



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA
TRANSFORMADA DE EULER SOBRE ANOMALÍAS
MAGNÉTICAS DIPOLARES EN POZOS CONTAMINANTES
SOMEROS”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

ING. GEOFÍSICO

PRESENTA:

Granadas Aguilar Juan Pablo.

ASESOR DE TESIS:

M. C. JUAN ESTEBAN HERNÁNDEZ QUINTERO



MEX. DF

ENERO 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que de alguna manera influyeron para que el presente trabajo fuese realizado, de las cuales se mencionará solo a las que se consideran más representativas ya que el espacio para este apartado es reducido.

Primero, quisiera agradecer a familia, especialmente a mis señores padres Raúl y Rafaela quienes me exhortaron de forma extraordinaria para realizar el presente trabajo.

A mi director de tesis, el señor, maestro en ciencias, Juan Esteban Hernández Quintero, pues sin su participación este trabajo de tesis no hubiera sido posible.

A mis cuatro sinodales (Ing. Enrique Faustino Del Valle Toledo, Dr. Andrés Tejero Andrade, Dr. Osvaldo Sánchez Zamora, Ing. Gerardo Cifuentes Nava) que gracias a su amplio conocimiento en el presente tema, contribuyeron de manera sustancial en la corrección de esta publicación.

Al Ing. Edgar Angeles Cordero, quien me dio la pauta del tema de tesis y fue el iniciador de este trabajo, y también quisiera agradecer a al Ing. Eduardo Amador Terrazas por la asesoría y apoyo que me brindo.

I INTRODUCCIÓN.

| | |
|---|----|
| ❖ I.1.-OBJETIVO..... | 5 |
| ❖ I.2 ANTECEDENTES..... | 5 |
| ❖ I.3.-FUNDAMENTOS DEL METODO MAGNETOMÉTRICO DE EXPLORACION SOMERA..... | 5 |
| • I.3.1.-Propiedades Magnéticas de Los Materiales y Conceptos Fundamentales..... | 5 |
| • I.3.2.-Campo Magnético Terrestre y Correcciones..... | 13 |
| • I.3.3.-Adquisición de Datos Magnetométricos..... | 17 |

II METODOLOGÍA DE LA INVERSION.

| | |
|---|----|
| ❖ II.1.-TÉCNICA PARA PRODUCIR ESTIMACIONES DE PROFUNDIDAD PARA DATOS MAGNÉTICOS. (Thompson, 1982)..... | 18 |
| ❖ II.2.-PARÁMETROS DE FUENTES MAGNÉTICAS DE ESTRUCTURAS BIDIMENSIONALES USANDO LA DECONVOLUCÓN DE EULER EXTENDIDA (Mushayandebvu, 2001)..... | 24 |
| ❖ II.3.-SEÑAL ANALÍTICA EN ESTRUCTURAS 2D CON SECCIÓN DE CORTE POLIGONAL: SUS PROPIEDADES Y USOS PARA LA INTERPRETACIÓN AUTOMATIZADA DE ANOMALÍAS (Nabighian, 1972)..... | 28 |
| ❖ II.4.-APLICACIÓN A MODELOS SINTÉTICOS 2D..... | 32 |
| • II.4.1.- El Tubo Vertical..... | 33 |
| • II.4.2.- La Esfera..... | 40 |
| • II.4.3.- La Falla Vertical..... | 46 |

III APLICACIÓN

| | |
|---|----|
| ❖ III.1.-APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE TUBERIAS DE POZO CON CONTAMINANTES..... | 51 |
| • III.1.1.- Caso1 Comparativo Relevamiento Magnetométrico Terrestre de Rellenos Sanitarios: Estudio Piloto en Gualaguaychú, Entre Ríos, Argentina (Oriega, 2004)..... | 51 |
| • III.1.2.- Caso2 Propiedades Magnéticas de Barriles de Acero Inoxidable por Medio de mediciones de Campo Magnético en Laboratorio, (Dhananjay Ravat, 1996)..... | 54 |

| | |
|---|----|
| ❖ III.2.-IMPACTO AMBIENTAL EN MINATITLAN VERCRUZ Y ALREDEDORES..... | 57 |
| • III.2.1.-Antecedentes de Empresa Azufrera Panamericana..... | 57 |
| • III.2.2.-Ubicación Geográfica, Geología Local y Regional..... | 57 |
| • III.2.3.-Yacimientos de Azufre..... | 60 |
| • III.2.4.-Explotación del Yacimiento..... | 61 |
| • III.2.5.-Consecuencias Ambientales..... | 63 |
| • III.2.6.-Dictámenes Ambientales..... | 63 |

IV DETECCIÓN DE POZOS CONTAMINANTES

| | |
|--|-----|
| ❖ IV.1.-GENERALIDADES..... | 64 |
| ❖ IV.2.-ANOMALÍA “A”..... | 67 |
| • IV.2.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”..... | 67 |
| • IV.2.2.-Aplicación de la Señal Analítica..... | 70 |
| • IV.2.3.-Comparación Con Modelo Sintético..... | 73 |
| ❖ IV.3.-ANOMALÍA “B”..... | 77 |
| • IV.3.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”..... | 77 |
| • IV.3.2.-Aplicación de la Señal Analítica..... | 80 |
| • IV.3.3.-Comparación Con Modelo Sintético..... | 83 |
| ❖ IV.4.-ANOMALÍA “C”..... | 87 |
| • IV.4.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”..... | 87 |
| • IV.4.2.-Aplicación de la Señal Analítica..... | 90 |
| • IV.4.3.-Comparación Con Modelo Sintético..... | 93 |
| ❖ IV.5.-ANOMALÍA “D”..... | 97 |
| • IV.5.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”..... | 97 |
| • IV.5.2.-Aplicación de la Señal Analítica..... | 100 |
| • IV.5.3.- Comparación Con Modelo Sintético..... | 103 |

V CONCLUSIONES.

| | |
|----------------------------------|-----|
| ❖ V.1.-CONCLUSIONES FINALES..... | 107 |
|----------------------------------|-----|

BIBLIOGRAFIA

I.- INTRODUCCIÓN.

En el ámbito de la ingeniería y estudio de eventos físicos, se suelen realizar idealizaciones y suposiciones que son aproximadas a la realidad para tratar de definir, explicar o estimar ciertos comportamientos de fenómenos físicos, por lo que es evidente que los resultados de estas estimaciones son solo parecidos y en algunos casos completamente diferentes y sin embargo han sido de gran utilidad para el ser humano y gracias a esto se ha fundamentado el desarrollo tecnológico de la humanidad; por lo que respecta a esta tesis, se realiza el estudio de ciertas anomalías magnéticas (un total de 4), y para explicarlas y entenderlas se emplea el método de prospección magnética, por medio del cual se modelan cuerpos sintéticos que intentan emular su comportamiento los cuales se refieren a tubos de extracción de sulfuros y se espera que no sean exactamente iguales en ambos casos, pero si se espera que den la pauta para fundamentar la presencia de la fuente, y también proporcionen coherencia y confiabilidad al método de la modelación de cuerpos anómalos.

I.1 OBJETIVO

Los fines que se pretenden son producir una estimación confiable referente a la presencia de tubos de extracción que contienen sulfuros en su interior y que en la actualidad se encuentran inactivos; por medio del método de magnetometría terrestre usando la deconvolución de Euler, desarrollada a partir de la ecuación diferencial homogénea de Euler y así como también de la aplicación del método de la señal analítica aplicada a cada anomalía de la zona, se localizará y se darán dimensiones (aproximadas) de cada una de las fuentes en cuestión haciendo uso de la comparación de ambos resultados.

I.2 ANTECEDENTES

El método magnetométrico de exploración geofísico, ha sido ampliamente usado en la detección de estructuras metálicas asociadas a fuentes de contaminación del suelo, como lo reporta el trabajo de revelamiento magnético en Buenos Aires, Argentina (Orgeira, et al., 2004), de donde se reporto éxito en la aplicación del método magnetométrico de exploración somera en la detección de rellenos sanitarios clandestinos, basándose en el contenido de material metálico (tubos, latas barriles, etc.), en dicho trabajo obtiene una malla de datos con anomalías dipolares.

I.3.- FUNDAMENTOS DEL MÉTODO MAGNETOMÉTRICO DE EXPLORACIÓN SOMERA.

- I.3.1.-Propiedades Magnéticas de los Materiales y Conceptos Fundamentales

Las propiedades magnéticas de los materiales varían sobre amplios límites (Netleton, 1940). Esta variación puede ser considerada como el resultado de los diferentes valores en la densidad y volumen de elementos magnéticos, así como también el sentido en que estos puedan ser orientados y la persistencia en la que mantengan una orientación dada.

Las propiedades de los cuerpos magnetizados y sus campos se encuentran íntimamente relacionados y pueden ser cuantitativamente definidos en ciertos términos, las relaciones

entre una corriente eléctrica y un campo magnético es expresada por medio de la ley de Ampère (también llamada ley de Biot- Savart) tanto las corrientes eléctricas como el campo magnético son cantidades vectoriales y su dirección, así como también su magnitud y sentido se relacionan entre ellos mismos. Por lo que para el caso del potencial magnético, se considera a los efectos magnéticos externos de un cuerpo como la suma de los efectos de partículas magnéticas o dipolos que hacen que el cuerpo permanezca en estado magnético (Netleton, 1940), estos dipolos magnéticos son de carácter vectorial y tienen por lo tanto una asociación con la dirección, la magnitud y el sentido. Entonces la orientación de los dipolos que determina la magnetización puede ser en varias direcciones, por lo tanto, la definición del estado magnético o magnetización de un cuerpo requiere tanto de la magnitud como de la dirección, lo cual no ocurre en el caso del potencial gravitacional pues solo se ocupa la magnitud o sea, la masa.

Es conveniente suponer que para que un cuerpo se encuentre en estado magnético es gracias al arreglo de sus componentes magnéticos o dipolos, en donde cada uno consiste de un polo magnético positivo y uno negativo, separados por una pequeña distancia. Los dipolos se relacionan por medio de la influencia de un campo magnético externo, alineándose en algunas ocasiones con el campo.

En el estado desmagnetizado, los dipolos elementales tienen una distribución y orientación aleatoria. El campo de diferentes dipolos se neutraliza uno con otro, tal que no hay campo resultante y no hay influencia magnética fuera del cuerpo. Sin embargo, si el cuerpo es colocado en un campo magnético, los dipolos elementales tienden a alinearse algunas veces paralelos con el campo. A mayor fuerza del campo, su alineación de dipolos es más completa.

Después de que el cuerpo es magnetizado, se presenta un campo que es propio al cuerpo en todas las direcciones del espacio. Si el campo de magnetización externo es eliminado, el alineamiento tal vez podría desaparecer; esto ocurre para muchos materiales “suaves”, es decir, para materiales difícilmente magnetizables y entonces no tendrían un grande campo magnético propio, sin embargo en materiales “duramente” magnéticos, el alineamiento de los elementos magnéticos persiste y la magnetización se considera permanente. A continuación se presentan algunos valores de susceptibilidad magnética (TABLA I.3.1.1), los materiales que se presentan son propios al estudio en cuestión.

| MATERIAL | SUSCEPTIBILIDAD (1×10^{-3} [SI]) |
|-------------|--|
| AIRE | 0 |
| CUARZO | -0.01 |
| SAL DE ROCA | -0.01 |
| CALCITA | -0.001-0.01 |
| ESFELERITA | 0.4 |
| PIRITA | 0.05-5 |
| HEMATITA | 0.5-35 |
| ILLMENITA | 300-3500 |
| MAGNETITA | 1200-19200 |
| CALIZA | 0-3 |
| ARENISCA | 0-20 |
| ARCILLAS | 0.01-15 |
| ESQUISTOS | 0.3-3 |
| GNEIS | 0.1-25 |
| PIZARRA | 0-35 |
| GRANITO | 0-50 |
| GABRO | 1-90 |
| BASALTO | 0.2-175 |
| PERIDOTITA | 90-200 |
| AZUFRE | -1.1956×10^{-2} |

TABLA I.3.1.1.-Diferentes valores de susceptibilidad magnética de algunos materiales que son referentes al tema de estudio. (Escobar, 2009)

Los materiales pueden clasificarse magnéticamente según (Escobar, 2005) el valor de su susceptibilidad magnética, en tres diferentes grupos:

Materiales diamagnéticos
Materiales paramagnéticos
Materiales ferromagnéticos

MATERIALES DIAMAGNÉTICOS.- Este tipo de materiales se caracteriza por presentar una susceptibilidad negativa. Bajo la acción de un campo magnético externo H, se induce en el material un cambio en el movimiento orbital de sus electrones, del tal manera que los momentos magnéticos asociados a las corrientes así inducidas, producen una magnetización que es diferente de cero, pero muy pequeña. Según la ley de Lenz, la magnetización inducida es opuesta al campo magnético H que la produce, dando como resultado que la susceptibilidad sea negativa. Ejemplo son la acetona, petróleo, azufre, ácido clorhídrico, agua.

MATERIALES PARAMAGNÉTICOS.- Se caracterizan por tener una susceptibilidad positiva, relativamente pequeña. En ausencia de campo, todos los momentos magnéticos de los átomos se encuentran orientados al azar debido a una falta de acoplamiento de modo que la magnetización resultante es nula, bajo la actividad de un campo magnético, los

momentos magnéticos de los átomos tienden a alinearse en la dirección del campo resultando una magnetización diferente de cero.

La susceptibilidad de los materiales paramagnéticos depende de la temperatura, a una temperatura ambiente y bajo la acción de un campo magnético, la magnetización es relativamente pequeña, ya que existe en la estructura atómica un efecto de agitación térmica que impide un alineamiento de los momentos magnéticos. A bajas temperaturas, los efectos de desorden son menores, dándose un mayor alineamiento de los momentos magnéticos y por lo tanto una mayor magnetización, la susceptibilidad de los materiales paramagnéticos sigue la ley de Curie (Blakely, 1990). Como ejemplos esta el aluminio, litio, magnesio, oxígeno, molibdeno, iridio.

MATERIALES FERROMAGNÉTICOS.- Se distinguen por tener una susceptibilidad positiva, la propiedad por excelencia de estos materiales es el alineamiento paralelo espontáneo, que se da entre sus momentos magnéticos atómicos en ausencia de campo. Entre estos materiales se encuentra el hierro, cobalto y níquel. Estos materiales son los precursores del magnetismo en la materia.

Como el azufre es de gran importancia en este trabajo, se hablara en este apartado de sus usos.

El azufre se usa en multitud de procesos industriales como producción de ácido sulfúrico para baterías, la fabricación de pólvora y el vulcanizado del caucho. El azufre tiene usos como fungicida y en la manufactura de fosfatos fertilizantes. Los sulfatos se usan para blanquear el papel y en cerillas. El tiosulfato de sodio o amonio se emplea en la industria fotográfica como “fijador” ya que disuelve el bromuro de plata; y el sulfato de magnesio (formado a partir de magnesio y ácido sulfúrico) tiene usos diversos como laxante, exfoliante o suplemento nutritivo para plantas.

Es de color amarillo (FIGURA I.3.1.1), blando, frágil, ligero, desprende un olor característico a huevo podrido al mezclarse con hidrógeno y arde con llama de color azul, desprendiendo dióxido de azufre. Es insoluble en agua pero se disuelve en disulfuro de carbono.

En todos los estados (sólido, líquido y gaseoso) presenta formas alotrópicas cuyas relaciones no son completamente conocidas. Las estructuras cristalinas más comunes son el octaedro ortorrómbico (azufre α) y el prisma monoclinico (azufre β), siendo la temperatura de transición de una a otra de 96 °C; en ambos casos el azufre se encuentra formando moléculas de S₈ con forma de anillo, y es la diferente disposición de estas moléculas la que provoca las distintas estructuras cristalinas. A temperatura ambiente, la transformación del azufre monoclinico en ortorrómbico, es más estable y muy lenta.

Al fundir el azufre, se obtiene un líquido que fluye con facilidad. Sin embargo, si se calienta, el color se torna marrón algo rojizo, y se incrementa la viscosidad. Este comportamiento se debe a la ruptura de los anillos y la formación de largas cadenas de átomos de azufre, que pueden alcanzar varios miles de átomos de longitud, tal que se enredan entre sí disminuyendo la fluidez del líquido; el máximo de la viscosidad se alcanza

en torno a los 200 °C. Enfriando rápidamente este líquido viscoso se obtiene una masa elástica, de consistencia similar a la de la goma, denominada «azufre plástico» (azufre γ) y formada por cadenas que no han tenido tiempo de reordenarse; transcurrido cierto tiempo la masa pierde su elasticidad cristalizando en el sistema rómbico. Estudios realizados con rayos X muestran que esta forma amorfa puede estar constituida por moléculas de S_8 con estructura de hélice espiral.

En estado vapor también forma moléculas de S_8 , pero a 780 °C ya se alcanza el equilibrio con moléculas diatómicas y por encima de aproximadamente 1800 °C la disociación es completa y se encuentran átomos de azufre.



FIGURA I.3.1.1.- Muestra de azufre en estado sólido. (Wikipedia, 2009)

A continuación se presentan ciertos conceptos básicos que son necesarios para tener un mejor entendimiento de lo referente a la prospección magnética, hay que mencionar que los conceptos aquí presentados (así como también en todo el desarrollo del presente trabajo) son basados de acuerdo al Sistema Internacional de medidas “SI”.

Inducción Magnética.-La fuerza o magnitud de un campo magnético da lugar a la existencia de un flujo magnético, así como un campo eléctrico puede dar origen a un flujo de carga eléctrica (Parasnis, 1986). La densidad de flujo magnético, que es el flujo por unidad de área (también llamada inducción magnética), esta denotada por “ B ”. Si “ H ” es la intensidad del campo, entonces:

$$B = H \cdot \underline{\hspace{2cm}} \quad (I.3.1.1)$$

Donde $\underline{\hspace{2cm}}$ es conocida como la permeabilidad absoluta del medio. En el Sistema Internacional de Unidades “SI”, H es medido en Ampere sobre metro [A/m] y se considera como la fuerza del campo magnético que existe en el centro de un enrollado

circular de un metro de diámetro, colocado en el aire y transportando el cable una corriente de un ampere. (FIGURA I.3.1.2)

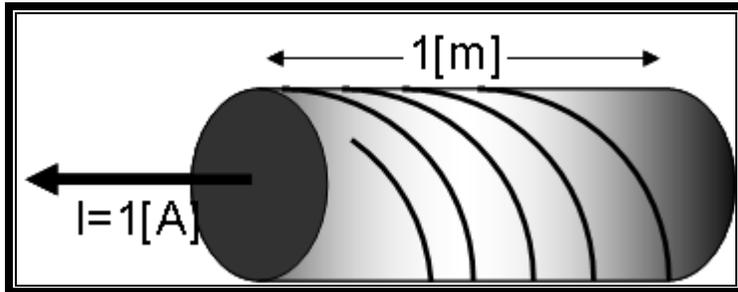


Figura I.3.1.2.- Representando la intensidad de campo magnético H .

Unidades de Medición.- Las unidades del flujo magnético en el SI son volts por segundo $[V \cdot s]$; las cuales son conocidas con el nombre de Weber $[Wb]$ por lo que para la densidad de flujo magnético (o inducción magnética, \bar{B}) se tendrá $[Wb/m^2]$, es decir, es un Volt por segundo sobre cada unidad de área, y a esta última combinación de unidades se le denomina tesla $[T]$. Esta unidad es de gran importancia, pues el campo magnético que se mide en aplicaciones geofísicas es precisamente la densidad de flujo. Para muchos de los propósitos de la geofísica, las unidades de densidad de flujo son demasiado grandes por lo que es más conveniente usar el nano tesla $[nT]$, en donde

$1[nT] = 1 \cdot 10^{-9}[T]$. Es importante hacer la aclaración de que en algunas ocasiones B es llamado densidad de flujo por unidad de área.

Permeabilidad Absoluta.- De acuerdo a la ecuación (I.3.1.1) la permeabilidad absoluta es igual a B/H , sus dimensiones son de Ohm por segundo sobre unidad de longitud $[\Omega \cdot s/m]$. La permeabilidad absoluta en el vacío es muy importante y es denotada por μ_0 , de modo que la intensidad del campo magnético H crea una densidad de flujo de

$$B_0 = \mu_0 H. \text{ (I.3.1.2)}$$

Para muchos propósitos prácticos, la permeabilidad absoluta del aire puede tomarse como μ_0 . En donde μ_0 toma el valor de $4 \cdot 10^{-7} [\Omega \cdot s/m]$ de modo que si hay muchos espacios vacíos (aire), habrá una densidad de flujo de B_0 , con una correspondiente intensidad del campo H igual a B_0 / μ_0 .

Permeabilidad Relativa.- Si para un medio que es diferente al vacío, se hace la sustitución $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ en la ecuación (I.3.1.1), entonces se obtendrá lo siguiente:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 H$$

$$B = \mu_0 H + \mu_0 (\mu_r - 1) H$$

$$B = \mu_0 H + \mu_0 k H$$

$$B = \mu_0 H(1+k) \quad (I.3.1.3)$$

Donde $k = (\mu_r - 1)$, y por lo tanto $\mu_r = k + 1$, el cual es precisamente el valor de permeabilidad relativa el cual resulta ser adimensional y “puro” al igual que el valor de k que es llamado como susceptibilidad magnética. Siempre se cumple que para el vacío $k = 0$ y $\mu_r = 1$.

Intensidad de Magnetización.-Para el vacío, la ecuación (I.3.1.3) se convierte en $B = \mu_0 H$, para obtener una densidad de flujo magnético como en (I.3.1.1) tendría que ser necesario un campo de fuerza H adicional, de modo que sería Hk , el cual es llamado intensidad de magnetización y se puede imaginar como ciertos puntos de materia que están ocupando la cavidad que se encuentra supuestamente al vacío. La intensidad de magnetización se suele representar por la literal M , así:

$$M = kH \quad (I.3.1.4)$$

Las unidades de M resultan ser de un Ampere sobre cada unidad de longitud, es decir $[A/m]$. Finalmente, sustituyendo (I.3.1.4) en (I.3.1.3), se tendrá:

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (I.3.1.5)$$

Funciones armónicas.-.

Las condiciones que cumple una función armónica son las siguientes:

- 1) Satisface la ecuación de Laplace. $\nabla^2 = 0$
- 2) Es continua la función y al menos tendrá segunda derivada .
- 3) Tiene segunda derivada.

De modo que una función que es armónica a través de una región R puede tener máximos y mínimos en la frontera de R y no dentro de R misma.

Aplicación de la ecuación de Laplace para obtener la ecuación de homogeneidad de Euler.-
 Los campos potenciales fuera de regiones con fuente magnética, satisfacen la ecuación de Laplace, que en coordenadas cartesianas es:

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (1.3.1.6)$$

Definiendo a D y D' como la representación de muchas operaciones diferenciales en coordenadas cartesianas, tales como $\frac{\partial}{\partial x}$, $\frac{\partial^2}{\partial y^2}$ o ∇^2 en donde ambos operadores son conmutativos, es decir

$DD'f(x, y, z) = D'Df(x, y, z)$ y en particular $D\nabla^2 U(x, y, z) = \nabla^2 DU(x, y, z)$ Aquí si $U(x, y, z)$ es una función armónica entonces tiene derivadas espaciales $U(x, y, z)$

Este teorema provee de una medida para generar una gran cantidad de funciones armónicas y que resultan ser la solución de la ecuación de Laplace. Por ejemplo,

$$\nabla^2 \frac{1}{r} = 0 \quad ; \forall r \neq 0$$

Donde reconocemos inmediatamente que $\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right)$, y $m \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right)$ (que es el potencial magnético de un dipolo) es también armónico. Si se puede mostrar que el campo magnético escalar de la tierra es armónico, entonces las componentes del mismo campo escalar también deben ser armónicas.

Una función V es definida como homogénea y de grado n si satisface la ecuación de Euler:

$$x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right) + y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right) + z \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) = nV \quad (I.3.1.7)$$

Esta función homogénea que también satisface la ecuación de Laplace, (Blakely, 1996) es conocida con el nombre de "funciones armónicas sólidas esféricas" y es la representación de la ecuación diferencial homogénea en derivadas parciales de Euler, y se verá más adelante que muchas fuentes magnéticas pueden ser representadas por la ecuación (I.3.1.7)

Ejemplos específicos de esta función son: x, y, z (de grado 3), x, y (de grado 2), x (de grado 1), $\log \left(\frac{r+z}{r-z} \right)$ (de grado cero), $\left(\frac{1}{r} \right)$ (de grado -1), y $\frac{z}{r^3}$ (de orden -2).

- I.3.2.- Campo Magnético Terrestre y Correcciones.

Antes de discutir las correcciones que suelen practicarse a las observaciones de campo magnético, es importante tener entendimiento de la naturaleza del campo magnético, y por lo tanto, a continuación se presenta un esbozo que se refiere a sus particularidades.

Se sabe que parte del campo geomagnético existe por causas internas del planeta, y otra parte es concebida por causas externas, esto es, el campo magnético originado dentro de la tierra es aproximadamente dipolar, sin embargo, el planeta es golpeado por viento solar (un flujo de plasma emitido por el sol). La región en la que interactúan el viento solar y el campo magnético interno de la tierra es llamado magnetosfera y esta interacción hace que se pierda el comportamiento dipolar del campo magnético, aunado a otros efectos propios de la actividad terrestre como el efecto de rotación y las mareas, los cuales son otra causa de alteración del campo, pues estos dos últimos efectos generan corrientes eléctricas en la zona de la ionosfera (región alrededor del planeta en la que hay interacciones en latitudes que comprenden de 50 a 1500 [Km.]) y causa cambios en el campo magnético, de hasta 1000 [nT] sobre la superficie terrestre. Los efectos térmicos terrestres también provocan cambios al campo magnético.

Por lo que se refiere al origen del campo externo es causado probablemente por corrientes eléctricas en las partes elevadas de la atmósfera terrestre, pues se sabe que la atmósfera superior esta ionizada, la cual es provocada por la radiación ultravioleta de los rayos solares. La variación en el número de iones también es causa de cambio en el campo magnético en la superficie de la tierra. La circulación diaria de las corrientes de aire en la atmósfera que son causadas por la atracción gravitacional del sol y la luna, dan una satisfactoria explicación de las variaciones magnéticas diarias, en donde estas variaciones son mayores en el verano que en invierno, con un rango de variación en intensidad vertical de hasta 100 [nT]. Ocasionalmente el campo magnético puede distribuirse de forma repentina e irregular gracias a las tormentas magnéticas. Aparentemente son causadas por cambios repentinos en la ionización de la atmósfera superior

Las cantidades vectoriales en estudios geomagnéticos deben ser descritos bajo una estructura de ejes con referencia a los puntos de observación sobre la superficie terrestre, estas cantidades vectoriales pueden ser descritas en términos de tres componentes mutuamente ortogonales en un sistema cartesiano (FIGURA I.3.2.1), en donde se acostumbra que el eje “x” este direccionado hacia el Norte, el eje “y” direccionado al Este y el eje “z” positivo hacia abajo de la superficie de medición, de modo que en función de dicha nomenclatura, se definen las siguientes entidades vectoriales:

$P(X, Y, Z)$ = Punto de observación.

\bar{T} = Vector de campo total magnético.

T_x = Componente horizontal de campo magnético direccionado hacia el Norte.

T_y = Componente horizontal de campo magnético direccionado al Este.

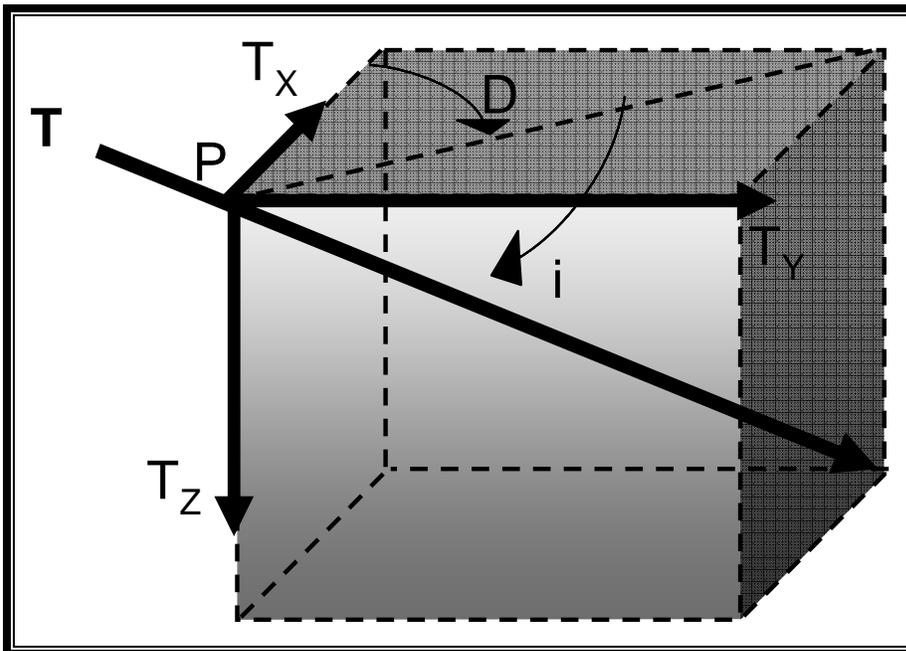
T_z = Componente vertical de campo magnético direccionado hacia abajo.

D = Declinación (ángulo entre el vector de campo total magnético (T) y el Norte magnético)

i = Inclinación magnética (ángulo entre la superficie de medición y el vector de campo total magnético T)

De modo que las tres componentes del vector de campo total magnético son T_x, T_y, T_z , su módulo es la cantidad que se mide en las exploraciones, aunque algunos magnetómetros son capaces de medir todas sus componentes.

La intensidad y declinación son las dos componentes de medición más importantes que están involucradas en la prospección magnética y gracias a estas se termina de definir el vector de campo total magnético.



FIGURAL.3.2.1.-
Esquema que define las componentes de campo magnético.

Muchas de las mediciones magnéticas son realizadas en la superficie terrestre (Netleton, 1940). Por lo tanto, el conocimiento de las propiedades magnéticas y las condiciones de la tierra son completamente necesarias así como también el proponer estimaciones que puedan ser tomadas para la contribución de los efectos magnéticos. El campo magnético terrestre sufre de ciertos cambios a lo largo del tiempo. Por lo que para un tiempo y lugar determinado, la variación en el valor del campo puede deberse a tres razones:

1.-Un cambio relativamente lento, de carácter secular, causado por el estado interno de la tierra y que posee una forma rugosa, la cual le da forma a la tierra de una esfera no muy bien formada, pero uniformemente polarizada, el rango de variación es de 50 a 100 [nT/año] esta variación es obtenida por mapas de contorno que son basados en algún modelo de IGRF.

2.-Una parte diurna de valor relativamente pequeño (100 [nT]), que cambia de forma errática con el tiempo y que es aproximado por ciclos diarios con posibles perturbaciones

relativamente fuertes en lapsos de tiempo cortos debido a las tormentas magnéticas, y otros fenómenos que ya han sido explicados antes.

3.-Variaciones menores con un rango que puede iniciar desde algunos cuantos nano teslas, pero que puede alcanzar hasta los 1000 [nT], causadas por inhomogeneidades magnéticas de la corteza terrestre. Esta es la parte que es de gran interés en la prospección magnética. A esta porción se le suele llamar la anomalía.

Las partes secular y diurna son removidas como parte de la anomalía, pero en forma aislada. Para una primera visualización, la forma general del campo geomagnético en la superficie de la tierra es una esfera polarizada, con un polo magnético cerca del polo norte geográfico, el cual por convención es negativo y otro cercano al polo sur geográfico, que en este caso es el positivo.

Debido al constante cambio del campo, se realizan mediciones en estaciones fijas, aviones, barcos y sistemas de medición terrestre, con la finalidad de realizar cartas y tablas que expliquen su comportamiento. Las cartas más usadas son aquellas proporcionadas por el campo de referencia geofísico internacional (IGRF) el cual es derivado de un conjunto de armónicos esféricos para ajustar el campo actual en un tiempo en particular ($\nabla V = 0$)

La intensidad y declinación total son las dos componentes de medición más importantes que están involucradas en la prospección magnética; la primera, o sea la intensidad, da el valor de fondo del campo y la segunda, o sea la declinación, da la dirección del campo con respecto al norte magnético.

CORRECCIONES.- Antes de que se presenten los datos emanados de la exploración magnética sobre un plano, las lecturas deben pasar por ciertas correcciones. La de temperatura, la variación diurna y la normal y en ciertas condiciones también se debe realizar la corrección por terreno, a continuación se menciona un esbozo de estas correcciones (Netleton, 1940).

CORRECCIÓN DIURNA.- La variación diurna del campo magnético terrestre puede tener una variación de 10 a 100 [nT] y debe ser tomada en cuenta para reducir los datos proporcionados por los magnetómetros de campo. La reducción puede hacerse por varios sistemas; el procedimiento usado con más frecuencia cuando se usa un solo aparato, es de regresar a la estación de base cada dos horas y construir una curva de variación para la estación base con este intervalo de tiempo. Pueden existir irregularidades del orden de 10 [nT], por lo que este sistema tampoco puede utilizarse si la precisión requerida es menor al valor antes mencionado. Cuando se emplean dos instrumentos que no distan más de 80 [Km.] y cuando el de la estación base registra continuamente, la precisión de la corrección diurna debe ser de unos cuantos [nT].

Para el caso de que se cuenten con dos magnetómetros, la corrección diurna se estima aplicando la siguiente ecuación:

$$CD = (Ba - PBa) \text{_____} \quad (I.3.2.1)$$

La ecuación anterior (I.3.2.1) representa el valor a corregir, es decir, simplemente es el valor que se suma o resta (dependiendo de su signo) de los datos obtenidos en campo, por otra parte, la corrección será:

$$CD = (Ba - PBa) + da \text{_____} \quad (I.3.2.2)$$

En donde: CD es la corrección diurna.

Ba Son los valores del magnetómetro base.

PBa Es el valor promedio del mismo magnetómetro base.

da Son los datos emanados de un magnetómetro móvil.

Para corregir las observaciones de campo a partir de curvas de variación diurna, es necesario anotar con precisión la hora en la que se realizaron dichas mediciones y se procede de la forma siguiente.

Primero se grafican los valores leídos por un magnetómetro base al mismo tiempo que se aplica una recta de regresión lineal de dicha curva. Para los tiempos en que se tomo lectura, se resta el valor del magnetómetro base con el valor correspondiente a la línea de regresión, obteniendo un valor Δ ,

$$\Delta = Ba - V_r \text{_____} \quad (I.3.2.3)$$

La ecuación anterior (I.3.2.3) representa el valor a corregir (Δ), el cual habrá de ser restado o sumado (según su signo) a los datos leídos por el magnetómetro móvil (da) con el objeto de generar la corrección diurna (CD_1), esto es:

$$CD_1 = da - \Delta \text{_____} \quad (I.3.2.4)$$

Donde:

V_r : Valores recta de regresión.

CD_1 : Corrección por variación diurna aplicando una recta de regresión.

da : Valor de magnetómetro móvil.

Δ : Resta del valor de magnetómetro base con recta de regresión para los tiempos de lectura, que es el valor de corrección.

Quitando el IGRF.- Esta corrección es parecida al elipsoide de referencia en el caso de la prospección gravimétrica, a grandes rasgos, se procura dar un valor "teórico" del campo magnético para un tiempo y fecha en especial por medio de un modelo matemático cuyo nombre es IGRF (International Geomagnetic Reference Field), el cual consiste de

coeficientes de Gauss, los cuales crearan el valor de campo magnético de la corteza terrestre. Como los valores de campo magnético varían con respecto al tiempo, se genera un diferente modelo de IGRF cada cinco años. De esta forma, los valores de latitud y longitud evaluados en el correspondiente IGRF darán valores de un campo magnético que se pueden suponer como “teóricos” los cuales tienen que ser restados de los valores de campo obtenidos en la exploración

$$C_{IGRF} = T_{OBS} - T_{IGRF} \text{ (I.3.2.3)}$$

Donde:

C_{IGRF} : Eliminación de IGRF.

T_{OBS} : Valores de campo observados en la exploración.

T_{IGRF} : Valores de campo magnético emanados de evaluar la longitud y latitud en el modelo IGRF y que se pueden tomar como “teóricos”, que son valores de corrección.

- I.3.3.- Adquisición de Datos Magnetométricos.

Las mediciones magnéticas en la geofísica aplicada a menudo son tomadas como determinaciones relativas en que los valores de uno o más elementos del campo magnético en muchos puntos son obtenidos por medio de una diferencia entre sus valores, realizados sobre una base de puntos previamente seleccionada, sin embargo, muchos instrumentos modernos detectan directamente los valores de campo total o la componente del campo magnético vertical. Cuando se realizan estas mediciones absolutas (hoy en día es la más usual) el valor de campo normal en el área es restado de las observaciones y solo el resultado anómalo es usado para la interpretación.

Si el área de investigación es relativamente pequeña, el campo geomagnético normal puede ser considerado constante y este valor es determinado de acuerdo a los datos de campo obtenidos. En muchas áreas grandes, la variación del campo normal puede ser significativa y entonces se debe tomar en cuenta, lo cual ocurre en la conexión de varias áreas pequeñas de investigación.

EXPLORACIONES TERRESTRES.- Cuando en el área de investigación magnética se ha seleccionado una línea base, entonces la línea es seleccionada en forma paralela al rumbo geológico y las mediciones son hechas con una separación regular a lo largo de una línea que es perpendicular a la línea base. En exploraciones de detalle, las estaciones de medición se encuentran a una separación menor (1 o 2 [m]), si no hay un rumbo geológico visible, entonces la línea base será inicialmente establecida en varias direcciones que resulten convenientes. En exploraciones de reconocimiento, las mediciones son hechas en algunas ocasiones a lo largo de líneas que no son bien delimitadas y son difíciles de reconocer por los diversos sistemas de mallas, pero en exploraciones detalladas se necesita una buena determinación de la malla para las estaciones de medición.

Las mediciones relativas deben estar posicionadas para un punto de referencia lejano de perturbaciones artificiales como aquellas debidas a cables eléctricos o tormentas eléctricas, y los valores de campo magnético en todos los puntos son medidos con diferencias positivas o negativas.

Ciertas precauciones deben de ser tomadas en los levantamientos magnéticos al momento de realizar la medición en campo, los materiales metálicos de uso personal como los relojes de mano, la hebilla del cinturón, llaves, navajas, y más, pueden alterar los datos de las mediciones observadas y por lo tanto se producirían valores erróneos.

II.- METODOLOGÍA DE LA INVERSIÓN.

II.1.-TÉCNICA PARA PRODUCIR ESTIMACIONES DE PROFUNDIDAD PARA DATOS MAGNÉTICOS

“DECONVOLUCION DE EULER CLASICA (Thompson 1982)”

En este apartado se presenta la base teórica de software propio para el tratamiento de los datos de campo de métodos potenciales, más específicamente, de fuentes magnéticas, y se le referirá aquí como “DECONVOLUCIÓN DE EULER”.

Basado en la ecuación de homogeneidad de Euler “EDE” (apartado I.3.1, ecuación I.3.1.7), el método reporta ciertas aproximaciones referentes a la profundidad a la que se encuentran ciertas fuentes magnéticas por medio de un índice estructural. Sirve para una amplia gama de estructuras geológicas como diques, fallas, contactos magnéticos, extrusivos, intrusivos y más.

Este método pertenece a la clase de técnicas que en algunas ocasiones son referidas como “técnicas automáticas”. Estas técnicas son designadas para realizar un análisis por cómputo asistido con gigantescos volúmenes de datos magnéticos digitales, contrario a estos métodos “automáticos” se encuentran los métodos que utilizan regla de dedo, curvas características, iteraciones o graficado de curvas inversas, los cuales tienen muchas limitaciones con las cantidades grandes de datos.

Ahora bien, varios métodos de cómputo asistido de clase “automática” han sido publicados, dentro de los cuales se encuentra O’Brien (1972), el cual reporta una técnica que básicamente localiza los vértices de un modelo poligonal. Koulomzine (1970) y Naudy (1971) reportan un método que utiliza modelos de prismas verticales y placas delgadas.

La más útil técnica es el método conocido como deconvolución de Werner (1953) en donde se muestra que una simple ecuación de un dique delgado bidimensional (2D), se escribe en forma de parámetros lineales.

Hartman (1971) extiende la técnica de Werner para incluir una variedad de análisis de discontinuidades magnéticas a través del uso de las derivadas verticales y horizontales de intensidad total de campo magnético.

La ventaja potencial de la aplicación de la “EDE” es que el método no asume modelos geológicos particulares, no genera muchas suposiciones de restricción sobre el modelo geológico y por lo tanto es aplicable a una mayor variedad de situaciones que en otras técnicas, e incluso, puede ser aplicado en forma directa a mallas y planos magnéticos.

La técnica esta basada en una relación de homogeneidad de la ecuación de Euler y difiere de técnicas similares en que es válida cuando no se asume un modelo geológico previo, sin embargo, esta flexibilidad sugiere una carga pesada para el intérprete y se necesita una amplia experiencia en el modelado.

A continuación se presenta la teoría matemática que sustenta a esta técnica. Para dar origen a la ecuación de Euler, es necesario imaginar muchas ecuaciones de tres coordenadas cartesianas x, y, z denotadas por $f(x, y, z)$ considerando al plano de observación en $z = 0$ donde z es positivo hacia abajo. Por convención, el eje "x" es referido hacia el Norte, y el eje "y" es referido al Este.

La función $f(x, y, z)$ es supuesta como homogénea y de grado n , de modo que se cumple que:

$$f(tx, ty, tz) = t^n f(x, y, z) \quad \text{(II.1.1)}$$

Además, si $f(x, y, z)$ es homogénea y de grado n , entonces, la siguiente ecuación debe de ser satisfecha (condición de homogeneidad para ecuaciones diferenciales)

$$x \frac{\partial f}{\partial x} + y \frac{\partial f}{\partial y} + z \frac{\partial f}{\partial z} = nf \quad \text{(II.1.2)}$$

Esta ecuación diferencial en derivadas parciales es conocida como la ecuación homogénea de Euler, o simplemente como la ecuación de Euler, que es igual a la ecuación I.3.1.7

Suponiendo que la función $f(x, y, z)$ es una función de la forma

$$f(x, y, z) = \frac{G}{r^N} \quad \text{(II.1.3)}$$

Donde $r = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ y $N = 1, 2, 3$; y que además G no depende de x, y, z . Claramente la ecuación (II.1.3) es homogénea y de grado $n = N$. Muchos puntos simples de fuentes magnéticas tienen la forma de la ecuación (II.1.3)

Considerando ahora un punto fuente (punto masa, polo magnético aislado, etc.) localizado en el punto x_0, y_0, z_0 que es relativo al plano de medición, se tendrá entonces que la intensidad magnética deberá tener la forma (Thompson, 1982)

$$\Delta T(x, y) = f|(x - x_0), (y - y_0), z_0| \quad \text{(II.1.4)}$$

Que es la forma funcional de la ecuación de Euler, la cual puede ser escrita como

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial y} - z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x, y) \quad \text{(II.1.5)}$$

El gradiente en las tres direcciones puede ser calculado por medio de la teoría de potencial estándar, en muchos casos, el gradiente vertical puede ser medido y usado directamente en la ecuación (II.1.5) y además puede ser usada para analizar mapas magnéticos, sin embargo, en el presente trabajo, el objetivo de esta expresión esta enfocado sobre el perfil de los datos de la línea de medición. En este caso, el eje coordenado "x" coincide perfectamente con la línea de perfil, y el eje coordenado "y" es un conjunto de ceros a lo largo del perfil (FIGURA II.1.1). Por consecuencia de lo anterior, el gradiente transversal ($\partial \Delta T / \partial \Delta y$) en la ecuación (II.1.5) es igual a cero; de modo que se supone un modelo 2D, para lo cual, se hace la suposición de que el cuerpo anómalo es transversalmente simétrico al perfil.

