

FACULTAD DE INGENIERIA



**APLICACION DE LA GRAVIMETRIA A LA
DETECCION DE CAVIDADES EN ZONAS URBANAS**

**JOSE JOAQUIN MARTIN DEL CAMPO MENA
CARLOS FILIBERTO CORTES RAMIREZ**

2ej
16



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis 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.

**"APLICACION DE LA GRAVIMETRIA A LA DETECCION DE
CAVIDADES EN ZONAS URBANAS".**

I N D I C E .

CAPITULO I	
OBJETIVOS - - - - -	1
CAPITULO II	
CONSIDERACIONES SOBRE LA TOMA DE DATOS - - - - -	4
CAPITULO III	
DERIVADAS HORIZONTALES Y VERTICALES - - - - -	13
CAPITULO IV	
DISEÑO DE OPERADORES - - - - -	16
CAPITULO V	
TRABAJO DE CAMPO Y CORRECCION DE DATOS - - - - -	24
CAPITULO VI	
PROCESO DE DATOS - - - - -	42
CAPITULO VII	
INTERPRETACION - - - - -	60
CAPITULO VIII	
CONCLUSIONES - - - - -	65
CAPITULO IX	
BIBLIOGRAFIA - - - - -	67

C A P I T U L O I.

OBJETIVO.

A los muchos problemas que se presentan en el Valle de México, debemos integrar el de la inestabilidad del subsuelo generada por la existencia de antiguas explotaciones subterráneas en la zona poniente de la Ciudad de México, las cuales, al extenderse la mancha urbana hacia esa zona, presentan un peligro potencial para los asentamientos humanos ahí ubicados.

Muchos han sido los casos de derrumbes que han originado cuantiosas pérdidas económicas y en ocasiones, pérdidas de vidas.

La solución de este problema tiene diversos puntos de enfoque, como medidas preventivas existen las restricciones en el uso del suelo y desalojos -- de algunos predios, hasta la reubicación de colonias enteras; y el relleno e inyección de las cavidades, o el derrumbe de las bóvedas de las mismas como medidas definitivas.

El desarrollo tan errático de la Ciudad de México, ha ocasionado que la -- planeación y planificación de la misma, actualmente se enfoque más a co--rregir los errores del pasado, que a organizar para el futuro, y esto es devido a que las soluciones de los problemas que se han presentado general--mente, no constituyen soluciones definitivas, y con el tiempo, los proble--mas surgen nuevamente con dimensiones tales, que aparentan no tener so--lución.

Para el logro de soluciones en el problema de las zonas minadas del Distri

to Federal, del tipo de las señaladas anteriormente como definitivas, es necesario el conocimiento preciso de estas cavidades, las cuales, probablemente en más del 60% de los casos no se conoce su ubicación, dado que nunca existió control sobre las mismas, y el desarrollo urbano, con sus construcciones y movimientos de tierras, ha ocasionado que el acceso a las mismas se haya obturado y actualmente sea imposible conocer su ubicación.

Existen diversos métodos para conocer la posición de estos accesos, el más sencillo, investigar con los antiguos habitantes de estas zonas, donde se ubicaban los mismos, pero generalmente se chocará con el injustificado temor de estas gentes a perder una propiedad a la que se encuentran arraigados. Otra es la investigación en fotografías aéreas de varias épocas de estas zonas vistas al estereoscopio, pero las escalas y la calidad de las fotos más antiguas, así como lo "novedoso" del procedimiento de la toma de fotografías aéreas, nos dejará sin conocer las condiciones de las zonas más cercanas al centro de la ciudad, en donde se ubicaban las explotaciones más antiguas, así como de aquellas en las que no sea posible identificar las explotaciones por este método.

Es aquí donde es necesario echar mano de los métodos geofísicos para detectar estas oquedades en el subsuelo.

Uno de los métodos geofísicos más empleados para la detección de cavidades es el de resistividad eléctrica, pero en algunas zonas su aplicación se ve restringida por la presencia de ductos subterráneos de agua o ener

gía eléctrica, así como por la presencia de líneas de alta tensión; incluso se podrían mencionar casos como el de la subestación Los Remedios, de la Comisión Federal de Electricidad, donde por razones obvias fue imposible emplear este método para detectar las cavidades existentes en el subsuelo, en una de las cuales el colapso de la bóveda ocasionó graves daños en la subestación.

Otro método sería el sísmico de refracción, donde la marcada diferencia en la conducción de ondas sísmicas entre el suelo y el aire en la cavidad, nos llevaría a pensar que sería ideal, pero el retraso en el arribo de las ondas a los detectores, en muchos casos no es perceptible, debido a las reducidas dimensiones de las cavidades, y el empleo de este método en zonas urbanas es casi imposible, debido a la gran cantidad de "ruido" que existiría.

Es por eso que en el presente trabajo, proponemos el uso del método gravimétrico, que aunque en algunos casos presenta serias limitaciones, mediante el empleo de un adecuado sistema de procesamiento de los datos, nos llevará a conclusiones satisfactorias, para esto, se propone la determinación de derivadas vertical y horizontal, obtenidas por medio de operadores calculados a partir de la serie de Fourier.

CAPITULO II.

CONSIDERACIONES SOBRE LA TOMA DE DATOS.

La toma de datos en campo, así como la corrección de los mismos, se ven afectadas por diversos factores, los cuales indicamos a continuación:

El procedimiento de medición ideal, sería en rejillas, de manera que aunque el efecto gravimétrico generado por la cavidad fuese pequeño, el evento probablemente se alinearía en caso de existir un túnel, pero la presencia de construcciones impide emplear este procedimiento y la toma de datos deberá realizarse generalmente sobre las vías públicas.

La forma de las cavidades generalmente no es de un solo túnel, sino de una intrincada red, que en ocasiones llega a afectar áreas de hasta 200 X 100 metros, por lo tanto las líneas de medición generalmente deberán ser mayores de 200 metros, y aunado a esto, se deberá considerar que el espaciamiento máximo entre cada punto, no deberá ser mayor de 3 metros, para no incurrir en espaciamientos que impidan detectar la existencia ocasional de un solo túnel. Asimismo, cada medición deberá realizarse por lo menos dos veces con el fin de evitar errores en las lecturas, por lo tanto, el número de determinaciones deberá ser muy grande y consecuentemente el proceso lento.

La zona poniente de la ciudad está constituida por lomas separadas por barrancas de hasta 80 metros de profundidad, y en ocasiones con fuertes pendientes en sus laderas, lo que originará que sea necesario un control topográfico muy preciso para las correcciones por rugosidad del terreno, aunque este problema

no existe cuando se lleva un plan integral de investigación de una zona, ya que para determinar el espesor de las bóvedas de las cavidades que se localicen, - deberá conocerse la altimetría de la superficie en toda el área, la cual generalmente se realiza por métodos fotogramétricos.

Las cavidades en esa zona generalmente se localizan dentro de la formación Tarango, la cual está constituida por materiales granulares procedentes de abanicos aluviales y depósitos originados por nubes ardientes producto de erupciones de la Serranía de las Cruces; sobre éstos generalmente se encuentran los suelos Becerra y Tacubaya, gravas y arenas de la serie clásica fluvial y aluvial, y sobre todos éstos, los suelos orgánicos Totolsingo, siendo este conjunto, de espesores muy variables y fuertemente cementado, por lo cual es de esperarse la presencia de "ruido geológico" en algunas zonas.

Las líneas de medición deberán ubicarse preferentemente paralelas a los ejes de las barrancas, y lo más próximo a las mismas, dado que debido a que los horizontes explotables generalmente no afloran en las partes altas de las lomas, los accesos se localizan en las laderas de las barrancas, donde si es posible explotar el material en dirección horizontal. También existen casos en los que las cavidades partían de zonas excavadas a cielo abierto en las partes altas de las lomas, pero estas excavaciones en algunas zonas persisten actualmente, o son observables en fotografías aéreas antiguas, lo cual ayuda a orientar la prospección.

Tal vez el punto más importante a considerar es el de la magnitud de las anomalías que se esperan encontrar. Teóricamente se puede hacer el siguiente análisis:

Supongamos que tenemos una superficie plana y un suelo con densidad uniforme, entonces la anomalía generada por un cilindro horizontal, estará dada por

$$\Delta g = 2 \pi G (\rho_0 - \rho_1) \frac{R^2}{Z}$$

Donde

$$G = \text{Constante gravitacional} = 6.673 \times 10^{-8} \frac{\text{cm}^3}{\text{g. seg}^2}$$

ρ_0 = Densidad de la cavidad = 0.

ρ_1 = Densidad del medio circundante.

R = Radio del cilindro.

Z = Profundidad del eje del cilindro.

Θ = Angulo entre el radio vector que va del punto de medición al centro del cilindro y la vertical.

Si consideramos la anomalía máxima provocada por este cilindro o sea para $\Theta = 0$, todos los términos son constantes, a excepción de R y Z, por lo tanto la posibilidad de detectar una cavidad, dependerá de la relación R^2/Z .

Esto es, si tenemos una cavidad de 1 metro de radio a una profundidad de 5 metros y una densidad de 2 gr/cm² por unidad de longitud, la anomalía máxima será:

$$\Delta G = -1.67 \times 10^{-5} \text{ gales.}$$

$$\Delta G = -0.0167 \text{ miligales.}$$

Los verniers de los gravímetros en uso actualmente, solo miden hasta 0.01 miligales, por lo tanto, la anomalía máxima, aunque detectable, probablemente se verá enmascarada por el "ruido geológico" u otros factores, pero se debe considerar que las cavidades se ubican en ocasiones, a profundidades menores que la señalada, y aunque en general la altura promedio de las mismas es del orden de 2 a 3 metros, existen casos en que estas alturas llegan a ser hasta de 8 metros, y los claros, en determinadas direcciones, de más de 30 metros. En las figuras 2.1 a 2.3, se presentan algunas de las formas de explotación más comúnmente encontradas.

En la figura 2.4, se presenta la gráfica de los valores de las anomalías máximas generadas por un cilindro de diferentes radios, diferentes profundidades y una densidad del medio de 2 gr/cm³; este caso correspondería a explotaciones consistentes en un solo túnel, las cuales se ha comprobado en las investigaciones realizadas en las zonas minadas, que generalmente corresponden a explotaciones que se iniciaban, por lo cual son de poca longitud y presentan poco peligro de colapsarse.

El problema principal lo constituyen las explotaciones grandes, las cuales si presentan un peligro potencial de consideración, pero éstas proporcionaban anomalías de mayor intensidad, lo cual las hará más fácilmente detectables, por lo tanto los valores de la figura 2.4 representan en realidad valores mínimos esperados de anomalía, los cuales no necesariamente serán los más frecuentes en las investigaciones de campo.

Ctro punto importante a considerar en el aspecto de la intensidad de las anomalías, es el que de diversas zonas en que se conoce la existencia de cavidades, se observa que las explotaciones en cierta área, presentan las mismas características geométricas, por lo tanto, en la investigación de una zona, el conocimiento de una sola cavidad, nos indicará la geometría aproximada de otras posibles cavidades existentes en esa zona. Esto, aunado al conocimiento de la estratigrafía del área, que nos dará a conocer la profundidad de los estratos explotables en los que es factible la existencia de cavidades, nos permitirá diseñar modelos -- por medio de los cuales se podrá determinar si el método gravimétrico -- y los equipos en uso tienen la sensibilidad suficiente para detectar las cavidades existentes en la zona.



PILAR



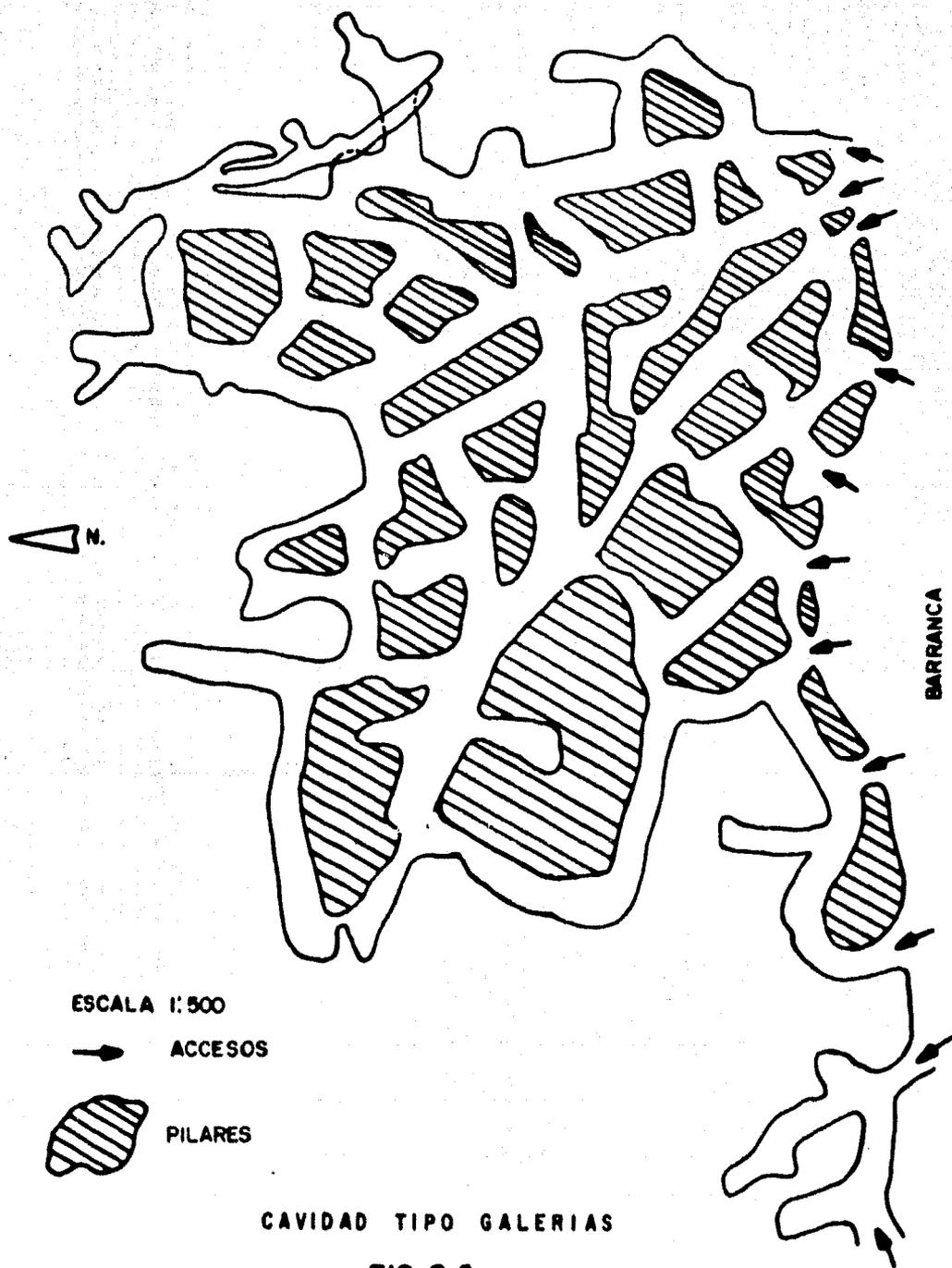
ACCESO

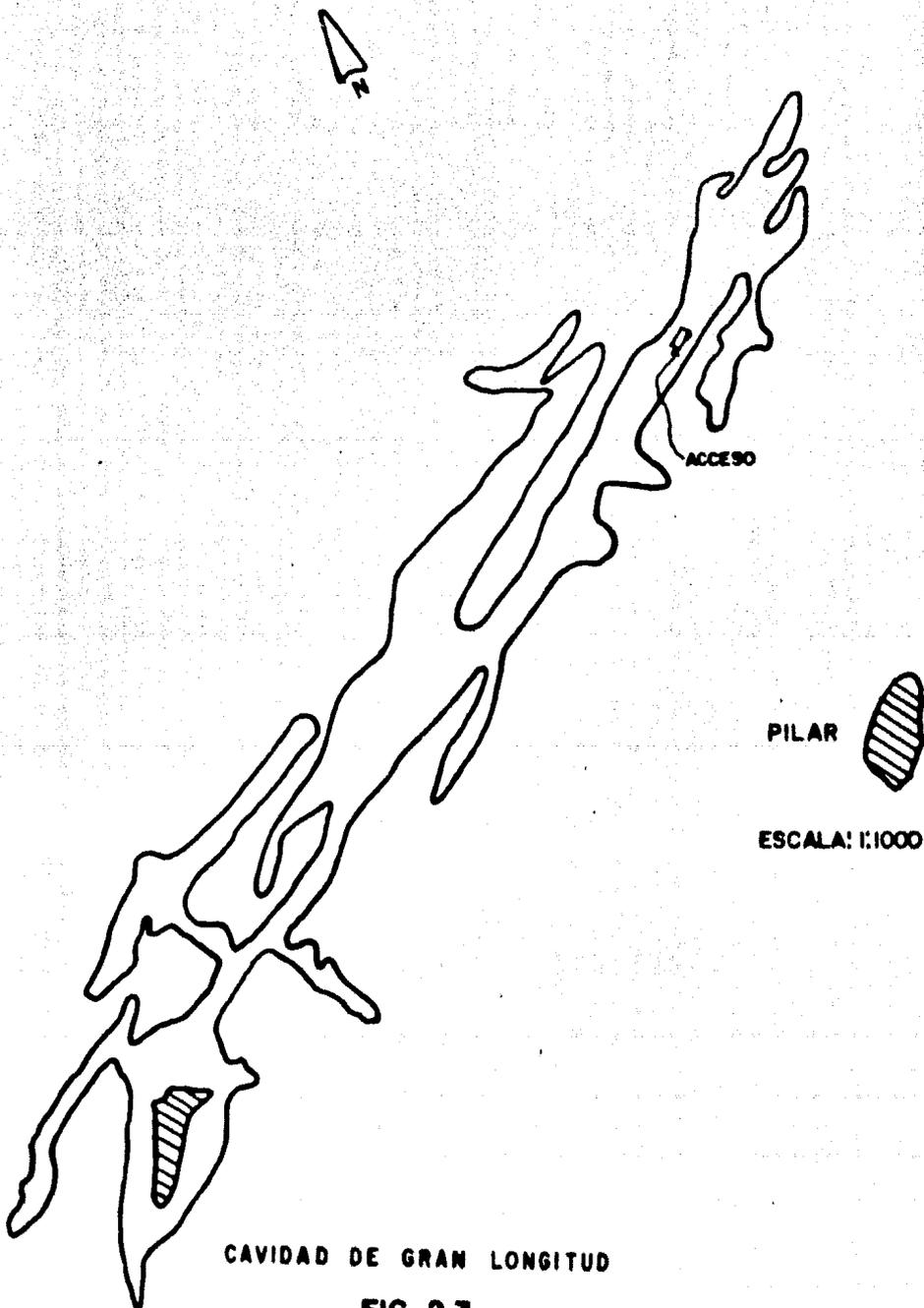


ESCALA 1:500

CAVIDAD TIPO SALON

FIG. 2.1





CAVIDAD DE GRAN LONGITUD

FIG. 2.3

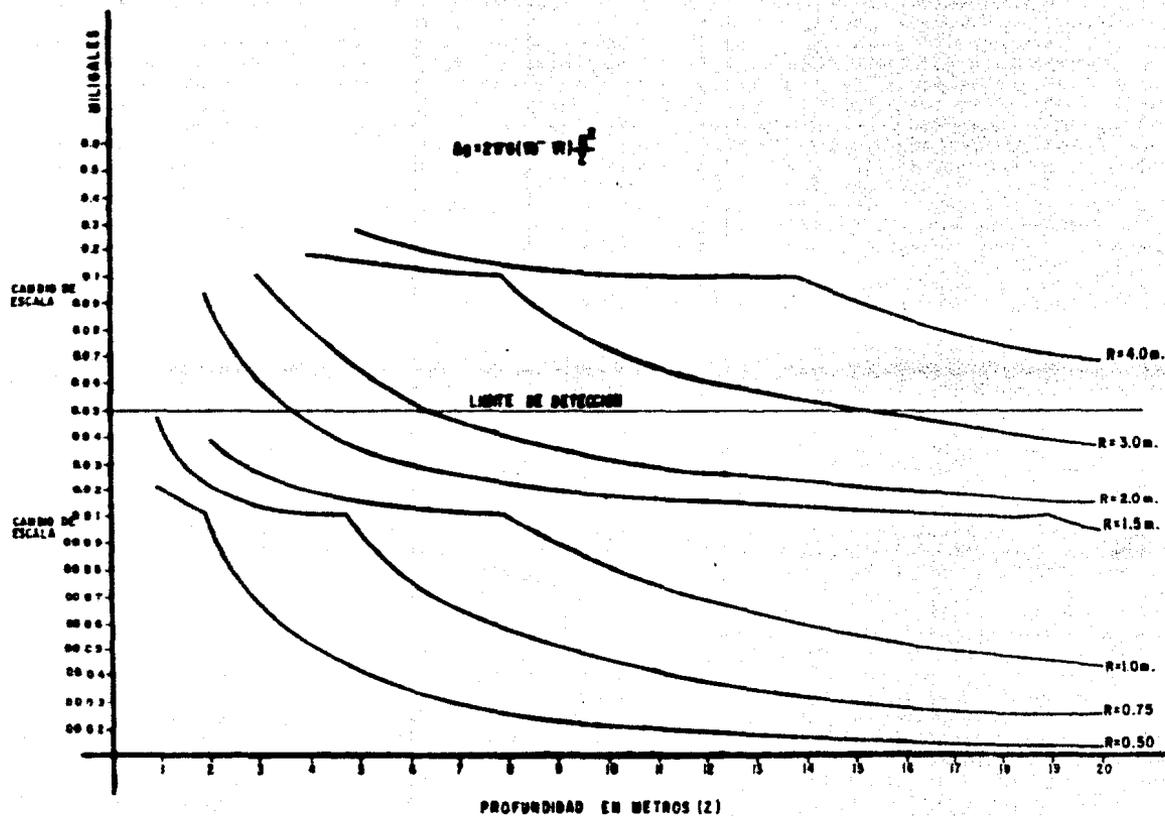


FIG. 2.4.

