicando las diversas actividades involucradas en el proceso.

#### IV.1. DATOS AEROMAGNETICOS.

Para prospección magnetométrica los datos aeromagnéticos pueden tomarse como el punto de partida del análisis aquí expuesto, estos datos -- pueden ser de dos tipos: aeromagnéticos de vuelo barométrico alto -- (2000-4000 mts.+) y aeromagnéticos de vuelo bajo o de contorno -- -- --

(100-300 mts =). Los vuelos magnetométricos altos serán de mayor -- utilidad cuando los objetivos son principalmente para mapeo regional -- de estructuras geológicas (prospección petrolera), ya que resaltan -- éstas debido a su respuesta de frecuencia y gradientes bajos, también son utilizados como apoyo en la selección de áreas favorables para -- exploración minera.

Los levantamientos aeromagnéticos de vuelo bajo de contorno se utilizan para fines mineros, ya que proporcionan mayor resolución al resal -- tar respuestas magnéticas de gradientes y frecuencias altas produci -- das por cuerpos o estructuras someras.

Cabe hacer notar que aún cuando en este último tipo de levantamientos se tiene un control magnético del área bastante aceptable, tal vez -- no sean debidamente definidas ciertas anomalías que pueden estar aso -- ciadas a mineralización, ésto dependerá la mayor de las veces del -- espaciamiento programado entre las líneas de vuelo, siendo obvio que -- entre más proximidad haya entre ellas y menor sea la altura del vuelo, la resolución que se tenga de los datos magnéticos será más aceptable. Deberán tomarse como factores determinantes para la planeación del -- vuelo; el tipo de mineralización y la dimensión de los cuerpos espera -- dos, de tal forma que la respuesta magnética de dichos cuerpos no sea omitida en el levantamiento.

#### IV:2. ANALISIS DE DATOS AEROMAGNETICOS.

Una vez que se tienen los planos aeromagnéticos, éstos deberán anali -- zarse observando varios parámetros importantes como los que a conti -- nuación se describen.

Para fines mineros se resaltarán respuestas de alta frecuencia que -- generen anomalías magnetométricas, es decir, divergencias del campo -- magnético debidas a contraste de susceptibilidad entre unidades adya -- centes de roca; dichas anomalías deberán analizarse tomando en consi -- deración su orientación dipolar, la cual, deberá ser con el bajo ----



magnético al norte y el alto magnético al sur, generando lo que -- denominase una anomalía normal. Una anomalía inversa tendrá una -- orientación dipolar contraria a la anteriormente mencionada, producto principalmente del magnetismo remanente en las rocas sin ~~interés~~ -- interés especial para fines mineros, aunque cuando estas anomalías -- muestren características importantes no deben descartarse sin un -- análisis más detallado.

Deberá analizarse también: amplitud, gradiente, dimensiones, etc., -- de cada anomalía, utilizando además cuando fuese necesario, técnicas de filtrado de datos como los mencionados en el capítulo No. I. del -- presente trabajo de tesis, (segundas derivadas, continuaciones hacia arriba, continuaciones hacia abajo, reducción al polo etc. etc.) lo -- cual eliminaría rasgos innecesarios en el análisis, resaltando los -- deseados.

#### IV.3. DATOS GEOFISICOS ADICIONALES.

El apoyo que pueda darse a la información disponible con el auxilio -- de otros datos geofísicos es importante, pues éstos en ocasiones --- dan características que pueden pasar inadvertidas.

En áreas áridas, un aporte significativo para delimitar zonas de -- interés para mineralización son los métodos geofísicos espectrométri -- cos, los cuales pueden llevarse a cabo simultáneos a los métodos -- aeromagnéticos de vuelo bajo, pudiendo existir asociaciones entre -- ellos que puedan dar mayor resolución al análisis. Se debe ser cauto al manejar éste tipo de información para no incurrir en errores. Los métodos antes citados han tomado en los últimos años una impor -- tancia relevante en la exploración geofísica, su comprensión y estu -- dio necesita de un análisis especial, por lo cual y debido a los --- objetivos perseguidos en el presente trabajo no se ahondará en ellos,

dando al final referencias bibliográficas para su consulta.

Levantamientos sismológicos, magnetométricos y gravimétricos en el área de interés o circundante a ella servirán de apoyo en el análisis de datos.

Los métodos eléctricos son de bastante utilidad para tener una idea de la estratificación y resistividad del subsuelo, si es que los hay en la zona de estudio deben correlacionarse con los datos recopilados para tener una interpretación más confiable, éstos al igual que los estudios gravimétricos están íntimamente relacionados al análisis de datos magnetométricos y en muchos casos son consecuencia de dicho análisis.

#### IV.4. INFORMACION GEOLOGICA Y DE OTRAS DISCIPLINAS AFINES.

Uno de los apoyos principales y muchas veces determinante en los estudios de exploración, es sin duda el que aportan los datos geológicos, éstos permitirán en un momento dado jerarquizar anomalías a partir de su análisis, de éste modo mapas de geología regional, geología de detalle, estudios estratigráficos, litológicos etc., darán mayor resolución a los trabajos para su consecuente evaluación.

Cuando sea posible, se recomienda un análisis fotogeológico y de imágenes de satélite del área de interés, para apoyo del mapeo geológico estructural. La disponibilidad de datos geoquímicos, topográficos, trabajos de minería relacionados al área etc., darán aportes para un análisis más completo en el estudio.

#### IV.5. INTERPRETACION CUALITATIVA DE DATOS MAGNETICOS.

Como se describió en capítulos anteriores, mediante los datos magnéticos se puede hacer una interpretación cualitativa del área consis-

tente en una interpretación geológica regional, mapeando de una forma un tanto general, litología, fallas, intrusiones, alineamientos, - - estructuras, etc., limitando posibles zonas relacionadas a condiciones favorables para mineralización desde un análisis preliminar de -- gabinete.

Cuando existan dudas, esta interpretación debe tomarse un tanto escéptica, pero auxilia al tener una idea de la geología del área de estudio.

De este paso global o cualitativo partiremos a un análisis más particular en trabajos posteriores.

#### IV.6. INTERPRETACION CUANTITATIVA DE DATOS MAGNETICOS.

La interpretación cuantitativa que pueda hacerse por medio de técnicas empíricas (cap. III), debe tomarse como una primera aproximación para determinar el cálculo de parámetros geométricos, profundidad, - - echado, inclinación de cuerpos asociados a las anomalías de interés. En base a este primer análisis se deberá recurrir a técnicas de interpretación cuantitativa que brinden mayor confianza en los resultados, (cálculos por computadora). Esto se apoyará en la integración de ---- datos adicionales, hasta que se estimen suficientes para hacer una -- reinterpretación lo más completa posible.

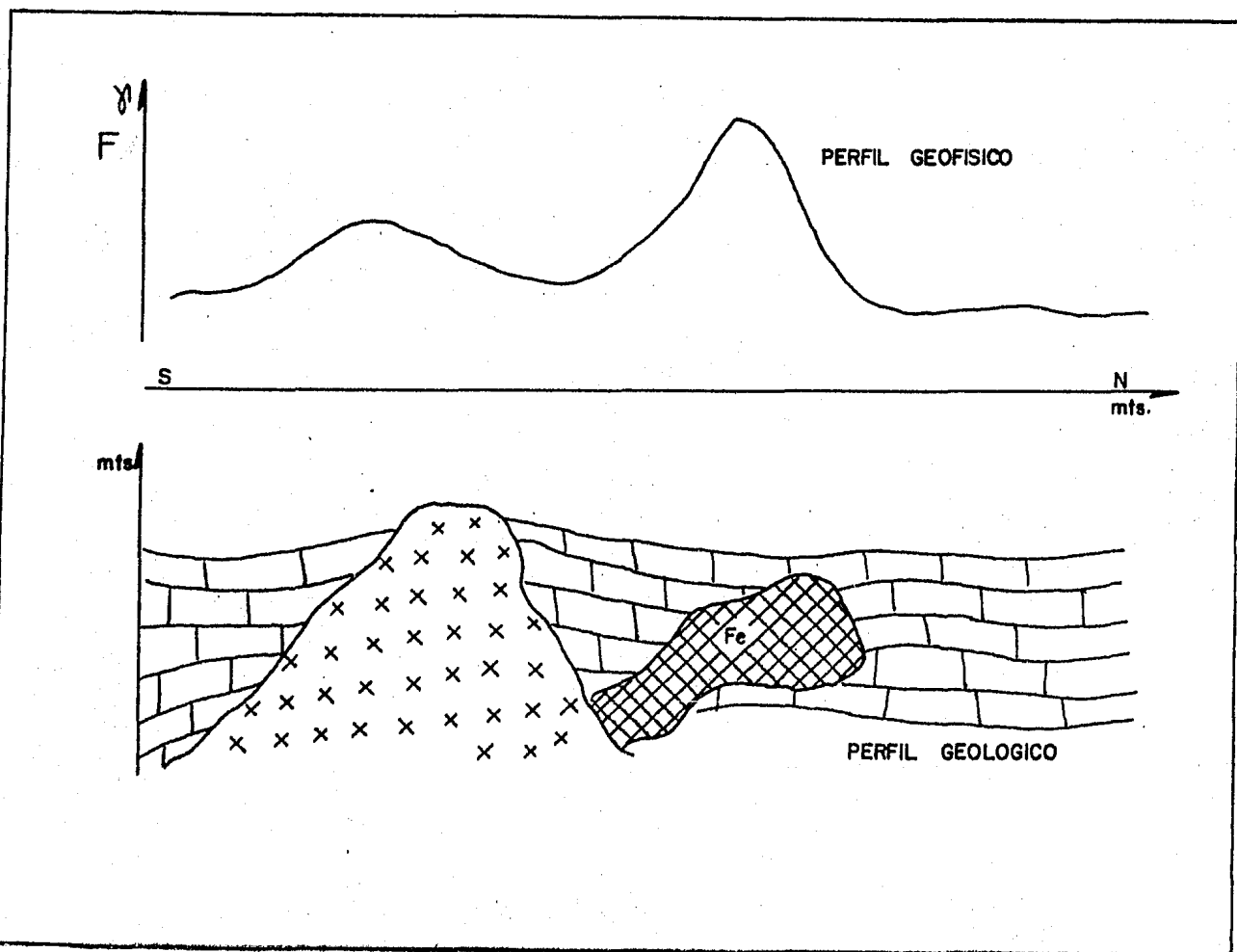
#### IV.7. CORRELACION GENERAL DE DATOS.

Esta se lleva a cabo comparando los datos que han sido recopilados -- y que se mencionan en los incisos anteriores, precisando lo mejor - - posible las relaciones existentes entre ellos. Así datos geológicos, - topográficos, fotos aéreas, datos geofísicos, etc., darán las bases - para llevar a cabo recomendaciones respecto al área de estudio, ya -- sea para dar por concluidas las actividades por resultados poco favorables, o bien para continuar con trabajos exploratorios más detallados si éstos se justifican y son requeridos.

Para el proceso antes mencionado se aplican diversas técnicas, las -  
cuales se mencionan a continuación.

Secciones y Planos Geológicos-Geofísicos.- Para las secciones y - -  
planos geológicos-geofísicos (como para los demás datos recopilados)  
deberá trabajarse preferentemente a la misma escala, ésto dará un --  
panorama más práctico y preciso de las relaciones que guardan entre-  
si las características de cada uno de ellos.

La construcción de secciones geológicas-geofísicas es un auxiliar --  
importante en el manejo de datos. Comúnmente la construcción de - -  
secciones geofísicas se lleva a cabo de una manera simultánea con la  
construcción de secciones geológicas, para relacionarlas de una - -  
manera directa y objetiva. Véase la figura siguiente:



Estas secciones se construyen a través de las anomalías de importancia y en dirección perpendicular a las líneas magnéticas que definen su gradiente, preferentemente se recomienda seguir una orientación --norte-sur debido a las características propias del campo geomagnético en la latitud a la que se trabaja en el país, obteniendo un mayor -- número de características y parámetros de apoyo. Esta metodología es bastante resolutive, ya que existen gran cantidad de métodos de -- -- interpretación basados en perfiles geofísicos con la orientación -- -- antes mencionada. Cuando sea requerido, se construirá un mayor número de líneas paralelas y perpendiculares al eje dipolar de la anomalía -- para definir más correctamente las causas geológicas que la origina-- ron.

