



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería

**DECONVOLUCION DE REGISTROS DE
RAYOS GAMMA**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO GEOFISICO
P R E S E N T A ;
SIXTO TOMAS FERNANDEZ RAMIREZ**

México, D. F.

1953



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DIRECCION

60-I-61

Señor FERNANDEZ RAMIREZ SIXTO TOMAS.
P r e s e n t e .

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que aprobado por esta Dirección, propuso el Prof. Ing. - Francisco A. Arroyo Carrasco, para que lo desarrolle como tesis- para su Examen Profesional de la carrera de INGENIERO GEOFISICO.

"DECONVOLUCION DE REGISTROS DE RAYOS GAMMA"

- I INTRODUCCION.
- II ASPECTOS GENERALES Y PRINCIPIOS BASICOS.
- III INTERPRETACION CUANTITATIVA DEL REGISTRO DE RAYOS GAMMA.
- IV APLICACION.
- V CONCLUSIONES.
BIBLIOGRAFIA.

Ruego a usted se sirva tomar debida nota de que en cumplimiento con lo especificado por la Ley de Profesionales, deberá prestar -- Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses como -- requisito indispensable para sustentar Examen Profesional; así -- como de la disposición de la Coordinación de la Administración -- Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de los- ejemplares de la tesis, el título del trabajo realizado.

Atentamente.
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., 12 de abril de 1983.
EL DIRECTOR

Dr. Octavio A. Rascón Chávez

OARCH'MRV!gtg

A MI MADRE:

SARA RAMIREZ O.

Por su amor y apoyo que me permiten alcanzar esta meta.

A MI HERMANO:

C.P. OCTAVIANO FERNANDEZ RAMIREZ

A LA MEMORIA DE MI PADRE:

OCTAVIANO FERNANDEZ HDEZ.
Padre y amigo.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al Consejo de Recursos Minerales por las facilidades prestadas para la elaboración de este trabajo, así como al Ing. Alejandro Arroyo por sus sugerencias durante la dirección. También hago patente mi agradecimiento a Ricardo Maya por su auxilio en el manejo del sistema PDP 11/40 y a Salvador Labrada por sus dibujos.

I N D I C E .

I.	INTRODUCCION	1
II.	ASPECTOS GENERALES Y PRICIPIOS BASICOS.....	4
	1. Radiactividad Natural	4
	2. Elementos Naturalmente Radiactivos.....	5
	2.1 Potasio.....	6
	2.2 Uranio	6
	2.3 Torio	9
	3. Absorción de Rayos Gamma	9
	4. Instrumentos de Medición de Rayos Gamma	12
	4.1 Camara de Ionización	12
	4.2 Contador de Geiger-Muller	12
	4.3 Contador de Centelleos	13
	5. Principios Básicos	16
	5.1 Derivación de $GT=KA$ para Capas Horizontales	17
	5.2 Derivación de $GT=KA$ para Capas Inclınadas	21
	6. Correcciones	24
III.	INTERPRETACION CUANTITATIVA DE REGISTROS DE RAYOS GAMMA	27
	1. Método Iterativo de Scott	29
	2. Generación de la Anomalia Sintética	37
	3. Respuesta al Impulso Geológico (GIR)	39
	4. Determinación del GIR	41
	5. Método de Filtrado	50
	6. Relación Entre el Método Iterativo y el Método de Filtrado	58
	7. Intervalo de Muestreo	63
	8. La Constante α	65
IV.	APLICACION.....	68
	1. Programa para el Cálculo de la Constante α (TI-58,59)	68
	2. Programa para Método Iterativo (FORTRAN).....	72
	3. Programa para Filtrado (FORTRAN)	77
	4. Programa para Filtrado (TI 58,59)	81
	5. Iteración y Filtrado en Práctica	85
V.	CONCLUSIONES	103
	BIBLIOGRAFIA	105

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

El avance de la tecnología en el área de Registros de Pozos ha provocado la generación de gran cantidad de herramientas para medir de una manera directa o indirecta las propiedades fundamentales de las rocas. Anteriormente la única manera de conocer las propiedades de las rocas, era mediante la inspección y análisis directo de muestras de roca cortadas por la barrena; hoy en día aunque no se han descartado estas pruebas, han sido desplazadas por Registros de Pozos, por el hecho de que proporcionan una mayor información indirecta de las condiciones existentes en las formaciones atravezadas por la barrena con un costo de operación más económico.