CAPITULO III

DERIVADAS HORIZONTALES Y VERTICALES.

El método gravimétrico en sus aplicaciones prácticas, trata de determinar variaciones en el campo gravimétrico normal, generadas por diferencias de densidades en el subsuelo asociadas a cuerpos que presentan un cierto interés para el investigador.

Dado que los datos que se obtienen en una investigación gravimétrica son variaciones del campo gravimétrico, es de interés conocer como se comportan estas variaciones, lo cual se puede realizar por medio de derivadas direccionales, o por la determinación de gradientes en el sentido horizontal y vertical.

DERIVADAS HORIZONTALES.

En el caso que nos ocupa, la detección de cavidades, las anomalías que se esperan corresponderán a mínimos, ya que la presencia de una cavidad implica un defecto de masa, por lo cual, al calcular la derivada horizontal de una anomalía de este tipo, la zona donde exista la cavidad, se reflejará en la anomalía derivada como una curva de pendiente creciente, la cual cruzará por cero en el punto donde se localice el mínimo de la anomalía original.

Este tipo de derivadas cuando se realizan por medio de operadores, nos permitirán conocer con mayor precisión las pequeñas anomalías que no sean plenamente identificables en la anomalía original, o eliminar pequeñas variaciones que puedan ser consideradas como ruido, dependiendo de como se diseñen los operadores que se apliquen, aunque en general, las derivadas enfatizaran las señales de alta frecuencia.

Asimismo, el aplicar operadores originará que no sea realmente una derivada en el sentido estricto lo que se realice, sino un cociente diferencial, ya que en este caso el espaciamiento ΔX no tenderá a cero.

DERIVADAS VERTICALES.

Teóricamente para realizar una derivada vertical, es necesario contar con mediciones de la gravedad en el mismo punto, una a mayor elevación que la otra, para así calcular el cociente diferencial en esa dirección. Esto aunque algunos autores lo consideran posible, realizando mediciones sobre una torre con dos platos separados entre sí una cierta distancia ΔZ , el procedimiento de campo presenta serios problemas, ya que según Fajklewicz, el espaciamiento mínimo deberá de ser de tres metros, de manera que los platos queden situados en diferentes líneas equipotenciales, y así obtener lecturas que tengan una diferencia significativa entre sí. Esta altura de la torre ocasionará que se presenten dificultades para mantenerla estable, ya que su diseño deberá ser rígido, pero construida de un material ligero para que pueda transportarse sin dificultad, esto no permitirá eliminar las vibraciones generadas por rachas de viento, y por lo tanto se mantendrá inestable el gravímetro; asimismo, deberán realizarse calculos especiales para las correcciones de deriva, ya que el procedimiento es lento, así como para las correcciones por rugosidad del terreno.

Estos procedimientos de campo, pueden ser evitados, si en el proceso de datos se realizan derivadas por medio del empleo de operadores, lo cual, asimismo, permitirá introducir conceptos del analisis de frecuencias que ayudaran a mejorar la calidad de los datos de campo.

CAPITULO IV

DISEÑO DE OPERADORES.

Una consideración importante en el análisis de una función en el dominio de la frecuencia, son las características de simetría de la misma respecto a un eje en el dominio del tiempo. Esto ha llevado a dividir las funciones en dos tipos:

Funciones pares, las cuales son simétricas respecto a un eje y presentan la siguiente característica:

$$f(-t) = f(t)$$

Funciones impares, las cuales no presentan simetría respecto a un eje y su característica es la siguiente:

$$f(-t) = -f(t)$$

El ejemplo más típico de estas funciones son el seno y el coseno, las cuales son impar y par respectivamente.

Considerando los anteriores conceptos de simetría, si analizamos la expresión para la obtención de los coeficientes de la Serie de Fourier en su forma compleja, tendremos lo siguiente:

$$D_k = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-i\omega t} dt \text{ -----(1)}$$

Para funciones $f(t)$ pares tendremos:

$$D_k = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t \, dt \quad \text{-----}(2)$$

y para funciones impares resultará:

$$D_k = \frac{-1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t \, dt \quad \text{-----}(3)$$

De observar la ecuación (2), se puede inferir que para funciones pares, la obtención de los coeficientes de la serie de Fourier, es operacionalmente equivalente a realizar una transformada inversa de Fourier la cual presenta las siguientes características:

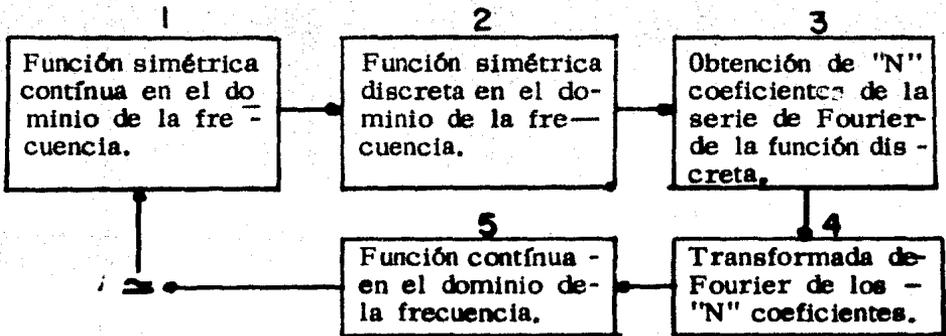
$$F^{-1}(f(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} \, d\omega$$

y para funciones pares:

$$F^{-1}(f(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \cos \omega t \, d\omega$$

Esta equivalencia operacional es de gran valor para el diseño de operadores, ya que al calcular los coeficientes de la serie de Fourier de un operador diseñado en el dominio de la frecuencia, se obtendrá un operador discreto en el dominio del tiempo con el número de puntos que se deseen, lo cual presenta grandes ventajas respecto a la transformada inversa de Fourier, la que proporciona operadores continuos de gran longitud, y esto presentará el problema de escoger la longitud a la cual deberá cortarse el operador, así como el de digitalizarlo de tal manera que el error que se obtenga en este proceso sea el mínimo posible;

Por lo tanto se considerará más apropiado el procedimiento de cálculo por medio de la serie de Fourier, el cual resulta más sencillo, para lo cual el procedimiento se señala en el siguiente diagrama de bloques:



El signo de aproximación entre los pasos (5) y (1), indica que la función obtenida en el paso (5) no es igual a la original, pero presenta las mismas características como se apreciará en el ejemplo que se presenta posteriormente.

Previamente es conveniente indicar las ecuaciones propuestas por Kelly para la obtención de los coeficientes y series de Fourier.

Para $2N$ puntos igualmente espaciados:

$$F(y) \approx \sum_{m=1}^{N-1} \left(A_m \cos \frac{\pi}{N} m y + B_m \sin \frac{\pi}{N} m y \right) + A_N \cos \pi y \quad \text{donde}$$

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{2N-1} F(y)$$

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{2N-1} F(y) \cos \frac{\pi}{N} m y$$

$$A_m = \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{2N-1} F(y) \cos \pi y$$

$$B_m = \frac{1}{N} \sum_{y=0}^{2N-1} F(y) \sin \frac{\pi}{N} m y$$

$$y=1, 2, 3, \dots, 2N-1$$

$$m=1, 2, 3, \dots, N-1$$

Para $2N + 1$ puntos igualmente espaciados

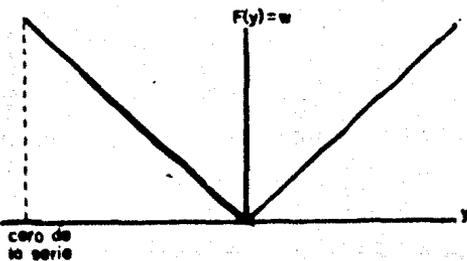
$$F(y) = \frac{1}{2} + \sum_{M=1}^N A_M \cos \frac{2\pi M}{2N+1} y + B_M \sin \frac{2\pi M}{2N+1} y$$

$y=1, 2, \dots, 2N$
 $M=1, 2, \dots, N$

$$A_M = \frac{2}{2N+1} \sum_{y=0}^{2N} F(y) \cos \frac{2\pi M}{2N+1} y$$

$$B_M = \frac{2}{2N+1} \sum_{y=0}^{2N} F(y) \sin \frac{2\pi M}{2N+1} y$$

Ejemplo de cálculo del operador "w" de derivada vertical:



y	F (y)
0	3.14158/ Δx
1	2.35619/ Δx
2	1.57080/ Δx
3	0.78540/ Δx
4	0.0
5	0.78540/ Δx
6	1.57080/ Δx
7	2.35619/ Δx

8 puntos
 $N = 4$

Aplicando la serie de Fourier se obtiene:

$$a_0 = 3.14159 / \Delta x$$

$$b_1 = 0.0$$

$$a_1 = 1.34076 / \Delta x$$

$$b_2 = 0.0$$

$$a_2 = 0.0$$

$$b_3 = 0.0$$

$$a_3 = 0.23004 / \Delta x$$

$$b_4 = 0.0$$

$$a_4 = 0.0$$

Por lo que la serie de Fourier será:

$$F(y) = \frac{1.5708}{\Delta x} + \frac{1.3408}{\Delta x} \cos \frac{\pi}{4} y + \frac{0.2300}{\Delta x} \cos \frac{3\pi}{4} y$$

Cambiando el origen al cero de la función:

$$F(y) = F(y - 4) = \frac{1.5708}{\Delta x} - \frac{1.3408}{\Delta x} \cos \frac{\pi}{4} y - \frac{0.2300}{\Delta x} \cos \frac{3\pi}{4} y$$

Los pesos del operador serán:

$$\alpha_0 = a_0 = 1.5708/\Delta x$$

$$\alpha_1 = -\frac{a_1}{2} = -0.6704/\Delta x$$

$$\alpha_2 = -\frac{a_2}{2} = 0.0$$

$$\alpha_3 = -\frac{a_3}{2} = -0.1150/\Delta x$$

$$\alpha_4 = -\frac{a_4}{2} = 0.0$$

El espectro del operador será:

$$F(w) = \alpha_0 + 2\alpha_1 \cos w\Delta x + 2\alpha_2 \cos 2w\Delta x + 2\alpha_3 \cos 3w\Delta x + 2\alpha_4 \cos 4w\Delta x$$

$$\text{Si } w = 2\pi f ;$$

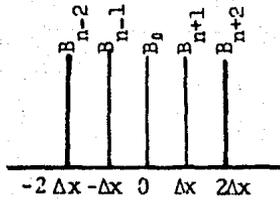
$$F(f) = \frac{1.5708}{\Delta x} - \frac{1.3408}{\Delta x} \cos 2\pi f\Delta x - \frac{0.2300}{\Delta x} \cos 6\pi f\Delta x$$

En la figura 4.1, se presenta la gráfica del espectro original, así como el del espectro del operador calculado para diferentes valores de Δx , los cuales como se señala anteriormente, son semejantes, pero la aproximación del espectro del operador al espectro original, prácticamente es bastante aceptable.

En el ejemplo precedente se ha calculado el operador "w" de derivada vertical, aquí es importante observar que el espectro de amplitud de "w" es el mismo tanto para la derivada horizontal como para la derivada vertical, siendo la diferencia entre estos dos operadores que los de derivada vertical corresponden a funciones pares y los de derivada horizontal a funciones impares, por lo tanto existe un desfase entre los mismos de 90° , por lo que aunque en el dominio de la frecuencia sus amplitudes son iguales, en el dominio del tiempo sus amplitudes y la forma de los operadores es distinta.

Esto como lo señalan Stanley y Green, facilita la obtención de gradientes verticales a partir de los gradientes horizontales de una función por medio de la transformada de Hilbert, la cual la define Bracewell como "equivalente a un curioso género de filtrado, en el cual las amplitudes de las componentes espectrales no varían, pero sus fases se alteran $\Pi / 2$ ".

El procedimiento señalado anteriormente para la obtención de operadores en el dominio del tiempo, como se mencionó solo es aplicable a funciones pares, por lo cual no es posible calcular con el mismo los operadores de derivada horizontal, por lo tanto serán calculados por medio del método de aproximación polinomial, del cual se presenta a continuación un ejemplo del cálculo del operador de derivada horizontal de 5 puntos.



El polinomio de aproximación será:

$$Y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4$$

La primera derivada es:

$$Y' = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + 4a_4 x^3$$

Para $x=0$ tendremos $y = a_0$

Sustituyendo los valores de los espaciamentos tendremos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$B_{n-2} = a_0 + a_1(-2\Delta x) + a_2(-2\Delta x)^2 + a_3(-2\Delta x)^3 + a_4(-2\Delta x)^4$$

$$B_{n-1} = a_0 + a_1(-\Delta x) + a_2(-\Delta x)^2 + a_3(-\Delta x)^3 + a_4(-\Delta x)^4$$

$$B_n = a_0$$

$$B_{n+1} = a_0 + a_1(\Delta x) + a_2(\Delta x)^2 + a_3(\Delta x)^3 + a_4(\Delta x)^4$$

$$B_{n+2} = a_0 + a_1(2\Delta x) + a_2(2\Delta x)^2 + a_3(2\Delta x)^3 + a_4(2\Delta x)^4$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones para el valor de a_1 , obtendremos lo siguiente:

$$Y' = a_1 = B_{n-2} \left(\frac{1}{12\Delta x} \right) + B_{n-1} \left(\frac{-8}{12\Delta x} \right) + B_n (0) + B_{n+1} \left(\frac{8}{12\Delta x} \right) + B_{n+2} \left(\frac{-1}{12\Delta x} \right)$$

Por lo tanto los pesos del operador serán:

$$\left(0.08333/\Delta x, -0.66666/\Delta x, 0.0, 0.66666/\Delta x, -0.08333/\Delta x \right)$$

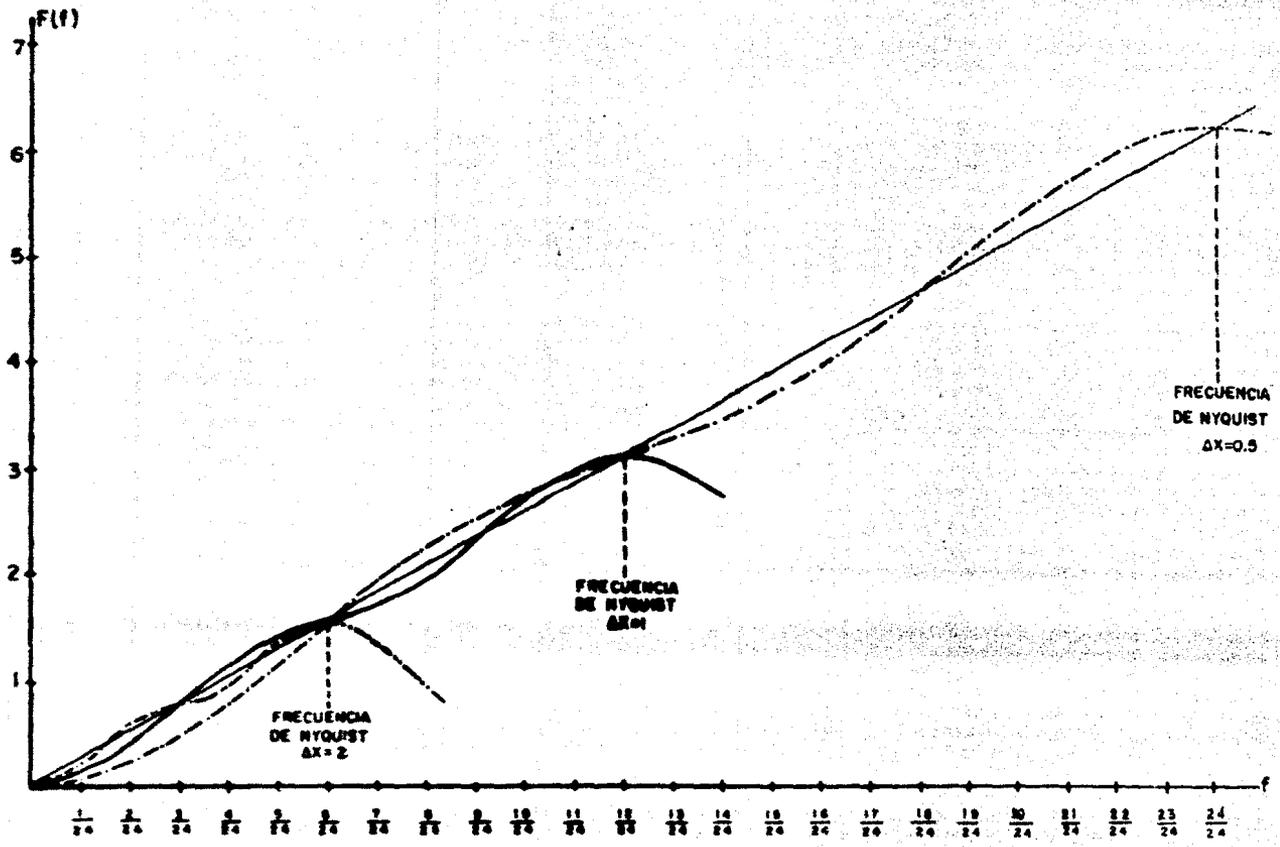


FIG 4.1

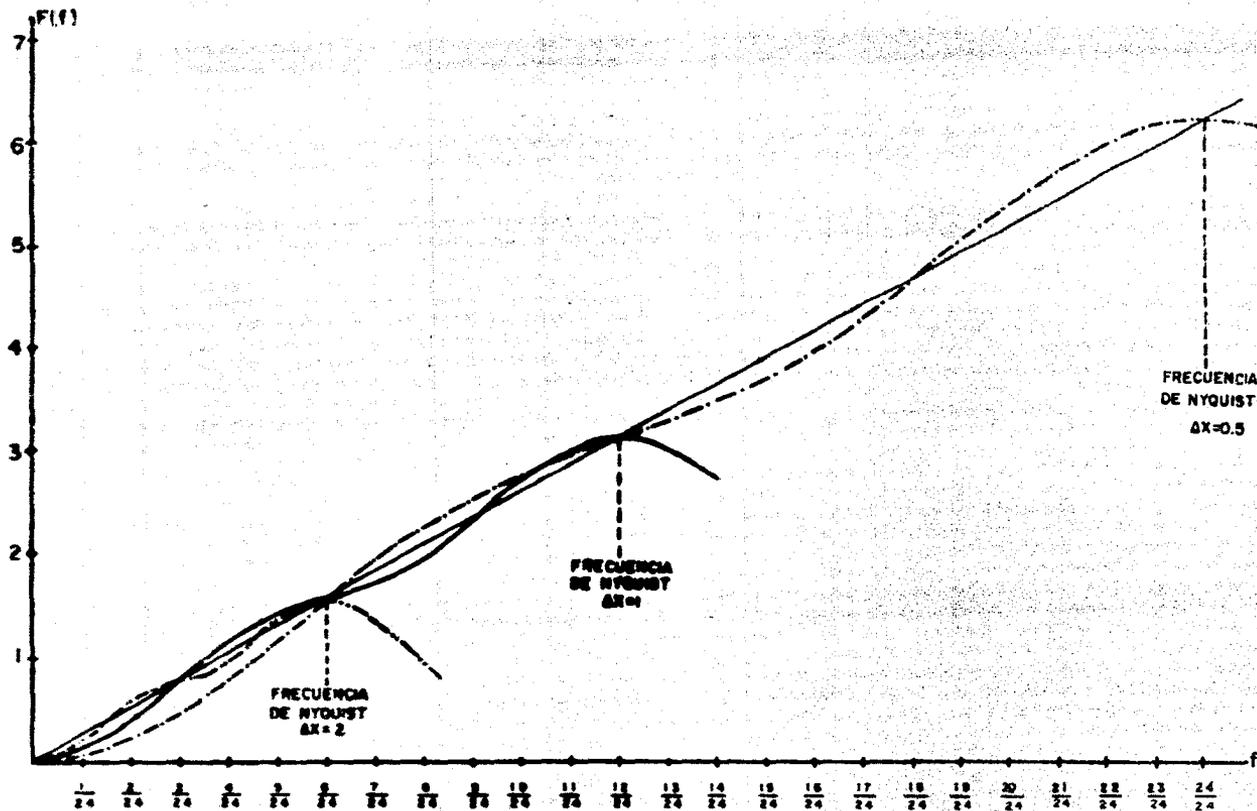


FIG 4.1

CAPITULO V.