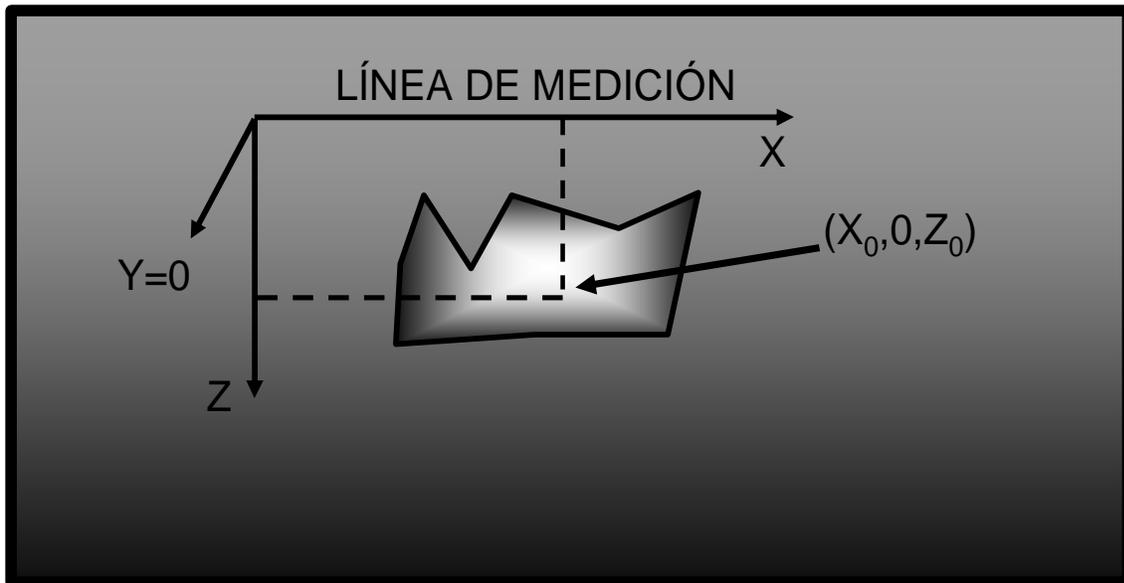


Figura II.1.1

Mostrando la forma en la cual se establece la ecuación homogénea de Euler, el segundo término del lado izquierdo de la ecuación II.1.5 es igual a cero.

De acuerdo a lo anterior, se deduce que la ecuación (II.1.5) para el perfil, será

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} - z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(x)$$

Desarrollando esta última expresión, se tiene

$$x \frac{\partial \Delta T}{\partial x} - x_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} - z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N \Delta T(X)$$

Reagrupando

$$x_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + z_0 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = x \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + N \Delta T(x) \quad \text{(II.1.6)}$$

Las derivadas o gradientes en la ecuación (II.16) suelen ser medidas, o más comúnmente, calculadas por medio de los datos, en el caso de que la derivada vertical $\partial \Delta T / \partial z$ sea calculada por el campo total observado ΔT , entonces se puede hacer la suposición de un modelo 2D. Las únicas cantidades desconocidas en la ecuación (II.1.6) son x_0, z_0, N ; las coordenadas (x_0, z_0) representan la profundidad y localización a lo largo del perfil del punto fuente equivalente y N es el tipo de fuente que mejor representa a la anomalía (o sea el índice estructural) por lo que varios modelos simples tienen su propio valor de N determinado, además, el índice estructural, también es una medida de que tan puntiaguda puede ser la curva de la anomalía de acuerdo a su profundidad. Se muestran los índices estructurales (TABLA II.1.1) para varios modelos de punto simple (fuentes puntuales). Por ejemplo; un dique angosto 2D, tiene un valor de $N = 1$ en el polo magnético, mientras tanto, un contacto geológico en el polo tiene un índice estructural de $N \leq 0.5$. La conexión entre el índice estructural y las anomalías geológicas reales, forma la base de la "EDE".

| Modelo simple | N |
|------------------|-----|
| Línea de polos | 1.0 |
| Polo | 2.0 |
| Línea de dipolos | 2.0 |
| Punto dipolar | 3.0 |

TABLA II.1.1

Tabla que muestra los índices estructurales propuestos por Thompson para cuerpos simples. Estos valores serán retomados en capítulos posteriores.

La ecuación (II.1.6) habrá de ser resuelta para las incógnitas x_0, z_0, N y evaluando las derivadas y los valores de campo total con tres diferentes coordenadas "x" a lo largo del perfil, resultando tres ecuaciones con tres incógnitas, que pueden ser en principio resueltas si el determinante de este sistema no es cero.

Por otra parte, la aplicación directa de la ecuación (II.1.6) a los datos observados no es útil debido a las siguientes tres razones:

- 1.- Muchas anomalías en el polo se ajustan bien con altos índices estructurales, sin embargo, pequeños índices estructurales son mejores indicadores de profundidad.
- 2.- Un absoluto y único valor de campo anómalo ΔT raramente se presenta en las mediciones, si no más bien, viene acompañado del campo regional, el cual en la ecuación (II.1.6) no se toma en cuenta, y por lo tanto se debería hacer una separación.
- 3.- Raramente, las anomalías se presentan como un punto aislado, mas bien se presentan en cuerpos multipolares.

Estos tres factores producen una solución de la ecuación (II.1.6) muy irreal y errática, por lo que se deben desarrollar métodos que eliminen a estos tres problemas.

El primer problema es referente a estimar profundidades con bajos valores de índice estructural, el cual es resuelto mejorando el análisis para una serie de índices estructurales preestablecidos, para los cuales se dan 5 índices que son presentados en la tabla (II.1.2).

| Índice estructural N | Símbolo |
|----------------------|---------|
| 1.00 | + |
| 1.50 | ◇ |
| 2.00 | □ |
| 2.50 | ○ |
| 3.00 | △ |

TABLA II.1.2

Indicando la simbología y colores de los índices estructurales.

Esto hace posible determinar el índice estructural más idóneo por medio de la elección de cinco diferentes índices para una anomalía dada, y el primer problema planteado es resuelto.

Por lo que respecta al segundo problema, se asume ahora que el campo anómalo es perturbado por una cantidad constante B, de modo que la cantidad de campo observada será

$$T(x) = \Delta T(x) + B \quad \text{(II.1.7)}$$

Donde B es una cantidad constante en la coordenada x sobre la porción del perfil donde se realiza el análisis. Resolviendo la ecuación (II.1.7) para ΔT , se tendrá

$$\Delta T(x) = T(x) - B$$

Sustituyendo este último resultado en la ecuación (II.1.6)

$$x_0 \frac{\partial}{\partial x} [T(x) - B] + z_0 \frac{\partial}{\partial z} [T(z) - B] + N[T(x) - B] - x \frac{\partial}{\partial x} [T(x) - B] = 0$$

Desarrollando

$$x_0 \frac{\partial}{\partial x} [T(x)] - x_0 \frac{\partial}{\partial x} [B] + z_0 \frac{\partial}{\partial z} [T(z)] - z_0 \frac{\partial}{\partial z} [B] + N[T(x)] - NB - x \frac{\partial}{\partial x} [T(x)] + x \frac{\partial}{\partial x} [B] = 0$$

Eliminando términos (la derivada parcial con respecto a una constante es cero)

$$x_0 \frac{\partial}{\partial x} [T(x)] + z_0 \frac{\partial}{\partial z} [T(z)] - N[T(x)] + NB - x \frac{\partial}{\partial x} [T(x)] = 0$$

Reagrupando

$$x_0 \frac{\partial}{\partial x} [T(x)] + z_0 \frac{\partial}{\partial z} [T(z)] + NB = x \frac{\partial}{\partial x} [T(x)] + N[T(x)] \quad \text{(II.1.8)}$$

Por lo que las anomalías actuales son solo aproximadas por simples modelos. El tercer mayor problema es el de resolver para los valores desconocidos de x_0, y_0, B por medio de la generación de un conjunto de ecuaciones lineales sobredeterminado. Evaluando la ecuación (II.1.8) con por lo menos 4 puntos diferentes que se encuentren sobre el perfil, es decir, $(x_1, 0), (x_2, 0), (x_3, 0), (x_4, 0)$, se obtiene el sistema sobredeterminado resolviendo por el método de los mínimos cuadrados.

La solución por medio de los mínimos cuadrados del sistema de ecuaciones sobredeterminado genera además una estimación de la desviación estándar del parámetro z_0 , esta cantidad σ_z es tomada como una barra de error en la estimación de profundidad y forma la base para el algoritmo que determina si la estimación de la profundidad será aceptada o no.

Los resultados del procedimiento consisten de imprimir y graficar los datos en pantalla, si el criterio de aceptación es adecuado el símbolo del índice es graficado con coordenadas (x_0, z_0) y el valor de $\pm \sigma_z$ es indicado por una barra de error. A través de la deconvolución de varias ventanas, junto con los 5 diferentes índices (Tabla II.1.2), y con el perfil magnético completo se pueden realizar muchas estimaciones de la profundidad. El valor de la tolerancia de aceptación (TOL) depende de la calidad de los datos y debe de ser ajustada por el intérprete de forma empírica, por ejemplo, para datos aeromagnéticos de alta resolución, los valores que cumplen la siguiente desigualdad son los que se grafican.

$$TOL = 20 \leq \frac{Z_0}{N_z}$$

Z_0 y N es el índice estructural y tamaño de ventana aplicados a la deconvolución y 20 representa un valor dado por el intérprete.

Estructuras magnéticas típicas que generalmente se presentan y que suelen ser de interés son la esfera, tubo y falla vertical y contactos; para lo cual, se modelaran sintéticamente en capítulos posteriores de este mismo escrito (sección II.4) sin embargo es conveniente adelantar que la elección del índice estructural se basará en la concentración y cantidad de los símbolos de la tabla II.1.2 en pantalla, aunado a la geometría que formen estas concentraciones junto con la intuición y experiencia del intérprete.

La “EDE” puede ser aplicada a diferentes inclinaciones magnéticas, sin embargo, las estimaciones de profundidad son más exactas cuando los datos se les aplica una reducción al polo, se dice que conforme la declinación magnética decrece (thompson, 1973), los modelos simples tienden a sobreestimar su profundidad y por consecuencia se recomienda aplicar una reducción al polo para cuando se trabaje con datos cercanos a bajas latitudes.

II.2.- PARÁMETROS DE FUENTES MAGNÉTICAS DE ESTRUCTURAS BIDIMENSIONALES USANDO LA DECONVOLUCIÓN DE EULER EXTENDIDA (Mushayandebvu, 2001)

A grandes rasgos, en esta parte referente a la deconvolución de Euler (“EDE”) lo que se trata es de introducir una relación adicional que expresa la transformación de funciones homogéneas bajo un rotacional.

Se trata de complementar la definición de la fuente con la combinación de funciones a las cuales se les conoce con el nombre de “deconvolución de Euler expandida para estructuras 2D”, la cual da una mejor estimación de los parámetros de la fuente que permiten la determinación del contraste de susceptibilidades magnéticas junto con el buzamiento de la estructura (siempre que se trate de un contacto o de láminas delgadas). Como consecuencia se obtendrá un índice estructural más adecuado por medio de un conocimiento previo de susceptibilidades y valores de buzamiento.

Esta técnica cuestiona pobres (o malas) soluciones, incluyendo la elección del índice estructural, la estimación de profundidad, así como también, el método de estimación del contraste de susceptibilidades de la fuente y el buzamiento, lo cual da como resultado que el método de Euler no sea completamente aceptado como un método de interpretación para el uso de los campos potenciales, debido a que el patrón de soluciones presenta cierta dispersión emanada de algunas fuentes pequeñas, interfiriendo con la fuente de mayor importancia

Con la adición de un rotacional resulta que muchos de los factores limitantes en el método de Euler convencional son eliminados.

La expansión (o extensión) de Euler es denotada en un espacio 2D con profundidad "z" positiva hacia abajo y una distancia horizontal x , de modo que se introduce la ecuación (II.1.6) como modelo inicial, considerándose homogénea por lo que también resulta ser un invariante esta ecuación.

De modo que la ecuación (II.1.6) es una función homogénea y resulta que es también un invariante bajo el rotacional $r \rightarrow e^i r$, que transforma el potencial ΔT en $e^{-ni} \Delta T$ permitiendo que la ecuación (II.1.6) quede

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} - (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = 0 \quad \text{(II.2.1)}$$

Un ejemplo de la metodología que se habrá de seguir es la siguiente. Para campos que decaen al incrementar la distancia a la fuente que puedan ser modelados por polos o dipolos magnéticos, se tiene a la ecuación II.1.3. Donde G es una constante asociada con las propiedades físicas de la fuente y como ya se sabe $r^2 = (x - x_0)^2 + (z - z_0)^2$ por lo que el gradiente del campo para cada componente quedara

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -N(x - x_0) \frac{G}{r^{N+2}} = -N \Delta T \left(\frac{(x - x_0)}{r^2} \right) \quad (\text{II.2.2})$$

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N(z - z_0) \frac{G}{r^{N+2}} = -N \Delta T \left(\frac{(z - z_0)}{r^2} \right) \quad (\text{II.2.3})$$

Multiplicando la ecuación (II.2.2) por $(x - x_0)$ y la ecuación (II.2.3) por $(z - z_0)$ y posteriormente sumando, se obtiene la ecuación de Euler. Multiplicando la ecuación (II.2.2) por $(z - z_0)$ y la ecuación (II.2.3) por $(x - x_0)$ y posteriormente restando, se obtiene la ecuación "limitante" del rotacional. Este procedimiento se aplica para cada modelo geológico en particular y es la parte adicional de la que se habla en este apartado y que permite resolver parámetros tales como el buzamiento y la distribución de susceptibilidad.

A continuación, se presentaran las soluciones para el caso en que se busquen estructuras de geometría específica (contacto magnético, y dique delgado) empleando la metodología que se acaba de explicar sobre las ecuaciones II.2.2 y II.2.3.

SOLUCIONES PARA DOS MODELOS EN PARTICULAR

CONTACTO MAGNÉTICO.- Las ecuaciones de campo magnético y sus derivadas asociadas para un contacto que se extiende con la profundidad y su tope más profundo se encuentra en (x_0, z_0) , están dadas de acuerdo a (Nabighian, 1972). Una representación de este modelo se presenta gráficamente (FIGURA II.2.1)

Las derivadas parciales de este modelo son las siguientes.

$$\frac{1}{\partial z} \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = \frac{(x - x_0) \cos(\theta) + (z - z_0) \sin(\theta)}{r^2} \quad (\text{II.2.4})$$

$$\frac{1}{\partial x} \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = \frac{(x - x_0) \sin(\theta) - (z - z_0) \cos(\theta)}{r^2} \quad (\text{II.2.5})$$

Donde $\theta = 2KFC \sin(d)$, $\theta = 2l - d - 90^\circ$ para el campo total anómalo, y $r^2 = (z - z_0)^2 + (x - x_0)^2$ con K como el contraste de susceptibilidad en el contacto, d es el buzamiento local, F es la magnitud del campo magnético terrestre, $C = 1 - \cos^2(i) \sin^2(A)$ para i como la inclinación magnética y A es el ángulo entre el norte magnético y el eje x .

$l = \text{ang} \tan\left(\frac{\tan(i)}{\cos(A)}\right)$. Sustituyendo estas ecuaciones en (II.1.6) y (II.2.1) se tendrá

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = \sin(\theta) \quad (\text{II.2.6})$$

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} - (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = \cos(\theta) \quad (\text{II.2.7})$$

Las ecuaciones (II.2.6), (II.2.7) son las ecuaciones de Euler expandidas para un contacto magnético que teóricamente tiene un índice estructural igual a cero. Por medio de estas dos ecuaciones uno puede resolver un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas y resolver para x_0 y para z_0 . Conociendo la intensidad de campo magnético, la inclinación y declinación del lugar, es posible estimar valores del buzamiento y distribución de susceptibilidad suponiendo que no existe magnetización remanente.

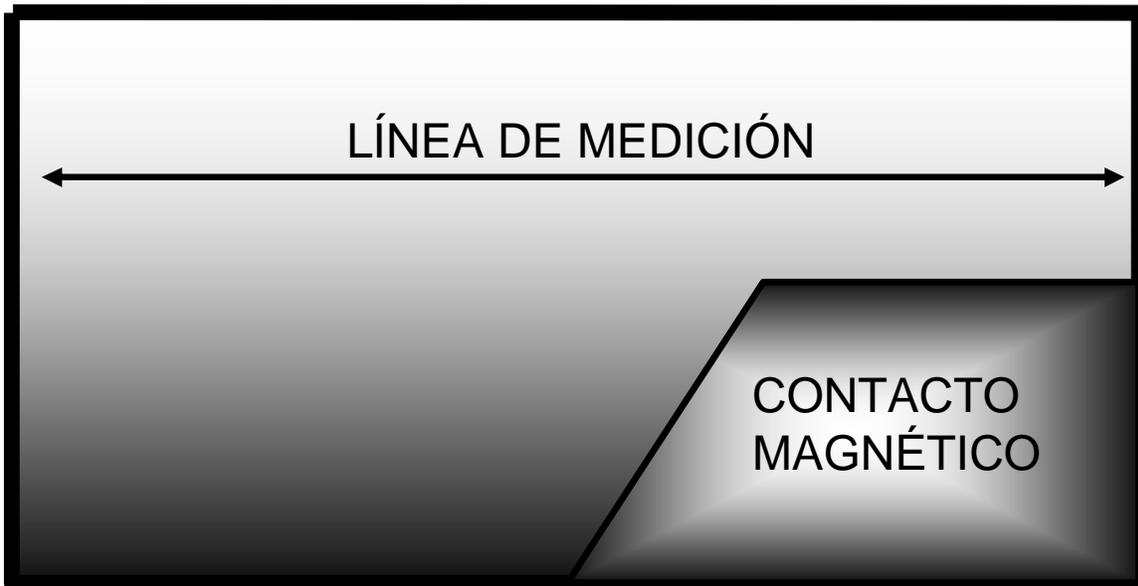


Figura II.2.1

Esquema general de un modelo de contacto magnético que es aplicado para el presente análisis.

DIQUE DELGADO.- La ecuación de un campo magnético para un dique delgado que se extiende junto con la profundidad con su límite tope en (x_0, z_0) según (Nabighian, 1972) es

$$\frac{\Delta T}{r^2} = \frac{(x - x_0)\text{sen}(\theta) - (z - z_0)\text{cos}(\theta)}{r^2} \quad \text{(II.2.8)}$$

Ahora con θ igual a $2KFct\text{sen}(d)$ donde t es el grosor del dique. Los demás términos tienen la misma definición que en el contacto magnético, las ecuaciones que lo modelan son

$$\frac{1}{\partial x} \frac{\partial \Delta T}{\partial x}(x, z) = \frac{-2(x - x_0)[(x - x_0)\text{sen}(\theta) - (z - z_0)\text{cos}(\theta)]}{r^4} + \frac{\text{sen}(\theta)}{r^2} \quad \text{(II.2.9)}$$

$$\frac{1}{\partial z} \frac{\partial \Delta T}{\partial z}(x, z) = \frac{-2(z - z_0)[(x - x_0)\text{sen}(\theta) - (z - z_0)\text{cos}(\theta)]}{r^4} - \frac{\text{cos}(\theta)}{r^2} \quad \text{(II.2.10)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (II.2.9) y (II.2.10) en (II.1.6) y (II.2.1)

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -\Delta T \quad \text{(II.2.11)}$$

y

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial z} - (z - z_0) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\frac{1}{r^2} [(x - x_0) \cos(\theta) + (z - z_0) \sin(\theta)] = -V \quad \text{(II.2.12)}$$

En donde (II.2.12) es la ecuación convencional de Euler para un dique delgado con un índice estructural de 1. Por lo que respecta a V representa el gradiente vertical del campo magnético en el modelo del contacto, como V es una cantidad desconocida, la ecuación (II.2.11) es usada para determinar la localización de la fuente y la (II.2.12) para determinar el valor de V .

Finalmente, se puede deducir que el buzamiento, el contraste de susceptibilidades y el grosor pueden ser determinados siempre que se conozca la intensidad del campo magnético e inclinación y suponiendo además que no hay magnetismo remanente. (FIGURA II.2.2)

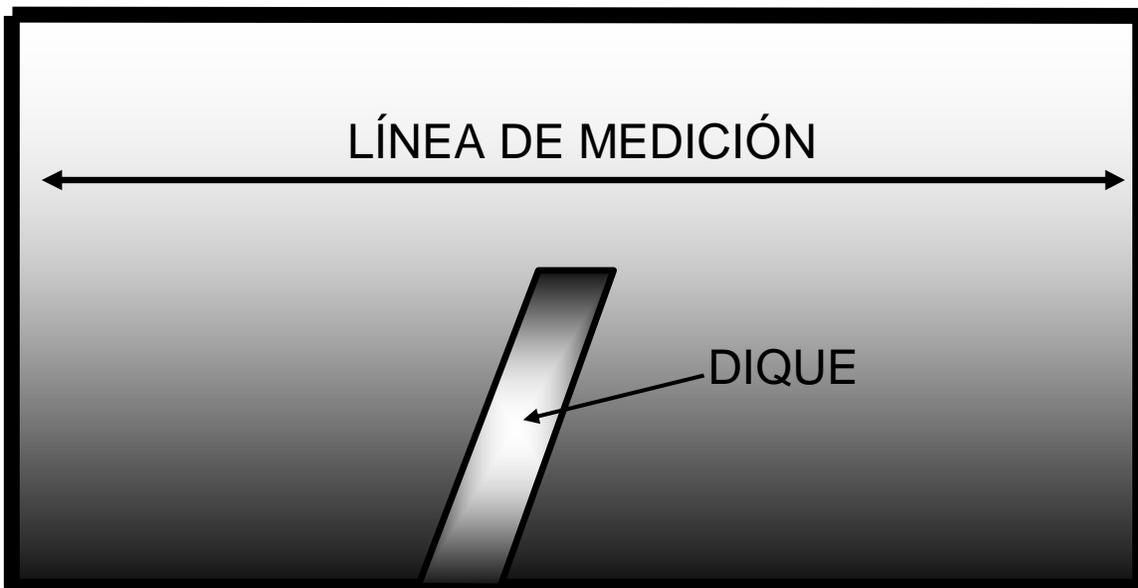


FIGURA II.2.2

Esquematisando el modelo de un cuerpo correspondiente a un dique

Por lo que respecta a la “EDE” convencional, para el caso en que se tengan cuerpos fuente interferidos, como por ejemplo, un dique, el cual no se presenta en forma aislada sino en diques múltiples y aunque se efectuó de forma adecuada la representación del modelo, o bien, el de un contacto magnético; aparecen puntos que conforman ciertos aglutinamientos o conjuntos en las soluciones dadas por esta metodología clásica. Debido a los efectos de fuentes cercanas y mal posicionamiento de la ventana de Euler. Para eliminar esto, aquí se propone que por medio de la deconvolución de Euler expandida; para un contacto, la dispersión de las soluciones de Euler debidos por la localización de la fuente verdadera

sigue diferentes caminos, dependiendo de si la ecuación (II.1.6) que es la deconvolución de Euler convencional, o la (II.2.1) que es la ecuación de la constante rotacional, o ambas, son utilizadas para invertir la localización de la fuente.

II.3.-LA SEÑAL ANALÍTICA EN ESTRUCTURAS 2D CON SECCIÓN DE CORTE POLIGONAL: SUS PROPIEDADES Y USOS PARA LA INTERPRETACIÓN AUTOMATIZADA DE ANOMALIAS (NABIGHIAN, 1972)

Lo que se pretende es determinar y resolver anomalías magnéticas causadas por cuerpos bidimensionales, se hace la suposición de que todos estos cuerpos presentan una magnetización uniforme y que además su sección de corte (de perfil) puede ser representada por medio de un polígono de extensión a profundidad finita o infinita.

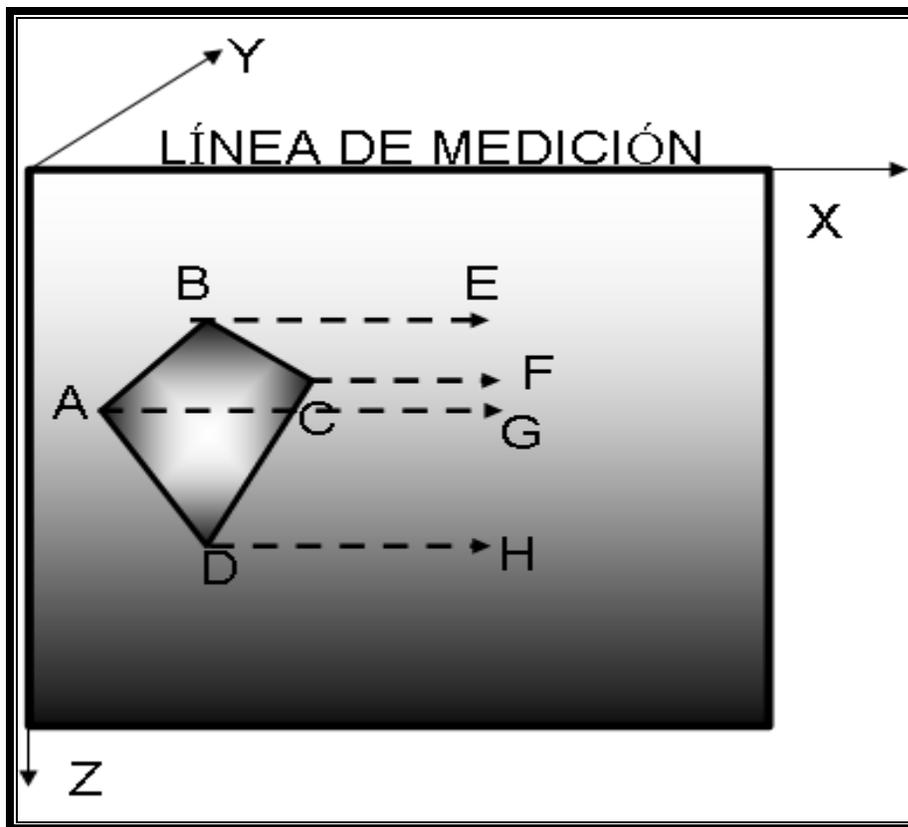


FIGURA II.3.1-
Representación de un cuerpo anómalo como un cuerpo poligonal en sección de corte, la cual coincide con la línea de medición.

En resumen, la derivada horizontal sobre el campo que produce el perfil transforma los efectos de magnetización en una sección de corte, en donde la fuente es ensamblada por medio de placas delgadas para formar un polígono que es equivalente a la fuente con profundidad infinita.

Entre otras cosas, la transformación (ya sea de Hilbert o de Fourier) al dominio de las frecuencias sobre la componente horizontal, produce una señal analítica, en donde la parte real de la transformada representa la derivada horizontal del campo del perfil y la parte imaginaria resulta ser la derivada vertical del mismo campo.

El resultado presenta en cada esquina del cuerpo una curva con forma de campana, la cual tiene simetría con respecto a un eje vertical, por último, si se desea, es posible practicar la reducción al polo por medio de la integración sobre la misma señal analítica.

ECUACIONES

Es bien sabido que muchos cuerpos poligonales en dos dimensiones (no necesariamente con profundidad limitada) pueden ser obtenidos por la superposición de un número finito de cuerpos magnetizados, como se ve en la figura anterior (FIGURA II.3.1), tendremos:

$$\overline{ABCD} = \overline{ABEF} + \overline{DAFH} - \overline{CBEG} - \overline{DCGH}$$

Donde, \overline{ABCD} es un cuerpo bidimensional con sección de corte ABCD, representando un bloque con extensión a profundidad infinita.

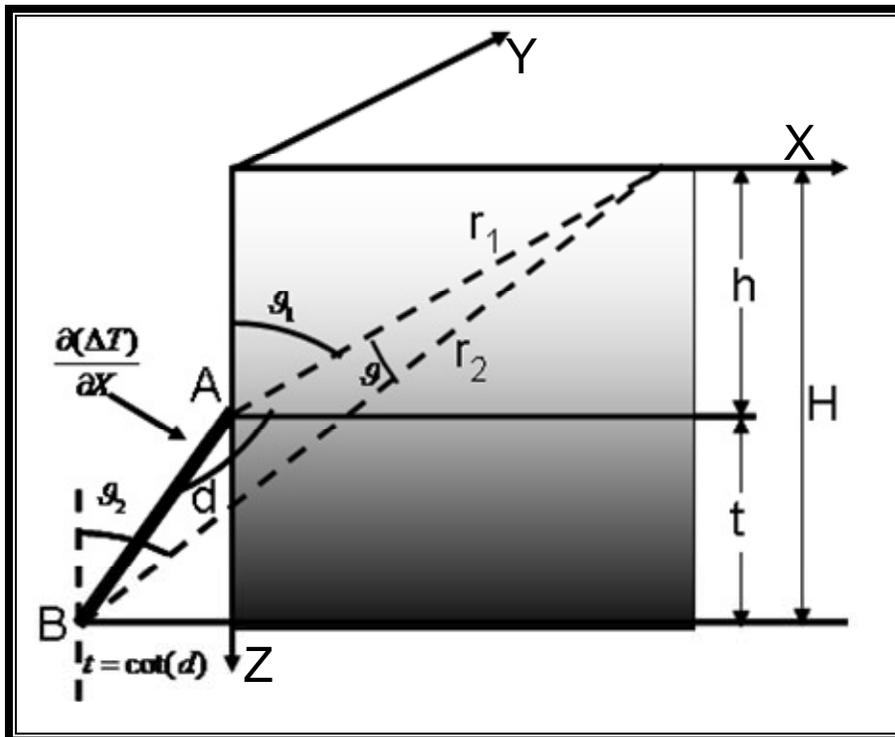


FIGURA II.3.2.-
Notación ocupada para la derivación de la anomalía

Con la notación dada en la anterior imagen (FIGURA II.3.2), la anomalía ΔT debida a una placa magnetizada finita (que aparece en color negro remarcado), puede ser escrita en la siguiente forma

$$\Delta T(x) = 2kFcsend[(s_1 - s_2)\cos(\alpha) + sen(\alpha)Ln(r_1/r_2)] \dots\dots\dots (II.3.1)$$

Donde:

k Es el contraste de susceptibilidades de las placas;

F Es el campo magnético terrestre;

$c = \cos(A)[1 - \cos^2(i)sen^2(A)]^{1/2}$ para campo horizontal

$= l - d - 90^\circ$ para campo horizontal.

i Es inclinación del campo terrestre;

A Es el ángulo entre el Norte magnético y el eje positivo x .

$$I = \text{ang} \tan\left(\frac{\tan(i)}{\cos(A)}\right)$$

Cuyos valores representan las características físicas de la fuente, c y d dependen de la dirección de la componente.

Por la derivación de (II.3.1) con respecto a x y haciendo $t \rightarrow \infty$, obtenemos la derivada horizontal (es la derivada horizontal sobre la línea de perfil)

$$T(x) = \frac{\partial(\Delta T)}{\partial x} = 2kFc \text{send} \frac{(h-z)\cos + x \text{sen}}{(h-z)^2 + x^2} \quad \text{(II.3.2)}$$

Que representa la anomalía de una placa delgada (AB en la FIGURA II.3.2) con profundidad h y buzamiento d . De forma análoga, derivando la ecuación (II.3.1) pero ahora con respecto a z , se obtiene la derivada vertical

$$T_1(x) = \frac{\partial(\Delta T)}{\partial z} = 2kFc \text{send} \frac{x \cos - (h-z)\text{sen}}{(h-z)^2 + x^2} \quad \text{(II.3.3)}$$

Para componente vertical (o sea, para la ecuación II.3.3), $c = (1 - \cos^2(i)\text{sen}^2(A))^{1/2}$ y $= I - d - 90$.

Sin embargo, aplicando la transformada de Hilbert a la ecuación (II.3.2) se obtiene la derivada vertical con signo negativo, lo cual es una manera más eficiente de obtener la derivada vertical.

Por otra parte, una forma más eficiente de efectuar la derivación de la ecuación (II.3.1) con respecto a la profundidad es en el dominio de la frecuencia, por medio de la transformada de Fourier, de modo que si $F(w)$ es la transformada de Fourier de $T(x)$ es posible obtener la transformada de Fourier para la derivada vertical $T_1(x)$ que sería $F_1(x)$ y adicionando un espectro $\overline{F}(w)$ el cual duplica las frecuencias positivas y elimina valores negativos que tendría como transformada de Fourier inversa

$$A(x) = T(x) - iT_1(x) \quad \text{(II.3.4)}$$

La ventaja de usar la transformada de Fourier, radica en lo siguiente:

- 1) $A(x)$ es una función analítica en variable compleja (se cumplen las ecuaciones de Cauchy-Riemann), lo cual propone que la curva de intensidad de campo magnético presente polos en cada uno de los vértices del polígono, esto es muy útil para nuestros fines buscados.

2) Además su amplitud es una función simétrica con respecto a un eje vertical, y no dependen de ω , esto es:

$$A(Z) = \sqrt{T(X)^2 + T(Y)^2} \quad \text{(II.3.5)}$$

La ecuación anterior, es de notable importancia pues su gráfica es lo que modelara al cuerpo anómalo.

3) Su derivada proporciona un potencial complejo, en donde sus componentes también son analíticas

4) La forma de campana de la función tiene la propiedad de que a la mitad de su amplitud, la mitad de su grosor es la profundidad del cuerpo (FIGURA II.3.3)

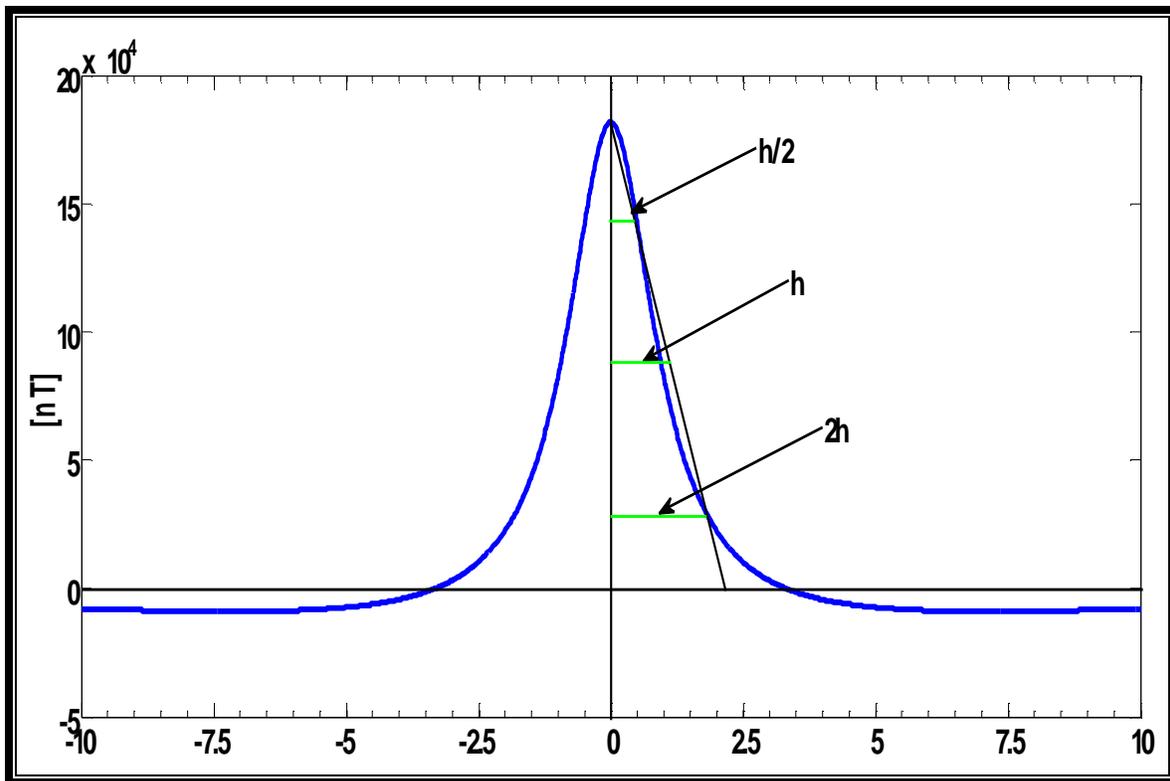


FIGURA II.3.3.- Relación de la profundidad de la fuente con la amplitud de la curva de la señal analítica.

5) Se puede estimar la profundidad “h” por medio de un cambio de frecuencias, o bien por medio de la transformación de Hilbert aplicado sobre el par transformado de (II.3.4).

El procedimiento para llevar a cabo la señal analítica se resume en los siguientes cinco pasos:

- 1) La curva del campo es derivada con respecto a la línea de perfil (o sea x) para obtener $T(x)$
- 2) Posteriormente sigue la aplicación de la transformada de Fourier para obtener $F(w)$
- 3) Se crea un nuevo espectro $\overline{F}(w)$
- 4) Se realiza la transformada inversa para encontrar $A(Z) = T(x) - iT_1(x)$
- 5) Se eleva al cuadrado la amplitud, es decir, $a(x) = [T^2(x) + T_1^2(x)]^{1/2}$, la cual es graficada y da como resultado una curva en forma de campana simétrica situada exactamente sobre el vértice del cuerpo y a la mitad de su amplitud máxima se ubica la mitad de su grosor, el cual representa la profundidad.

Finalmente, si se desea obtener la reducción al polo solo se realiza la integración de

$[T(x) - iT_1(x)]$ y se utiliza su parte real.

II.4.- APLICACIÓN A MODELOS SINTÉTICOS 2D

Con el objeto de tener una previa idea general de la respuesta magnética que deberán presentar los tubos que contienen el material contaminante, se presentan a continuación una esfera de acero hueca, además de un cilindro, los cuales presentan una polarización vertical.

El procedimiento consiste en utilizar modelado directo suponiendo que se realizan las mediciones sobre una línea recta orientada al Norte magnético (declinación igual a cero grados) con una longitud de 20 metros en donde el centro de la fuente anómala no coincide con el punto medio de la línea de exploración (FIGURA II.4.1). Es conveniente hacer la aclaración de que en todo momento se hace uso del Sistema Internacional de medidas (SI).

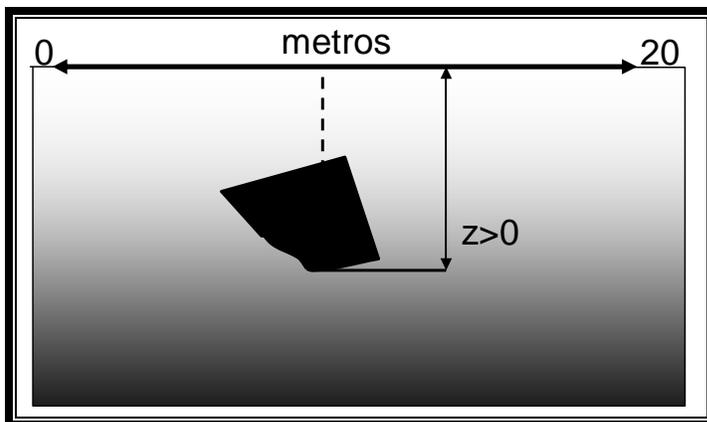


FIGURA II.4.1.- Esquema general de la metodología para la aplicación de los modelos sintéticos.

- II.4.1.-Tubo de Acero Vertical

Una tubería extendida en sentido vertical puede ser considerada como una aproximación equivalente a un dipolo magnético largo, su magnetización puede ser representada por medio de dos polos colocados en extremos contrarios del tubo, el polo negativo cercano a la superficie y el positivo en el extremo más profundo como se ve en la representación gráfica (FIGURA II.4.1.1)

Por otra parte también es posible imaginar a la tubería como dipolos aislados colocados en línea, lo cual daría un resultado análogo al acabado de plantear, solo que el índice estructural que caracteriza a este acomodo es el de 1.0, y se corroborará en la solución a la deconvolución de Euler.

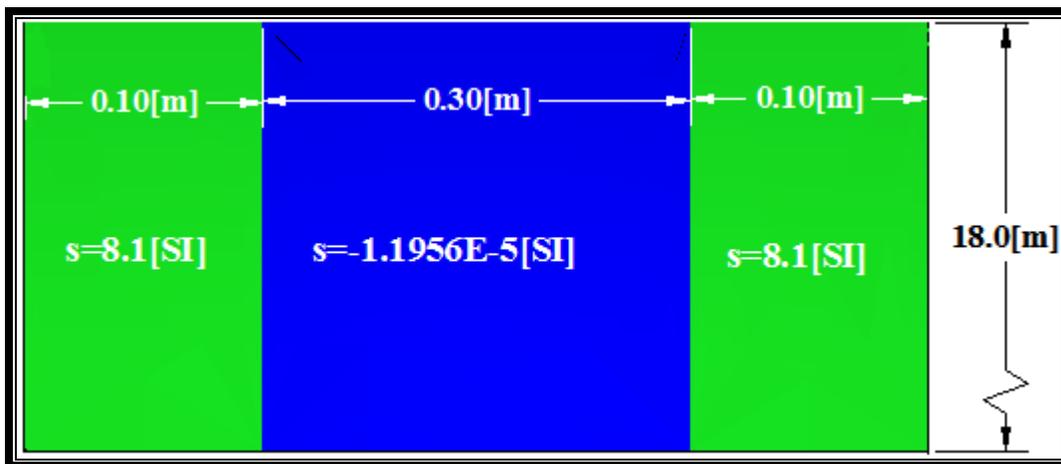


FIGURA II.4.1.1 esquema referente al tubo vertical. Las paredes son de acero (color verde) y el contenido del tubo es azufre (azul.). La literal “s” es la susceptibilidad.