Planos Geológicos. - Una primera aproximación de datos geológicos y -- geofísicos se lleva a cabo mediante planos de geología regional existente y planos aeromagnéticos.

Paralelamente a la depuración de los datos geológicos-geofísicos se -- va haciendo su comparación; uno de los métodos es "vaciar" en los -- planos geofísicos la geología para visualizar de una manera directa -- y conjunta ambos tipos de información, algunas veces éste método es -- contraproducente por la cantidad de datos existentes en un solo pla-- no, por lo cual se procede a utilizar cuantos planos sean necesarios -- para diferenciarlos y compararlos, ya sea a trasluz o bien viéndolos -- alternadamente en forma separada.

En el caso de existir condiciones favorables para mineralización, -- deben compararse éstas con patrones de yacimientos conocidos. La re-- lación y concordancia de procesos puede dar la pauta para establecer -- mayores bases de seguridad en el análisis. Lo anterior equivale a -- relacionar por ejemplo para exploración por hierro, los procesos que -- ocurrieron para la formación del mineral en yacimientos antes estu-- diados, ( "La Perla", Chih., "Cerro del Mercado", Dgo., "Hércules" -- Coah. etc.) con áreas de características geológicas semejantes.

#### IV.8. ORIGEN GEOLOGICO DE LAS ANOMALIAS MAGNETOMETRICAS

El conocimiento del origen geológico que causa la anomalía magneto-métrica conduce a hacer un análisis preliminar (el cual algunas - - veces es definitivo de las anomalías) con la finalidad de ir discriminándolas al no reunir condiciones geológicas favorables. Por - - ejemplo, para exploración minera las anomalías seleccionadas en - - principio pueden ser desechadas al verificar que se asocian a zonas de basalto, o bien al ser producidas por contactos litológicos sin indicar una mineralización importante. Por otro lado si el origen - geológico de la anomalía es favorable a los objetivos perseguidos, - se justificará si es necesario, un estudio más detallado de la - - zona de anomalía.

De este paso se procederá a hacer un reporte, que puede ser parcial o final dependiendo de los resultados y de los objetivos del trabajo.

#### IV.9. LEVANTAMIENTOS ADICIONALES.

La planificación de levantamientos adicionales se dará en base a lo anteriormente establecido. Este proceso puede darse desde el primer análisis de gabinete, después de la verificación de anomalías o de levantamientos a detalle; se lleva a cabo en un proceso retroactivo, en el cual a medida que sea necesario y justificable se planificarán estudios cada vez más detallados hasta satisfacer las necesidades que se tengan.

#### IV.10. INTEGRACION DE DATOS ADICIONALES.

Una vez obtenidos los resultados de los levantamientos adicionales, éstos se integran a los datos anteriores para conjuntar cada vez - un mayor número de información que sirva para un análisis más confiable. Estos datos vuelven a seguir el proceso retroactivo descri

to anteriormente, el cual será alimentado cuantas veces sea necesario.

En conclusión, la integración de datos geológicos-geofísicos es un -- proceso retroactivo que debe ser desarrollado con las mejores bases - posibles, manejando los datos de una manera apropiada y teniendo como respaldo un personal de experiencia y conocimientos que hagan del --- análisis y la interpretación de datos, un juicio lo más confiable - - posible.

V.- E J E M P L O



## V. EJEMPLO.

### V.1. ANTECEDENTES Y TRABAJOS PREVIOS.

El ejemplo a tratar en este capítulo está basado en una serie de -- datos recopilados de una zona localizada al Noroeste de la Ciudad - de Durango, la cual se ha estudiado desde hace varios años por --+-- diversos autores, por lo que la cantidad de datos geológicos-geofísicos con que se cuenta para la interpretación es bastante aceptable.

Debido a considerar cierta información como confidencial, no se dan coordenadas de localización de la zona mencionada.

Entre los estudios geológicos realizados, encontramos trabajos - - regionales y de detalle de geología estructural, geológico-mineros, estratigráficos, tectónicos, geoquímicos, metalogénicos, etc.

Los estudios geofísicos comprenden levantamientos aeromagnéticos -- de vuelo alto, aeromagnéticos de vuelo bajo, verificación de anomalías aeromagnéticas y estudios magnetométricos terrestres de detalle.

De acuerdo a los estudios geológicos se han descrito en general dos tipos de mineralización. La primera por reemplazamiento en calizas adyacentes a los pórfidos riolíticos y la segunda por menor reemplazamiento de calizas con leyes más altas de Ag, Pb, Zn. Se considera también un afloramiento de mineral de hierro (magnetita y hematita) de 200 m. de longitud por 20 m., de ancho, presentándose algunos -- crestones que alcanzan hasta 10 m. de altura.

En la parte central del afloramiento hay un tiro de 17 m., de profundidad con mineral que contiene de 30.9 a 65.4% de hierro total, - - 0.08% de fósforo, el manganeso y cobre se presentan ambos con un - - 0.15% .

## V.2. G E O L O G I A

Como se mencionó anteriormente, la geología que se ha realizado en la zona anómala comprende diversos y variados estudios.

Para los fines del presente ejemplo se han tomado los datos más -- apropiados para el apoyo y correlación con los resultados geofísicos, ya que hacer un análisis detallado de la Geología del área -- conduciría a un trabajo específico independiente.

### V.2.a. GEOLOGIA REGIONAL.

La anomalía seleccionada se localiza en la provincia metalogenética de la Sierra Madre Occidental, la cual fue dividida por Carrasco (1980) en:

- 1.- Subprovincia de Barrancas.
- 2.- Subprovincia de la Altiplanicie.
- 3.- Subprovincia de Alta Llanura.

En esta última subprovincia se localiza la anomalía del ejemplo, - la cual forma un desnivel que marca la transición con la provincia de la Mesa Central. Según Carrasco (1980) en esta subprovincia - - afloran principalmente rocas de la Serie Volcánica Superior de - - composición ácida: riolitas, tobas e ignimbritas, cubriendo en - - discordancia a rocas sedimentarias del Cretácico. También menciona que existen varios cuerpos intrusivos, siendo los más antiguos de edad Jurásico Superior con  $154.3 \pm 3.2$  m.a. y  $148.9 \pm 3.3$  m.a. dados para una cuarzodiorita y una diorita por el método de K-Ar.

Al norte a 1.5 km de la zona anómala hay pórfidos cuarzolátíticos - y pórfidos riódacíticos, existen además numerosos cuerpos de monzonita intrusionando y produciendo metamorfismo de contacto (Hornfels). El intrusivo asociado a la anomalía es el de mayores dimensiones -- con composición de pórfido riolítico, existen al sur de éste diques aplíticos que indican las últimas intrusiones; todos estos cuerpos se consideran responsables de la mineralización con edad posible del Oligoceno tardío. Los tipos de roca antes mencionados se han clasificado en base a estudios petrográficos.

Se menciona que existe un fracturamiento preferentemente N-S en el área y se supone que éste facilitó la salida del magma a la superficie. Rodeando al intrusivo, se encuentran diferentes cuerpos monzoníticos que intrusionan tanto a las rocas sedimentarias, como al intrusivo riolítico.

El vulcanismo y los fenómenos estructurales de la Sierra Madre - - Occidental, se consideran relacionados al movimiento relativo de -- placas.

Varios autores suponen que el fracturamiento cortical post-mesozoico, por el cual ascendieron los materiales de la secuencia volcánica cenozoica de la Sierra Madre Occidental, fue causado por la fundición de la corteza oceánica de la placa Farallón subducida debajo de la placa Americana, así como el cabalgamiento de ésta última - - sobre la placa Farallón.

Existen dos sistemas de fallas preferenciales. El más desarrollado tiene una orientación al NNW y el segundo hacia el ENE; se observan dos grandes Grabens, un Horst en la porción central del área y una gran falla ENE. Alineados con esta falla se observan una serie de - intrusivos de forma circular que tal vez fueron emplazados en esta zona de debilidad. Dicha zona se originó posiblemente por una estructura semicircular que podría tratarse de una caldera.

Yacimientos Minerales.- Se consideran exclusivamente los yacimientos de hierro clasificándolos a nivel regional en los siguientes tipos:

- a) Hierro asociado al fracturamiento regional tipo cuencas y-- sierras.
- b) Hierro asociado a diques (doleríticos) de diabasa.
- c) Sombreros (Gossans) de hierro, siendo los más importantes - asociados al fracturamiento regional, de los cuales existen numerosos afloramientos apreciándose pequeños diques de - - Oxido de hierro (generalmente hematita), asociados con cuarzo lechoso y jaspe. Las rocas encajonadas pertenecen a la - secuencia volcánica superior de la Sierra Madre.

#### V.2.b. GEOLOGIA LOCAL.

El sistema de cuencas y sierras (Basin and Range) está ampliamente - desarrollado en el área, encontrándose una serie de fallas importantes, el fallamiento inverso es poco frecuente con una traza de falla casi siempre E-W y con inclinación hacia el sur de 25° a 30° .

Los depósitos minerales en el distrito minero son numerosos. Se considera que en su totalidad los yacimientos minerales del área son de tipo hidrotermal, existiendo dos períodos de mineralización.

El primero caracterizado por contener una gran cantidad de pirita y una marcada deficiencia de plomo y zinc. El segundo período se caracteriza por leyes altas de plomo, plata y zinc y por un reducido reemplazamiento en las calizas, a este período corresponden la mayoría - de las vetas.

Dentro del sistema se pueden reconocer dos sistemas de vetas, uno -- con orientación NW-SE y echados variables entre 65° al NE hasta 65°-

al SW y otro con orientación EW con echados variables entre 65° - -  
al N y 70° al S.

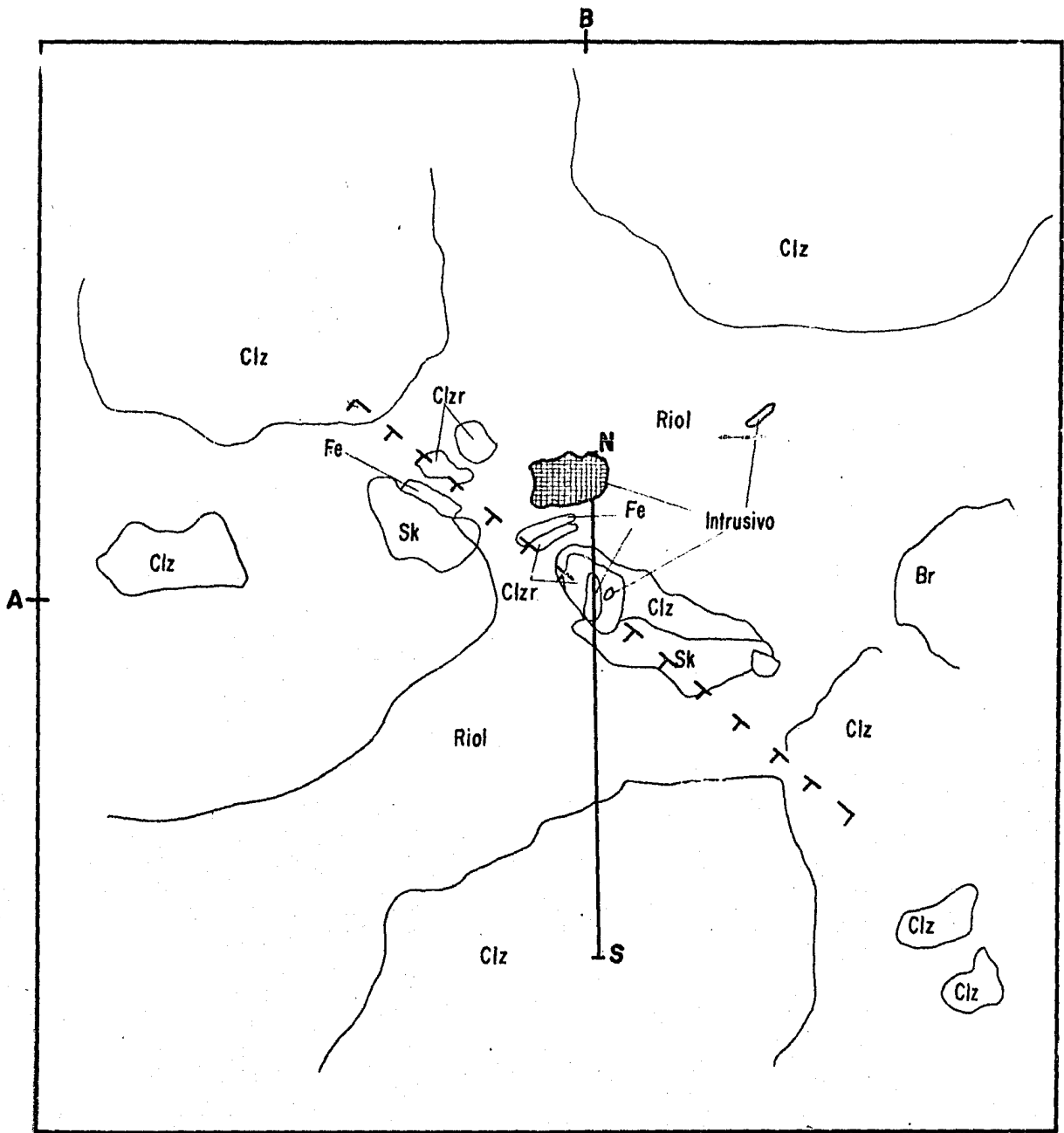
En su mayoría las vetas son angostas con potenciales menores de --  
2 m., encajonados principalmente por calizas y conglomerados.