TRABAJO DE CAMPO Y CORRECCION DE DATOS.

Con objeto de comprobar el alcance del método, se efectuaron mediciones de la gravedad a lo largo de cuatro líneas cuyas características se describen a continuación.

Línea 1. - Sobre la calle Norte en la colonia Las Palmas, D. F. (Fig. 5.1.) paralela a la Barranca del Tecolote, en esta zona se sabía de la existencia de cavidades, pero no habían sido detectadas, la línea consta de 206 estaciones espaciadas a un metro y se obtuvo dos veces la lectura en cada estación, posteriormente, en base a otros estudios realizados por el Departamento del Distrito Federal, se verificó que la línea cruzó sobre el ramal de una cavidad casi al final de la misma. Las mediciones se efectuaron con un gravímetro Worden.

Línea 2. - Sobre la calle General Torroella en la colonia Daniel Garza, D. F. (Fig. 5.2.), en esta zona se conocía una cavidad la cual consta de un solo túnel, la línea se trazó perpendicularmente al mismo y se realizaron dos mediciones en las 17 estaciones, espaciadas a un metro, de que constó esta línea. El gravímetro empleado fue un Lacoste-Romberg.

Línea 3. - Sobre la Av. Santa Lucía, en la colonia Olivar del Conde, D. F. (Fig. 5.3.), esta línea constó de 30 estaciones, sobre -

una cavidad ya conocida, las mediciones se realizaron dos veces en cada estación espaciadas un metro, con un gravímetro Lacoste-Romberg.

Línea 4. - Sobre la Cerrada de Hidalgo colonia Ampliación - Olivar del Conde, D. F. (Fig. 5.4.), esta línea constó de 25 puntos, con espaciamiento a cada dos metros, se efectuaron dos lecturas en cada estación con un gravímetro Lacoste-Romberg, sobre una cavidad ya conocida.

Se obtuvo la cota de cada estación referida al nivel del mar, partiendo de los bancos de nivel fijados en estas colonias por el Departamento del Distrito Federal y se procedió a realizar las siguientes correcciones:

1. - Corrección por deriva del aparato y efecto de marea, trazándose las gráficas respectivas. En la figura 5.5.A se presentan las correspondientes a la línea 2.

2. - Corrección de aire libre y Bouguer, para lo cual se emplearon como niveles de referencia la cota 2100 m. s. n. m. en la línea 2, y 2300 m. s. n. m. en las líneas 1, 3 y 4, asimismo, se consideró una densidad del medio de 2.0 gr/cm³.

3. - Corrección por rugosidad del terreno, para lo cual se elaboró una plantilla de Hammer en escala 1:1000, y se calcularon las co

recciones correspondientes a los radios 1.99--16.64; 16.64--53.34; y 53.34--170.00 metros, en planos altimétricos con curvas de nivel a cada un metro.

Como resultado de aplicar estas correcciones a los datos, se obtuvieron las anomalías de Bouguer, cuyos valores en unidades gravimétricas se presentan en la tabla 5.1. . Las anomalías, así como su ubicación respecto a las cavidades se presentan en las figuras 5.5. a 5.8.

Previamente y con objeto de estimar la magnitud de las anomalías esperadas, se calcularon las anomalías teóricas correspondientes a las líneas 2, 3 y 4, por medio del método de Talwani, obteniéndose los valores señalados en la tabla 5.2. ; las gráficas correspondientes se muestran en las figuras 5.9. a 5.11.

Un análisis preliminar de los resultados obtenidos, nos permitirá observar lo siguiente:

Línea 1.- se observa una fuerte variación del perfil, probable -- mente ocasionada por la proximidad de la Barranca del Tecolote, más que por un efecto anómalo producido por cavidades, ya que en ningún caso las anomalías tienen intensidades superiores a 1 U.G.

Línea 2.- La anomalía teórica de la cavidad ubicada bajo esta línea es del orden de -0.15 U.G. , por lo cual esta cavidad no será detectable con los gravímetros en uso, asimismo, en la anomalía real se observa una fuerte influencia de una excavación de grandes dimensiones ubicada muy próxima a la línea.

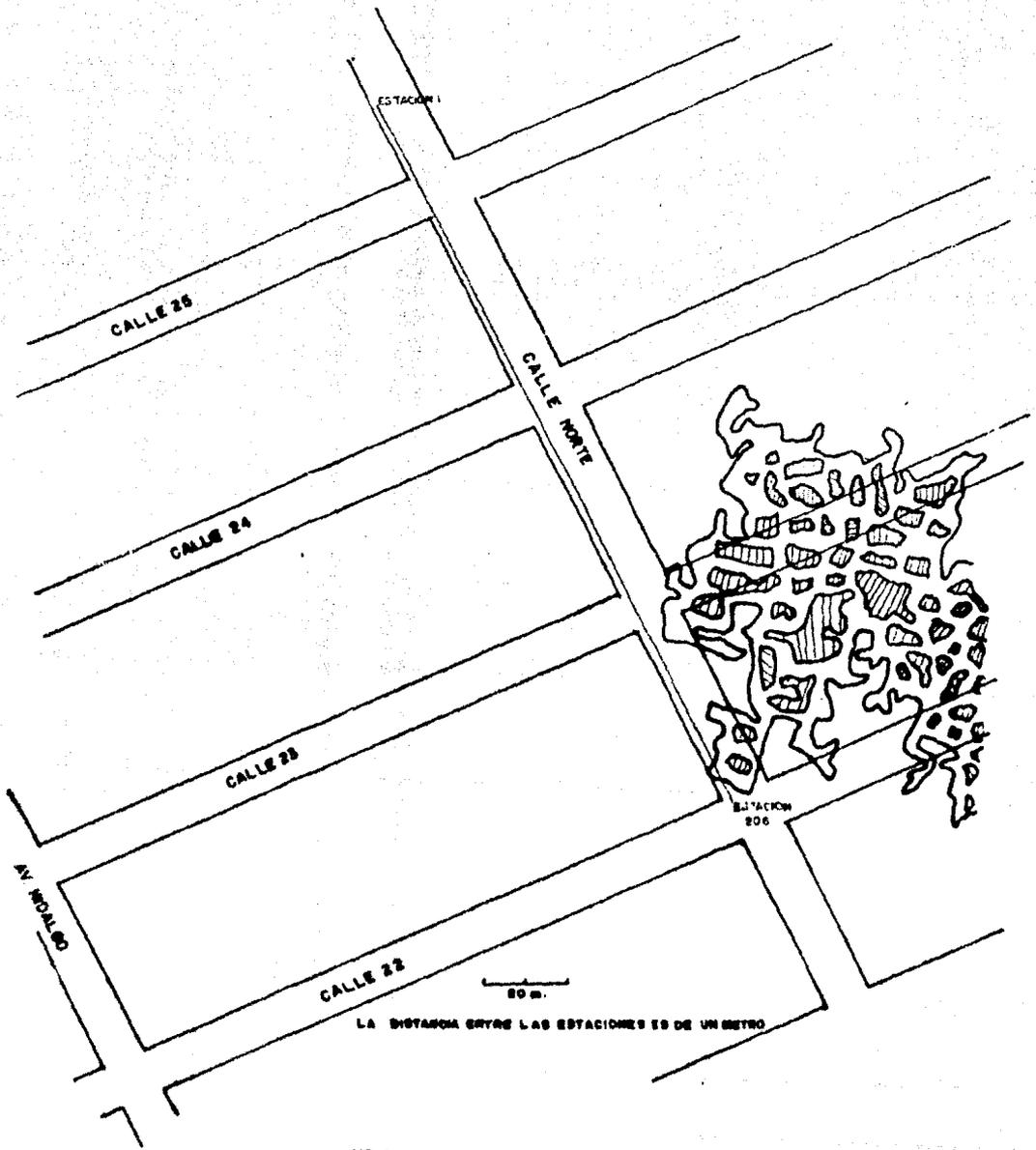
En estas dos líneas la corrección por rugosidad no tuvo el alcance suficiente, en virtud de que los levantamientos topográficos no fueron lo suficientemente detallados para precisar estos accidentes, lo cual dió origen a las variaciones señaladas.

Línea 3.- En la anomalía correspondiente a esta línea se aprecian tres mínimos, dos de los cuales corresponden a la influencia lateral de dos pequeños brazos de la cavidad, y el tercero, con una amplitud de 1 U.G., que se ubica directamente sobre la cavidad, corresponde aproximadamente a la magnitud de la anomalía teórica calculada para esta cavidad.

Línea 4.- La cavidad se manifiesta con una amplitud aproximada de 2 U.G., lo cual corresponde a la anomalía teórica calculada, y se aprecian dos mínimos correspondientes a los dos ramales de la cavidad que se cruzaron.

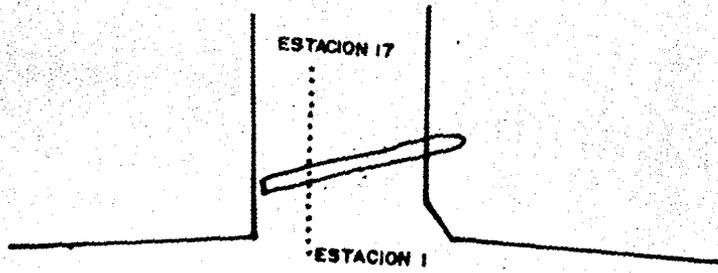
Es interesante observar que no obstante que la cavidad bajo la línea tres es más eómera que la de la línea cuatro, esta última se manifiesta con mayor amplitud, debido a que sus dimensiones son mayores, esto confirma lo señalado en el capítulo II

En el capítulo correspondiente a la interpretación se efectuará un análisis más detallado de las anomalías.



LA DISTANCIA ENTRE LAS ESTACIONES ES DE UN METRO

UBICACION LINEA I
FIG. 5.1



JOSE CEBALLOS

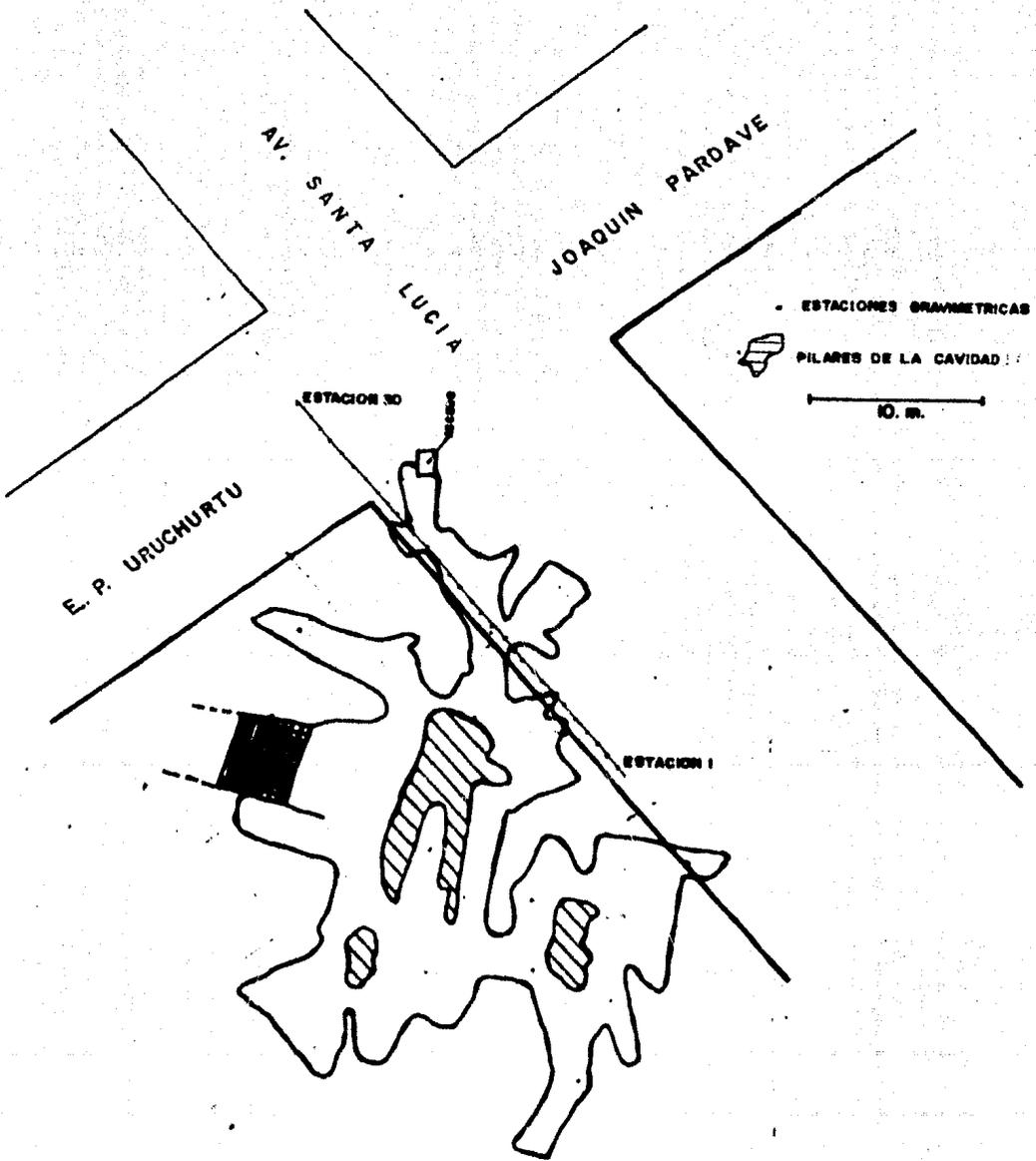
ESTACIONES GRAVIMETRICAS
ESCALA 1:500



GRAL. TORROELLA

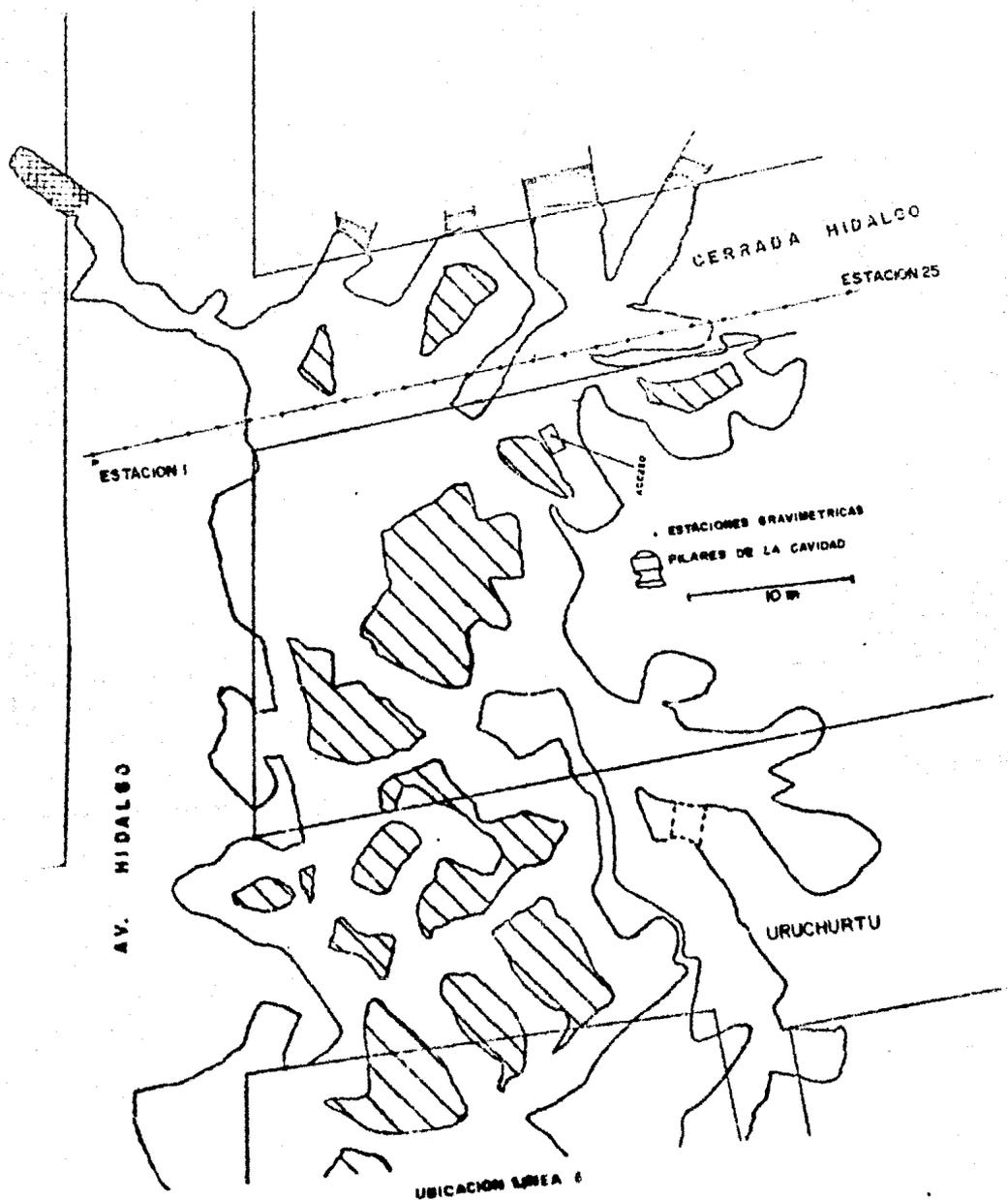
UBICACION LINEA 2

FIG. 5.2



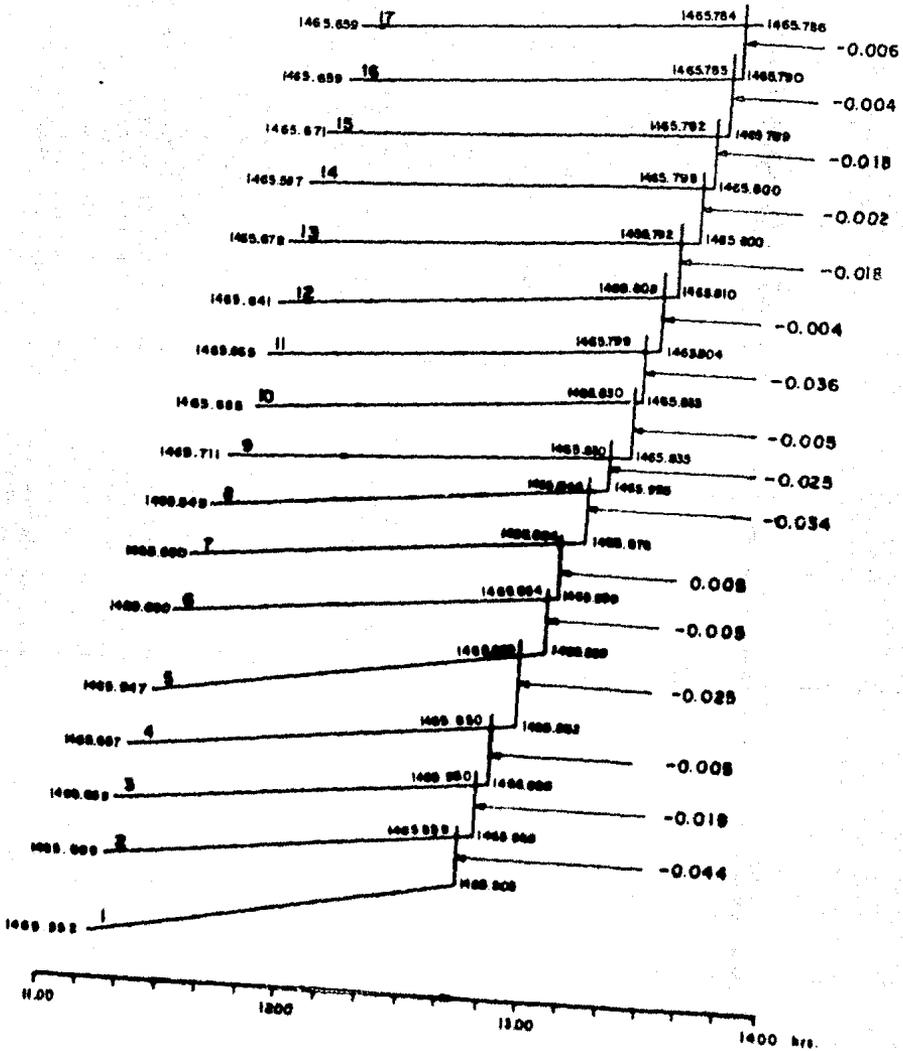
UBICACION LINEA 3

FIG. 5.3.