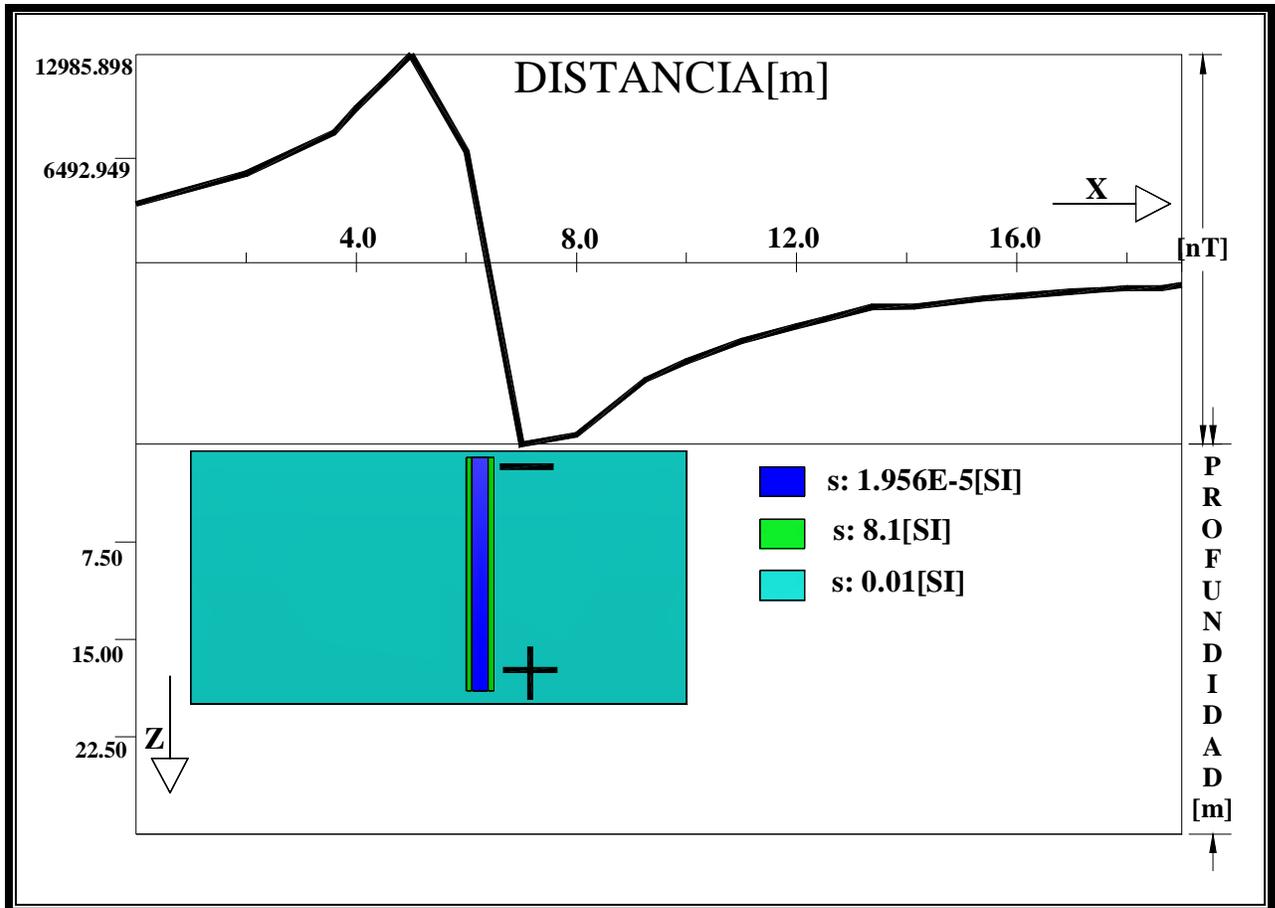


FIGURA II.4.1.2. -modelo referente a la tubería posicionada y polarizada verticalmente, la curva presenta la forma dipolar aislada ubicándose el centro de la anomalía en el cambio de polaridad.

El cuerpo en color verde claro (FIGURA II.4.1.2) hace referencia a la litología del lugar, la cual es un promedio de susceptibilidades de sal de roca, caliza, arcillas y areniscas y es de 0.01. Las paredes del tubo son de acero (bloques en color verde fuerte), por lo que su susceptibilidad es de 8.1, el interior es azufre (bloque color azul) que corresponde a -0.00001956 en SI (ver FIGURA II.4.1.1)

De acuerdo a la idealización anterior, se edita el modelo sintético por modelado directo (FIGURA II.4.1.2), en el que se aprecia que la anomalía es de carácter dipolar, se colocó la curva de forma tal que la fuente se encuentra exactamente en el centro de donde hay cambio de polaridad, este comportamiento es lo que se espera al modelar las anomalías reales.

Es importante hacer notar que se estima a la tubería con un diámetro de 0.50 [m] comenzando en 6.00 y terminando en 6.50 sobre la línea de perfil iniciando a una profundidad de 1.00 [m] a 19.00 [m], por lo que la fuente se considera finita. El grosor del tubo es de 0.10 [m] hecho de acero; su contenido es azufre y esta de 6.10 a 6.40 [m]. (Ver FIGURA II.4.1.1)

A continuación, se presenta la curva de respuesta magnética con los valores máximos y mínimos de la anomalía sintética (FIGURA II.4.1.3), ya que estos valores junto con esta curva serán retomados en secciones posteriores al momento de comparar con la anomalía real.

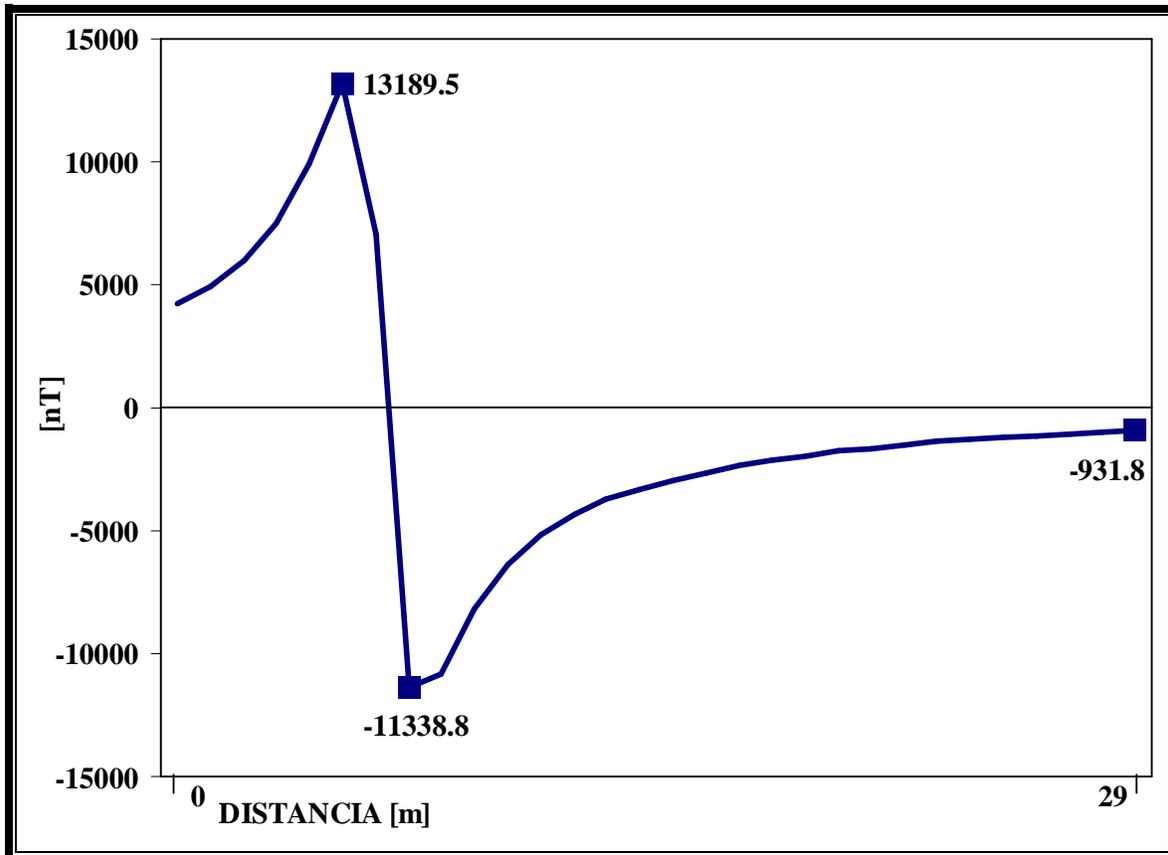


FIGURA II.4.1.3.-curva de respuesta magnética para una anomalía que corresponde a una tubería posicionada y polarizada verticalmente.

Como se puede notar, el valor máximo para esta curva es de 13189.5 [nT] con un valor mínimo de -11 338.8 [nT] y valor constante de -931.8 [nT].

De acuerdo a las características geométricas de la fuente se espera que el índice estructural que mejor modele al cuerpo sea de 2.00 o bien de 1.00, ya que por pruebas anteriores (sección II.1, Thompson 1982) se recomienda un índice estructural de 2.00 para dipolos dispuestos en línea y para polos puntuales en línea el 1.00, los cuales cumplen con la forma de la tubería; por lo que estos dos valores se toman en consideración especial al aplicar la deconvolución de Euler, cuya modelación se muestra a continuación (FIGURA II.4.1.4).

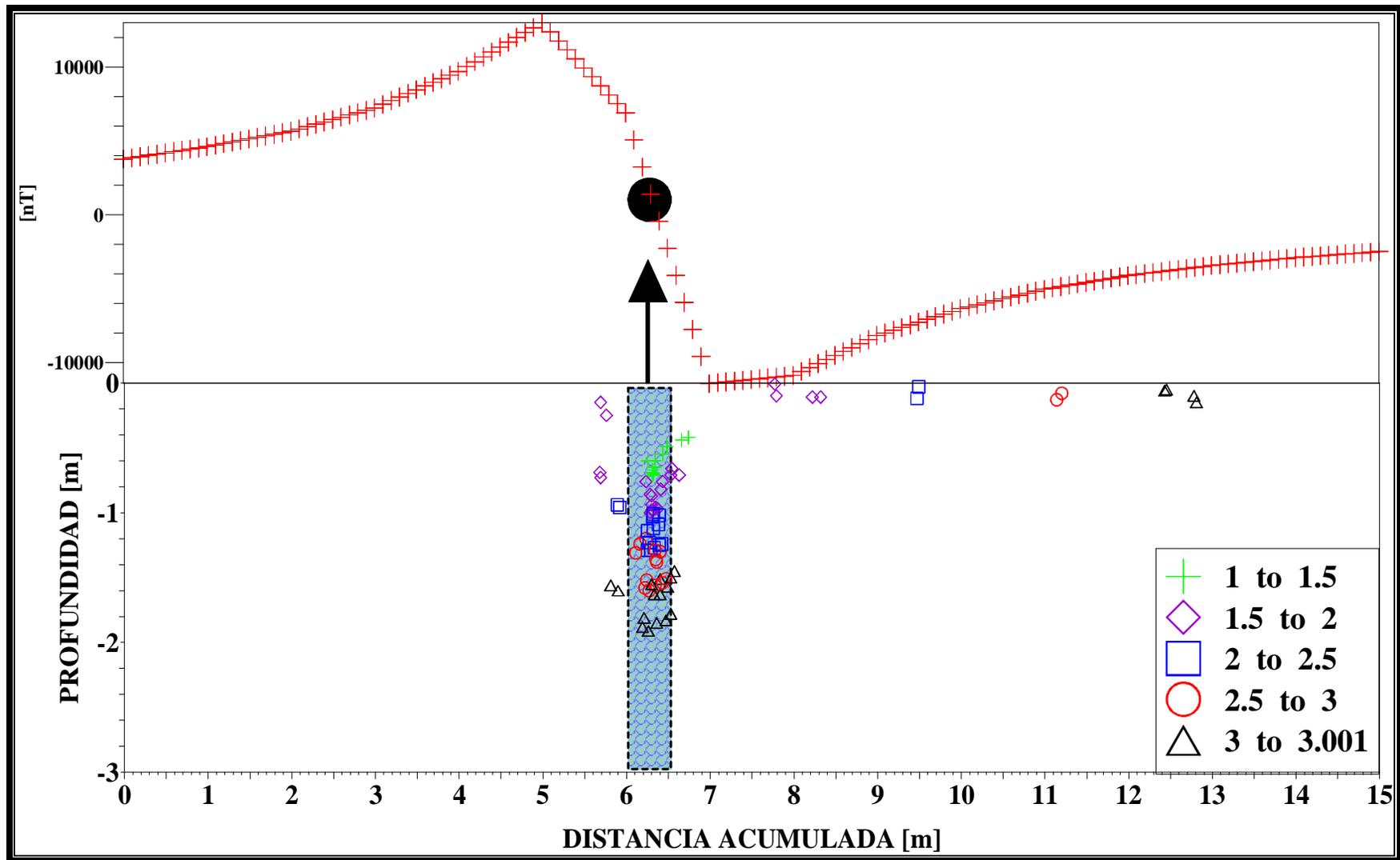


FIGURA. II.4.1.4.- Modelo sintético del tubo vertical.

La presencia del cuerpo tubular, según la “EDE” es inmediata, todos los índices estructurales definen la forma de la tubería, se acumulan en la parte central, la determinación del índice estructural idóneo se basa en aquella acumulación de índices estructurales que se encuentren mejor ubicados de acuerdo al tipo de fuente, que en este caso el mejor índice es de 2.00 (azul), pues el diámetro, así como también su posición con respecto a la curva de anomalía son las esperadas. Sin embargo, la profundidad, deja mucho que desear, ya que apenas alcanza los dos metros y lo esperado era de 19.00 [m].

DECONVOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL HOMOGÉNEA DE EULER “EDE”

NÚMERO DE ECUACIONES: 12

SEPARACIÓN DE MEDICIÓN: 0.1 metros

PROFUNDIDAD: 19 metros

TABLA DE RECURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| ÍNDICE | % | CANTIDAD | SIMBOLO |
|--------|-------|----------|---------|
| 1.00 | 14.30 | 12 | + |
| 1.50 | 26.20 | 22 | ◇ |
| 2.00 | 19.00 | 16 | □ |
| 2.50 | 17.90 | 15 | ○ |
| 3.00 | 22.60 | 19 | △ |

Nótese que el segundo índice (N=1.5) es el más abundante, luego el de 3.0, y posteriormente N=2.0 lo cual es satisfactorio, pues como ya se menciono antes, dos de estos 3 valores (N=1.5, N=2.0) son los más adecuados a la fuente magnética en modelación.

Para reafirmar, se presenta la imagen de perfil (FIGURA II.4.1.5) que corrobora la presencia de la tubería, en la parte superior es donde se define el cuerpo, por otra parte, la profundidad no es precisa, sin embargo, se confirma el cuerpo anómalo; la superposición es la misma tanto en la solución a la deconvolución (FIGURA II.4.1.4) como en la imagen de perfil (FIGURA II.4.1.5)

CONCLUSIONES.

Para producir el cuerpo de la fuente por medio de la deconvolución de euler, la parte medular es la selección del tamaño de ventana, así como también los índices estructurales, para este caso en especial, se seleccionan todos los índices, pero se tiene un especial interés por los de 1.0, 1.5, 2.0, debido a que las características geométricas del cuerpo en cuestión asimilan a un cuerpo que contiene dos polos de signo contrario y colocados en sus bordes opuestos. Por lo que la elección inicial del índice estructural se basa en el número de polos que pueda tener la fuente y en como estén dispuestos. Por otra parte, la leyenda “número de ecuaciones” representa el número de ecuaciones que tendrá el sistema sobredeterminado, por lo que a mayor número de ecuaciones se tendrán mayores soluciones del sistema, sin embargo es preciso seleccionar este rubro por medio de inspección visual considerando el número de puntos de medición (en este caso 20). Por último, se resume que la

representación del cuerpo es adecuada, su ubicación con respecto a la curva anómala, sus dimensiones geométricas son confiables, no así la profundidad a la que se ubica, además de que coincide el valor del índice estructural recomendado por trabajos anteriores con el obtenido aquí, que es de 2.0 a pesar de que no es el que tiene mayor recurrencia, es el que contornea mejor y tiene menor dispersión.

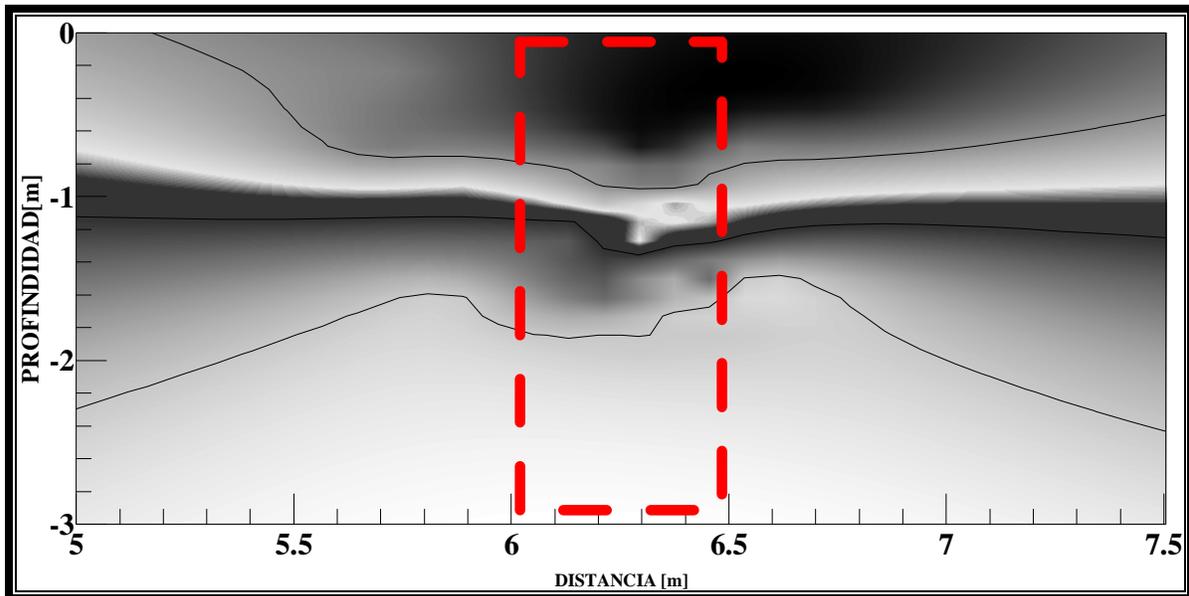


FIGURA II.4.1.5.- Imagen de perfil de la deconvolución.

Por último, cabe mencionar la importancia que tiene la ejecución de interpolación en la curva anómala, a un mayor contenido de puntos dentro del dominio de la respuesta magnética se tendrán soluciones a la deconvolución de Euler más robustas, sin embargo la dispersión también aumenta significativamente por lo que esto demuestra que es adecuado practicar la interpolación para cada perfil anómalo pero sin llegar a un punto de exageración, en el cual el grado de dispersión en la solución a la deconvolución es tan alto que se pierde la resolución del cuerpo anómalo. Para probar esto, se presenta a continuación (FIGURA II.4.1.6) el mismo modelo sintético del tubo vertical que se acaba discutir, pero con la única diferencia en que la separación de medición de 2.00 unidades, como se puede observar la concentración de índices estructurales es más tenue, la profundidad difiere en ambos modelos, en comparación con el modelo sintético inicial (FIGURA II.4.1.4) en general se gana profundidad al aumentar la interpolación. De acuerdo con esta conclusión es como se justifica el por que en cada anomalía existe un valor particular en el grado de interpolación y se define como SEPARACIÓN el cual es indicado al momento de realizar la aplicación de la deconvolución de Euler.

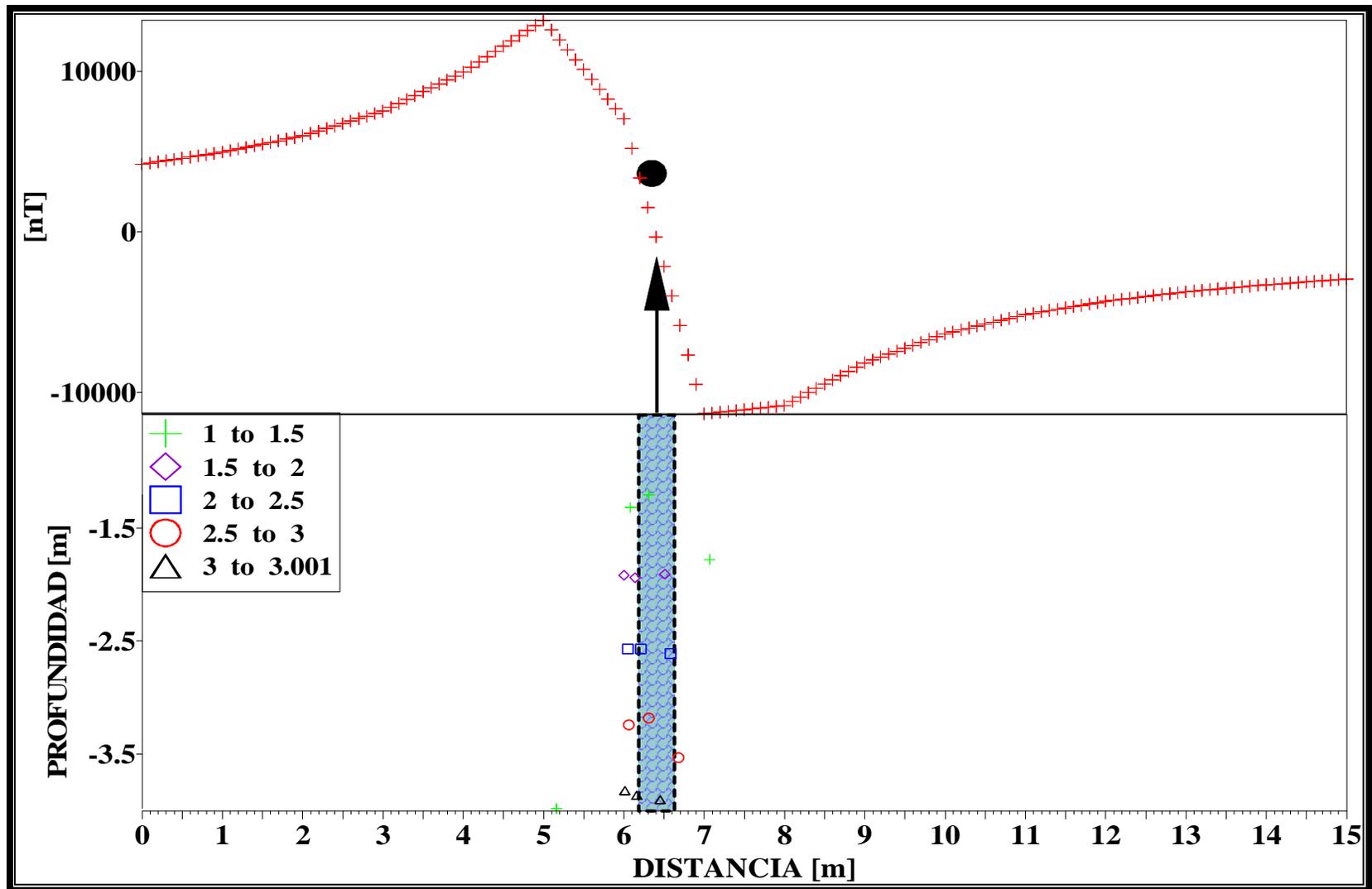


FIGURA II.4.1.6.- Deconvolución de Euler para el tubo sintético con 2.0 unidades de separación entre mediciones, es evidente que aquí la solución es más errática que en el modelo con 0.1 unidades de dispersión (FIGURA II.4.1.4)

- II.4.2.- La Esfera

El volumen de magnetización de una esfera que se encuentra polarizada verticalmente puede ser considerado como una superficie de distribución de dos polos; uno negativo en la mitad superior de una esfera y el otro polo positivo en la parte inferior de la otra mitad. Como se muestra en la siguiente representación (FIGURA II.4.2.3). Por lo que respecta a las características físicas de la fuente se considera la misma litología que en el modelo anterior, la esfera también se ha rellenado de azufre (FIGURA II.4.2.3).

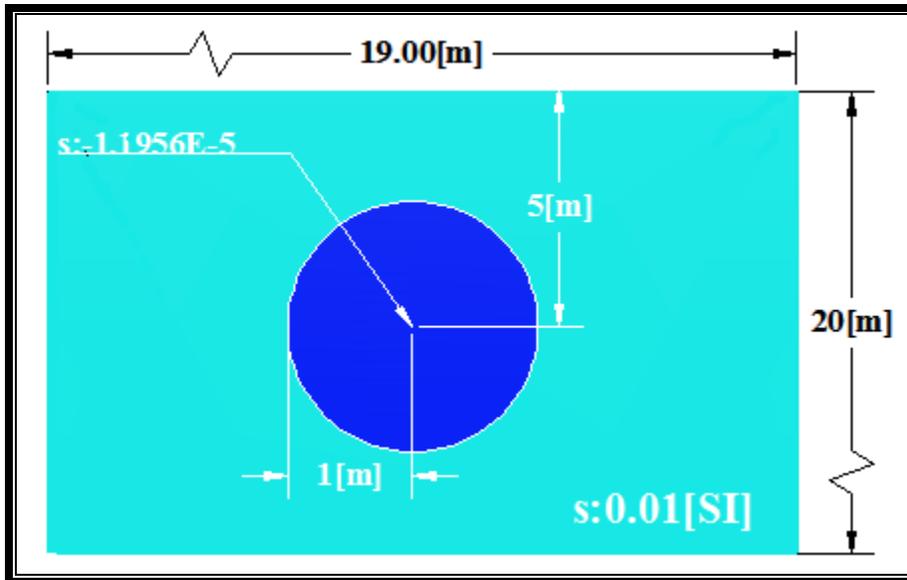


FIGURA
II.4.2.1.- Esquema general de la forma de magnetización de una esfera polarizada verticalmente de forma homogénea. De acuerdo a los trabajos antecedentes, los posibles índices estructurales correctos serían de 2.00 o 3.00.

De acuerdo a la sección II.1 (Thompson, 1982) se espera que los índices que mejor den forma al cuerpo sean de 2.00 o 3.00 que es de polo puntual y dipolo puntual respectivamente

De forma cualitativa, esto se puede imaginar con un signo negativo en la mitad superior y otro positivo en la mitad inferior, ahora bien, este fenómeno presenta tres curvas de respuesta magnética, una es la contribución del polo negativo, la cual es la mayor en magnitud y otra que es la contribución del polo positivo (FIGURA II.4.2.2)

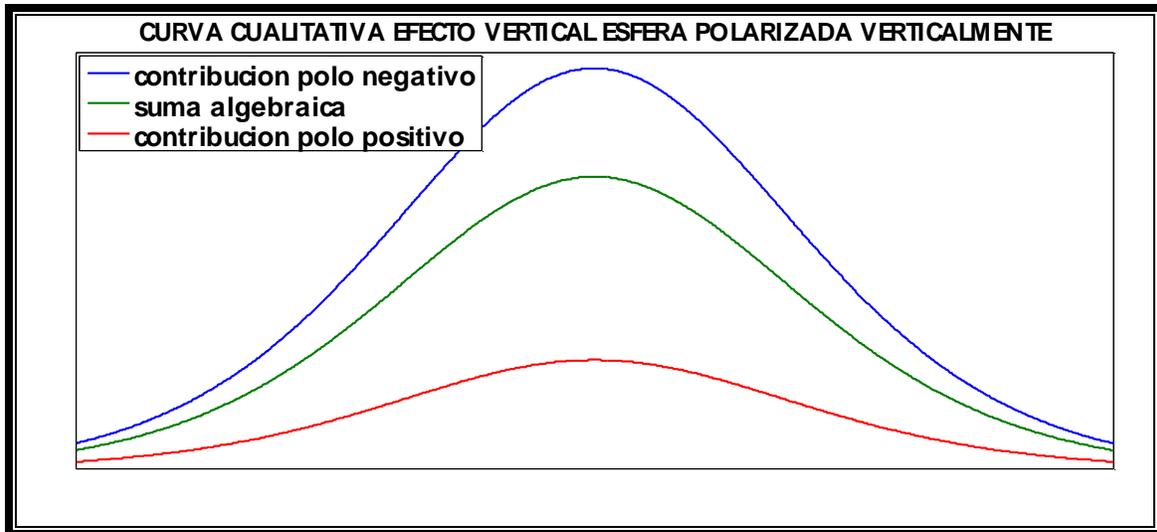


FIGURA II.4.2.2.- *Curvas de respuesta magnética para la esfera.*

La estrategia se basa en diseñar la respuesta magnética que tendría una esfera homogénea y por lo tanto compuesta 100% de acero, luego realizar la respuesta magnética de otra esfera bajo las mismas condiciones pero con un radio ligeramente menor y posteriormente realizar la sustracción de ambas respuestas magnéticas, con la finalidad de obtener una respuesta que simule la presencia de una esfera hueca con la pared hecha de acero.

Los datos que se evalúan son los siguientes (VER FIGURA II.4.2.3):

R = Radio de la esfera = 1[m].

x = Distancia de la línea de medición = 19[m].

z = Distancia vertical de la superficie de medición al centro del cuerpo = 5[m]

= Susceptibilidad magnética del azufre, que en este caso se obtiene de la tabla de valores de susceptibilidad del apartado “propiedades de la materia”, sección I.3:

La intensidad de campo magnético es igual a 40451.5 [nT], según el reporte del satélite NOAA.

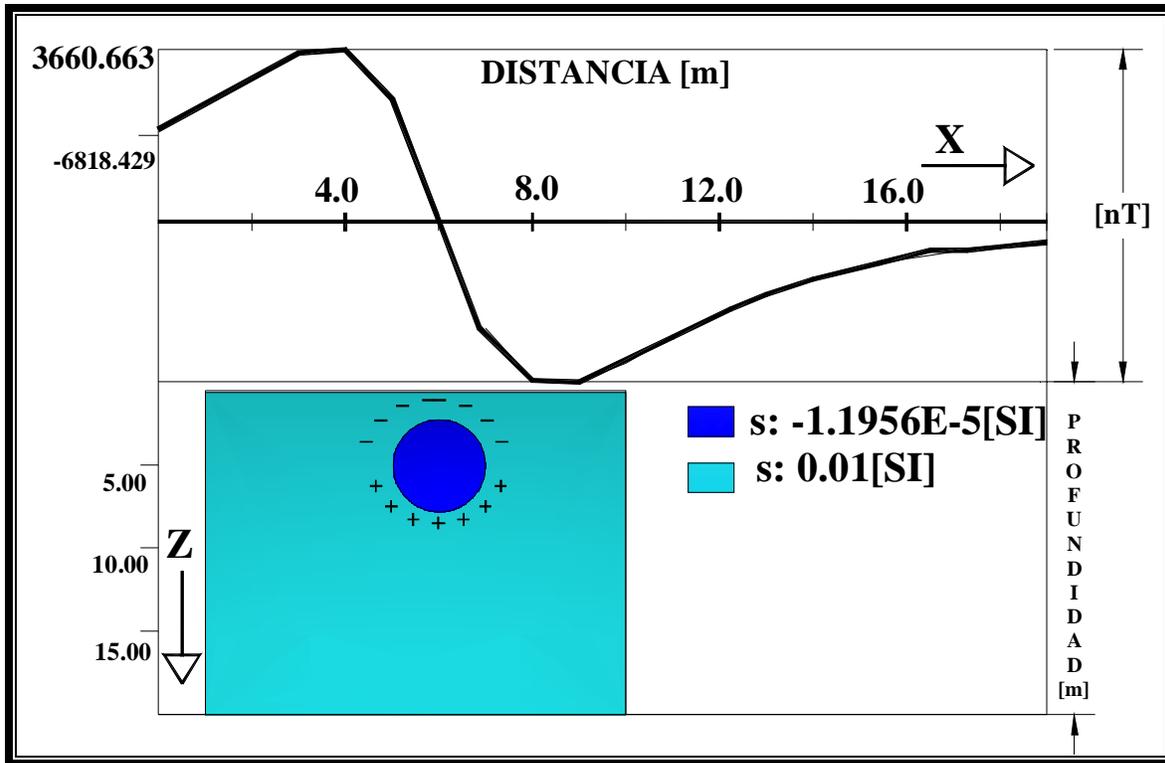


FIGURA II.4.2.3.-Esquema de la representación del modelo sintético de la esfera.

La aplicación del modelado directo a la esfera (FIGURA II.4.2.3) da como resultado una curva muy parecida a la obtenida por el tubo vertical, tiene un máximo en la parte sur y un mínimo en la parte norte, pues se considera que la magnetización es inducida y se alinea con respecto al campo magnético terrestre (CMT)

DECONVOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL HOMOGÉNEA DE EULER “EDE”

TAMAÑO DE VENTANA: 08 puntos

SEPARACIÓN DE MEDICIÓN: 1.0 metros

PROFUNDIDAD: 12 metros

REALCE DE SOLUCIÓN: No Se aplica.

TABLA DE RECURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| ÍNDICE | % | CANTIDAD | SIMBOLO |
|--------|-------|----------|---------|
| 1.00 | 21.10 | 46 | + |
| 1.50 | 20.20 | 44 | ◇ |
| 2.00 | 19.70 | 43 | □ |
| 2.50 | 19.70 | 43 | ○ |
| 3.00 | 19.30 | 42 | △ |

Todos los índices son presentados en la deconvolución, pues contornean una forma congruente y cualquiera puede ser el definitivo en la solución; por lo que respecta a los índices esperados, en la tabla de ocurrencia aparecen casi empatados (con 43 y 42), solo falta visualizar la solución de la deconvolución para determinar que índice es más representativo.

Aplicando la deconvolución de euler “EDE” resulta difícil elegir el índice estructural que mejor representa al cuerpo anómalo. El 3 es conveniente por lo estipulado en la sección II.1, pues es posible considerar a la esfera como un punto dipolar, otra opción es tomarlo como un polo puntual; si se considera la segunda opción, entonces el número estructural para la esfera sintética deberá ser el valor 2 y también proporciona congruencia al momento de realizar la deconvolución, pues como se puede observar (FIGURA II.4.2.4) resulta un cuerpo esférico que se ajusta a la profundidad y se encuentra bien ubicado con respecto a la curva anómala. Por otra parte, según la tabla de recurrencia, el índice que más ocurre en la deconvolución es el 1, lo que no significa que sea el índice más representativo de la esfera.

En la solución de la deconvolución (FIGURA II.4.2.4) se observa que el índice marcado en círculo rojo (índice igual a 2.5) contornea de forma más justa a la fuente, y tiene muy poca dispersión, pero el número 3 (negro) también la contornea y además se encuentra adentro de lo que es la esfera, su dispersión es aún menor; los demás índices le dan forma a la fuente pero se dispersan mucho y además exageran al cuerpo.

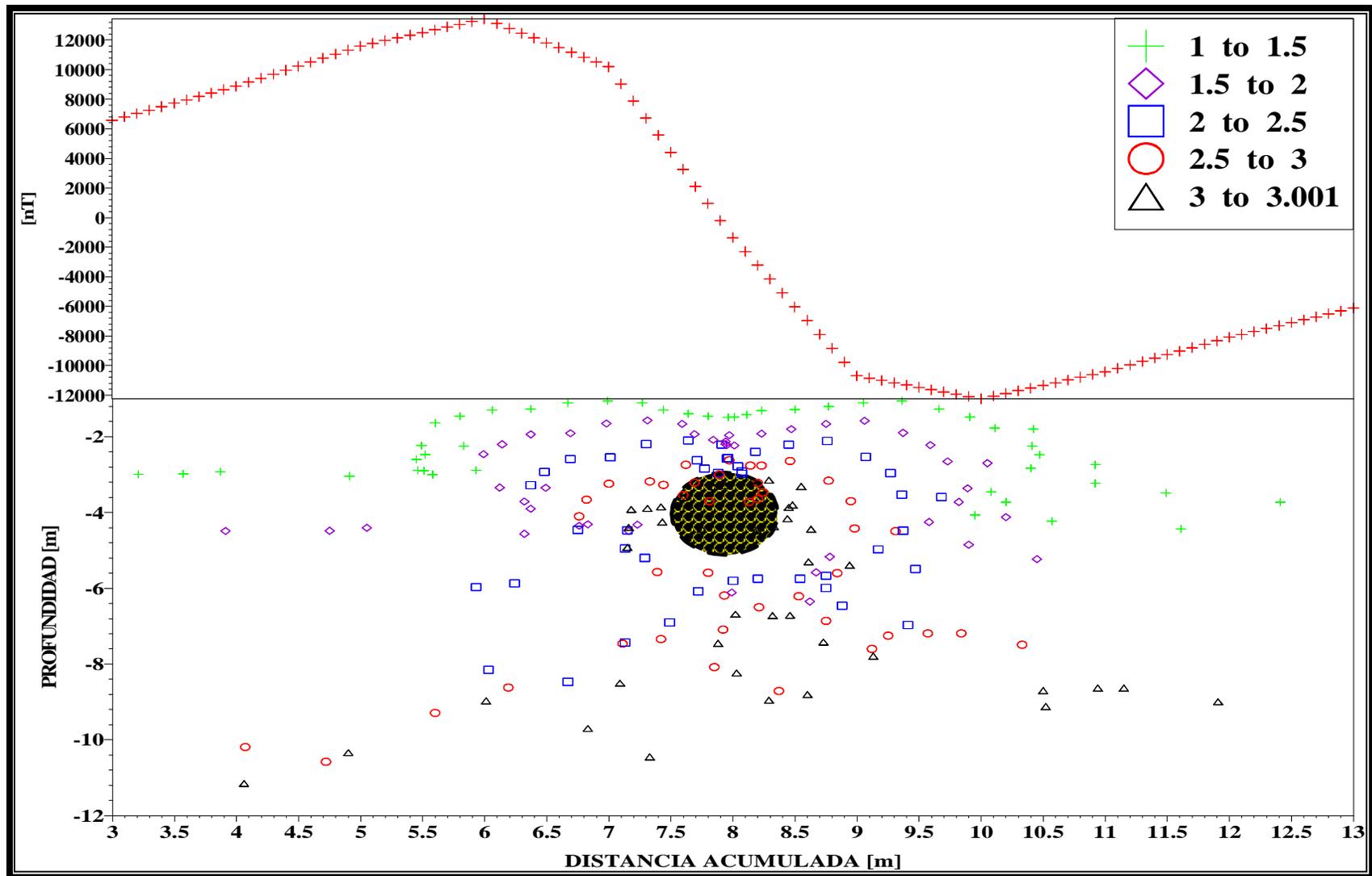


FIGURA II.4.2.4.- Deconvolución de euler aplicada al modelo sintético de una esfera.

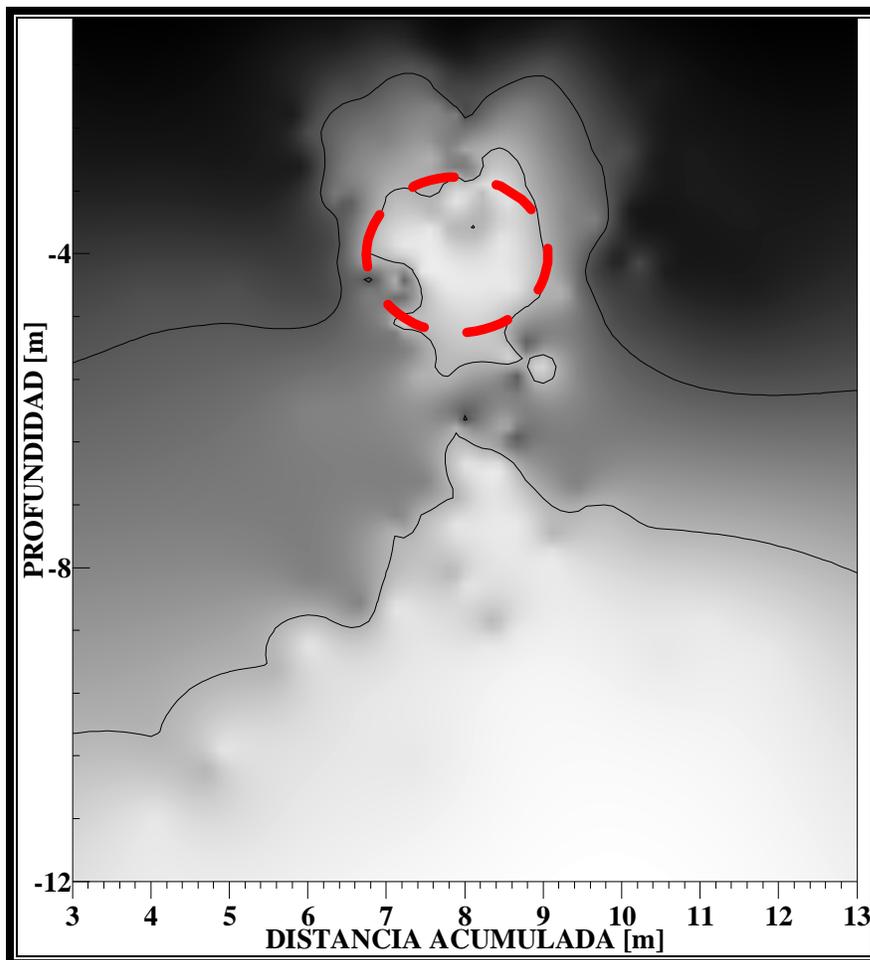


FIGURA II.4.2.5.-
Otra herramienta de visualización de la fuente en vista de perfil, en la cual se detalla la fuente superpuesta, se define a la fuente como la zona en color rojo, la solución tiene dimensiones adecuadas.

El perfil de la anomalía de la esfera (FIGURA II.4.2.5) es obvia la localización de la fuente, se ha superpuesto la fuente con las dimensiones esperadas y se ve que coincide satisfactoriamente.

CONCLUSIONES.

Según la discusión anterior, el índice estructural de 3.00 es el que mejor define la solución de la deconvolución, definiendo a la esfera como un dipolo puntual, por lo que respecta a la profundidad de la fuente (que es de aproximadamente de 4.00 [m]) es la esperada y se dice que la aplicación de la solución a la “EDE” es apropiada y confiable para usarse como patrón de comparación con anomalías reales.

- II.4.3.-La Falla Vertical

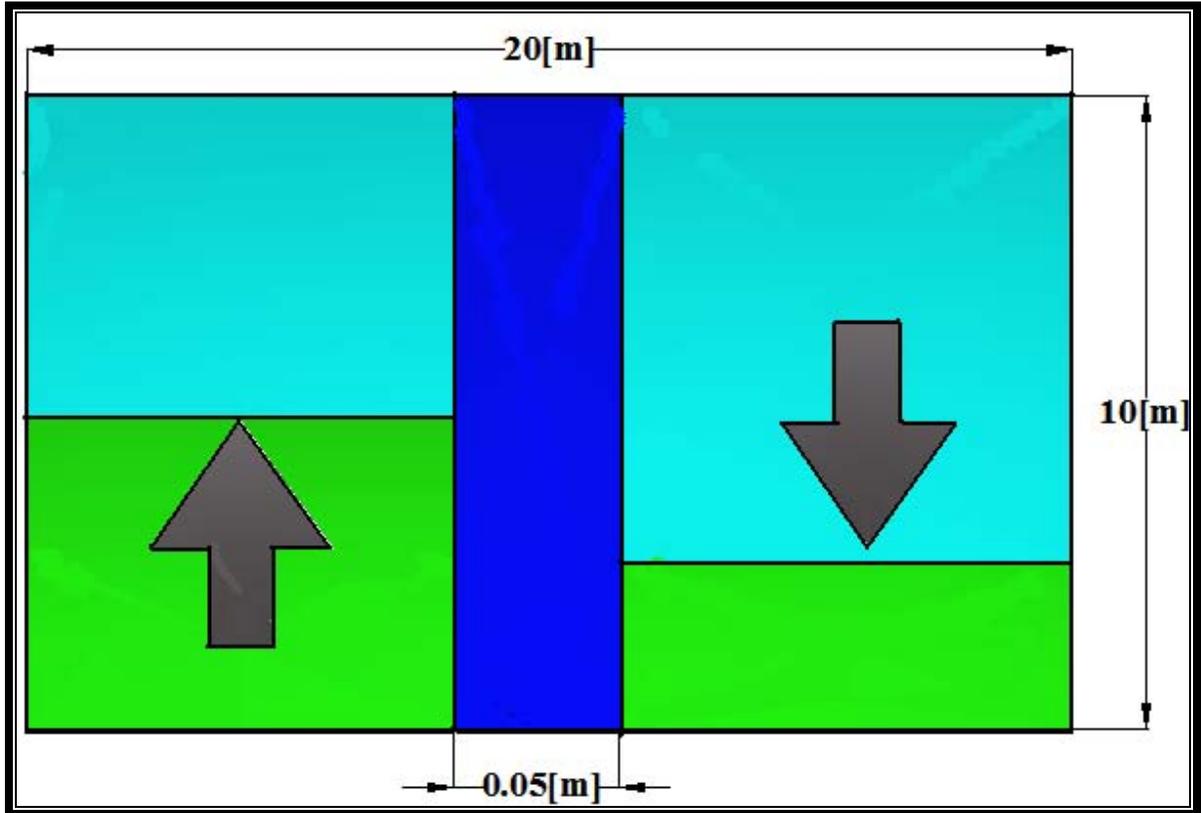


FIGURA II.4.3.1. - Idealización de la falla vertical, en la cual se espera que el índice estructural tome valores referentes a una línea de polos o bien dipolos en línea.