En general se considera que los depósitos mesotermales son los más -  
abundantes, situando a los de reemplazamiento y relleno dentro de --  
este grupo. Las alteraciones que sirven como guía para la explora- -  
ción de éstos son: silicificación, cloritización y argilización prin-  
cipalmente.

Otros autores consideran que la mayoría de los yacimientos son de --  
origen metasomático, causado por soluciones ascendentes mineralizan-  
tes.

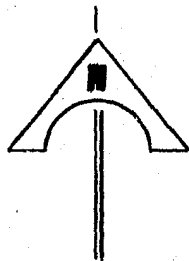
La geología de detalle del área que cubre la anomalía magnetométrica  
se muestra en el plano No. V.I., así como también la línea del per--  
fil geológico, asociado posteriormente a los perfiles de magnetome--  
tría correspondientes.

El Plano geológico de detalle muestra una litología formada princi--  
palmente por calizas, intrusivos riolíticos y rocas metamórficas - -  
(skarn, caliza recristalizada), estas últimas rocas y un afloramien-  
to de hierro compuesto por hematita y magnetita, son asociados direc-  
tamente a la anomalía aeromagnética de vuelo bajo.



**SIMBOLOGIA**

- CONTACTO GEOLOGICO
- FALLA INFERIDA
- CALIZA
- CALIZA RECRISTALIZADA
- SKARN
- CONGLOMERADO
- RIOLITAS
- BRECHA
- MINERAL DE FIERRO
- INTRUSIVO DE REFERENCIA
- SECCION GEOLOGICA



<b>FACULTAD DE INGENIERIA</b> <b>TESIS PROFESIONAL</b>		
<b>PLANO GEOLOGICO</b> <b>DE DETALLE</b>		
FIGUEROA CORREA GERARDO		
No. DE CUENTA : 7238945 - 0		
<b>G E O F I S I C A</b>	PLANO V. 1	ESC. 1: 50 000
		1985

### V.3. G E O F I S I C A .

Como ya se dijo, la Geofísica que se desarrolló en el área está -- representada por levantamientos magnetométricos de diversos tipos, los cuales se dividen en:

Magnetometría aérea de vuelo alto  
Magnetometría aérea de vuelo bajo  
Verificación de anomalías aeromagnéticas.  
Magnetometría terrestre de detalle.

Cada una de las etapas se llevó a cabo una vez que la actividad --- anterior lo justificó y a medida que los estudios necesitaban retro alimentarse de información más específica y que brindará mayor reso lución.

#### V.3.a. MAGNETOMETRIA AEREA.

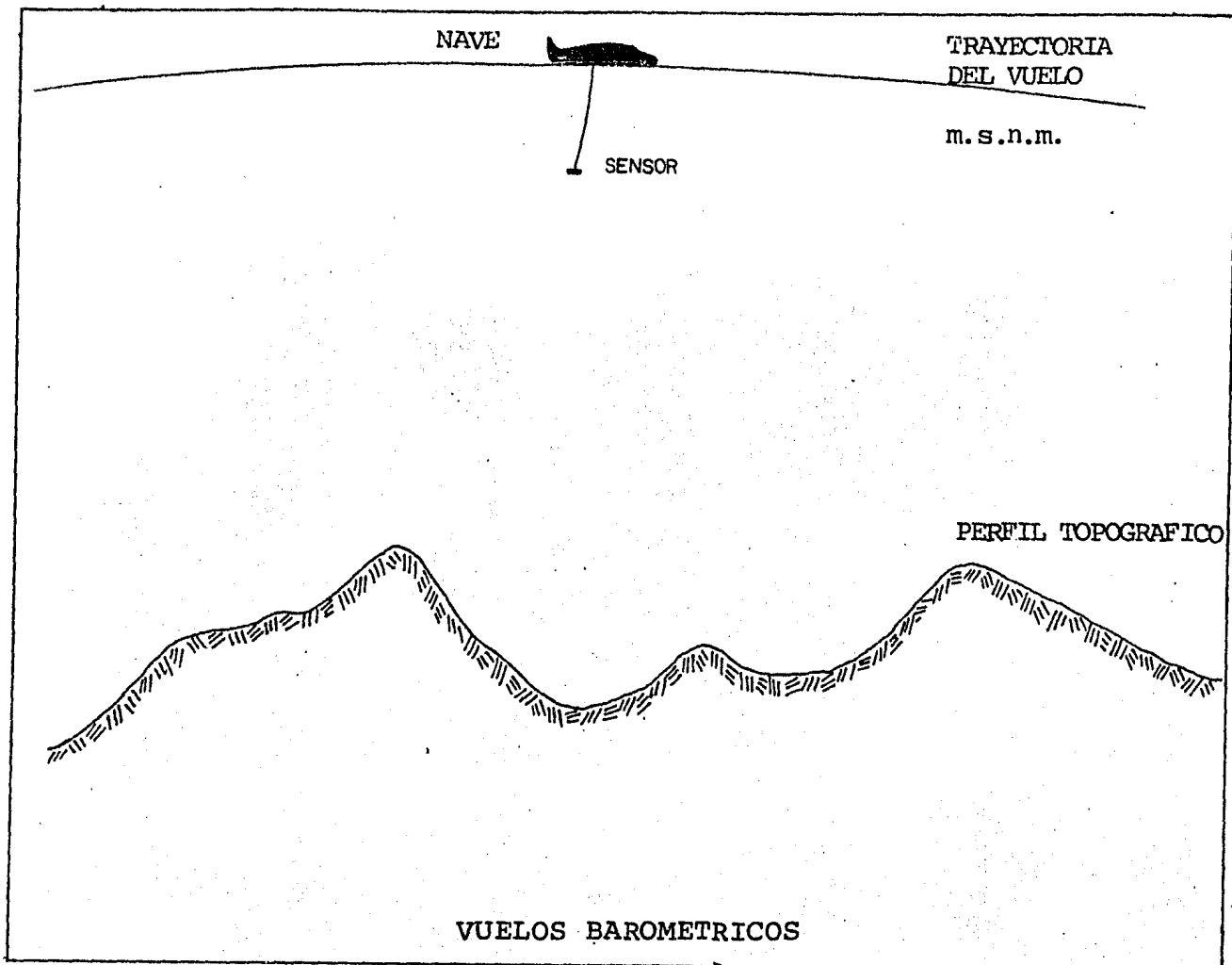
Esta se subdivide en levantamiento barométrico de vuelo alto y levanta mientos de contorno de vuelo bajo. Los primeros llevados a cabo -- para estudios más regionales y los segundos para estudios más loca-- les, generados de los resultados del primer levantamiento y de su -- asociación geológica favorable.

##### V.3.a.1. Vuelos Barométricos.

Los levantamientos aeromagnéticos de vuelo alto barométricos fueron llevados a cabo a 3000-4000 m.s.n.m., (figura siguiente) con líneas-- 1 km orientadas norte-sur aproximadamente, enfocadas en primer ins-- tancia a la detección del basamento cristalino en un enfoque petrole ro.

---

NOTA: En estos levantamientos el perfil topográfico es despreciable debido a la altura a la que opera la nave.



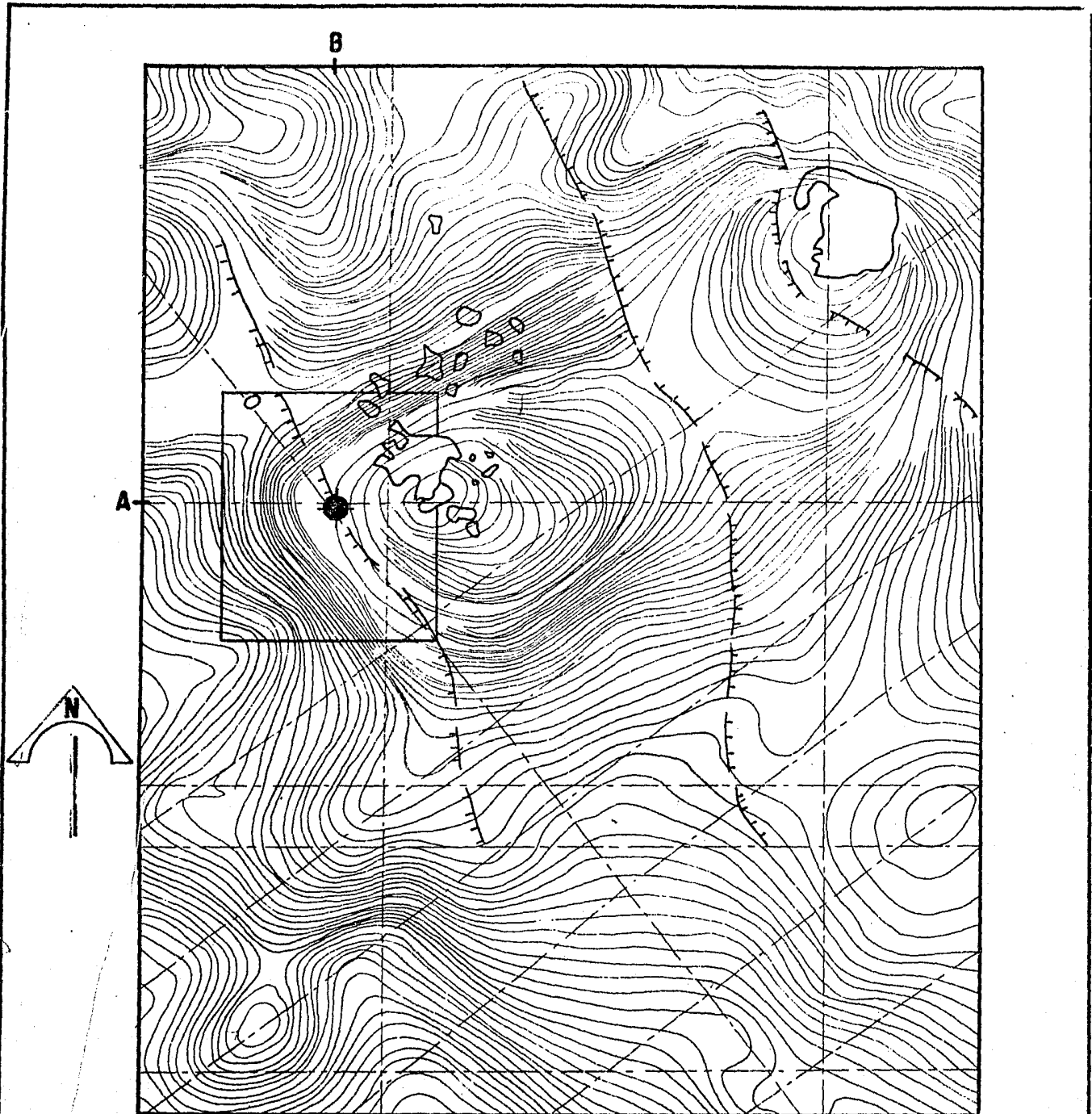
Los resultados del levantamiento barométrico configurados en un plano de intensidad magnética total, mostraron una zona de interés para -- fines mineros la cual se cita en el ejemplo de este trabajo de tesis. PLANO V.2.