UBICACION LINEA 6

FIG. 8.4



LINEA 2 CORRECCION DE DERIVA

FIG. 5.5a

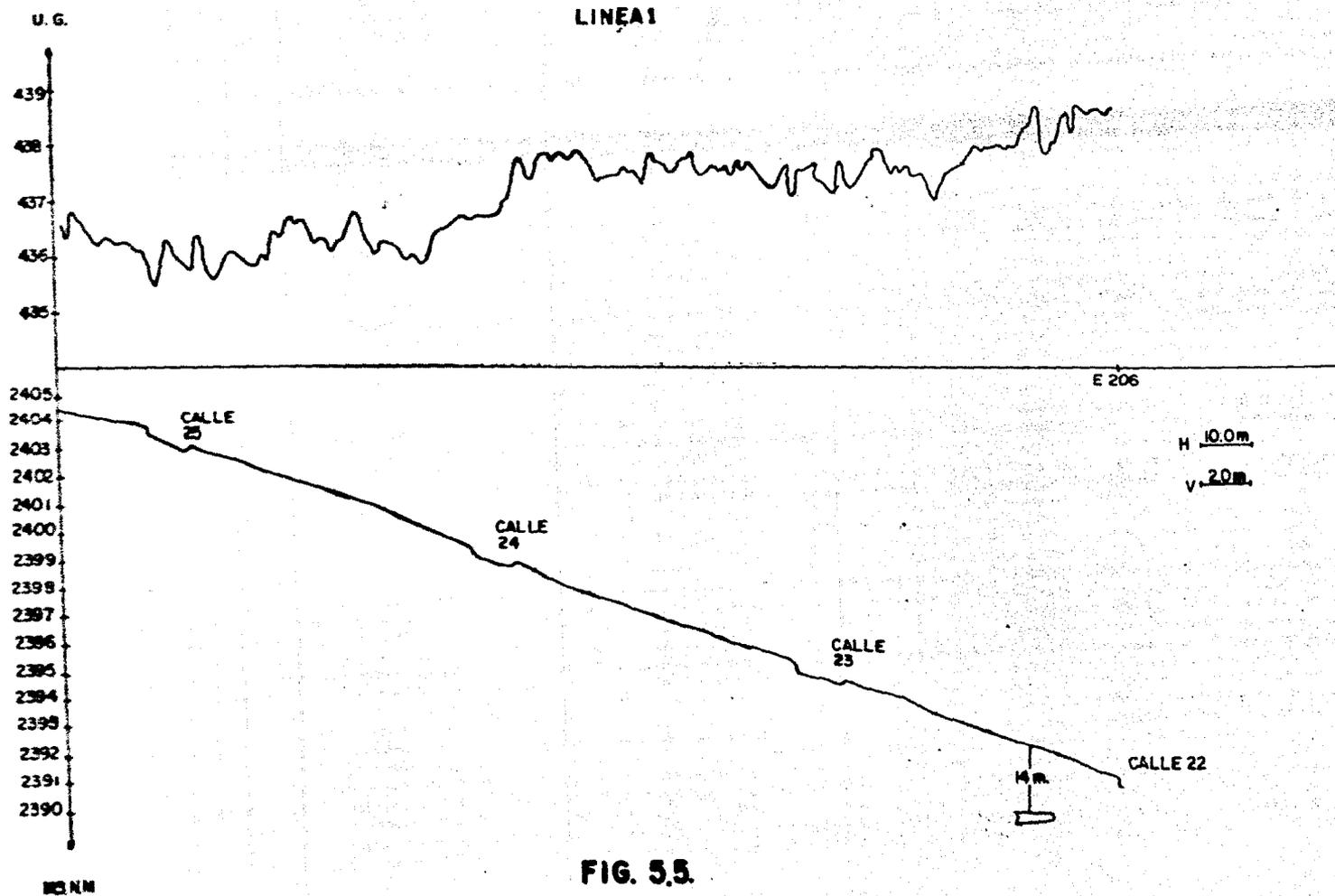


FIG. 5.5.

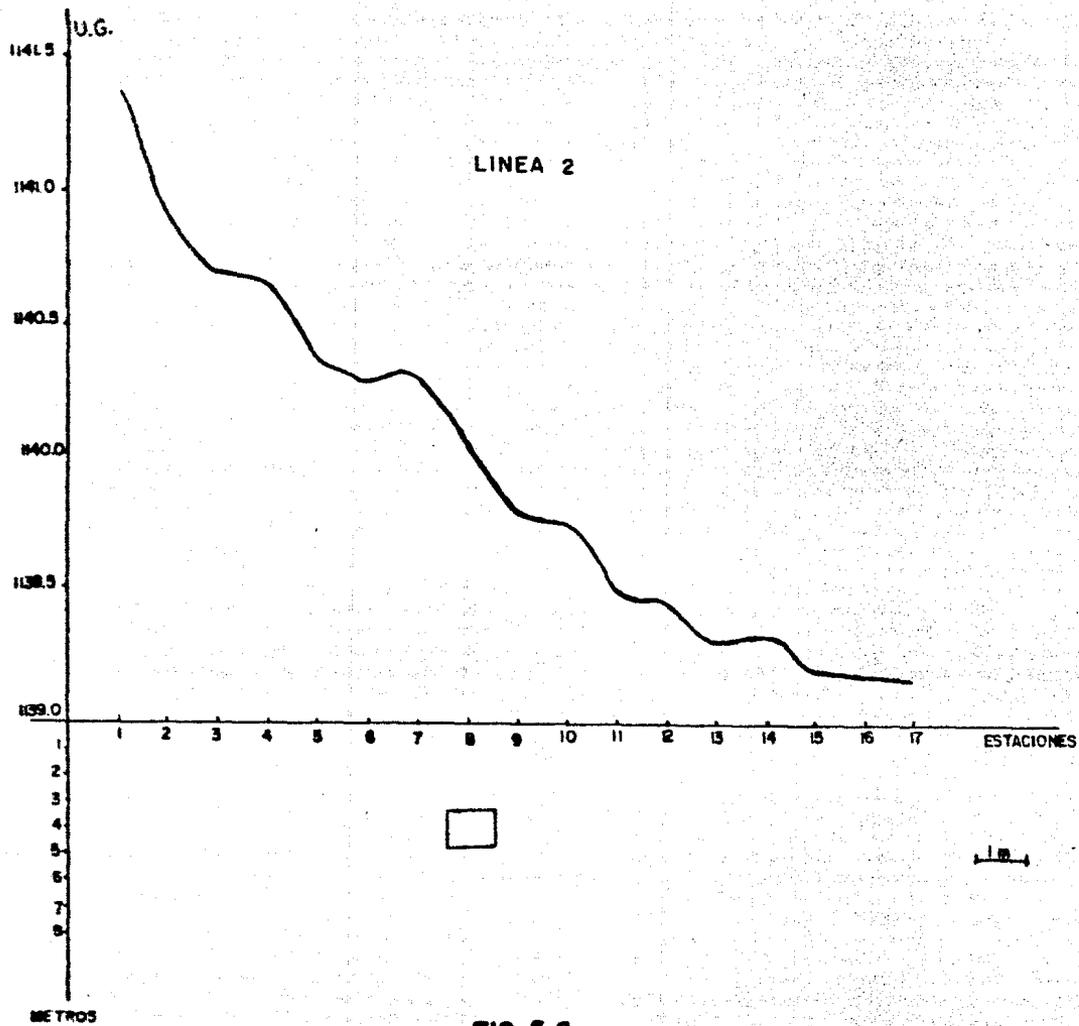


FIG. 5.6.

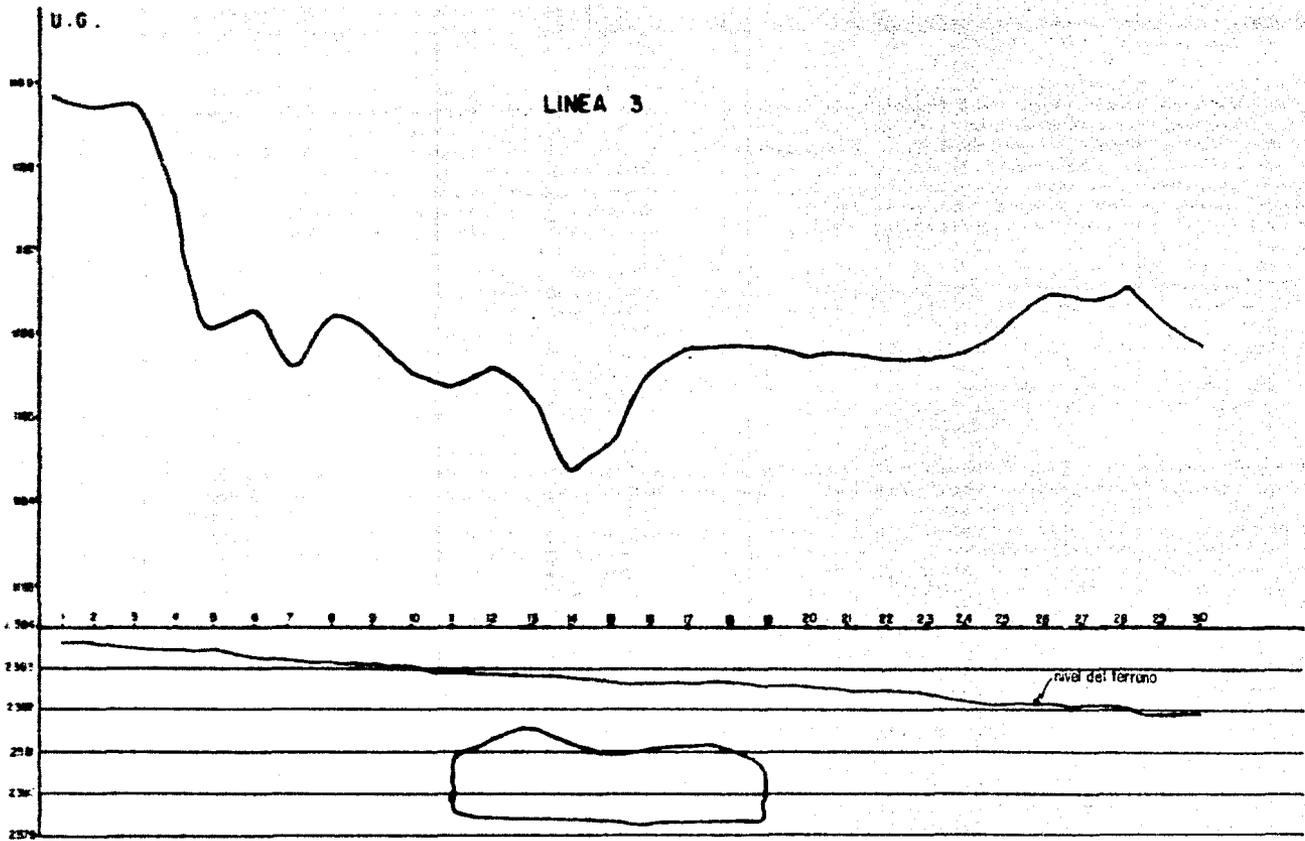


FIG. 5.7.

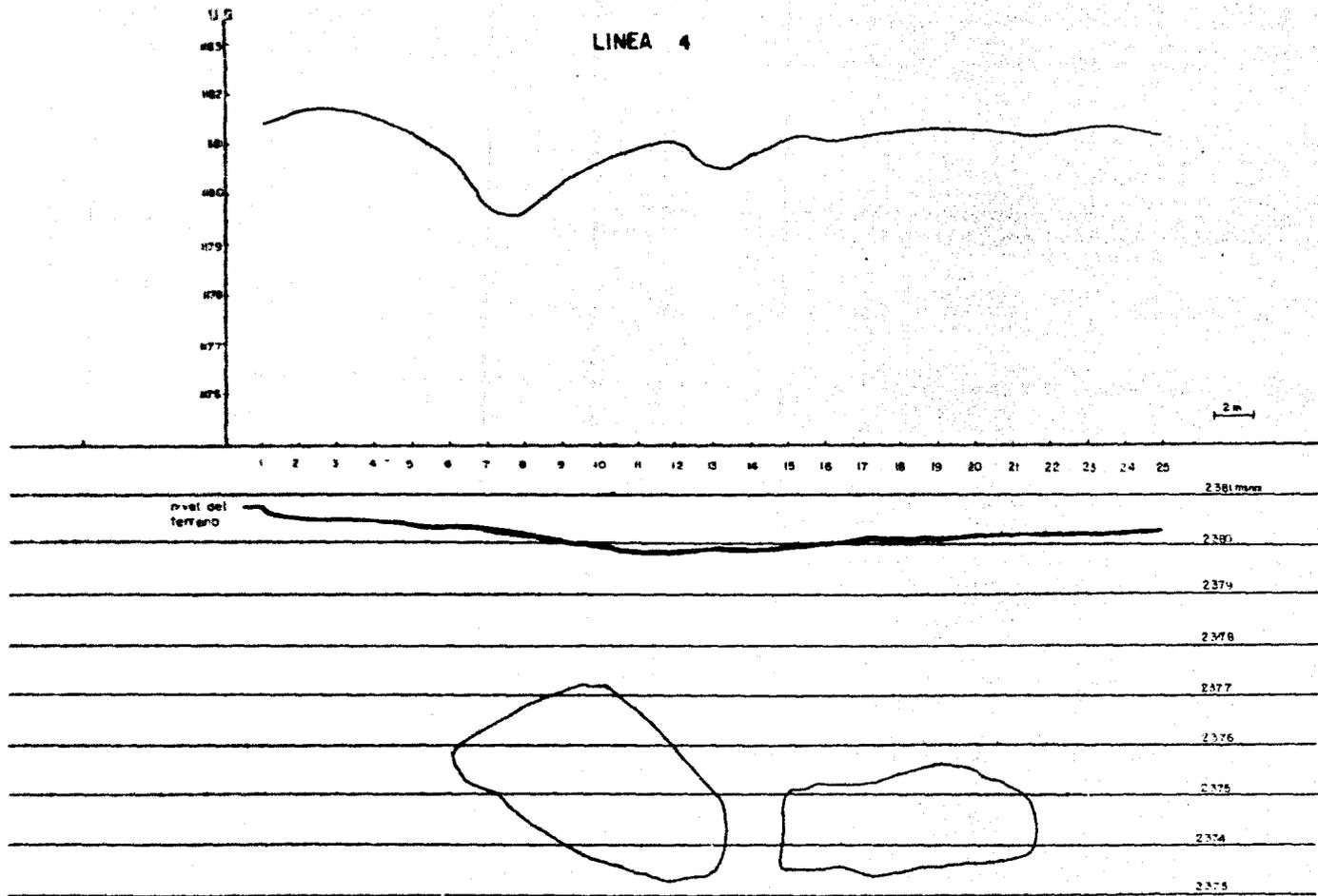
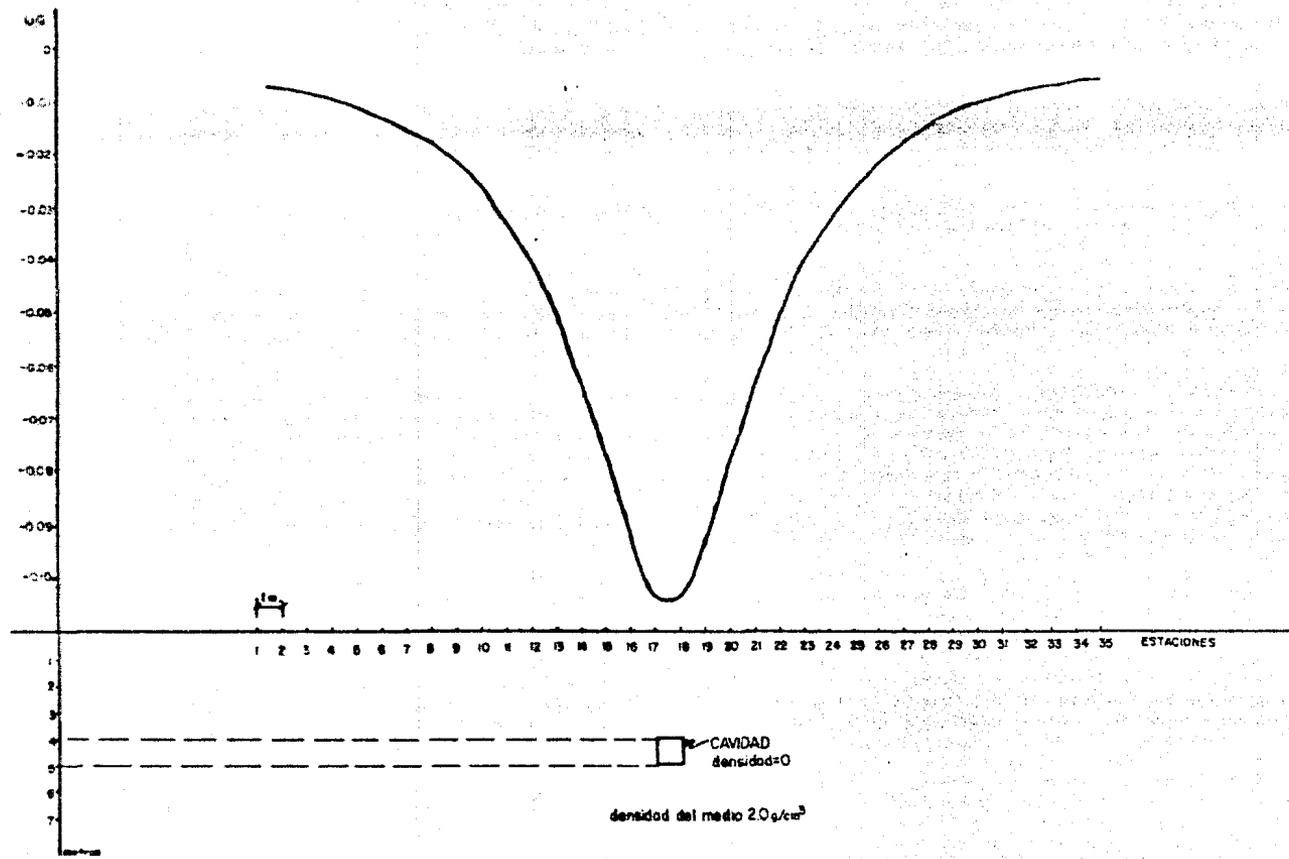
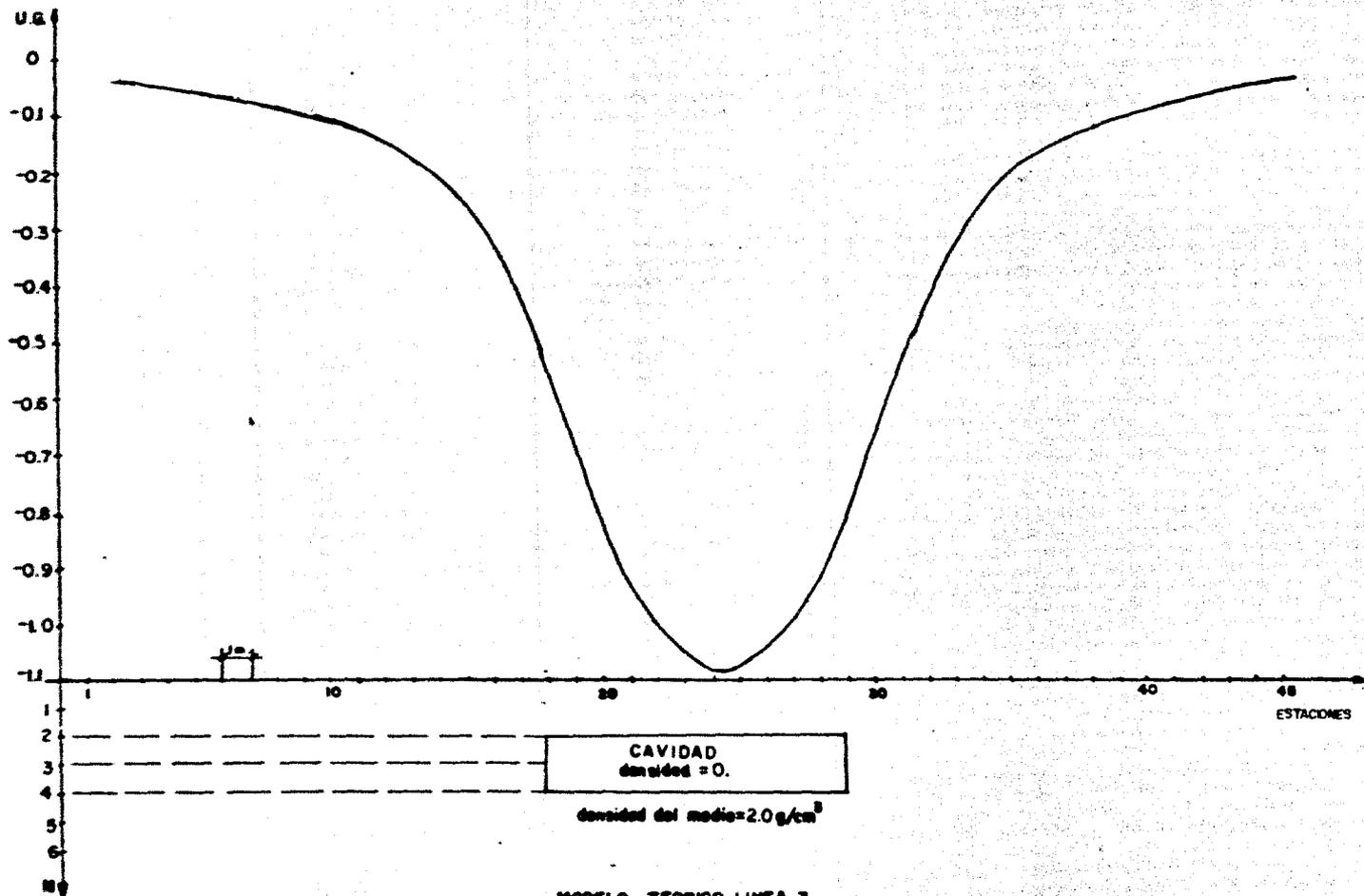