Para realizar la modelación de este tipo de cuerpos, es muy conveniente idealizar a la falla como un plano vertical semi-infinito (FIGURA II.4.3.1) la polarización es vertical y homogénea.

Como ya se dijo en el párrafo anterior, este modelo se concibe como un plano semi-infinito posicionado verticalmente y al igual que en los anteriores modelos, la profundidad es finita y corresponde a los 10 metros, la longitud de la línea de perfil es de 20.00. Por otra parte se dice que para este tipo de cuerpos, el índice estructural podría ser bien caracterizado por un índice estructural referente a una línea de dipolos o bien a polos en línea, pero del modo que sea, al momento de realizar la deconvolución se aplicarán pruebas con todos y cada uno de los índices para emitir la mejor solución.

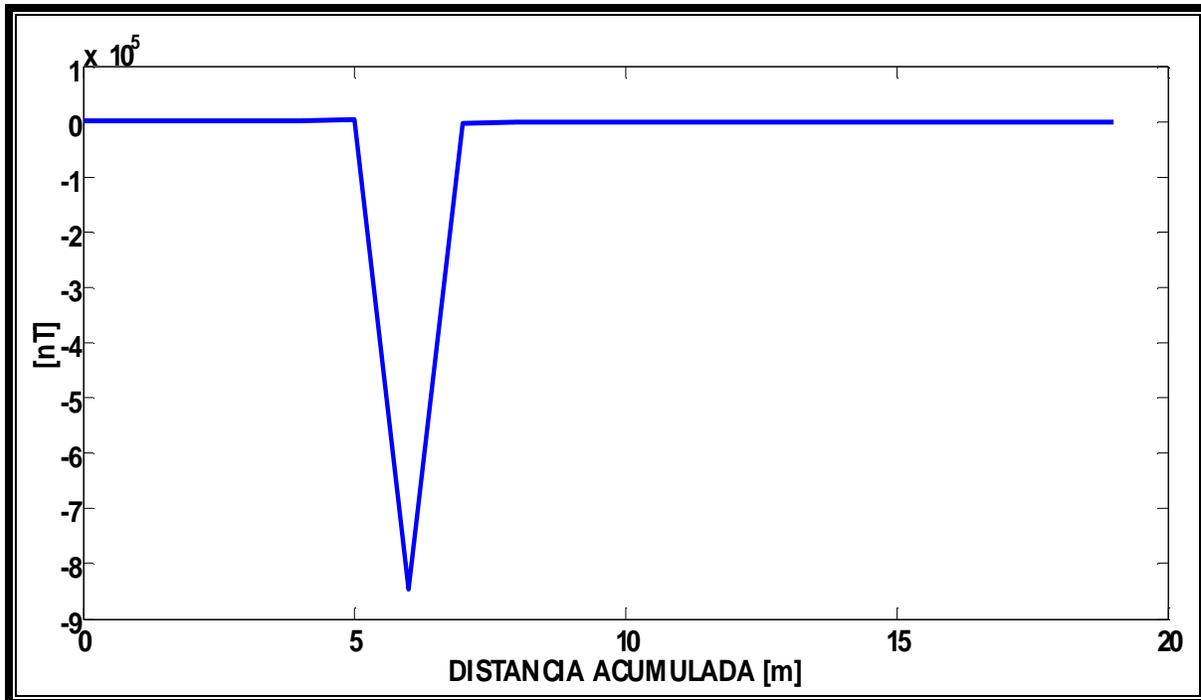


FIGURA II.4.3.2.- Forma completa de la curva de respuesta magnética para una falla que se posiciona y que se magnetiza verticalmente.

Según la forma de la curva de respuesta magnética (FIGURA II.4.3.2) se estima que la localización de la fuente se encuentre justo por debajo de la depresión, o sea entre 5.95 y 6.00 a lo largo de la línea de perfil.

DECONVOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL HOMOGÉNEA DE EULER “EDE”

TAMAÑO DE VENTANA: 8
SEPARACIÓN DE MEDICIÓN: 1.00
PROFUNDIDAD: 10.00 metros
REALCE DE SOLUCIÓN: Se aplica.

TABLA DE RECURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| ÍNDICE | % | CANTIDAD | SIMBOLO |
|--------|-------|----------|---------|
| 1.00 | 18.20 | 18 | + |
| 1.50 | 20.20 | 20 | ◇ |
| 2.00 | 21.20 | 21 | □ |
| 2.50 | 20.20 | 20 | ○ |
| 3.00 | 20.20 | 20 | △ |

Referente a la tabla de recurrencia, es difícil vaticinar el mejor índice estructural, el índice que más aparece es el de 2.00, el cual corresponde a dipolos acomodados en línea y esto es coincidente con lo esperado, sin embargo los índices de 1.50, 2.50, 3.00 se encuentran

empáticos lo cual especula una estabilidad en la solución, por lo que por el momento se estima de manera tentativa que el más idóneo es el de 2.00.

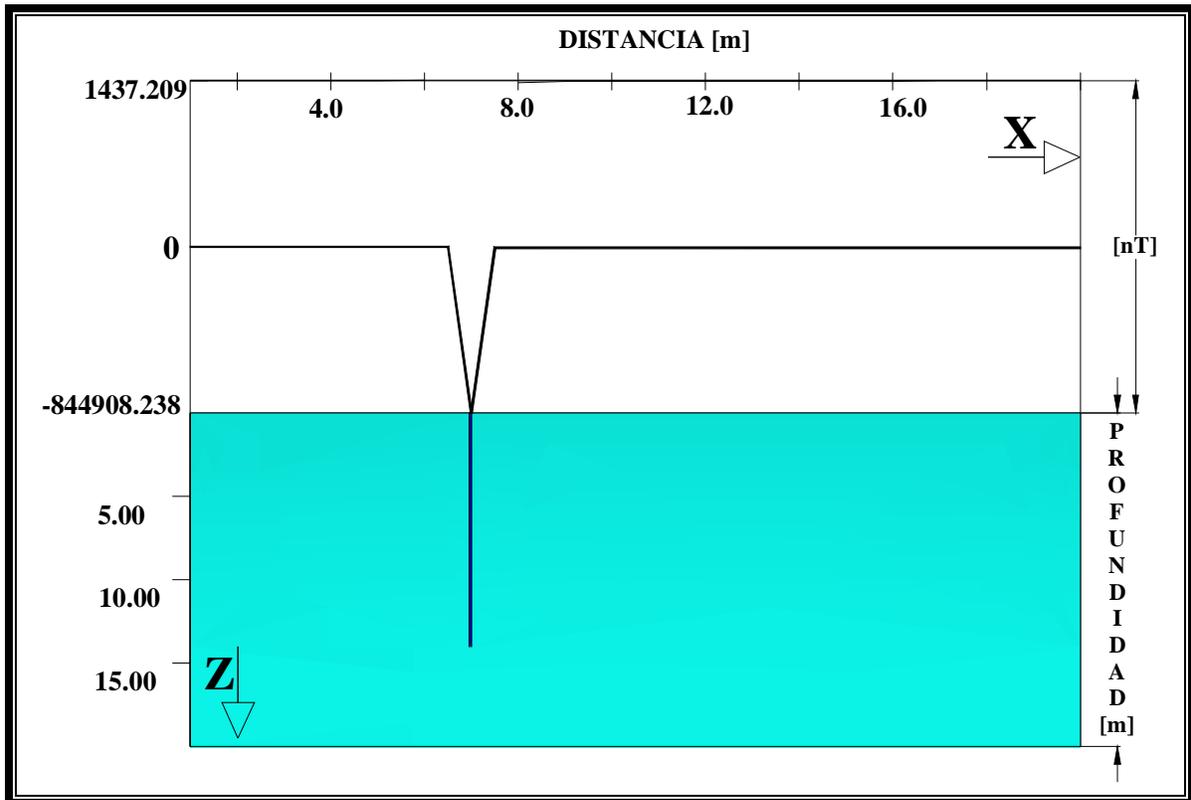


FIGURA II.4.3.3.- Aplicación del modelado inverso practicado a una falla vertical

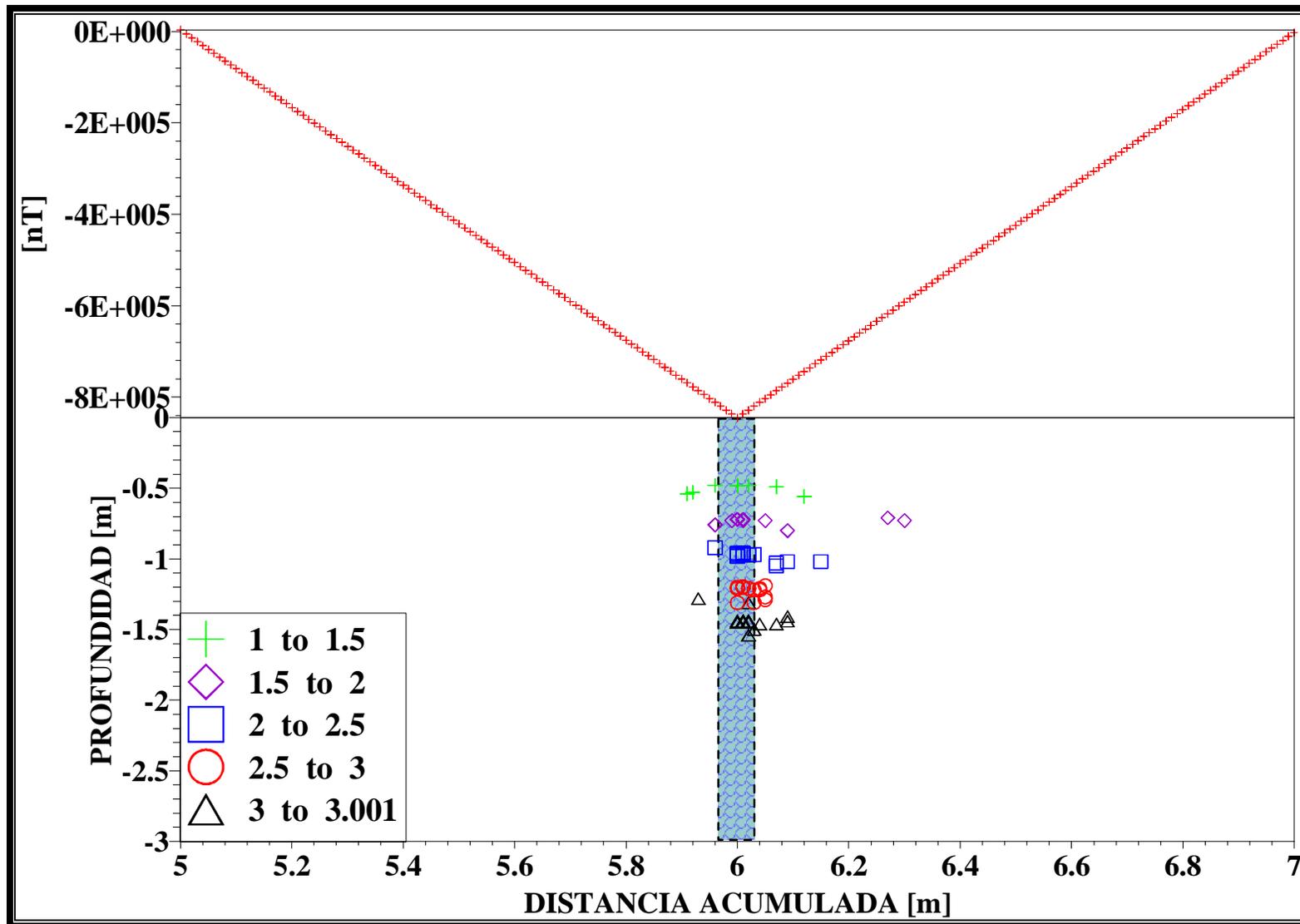


FIGURA II.4.3.4.- Deconvolución de euler aplicada a una falla posicionada y polarizada verticalmente.

La modelación sintética por medio del sistema directo (FIGURA II.4. 3.3), es precisa con las especificaciones, la profundidad del cuerpo es de 10 [m] pero la profundidad del modelo es de 20[m] con objeto de que se tenga un amplio margen de visualización.

Luego de la aplicación de la deconvolución de euler (FIGURA II.4.3.4), el espesor de la falla es aumentado en esta imagen con 0.16 [m] aproximadamente, la ubicación con respecto a la línea de medición es la correcta, queda en la parte central de la depresión, tal como se había vaticinado. La profundidad no es la adecuada. La siguiente imagen de perfil (FIGURA II.4.3.5) apoya esta descripción.

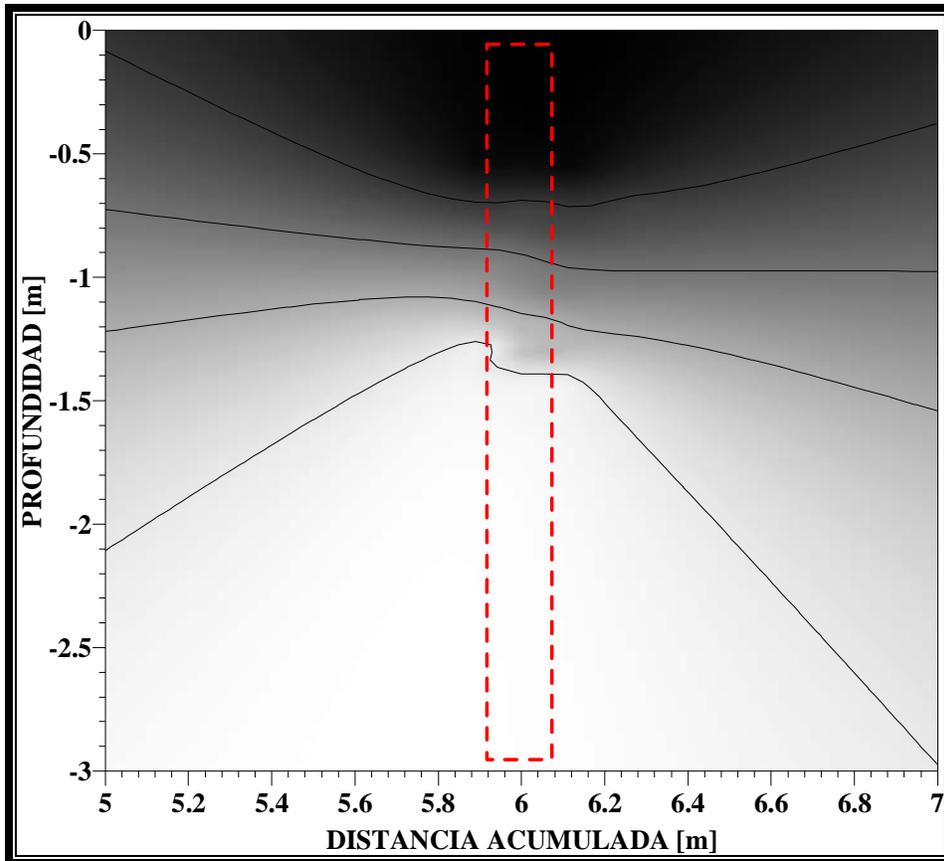


FIGURA II.4.3.5.- Imagen de la línea de perfil ilustrando la falla vertical, posicionada y polarizada verticalmente, el espesor de dicho cuerpo es exagerada por el recuadro rojo. Se nota una concentración a los 2 [m] de profundidad y es en donde se empieza a definir la falla.

Las curvas de mismo valor de índice estructural (FIGURA II.4.3.5) convergen a la parte central, dando forma a la presencia de un cuerpo tabular o cilíndrico alargado, de modo que se superpone la fuente (rectángulo en línea roja discontinua) para dar orientación a los resultados, note que la superposición es aumentada en el ancho, iniciando 5.92 y terminando en 6.08 pero más importante aún, es la profundidad; no se supera el 1.50 [m] lo cual no era lo supuesto, ya que es de 10 [m].

CONCLUSIÓN

El modelo proporcionado por la deconvolución de euler, presenta calidad en lo referente a la localización del cuerpo (ubicación con respecto a la línea de perfil) sin embargo la profundidad es demasiado corta; el espesor de la falla es exagerado, sin embargo esto es

con fines de visualización ya que en realidad, los 5 índices estructurales se perfilan de buena manera, su dispersión no rebasa los 0.04 [m], de modo que la definición del mejor índice estructural es difícil determinar, apoyado de la tabla de ocurrencia y de la descripción de la solución de la “EDE” (FIGURA II.4.3.4), el índice con valor de 2.00 es el índice definitivo.

CONCLUSIÓN GENERAL PARA LOS MODELOS SINTÉTICOS

En general la modelación por medio de la deconvolución de Euler aplicada a modelos sintéticos es muy aceptable en lo referente a la localización con respecto a la curva de respuesta y no así con la profundidad; así como también las dimensiones de la fuente, por otra parte, se debe tener mucha paciencia y amplia disposición de tiempo al realizar la deconvolución pues es necesario hacer diversas pruebas con el tamaño de la ventana y con diferentes índices estructurales. La elección del índice estructural es concebida desde un punto de vista muy personal del intérprete, de modo que es posible que si dos intérpretes analizan por separado la misma anomalía, es muy poco probable que ambos convengan en su elección de dichos parámetro

III.- APLICACIÓN

III.1.-APLICACIÓN EN LA DETECCIÓN DE TUBERIAS DE POZO CON CONTAMINANTES

Tocante al uso del método magnético en el ámbito ambiental se presenta una prospección realizada en Argentina referente a la detección de un relleno sanitario, en donde el objetivo es determinar el material de alta susceptibilidad magnética compuesto por metales. Además se presenta un segundo caso que es referente a la medición de susceptibilidad magnética de barriles de acero, estos dos casos son un bosquejo por lo que solo se presentan generalidades, por lo que no se toman en cuenta detalles.

- III.1.1.- Caso1.- Comparativo Relevamiento Magnetométrico Terrestre de Rellenos Sanitarios: Estudio Piloto en Gualeguaychú, Entre Ríos, Argentina, (Orgeira, 2004).

La presente contribución contiene resultados de la aplicación de relevamiento magnetométrico terrestre en el estudio de rellenos sanitarios. Se ha elegido como caso testigo el área situada hacia el sur de la localidad de Gualeguaychú, en el extremo sudoriental de la provincia de Entre Ríos, Argentina.

La interpretación de la respuesta magnética obtenida sugiere que los objetos enterrados con alta susceptibilidad magnética, no serían de grandes proporciones (menores a tanques de 1 m de altura). Por ello, se descartaría la presencia de tambores, eventuales contenedores de elementos tóxicos. La profundidad de soterramiento de los objetos de alta susceptibilidad magnética aumenta a mayor distancia del camino de acceso a la zona.

La prospección magnetométrica se basa en las diferentes respuestas magnéticas que

producen cuerpos de diferente susceptibilidad. Bajo la acción del campo magnético terrestre (CMT) cuerpos enterrados generan diferentes magnetizaciones inducidas que se adicionan al propio campo terrestre. En consecuencia, la magnetometría revela contrastes de susceptibilidad magnética debajo de la superficie.

La magnetometría terrestre es una de las técnicas geofísicas más difundidas para el control de rellenos sanitarios. Por una parte se aplica esta metodología con el objeto de detectar áreas de enterramiento clandestinas, y por la otra se usa junto con otras técnicas como control de la evolución de áreas de soterramiento habilitadas.

Las mediciones magnetométricas permiten detectar perturbaciones en el campo magnético terrestre causadas por objetos ferromagnéticos enterrados tales como herramientas, tambores y desechos metálicos en general. Nótese que en el caso particular de los tambores, éstos frecuentemente son portadores de fluidos altamente contaminantes.

Por otra parte este método tiene la sensibilidad suficiente como para determinar la presencia de objetos con alto contenido de hierro ferromagnético a profundidades mayores que los detectores de metales.

Por lo anteriormente expuesto, la magnetometría es una de las seis técnicas sugeridas de estudio de control ambiental de áreas de basurales por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Asimismo en Europa es una técnica sumamente difundida, en particular para investigar la existencia y localización de tambores metálicos contenedores de residuos peligrosos. Investigaciones de tales características se pueden consultar a modo de ejemplo en Dahlin y Jeppson (1995) quienes realizaron la prospección en una zona problemática localizada al sur de Suecia.

El presente trabajo contiene los primeros resultados de la aplicación de técnicas magnetométricas en el estudio de rellenos sanitarios. Se ha elegido un caso testigo, donde se tenía conocimiento del cese de operaciones y el interés para verificar la presencia de anomalías indicadoras de potenciales peligrosos para el medio.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.- Se efectuó un relevamiento magnetométrico terrestre, mediante un magnetómetro protónico *Geometrics* con una sensibilidad de 0,1 nT. Se realizó una corrección diurna con una estación base cada hora. El relevamiento comprendió tres transectas de 150 m rumbo norte-sur, equidistantes entre sí 50 m y dos transectas este-oeste separadas a igual equidistancia y una transversal al área de rumbo N 45°O. En cada transecta las estaciones de medición se localizaron cada 2 metros. La estación base (33°3'S-58°32'O) y puntos adicionales de control se localizaron usando un GPS. Una vez corregidas las lecturas efectuadas en el campo, en el gabinete se sustrajo la intensidad del campo magnético terrestre de referencia (IGRF) para el área.

RESULTADOS.- La respuesta magnética obtenida presenta un patrón peculiar, aunque esperable en cuanto a la magnitud de anomalías para un relleno sanitario domiciliario. Cuerpos de alta susceptibilidad magnética, con alto contenido de Fe, están enterrados en forma más o menos aleatoria.

Sin embargo, el sector sudoeste del área presenta una alineación de máximos y mínimos longitudinales de rumbo este-oeste. Este peculiar diseño es el reflejo de una distribución alineada de objetos magnéticos debida al desarrollo de celdas de enterramiento durante el proceso del relleno sanitario.

Si bien el cálculo de la profundidad de enterramiento, así como la localización exacta de los cuerpos es difícil de hacer en este tipo de áreas por las limitaciones propias de la metodología empleada, puede arribarse a estimaciones útiles a los fines propuestos. Al respecto, las dimensiones de las anomalías magnéticas obtenidas disminuyen hacia el sur. Es de destacar que este sector se correlaciona con la parte más antigua del basurero. Consecuentemente, podría interpretarse que tal distribución de anomalías está generada por objetos metálicos ferrosos enterrados que se encuentran a mayor profundidad en el sector sur, debido al enterramiento paulatino debido al efecto de hundimiento progresivo de los objetos metálicos de mayor densidad, efecto previsible en este tipo de depósitos.

Un punto muy importante a evaluar es la magnitud de las anomalías magnéticas obtenidas. En este caso los valores más elevados fueron del orden de las 200 nT. Si se toma en consideración que la profundidad máxima de este relleno sanitario no supera los 2 metros (información suministrada por trabajadores de la zona y constatada *in situ* en el área activa aledaña), y los objetos metálicos enterrados no superarían los dos kilogramos de hierro. Y aunado a que según las estimaciones de anomalías calculadas por Breiner (1973) para objetos típicos metálicos enterrados. Se asegura que, los valores obtenidos en el área de estudio no son compatibles con la respuesta que originaría a las citadas profundidades un tambor metálico de tamaño estándar.

CONCLUSIONES.- El método magnetométrico resultó adecuado a los fines propuestos. En el sector sudoeste del área muestra que se ha podido dar una alineación de máximos y mínimos longitudinales de rumbo este-oeste, producto de una distribución alineada de objetos magnéticos y que reflejan el desarrollo de celdas de enterramiento durante el proceso del relleno sanitario. No se detectaron cuerpos de grandes dimensiones de alta susceptibilidad magnética enterrados en profundidad, lo cual es consistente con relleno sanitario de tipo domiciliario. Consecuentemente se descarta el enterramiento de tambores metálicos, potenciales contenedores de sustancias peligrosas.

La profundidad de enterramiento de los residuos fue disminuyendo a mayor cercanías de las vías de acceso, lo cual es interpretado como un efecto de soterramiento natural progresivo de los objetos metálicos o bien podría ser interpretado por un aporte diferente de residuos metálicos a lo largo de la evolución del relleno sanitario. Dado que la población del área se mantuvo estable durante el período de operación del terreno y que no existieron rellenos alternativos en otras áreas, la segunda alternativa es descartada.

- III.1.2.- Caso2 Propiedades Magnéticas de Barriles de Acero Inoxidable por Medio de mediciones de Campo Magnético en Laboratorio, (Dhananjay Ravat, 1996)

Para este ejemplo de aplicación, no se visita al campo, las mediciones son realizadas en laboratorio, sin embargo se consideran relevantes por el hecho de tratarse de barriles metálicos hechos de acero y por las características geométricas de las fuentes magnéticas que se evalúan en el presente estudio es preciso mencionar este trabajo. Además de que se aplica la ecuación diferencial homogénea de Euler, la cual es ampliamente aplicada en el presente tema de estudio.

INTRODUCCIÓN.- La detección de objetos ferromagnéticos y estimación del tipo y cantidad de objetos se ha incrementado de forma importante en las investigaciones del medio ambiente en todo el mundo. El método magnético es muy útil, en casos donde el índice señal/ruido de anomalías magnéticas es alto, para la detección horizontal (x,y) de cuerpos ferromagnéticos aislados (asumiendo que tienen cambios máximo/mínimo debido a la inclinación y declinación de la orientación del campo magnético y debido a la dirección de la componente total de campo magnético). Se encuentra la profundidad de objetos compactos con un aceptable error, por medio de alguna técnica basada en el gradiente vertical u horizontal. La estimación del tipo de fuente puede ser hecha en muchas circunstancias por medio de la observación de patrones anómalos, con la aplicación de un juicio de la separación de las fuentes y que en algunas ocasiones se requiere que diferentes objetos sean modelados de forma fusionada en una misma anomalía. En el presente trabajo es posible usar modelado elemental, ya sea directo o inverso para estimar aproximadamente el número de tambores y sus localizaciones en casos donde el índice señal/ruido es elevado.

En este estudio, primero, serán determinadas las magnetizaciones de campo y laboratorio de tambores de acero nuevos. Las magnetizaciones derivadas de laboratorio, de campo y sus correspondientes anomalías magnéticas serán comparadas para investigar posibles correcciones y discrepancias. También se realiza una comparación de modelado entre el método de fuente equivalente y un método de modelado 3D para determinar su función habilidad en investigaciones medioambientales. Cabe mencionar que con la oxidación de dos años, las anomalías magnéticas de los barriles han disminuido en amplitud, pero en otros barriles han incrementado, por lo que los cambios causados por la oxidación son por demás complejos

MEDICIONES DE LABORATORIO.-Para las mediciones de susceptibilidad y magnetización remanente, se utilizan 36 muestras de 0.0254 [m] de diámetro que fueron extraídas de 12 barriles de acero usando un pozo industrial. Este no es el mejor método para preservar las magnetizaciones originales, pero es el menos destructivo en la extracción de muestras. La razón más poderosa para aplicar este método se basa en que la presión que es aplicada para remover la muestra puede hacer variar la magnetización, y usando el pozo la presión puede variar lentamente y por lo tanto la variación de la magnetización no presentara cambios bruscos.

SUSCEPTIBILIDAD Y MAGNETIZACIÓN INDUCIDA.- Las mediciones de susceptibilidad son mejoradas en un equipo BARTINGTON donde las muestras son colocadas dentro de una bobina en un circuito capacitor-resistor-inductor (LRC), los cambios en la corriente inicialmente son proporcionales a la susceptibilidad magnética de la muestra. El valor de la intensidad de campo magnético es de 79.577 [Amp/m] con una exactitud de ± 0.04 SI, por la geometría de las muestras, fue necesario hacer las mediciones de dos formas, una en la cual el eje de rotación principal del tambor coincide con el eje de la bobina, que en este caso se obtuvieron valores máximos de susceptibilidad magnética y otro en el cual los ejes principales de rotación para el tambor y el enrollado son ortogonales, que es cuando los valores de susceptibilidad magnética son menores. Se presentan a continuación solo algunas de la muestras con sus valores correspondientes de susceptibilidad magnética (TABLA III.1.2.1)

| MUESTRA # | SUSCEPTIBILIDAD [SI] dirección mínima | SUSCEPTIBILIDAD[SI] dirección máxima |
|-----------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 2.692 | 20.987 |
| 2 | 3.667 | 15.228 |
| 3 | 3.057 | 17.122 |

TABLA III.1.2.1.- Tabla de tres muestras de barriles de acero con valores de susceptibilidad magnética.

MÉTODOS DE MODELADO.- Se habla de dos métodos de modelado para las fuentes magnéticas, para este caso, uno de ellos es diseñando un cuerpo sólido de forma cilíndrica que coincida con las dimensiones del barril junto con sus propiedades magnéticas, luego se superpone otro cilindro ligeramente más pequeño con las propiedades magnéticas del primer cilindro pero negativas, con el fin de emular un barril vacío. En el segundo método se puede representar al barril por medio de la adición de diferentes cuerpos de geometría simple aproximando al barril como un dipolo magnético o una esfera. Ambos métodos tienen sus puntos fuertes, en el primer método se obtiene una mejor estimación de la profundidad, en el segundo es fácil de obtener las contribuciones de magnetización remanente e inducida. Ambos métodos son aplicables en el presente estudio.

DETERMINACIÓN DE MAGNETIZACIÓN INDUCIDA Y REMANENTE.- En este estudio, se ha utilizado la anomalía magnética completa causada por el barril en diferentes orientaciones específicas (FIGURA III.1.2.1). En la orientación 1, el barril es posicionado verticalmente, la orientación 2 es referente a una rotación de 180° sobre el eje “Y”, la orientación 3 es con rotación de 180° con respecto al eje “X” y en la cuarta orientación se gira el eje “Z” 180°, en los valores de susceptibilidad magnética (TABLA III.1.2.1) se toma en cuenta la orientación 1.

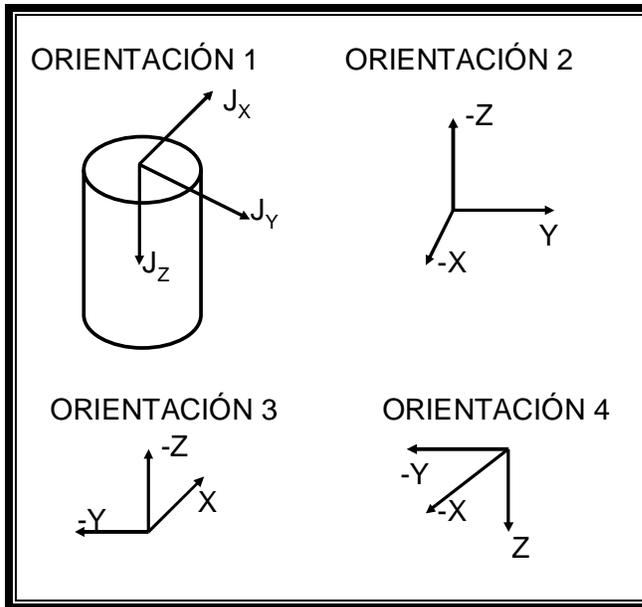


FIGURA III.1.2.1.- Diferentes posiciones de medición de la susceptibilidad magnética para un mismo barril, solo se toma la orientación 1 para el presente estudio.

MODELADO DE FUENTE EQUIVALENTE.- Se han modelado fuentes equivalentes por medio de dipolos magnéticos los cuales son de gran importancia debido a que se busca ajustar a las anomalías observadas en la mayor medida de lo posible. La localización horizontal del dipolo será centrada en el centro del barril. La localización vertical del dipolo que numéricamente se ajusta mejor a la anomalía es por medio de la ecuación diferencial homogénea de Euler. La profundidad promedio del dipolo equivalente es de 0.122 [m].

III.2.-IMPACTO AMBIENTAL EN MINATITLAN VERCRUZ Y ALREDEDORES

- III.2.1.-Antecedentes de Empresa Azufrera Panamericana

Se sabe que desde el principio del siglo antepasado esta zona fue pionera al desarrollar la explotación del Azufre (CRM, 2005), estos yacimientos presentan características particulares y un control litoestratigráfico definido, relacionado a la evolución de estructuras salinas. El área de estudio se encuentra dentro de una zona minera denominada Región Azufrera del Istmo. Constituida por: Jaltipan, Hornillas, Texistepec, Otapan, El Tabasqueño, Cabritos, Las Limas, La Encantada, El Zapote y Uxpanapa.

Su descubrimiento se atribuye a la compañía inglesa “El Águila”, en el año de 1904, quien inicio primeramente la exploración de esta zona. Dos años más tarde, fue descubierta la cuenca salina del istmo de Tehuantepec por la compañía “Pearson Sons”. Las perforaciones realizadas por dicha empresa no detectaron yacimientos petrolíferos, sin embargo, esto condujo al descubrimiento de los primeros depósitos de Azufre. A partir de este año hasta 1957, los trabajos de exploración y explotación estuvieron en manos de compañías extranjeras hasta que en ese mismo año, la empresa Brady Co, traspaso sus instalaciones a la Comisión de Fomento Minero. De 1984 a 1991 el Consejo de Recursos minerales (CRM, 2005) realizo trabajos de exploración y evaluación, cubicando 7'157,460 toneladas de azufre.

- III.2.2.-Ubicación Geográfica, Geología local y Regional

La localización geográfica del sitio en estudio se encuentra en el estado de Veracruz municipio de Jaltipan, limitado por las coordenadas 17°56'51.77"N,94°43'18.87" O; 17°55'51.35"N, 94°43'12.09"O; 17°55'51.85"N; 94°42'03.86"O; 17°56'52.36"N, 94°41'57.39" y con una altura sobre el nivel medio del mar de 45 [m]. Un mapa general de la zona se muestra a continuación (FIGURA III.2.2.1)

El área de estudio se localiza en la porción suoriental del estado de Veracruz y nororiental del estado de Oaxaca, entre sus municipios más importantes se encuentran los siguientes: Minatitlán, Acayucan, Jaltipan, Cosoleacaque, Sayula, Rodríguez Clara y Playa Vicente, Ver., comprende parte de los municipios de San Juan La Lana, Santiago Jocotepec, San Juan Petlapa que pertenecen los Distritos de Choapan, Palomares, Cuauthemoc, San Juan Mazatlán, San Juan Cotzocón.

Para acceder al área en estudio (CRM, 2005), por vía terrestre, la Autopista de cuota # 145 México-Minatitlan y la carretera federal #185 Sayula-Acayucan, la carretera federal # 147 en el tramo playa Vicente-Palomares, la Autopista de cuota #145 México- y la carretera federal No. 180 que comunica al puerto de Veracruz con Acayucan.

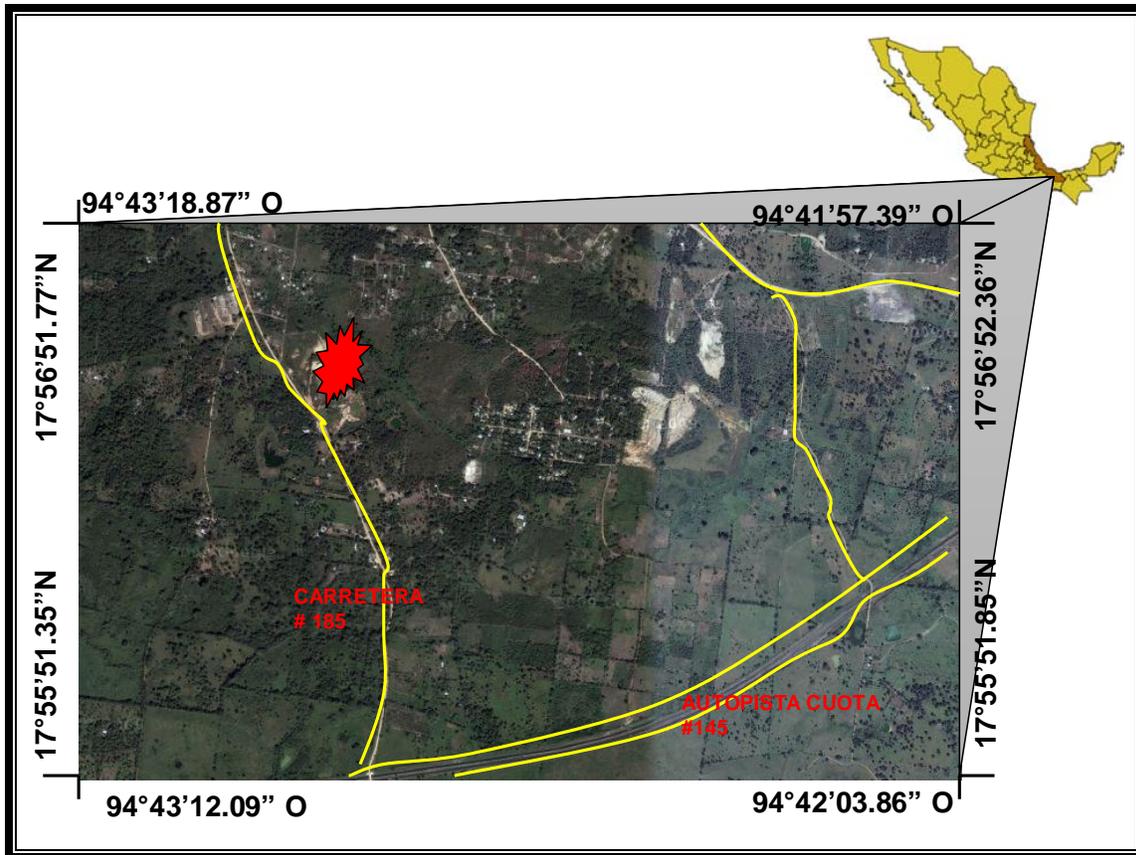


FIGURA III.2.2.1.- Mapa general de la república mexicana que indica la localidad de Jaltipan por medio del punto en color rojo. (Google Earth, 2003)

GEOLÓGIA LOCAL.- La secuencia litológica de la región azufrera del Istmo comprende edades que varían desde el pre-jurásico (CRM, 2005). Que esta representado por estructuras diapíricas salinas y rocas terciarias de las siguientes formaciones: Depósito (Tm, Lu, Tr), Encanto(Tm, Lu, Ar), Concepción(Tm, Ar-Lu) y Filisola(Tm, Ar-Lu); muchas de ellas sin aflorar. Las formaciones terciarias consisten principalmente de lutitas y areniscas. Todas ellas cubiertas en gran parte por Arcillas, Limos y clastos de grano fino (FIGURA III.2.2.2).

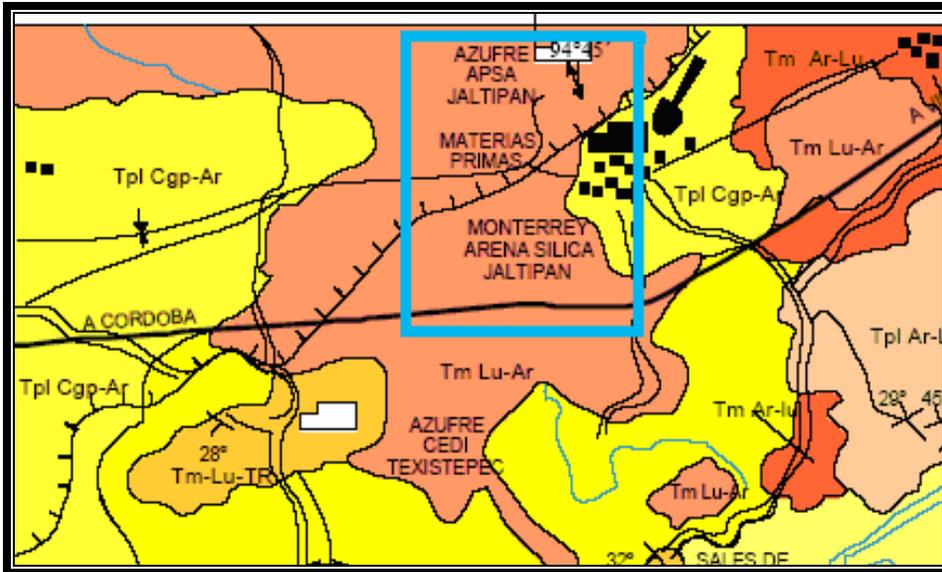


FIGURA
III.2.2.2.-
Enmarcando el área azufrera de la zona (rectángulo azul), la cual es definida geológicamente por la formación concepción (en color rosado) y el encanto (en color amarillo)
CRM 2005.

GEOLOGÍA REGIONAL.- La zona de estudio forma parte del Terreno Tectonoestratigráfico denominado terreno Maya (CRM, 2005), caracterizado por presentar como basamento el Complejo Metamórfico Sierra de Juárez, con una cubierta sedimentaria. Recientemente se ha reafirmado la existencia de este terreno; es importante mencionar que dentro del área se detectaron rocas metamórficas descritas como Complejo Guichicovi, y por análisis petrográficos se determina la presencia de granulitas y con dataciones obtiene edades que fluctúan entre 980 m.a. y 990 m.a., que le permitieron asignarle una edad Greenvilliana. Posteriormente se confirma lo anterior determinando la presencia de gneisses, paragneisses, ortogneisses, charnoquitas y anortositas con edades isotópicas que fluctúan entre 911 m.a. y 1760 m.a. correspondiendo al Proterozoico medio y coinciden en litología y edades con las rocas del basamento del Terreno Oaxaca. Por la posición geográfica que ocupan los complejos Guichicovi y Oaxaqueño, es difícil explicar ya que estos se encuentran separados por el Complejo Sierra de Juárez. Del Pérmico hasta el Triásico se desarrolla un arco magmático continental en la margen pacífica que origina rocas de composición generalmente granítico-granodioríticas con variaciones a dioritas y tonalitas, que constituyen el Macizo de Chiapas y el Batolito de la Mixtequita con edades isotópicas que varían de 318 m.a. a 196 m.a., que corresponden al Carbonífero-Jurásico, cuya relación con el Complejo Guichicovi es de intrusión, la litología y edades de esta unidad guardan gran similitud con las rocas del Macizo de Chiapas. Dentro de las rocas que conforman a la cubierta sedimentaria se encuentra la secuencia Vulcano-sedimentaria de la formación Todos Santos (?) de edad Jurásico medio; se encuentra sobreyaciendo tanto al Bloque La Mixtequita como al basamento del Terreno Maya; a su vez este terreno se encuentra cubierto por las secuencias sedimentarias que conforman las cuencas de Zongolica, Depresión Ítmica y Sierra de Chiapas.