La configuración mencionada puede observarse en el Plano V.2. donde se evidencian dos anomalías orientadas NE-SW (cada una corresponde a la respuesta de un intrusivo), así como efectos debidos a las fallas de rumbo NW-SE que definen la fisiografía de cuencas y sierras.






#### V.3.a.2. Vuelos de Contorno.

Las zonas de interés generadas por el levantamiento aeromagnético -- antes descrito, fueron cubiertas con un levantamiento magnetométrico



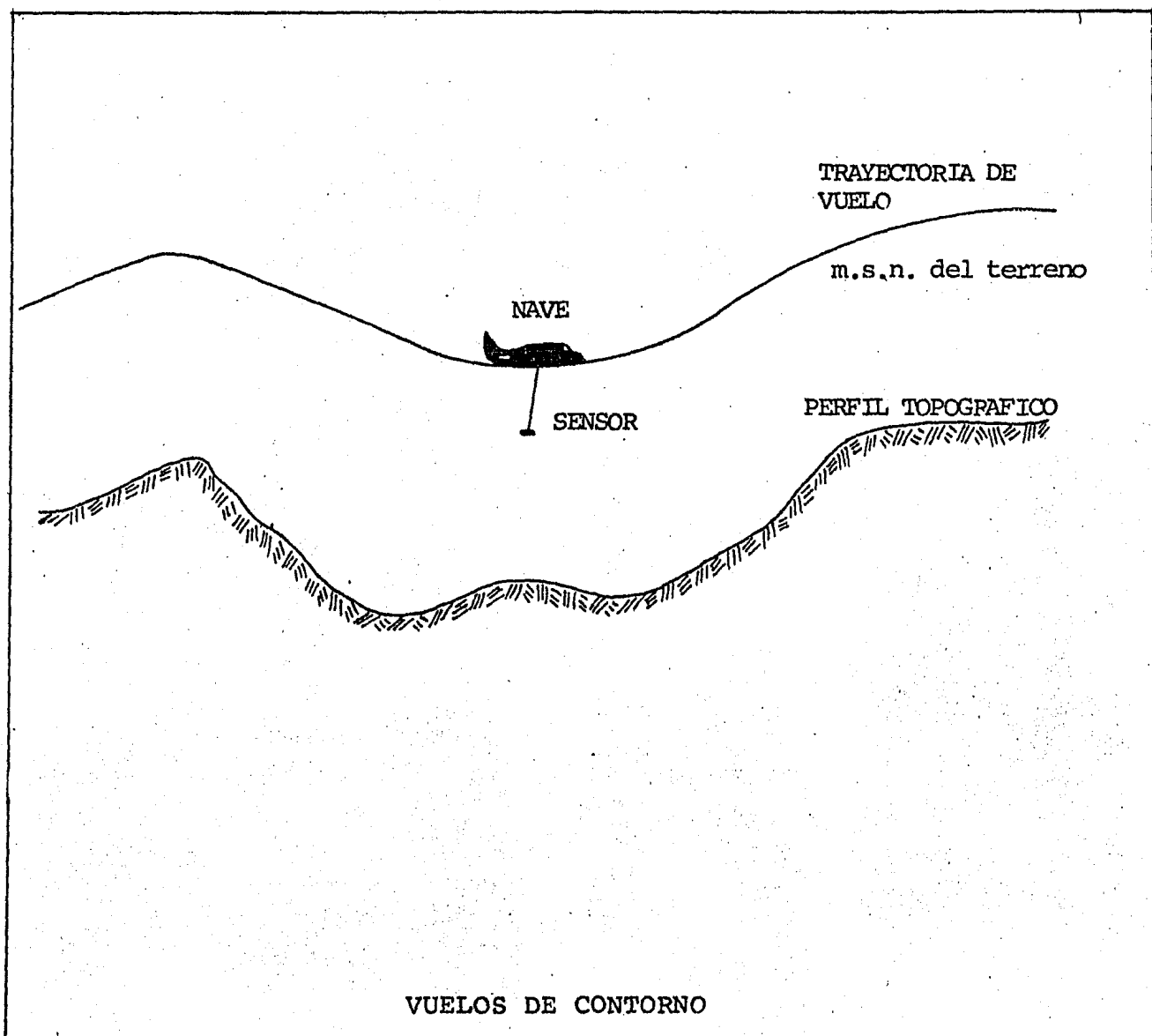


**SIMBOLOGIA**

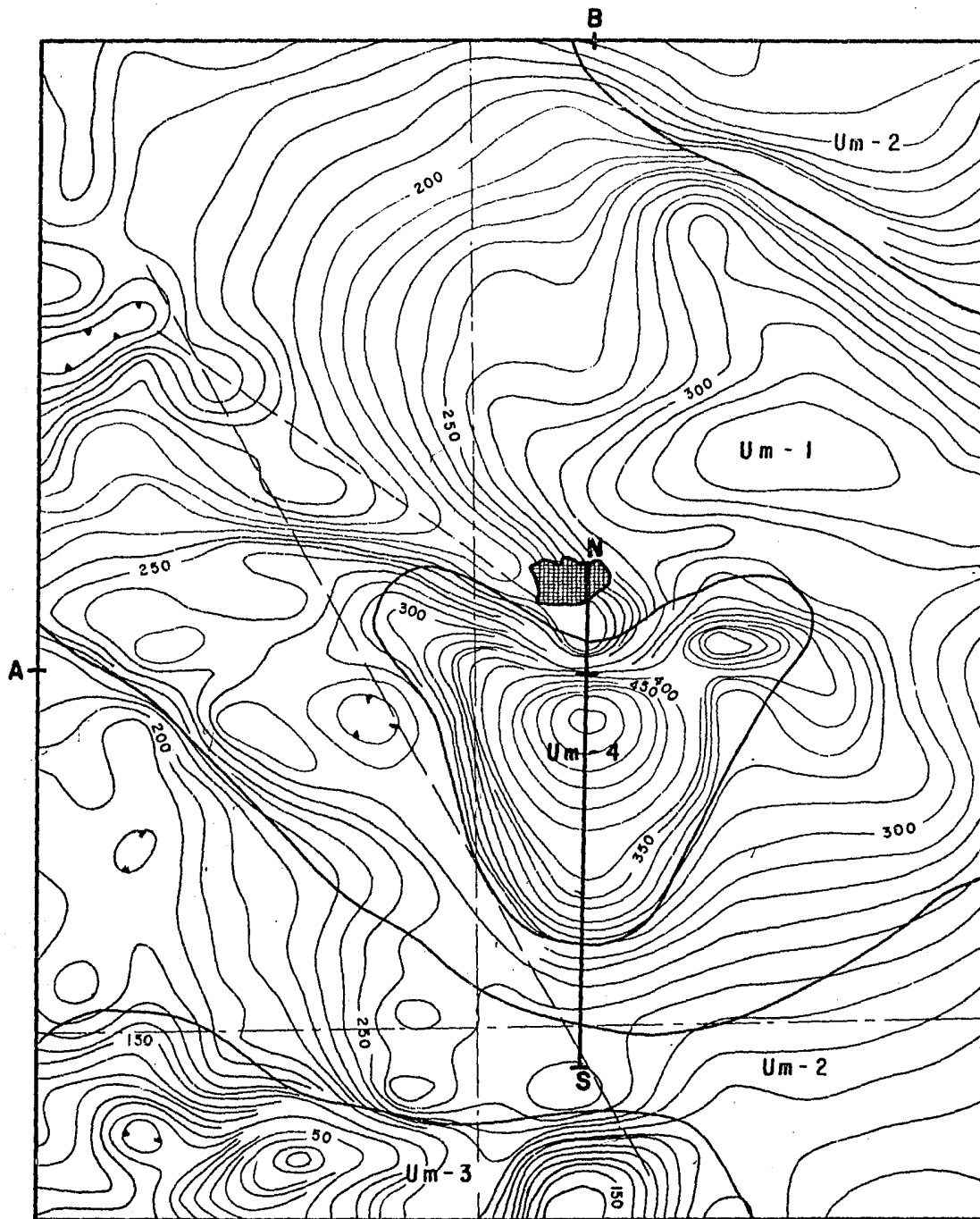
-  CONTORNO MAGNETICO
-  ANOMALIA DE INTERES
-  CONTORNO DEL INTRUSIVO
-  FALLA INFERIDA
-  ZONA DE ESTUDIO A DETALLE

 <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
<b>TESIS PROFESIONAL</b>		
<b>PLANO DE INTENSIDAD MAGNETICA TOTAL</b> <b>(VUELO ALTO)</b>		
FIGUEROA CORREA GERARDO		
No. DE CUENTA : 7238945 - 0		
<b>G E O F I S I C A</b>	PLANO V. 2	ESC. 1:200 000
		1985

de vuelo bajo de contorno a 120 m., sobre el nivel del terreno. -- (Véase la figura siguiente), con líneas separadas 400 m., entre sí y orientadas norte sur. Los resultados de la configuración se ilustran en el Plano V.3: mostrando las características más sobresalientes.



Note que en los vuelos de contorno, la altura del levantamiento -- trata de mantenerse constante con respecto al perfil del terreno.



**SIMBOLOGIA**



CURVAS DE ISOGAMMAS



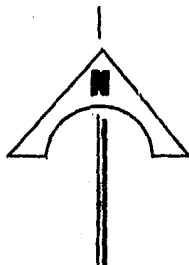
UNIDADES MAGNETICAS



TRAZAS DE FALLAS INFERIDAS



INTRUSIVO



 <b>FACULTAD DE INGENIERIA</b>		
<b>TESIS PROFESIONAL</b>		
<b>PLANO DE INTENSIDAD MAGNETICA TOTAL</b>		
<b>(VUELO DE CONTORNO)</b>		
FIGUEROA CORREA GERARDO		
No. DE CUENTA : 7238945 - 0		
<b>G E O F I S I C A</b>	PLANO V. 3	ESC. 1:50 000
		1985