FIG. 5.8.



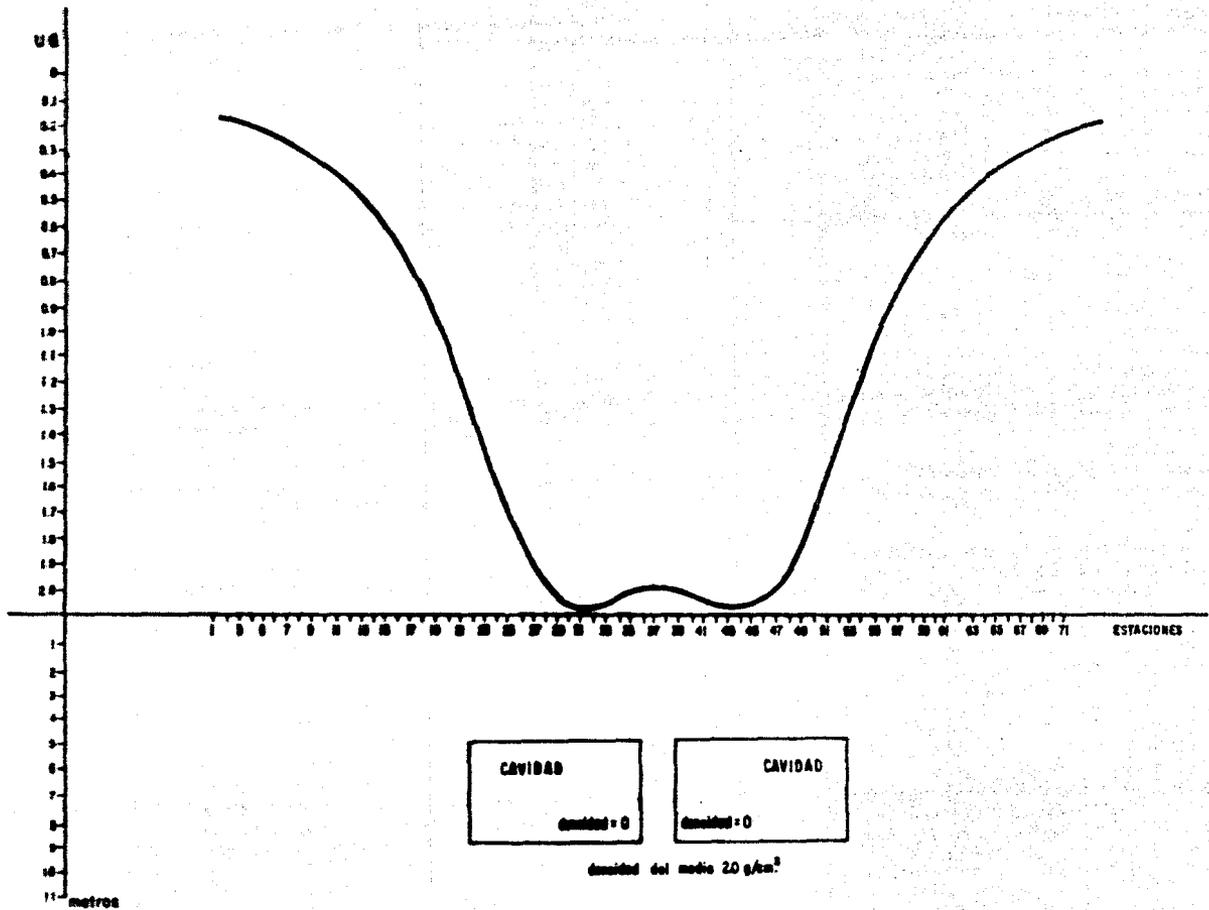
MODELO TEORICO LINEA 2

FIG. 5.9.



MODELO TEORICO LINEA 3

FIG 5.10



MODELO TEORICO LINEA 4

FIG. 5.11

LINEA	E	U.G.	E	U.G.											
1	436.58	37	435.88	73	436.14	109	437.49	145	437.50	181	438.03	9	1139.80	26	1185.51
2	436.57	38	435.86	74	436.44	110	437.69	146	437.67	182	438.06	10	1139.77	27	1186.46
3	436.27	39	435.74	75	436.48	111	437.46	147	437.75	183	438.05	11	1139.48	28	1186.59
4	436.83	40	436.01	76	436.46	112	437.62	148	437.40	184	437.98	12	1139.46	29	1186.18
5	436.63	41	435.93	77	436.60	113	437.48	149	437.38	185	438.03	13	1139.30	30	1185.93
6	436.54	42	436.48	78	436.67	114	437.26	150	437.18	186	437.97	14	1139.33		
7	436.39	43	436.37	79	436.72	115	437.87	151	437.04	187	438.26	15	1139.19		
8	436.30	44	436.34	80	436.70	116	437.73	152	437.73	188	438.34	16	1139.17		
9	436.18	45	436.66	81	436.70	117	437.65	153	437.37	189	438.37	17	1139.16		
10	436.32	46	436.77	82	436.77	118	437.67	154	437.17	190	438.83				
11	436.39	47	436.58	83	436.78	119	437.52	155	437.24	191	438.25				
12	436.24	48	436.67	84	436.73	120	437.64	156	437.40	192	437.93				
13	436.19	49	436.58	85	436.70	121	437.81	157	437.74	193	438.10	1	1188.83		
14	436.24	50	436.32	86	436.73	122	437.73	158	437.79	194	438.08	2	1188.74		
15	436.22	51	436.21	87	437.03	123	437.91	159	438.00	195	438.40	3	1188.77		
16	436.10	52	436.33	88	437.02	124	437.63	160	437.99	196	438.80	4	1187.67		
17	436.09	53	436.29	89	437.48	125	437.50	161	437.86	197	438.67	5	1186.06		
18	436.13	54	436.06	90	437.85	126	437.51	162	437.50	198	438.23	6	1186.27		
19	435.42	55	436.33	91	437.66	127	437.62	163	437.70	199	438.84	7	1185.61		
20	435.74	56	436.29	92	437.37	128	437.68	164	437.54	200	438.72	8	1186.22		
21	436.31	57	436.74	93	437.72	129	437.59	165	437.63	201	438.62	9	1185.96		
22	436.20	58	436.82	94	437.83	130	437.67	166	437.46	202	438.70	10	1185.53		
23	436.00	59	436.75	95	437.94	131	437.46	167	437.52	203	438.68	11	1185.40		
24	435.84	60	436.40	96	437.77	132	437.71	168	437.58	204	438.55	12	1185.61		
25	435.74	61	436.29	97	437.87	133	437.51	169	437.46	205	438.55	13	1185.25		
26	435.69	62	436.04	98	437.86	134	437.75	170	437.09	206	438.69	14	1184.42		
27	436.43	63	436.23	99	437.72	135	437.69	171	437.21		438.82	15	1184.74		
28	436.20	64	436.23	100	437.88	136	437.51	172	437.47			16	1184.74		
29	436.17	65	436.22	101	437.99	137	437.41	173	437.59			17	1185.71		
30	435.65	66	436.19	102	437.79	138	437.27	174	437.54			18	1185.91		
31	435.55	67	436.12	103	437.75	139	437.24	175	437.70			19	1185.96		
32	435.62	68	435.94	104	437.66	140	437.31	176	437.67			20	1185.85		
33	435.75	69	436.01	105	437.32	141	437.56	177	437.86			21	1185.92		
34	436.16	70	435.92	106	437.42	142	437.71	178	438.00			22	1185.84		
35	436.09	71	435.86	107	437.42	143	437.05	179	437.90			23	1185.83		
36	436.03	72	435.90	108	437.53	144	437.57	180	438.04			24	1185.93		
												25	1186.10		

VALORES DE LAS ANOMALIAS

T A B L A 5. 1.

LINEA 2		LINEA 3				LINEA 4			
E	U.G.	E	U.G.	E	U.G.	E	U.G.	E	U.G.
1	-0.007	1	-0.042	37	-0.122	1	-0.184	37	-1.990
2	-0.007	2	-0.046	38	-0.105	2	-0.196	38	-1.990
3	-0.008	3	-0.051	39	-0.091	3	-0.209	39	-2.004
4	-0.010	4	-0.056	40	-0.080	4	-0.224	40	-2.026
5	-0.011	5	-0.063	41	-0.071	5	-0.241	41	-2.050
6	-0.013	6	-0.071	42	-0.063	6	-0.259	42	-2.070
7	-0.015	7	-0.080	43	-0.056	7	-0.280	43	-2.081
8	-0.018	8	-0.091	44	-0.051	8	-0.304	44	-2.080
9	-0.021	9	-0.105	45	-0.046	9	-0.330	45	-2.066
10	-0.026	10	-0.122	46	-0.042	10	-0.360	46	-2.036
11	-0.032	11	-0.144			11	-0.395	47	-1.990
12	-0.039	12	-0.172			12	-0.435	48	-1.927
13	-0.050	13	-0.209			13	-0.481	49	-1.847
14	-0.063	14	-0.258			14	-0.534	50	-1.748
15	-0.078	15	-0.325			15	-0.596	51	-1.632
16	-0.093	16	-0.416			16	-0.669	52	-1.502
17	-0.103	17	-0.535			17	-0.753	53	-1.363
18	-0.103	18	-0.674			18	-0.850	54	-1.222
19	-0.093	19	-0.811			19	-0.962	55	-1.086
20	-0.078	20	-0.923			20	-1.086	56	-0.962
21	-0.063	21	-1.001			21	-1.222	57	-0.850
22	-0.050	22	-1.050			22	-1.363	58	-0.753
23	-0.039	23	-1.073			23	-1.502	59	-0.669
24	-0.032	24	-1.073			24	-1.632	60	-0.596
25	-0.026	25	-1.050			25	-1.748	61	-0.534
26	-0.021	26	-1.001			26	-1.847	62	-0.481
27	-0.018	27	-0.923			27	-1.927	63	-0.435
28	-0.015	28	-0.811			28	-1.990	64	-0.395
29	-0.013	29	-0.674			29	-2.036	65	-0.360
30	-0.011	30	-0.535			30	-2.066	66	-0.330
31	-0.010	31	-0.416			31	-2.080	67	-0.304
32	-0.008	32	-0.325			32	-2.081	68	-0.280
33	-0.007	33	-0.258			33	-2.070	69	-0.259
34	-0.007	34	-0.209			34	-2.050	70	-0.241
		35	-0.172			35	-2.026		
		36	-0.144			36	-2.004		

VALORES TEORICOS DE LAS ANOMALIAS

T A B L A 5. 2.

PROCESO DE DATOS.

El proceso de los datos consistió en la convolución de los datos teóricos y de campo, con operadores calculados por medio de los procedimientos señalados en el capítulo IV, éstos operadores fueron los siguientes:

DERIVADA HORIZONTAL.

Operador de 3 puntos (D.H.3)

$(0.5/\Delta x, 0.0, -0.5/\Delta x)$

Operador de 5 puntos (D.H.5)

$(-0.08333/\Delta x, 0.66666/\Delta x, 0.0, -0.6666/\Delta x, 0.8333/\Delta x)$

Operador de 7 puntos (D.H.7)

$(0.01667/\Delta x, -0.150/\Delta x, 0.750/\Delta x, 0.0, -0.750/\Delta x, 0.150/\Delta x,$
 $-0.01667/\Delta x)$

DERIVADA VERTICAL:

Operador de 5 puntos (D.V.5)

$(0.0, -0.78540/\Delta x, 1.57080/\Delta x, -0.78540/\Delta x, 0.0)$

Operador de 11 puntos (D.V.11)

$(-0.03142/\Delta x, 0.0, -0.0960/\Delta x, 0.0, -0.65798/\Delta x, 1.57080/\Delta x$
 $-0.65798/\Delta x, 0.0, -0.0960/\Delta x, 0.0, -0.03142/\Delta x)$

Operador de 5 puntos a $1/2$ de la frecuencia de Nyquist (D.V.5. $f_n/2$)

$(-0.39270/\Delta x, 0.0, 0.78540/\Delta x, 0.0, -0.39270/\Delta x)$

La convolución de los datos con los operadores se realizó en computadora empleando el siguiente programa:

I 5 6 7

C PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA CONVOLUCION DE DOS SENALES ES UNA
 C DIMENSION DONDE:
 C A= SEÑAL QUE SE CONVOLUCIONA
 C B= OPERADOR
 C NA= NUMERO DE MUESTRAS DE LA SEÑAL A
 C NB= NUMERO DE MUESTRAS DEL OPERADOR B

VARIABLE	FORMATO	TARJETA	COLUMNA
NA	I3	1	1-3
NB	I3	1	4-6
A	F8.3	2 Y SIGS	1-8 Y SIGS
B	F8.5	3 Y SIGS	1-8 Y SIGS

DIMENSION A (300), B (300), C (600)
 READ (5,1) NA, NB
 1 FORMAT (2I 3)
 READ (5,2) (A (I), I = 1, NA)
 2 FORMAT (10 F8.3)
 READ (5,3) (B (I), I = 1, NB)
 3 FORMAT (10 F8.5)
 NC= NA + NB -1
 CALL CONV (NA, A, NB, B, NC, C)
 WRITE (6,4)
 CALL PRINTM (A, NA, 1, NA)
 WRITE (6,6)
 CALL PRINTM (C, NC, 1, NC)
 4 FORMAT (1 H 1, 58X, "SEÑAL DE ENTRADA", //)
 5 FORMAT (1 H 1, 62X, "OPERADOR", //)
 6 FORMAT (1 H 1, 52X, "RESULTADO DE LA CONVOLUCION", //)
 CALL EXIT
 END

SUBROUTINE CONV (LA, A, LB, B, LC, C)
 DIMENSION A(LA), B(LB), C(LC)
 DO 2 I = 1, LC
 2 C (I) = 0.0
 DO 1 I = 1, LA
 DO 1 J = 1, LB
 K = I + J - 1
 1 C(K) = C(K) + A(I) * B(J)
 RETURN
 END

SUBROUTINE PRINTM (A, N, M, NI, MI)
 DIMENSION A(N1, M1)
 DO 100 IB = 1, M, 10
 IE = IB + 9
 IF (IE - M) 2, 2, 1
 1 IE = M
 2 WRITE (6, 20) (I, I = IB, IE)
 DO 101 J = 1, M
 101 WRITE (6, 21) J, (A (J, K), K = IB, IE)
 100 CONTINUE
 20 FORMAT (1 H 0, 1X, 10I12)
 21 FORMAT (1 H 0, 15, 10F 12.4)
 RETURN
 END.