- III.2.3.-Yacimientos de Azufre

Referente al origen del yacimiento de azufre para esta área en particular, se dice que se encuentra íntimamente relacionado con la evolución de las estructuras salinas (CRM, 2005). Estos depósitos se localizan generalmente en la zona del casquete rocoso o cap-rock a profundidades variables, en la porción superior de las estructuras salinas, que comúnmente son de forma cómica. Con frecuencia el cap-rock se encuentra a 150 [m] de profundidad.

El casquete rocoso se forma mediante la solución diferencial de sal que fue originalmente impura. Los residuos insolubles (99% CaSo_4) se acumulan y se consolidan para formar un residuo llamado casquete rocoso (ya definido como cap-rock) posiblemente en forma de anhidrita o yeso. Mediante investigación científica adicional, se ha demostrado que bajo un medio reductor en presencia de bacteria sulfúrica e hidrocarburos, la anhidrita o el yeso pueden cambiarse biogeoquímicamente a caliza y azufre. (VER FIGURA III.2.3.1)

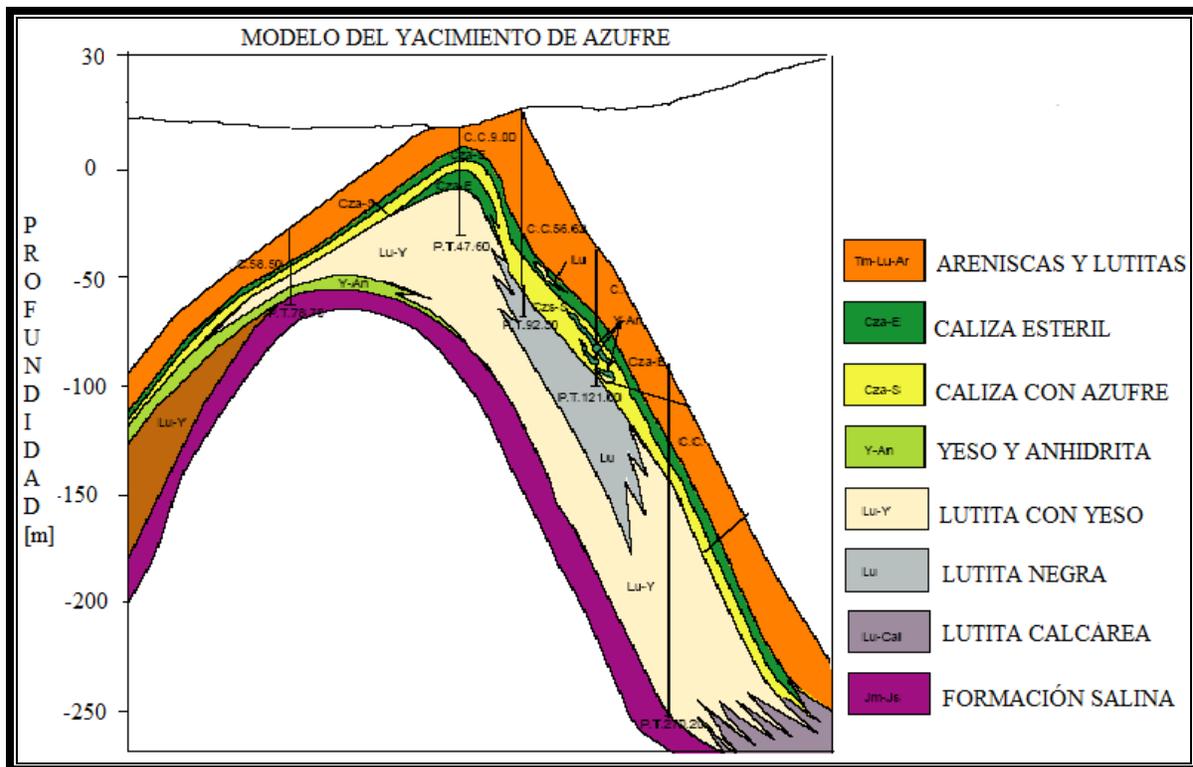


FIGURA III.2.3.1.- Modelo típico de un yacimiento de azufre, en donde se presume que el yeso y anhidrita se convierten en azufre albergado en los poros de caliza. (CRM, 2005)

MINERALIZACIÓN Y ALTERACIONES.- La mineralización es azufre asociado a las estructuras dómicas (CRM, 2005), que están formadas por la intrusión de la masa salina, con su respectivo casquete el cual consta de la cima a la base de: caliza estéril, caliza con azufre, anhidrita o yeso y la formación salina.

ESTRUCTURAS, LEYES Y POTENCIAL.- Las estructuras son de forma domica y sus parámetros para que sea un yacimiento explotable debe ser mayor a 0.50 [m] de azufre neto (CRM, 2005), su potencial es de 7157,460 [ton] de azufre neto in situ, juntando las áreas de Jaltipan, Otapan y Hornillas. Por lo que respecta al domo Jaltipan, la estructura presenta una orientación N 45° E, con una longitud de 2,500 [m] y un ancho de 1,000 [m]. Este yacimiento de azufre estuvo sometido a una intensa explotación, actualmente las reservas se encuentran agotadas.

- III.2.4.- Explotación del Yacimiento

La mayor cantidad del azufre elemental del mundo se ha obtenido por el proceso de Frasch a partir de las piedras calizas porosas que lo contienen (Frasch). Herman Frasch desarrollo su ingenioso método, que consiste en fundir el azufre bajo tierra o en el mar, y luego bombearlo hasta la superficie. Se utiliza equipo común de los pozos petroleros para hacer las perforaciones hasta el fondo de los estratos cargados de azufre, a una profundidad entre 150 y 750 [m] bajo tierra.

Se introduce un juego de tres tubos concéntricos, se pasa un tubo de 10 [cm] a través del de 20 [cm], de modo que quede un espacio anular entre los dos, extendiéndolo casi hasta el fondo de la roca cargada de azufre, y se le apoya de un collar que sella el espacio anular entre los tubos de 20 y 10 [cm]. Un tubo para aire, de 3 [cm] de diámetro, dentro de los otros, llega hasta una profundidad ligeramente por encima del collar mencionado. El tubo de 20 [cm] se perfora en dos niveles diferentes, uno encima y otro debajo del collar anular. El conjunto superior de perforaciones permite que escape el agua caliente, y el Azufre fundido entra al sistema a través de las perforaciones inferiores.

Se pasa agua caliente a más o menos 160°C (el punto de fusión del azufre es de 115°C) hacia abajo del espacio anular, entre los tubos de 20 y 10 [cm] y se hace entrar aire comprimido hacia abajo del tubo de 3 [cm] para que el azufre líquido pueda subir a superficie (VER FIGURA III.2.4.1)

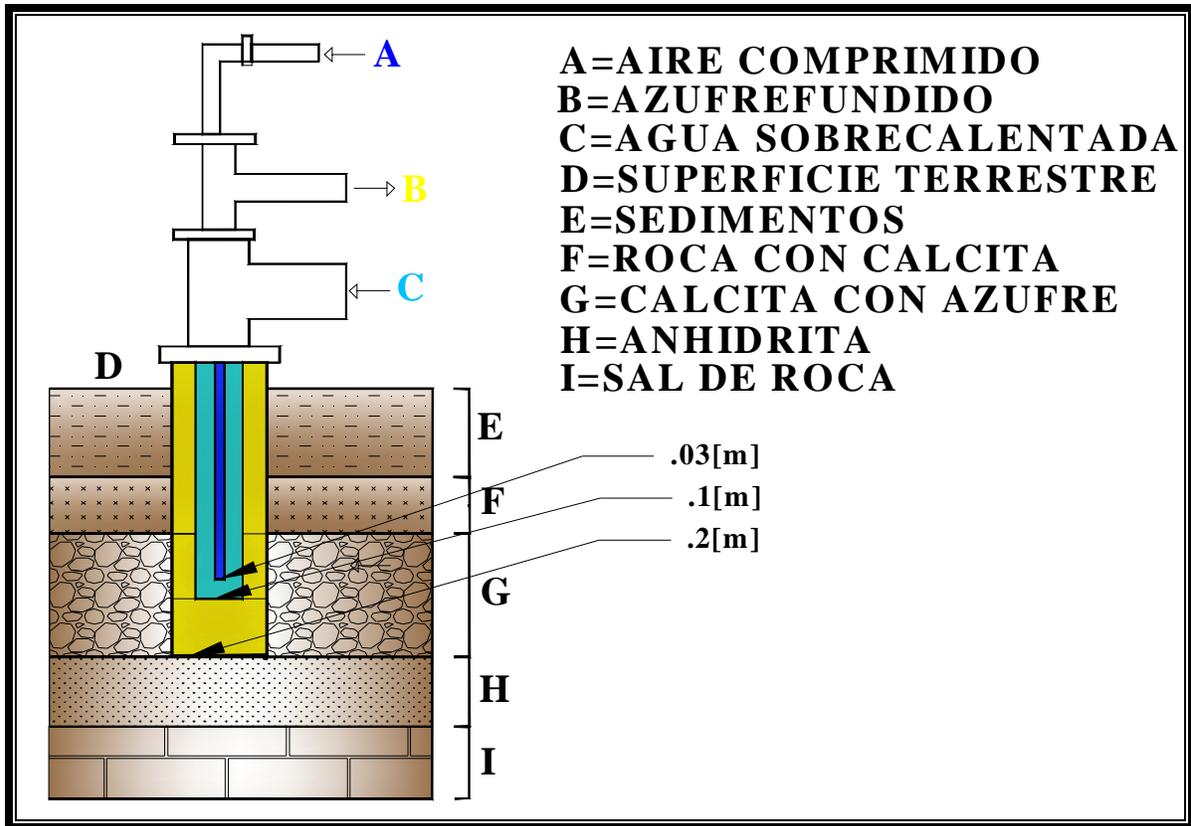


FIGURA III.2.4.1.- Sistema de Frasch.

- III.2.5.-Consecuencias Ambientales

Actualmente el predio consta de 480 hectáreas que tienen zonas con depósitos de residuos de carbón y azufre (Bremer, 2002), depósitos de restos de azufre donde éste era almacenado a cielo abierto para su distribución, se presentan además, derrames de azufre en diversos puntos del predio, presas, lagunas y sembrados así como también asentamientos de predios irregulares. De acuerdo con los resultados de trabajos de evaluación previos, se dice que los residuos presentes en la zona, son peligrosos por su alto contenido de corrosividad debido a que sus valores de pH (de 1.35 a 1.83) se encuentran por debajo del límite mínimo (2.0) establecido en la norma oficial mexicana NOM-052-ECOL-1993.

En muestras de agua y sedimento obtenidas en lagunas y presas, se detectó la presencia de metales pesados en concentraciones muy bajas

Los resultados de muestreo de suelo arrojan un valor de pH igual a 7.4 el cual es relacionado con el contacto de materiales azufrosos.

Se determinó que la cubierta vegetal de ciertas plantas presenta resistencia a los efectos ácidos de los residuos que subyacían directamente debajo de la capa de suelo que dio soporte a la cubierta vegetal

Resultados de pruebas microbiológicas indican que el alto contenido de azufre produce una reducción en el pH del suelo, lo cual inhibe el desarrollo de la actividad microbiana, por lo que el método de degradación del azufre por bacterias no es una solución viable

Existen tres áreas que se encuentran impactadas por hidrocarburos que han emanado a la superficie a través de pozos que quedaron abiertos y que deben ser remediados conforme a metodologías de remediación específicas para hidrocarburos

- III.2.6.- Dictámenes Ambientales

Se propone neutralizar o encapsular el material contaminante con un tipo de “embase” que tenga propiedades enfocadas a soportar el alto grado de acidez que caracteriza al material anómalo (Bremer, 2002), así como también un monitoreo constante del pH en zonas de derrame.

Se propone la construcción de una celda (tipo liner) que cumpla con normas de ecología e higiene por lo que se procedería a la utilización de un método de un relleno sanitario, debido a que la peligrosidad del contaminante solo implica a sus valores de pH y no por la presencia de compuestos tóxicos por metales pesados y compuestos orgánicos.



***FIGURA III.2.6.1.- Depósito de restos de azufre a cielo abierto.
Se nota la presencia de material biológico resistente a la acidez del terreno.
(Bremer, 2002)***

IV.-DETECCIÓN DE POZOS CONTAMINANTES

IV.1.-GENERALIDADES

Por medio de la utilización de diferentes herramientas, se demostrará la presencia de fuentes magnéticas que resultan ser cuerpos contaminantes y que deben de ser considerados para la evaluación del impacto ambiental prevaleciente en dicha localidad.

En forma resumida, el método se basa en elegir de una malla de datos, anomalías de carácter dipolar para posteriormente realizar una línea de perfil sobre cada una de estas, las cuales serán deconvolucionadas por medio de la ecuación diferencial homogénea de euler llamada aquí como “EDE” con el fin de modelar y dar una estimación de la posición a las fuentes; y para corroborar la autenticidad de la dipolaridad de las fuentes anómalas, así como también de corroborar la localización de las fuentes, se aplicara el método de la señal analítica (FIGURA IV.1.1). De forma adicional, se buscará una relación vinculada entre los modelos sintéticos antes expuestos (sección II.4) y los resultados obtenidos para datos originales por medio de una comparación cualitativa, es decir se comparará la forma de la anomalía de ambos modelos, su deconvolución y la forma geométrica de la fuente.

Por otra parte, la longitud de la línea de medición para cada anomalía es variable pues depende del tamaño de la zona anómala, el sentido de digitalización en todas las líneas de perfil es de Sur a Norte, por lo que todas las curvas de respuesta magnética se encuentran en este mismo sentido.

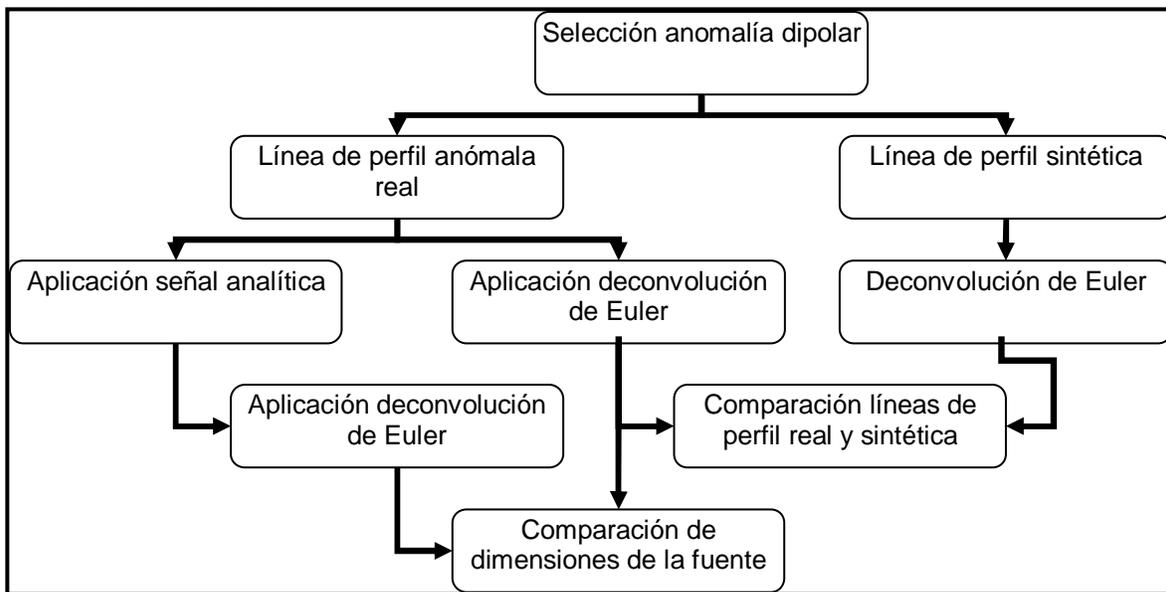


FIGURA IV.1.1.-Diagrama de la metodología a seguir.

De la siguiente vista en planta de la zona en estudio (FIGURA IV.1.2) se nota que todas las líneas de perfil, se ubican con rumbo Norte franco debido a que se presume (y más adelante se demostrará) que se está tratando con anomalías de carácter dipolar aisladas, en las cuales se tiene la teoría de que los tubos de extracción sufrieron un efecto de desmagnetización (probablemente alcanzaron el punto Curie, ver sección III.2.4 “Explotación del Yacimiento”) y posteriormente se magnetizaron de acuerdo al sentido del campo magnético terrestre, o sea de norte a sur. El sentido de la digitalización se realiza de Sur a Norte, de modo que todas las líneas de perfil se empiezan en este sentido.

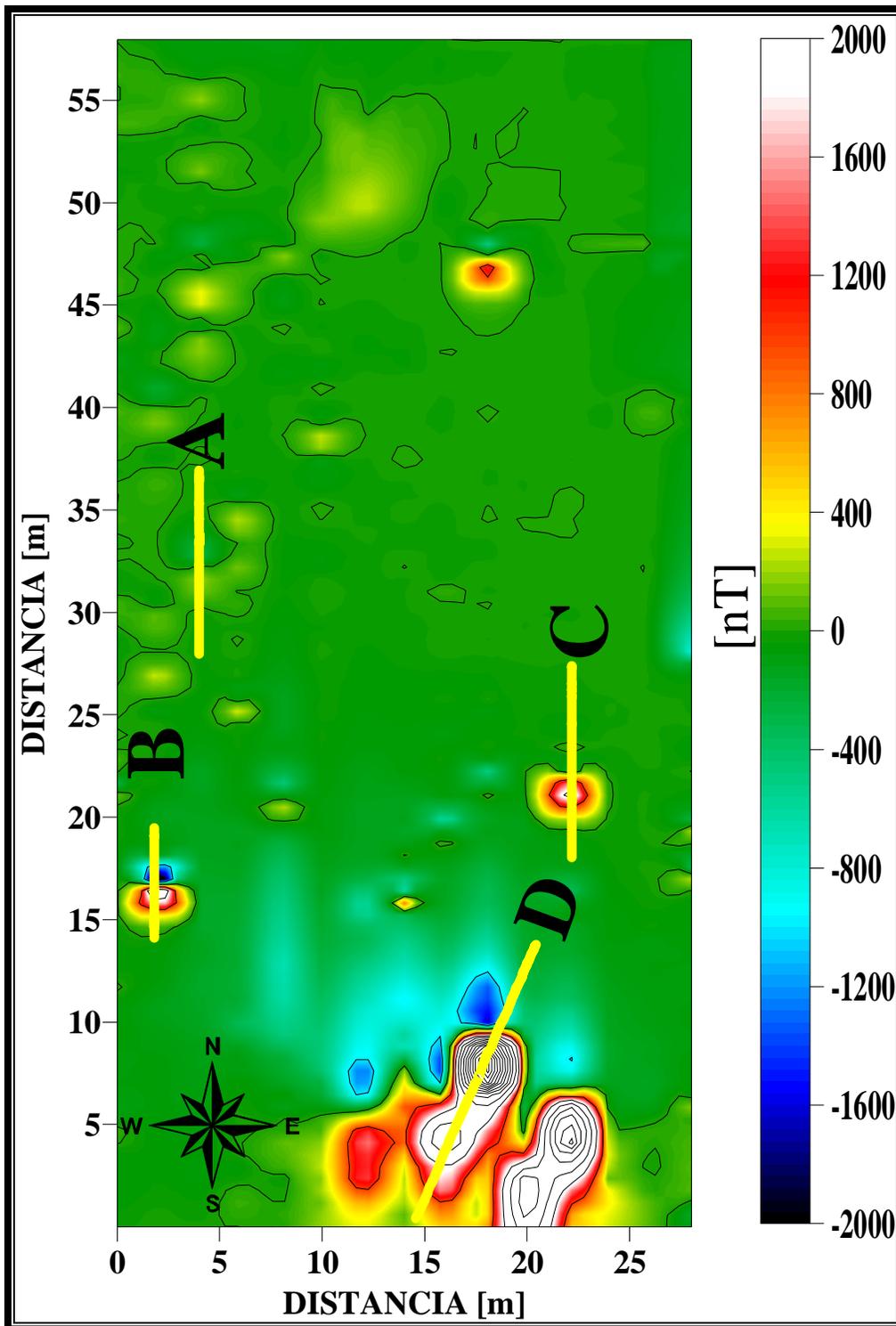


FIGURA IV.1.2- Vista en planta del mapa de anomalías magnéticas, se muestran además las líneas de perfil que se analizarán, se definen por medio de literales y serán expuestas en orden alfabético. Cabe mencionar que las coordenadas son arbitrarias.

IV.2.-ANOMALÍA “A”

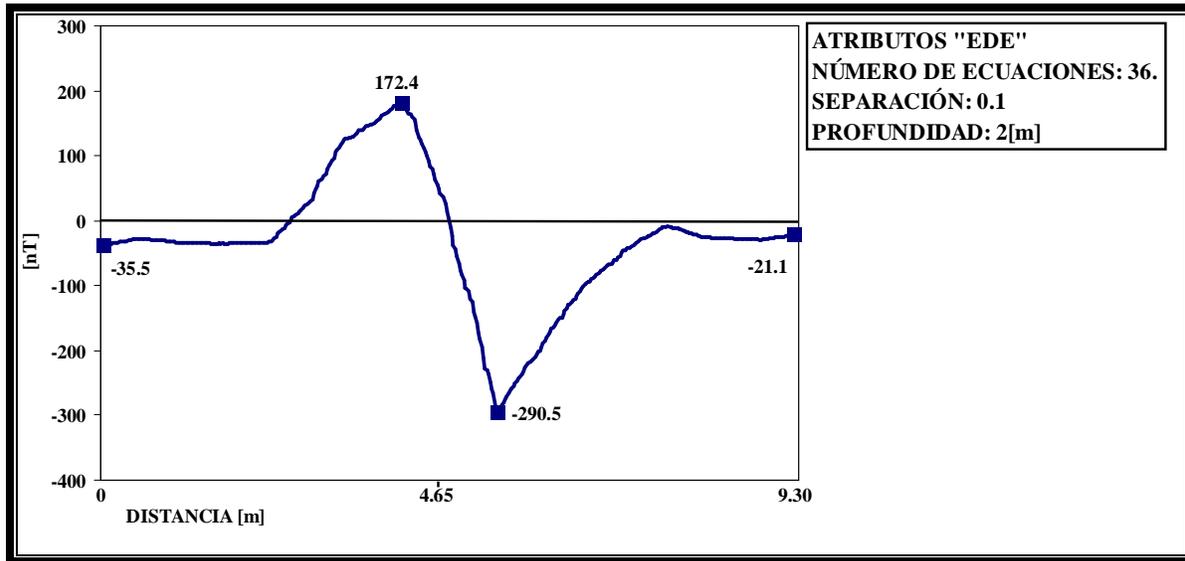


FIGURA IV.2.1.- Perfil de la anomalía “A”.

La anomalía “A” se compone de una buena curva con valores máximo y mínimo de 172.4 [nT] y -290.5 [nT] respectivamente (FIGURA IV.2.1), la información en la parte de la derecha muestra los valores que mejor detallaron a la solución de la deconvolución de Euler. El número de ecuaciones corresponde a 36, sin embargo existe la posibilidad de ejecutar la deconvolución con hasta 4201 puntos, pero la dispersión y forma de concentración de los índices se considera como inadecuada.

Esta anomalía se localiza en zona de estudio (FIGURA IV.1.2) con coordenada inicial en 27.60 N, 4.07E y coordenada final en 36.78N, 4.07E; su orientación preferencial es N-S, con una longitud de 9.30 [m].

- IV.2.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”

Ahora sigue la aplicación de lo que sería la deconvolución de Euler sobre la presente anomalía, los datos que se tienen de entrada para su ejecución son los siguientes:

Valor de campo magnético: 40451.5 [nT]

Inclinación campo magnético: 46.33 [nT]

Declinación campo magnético: 3.88 [nT]

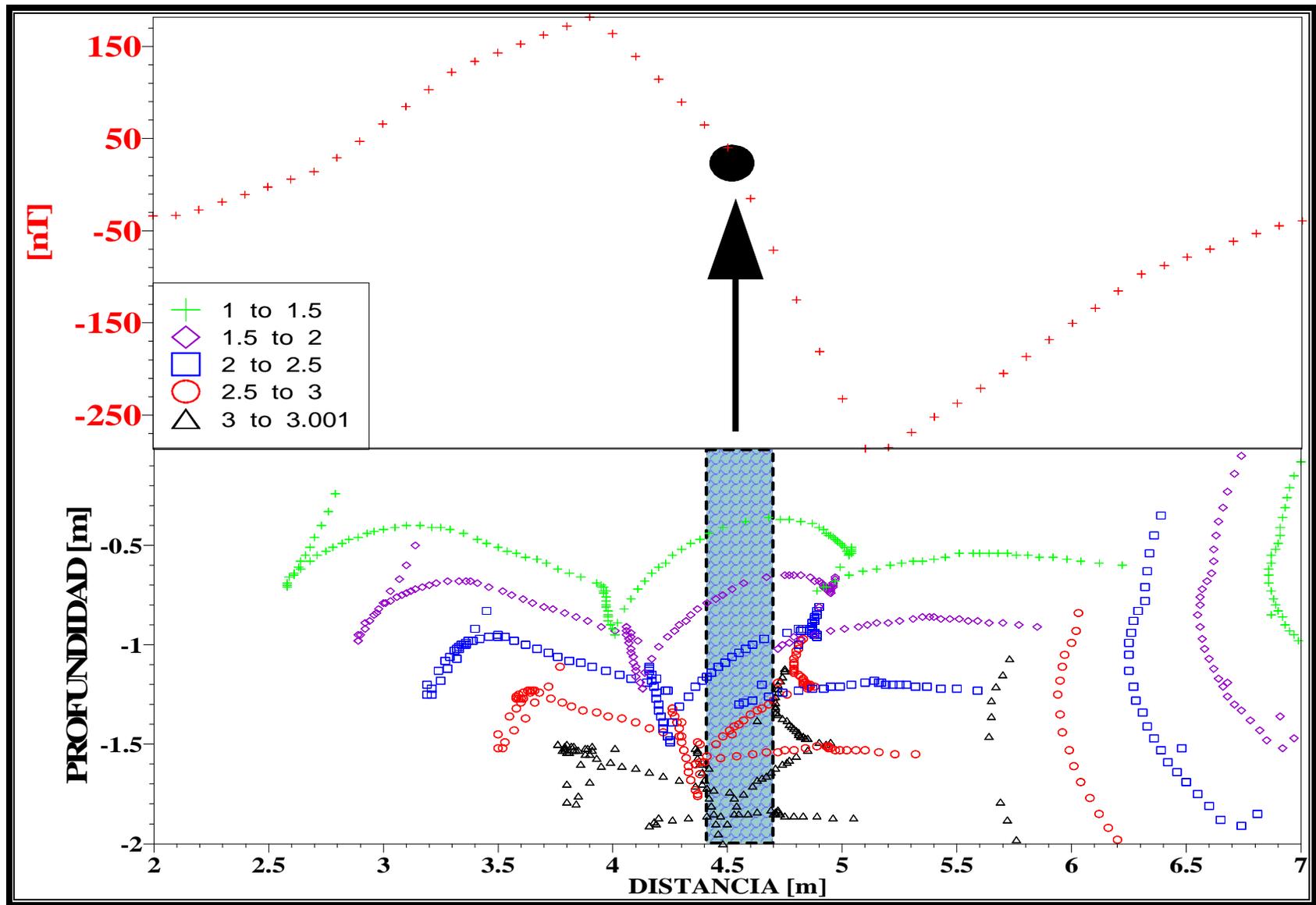


FIGURA IV.2.1.1.- Solución a la deconvolución de Euler aplicada a la anomalía "A".

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 21.70 | 173 |
| 1.5 | ◇ | 21.20 | 169 |
| 2.0 | □ | 20.50 | 163 |
| 2.5 | ◦ | 19.00 | 151 |
| 3.0 | △ | 17.60 | 140 |

Como en muchas de las siguientes anomalías, el índice que más aparece es el de 1.00. Para que este valor sea el mejor definidor de la fuente, falta revisar la deconvolución y analizar las imágenes que de ella emanen, pues la dispersión y concentración de los índices es un factor determinante.

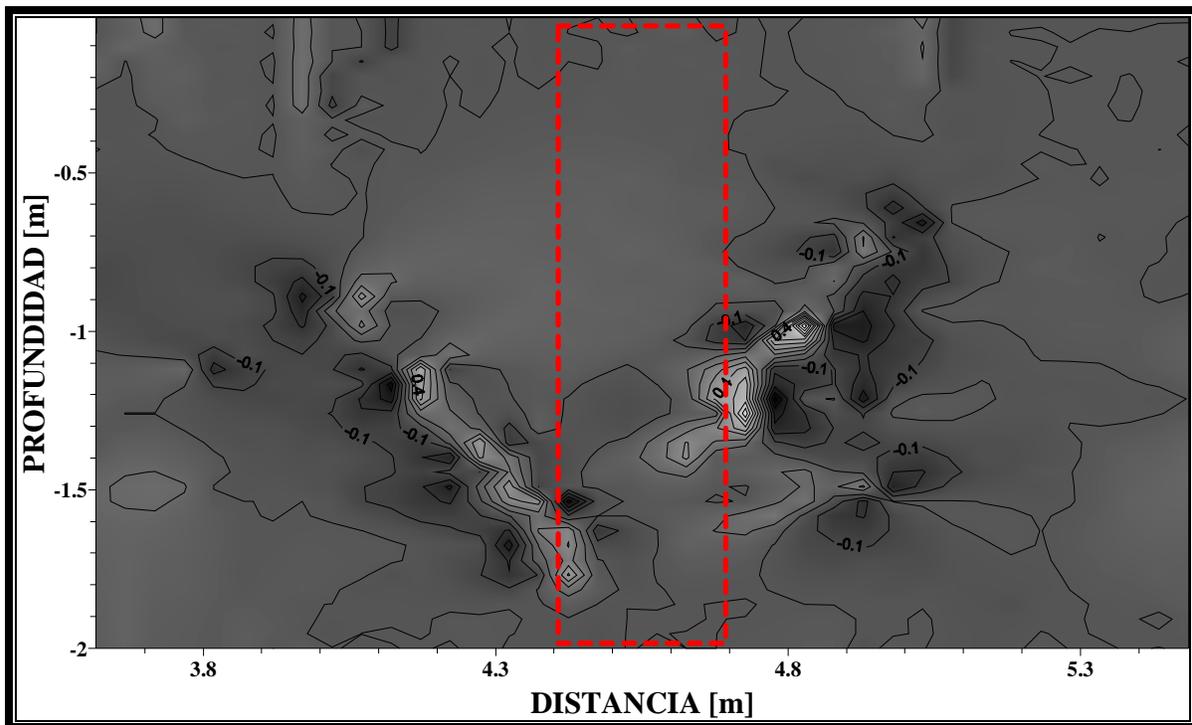


FIGURA IV.2.1.2.- Imagen de perfil de la anomalía "A"..

En función de las tendencias de concentración de los índices estructurales se define cual de estos es el mejor definidor de la fuente, y con base en esto se propone su localización, visualizando la solución a la deconvolución de Euler "EDE" (FIGURA IV.2.1.1) se aprecian diferentes patrones de concentración de índices estructurales, específicamente la concentración de índices estructurales que se encuentra entre 4.0 y 5.0 metros sobre la línea de perfil es donde se presume que se localiza la fuente, pues coincide con los límites del cambio de polaridad de la curva de la anomalía. Para esta concentración se aprecia que todos y cada uno de los índices forman una misma figura la cual tiende a ser circular, sin embargo cada índice propone una cierta profundidad y espesor horizontal diferente, por lo que es evidente que se debe seleccionar que concentración de índice estructural que es

perteneciente a este mismo rango se ajusta mejor a la fuente. Todas las concentraciones ajenas a este conjunto de valores se consideran erróneas y se definen como dispersión.

De acuerdo a lo recién citado se ha superpuesto un modelo de tubería que coincide con el índice estructural que se nota en la tabla de ocurrencia y en la solución de la deconvolución (FIGURA IV.2.1.1) en color rojo (2.50) pues los límites de este índice presenta las dimensiones más coherentes que son de 0.30 [m] de diámetro iniciando en 4.40 para terminar en los 4.70 metros. Por el momento se dirá tentativamente que el índice que mejor define a la fuente es de 2.00 o 2.50.

La solución a la deconvolución de Euler (FIGURA IV.2.1.1) presenta cierta dispersión, pero sin embargo el reconocimiento de la fuente esta señalado por un acomodo alineado de los índices, pues tienen la misma tendencia.

CONCLUSIONES

Se ha determinado la ubicación y presencia de la fuente, concluyendo que su diámetro es de aproximadamente 0.30 [m] localizado de 4.40 a 4.70 a lo largo de la línea de perfil, su posición con respecto a la curva de la anomalía es la correcta. Se ha estimado el índice estructural y se ha determinado que es de 2.50, lo cual es adecuado si se considera a la fuente compuesta por dipolos magnéticos aislados posicionados en línea.

Se necesita aplicar el método de la señal analítica para corroborar la naturaleza de la fuente de la anomalía y estimación de la ubicación, aparte de comparar los límites que esta ofrece con los detallados en esta parte.

- IV.2.2.-Aplicación de la Señal Analítica

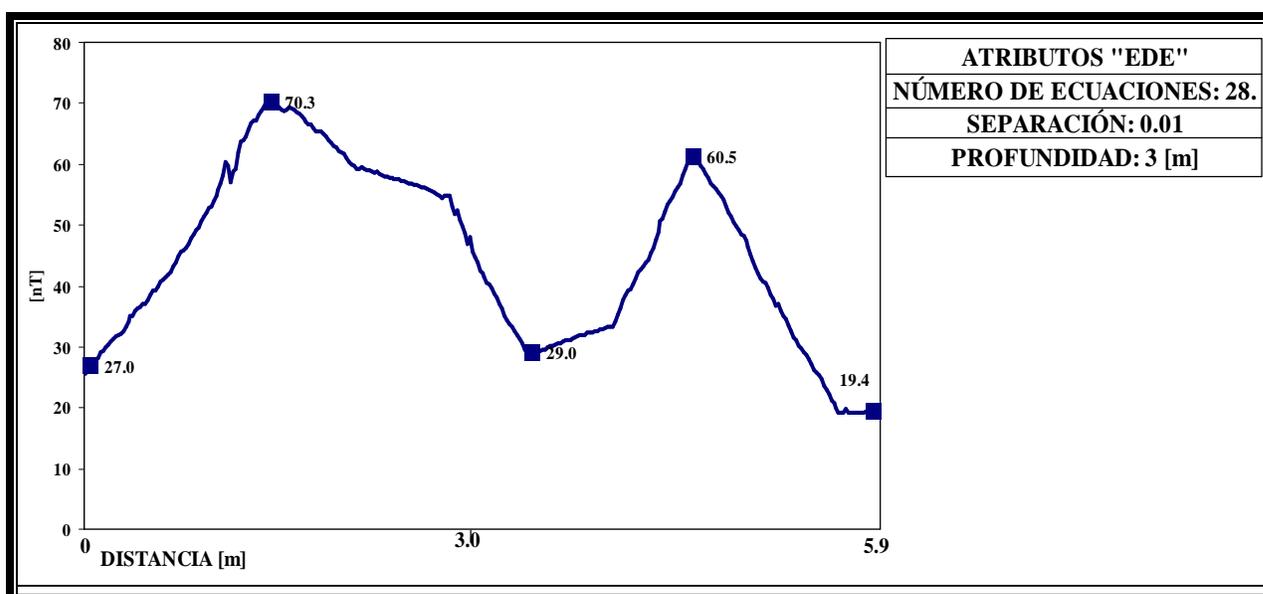


FIGURA IV.2.2.1.- Aplicación de la señal analítica sobre la anomalía "A".

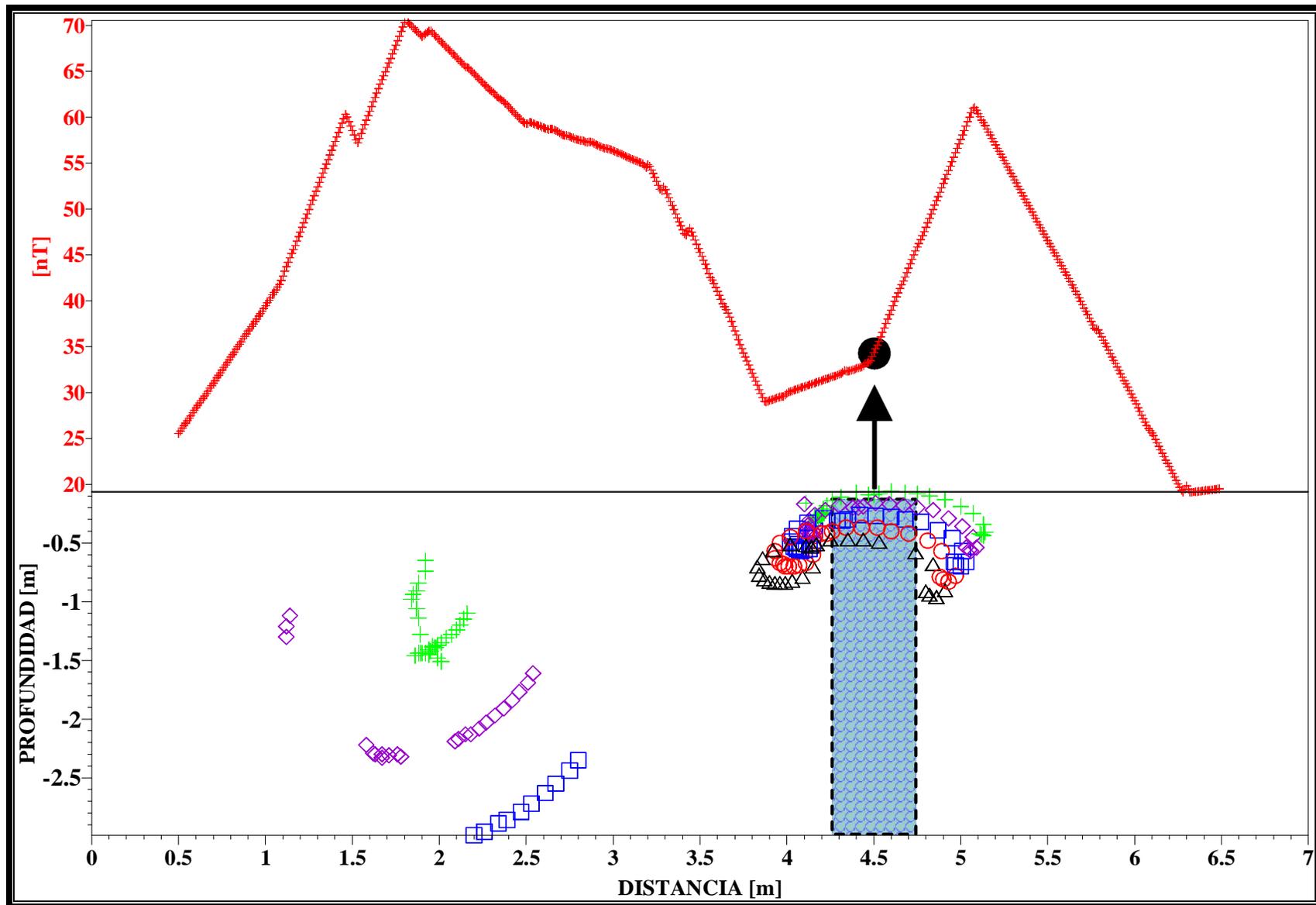


FIGURA IV.2.2.2.- Solución de la deconvolución de Euler para la señal analítica de la anomalía "A".

Por lo que se refiere a la teoría de la señal analítica, se esperaba que los dos valores máximos (uno de 70.3 y 60.5) fueran iguales en magnitud (FIGURA IV.2.2.1) sin embargo, no es así, se aprecia una falta de simetría en toda la curva, probablemente causada por la inhomogeneidad magnética del terreno.

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 29.70 | 62 |
| 1.5 | ◇ | 25.40 | 53 |
| 2.0 | □ | 18.70 | 39 |
| 2.5 | ◦ | 13.40 | 28 |
| 3.0 | △ | 12.90 | 27 |

El índice de mayor ocurrencia, es el de 1.00, sin embargo hay que mencionar que esto, no significa que sea el mejor índice, solo sirve como una primera idea. En la deconvolución anterior, se definió como 2.5 al mejor índice estructural, la aplicación de la señal analítica deberá coincidir con este valor.

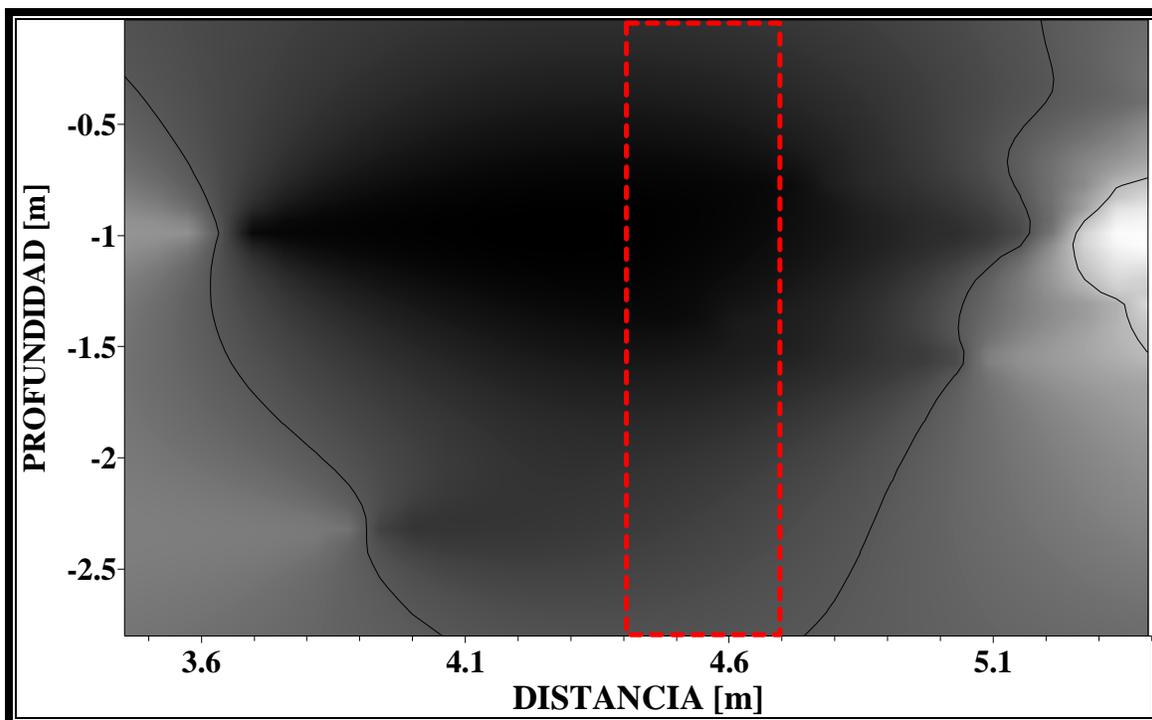


FIGURA IV.2.2.3.- Imagen en vista de perfil de la aplicación de la señal analítica con la fuente enmarcada con el rectángulo en color rojo.