### V.3.b. MAGNETOMETRIA TERRESTRE.

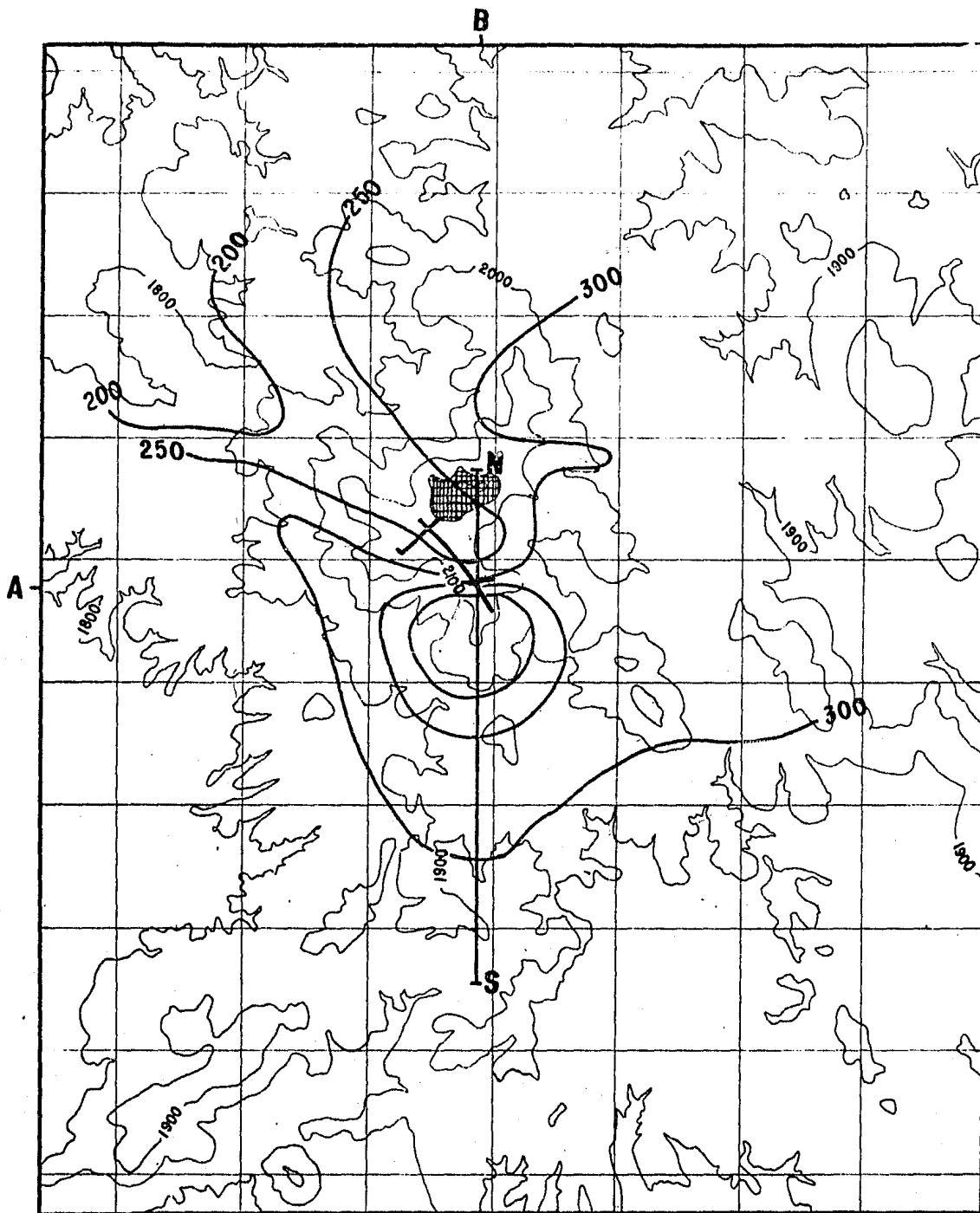
Los levantamientos de magnetometría aérea hicieron posible la ubicación de una zona de interés, con características favorables para -- trabajos de verificación terrestre de la anomalía aeromagnética. En vista de persistir la importancia se justificó un levantamiento -- magnetométrico de detalle en el área. Estos trabajos se describen -- a continuación.

#### V.3.b.1. Verificación.

La verificación de la anomalía aeromagnética, se llevó a cabo --- mediante el posicionamiento terrestre de ésta por medio de fotos -- aéreas y cartas topográficas escala 1:50,000 del área. Las líneas -- de verificación se observan en el Plano V.4. el cual también mues-- tra la topografía abrupta del área.

El levantamiento se llevó sin un patrón establecido, tratando - - - inicialmente de cubrir el dipolo de la anomalía en líneas con esta-- ciones cada 50 m., mediante el uso de brújula y cinta métrica. El - número de estaciones quedó sujeto a la obtención del dipolo magnéti-- co terrestre, al graficar en la libreta de campo las lecturas obte-- nidas en el levantamiento.

Simultáneamente se realizó un reconocimiento geológico sobre las -- líneas trazadas, tratando de establecer el posible origen de la -- anomalía y efectuando además caminamientos en las zonas aledañas -- a la anómala, para observar las características geológicas presen-- tes.



**SIMBOLOGIA**



CURVAS DE NIVEL TOPOGRAFICO



ANOMALIA AEROMAGNETICA



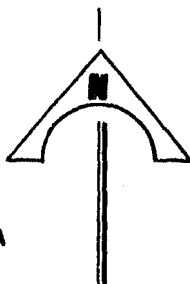
LINEAS PARA UBICAR LA ANOMALIA



INTRUSIVO



PERFIL DE REFERENCIA



FACULTAD DE INGENIERIA		
TESIS PROFESIONAL		
<b>PLANO TOPOGRAFICO CON LINEAS DE VERIFICACION</b>		
FIGUEROA CORREA GERARDO		
No. DE CUENTA : 7238945 - 0		
G E O F I S I C A	PLANO V.4	ESC. 1: 50 000
		1985

### V.3.b.2. Levantamiento de Detalle.

Esta etapa consistió en el trazo de 25 líneas de 15 km cada una -- equidistantes entre si 100 m., y con estaciones de lectura cada -- 25 m. Las líneas quedaron orientadas NW 30°SE transversales a la -- posible estructura con la finalidad de tener un mejor control de -- los datos magnetométricos colectados.

Lo anterior se apoyó en un levantamiento geológico de detalle en -- la zona anómala y en las circundantes con evidencias de mineraliza- -- ción, para hacer una correlación más apropiada de datos geológicos- -- geofísicos.

Los resultados de la configuración de este levantamiento se obser- -- van en el Plano V.5.

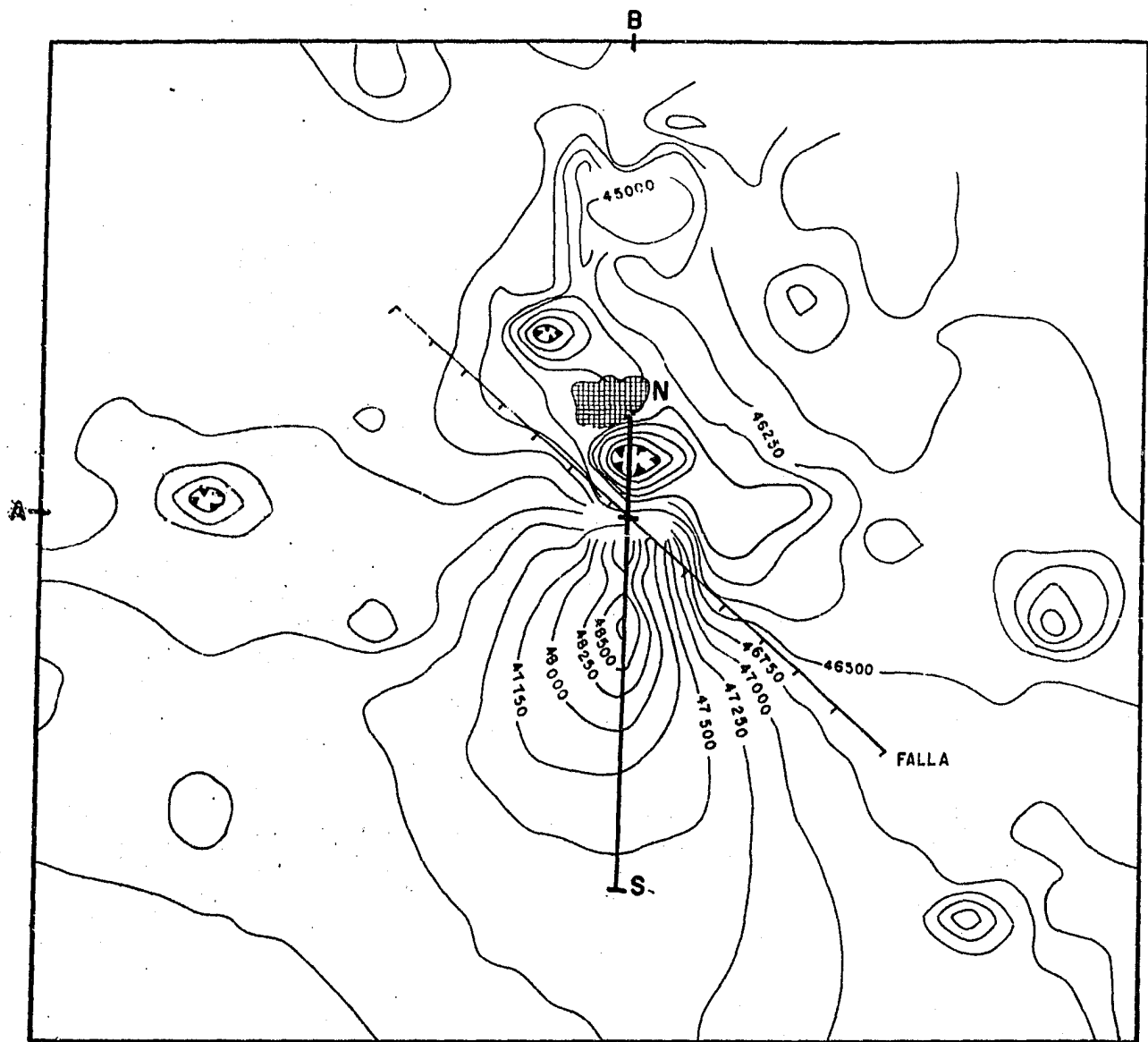
### V.4. INTERPRETACION CUALITATIVA.

Los datos aeromagnéticos de alta sensibilidad y vuelo alto mues- -- tran anomalías alineados NE-SW relacionados a intrusivos, uno de los -- cuales está asociado íntimamente a la anomalía tomada para este -- ejemplo. El Plano V.2. muestra la relación entre los intrusivos y -- las anomalías, así como las fallas de rumbo NW-SE que definen la -- fisiografía de sierras y cuencas mencionadas anteriormente.

El levantamiento aeromagnético de contorno presenta posibles fallas más locales, notándose también que persiste la tendencia de una -- falla NW-SE interpretada en el vuelo alto. Los resultados del vuelo bajo definieron la anomalía con una amplitud de 450 gammas y un -- gradiente de 600 gammas/km.\*

---

\* La intensidad total del campo es de 47 000 gammas aproximadamente, el cual -- se ha restado a las lecturas obtenidas en el vuelo de contorno.



**SIMBOLOGIA**

 — CONTORNO MAGNETICO  
(Líneas cada 250  $\gamma$ .)

 — FALLA

 — LINEA DEL PERFIL

		
FACULTAD DE INGENIERIA		
TESIS PROFESIONAL		
<b>PLANO DE MAGNETOMETRIA</b>		
<b>TERRESTRE DE DETALLE</b>		
FIGUEROA CORREA GERARDO		
No. DE CUENTA : 7238945 - 0		
G E O F I S I C A	PLANO v. 5 ESC. 1: 50 000	1985

Esta anomalía forma la parte de otra de mayor extensión horizontal, asociada a un cuerpo intrusivo que se manifiesta a través de varios afloramientos en el área.

El Plano V.3. ilustra la anomalía así como las unidades magnéticas que se interpretaron y que se desglosan a continuación.

Um-1 Unidad Magnética 1.- Formada por una anomalía de 100 a 150 gammas de amplitud, en un nivel de referencia de 200 gammas, asociada a un intrusivo de composición riolítica intrusionado a la vez -- por diques aplíticos.

Um-2 Unidad Magnética 2.- Representa el nivel medio magnético del área, se relaciona a diferentes tipos de roca sedimentaria y volcánicas con susceptibilidades magnéticas bajas.

Um-3 Unidad Magnética 3.- Consiste de varios mínimos magnéticos -- con una amplitud promedio de 50 a 200 gammas, las rocas que afloran en esa zona son de baja susceptibilidad magnética. Los mínimos se -- asocian a rocas andesíticas y dacíticas que subyacen a las anteriores.