Las operaciones de convolución realizadas fueron las siguientes:

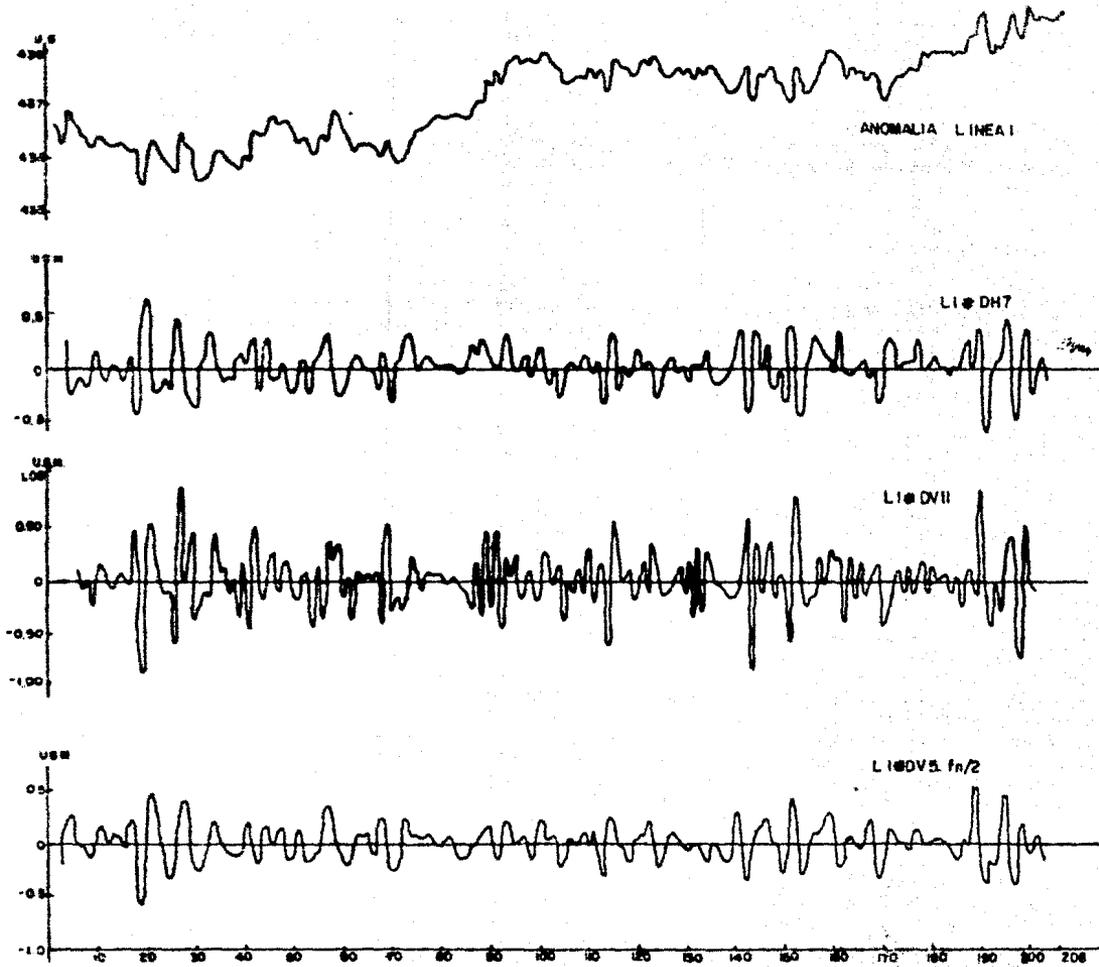
LINEA 1	*	<p>OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE SIETE PUNTOS (D. H. 7)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE ONCE PUNTOS (D. V. 11)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE CINCO PUNTOS (D. V. 5 fn/2)</p>
LINEA 2	*	<p>OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE TRES PUNTOS (D. H. 3)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE CINCO PUNTOS (D. V. 5)</p>
LINEA 3	*	<p>OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE CINCO PUNTOS (D. H. 5)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE CINCO PUNTOS (D. H. 5)</p>
LINEA 4	*	<p>OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE CINCO PUNTOS (D. H. 5)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE CINCO PUNTOS (D. V. 5)</p>
ANOMALIA TEORICA LINEA 2	*	<p>OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE TRES PUNTOS (D. H. 3)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE CINCO PUNTOS (D. V. 5)</p>
ANOMALIA TEORICA LINEA 3	*	<p>OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE CINCO PUNTOS (D. H. 5)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE CINCO PUNTOS (D. V. 5)</p>
ANOMALIA TEORICA LINEA 4	*	<p>OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE CINCO PUNTOS (D. H. 5)</p> <p>OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL DE CINCO PUNTOS (D. V. 5)</p>

Los resultados de estas operaciones se presentan en las figuras 6.1 a 6.7. Asimismo los espectros en el dominio del número de onda de los operadores empleados se presentan en las figuras 6.8 a 6.13.

Cabe recordar que siendo en la línea 4 el espaciamiento Δx de las estaciones de dos metros, los pesos de los operadores son distintos a los de las otras líneas.

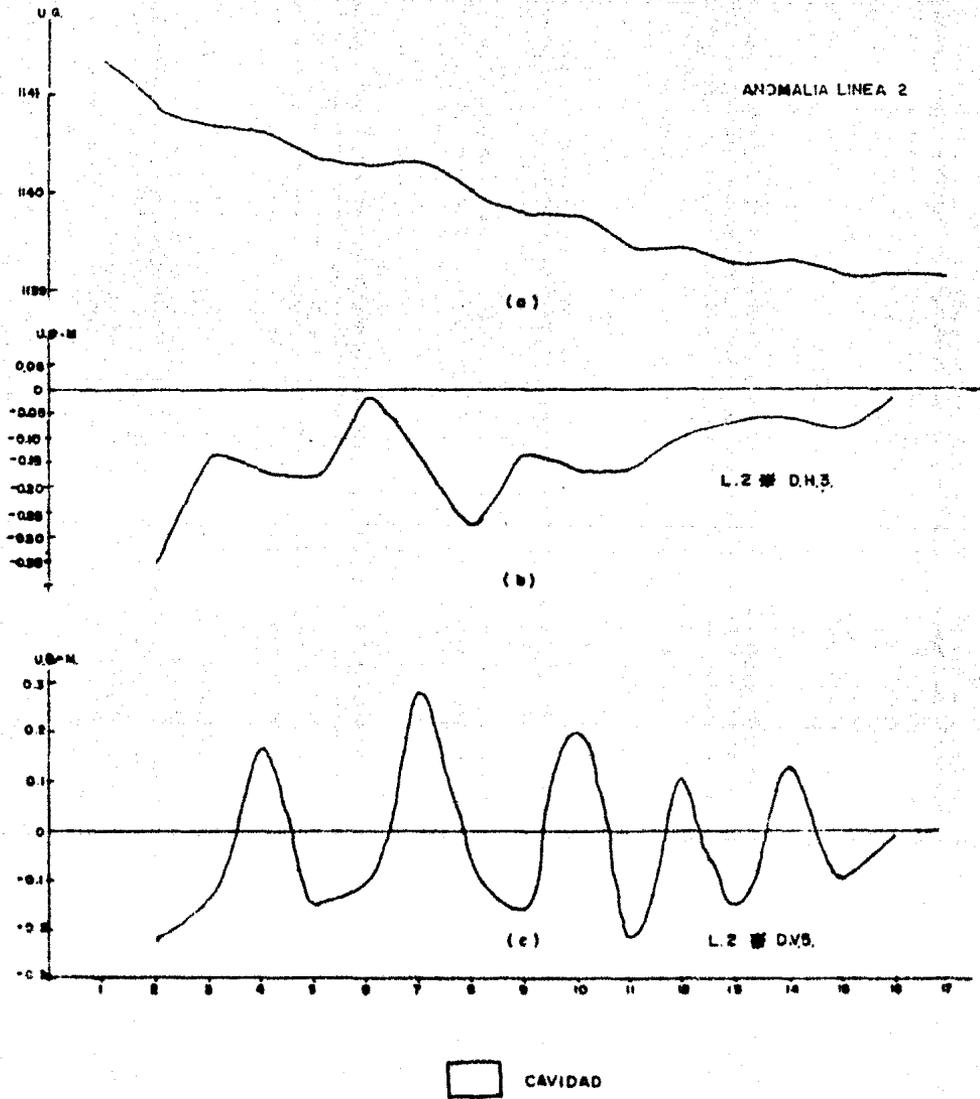
Durante el proceso de los datos con los operadores de derivada vertical, el que existieran valores negativos y positivos en el resultado de la convolución, hacía suponer que los operadores no funcionaban adecuadamente. Al revisar los espectros en el dominio de la frecuencia, se pudo constatar que debido a que los espectros reales de los operadores son solo aproximados a los espectros teóricos de derivada vertical, y al mismo tiempo constituyen una aproximación dentro del rango de bajas frecuencias a los espectros de los operadores de segunda derivada horizontal, en realidad estos operadores funcionan como operadores que se aproximan a ambas derivadas, cuando se aplican en un rango de bajas frecuencias.

Esto puede apreciarse claramente en la gráfica presentada en la figura 6.14. y resultó un punto conveniente para el análisis de las anomalías como se explica en el siguiente capítulo.



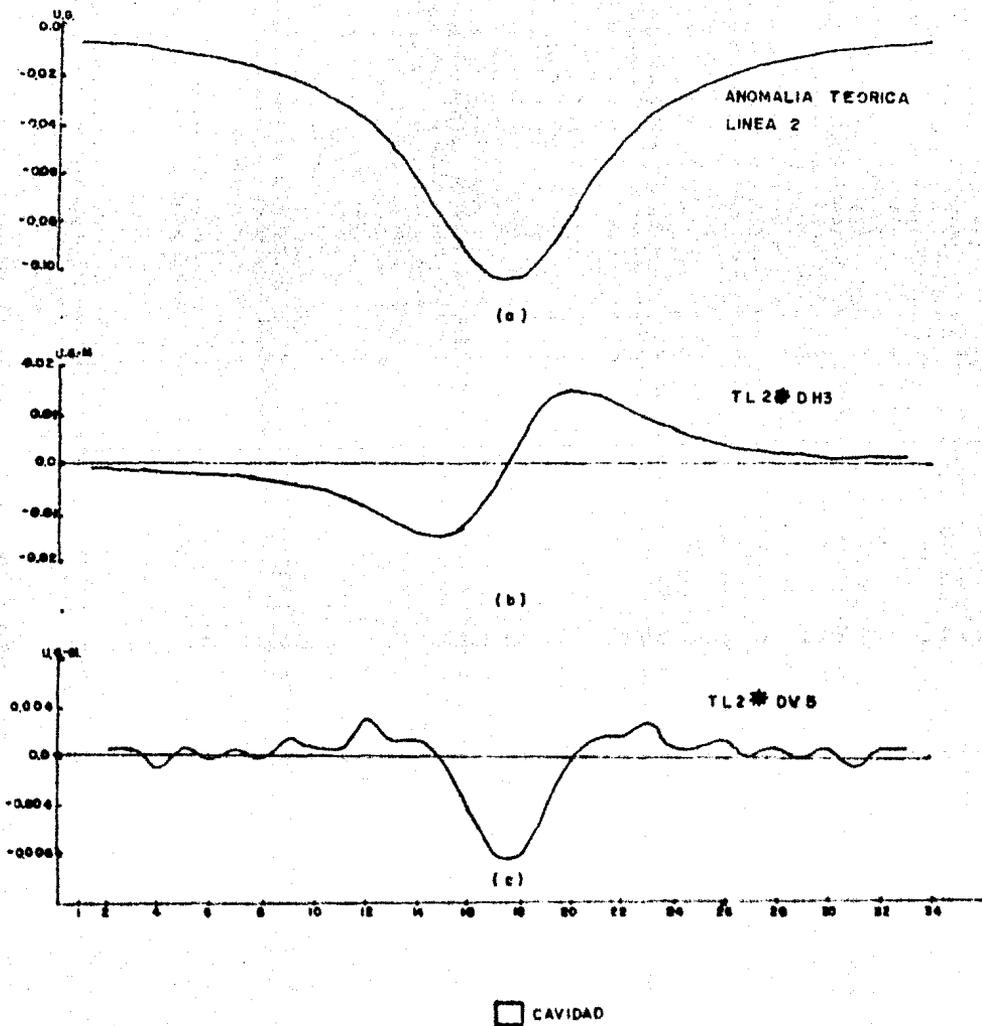
RESULTADOS LINEA I

FIG. 61.



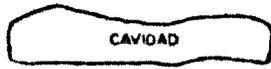
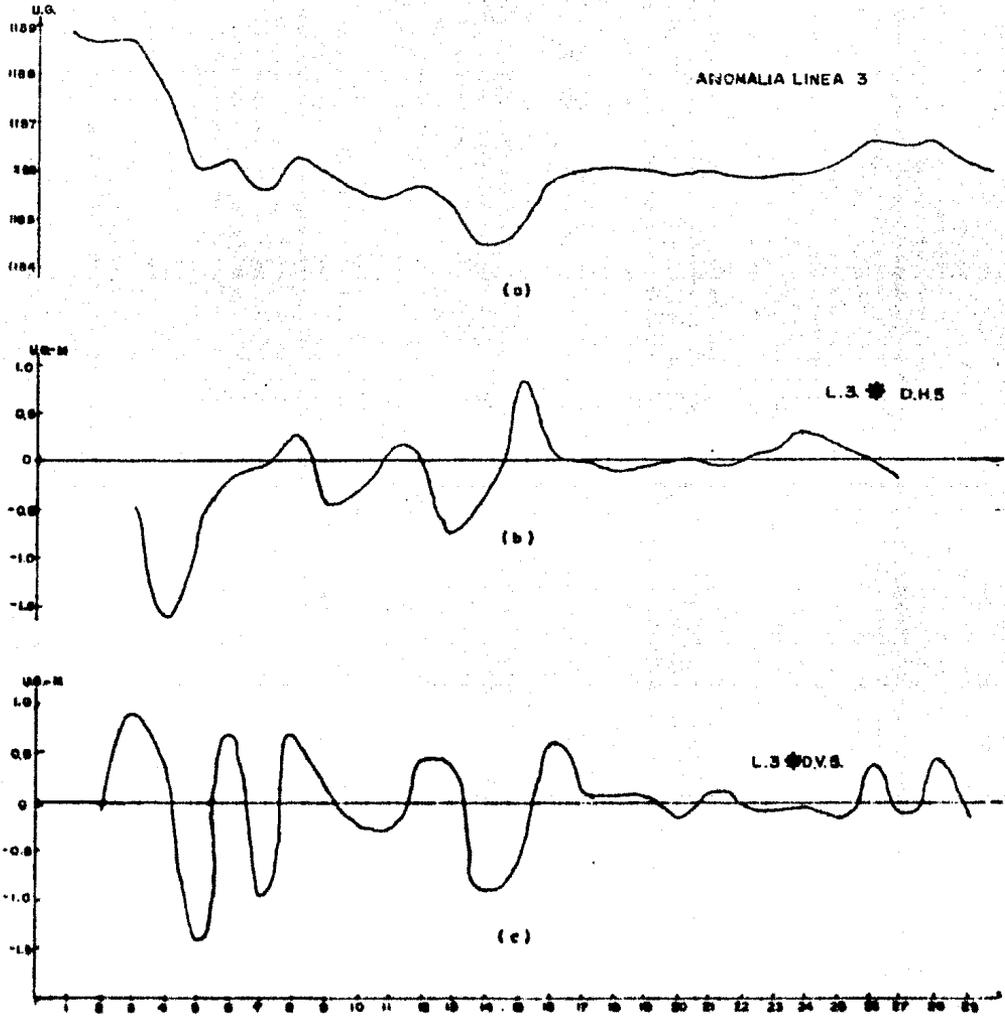
RESULTADOS LINEA 2

FIG. 6.2.



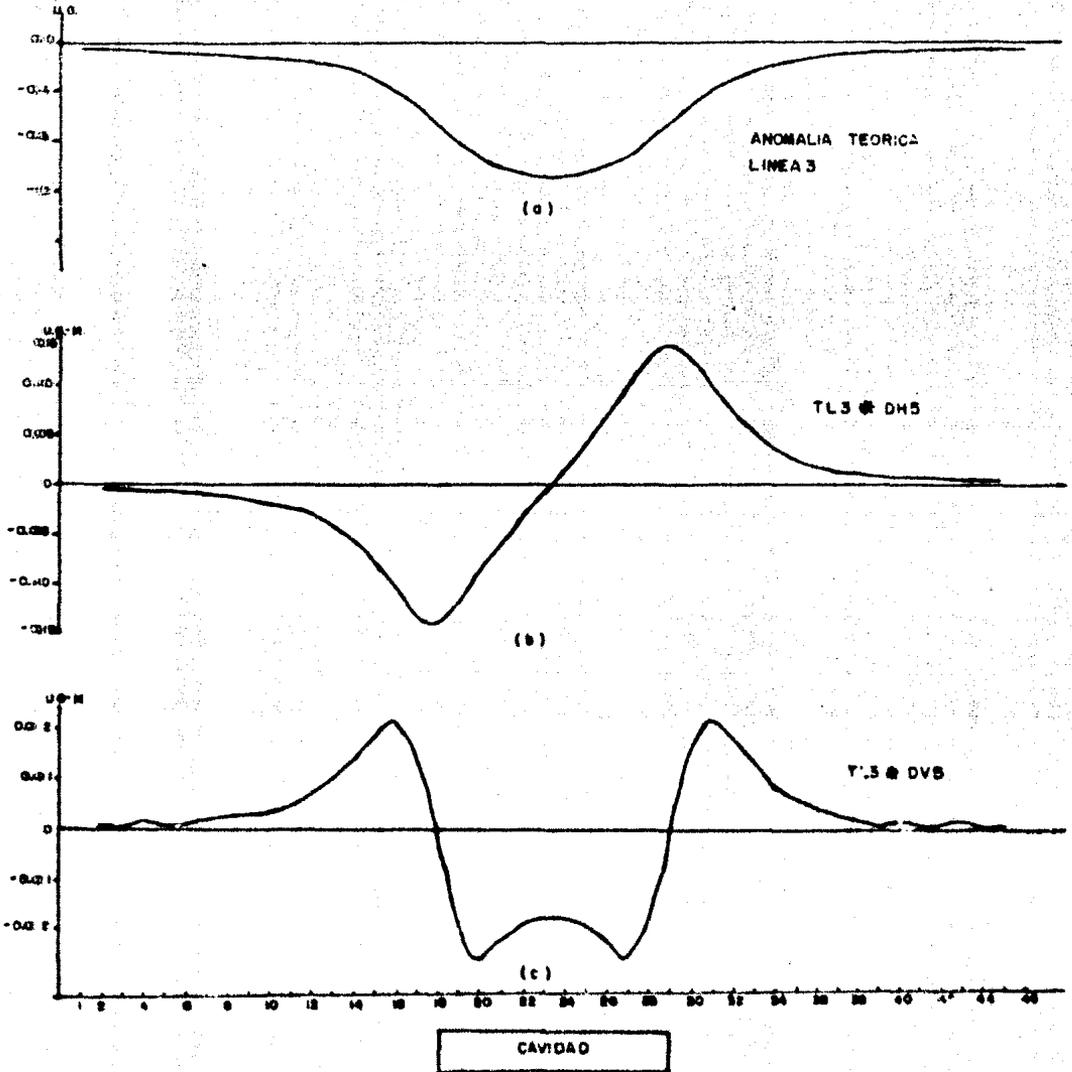
RESULTADOS TEORICOS LINEA 2

FIG. 6.3.