Por lo que se ve en el perfil de la anomalía “A” con la aplicación de la señal analítica (FIGURA IV.2.2.3) la enmarcación de la fuente no difiere con la imagen de perfil sin la aplicación de la señal analítica (FIGURA IV.2.1.1).

Hay un par de cuerpos circulares en cada lado de lo que sería la fuente, los cuales coinciden con las crestas superiores izquierda y derecha de la señal analítica y se pueden considerar como bordes de la fuente, pues se localizan muy próximos de lo que es la fuente. Se ve que la presencia de la fuente es detallada a partir de una concentración esférica.

La deconvolución de Euler aplicada a la señal analítica de la anomalía “A” (FIGURA IV.2.2.2) tiene una forma común, al igual que en la última imagen, se muestra a los cuerpos que detallan las crestas de la curva y su dispersión es relativamente poca.

Según esta imagen el mejor índice sería difícil de determinar dado que todos los índices definen lo mismo, presentan muy poca dispersión, la profundidad que se indica es menor al procesado anterior.

CONCLUSIONES

Las dimensiones propuestas por la solución de la deconvolución son de aproximadamente 0.30 [m] para el diámetro, empezando en 4.40 y terminando en 4.70 [m], y la profundidad se halla disminuida lo cual es aceptable. La señal analítica coincide con el procesado anterior a este.

Por lo que respecta al índice estructural, en las tablas de ocurrencia aparece más el índice de 1.00, sin embargo al observar las dos soluciones de la “EDE” este valor queda descartado. En la solución de la señal analítica es difícil determinar, por lo cual se concluye que el mejor índice es de 2.50.

- IV.2.3.- Comparación Con Modelo Sintético

La comparación cualitativa del modelo sintético con la anomalía “A” sin señal analítica, presenta sus similitudes así como también sus diferencias; las dos señales hacen referencia a un mismo tipo de anomalía y al igual que en los próximos casos, se espera que las curvas de respuesta magnética sean muy parecidas y que además la ubicación de sus respectivas fuentes se localice en el mismo punto.

De las curvas de repuesta magnética (VER FIGURAS II.4.1.3 y IV.2.1) se nota que ambas empiezan en un valor que es aproximadamente constante (-931.8 [nT] para el sintético y -35.5 [nT] para la anomalía real) luego tienen un máximo (172.4 [nT] para la anomalía real y 13189.5 [nT] para la sintética), un mínimo(-290.5 [nT] para la anomalía real y -11338.8 [nT] para la sintética) y finalmente regresan a un valor constante (-21.1 [nT] para anomalía real y -931.87 [nT] para la sintética); desde un punto de vista cualitativo, es claro asegurar que por su similitud son de la misma naturaleza y describen a un mismo cuerpo, sin embargo, de acuerdo a lo anterior existen diferencias cuantitativas y también deben ser tomadas en cuenta.

Para mostrar mejor esto, se presentan en forma individual a cada una de las curvas, con el eje vertical normalizado, iniciando con la anomalía real (FIGURA IV.2.3.1) y posteriormente con la curva de datos sintéticos (FIGURA IV.2.3.2), se observa claramente el máximo y el mínimo en las dos curvas.

El valor máximo para la curva de modelo real (FIGURA IV.2.3.1) es de 0.37 [nT] mientras que el mínimo es de -0.58 [nT], estos valores serán comparados con el máximo y mínimo correspondientes al modelo sintético más adelante, y por ahora solo se dirá que no necesariamente tienen que ser de la misma magnitud, ya que es muy probable que podrían diferir en diferentes factores.

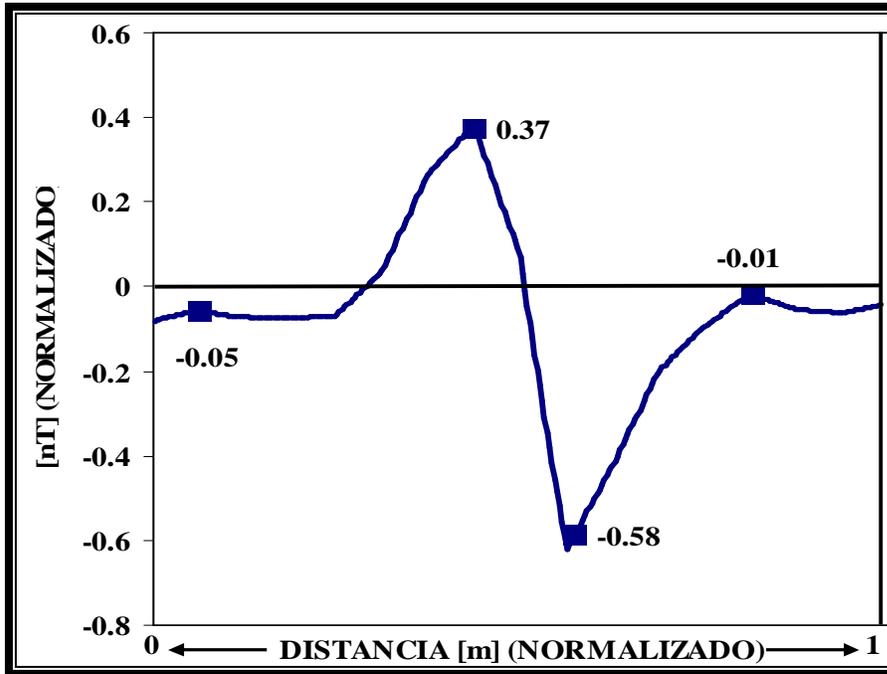


FIGURA IV.2.3.1.-
Curva de modelo real de tubo vertical, anomalía "A".

Ahora sigue la gráfica referente a la anomalía sintética (FIGURA IV.2.3.2), en la cual se observa una diferencia cualitativa mínima con respecto a la gráfica anterior.

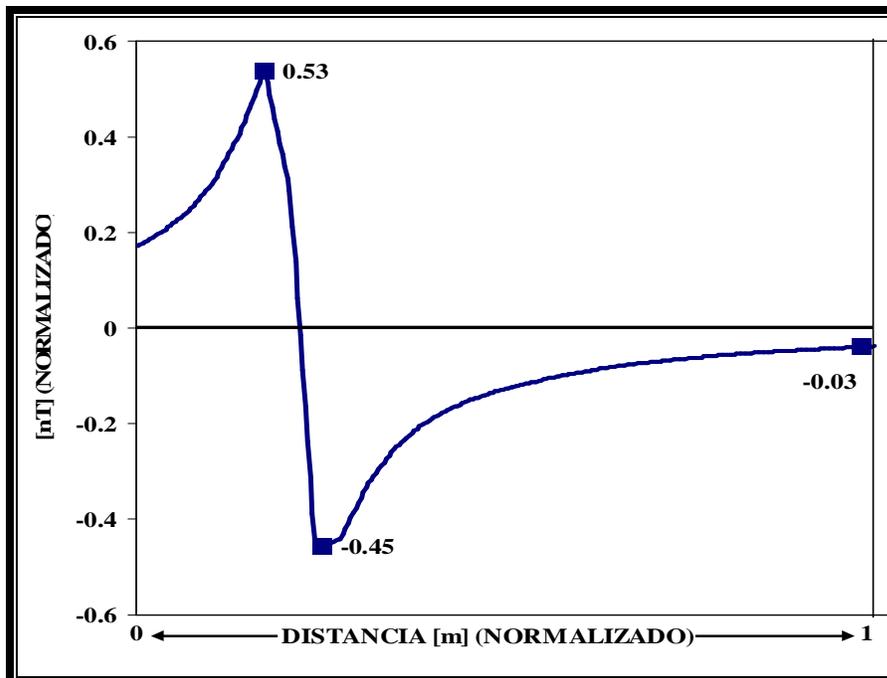


FIGURA IV.2.3.2.-
Curva de respuesta magnética para el modelo sintético.

El valor máximo es igual a 0.53 [nT], el mínimo igual a -0.45 [nT]. En efecto, las dos curvas presentan máximo y mínimo muy cercano uno con otro lo cual demuestra que su similitud es amplia y podemos decir que ambas curvas caracterizan a un mismo tipo de cuerpo que probablemente pueda diferir en dimensiones y probablemente también en contenido.

Cuantitativamente hablando, existe una diferencia abismal en el rango de las dos curvas, esto es causado principalmente por tres razones las cuales serán presentadas al finalizar este apartado, y con el fin de apreciar de forma cuantitativa el grado de similitud de las anomalía real con la sintética, se aplicará el coeficiente de correlación, el cual, es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Es independiente de la escala de medida de las variables.

El cálculo del coeficiente de correlación lineal se realiza dividiendo la covarianza por el producto de las desviaciones estándar de ambas anomalías:

$$r = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y}$$

Siendo:

σ_{XY} la covarianza de ambas anomalías

σ_X y σ_Y las desviaciones típicas de cada una de las anomalías.

El valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1, +1]:

Si $r = 0$, no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica una independencia total entre las dos variables, es decir, que la variación de una de ellas puede influir en el valor que pueda tomar la otra. Pudiendo haber relaciones no lineales entre las dos variables. Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en idéntica proporción. Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva. Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en idéntica proporción. Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

Para el presente caso primero se hará un normalizando del rango y dominio para ambas curvas y posteriormente se efectúa el calculo del coeficiente de variación, que resulta ser de 0.8163, es decir, se dice que ambas curvas difieren en un 18.37%, y de acuerdo con estola correlación es positiva sin llegar a una correlación perfecta positiva.

Por otra parte la localización de la fuente en cada caso es la misma, esto es, se ubican a la mitad del cambio de polaridad (FIGURA IV.2.3.3), sin embargo al observar sus correspondientes respuestas magnéticas y sus imágenes de perfil se notan diferencias en lo que se refiere a la dispersión de índices estructurales que predomina en la anomalía "A", sin embargo la fuente en ambos casos se detalla y sus dimensiones son confiables.

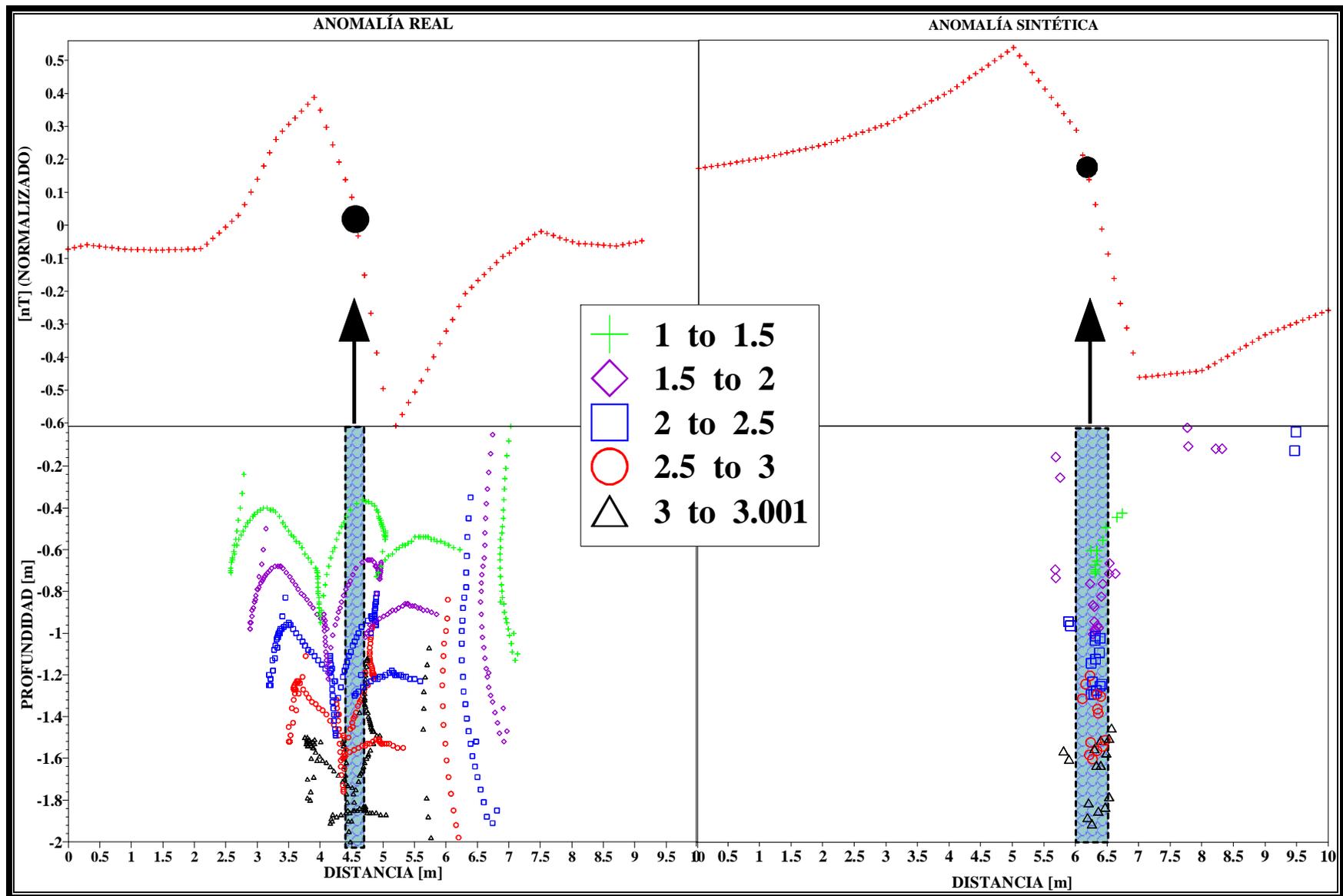


FIGURA IV.2.3.3.- Comparación de la solución de la deconvolución de Euler de la anomalía “A” y el modelo sintético.

IV.3.-ANOMALÍA “B”

Esta anomalía es un claro ejemplo de dipolaridad aislada (FIGURA IV.3.1), esta polarizada en la parte Sur como positiva y en la parte Norte negativa, tanto su valor máximo (2932.4 [nT]) como su mínimo (-2381 [nT]) son elevados; similar a la anterior anomalía, la fuente magnética se localizará en la parte media de la línea de perfil, en el cambio de polaridad de positivo a negativo.

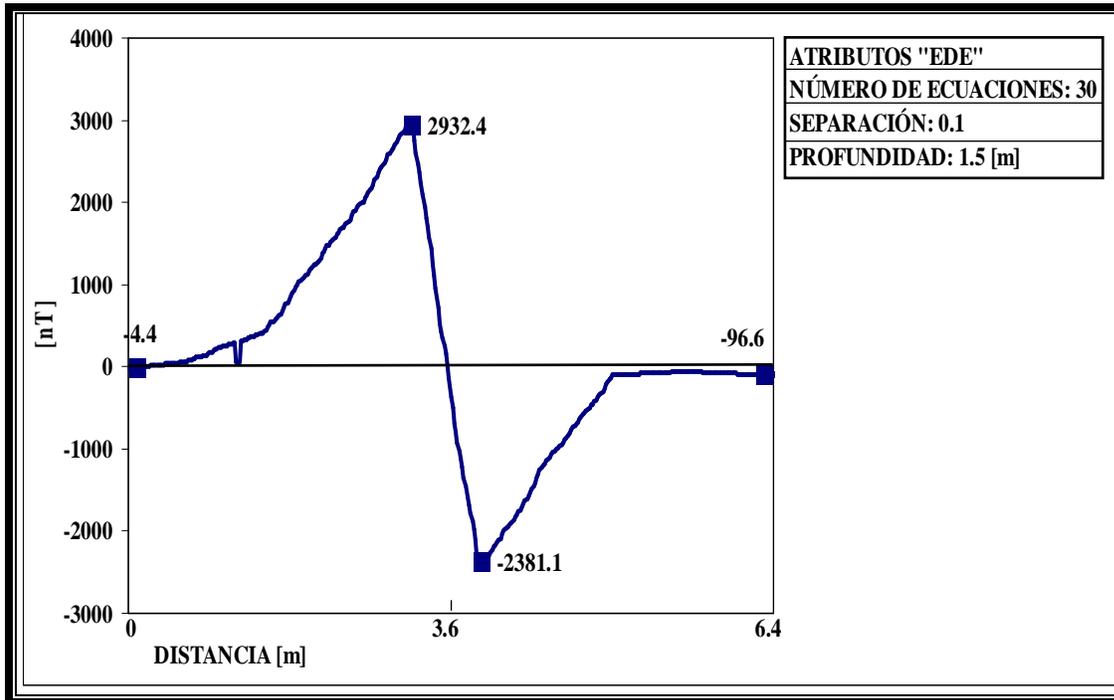


FIGURA IV.3.1.- Anomalía “B”.

La anomalía “B” se localiza en las coordenadas de estudio que corresponden a: 14N, 1.9E como inicio y finalizando en 19.8N, 1.9E, como ya se mencionó, su rumbo es Norte franco, por su magnitud se espera un buen modelado de la fuente.

- IV.3.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”

Los datos de entrada (inclinación, declinación y campo magnético) son los mismos que se utilizaron en la anomalía “A”.

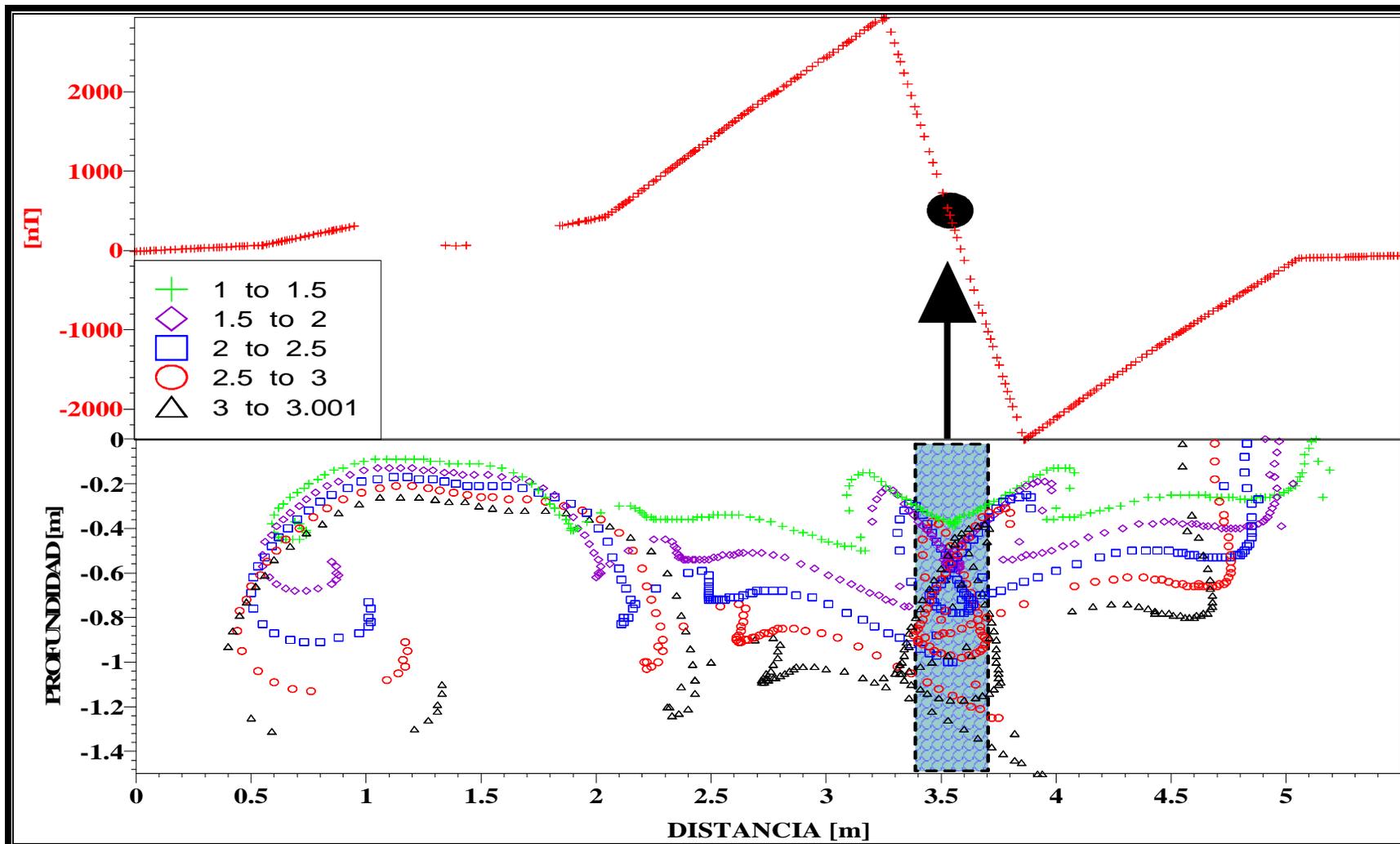


FIGURA IV.3.1.1. - Solución de la deconvolución de Euler "EDE" para la anomalía "B".

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 20.40 | 205 |
| 1.5 | ◇ | 20.30 | 204 |
| 2.0 | □ | 20.20 | 203 |
| 2.5 | ◦ | 19.80 | 199 |
| 3.0 | △ | 19.30 | 194 |

Nuevamente, el índice estructural de mayor ocurrencia en la “EDE” es el de 1.0, sin embargo, el índice de 1.50 y 2.00 tienen un valor muy cercano al primero, esto es conveniente para los fines buscados, ya que estos valores son propios para el tipo de fuente con el que se está tratando. La solución de la deconvolución de Euler dictaminara el índice estructural que más conviene al modelo.

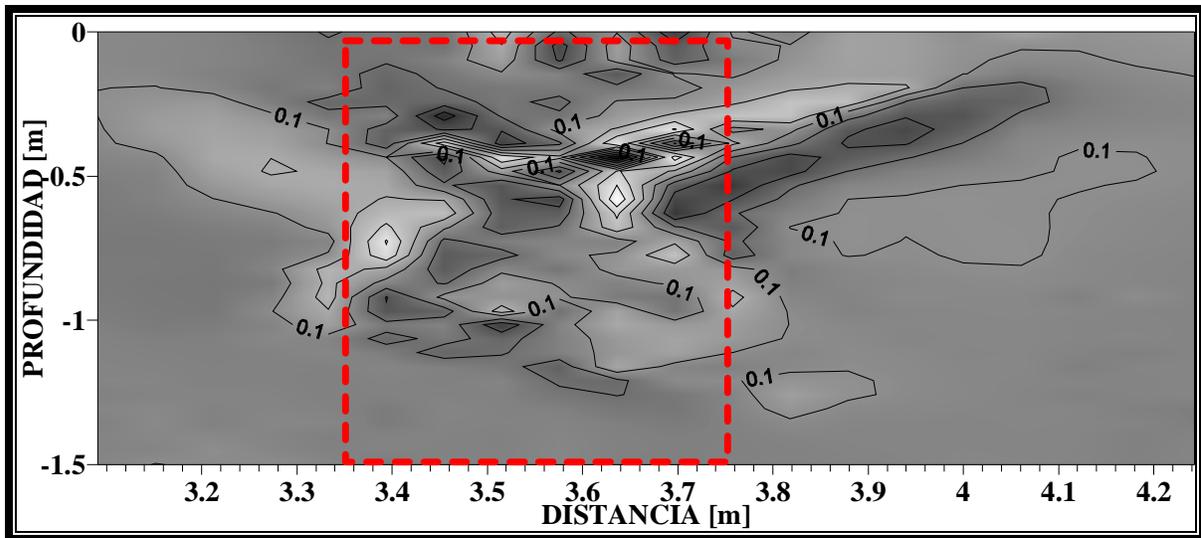


FIGURA IV.3.1.2.- Perfil de la anomalía “B”.

La forma de la fuente es inmediata en la imagen de perfil (FIGURA IV.3.1.2). Los límites, de acuerdo a esta figura, son de un poco menos de 0.40 metros para el diámetro de la fuente, inicia en 3.38 y termina en 3.72 [m] a lo largo de la línea de perfil, su profundidad máxima es de aproximadamente -1.50 metros, concordando con la solución a la deconvolución, la fuente se presenta a la misma altura sobre la línea de perfil, la dispersión en la solución a la deconvolución es algo abundante y la imagen de perfil ha sido recortada para omitir esta dispersión.

Es conveniente la aplicación de la función analítica para obtener otra perspectiva de la situación, y asegurar la presencia y localización de la fuente.

La dispersión es algo abundante en la solución de la deconvolución de Euler “EDE” (FIGURA IV.3.1.1) aquí la tubería se halla definida a partir de concentraciones de los índices estructurales en forma cercana a cuerpos circulares, es notable como cada uno de

los índices tiende a formar el mismo cuerpo, cada uno con su respectiva profundidad, incluso en la dispersión todos los índices guardan un patrón de alineamiento. La localización del cuerpo tubular queda exactamente en medio de la línea de perfil, lo cual era lo esperado, a pesar de la abundante dispersión, se considera que la aplicación de la deconvolución es aceptable.

CONCLUSIONES

Se define la posición de la fuente de forma contundente, con diámetro de aproximadamente 0.40 [m]; el mejor índice corresponde al de 2.50, pues a pesar de que no es el primero en tabla de ocurrencia contornea mejor la fuente; por lo que respecta a los demás índices, también estiman la localización de la fuente, pero causan diámetros diferentes al buscado.

Se recomienda aplicar el método de la señal analítica para luego deconvolucionar y finalmente hacer comparaciones y redefinir la estimación de localidad y profundidad de la fuente.

- IV.3.2.-Aplicación de la Señal Analítica

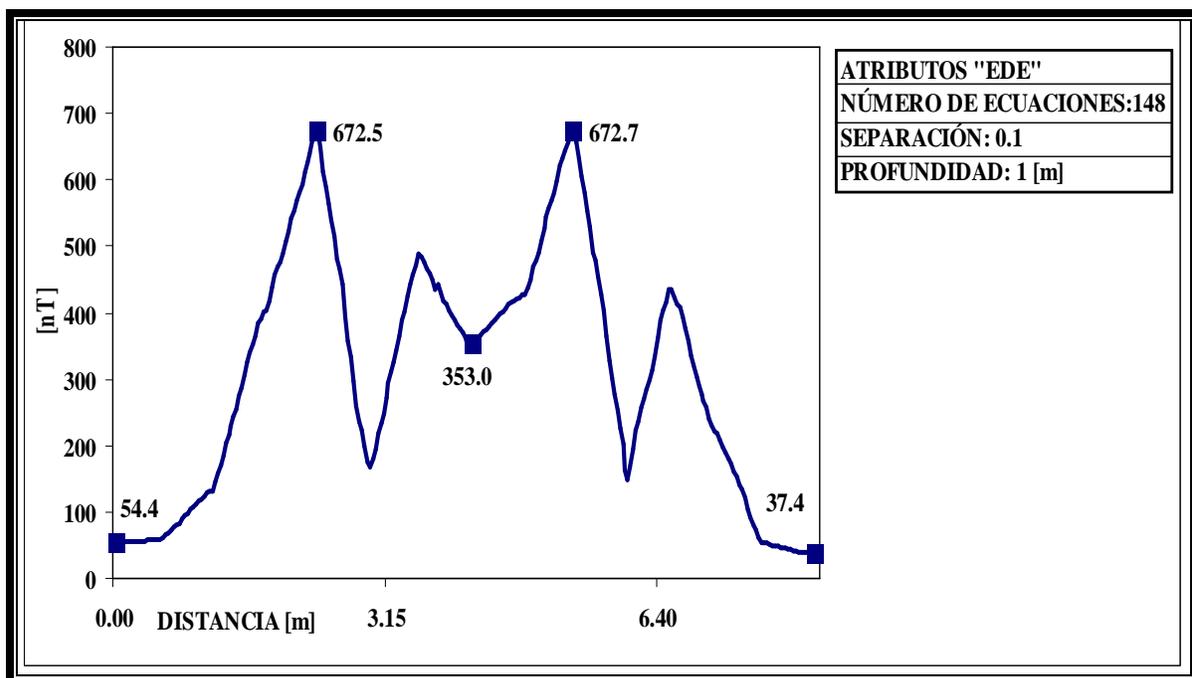


FIGURA IV.3.2.1.- Aplicación de la señal analítica sobre la anomalía "B".

La señal analítica (FIGURA IV.3.2.1) no tiene una forma clásica, pero por antecedente de experiencias anteriores es posible que presente un buen detalle de la fuente, según la teoría que respalda la señal analítica (sección II.3) deben aparecer los bordes de la fuente coincidiendo con los máximos superiores de la curva de respuesta magnética (672.5 y 672.7 [nT]), el índice estructural que se tuvo al aplicar la deconvolución anterior debe coincidir con el que se obtendrá en seguida.

Los valores máximos de la señal analítica (672.5 y 672.7 [nT]) son muy cercanos entre si, lo cual refleja una buena simetría en la curva y se espera que estos valores máximos detallan el contorno de la fuente, su separación horizontal es de poco más de 3 metros, de modo que no pueden definir los bordes de la tubería, pero si podrían marcar el entorno de esta.

DECONVOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL HOMOGÉNEA DE EULER
“EDE” PARA LA SEÑAL ANALÍTICA

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 23.70 | 108 |
| 1.5 | ◇ | 23.70 | 108 |
| 2.0 | □ | 23.70 | 108 |
| 2.5 | ◦ | 20.40 | 93 |
| 3.0 | △ | 8.40 | 38 |

Los tres primeros índices están empatados, lo cual hace más difícil la elección del índice correcto, sin embargo esto es satisfactorio, pues por la sección II.1 se esperan valores de 1.00 o bien 2.00, y resulta que estos valores son los más abundantes, solo falta corroborar con la respuesta de la “EDE” y su correspondiente imagen de perfil estos valores.

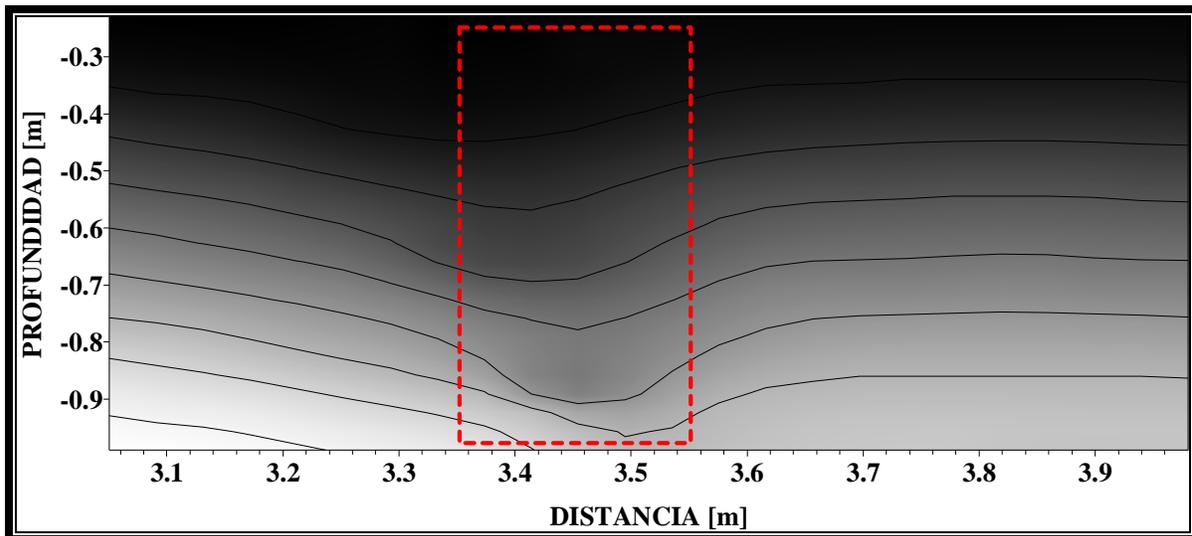


FIGURA IV.3.2.2.- Perfil de la anomalía “B” con la aplicación de la señal analítica con la fuente enmarcada en color rojo.

La figura que indica la tubería en línea roja discontinua (FIGURA IV.3.2.2) muestra a la fuente claramente y coinciden las dimensiones y la localización con la solución de la deconvolución en la señal analítica (FIGURA IV.3.2.3).

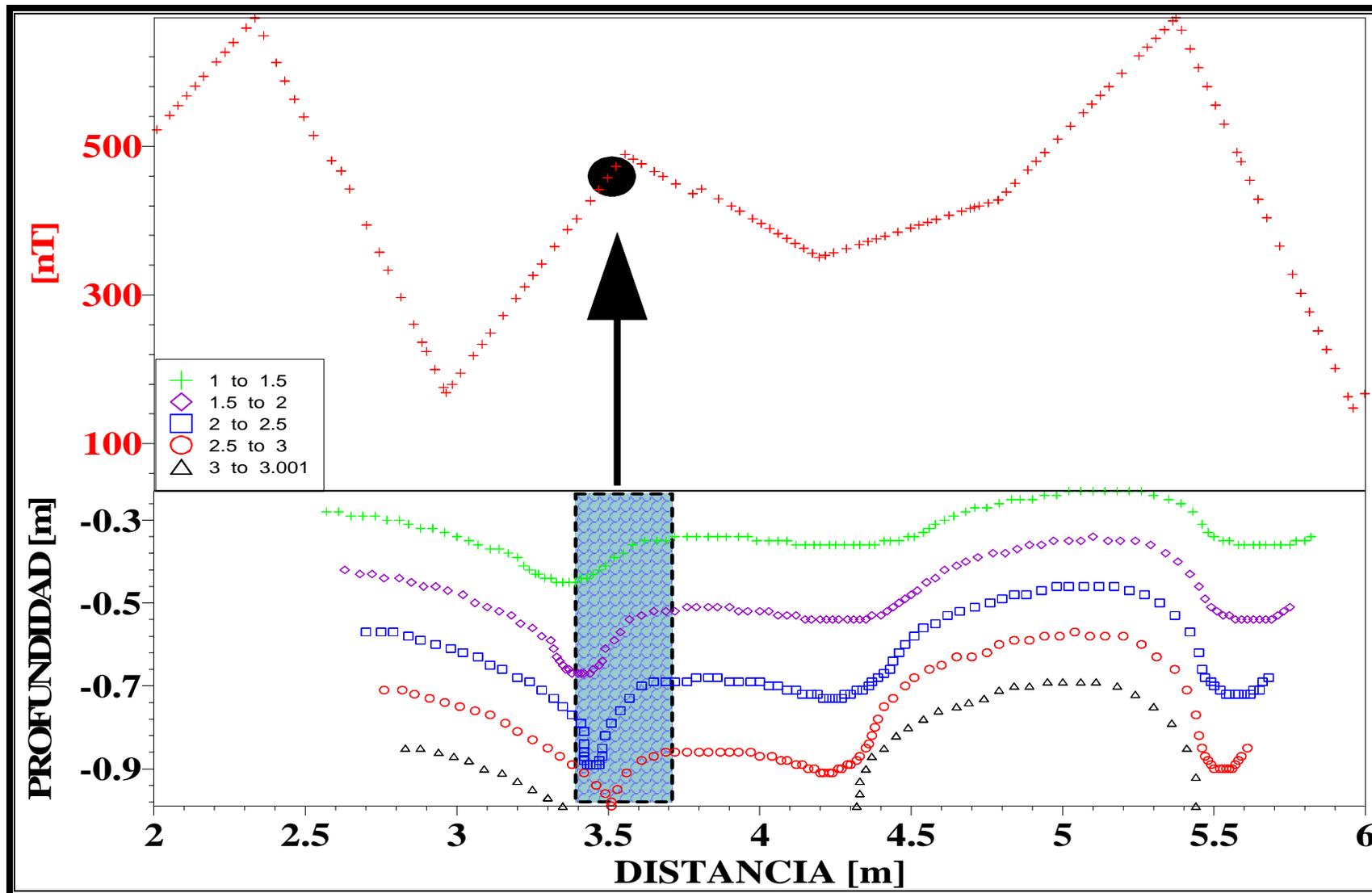


FIGURA IV.3.2.3.- Solución a la deconvolución de Euler de la señal analítica para anomalía "B".

CONCLUSIONES

Los límites y dimensiones de la fuente son satisfactorios a pesar de que en la solución de la deconvolución para la señal analítica no se aprecian con claridad los bordes de la fuente que se suponen tendrían que estar alineados con las crestas superiores de la curva de respuesta. La deconvolución no presenta dispersión. El índice estructural es el de 2.00, pues es el que mejor coincide en la deconvolución.

Nótese que los índices en la solución de la deconvolución de Euler sobre la señal analítica se perfilan en una misma forma solo difieren en la profundidad, en la tabla de recurrencia los tres primeros índices están empatados, por lo que la elección del mejor índice (el cual fue de 2.00) se basa en la experiencia de interpretación de anomalías anteriores.

- IV.3.3.- Comparación Con Modelo Sintético

Para demostrar las similitudes y diferencias entre el modelo sintético y el real se hará una comparación entre gráficas que representan las curvas de respuesta magnética. Se debe tener el previo conocimiento de que la longitud de la línea de medición no es la misma para los dos casos.

Al igual que en la anomalía “A”, la curva de respuesta magnética de la anomalía “B” (FIGURA IV.3.1), presenta la misma forma, iniciando en un valor constante (4.4 [nT]), luego un máximo (2932.4 [nT]), posteriormente un valor mínimo (-2381.1 [nT]) y finalmente regresa a un valor constante (-96.6 [nT]).

Antes de realizar la comparación de las dos anomalías, es importante esbozar acerca de las características del modelo sintético el cual tiene como máximo 13189.5 [nT] y como mínimo -11338.8 [nT]. El valor constante antes y después de la anomalía es el mismo y corresponde a -931.8 [nT]. (ver FIGURA II.4.1.3)

Los valores de la anomalía real no superan a la anomalía sintética que ya se ha presentado en este trabajo, se intuye que esto es un indicativo de que probablemente la tubería del modelo sintético tiene menor contenido de material diamagnético (sulfuros) o quizás el revestimiento de la tubería se encuentre íntegro y por consecuencia se dan estos elevados valores.

Análogo a los modelos anteriores, se determina que la abismal diferencia de recorridos para ambos modelos es causada por la diferencia de dimensiones de ambos tubos, esto es, el modelo ideal tiene mayor contenido de metal, las litologías difieren y el contenido de la fuente también no es el mismo, aunado al contraste de temperatura de las mediciones realizadas en laboratorio con la del subsuelo. A continuación se aplicará una normalización a las curvas de respuesta magnética con el fin de visualizar bajo una misma escala a ambas anomalías, para posteriormente calcular su índice de correlación.

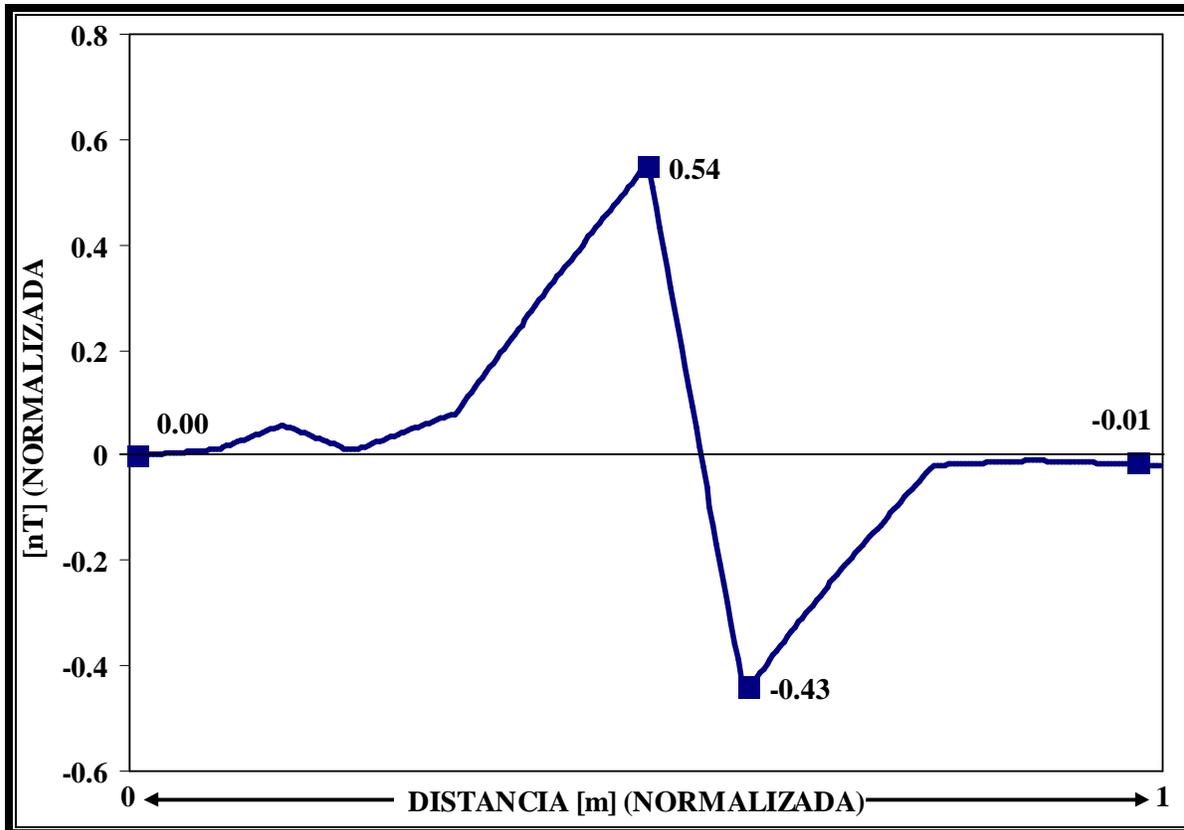


FIGURA IV.3.3.1.- Respuesta magnética de la anomalía “B”.

La normalización aplicada sobre la anomalía “B” (FIGURA IV.3.3.1) muestra como valor máximo 0.54 [nT] y como valor mínimo el de -0.43 [nT] el primer valor constante es igual a cero el segundo es muy próximo (-0.01 [nT]), se hará lo propio para la anomalía sintética y se evaluara su similitud desde un punto de vista más cuantitativo de ambas anomalías.

La aplicación de la normalización de la anomalía sintética (FIGURA IV.3.3.2) presenta un máximo de 0.53 [nT], mínimo de -0.46 [nT] y un valor constante de 0.03 [nT], lo cual refleja una similitud cuantitativa muy aceptable entre las dos curvas de respuesta magnética.