Um-4 Unidad Magnética 4.- Coincide con la anomalía para el ejemplo y se relaciona a un afloramiento de hematita-magnetita. En este afloramiento se colectó una muestra cuyo análisis de susceptibilidad reportó un valor de  $84,000 \times 10^{-6}$  ucgs, y en otro afloramiento -- situado a 550 m., al ENE del primero, se colectó otra muestra con -- un valor de  $50,000 \times 10^{-6}$  ucgs.

La verificación terrestre de la anomalía aeromagnética, dio como -- resultado una anomalía dipolar normal con amplitud de 4500 gammas -- y un gradiente de 45 gammas /m., asociada a un afloramiento de hierro.



El levantamiento magnetométrico terrestre de detalle, muestra una --  
tendencia debida posiblemente a una falla orientada NW 50° SE que --  
coincide con un afloramiento de Fe. La falla se localiza sobre la --  
zona de alto gradiente de la anomalía terrestre.

La zona presenta también altos magnéticos que se asocian a rodados de  
Fe, afloramientos de Fe o que pueden ser provocados por contactos --  
litológicos.

#### V.5. INTERPRETACION CUANTITATIVA.

La interpretación cuantitativa se llevó a cabo sobre un perfil tomado  
sobre la anomalía de interés (Plano V.5). Esta anomalía es resultado--  
del levantamiento magnetométrico de detalle, presenta una amplitud --  
de 4250 gammas, con una orientación normal y se asocia a un aflora--  
miento de hierro y a una falla normal.

El perfil se tomó norte-sur\* para su interpretación, ya que la orienta--  
ción normal que presenta el dipolo magnético de la anomalía terrestre  
y la latitud del país, facilitan el proceso al tomar el perfil en esa  
dirección, haciendo más confiables los resultados.

Las características que presenta la anomalía antes mencionada, hacen--  
que sea difícil de interpretar mediante los llamados métodos empíri--  
cos debido a la forma tan asimétrica mostrada. Por lo tanto una pri--  
mera aproximación mediante tales métodos es omitida del ejemplo.

La interpretación se apoyó en un manual de "curvas tipo" de anomalías  
magnéticas, con el cual se evaluaron preliminarmente los parámetros --  
del cuerpo geológico causante de la anomalía.

(Referencia bibliográfica R. Rogers G. "Magnetic field and Gradients--  
over...

---

\* Magnético.

La interpretación cuantitativa final, se llevó a cabo mediante el uso del método de inversión de parámetros desarrollados por M. Talwani, cuyas bases principales se establecieron en el capítulo III.

El uso de este programa se llevó a cabo mediante la técnica de ensayo y error, es decir, cada cálculo arrojó ciertos resultados que tenían que ajustarse, para que los del siguiente intento fueran más aproximados con los datos de la curva real obtenida en campo. Cuando el ajuste entre a las curvas teóricas y real, se consideró apropiado, se tomó por óptimo el modelo teórico del cuerpo generador de la anomalía y por ende los parámetros de éste. Para una idea más obvia de este procedimiento se dan dos modelos antes del óptimo en hojas subsecuentes (APENDICE 1).

#### V.6. INTEGRACION GEOLOGICA-GEOFISICA.

Esta integración define de una manera aproximada la causa geológica de la anomalía magnética, así como el de las zonas de alto gradiente.

Los más sobresalientes de esta integración se enumera en los siguientes puntos.

- 1.- La información aeromagnética de alta sensibilidad y vuelo alto, relaciona dos anomalías orientadas NE-SW con dos intrusivos posibles generadores de mineralización, uno de los cuales está íntimamente asociado a la zona elegida para este ejemplo. Se muestran también tendencias magnéticas relacionadas a fallas de rumbo NW-SE, que delinear de una manera general la fisiografía de cuencas y sierras.
- 2.- El vuelo bajo de contorno define que la anomalía sobre la que este trabajo se centra (Plano V.3.), está relacionada a un cuerpo intrusivo de composición riolítica manifestado en superficie a través de varios afloramientos.

- 3.- La anomalía aeromagnética resultado del levantamiento de vuelo bajo se asocia con un afloramiento de hematita-magnetita de -- 40 m.x60m.x4m., encajonado por rocas metamórficas (skarn y -- caliza recristalizada) que sugieren un reemplazamiento metasomático.

La anomalía presenta una amplitud de 450 gammas y un gradiente de 600 gammas/km formando un dipolo de orientación normal.

- 4.- Se localizan también afloramientos de Fe adyacentes formados -- de hematita, por lo cual la respuesta magnética es impercepti-- ble. Véase la asociación del Plano Geológico de Detalle con -- el Magnético Terrestre de Detalle (Planos V.1. y V.5 ) no apreciándose respuesta magnética de los mencionados afloramientos.

- 5.- La zona anómala y los afloramientos de mineral de Fe están asociados a un cuerpo intrusivo y a una falla NW-SE interpretada -- a partir de los levantamientos magnetométricos aéreos. Por esta falla es probable que hayan ascendido los fluidos mineralizantes. La falla interpretada persiste en los estudios subsecuen-- tes.

El cuerpo intrusivo (como ya se indicó anteriormente) se manifiesta en superficie a través de varios afloramientos y es sugerido también por los contornos magnetométricos resultados del -- vuelo bajo.

- 6.- La magnitud de la anomalía magnética\* detectada en los levanta-- mientos de vuelo de contorno y terrestre de detalle, se debe -- a la contribución de un cuerpo intrusivo sepultado, con mayor -- susceptibilidad que el pórfido riolítico que aflora al norte de la anomalía; sin embargo el mayor aporte se puede atribuir al -- cuerpo ferrífero asociado a la falla normal localizada en el -- área de la anomalía magnética (APENDICE 2 ).

Tanto el intrusivo sepultado como el cuerpo ferrífero fueron determinados en base a la interpretación cuantitativa antes-descrita, la cual se apoyó en la geología recopilada.

- 7.- La asociación entre el perfil magnetométrico aéreo de vuelo - bajo y el perfil magnetométrico del levantamiento terrestre - de detalle, ilustran de una manera objetiva su estrecha - - - correlación con el perfil geológico correspondiente, interpre- tado a partir de las evidencias geológicas de campo y de la - interpretación cuantitativa. Nótese la resolución evidente -- que muestran los perfiles (APENDICE 3).

#### V.7. EVALUACION DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos para el ejemplo desarrollado establecen las características más sobresalientes derivadas de la -- interpretación cualitativa, cuantitativa y la asociación geológica correspondiente, así como las recomendaciones pertinen- tes para el estudio.

Los resultados más importantes se enumeran a continuación:

- 1.- La zona anómala está ubicada en la provincia metalogenética - de la Sierra Madre Occidental, subprovincia de altas llanuras.
- 2.- Existen numerosos cuerpos intrusivos de edad terciaria que -- varían en composición. AL NE de la hoja aflora un tronco ---- intrusivo de forma circular de 3 km., de diámetro, constitui- do por una granodiorita de biotita de hornblenda, dicho - - intrusivo presenta una serie de apófisis alineados en el área. Los intrusivos son pórfidos cuarzoláticos riódacíticos y -- monzonita. La anomalía motivo de este ejemplo, se asocia al - intrusivo de composición riolítica representado topográfica--

mente por el cerro de mayores dimensiones; al sur de éste se presentan diques aplíticos que indican las últimas intrusiones. Todos estos cuerpos son los responsables de la mineralización en el área.

- 3.- Destacan tectónicamente una serie de alineaciones NE 40°, SW., que se extienden por más de 360 km.,\* la dirección se considera importante ya que alinea a los cuerpos intrusivos mineralizantes del área.
- 4.- Se presentan dos sistemas de fallas preferenciales. El más desarrollado tiene una orientación NNW y el segundo hacia el ENE. En el primer sistema queda incluida la falla asociada a la anomalía magnetométrica tomada para el ejemplo.
- 5.- Los depósitos minerales en el distrito en el cual se localiza la anomalía son numerosos, se considera que los yacimientos son de tipo hidrotermal divididos en dos períodos de emplazamiento. El primero por contener gran cantidad de pirita y marcada deficiencia de plomo y zinc. El segundo período se caracteriza por contener leyes altas de plata y zinc con altas concentraciones de plomo.
- 6.- Los yacimientos de hierro de la región son clasificados en los siguientes tipos.
  - a) Hierro asociado a fracturamiento regional tipo cuencas y sierras. (Basin and Range).
  - b) Hierro asociado a diques de diabasa.
  - c) Sombreros (Gossans) de hierro. Siendo los más importantes los asociados al fracturamiento regional. Existen numerosos afloramientos generalmente hematíticos asociados con cuarzo lechoso y jaspe.

---

\* Interpretadas a partir de imágenes de satélite ERTS.

- 7.- El promotorio de Fe asociado a la anomalía muestra una forma burdamente circular y cónica, el mineral es magnetita octaedral bien cristalizada y se localiza en la zona de contacto-por falla normal, por la cual, es probable que los fluidos mineralizantes hayan ascendido.
- 8.- La importancia desde el punto de vista ferrífero de la zona, se basó en la magnitud y dimensiones de la anomalía magnética detectada y su correlación con estructuras geológicas favorables de mineralización.
- 9.- Existen afloramientos de hierro que no dan respuesta magnética debido a su composición hematítica; por lo cual debe pensarse en la posibilidad de un mayor volumen de hierro no representado por anomalías magnéticas.
- 10.- Se recomiendan trabajos adicionales para cuantificar con mayores bases al cuerpo de Fe interpretado a partir de los datos magnetométricos.  
  
Podría pensarse en levantamientos de gravimetría, sin embargo la topografía abrupta del área hace el método difícil de aplicar.
- Debido a lo anterior los trabajos que se recomiendan para la cuantificación del cuerpo ferrífero son principalmente de barrenación, ya que las características y resultados obtenidos lo justifican.
- 11.- Desde el punto de vista geológico se recomiendan trabajos de detalle en las zonas aledañas con evidencias de mineralización, para así cuantificar el potencial de dichas zonas, al definir el posible origen de tales evidencias y su continuidad en el subsuelo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Como corolario al presente trabajo de Tesis, las conclusiones y -- recomendaciones más apropiadas y pertinentes de acuerdo a los resul -- tados obtenidos son las siguientes:

### CONCLUSIONES.

- 1.- El método aeromagnético es de gran apoyo en los trabajos de -- exploración minera y petrolera, recaba información en áreas -- extensas de una manera rápida y económica respecto a otros -- métodos exploratorios.
- 2.- Una interpretación cualitativa apropiada a partir de los planos de configuración de los levantamientos aeromagnéticos, es -- muchas de las veces determinante para jerarquizar zonas que -- ofrezcan mayor interés para estudios detallados, o bien elimi -- narlas si no ofrecen condiciones favorables; en éste caso un -- análisis formal de gabinete puede ser omitido del proceso.
- 3.- Dependiendo de los objetivos del estudio, al programar los le -- vantamientos aeromagnéticos deberán fijarse adecuadamente la -- altura del vuelo y el espaciamiento entre líneas, ya que de -- estas características dependerá el buen control de datos para -- no atenuar u omitir anomalías magnéticas, asociadas posiblemente a cuerpos mineralizados con rendimiento económico.
- 4.- La resolución que ofrecen los levantamientos aeromagnéticos -- dependerá de su objetivo. Para fines de exploración petrolera -- serán más apropiados los levantamientos altos, mientras que -- para cuestiones mineras a medida que el vuelo es más bajo y la -- distancia entre líneas más estrecha, la resolución es mayor. Los levantamientos bajos de contorno pueden ser considerados -- para minería como la primer etapa, no siendo necesarios los -- vuelos altos, sin embargo cuando éstos últimos existan deben -- ser utilizados para apoyo de la información al seleccionar -- -- mediante ellos zonas de interés exploratorio.