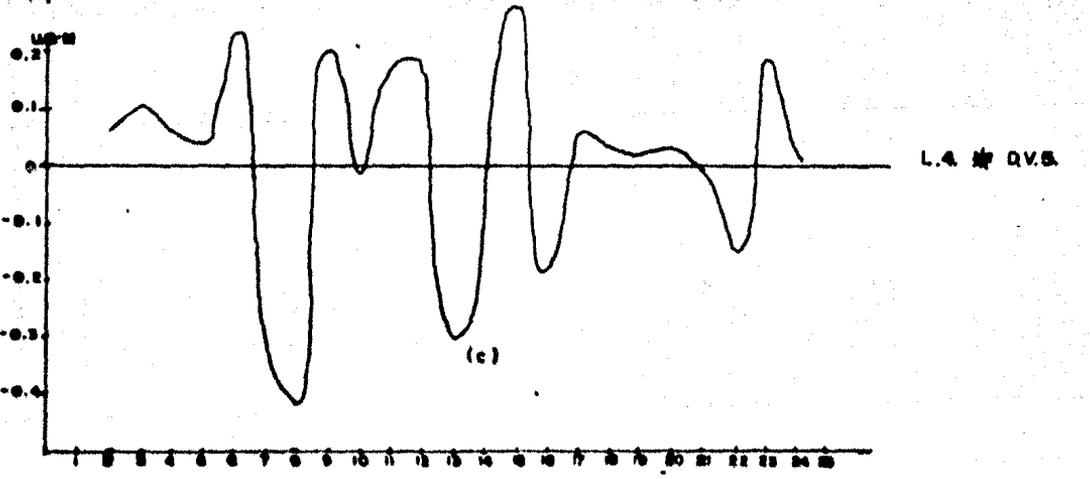
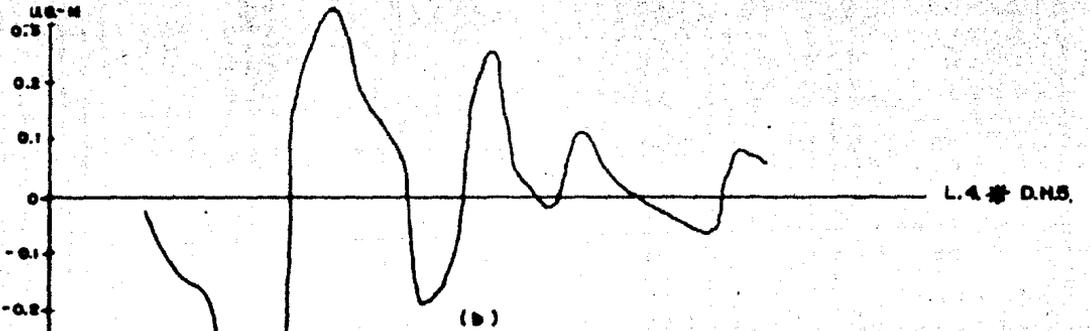
RESULTADOS LINEA 3

FIG. 6.4.

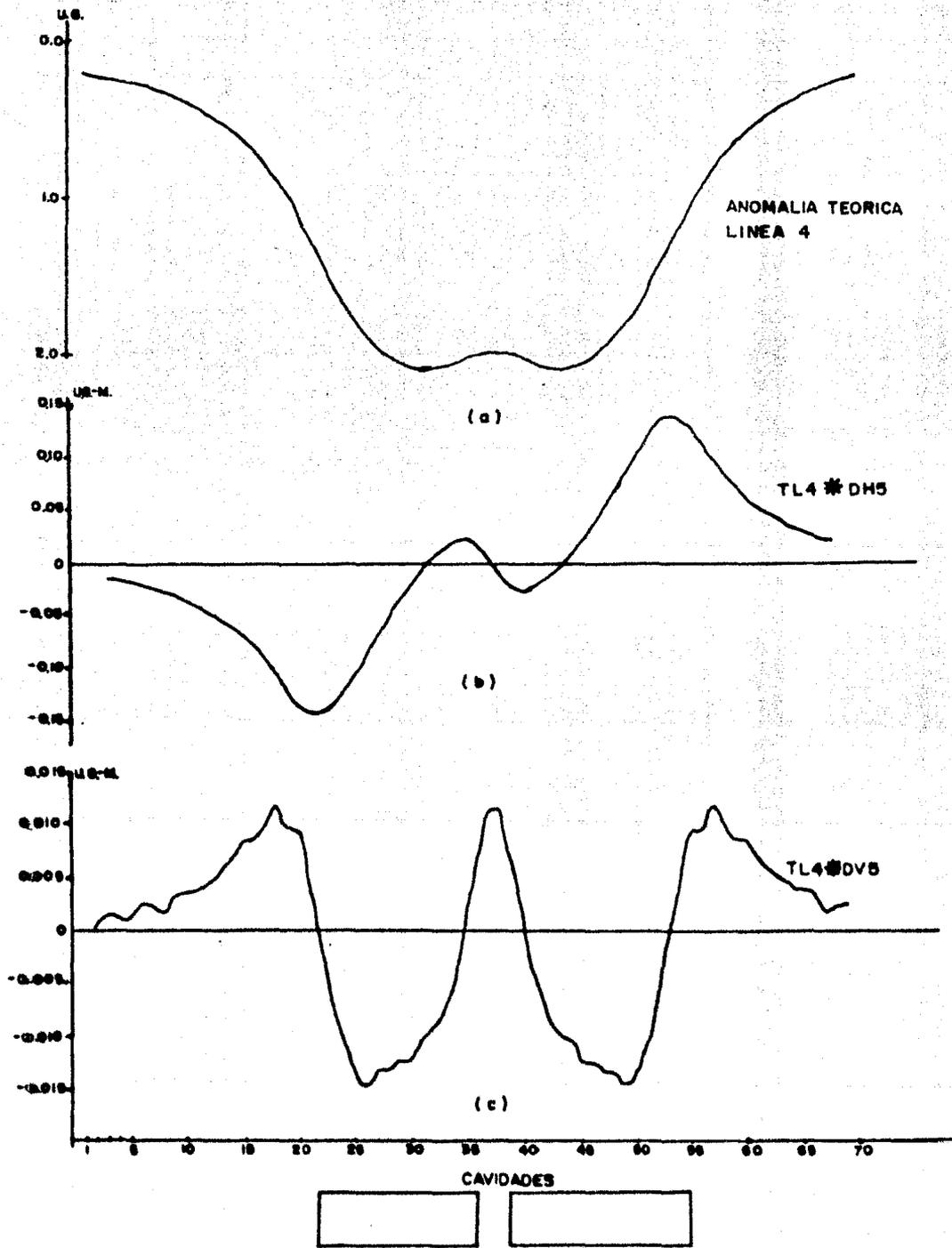


RESULTADOS TEORICOS LINEA 3

FIG. 6.5.

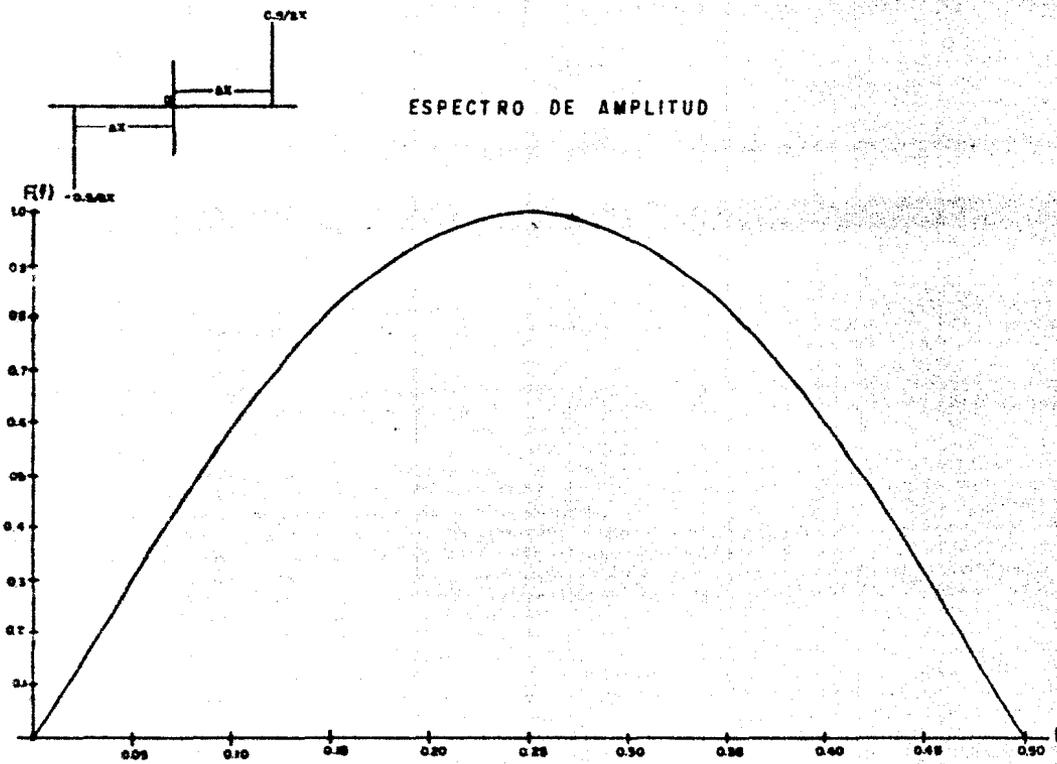


RESULTADOS LINEA 4
FIG. 66.



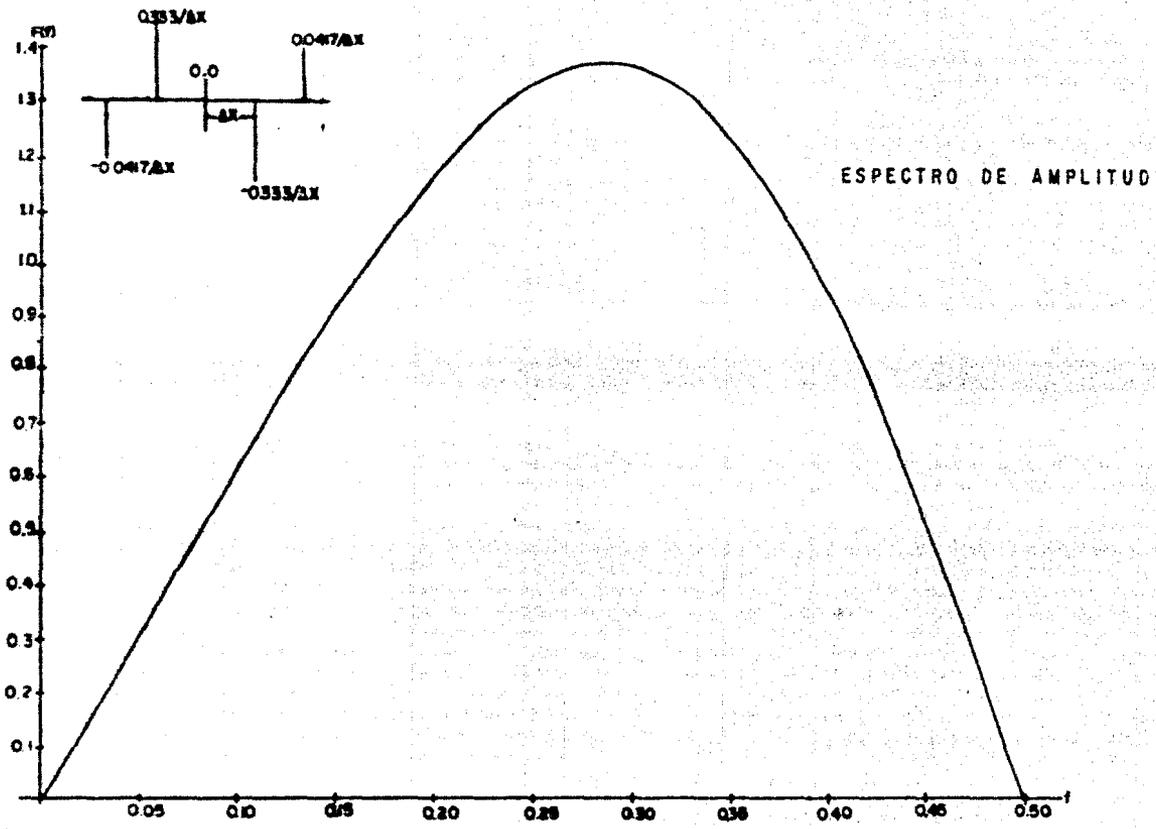
RESULTADOS TEORICOS LINEA 4

FIG. 6.7.



OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE 3 PUNTOS (D.H.3.)
 $\Delta X = 1m.$

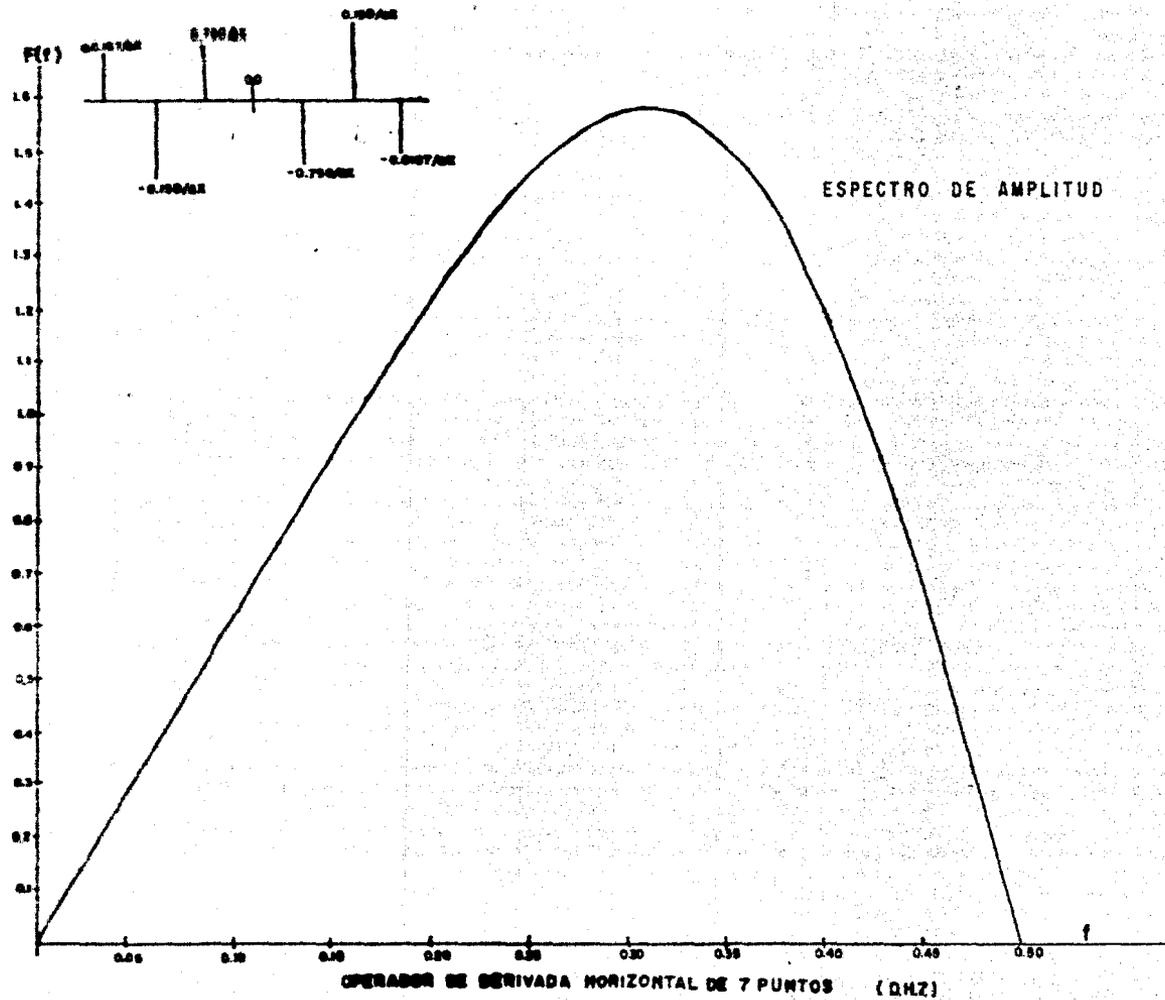
FIG. 6.8.



OPERADOR DE DERIVADA HORIZONTAL DE 5 PUNTOS (DH5)

$\Delta X = 1 \text{ m.}$

FIG. 69.



OPERADOR DE SERVIDA HORIZONTAL DE 7 PUNTOS (QHZ)

$\Delta x = 1m$

FIG. 6.10.

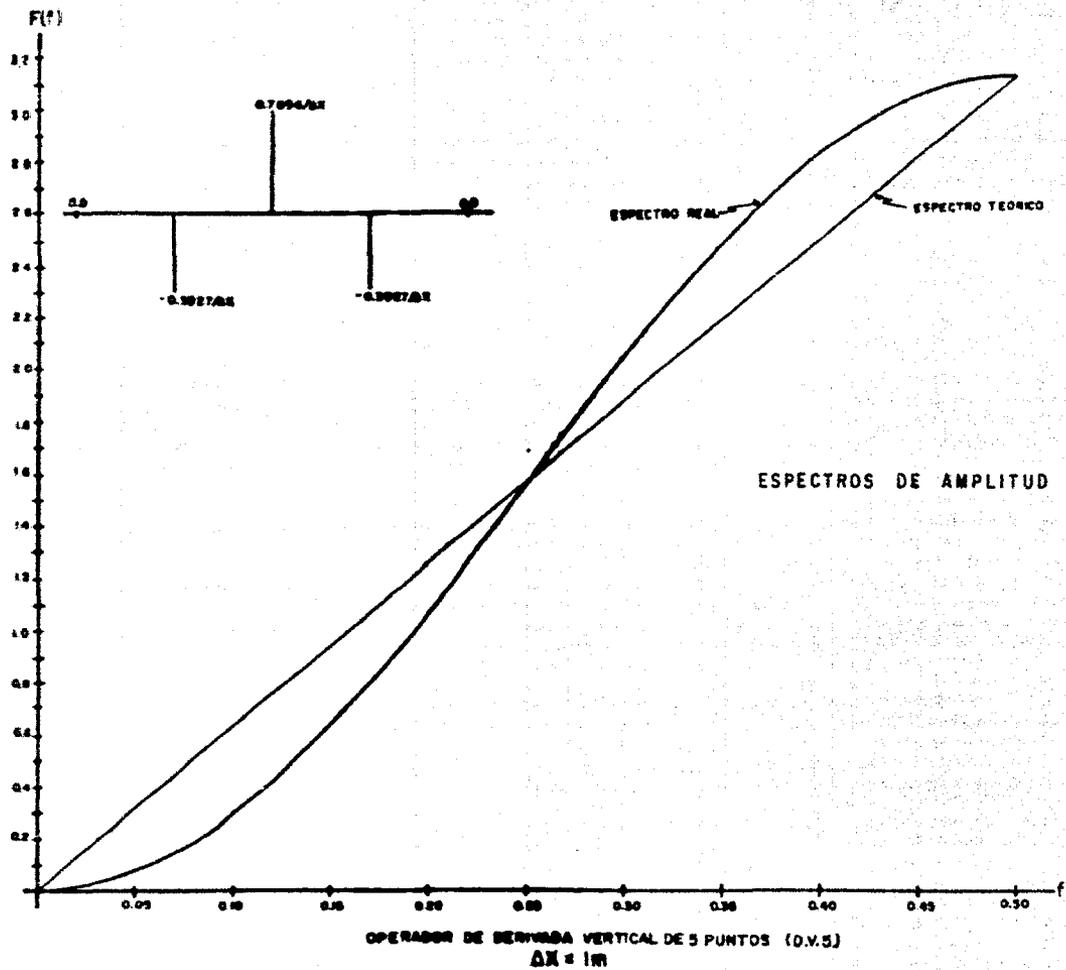


FIG. 6. II.