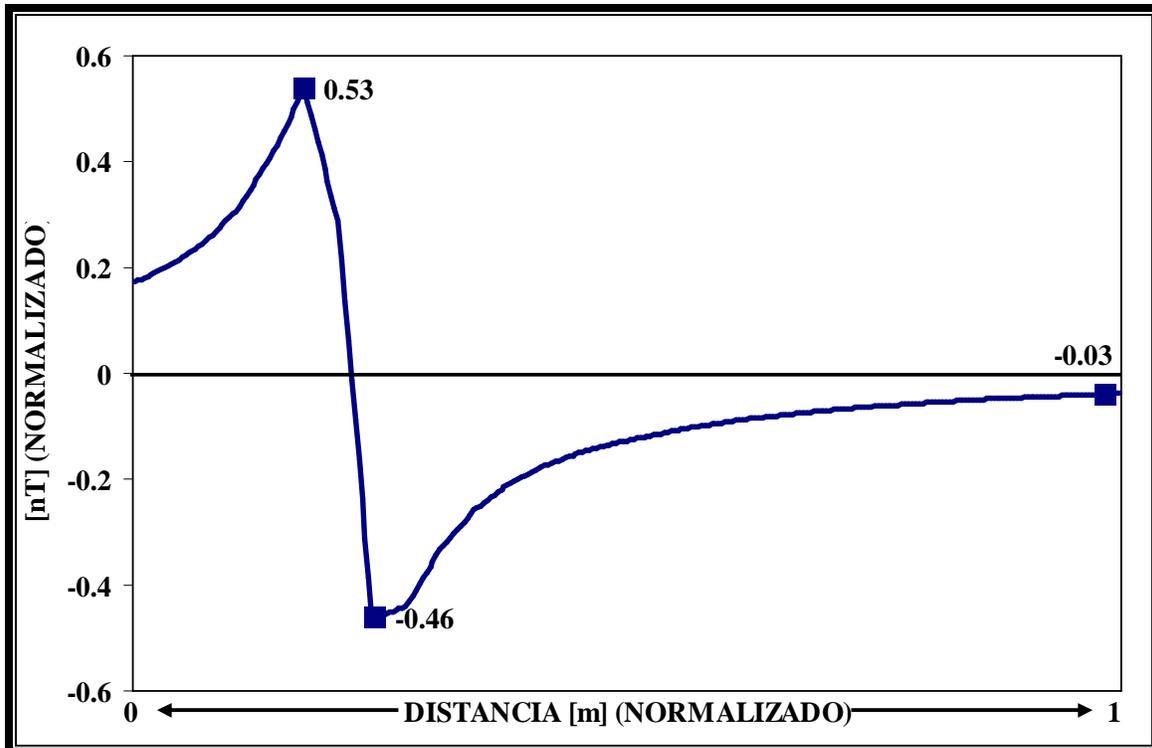


FIGURA IV.3.3.2.- Modelo sintético.

Ya se habló de la similitud de las dos curvas anómalas, se cumple con el patrón en donde se inicia con un valor constante, después un máximo, luego un mínimo y termina en valor constante pero al igual que en la anterior anomalía, la solución de la deconvolución no es ni siquiera parecida, en el modelo real existe mucha dispersión, no así en el modelo sintético, e incluso el patrón de concentración de índices estructurales para ambos modelos difiere (FIGURA IV.3.3.3). Sin embargo la localización de la fuente es la misma, se encuentran donde se da el cambio de polaridad y su presencia es obvia, finalmente, las diferencias en la deconvolución real y sintética son naturales y se considera normal por obvias razones que ya han sido citadas.

Una vez realizada la normalización de las dos curvas anómalas, el coeficiente de correlación resulta ser de 0.7971, el cual es ligeramente menor con respecto a la anomalía anterior que fue de 0.82.

El grado de similitud de la anomalía “B” con el modelo sintético respalda la idea de que esta anomalía es causada por una fuente de carácter dipolar, más específicamente de una tubería posicionada verticalmente.

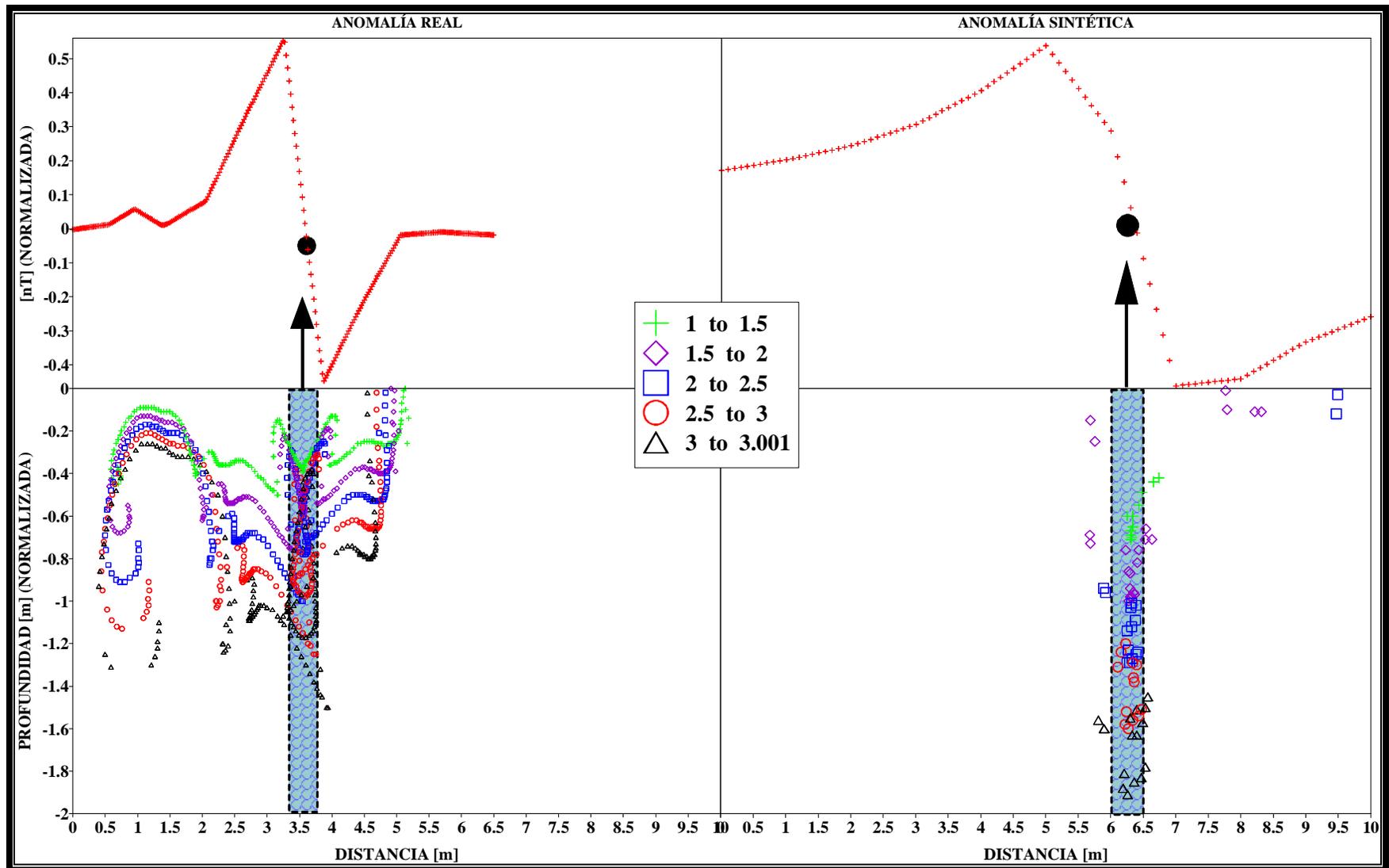


FIGURA IV.3.3.3.-Comparación de la respuesta de la deconvolución de Euler aplicado a la anomalía “B” y modelo sintético.

IV.4.-ANOMALÍA “C”

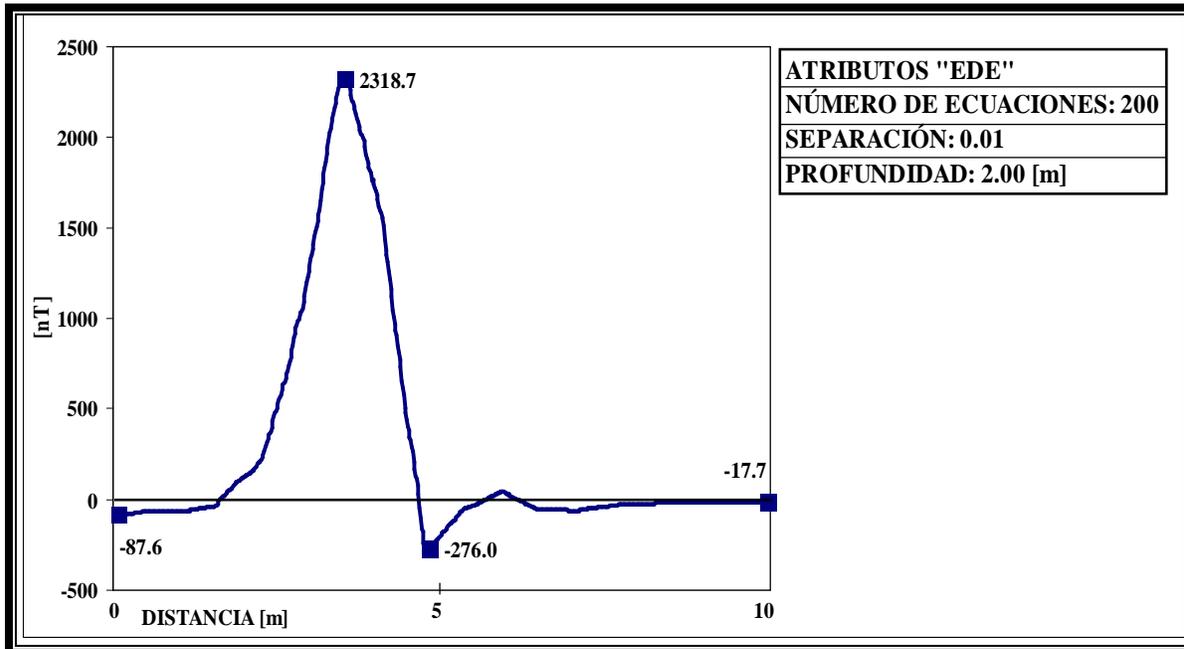


FIGURA IV.4.1.- Anomalía “C”. Claro ejemplo de anomalía dipolar.

La anomalía “C” no tiene un gran parecido con una anomalía dipolar aislada (FIGURA IV.4.1), sin embargo se espera que la fuente aparezca en el cambio de polaridad, así como también se espera que al procesar su deconvolución de Euler los índices estructurales sean de 1.00 o 2.00. Sus coordenadas de inicio son de 18N, 22.2E, las coordenadas finales son de 27.5N, 22.2E por lo que su orientación es Norte franco.

- IV.4.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”

Al igual que en las anteriores anomalías, los valores de de entrada para practicar la deconvolución son de 40451.5 [nT] para la intensidad de campo geomagnético, de 3.88 46.33 [nT] para la declinación e inclinación respectivamente.

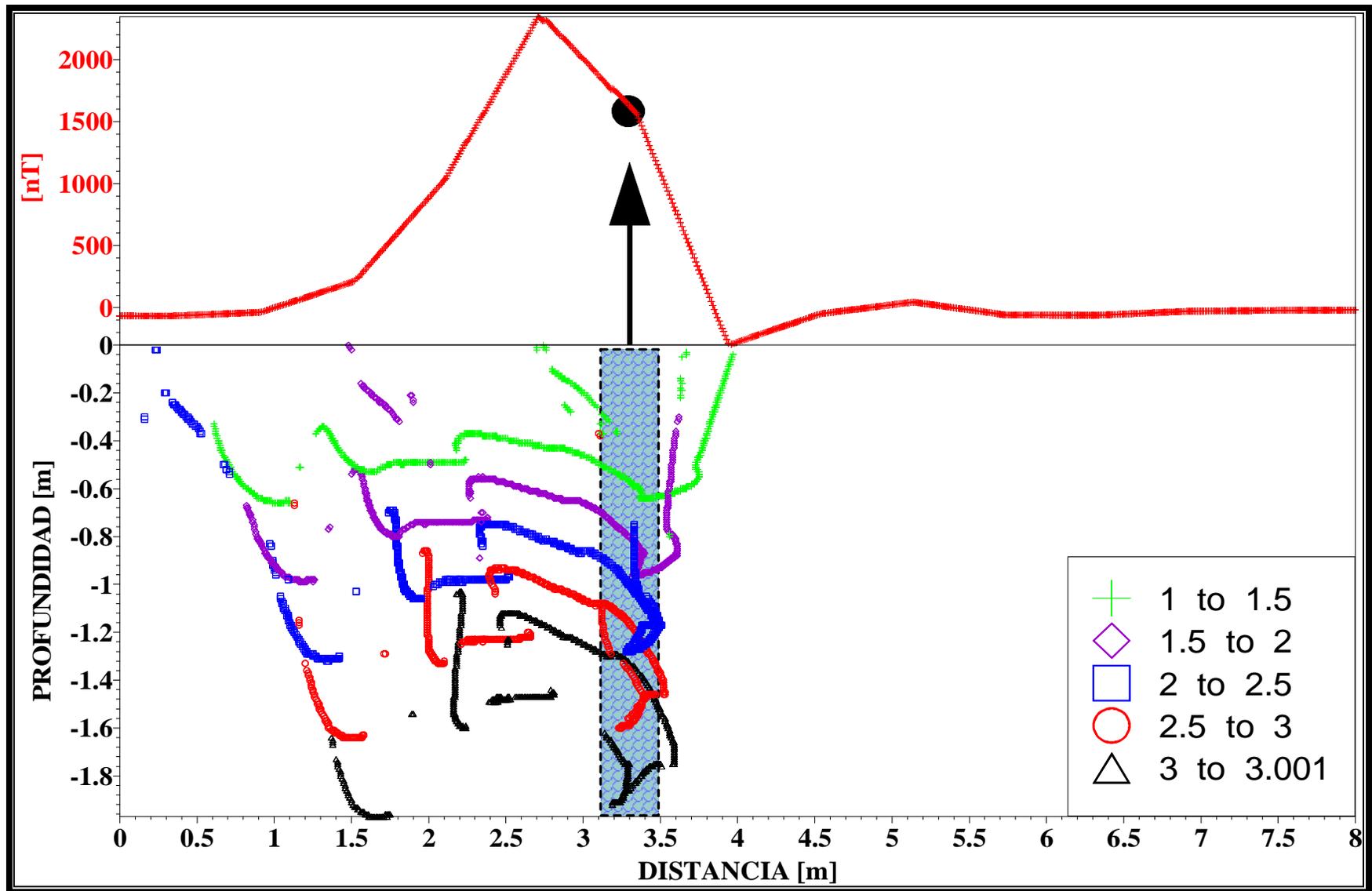


FIGURA IV.4.1.1.- Aplicación de la deconvolución de Euler sobre la anomalía "C".

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 23.10 | 942 |
| 1.5 | ◇ | 21.40 | 871 |
| 2.0 | □ | 19.90 | 813 |
| 2.5 | ◦ | 18.50 | 755 |
| 3.0 | △ | 17.10 | 696 |

Al igual que en las anomalías “A” y “B” en la tabla de ocurrencia, el índice que más aparece es el de 1.00, lo cual es adecuado por razones ya antes citadas. Para que este valor sea el mejor definidor de la fuente, falta aplicar la deconvolución y analizar su solución.

Del perfil de la anomalía (FIGURA IV.4.1.2) se ve que la definición de la fuente es errática, sin embargo la ubicación presentada por la solución de la deconvolución (FIGURA IV. 4.1.1) es precisa empezando en 3.10 y terminando 3.50. Se nota que en la siguiente imagen hay amplia congruencia con la solución a la deconvolución, se corrobora la presencia del cuerpo anómalo, mismo que se encuentra circulado por el rectángulo rojo. La dispersión es alta en esta anomalía, por lo que hay que aplicar el análisis de la señal analítica, para determinar con mayor seguridad la existencia de la fuente y la tendencia que toman los índices estructurales.

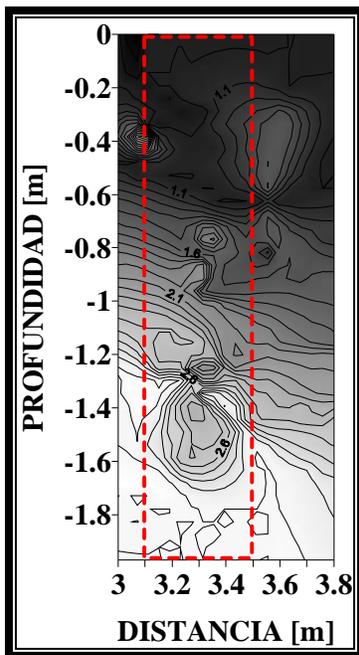


FIGURA IV.4.1.2.- Perfil de la anomalía “C”.

La solución a la deconvolución de Euler (FIGURA IV.4.1.1) presenta mucha dispersión, sin embargo el reconocimiento de la fuente esta señalado por un acomodo de los índices en forma de una espiral, hay que notar que todos los índices siguen un mismo patrón, por lo que a simple vista cualquiera podría definir a la fuente, sin embargo solo aquel que precisa con mayor acercamiento el valor del diámetro es el correcto, que en este caso seria el de 2.50 (en color rojo), pues este es el índice que contornea los límites de la fuente, por lo que respecta al de 1.00 (verde) se localiza en la superficie y no alcanza a detallar un cuerpo

tubular, su dispersión es amplia; el de 2.00 (azul) contornea a un cuerpo circular aunque esta mejor definido por el de color rojo. La profundidad no supera los 2.00 metros.

CONCLUSIONES

Se ha determinado la ubicación y presencia de la fuente, su diámetro es congruente, así como también su posición con respecto a la curva anómala que es en donde cambia la polaridad, se ha estimado el índice estructural y se ha determinado que es de 2.50, lo cual es adecuado si se considera a la fuente compuesta por dipolos magnéticos aislados posicionados en línea, sin embargo, existe una gran congruencia en los índices iguales a 2.00 y 1.00 que se encuentran presentes en la solución de la deconvolución (FIGURA IV.4.1.1). Se necesita aplicar el método de la señal analítica para determinar con mayor precisión la localidad de la fuente, pues se aprecia una amplia dispersión en la “EDE” lo cual podría ser la causa de un error en este rubro, así como también corroborar la naturaleza de la dipolaridad de la anomalía.

- IV.4.2.-Aplicación de la Señal Analítica

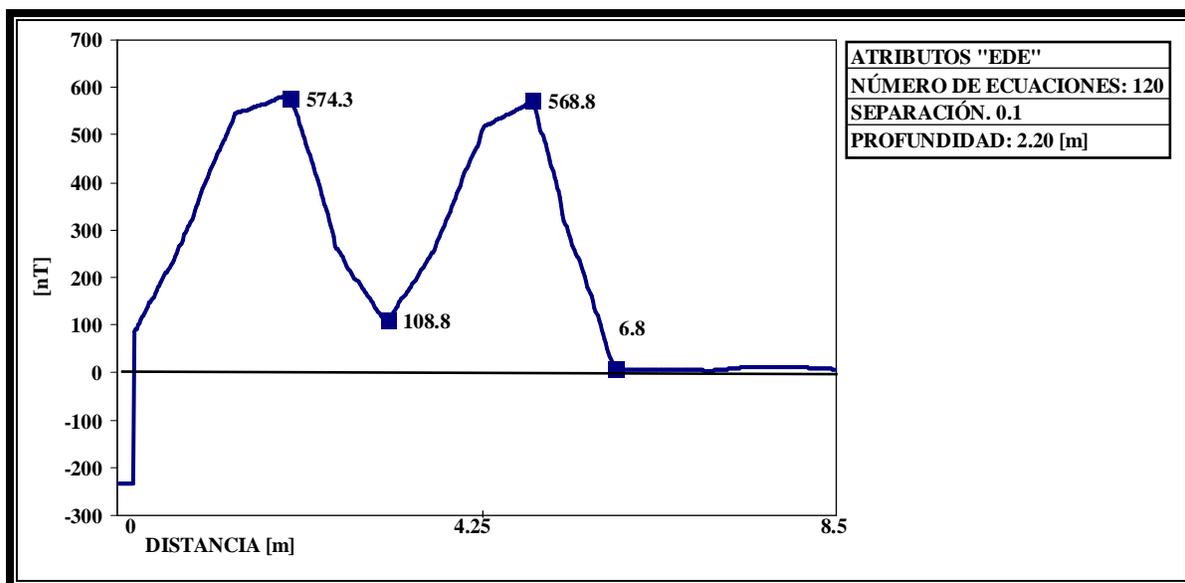


FIGURA IV.4.2.1.- Aplicación de la señal analítica sobre la anomalía “C”.

El resultado de la aplicación de la señal analítica (FIGURA IV.4.2.1) tiene la forma típica, se aprecia con claridad una forma “volcánica” y se espera que el cuerpo se encuentre en la parte central de la línea de perfil, es decir, en la parte interna de la curva. Tiene las mismas coordenadas de inicio con la línea de perfil anterior y su orientación es la misma

DECONVOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL HOMOGÉNEA DE EULER “EDE” PARA LA SEÑAL ANALÍTICA

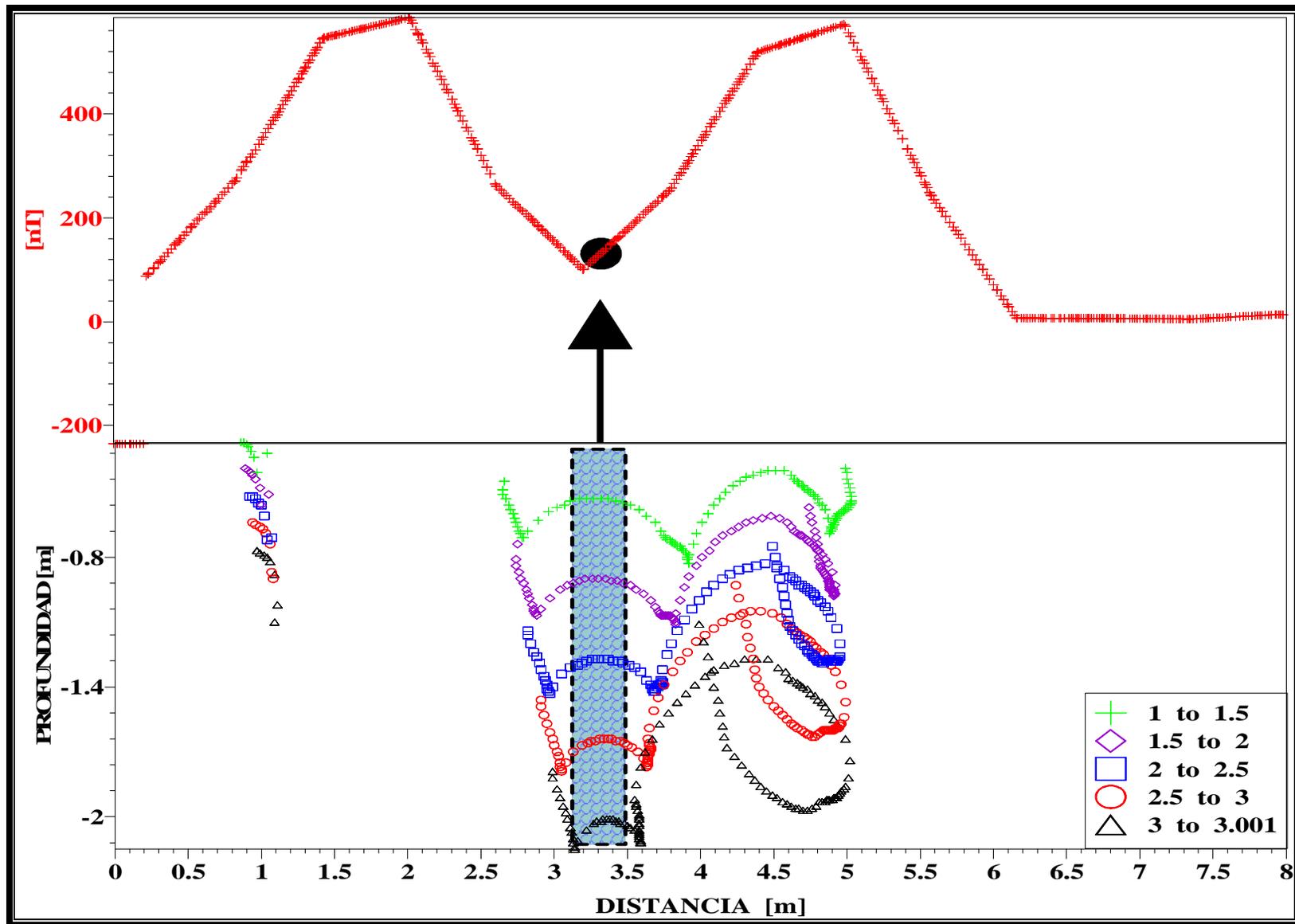


FIGURA IV.4.2.2.-*Solución de la deconvolución de Euler de la anomalía "C" aplicando la señal analítica.*

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 20.10 | 134 |
| 1.5 | ◇ | 20.10 | 134 |
| 2.0 | □ | 19.90 | 133 |
| 2.5 | ◦ | 19.90 | 133 |
| 3.0 | △ | 19.90 | 133 |

El índice de mayor ocurrencia, es el de 1.00 junto con el de 1.50, estos valores hacen referencia a fuentes que pueden ser idealizadas como polos magnéticos perfilados en línea vertical. Este valor es el mismo que en la anomalía sin la aplicación de la señal analítica. Otro índice de importancia es el de 2.00 también podría ser un buen valor pero es el tercero en ocurrir, además no hay que olvidar que el mejor índice obtenido en la deconvolución anterior es el de 2.50.

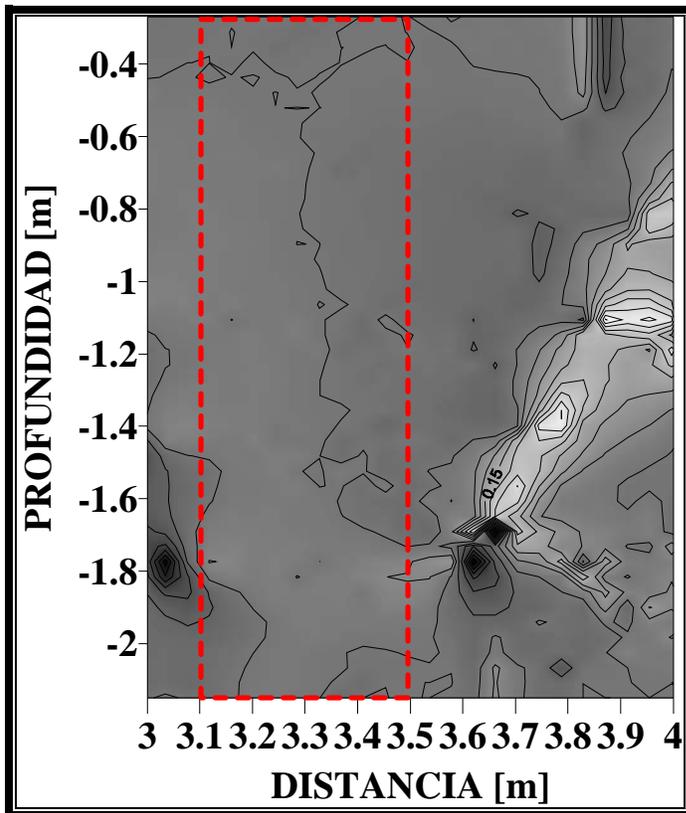


FIGURA IV.4.2.3.- Imagen en vista de perfil de la aplicación de la señal analítica con la fuente enmarcada en color rojo.

Por lo que se ve en el perfil de la anomalía “C” con la aplicación de la señal analítica (FIGURA IV.4.2.3), la localización de la fuente es inmediata, se observa la forma que la circunda, en esta imagen no hay presencia clara de los efectos de las crestas de la señal analítica, al igual que en la solución de la deconvolución no se destacan cuerpos referentes a las crestas, se detalla en el recuadro en línea roja lo que se interpreta como tubería y nuevamente el diámetro es de 0.40 metros, iniciando en 3.10 y terminando en 3.50 metros a lo largo de la línea de perfil coincidiendo con la primer aplicación de la deconvolución sobre la anomalía “C” (FUGURA IV.4.1.1).

La deconvolución de Euler aplicada a la señal analítica de la anomalía “C” (FIGURA IV.4.2.2) muestra una forma muy clásica, sin embargo no presenta los cuerpos que detallan las crestas de la curva. Según esta imagen el mejor índice sería el de color negro que en este caso es el de 3.00 (referente a un dipolo puntual) o bien el 2.50 (color rojo); el de 3.00 propone mayor profundidad al cuerpo y el diámetro que marca es el más adecuado a las características del cuerpo, pero no corresponde con el tipo de fuente, ya que se esperaba de 2.00 o 1.00 que es propio de cuerpos alargados con forma rectangular posicionados verticalmente, por otra parte, el de 2.50 es más somero y también proporciona un ancho de fuente congruente, por lo que se tomará como mejor índice el de 2.50, además de que es este valor el que se eligió en la solución a la deconvolución sin señal analítica.

CONCLUSIONES

La anomalía “C” presenta una forma muy clásica de carácter dipolar, se han establecido los límites de la fuente que coinciden en todas las imágenes a pesar de que la solución en la deconvolución muestra mucha dispersión y no se detallan con claridad los efectos de las crestas de la curva. La señal analítica no muestra los límites de los bordes de la tubería.

Por lo que respecta al índice estructural, en las tablas de ocurrencia aparece más el índice de 1.00, sin embargo al observar las dos soluciones de la “EDE” este valor queda descartado. En la solución de la señal analítica se nota que el mejor índice es el de 2.5, que coincide con la “EDE” sin señal analítica (FIGURA IV.4.1.1), por lo que se concluye que el mejor índice es de 2.50.

- IV.4.3.- Comparación con modelo sintético

Ahora procede comparar de forma cualitativa y cuantitativa la curva de respuesta magnética del modelo sintético con la anomalía “C” sin señal analítica, las dos señales hacen referencia a un mismo tipo de anomalía, a si que se espera (al igual que en las anomalías anteriores) que las curvas de respuesta magnética sean muy parecidas y que además la ubicación de sus respectivas fuentes se localicen en el mismo punto, que es en el cambio de polaridad.

De acuerdo a la respuesta magnética de la anomalía “C” (FIGURA IV.4.1) se nota que inicia en un valor constante (-87.6 [nT]), luego un valor máximo, un mínimo y finalmente regresa al mismo valor constante (-17.7 [nT]), típico de una anomalía dipolar. En su análisis se demostró que la fuente se ubica en el cambio de polaridad, lo cual era lo esperado. El valor máximo corresponde a 2318.7 [nT] y el mínimo es de -276.0 [nT], la magnitud del valor mínimo de la anomalía es pequeña y posiblemente esta sea una de las causas por las cuales el cuerpo anómalo sea tan somero.

De las curvas de repuesta magnética para cada uno de los modelos se aprecia una amplia similitud cualitativa, por lo que es claro asegurar que son de la misma naturaleza; y en efecto, las dos caracterizan a un mismo tipo de cuerpo con cercanas dimensiones, pero el material con el que se constituye cada uno, así como también las condiciones en las que se albergan, tienen que ser relativamente diferentes y por eso sus dimensiones en el recorrido difieren, además la longitud de los perfiles no son las mismas.

Por lo que respecta a la curva de respuesta magnética para el modelo sintético (FIGURA IV.4.3.2) se nota que presenta una forma muy parecida a la grafica de la anomalía “C”, es decir, tiene inicialmente un valor constante de -931.8 [nT], luego un máximo (13189.5 [nT]), un mínimo (-11338.8 [nT]) y finalmente regresa a un valor constante inicial de 931.8.

Debido a la gran diferencia en el rango, a continuación se aprecian las gráficas de ambas anomalías (“B” y sintética) con los ejes normalizados, con objeto de visualizar su similitud, y posteriormente el cálculo del índice de correlación.

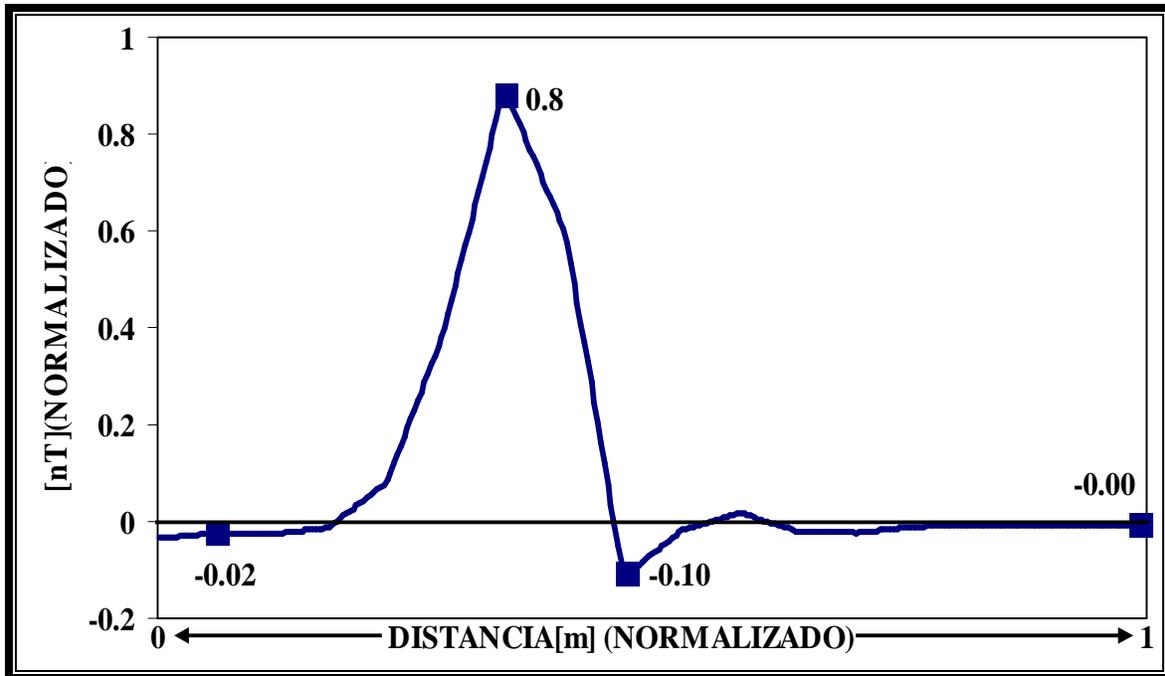


FIGURA IV.4.3.1.-Respuesta magnética normalizada de la anomalía “C”, presentando un valor máximo de 0.8 [nT] y un mínimo equivalente a -0.10 [nT].

La normalización de la anomalía “C” (FIGURA IV.4.3.1) sigue mostrando al valor mínimo muy cercano a cero que es igual a -0.01 [nT], máximo de 0.8 [nT] y valores constantes iguales a cero. Por otra parte, la normalización de la anomalía sintética (FIGURA IV.4.3.2) demuestra menor similitud con la anomalía “C” su valor máximo que es de 0.53 [nT] difiere más ampliamente que con el máximo de las anomalías “A” y “B”, así como también su valor mínimo que es de -.46 [nT]. En efecto, el valor del índice de correlación es de 0.660 para estas dos anomalías, por lo que la anomalía “C” es la que más difiere cuantitativamente hablando.

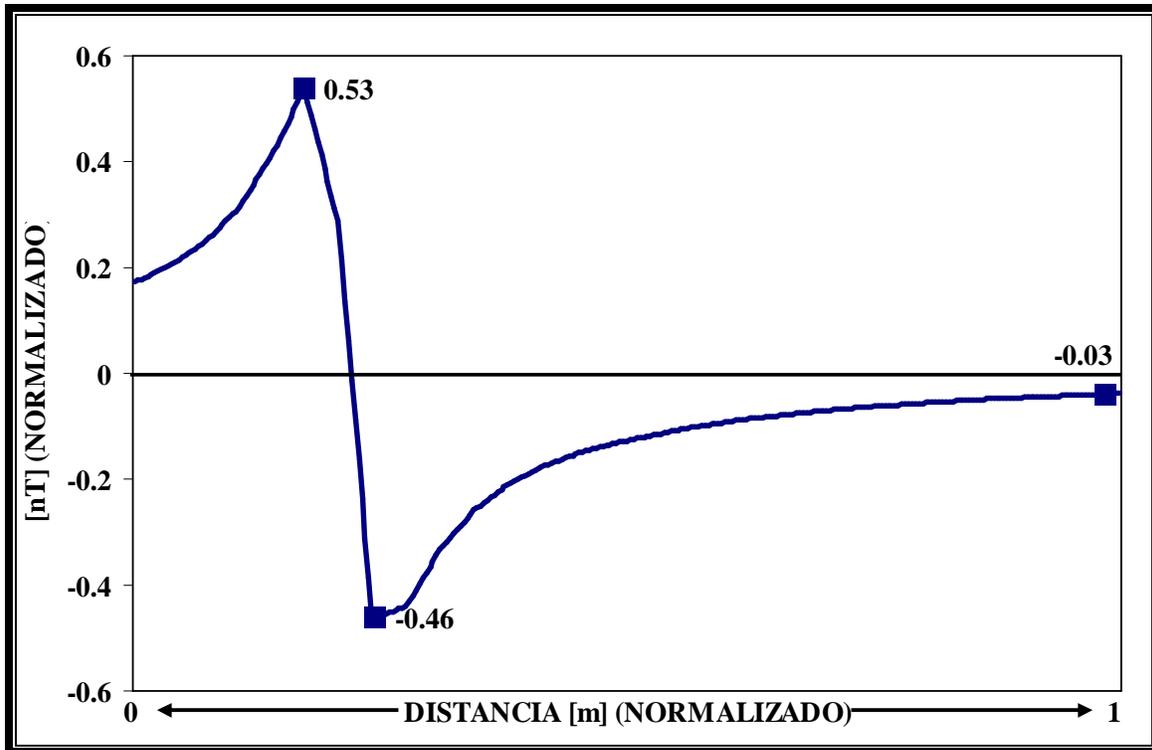


FIGURA IV.4.3.2.-Curva de respuesta magnética del modelo sintético de un tubo vertical.

Por otra parte la localización de la fuente en cada caso es la misma (FIGURA IV.4.3.3), esto es, se ubican a la mitad del cambio de polaridad, sin embargo al observar sus correspondientes respuestas magnéticas y sus imágenes de perfil se notan diferencias, principalmente en lo que se refiere a la dispersión de índices estructurales que predomina en la anomalía “C”, así como también en la forma en la que se concentran los índices estructurales para detallar a la fuente, sin embargo la tubería en ambos casos se detalla y sus dimensiones son congruentes. Por lo que respecta a la diferencia de profundidades en la comparación de la solución de la “EDE” no es muy amplia; mientras que para el modelo real apenas alcanza los 2.00 metros, en el sintético se tienen 3.00 [m], de modo que la fuente real es más somera de lo esperado. Lo que hace a esto interesante es que la forma de las soluciones son muy diferentes y sin embargo cada una es definida por los mismos índices estructurales para cada caso.

Existe una diferencia abismal de valores de campo anómalo para los dos modelos, las dimensiones estimadas para la tubería real son de 0.40 [m] y para el sintético se fijaron de medio metro, por lo que el contenido de metal es lo que podría hacer la gran diferencia de estos valores, otro factor que propicia diferencias es el valor de la susceptibilidad en la litología, en el modelo idealizado se propone una susceptibilidad promedio que comprende sal de roca, caliza, arcillas y areniscas, por lo que se emite una susceptibilidad de 0.01 y este valor podría ser otro factor que propicia esta diferencia, debido a que en la realidad la litología, que sin duda se compone principalmente de estos factores, presenta un valor de susceptibilidad menor debido a que prevalece una temperatura más elevada que en laboratorio de medición que es de 20 °C.

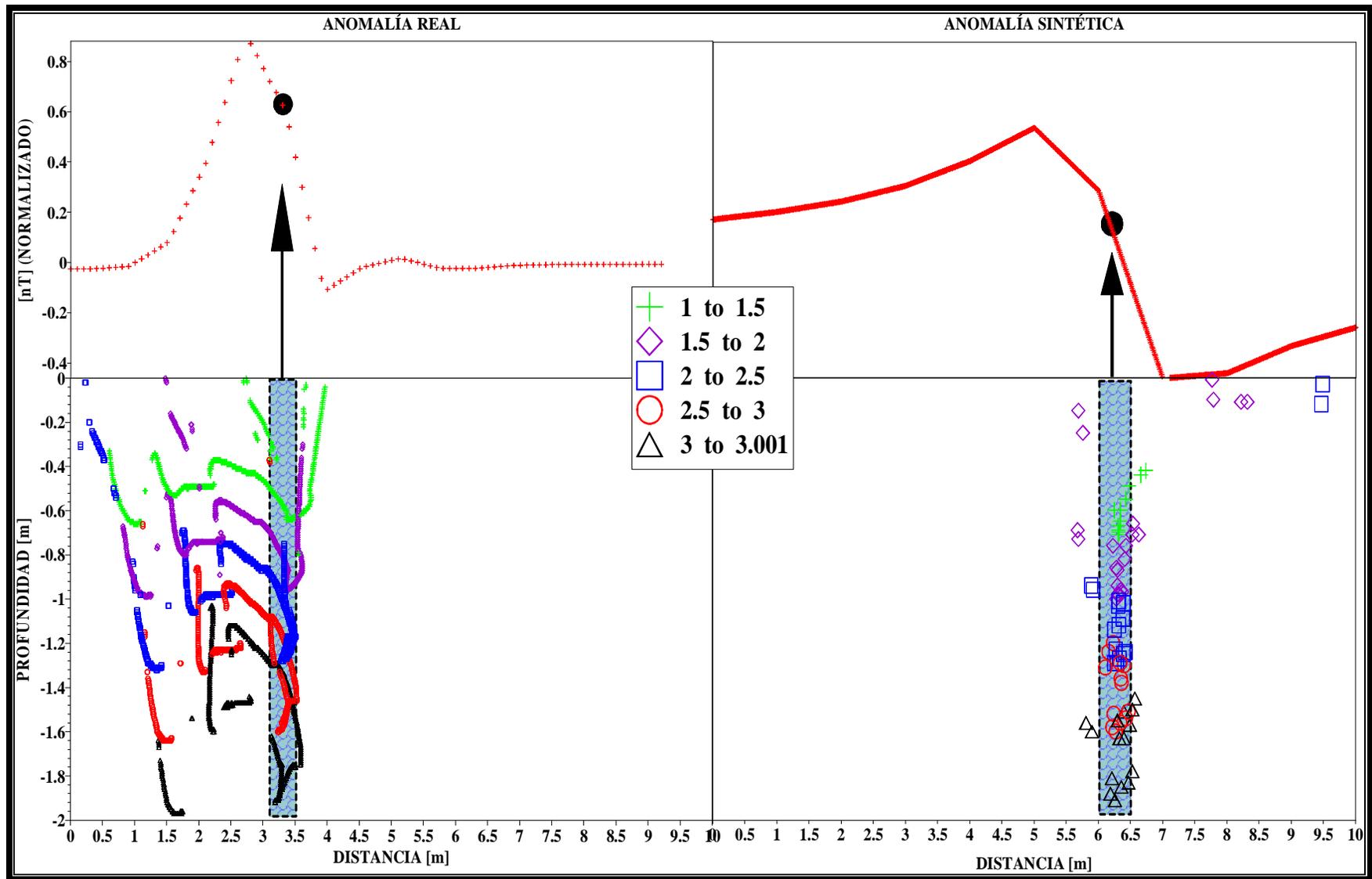


FIGURA IV.4.3.3.-Comparación de la solución de la deconvolución de Euler para el modelo sintético y la anomalía "C".

IV.5.- ANOMALÍA “D”

Ahora que ya se han analizado las anomalías que presentan una orientación Norte-Sur, se analizará una zona que es por demás singular, en la cual la polarización no se encuentra en dirección del campo magnético. Se trata de una anomalía aislada con un sentido de orientación de magnetización de 35 grados de norte a este.