- 5.- Los métodos empíricos de interpretación cuantitativa, ofrecen una primera aproximación de los parámetros que dimensionan al cuerpo generador de la anomalía, lo cual sirve de base para una interpretación más apropiada mediante métodos y técnicas más avanzadas y confiables, apoyadas por los factores geológicos asociados. Algunas veces los métodos empíricos son inaplicables por la forma tan asimétrica que presentan ciertos perfiles de campo (caso del ejemplo), son poco confiables y dan solo ideas relativas de la distancia a la cima del cuerpo generador y la forma burda de este.
- 6.- La importancia del manejo sistematizado, y la integración de datos geológicos desde el principio del análisis es primordial, ya que éstos serán determinantes en la interpretación de datos magnéticos y geofísicos en general, y por lo tanto en la programación de estudios más detallados.
- 7.- Existen afloramientos ferríferos que no dan respuesta magnética debido a su composición hematítica, por lo cual debe pensarse siempre que haya evidencias mineralizantes y geológicas favorables, en la aplicación de métodos más resolutivos hasta cuantificar lo mejor posible la importancia de la zona.

#### RECOMENDACIONES.

- 1.- La recopilación de datos debe ser lo más apropiada y completa posible antes de programar trabajos de exploración en alguna zona, ya que algunas veces se llevan a cabo actividades antes realizadas.

Debido a lo anterior, se recomienda que la comunicación entre compañías e instituciones relacionadas a la exploración, sea lo más estrecha posible para evitar egresos injustificados por la duplicidad de trabajos.

- 2.- Cuando la interpretación cualitativa sea ambigua debe ser verificada en la zona de estudio. Los datos derivados de la

interpretación cualitativa deben tomarse escépticamente - - - siempre que no sean evidentes.

- 3.- El método magnetométrico debe apoyarse para una interpretación más confiable en estudios de ciencias afines: Geológicos, Imágenes de Satélite, Estudios Geoquímicos, Petrológicos, - - etc. Debe considerarse también la aplicación de métodos geofísicos complementarios, tales como el Gravimétrico y los Métodos Eléctricos cuando las condiciones lo justifiquen.
- 4.- Cuando exista una anomalía magnética o zona de alto gradiente, y su asociación geológica reporte indicios de mineralización, deberán agotarse todas las posibilidades de estudios geológicos-geofísicos hasta obtener la causa que justifique el origen del disturbio magnético detectado.
- 5.- Aun cuando no siempre es posible, se recomiendan establecer -- modelos de asociación entre los factores geológicos-geofísicos que ocurren en yacimientos de Hierro ya conocidos (" La Perla" Chih., " Cerro del Mercado" Dgo., etc.), para ser comparados -- con zonas de estudio que presenten características similares, - lo cual servirá de apoyo para estimar las posibilidades económicas de alguna zona en su etapa de exploración.\*
- 6.- La interrupción indefinida de trabajos de exploración en zonas favorables debe evitarse, ya que ésto implica tanto la rápida-evaluación potencial del área para el incremento de posibles - reservas, como la generación de fuentes de trabajo.

---

\* También aplicable a la exploración de otro tipo de mineral.

## BIBLIOGRAFIA

## B I B L I O G R A F I A

- BARANOV, V. " A New Method for Interpretation of Aeromagnetic Maps" Geophysics, vol. 22, 1957. pp. - 359-383.
- EDWUIN J. BALLANTYNE " Magnetic Curve fit for a Thin Dique" - - - - Geophysics, vol. 45, p. 447-455.
- MURIEDA PAVON G. " La exploración de Areas Nuevas por el Método Aeromagnético" 1966, AMGE México.
- R. ROGERS G " Magnetic field and Gradients Over Vertical - Prism and Dipping Sheets" Aero Service. Philadelphi. U.S.A. 1974.
- HENRY NAUDY " Automatic Determination of depth on - - - - Aeromagnetic profiles", 1971 Geophysics v. 36 pp. 717-722.
- M. TALWANI AND J.R. HEIRTZLER" Computation of Magnetic anomalies -- caused by two dimensional structures of - - arbitrary shape". Geologic SCI V.9 No. 1 pp. 464-480.
- JEFFREY L. FRIED BERG" Undestarding and use of werner Deconvolution in Aeromagnetic Interpretation, forth Edition. octuber, 1975. Aeroservice U.S.A.
- VACQUIER V, STEENLAND, HENDERSON AND ZEITZ " Interpretation of - - Aeromagnetics Maps" 1951. Geological Society of America. Memoir 47.

- MARQUARDT DIW " An algorithm for least squares estimation of  
nan linear parameters" (1963) V. Soc. Indust.  
appl. math. vol. 11, No. 2 pp. 431-441.
- JHON M. STANLEY " Simpliefied Magnetic Interpretation of The -  
Geologic contact and thin dique"  
Geophysics vol. 42 No. 6, oct. 1977.
- CAMARGO Z. ANTONIO Apuntes del curso de Prospección Magnética .  
Inédito C.O.M.E.S.A. (1972).
- PARKER, G.S. " Standar Curves for Interpretation of Magnetic  
Anomalies over Long Tabular Bodies".  
Mining Geophysics, vol. II, pag. 512-548 - -  
( 1967 )
- HEILAND, C.A. " Magnetic Prospecting".  
p.p. 110-148, physics of The Earth series 8 -  
McGraw- Hill Book Company, 1939.
- PETERS, L.J. " The Direct Approach to Magnetic Interpretation  
and its Practical Applications"  
Geophysics, vol. 14, p.p. 290-320, 1949.
- COOK, LENNETH L. " Quantitative Interpretation of Magnetic - -  
Anomalies over Veins"  
Geophysics, vol. 15, pp. 667-686, 1950
- WEAVER, PAUL " The Relative Place of Empirical and Analytical  
Methods of Geophysical Exploration".  
Geophysics, vol. 7, p.p. 281-292, 1942.
- BHATTACHARYYA B.K. " Magnetic Anomalies due to Prism-Shaped Bodies-  
with arbitrary Polaritaton"  
Geophysics, vol, 29, p.p. 517-531, 1964

- CAUCHY A. " Méthode Générale pour la Résolution Tèmes --  
d'équations Simultanées".  
c.r. Acad. sci., 536-8 (1948)
- HENDERSON R.G. " Analisis of total Magnetic intensity anomalies  
produced by point and line sources"  
Geophysics, vol. 13, p.p. 428-436 (1948)
- NASH J.C. " Compact Numerical Methods for computers"  
Adam Hilger L.T.D. Bristol England, 1978.
- TELFORD W.M., SHERIFF R.E. " Applied Geophysics"  
GELDART L.P. KEYS D.A. Cambridge University Press  
Cambridge-London-New York-Melbourne,  
1976.
- GALBRAITH, F.M. " The Magnetometer as a Geological Instrument --  
at Sudburg"  
Geophysics, 1945 p.p. 98-106  
Trans. Am. Inst. Mining Met. Engrs.
- GARLAND, GEORGE D. " Introduction to Geophysics: Mantle Core and --  
crust"  
W.B. Saunders Company, 1971 Philadelphia, USA.
- OFFICER, CHARLES B. " Introduction to Theoretical Geophysics" - - -  
Springer-Verlag, New York, USA 1974.
- PARASNIS, D.S. " Geofísica Minera"  
Ed. Paraninfo. Madrid, España 1971.
- PARASNIS, D.S. " Principios de Geofísica Aplicada"  
Ed. Paraninfo. Madrid, España 1970.

SCHEIDEGGER, ADRIAN E.

" Foundations of Geophysics"  
Elsevier Scientific Publishing - -  
Company Amsterdam, The Netherlands,  
1976.

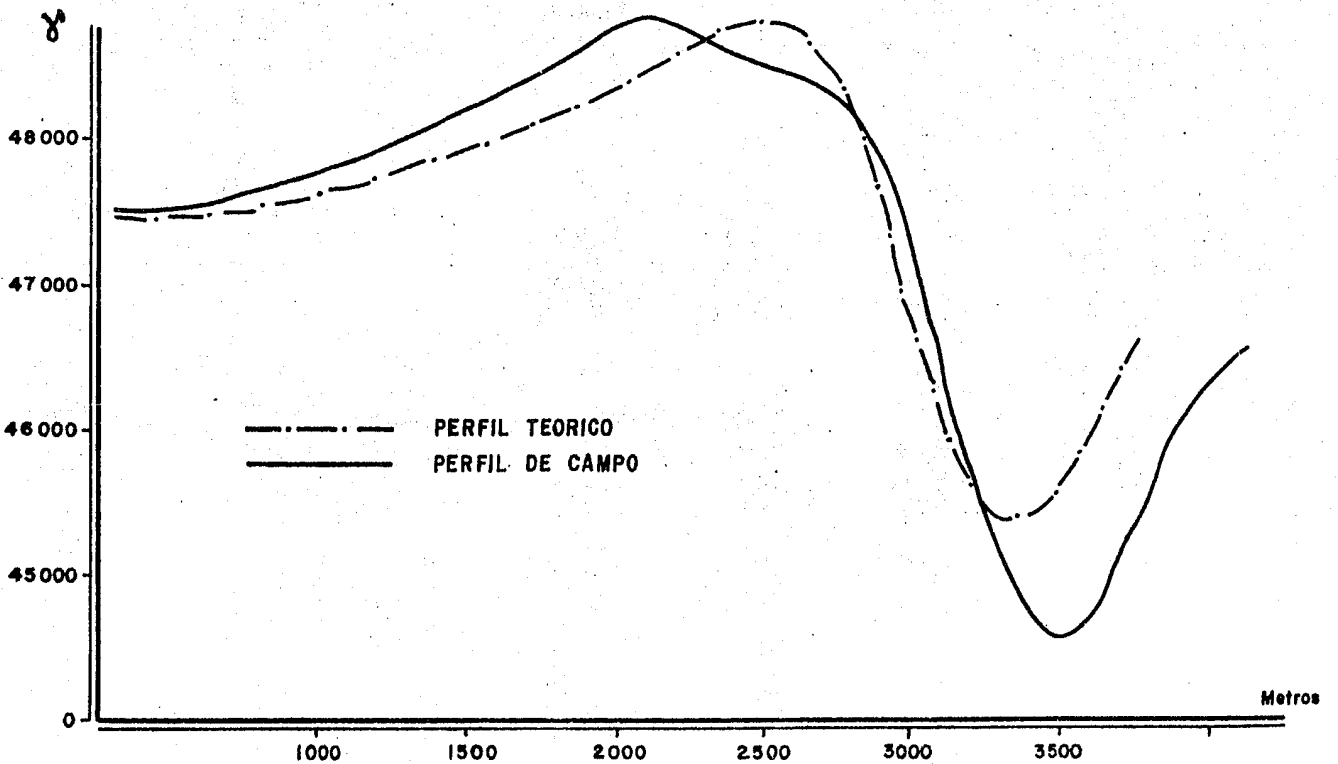
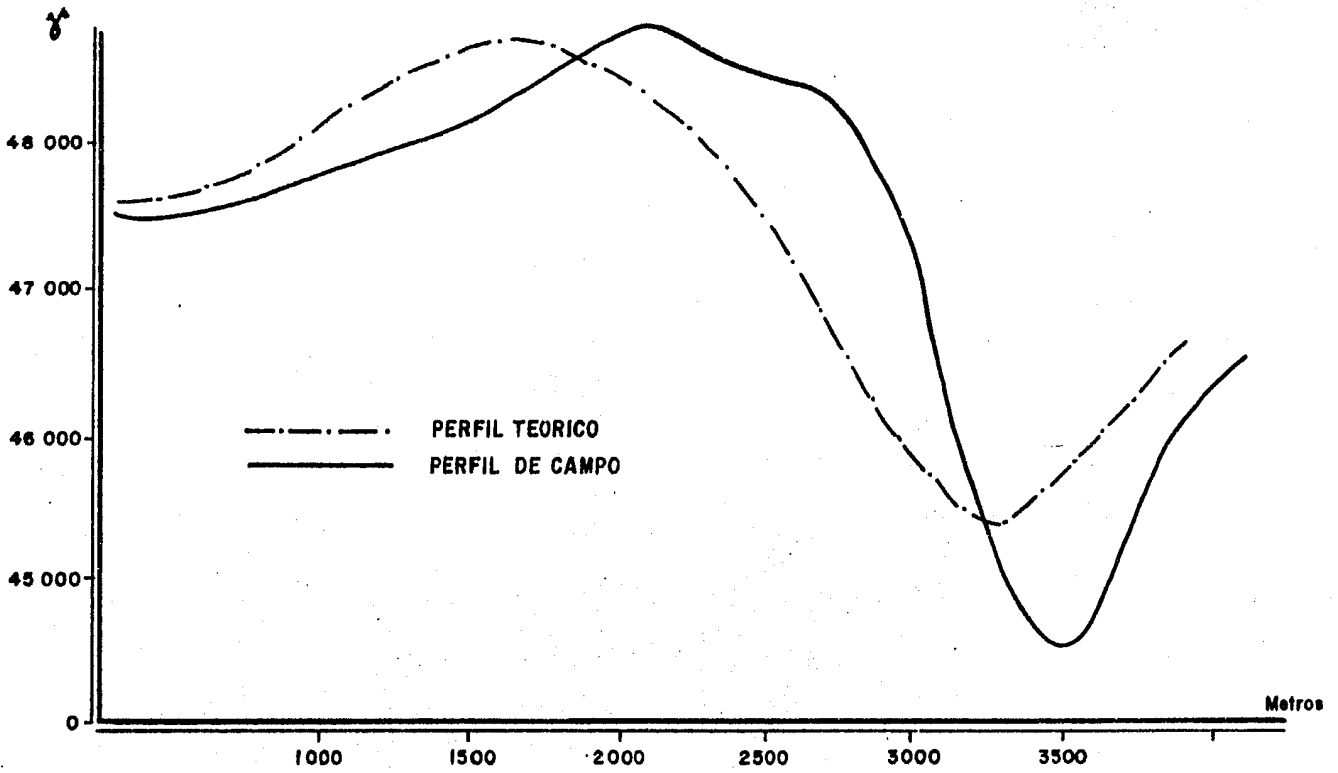
SHERIFF, ROBERT E.