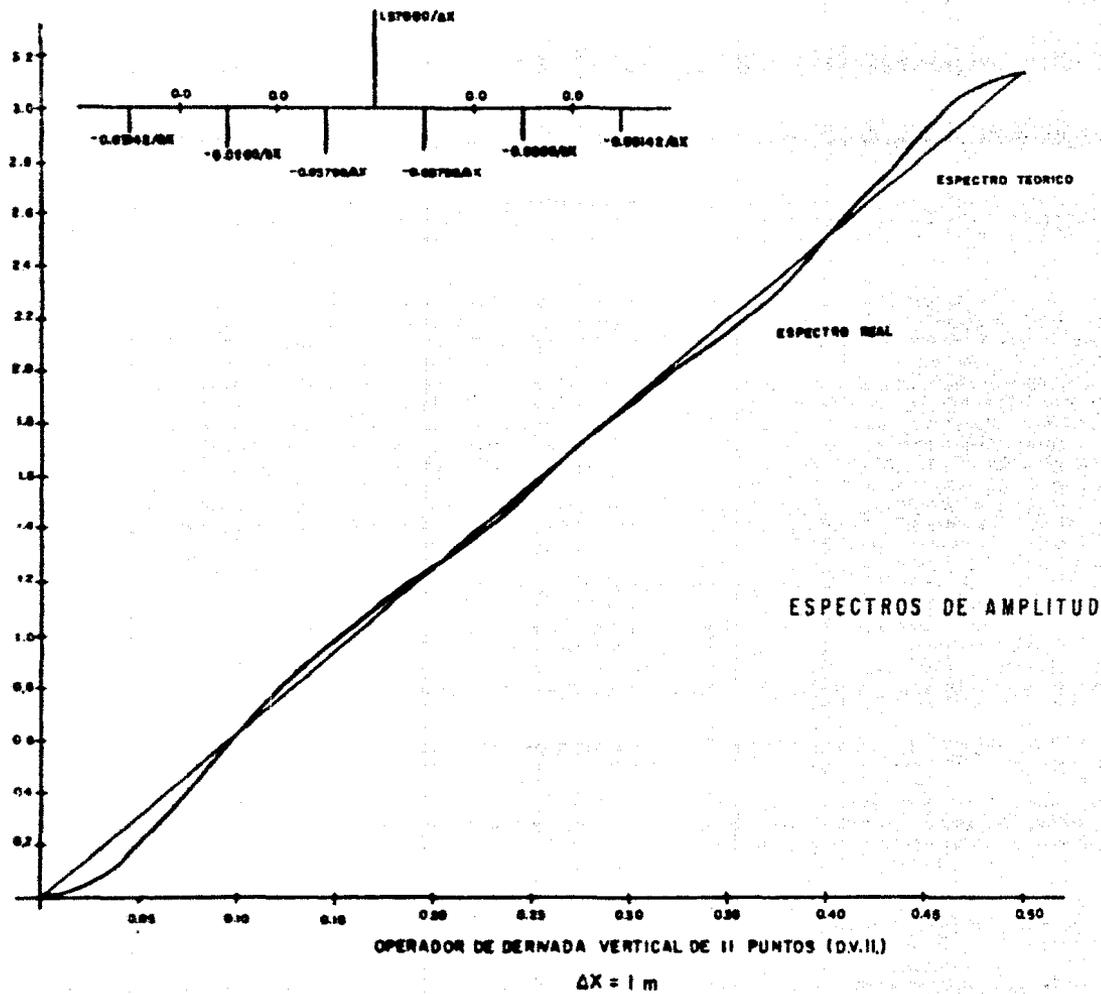
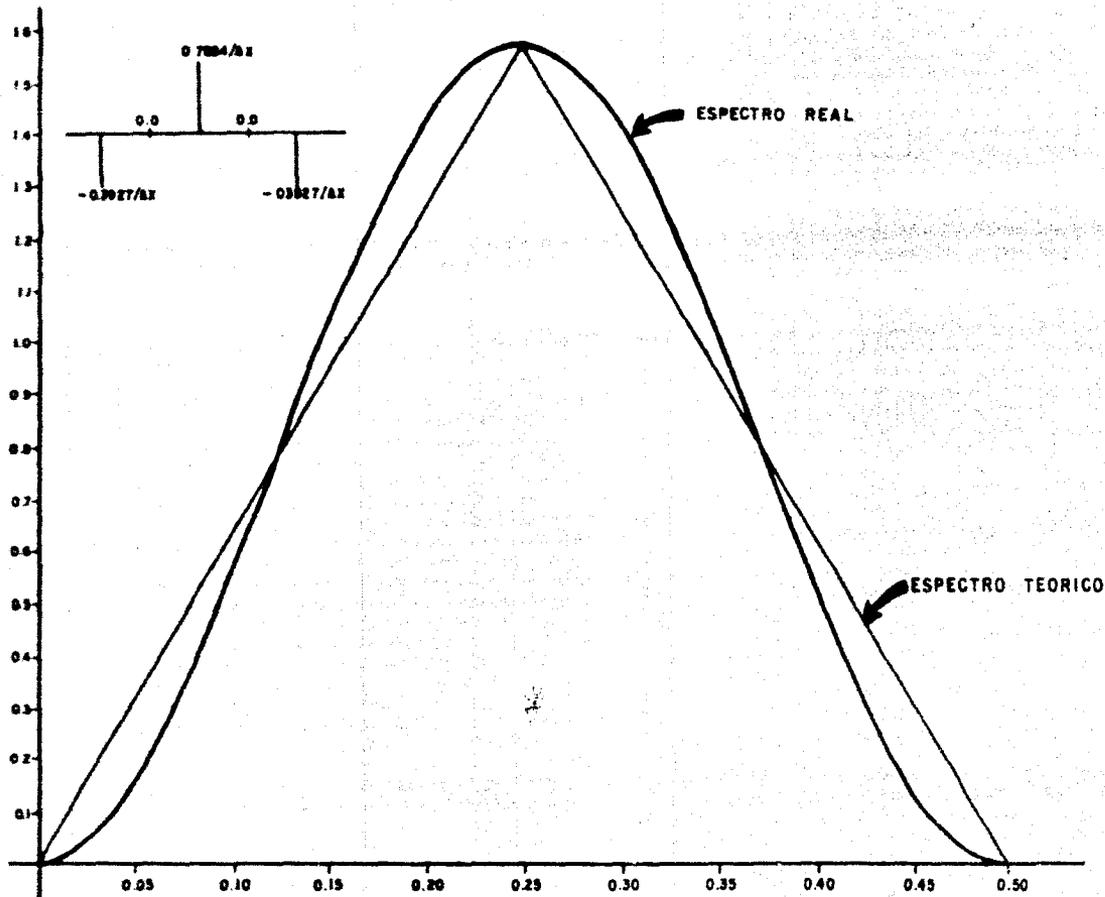


FIG. 6.12.



ESPECTRO DE AMPLITUD
 OPERADOR DE DERIVADA VERTICAL A 1/2 DE LA FRECUENCIA DE NYQUIST ($DV 5 \cdot f_n/2$)

$\Delta X = 1 \text{ m.}$

FIG. 6. 13.

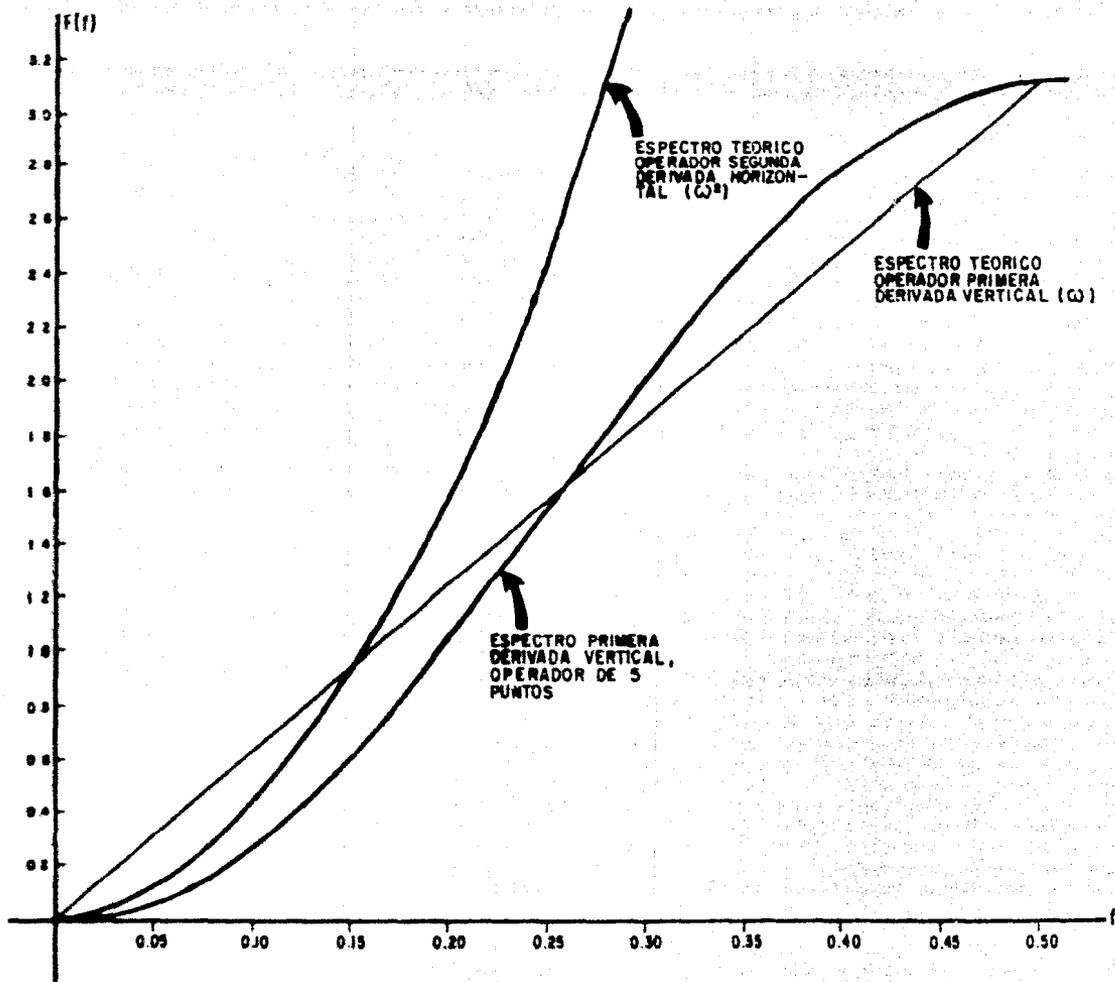


FIG. 6. 14.

CAPITULO VII

INTERPRETACION.

Siendo la presencia de cavidades una deficiencia de masa en el subsuelo, las anomalías gravimétricas generadas corresponderán a mínimos, y la intensidad de las mismas dependerán de la geome-tría de las cavidades, así como de la profundidad a que estas se localizen, siendo este último un factor que es posible determinar por medio del conocimiento de la estratigrafía de la zona. La geome-tría de las cavidades no es un factor fácil de determinar, y aunque por procedimientos iterativos podría conocerse aproximadamente, realmente carece de interés práctico, y el punto que es conveniente conocer, la profundidad a la que se ubican las cavidades, queda re-suelto por el conocimiento de la profundidad de los estratos explota-dos.

Por lo anterior, la interpretación de las anomalías reviste primordialmente un carácter cualitativo, más que cuantitativo.

El no tener que analizar cuantitativamente las anomalías, justifica aún más el empleo de los operadores de derivada vertical, los cuales como ya se mencionó anteriormente son una aproximación a la primera derivada vertical, y a la segunda derivada horizontal, lo cual nos permitirá analizar cualitativamente las anomalías desde los dos puntos de vista, además de el de primera derivada horizontal.

INTERPRETACION LINEA 1. - En esta línea (Fig. 6.1) la proximidad a la barranca del tecolote, ocasionó la presencia de gran cantidad de ruido, y como se puede apreciar en la anomalía, ningún mínimo alcanza un valor mayor a 1. U.G. por lo cual se considera que no corresponden a anomalías generadas por cavidades, ya que la que se cruzó, dadas las características de la misma, queda fuera del rango de detección del aparato, en las derivadas, los mínimos más acentuados se confirman con cruces por cero en la primera derivada horizontal y con mínimos acentuados en la derivada vertical con el operador de 11 puntos; la derivada vertical de 5 puntos, que permite un paso de frecuencias menor al anterior, dadas las características de su diseño, no acentúan tanto estas anomalías, lo cual indica que corresponden a altas frecuencias, pero esto implicaría en el caso de corresponder a cavidades, que estas serían muy pequeñas y so-
meras, por lo cual, incluso podría considerarse que los mínimos más acentuados, marcados con una flecha en la anomalía, corresponden a ductos subterráneos de dimensiones tales que pueden ser detectados, tales como ductos del alcantarillado público.

Asimismo en esta anomalía se aprecia que al principio de la línea los valores son más bajos que en la parte media y final de la misma lo cual, probablemente, esta ocasionado por la presencia de dos cañadas que se aproximan a la línea en las primeras estaciones, y que no fueron suficientemente corregidas por rugosidad del terreno.

Aunque esta línea no detectó cavidad alguna, dado que como se señaló anteriormente, no se conocían las condiciones del terreno al realizarse las me-

diciones, y posteriormente se verificó que efectivamente no existían cavidades bajo ella, salvo al final de la misma, es satisfactorio observar que para cavidades que se localizan en condiciones de ser detectadas dentro del rango de operación de los equipos en uso, la relación señal-ruido no tendrá valores que eviten se aprecien las anomalías generadas por cavidades.

INTERPRETACION LINEA 2. - Esta línea (Fig. 6. 2) se realizó sobre una cavidad consistente en un solo túnel, la cual como se aprecia en la anomalía teórica, genera una anomalía que queda fuera del rango de detección del equipo. En la anomalía teórica calculada, los operadores de derivada horizontal y vertical, funcionan adecuadamente, cosa que no ocurre en la anomalía real. Por lo cual se puede concluir que este tipo de cavidades quedarán fuera del límite de detección, y no podrán ser encontradas con los equipos en uso.

INTERPRETACION LINEA 3. - En esta línea (Fig. 6. 4) se aprecian 4 mínimos principales en las estaciones 5, 7, 12 y 14; el primero y el segundo, corresponden a efectos laterales de dos pequeños brazos de la cavidad; estas anomalías de amplitud menor que 1 U. G., se confirman en la derivada vertical y una de ellas en la derivada horizontal, la otra no se observa debido a la longitud del operador empleado, que no funciona adecuadamente al iniciar y finalizar la línea por las características del proceso de convolución.

En el momento de verificar las anomalías de un levantamiento gravimétrico por medio de perforaciones es importante considerar que estas --

pueden corresponder a efectos laterales, ya que como en este caso, al realizar una perforación no se detectaría ninguna cavidad con la misma, acaso únicamente pérdida del fluido de perforación, por lo cual debe -- considerarse la realización de perforaciones sobre un eje aproximadamente perpendicular a la línea de mediciones.

Los mínimos de los puntos 12 y 14 corresponden al cruce sobre la cavidad, y este último corresponde en magnitud al calculado en la anomalía teórica, asimismo corresponden las formas de las derivadas horizontal y vertical, con la salvedad de que la derivada vertical de la anomalía -- teórica, calculada por medio del operador presenta una inversión del mínimo en la parte central del mismo.

Esto es debido a que, como se mencionó anteriormente, el operador -- también funciona como una aproximación a la segunda derivada horizontal, ya que como se puede ver en la figura 6.5 los cruces por cero -- corresponden a puntos de inflexión de la anomalía teórica, y la mencionada inversión en el mínimo de la derivada vertical, vista desde el punto de -- vista de la segunda derivada horizontal, significa que en esa zona la curva tura de la anomalía teórica es menor en la parte central que a los lados.

INTERPRETACION LINEA 4. - Esta línea (Fig. 6.6) cruzó una cavidad -- la cual consta de dos ramales separados por un pilar por lo cual se -- presentan dos mínimos en las estaciones 8 y 13, siendo el primero el mayor, con una magnitud aproximada de 2. U.G. que corresponde con la anomalía teórica calculada, y es mayor que el de la otra estación debido a que este punto la cavidad es más somera, como se puede apreciar en las figuras -- 6.6 B, C y 6.7., las derivadas horizontal y vertical presentan gran pareci

do y los mínimos de la anomalía se confirman claramente en ellos.

Las variaciones que se aprecian en la derivada vertical de la anomalía teórica son debidas a que el funcionamiento del operador como se ha mencionado anteriormente, constituye unicamente una - aproximación.

Loa anterior pone de manifiesto que el método gravimétrico funciona para la detección de cavidades, aunque se encuentra limitado en su alcance en ciertos casos.

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES.

Para poder concluir sobre la posibilidad del empleo del método gravimétrico en la detección de cavidades, es necesario considerar en primer lugar las características de la zona que va a estudiarse, principalmente las dimensiones del predio, ya que esta aplicación en predios de pequeña dimensiones no se justifican en virtud de que otros métodos como el de perforaciones programadas a intervalos adecuados, resultará más económico. Su aplicación desde el punto de vista económico se justifica en predios de grandes dimensiones o en aquellos en que se realicen obras de importancia. El otro punto a considerarse sobre el alcance del método es las posibilidades de detección de cavidades con los equipos actualmente en uso, esto quedará definido por la profundidad a la que pueden localizarse las cavidades, pero generalmente este punto queda resuelto ya que al realizarse estudio estratigráficos previos, se podrá conocer si el método tiene el alcance suficiente.

Siendo el problema de las zonas minadas un problema que se agrava con el tiempo y que cada vez toma características más dramáticas es importante considerar que las cavidades que -- presentan mayor peligro son aquellas que se encuentran mas -- proximas a la superficie y cuyas características geométricas

son tales que el interperismo puede ocasionar la pérdida de estabilidad de las bóvedas, en estos casos el empleo del método que dará justificado desde el punto de vista social al proporcionar la ubicación de las cavidades que presentan un alto riesgo para los asentamientos humanos ubicados sobre ellos.

Por otra parte el uso de nuevos equipos con mayor sensibilidad como los gravímetros de la serie microgal que ya se fabrican actualmente y se emplean con éxito en otros países, permitirá que al poderse detectar anomalías del rango de un milésimo de miligal se puede tener oportunidad de detectar cavidades someras de pequeñas dimensiones, así como cavidades de grandes dimensiones a mayor profundidad.

Tal vez la conclusión más importante desde el punto de vista in genieril es que el empleo del método gravimétrico constituye -- una ayuda en la urgente solución que requieren algunas zonas mi nadas en el Distrito Federal.

CAPITULO IX

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Cimentaciones en zonas minadas de la Ciudad de México
(Simposio) Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. 1976.
- 2.- Introducción a la Geofísica.
Milton B. Dobrin.
Editorial Omega.
- 3.- Gravity vertical gradient measurements for the detection of
small Geologic and anthropogenic forms.
Zbigniew J. Fajklewicz.
Geophysics, Vol. 41, N° 5, pp. 1016-1030.
- 4.- Gravity vertical gradient measurements for the detection of
small Geologic and anthropogenic forms. (discusión)
. Thyssen-Bornemisza.
Geophysics, Vol. 42, N°4, pp. 872-876.
- 5.- Microgravimetry for engineering applications.
Arzi, A.A.
Geophysics, Vol. 23, pp. 408-425.
- 6.- Analysis Transmisión and filtering of signals.
Javid y Brenner.
McGraw- Hill Co.
- 7.- Handbook of numerical methods and applications.
Kelly, Louis Grant.
Addison Wesley.
- 8.- Mining Geophysics.
Two -dimensional frecuencia analysis and design of grid operators.
Brent D. Fuller pp. 658-708
S.E.G.
- 9.- The Fourier transform and its applications
Bracewell R.M.
New York, Mc Graw-Hill.
- 10.- Analisis de Fourier
Hwei P. Hsu,
Fondo educativo Interamericano, S.A.

- 11.-Gravity gradients and the interpretation of the truncated plate.
John M. Stanley and Ronald Green.
Geophysics, Vol. 41, pp. 1370-1376.
- 12.-Sintesis de operadores digitales bidimensionales para filtraje.
Osvaldo Sanchez Zamora.
Tesis Profesional, Facultad de Ingenierfa, U.N.A.M. 1978.
- 13.-La gravimetrie de haute precision, application aux recherches de cavites.
Robert Neumann.
Geophysical Prospecting Vol. 15, pp. 116-134.
- 14.-The detection of caves by gravity measurements.
Colley G.C.
Geophysical Prospecting, Vol. 11, N°1, pp. 1-10
- 15.-High precision measurements - recent progress.
Robert Neumann.
(no se proporciona fuente, traducido del frances por la Ralph Mc Elroy Co., Custom Division).
- 16.- Statistics and data analysis in Geology.
Davis, John C.
New York, J. Wiley, 1973.