Es importante notar que para esta anomalía no existe un valor que sea negativo, solo existen valores positivos, provocado (probablemente) por la suma de varias fuentes, por otra parte, aquí no aparenta existir una desmagnetización y luego otra magnetización en sentido del campo magnético; con la aplicación de líneas de perfil se notará la forma y magnitud de las anomalías por medio de la digitalización, dando como resultado su correspondiente curva de respuesta magnética, para posteriormente aplicar su deconvolución y finalmente su interpretación.

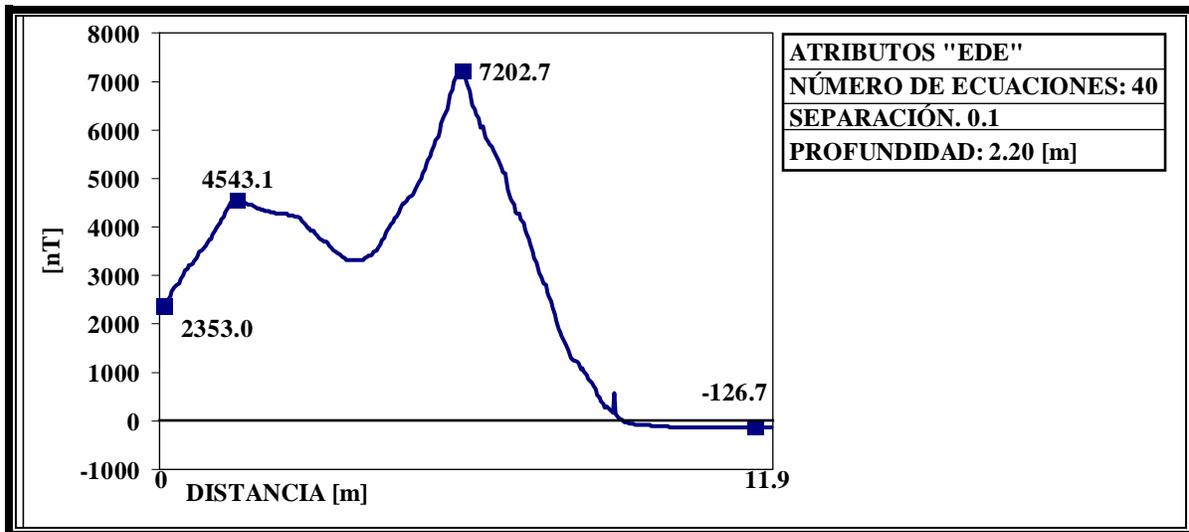


FIGURA IV.5.1.- Perfil de la anomalía “D”.

Como se dijo anteriormente, y con apoyo del perfil de la anomalía “D” (FIGURA IV.5.1) no se detalla un comportamiento dipolar, se ve que presentan dos valores mayores a cero, por lo que no presenta valor mínimo negativo, esto es posiblemente causado por la suma de dos anomalías dipolares, probablemente alguna acumulación cercana a la fuente provoca este comportamiento. A pesar de esto, se trata de fuentes tubulares y de cualquier forma los índices estructurales deberán ser de 1.00 o 2.00, y la deconvolución describirá los detalles de la fuente.

- IV.5.1.-Solución de la Deconvolución de Euler “EDE”

Para la ejecución de la deconvolución de Euler, se utilizan los mismos datos de entrada, pero además se incluye el valor del ángulo que forma la línea de perfil con el Norte geográfico, que es de 35°.

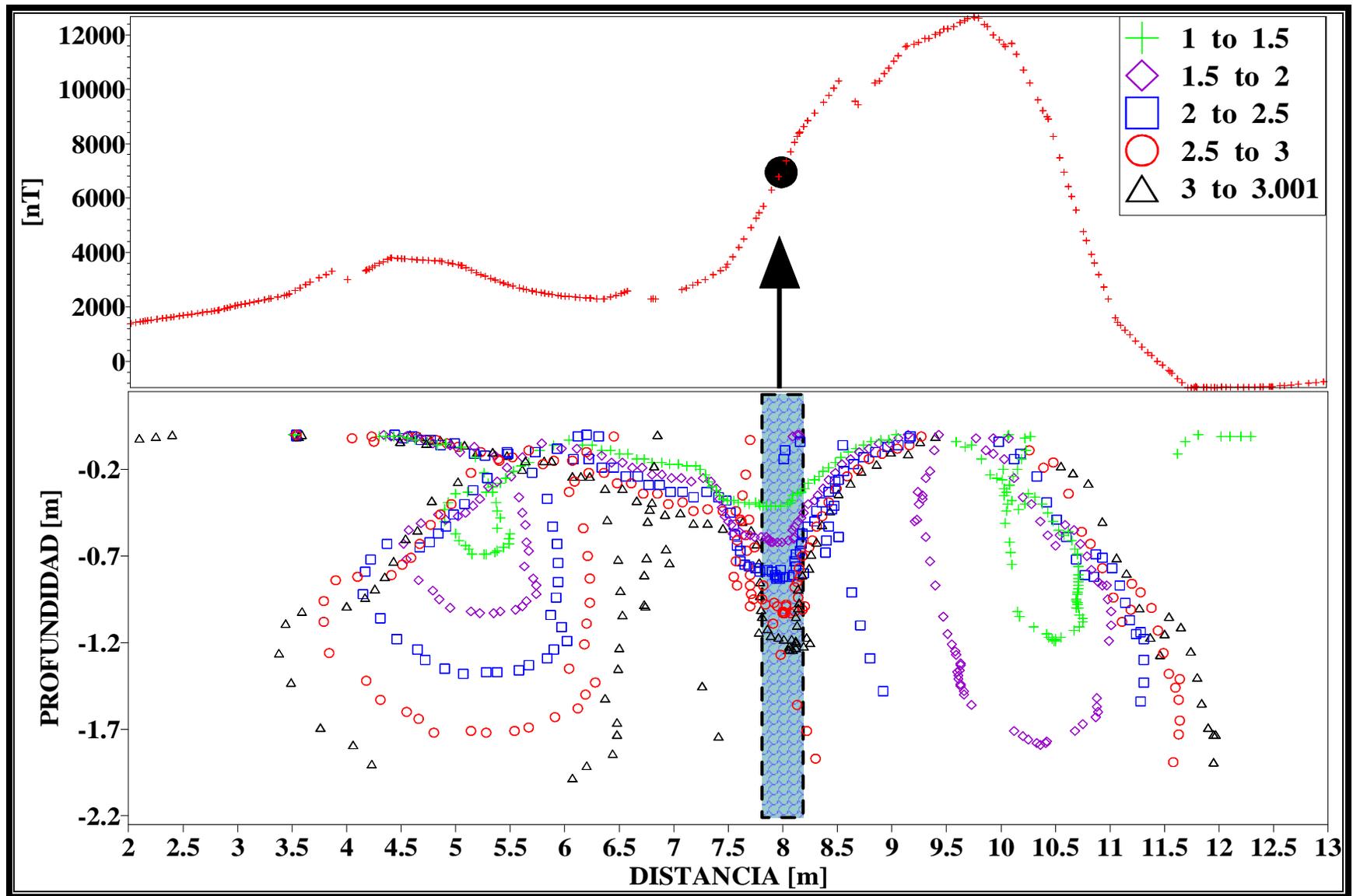


FIGURA IV.5.1.1.- Solución de la deconvolución de Euler aplicada a la anomalía "D".

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 22.00 | 518 |
| 1.5 | ◇ | 21.70 | 511 |
| 2.0 | □ | 20.10 | 472 |
| 2.5 | ◦ | 18.80 | 441 |
| 3.0 | △ | 17.40 | 410 |

Note que a pesar de que la anomalía no es dipolar, el comportamiento de la fuente es muy similar a los casos anteriores; el índice que más aparece es el de 1.00, junto con el de 2.00, reflejo de una fuente formada por polos o dipolos aislados.

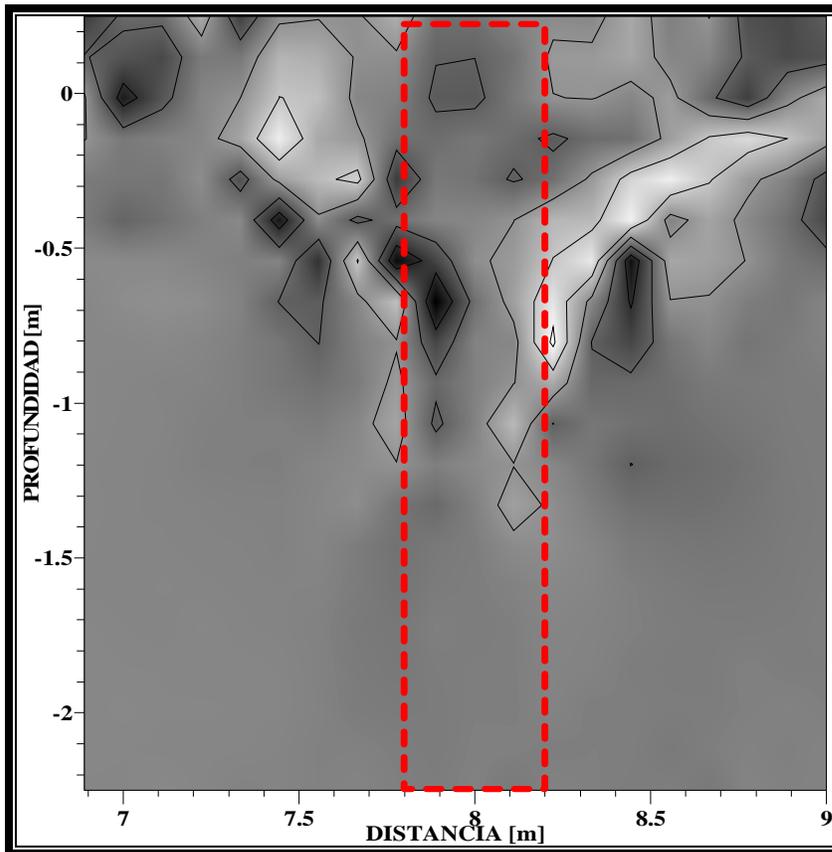


FIGURA IV.5.1.2.- Imagen de perfil de la anomalía "D".

Del perfil de la anomalía "D" (FIGURA IV.5.1.2) la presencia de la fuente es clara, solo se detalla a una profundidad aproximada de -1 [m] un pequeño cuerpo tubular que en su parte superior presenta una forma de "V" y que podría ser parte de la fuente o bien algún tipo de reflejo. Los cuerpos en forma de arco a cada lado de la tubería son producto de la influencia de la fuente. Es necesaria la aplicación de la señal analítica para reafirmar la forma, localización y dimensiones de la fuente.

La solución a la deconvolución de Euler (FIGURA IV.5.1.1) presenta mucha dispersión, pero sin embargo el reconocimiento de la fuente es inmediato por el acomodo de los índices, la depresión en la que convergen los índices lo hace evidente.

CONCLUSIONES

El diámetro resulto ser de aproximadamente 0.45 [m] localizado de 7.70 a 8.15 a lo largo de la línea de perfil, su posición con respecto a la curva anómala es antes del punto máximo. Se ha estimado el índice estructural y se ha determinado que es de 2.00 (índice en color azul) ya que es el que mejor contornea a la fuente y de hecho, este índice es el que limita a la fuente superpuesta, esto es adecuado si se considera a la fuente compuesta por dipolos magnéticos aislados posicionados en línea.

La profundidad no rebasa los 2.50 [m] análogo a las anomalías anteriores, su localización es definitivamente somera.

- IV.5.2.-Aplicación de la Señal Analítica

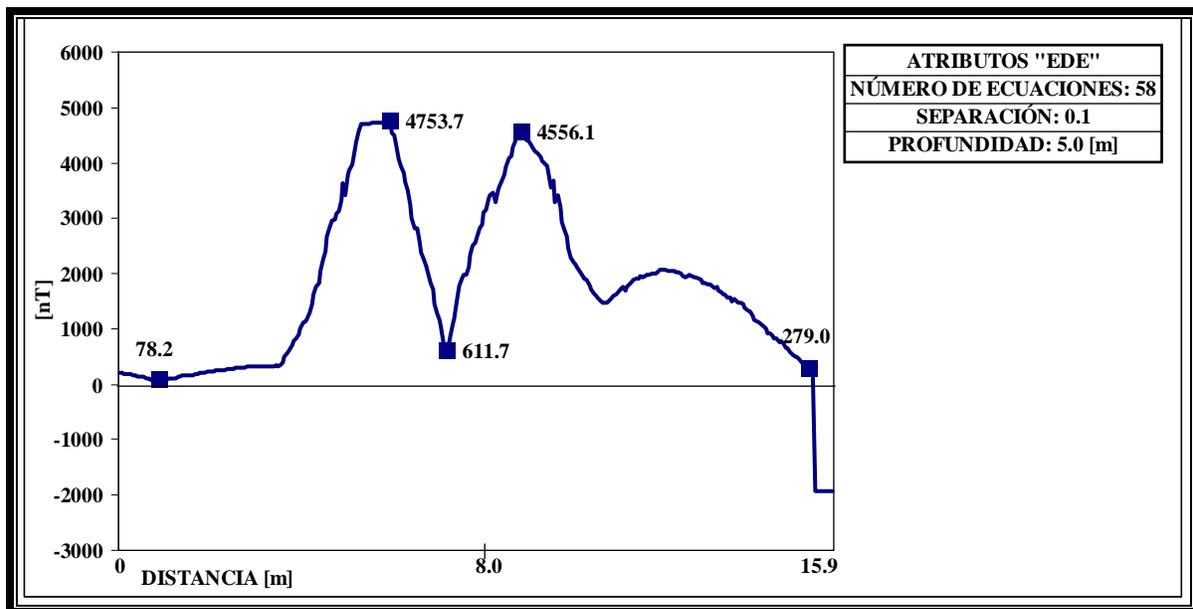


FIGURA IV.5.2.1.- Aplicación de la señal analítica sobre la anomalía "D".

De la curva anterior (FIGURA IV.5.2.1) se nota que la anomalía no presenta valores negativos, los valores máximos son de 4753.7 y 4556.1 [nT] estos son los valores máximos más altos que se han dado en todas las anomalías, posiblemente la fuente magnética responsable de esta anomalía se encuentre en mejores condiciones.

DECONVOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL HOMOGÉNEA DE EULER "EDE" PARA LA SEÑAL ANALÍTICA

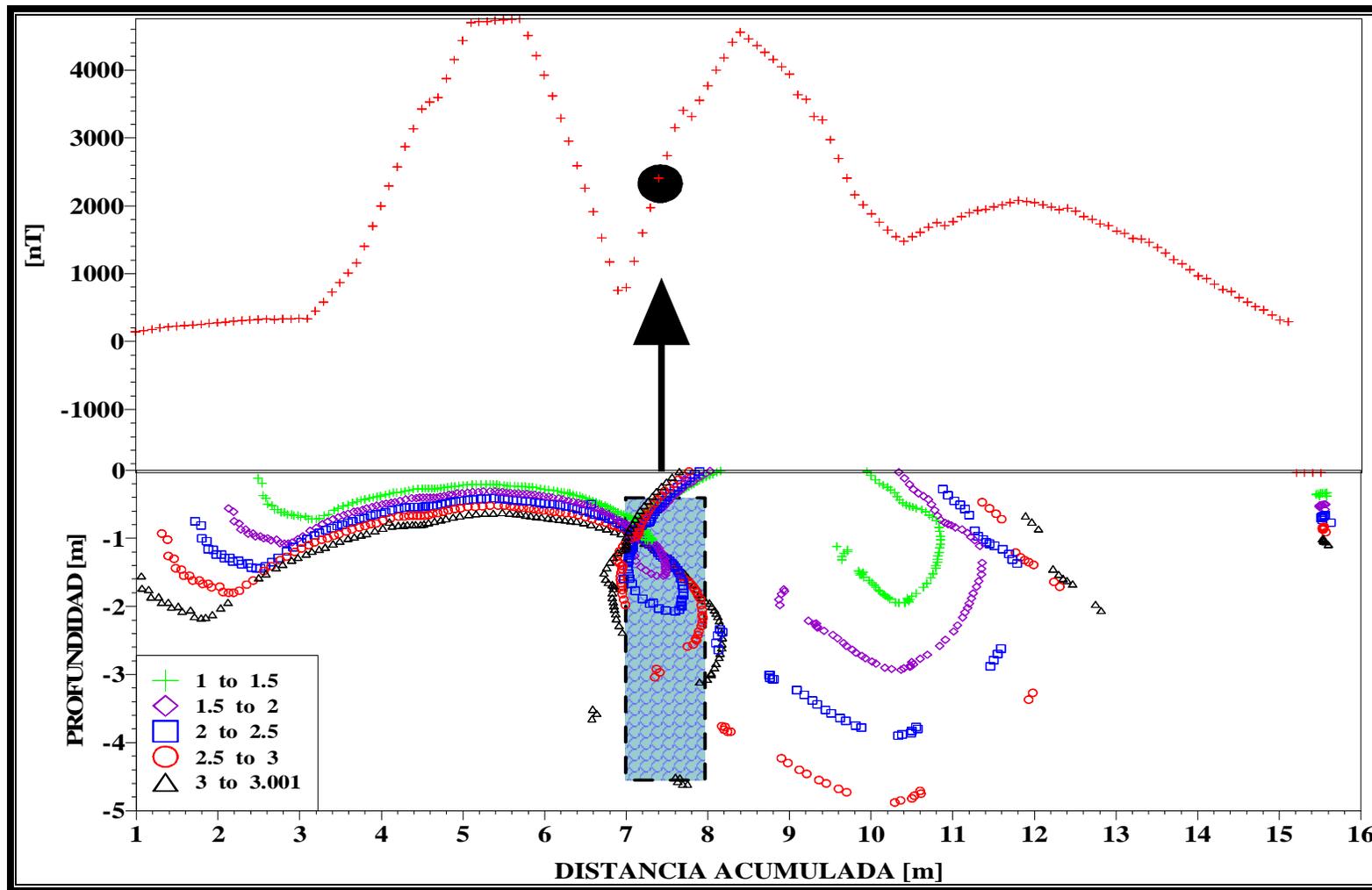


FIGURA IV.5.2.2.- Solución de la “EDE” aplicada a la señal analítica sobre la anomalía “D”.

OCURRENCIA DE ÍNDICES ESTRUCTURALES

| INDICE | SIMBOLO | PORCENTAJE | CANTIDAD |
|--------|---------|------------|----------|
| 1.0 | + | 22.50 | 244 |
| 1.5 | ◇ | 22.10 | 240 |
| 2.0 | □ | 20.40 | 221 |
| 2.5 | ◦ | 18.40 | 200 |
| 3.0 | △ | 16.60 | 180 |

El índice de mayor ocurrencia, es el de 1.00, seguido del de 1.50 y 2.00, esto es un buen comienzo, por el tipo de fuente buscado, el análisis de la solución de la deconvolución tendrá que definir a uno de estos tres valores como el índice definitivo.

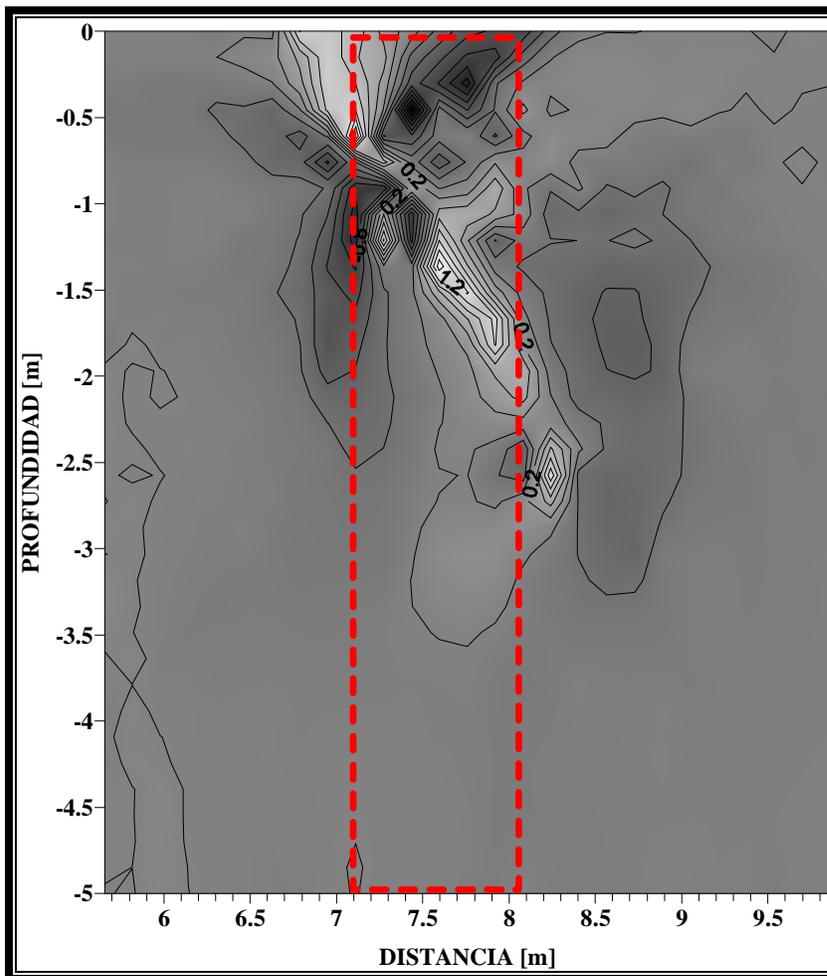


FIGURA IV.5.2.3.- Perfil de la aplicación de la señal analítica con la fuente enmarcada.

Por lo que se ve en el perfil de la anomalía “D” (FIGURA IV.5.2.3) la fuente ha sido exagerada en su diámetro (diámetro de .95 [m], de 7.10 a 8.05 metros sobre la línea de perfil) con respecto a la aplicación de la deconvolución sin señal analítica (FIGURA IV.5.1.2), se presentan los límites derecho e izquierdo de las crestas de la señal analítica que son las concentraciones alargadas e inclinadas, además la solución de la deconvolución (FIGURA IV.5.2.2) no tiene mucha dispersión y no se piensa en que exista más de un cuerpo.

La deconvolución de Euler aplicada a la señal analítica de la anomalía “D” (FIGURA IV.5.2.2) tiene una forma común, sin embargo, según la sección II.3 las cestas deberían limitar los bordes de la fuente y no es así. Según esta imagen el mejor índice sería el de 2.00 o bien el de 2.50, otro índice le da un aumento excesivo a las dimensiones de la fuente.

CONCLUSIONES

El diámetro para la solución de la deconvolución con señal analítica (FIGURA IV.5.2.2) es exagerado y corresponde a poco menos de 0.95 [m] localizado de 7.10 a 8.05 a lo largo de la línea de perfil, su posición con respecto a la curva de respuesta se ubica fuera del valle lo cual no es lo esperado por la teoría, sin embargo el resultado es confiable. El índice es de 2.00 (índice en color azul). Se hace ver que a pesar de que la anomalía no tiene una forma dipolar y que además su polarización es diferente, si presenta un cuerpo anómalo.

- IV.5.3- Comparación con modelo sintético

Sigue la comparación cualitativa del modelo sintético con la anomalía “D”, diferente a las comparaciones anteriores, se presentan diferencias cualitativas que son inmediatas, la principal es la forma de la curva de respuesta magnética (FIGURA IV.5.3.1; FIGURA IV.5.3.2).

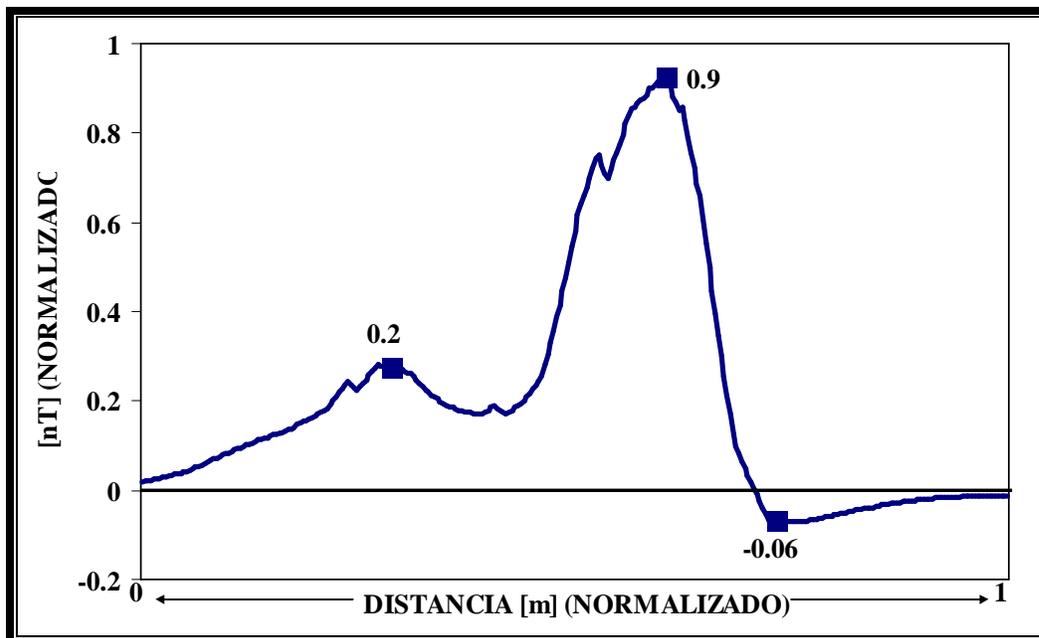


FIGURA
IV.5.3.1.-Curva
de respuesta
magnética de la
anomalía “D”.

Su valor máximo es de 0.9 [nT] que es un valor muy cercano al que presenta el modelo sintético y aquí queda decir como conclusión que debido a que la profundidad es mayor en relación a las anteriores anomalías, el contenido de tubería se empata con el del modelo sintético y por tal motivo la magnitud de ambas es tan similar.

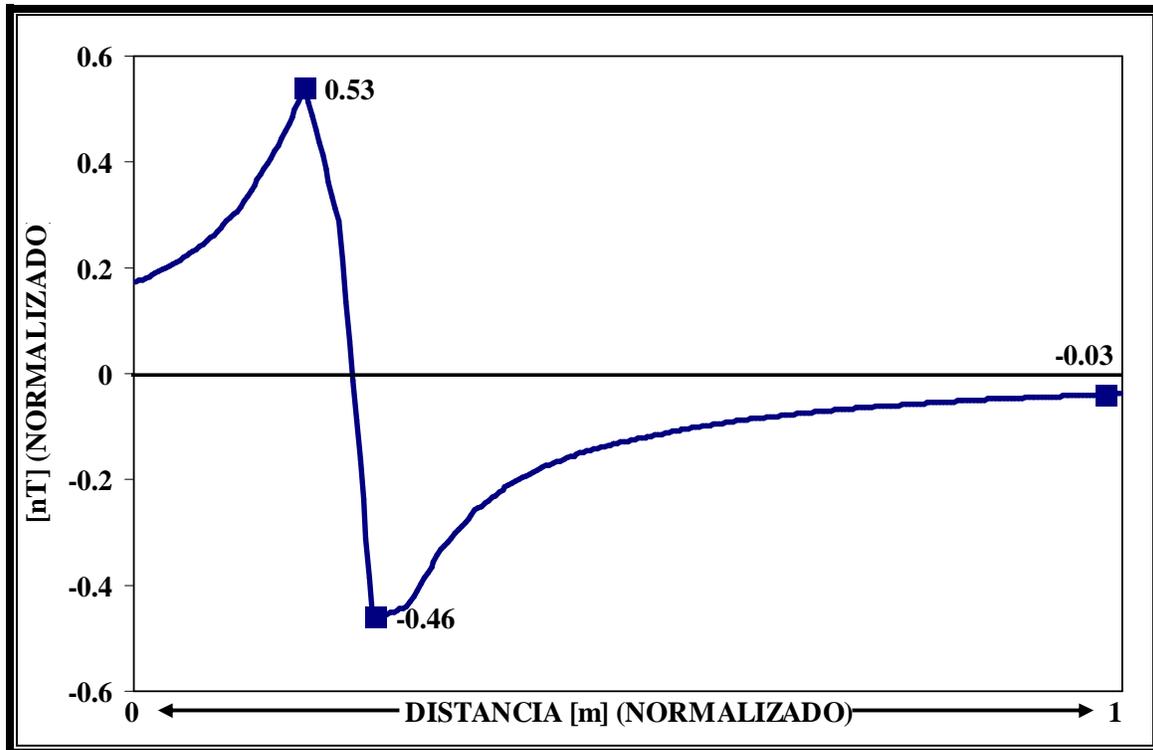


FIGURA IV.5.3.2.- Curva de respuesta magnética para el modelo sintético.

El valor máximo para esta curva es de 0.53 [nT] como ya se dijo es un valor que se acerca demasiado al modelo real de la anomalía “D”. Con un valor mínimo de -0.46

El coeficiente de correlación es igual a 0.62, mostrando mayor disparidad con respecto a las anomalías anteriores, lo cual era lo esperado pues como se ve en la línea de perfil de esta anomalía se nota poco parecida con la respuesta sintética.

En el modelo real se presenta con un máximo de 0.9 (FIGURA IV.5.3.2), su valor mínimo es de -0.06 pero no corresponde a un mínimo de una anomalía dipolar, mientras que en el modelo sintético aparece el comportamiento clásico que se describe con abundancia en las anomalías dipolares.

La localización de la fuente en la curva sintética se ubica en el cambio de polaridad, lo cual coincide con la teoría; en el modelo real se halla a la mitad de las dos crestas (FIGURA IV.5.3.3). Es notorio como difiere la forma de la dispersión y concentración de los índices estructurales en ambas soluciones de deconvolución y a pesar de esto, se define a un mismo tipo de fuente en los cuales coincide el índice estructural.

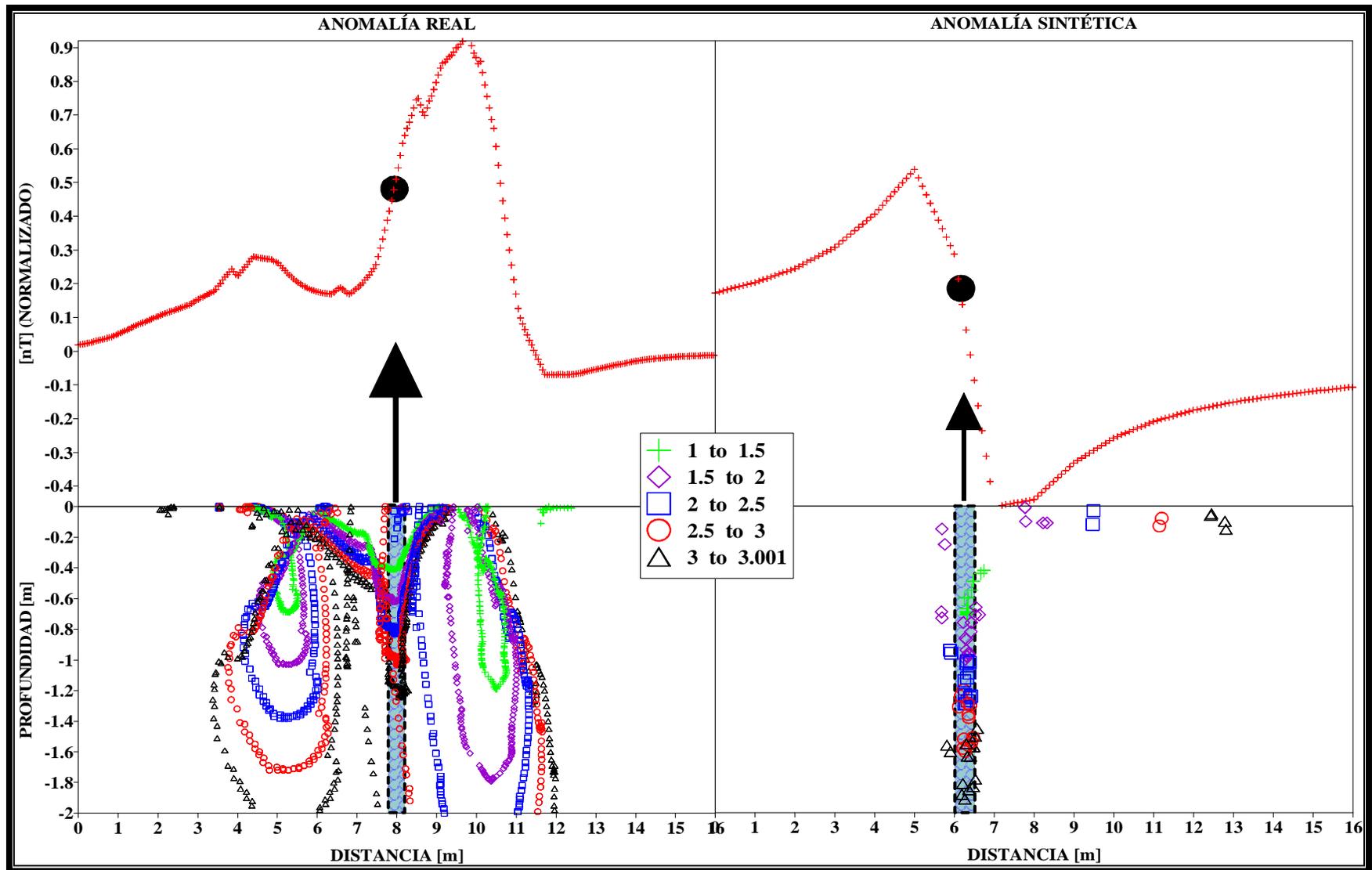


FIGURA IV.5.3.3.- Comparación de la “EDE” entre la anomalía “D” y el modelo sintético de un tubo vertical.

Finalmente, ya que se han analizado todas las anomalías, es importante notar que a pesar de que es la misma fuente en todos los casos, la solución emanada de la aplicación de la deconvolución de Euler para cada caso son relativamente diferentes; la fuente es detallada por la forma en que los índices se concentran, de esta forma en algunos casos la concentración forma cuerpos circulares, en otros la concentración es en cuerpos verticales. Ahora bien, la concentración suele venir acompañada de dispersión la cual también es muy variada, en la mayoría de los casos esta dispersión se concentra en forma de patrones pero en otros no existe tendencia alguna, de este modo, la estimación de la forma de la fuente (así como también sus dimensiones y localización) es fundamentada principalmente por la forma de la solución de la deconvolución, pero además es muy importante hacer uso de un criterio que es casi intuitivo que conjuga el conocimiento previo de los rasgos geométricos (por lo menos generales) de la fuente, así como también de la forma y tipo de anomalía (en este caso dipolar). La habilidad para la interpretación por medio de este método se aumenta con la experiencia en el procesado e interpretación de diferentes anomalías.

A continuación se presenta el resumen de resultados de todas las anomalías, se pretende realizar un comparativo de carácter cualitativo, enfocado especialmente en el valor máximo y mínimo de su curva de anomalía.

| ANOMALÍA | MÁXIMO [nT] | MÍNIMO [nT] | DIAMETRO [m] | PROF. [m] | I. CORREL. |
|------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|
| SINTÉTICO | 13189.5 | -11338.8 | 0.50 | 0.50 | 1.00 |
| A | 172.4 | -290.5 | 0.30 | 0.30 | 0.82 |
| B | 2932.4 | -2381.1 | 0.34 | 0.34 | 0.79 |
| C | 2318.7 | -276.0 | 0.40 | 0.40 | 0.66 |
| D | 7202.7 | -126.7 | 0.45 | 2.20 | 0.62 |

La magnitud en los valores máximo y mínimo del modelo sintético supera por mucho a cualquier curva de respuesta magnética. Las causas de esto son las siguientes.

1.- como se mencionó antes, se diseñó el modelo sintético con base en la litología que prevalece en la zona de estudio (sección III.2.2 y III.2.3) quedando una susceptibilidad de 0.01 para la litología, la cual esta compuesta por sal de roca, caliza, arcillas y areniscas, el valor que debe prevalecer en la zona debe tener un valor menor, debido a que debe existir un valor mayor de temperatura en el campo que en el laboratorio de medición (que es de 20 °C en el laboratorio) y esto disminuye el valor de la susceptibilidad de campo, pues se sabe que la susceptibilidad sufrirá un decremento en su valor al incrementar la temperatura.

2.- En el modelo sintético se propone una tubería de acero con diámetro de 0.50 [m], y un espesor de la pared de 0.10 [m], en cambio, en los modelos reales se estiman tuberías de 0.40 [m] de diámetro, o sea más pequeñas y además se desconoce el espesor de la pared, las cuales ya deben estar corroídas por efecto de la oxidación, disminuyendo el volumen metálico. De modo que el aumento de material paramagnético en el modelo sintético provoca un amplio aumento en la curva de respuesta magnética.

3.- En el modelo sintético se relleno de azufre puro, mientras que en los modelos reales probablemente hay una mezcla de azufre con diversos materiales diamagnéticos que hacen disminuir los valores de campo.

V.- CONCLUSIONES

V.1.- CONCLUSIONES FINALES.

A partir de que la deconvolución de la ecuación diferencial homogénea de Euler para la estimación de la posición y profundidad de fuentes magnéticas tal como se recomienda por ciertos autores (Thompson, 1982) se concluye que es un método adecuado y además, en virtud de que se han obtenido resultados satisfactorios en otras aplicaciones geofísicas de exploración magnética somera orientada a la caracterización de rellenos sanitarios con alto contenido metalífero (Orgeira, 2004; Dahlin, 1995; Dhananjay, 1996) se aplicó en el presente trabajo la misma metodología, pero ahora orientada en la caracterización de tubos posicionados verticalmente, los cuales detallan anomalías aisladas dipolares.

Con el fin de proveer una definición confiable de estas fuentes, primero se aplicó el método de Euler sobre anomalías sintéticas (tubo vertical, esfera y falla vertical) que se apegan en la mayor medida de lo posible a la realidad. Los resultados fueron satisfactorios para la esfera, pero en lo que se refiere al tubo y falla vertical la profundidad no cumplió satisfactoriamente con los objetivos. Finalmente la aplicación de la Deconvolución Euler sobre anomalías reales presenta cierto grado de ambigüedad, para anomalías aisladas compuestas por dipolos simples la estimación es confiable, en la interpretación de la solución a la deconvolución, una parte medular es el reconocimiento de la dispersión y concentración de los índices estructurales en base a una buena identificación de estos dos aspectos se tendrá una buena modelación de la fuente.

Para una mejor identificación de la fuente, se recomienda realizar excavaciones en una de las anomalías en el lugar de estudio, con el fin de tener un parámetro que pueda definir el rango de error real en la estimación de la profundidad en las demás anomalías e incluso para otras exploraciones a fines a este tema de estudio.

La aplicación de la señal analítica es recomendable para la localización y estimación de la geometría de cuerpos bidimensionales que se pueden representar en sección, sin embargo el método no es conveniente para una determinación a detalle de las dimensiones de la fuente.

La no unicidad de las soluciones en el terreno de la geofísica, es un problema que puede resolverse parcialmente de acuerdo a los elementos específicos de una exploración determinada. Una recomendación para el presente trabajo, es que se desarrolle la técnica bajo condiciones controladas de manera detallada. Generando modelos precisos se podrá determinar con mayor control el problema específico.

Así mismo otra variable importante es la combinación adecuada de todos los métodos posibles atendiendo al costo-beneficio para una solución eficiente y bien fundamentada en la aplicación futura de esta técnica.

En general, el protocolo establecido en este trabajo propone primero la aplicación de la magnetometría como metodología de campo, un control de calidad de los datos crudos (mediante la aplicación de las correcciones necesarias), el uso de la Deconvolución de Euler para la estimación de la profundidad de las anomalías dipolares, una segunda estimación de la profundidad y la geometría gruesa del cuerpo magnetizado por medio de la Señal Analítica. Finalmente una interpretación adecuada permite incorporar en esta etapa, más información de índole geofísico, geológico, estructural, y de cualquier otra índole para establecer la toma de las decisiones finales correspondientes.

Es adecuado hacer mención de la importancia que tiene la interpolación en cada perfil de datos, la equidistancia de los valores de campo en cada perfil anómalo es algo que reviste mucha importancia al momento de realizar la deconvolución, pues, como se noto en su momento, (sección II.4.1) a un mayor acercamiento entre puntos de medición se obtendrá una solución en la deconvolución más robusta con un aumento significativo de índices estructurales, sin embargo, un exceso de interpolación causará fuertes dispersiones que podrían conllevar a interpretaciones erróneas.

Finalmente, con respecto a la aplicación de la ecuación de la deconvolución de Euler (ecuación II.1.8) propuesta por Thompson, cabe hacer mención que en un particular punto de vista el factor que corresponde al valor de fondo de campo magnético “ B ” no debería ser tomado en cuenta, pues los datos de campo ya han sido corregidos con el fin de dejar únicamente el valor de campo anómalo y se pierde congruencia al momento de utilizar esta cantidad en dicha ecuación.

BIBLIOGRAFIA

- Blakely, R. J., 1996, Potential Theory in Gravity and Magnetic applications, 2^{da} Edición, 437 pp.
- Bremen, H., M., 2002, Transferencia, revista de posgrado, investigación y extensión del campus Monterrey, "Medio ambiente, evaluación Ambiental del predio de la ex-azufre". Revisar la página Web: <http://www.mty.itesm.mx/die/ddre/transferencia/59/59-III.05.html>
- CRM, Carta geológico-minera Minatitlán, E15-7,2005, estados de Veracruz y Oaxaca, Pp: 5-48.
- Dahlin.T y Jeppson H., 1995, Geophysical investigations of a waste deposit in southern Sweden, Proceedings of the symposium on the application of geophysics to Engineering and environmental problems EEGS 97-105.
- Dhananjay R., September-October, 1996, Magnetic Properties of Unruled Steel Drums from Laboratory and Field-Magnetic Measurements, Geophysics Vol.61 No.5, 1325-1335.
- Escobar M. A., Alatorre M., 2005, Medición de Susceptibilidad Magnética de los Materiales. Laboratorio de Propiedades Magnéticas de los Materiales, CENAM. <http://www.cenam.mx/dme/enme09>
- Frasch, www.textoscientificos.com/quimica/azufre/proceso-azufre-frasch
- Mushayandebvu, M. F.P., Van Drielz, Reid, A. B. y Fairhead, J. D., May- June 2001, Magnetic source parameters of two-dimensional structures using extended Euler deconvolution, Geophysics Vol. 66. No. 3, 814-823.
- Nabighian M. N., June 1972, The Analytic signal of two dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation, Geophysics, Vol. 37. No. 3, 507-517.
- Netleton, L. L., 1940, Geophysical Prospecting for Oil, 1^{ra} Edición, 429 Pp.
- Orgeira, M.J., Vásquez, C.A., Ostera, H., Septiembre 2004, Relevamiento Magnetométrico Terrestre de Rellenos Sanitarios: Estudio Piloto en Gualaguaychú, Entre Ríos, Revista Asociación Geológica Argentina, Vol. 59, No.3, Buenos Aires,
- Parasnis, D.S., 1986, Principles of applied Geophysics, 4^{ta} Edición, 325 Pp.
- Thompson, D.T., January 1982, EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, Geophysics Vol. 47 No. 1, 31-37.
- Wikipedia, the free encyclopedia, File: SulphurCristal.jpgpage