" Encyclopedic Dictionary of Exploration  
Geophysics"  
Society of Exploration Geophysicist.  
Tulsa, Oklahoma USA, 1973.

A P E N D I C E S



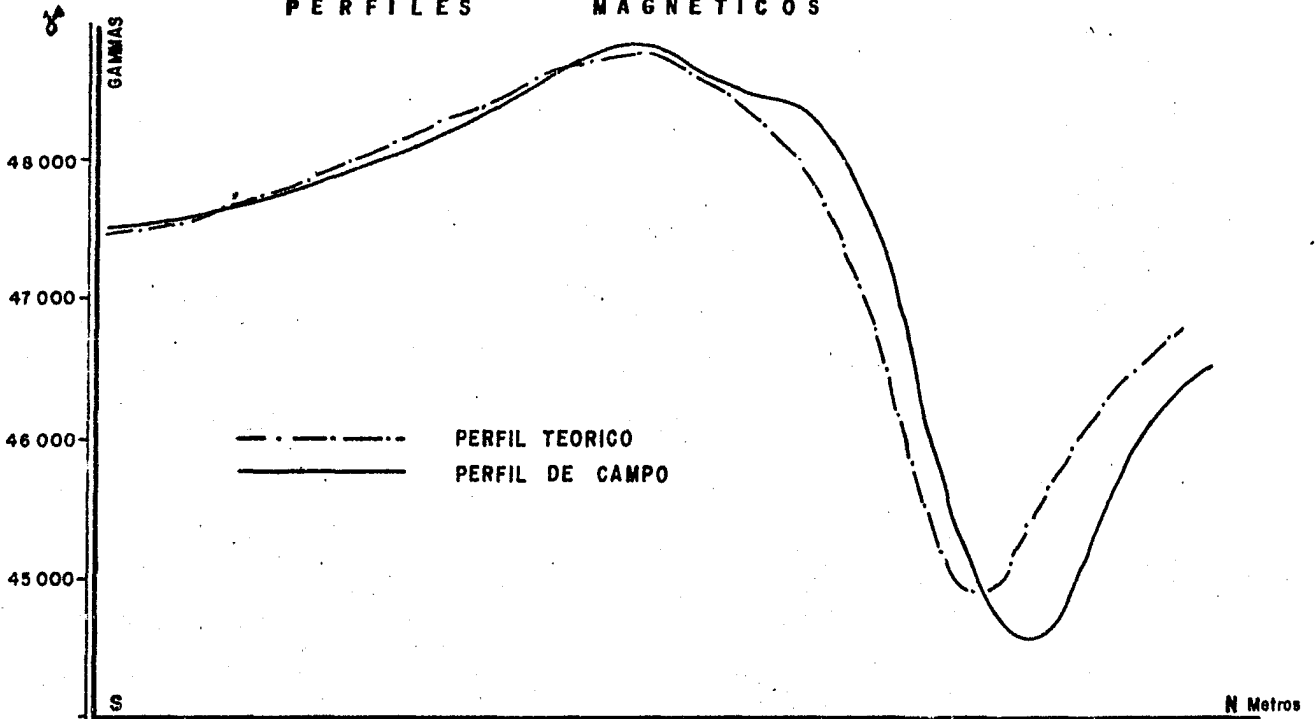
# APENDICE I



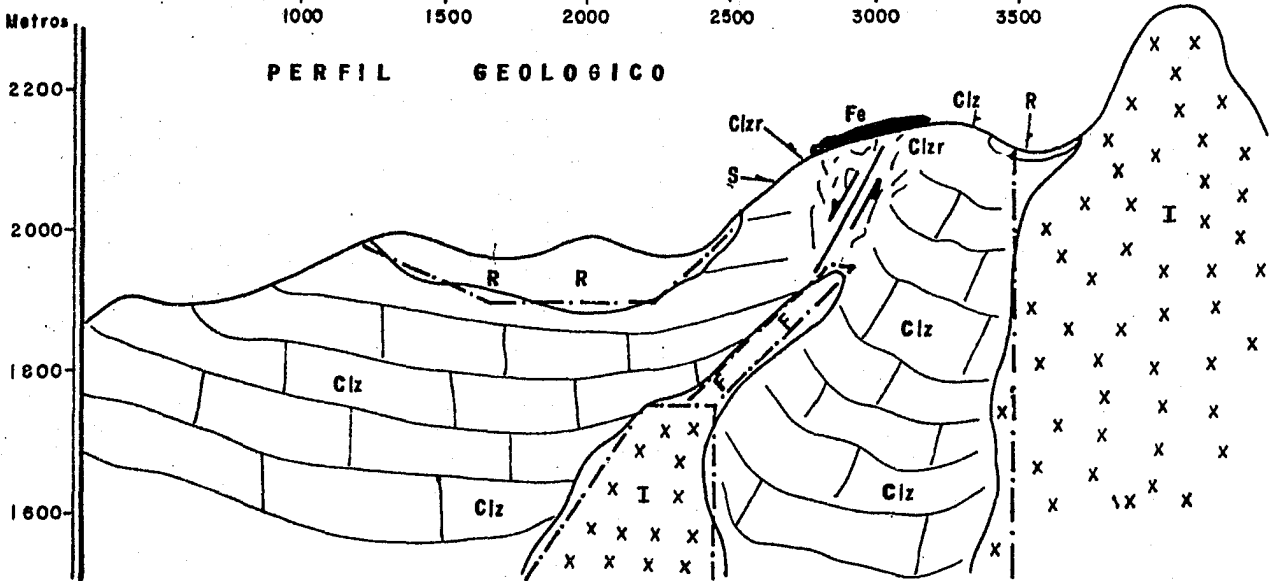
PERFILES TEORICOS ANTERIORES AL CONSIDERADO COMO OPTIMO

# APENDICE 2

## PERFILES MAGNETICOS



## PERFIL GEOLOGICO

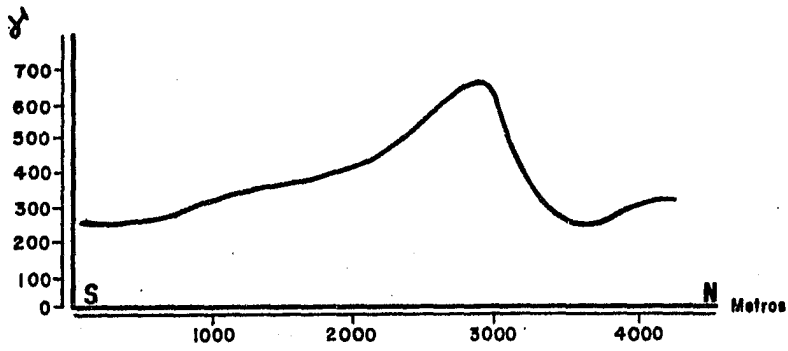


### SIMBOLOGIA

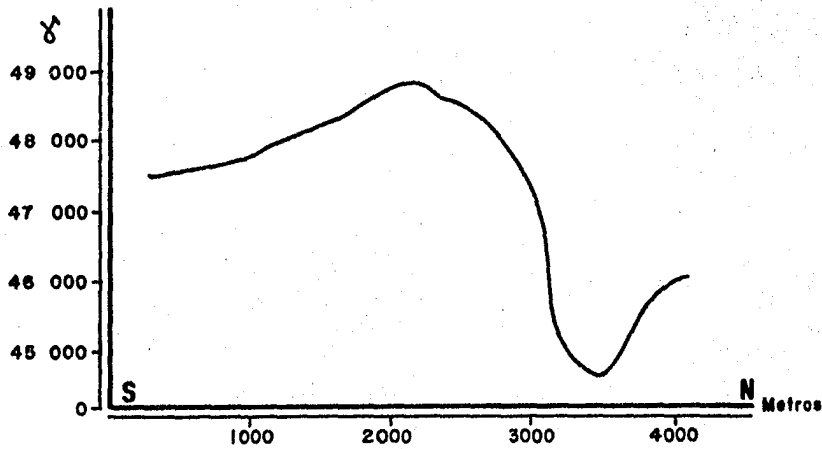
- MODELO CALCULADO
- MODELO INTERPRETADO
- F** — FIERRO Y RODADOS DE Fe.
- R** — RIOLITAS
- S** — SKARN
- Clz** — CALIZA
- Clzr** — CALIZA RECRISTALIZADA
- I** — INTRUSIVO
- FALLA

G E O F I S I C A	FACULTAD DE INGENIERIA	
	TESIS PROFESIONAL	
	ASOC. ENTRE PERFILES MAGNETICOS Y GEOLOGICOS CORRESPONDIENTES AL AREA DE ESTUDIO.	
	FIGUEROA CORREA GERARDO	
	No. DE CUENTA : 7238945 - 0	
APD. No. 2	ESCH. I. 25 000	1985

# APENDICE 3



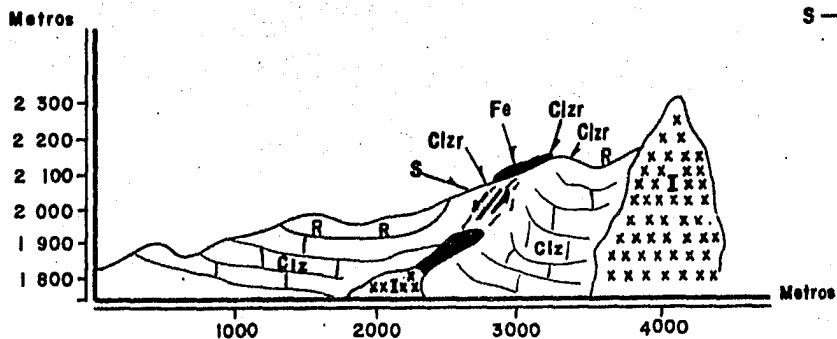
PERFIL AEROMAGNETICO-VUELO BAJO-



PERFIL MAGNETICO TERRESTRE

**SIMBOLOGIA**

- R — RIOLITAS
- Clzr — CALIZA RECRIST.
- I — INTRUSIVO
- Fe — FIERRO
- S — SKARN



PERFIL GEOLOGICO

ESC. HORIZONTAL 1 : 50 000