Las propiedades de las rocas que pueden ser medidas y obtenidas a partir de los Registros de Pozos son, entre otras: porosidad, densidad, resistividad, y radiactividad.

Si bien los registros han tenido su auge en la industria petrolera, hay uno que tiene gran importancia en la industria minera especialmente en la evaluación de yacimientos uraníferos y de sales potásicas, este registro es el de rayos gamma naturales.

El uso del átomo como fuente generadora de energía ha provocado que se apliquen nuevos métodos geofísicos en la búsqueda de minerales que sean capaces de ceder electrones o neutrones. El problema principal que se tiene actualmente es que éstos minerales se encuentran, en su mayoría, diseminados aleatoriamente en la superficie. Por otro lado si se encuentran cubiertos por algunos centímetros de aluvi6n o cualquier otro material no es posible detectarlos. En la actualidad se ha dado mayor importancia a la perforaci6n de pozos para poder determinar, a partir de mediciones hechas con sondas, en que intervalos cierta formaci6n es o no radiactiva, su espesor y cantidad de material radiactivo (ley media), con el prop6sito de determinar si es o no explotable.

Todo lo anterior a dado como resultado que en la industria minera aumente el interes por la perforaci6n de pozos, el uso de registros y la aplicaci6n de t6cnicas de procesamiento de datos para mejorar éstos con el prop6sito de evaluar las reservas de mineral radiactivo m6s cuantitativamente de una manera r6pida y econ6mica.

El registro m6s utilizado para este prop6sito es el Rayos Gamma Naturales, del cual se han desarrollado varios procedimientos.

tos interpretativos. En general estos métodos requieren hacer una digitización de los datos obtenidos para calcular la ley media de un intervalo de interés.

La validez de estos métodos depende de la interpretación total del intervalo. Hasta ahora se ha utilizado una técnica iterativa para procesar los Registros de Rayos Gamma y determinar la distribución de material radiactivo a lo largo de un pozo. El tiempo de cómputo de esta técnica es muy grande, por lo que para eliminar esta dificultad, se presenta en este trabajo una técnica para producir un registro que dé la concentración aproximada de radioelementos como una función de la profundidad, en base al análisis digital de series de tiempo.

Cabe añadir que si bien los métodos han sido aplicados específicamente a depósitos de uranio, los principios en los cuales se basan son generalmente aplicables a depósitos de otros materiales que emitan rayos gamma o se relacionen cuantitativamente con emisores de rayos gamma (por ejemplo roca fosfórica y sales de potasio).

I I . ASPECTOS GENERALES Y PRINCIPIOS BASICOS.

1. RADIATIVIDAD NATURAL.

El núcleo atómico está formado principalmente por protones y neutrones que se encuentran unidos por una gran fuerza de atracción (fuerza nuclear), en general, los elementos con pocos protones tienen un número semejante de neutrones y a medida que aumenta el número de protones (o sea el número atómico) la relación entre éstos y los neutrones aumenta de uno a valores mayores.

Todos los elementos que tienen un origen natural con número atómico de 83 o mayor, decaen sucesivamente a lo largo de una cadena de transformaciones hacia un núcleo estable. Esta transición hacia un estado más estable es acompañado por ciertas manifestaciones de energía y se denomina Radiactividad Natural. El tiempo que transcurre para que la radiactividad decaiga a la mitad de su valor original se conoce como vida media. La radiactividad natural está constituida principalmente por partículas alfa (α) beta (β) y radiación gamma (γ).

De los tres tipos de radiaciones antes citados, las parti-

culas alfa son las de más alta energía, son núcleos de Helio; tienen dos protones y dos neutrones con carga eléctrica positiva. Debido a esta carga positiva y su masa relativamente grande, son fácilmente detenidas por las masas de roca que rodean al material emisor, por lo que no llegan a los instrumentos de medición.

Las partículas beta son electrones libres y son de mucha menor energía que las partículas alfa, sin embargo, también son detenidas por el material que rodea a la fuente emisora antes de llegar al instrumento de medida.

Finalmente, la radiación gamma está constituida por radiación electromagnética de la misma naturaleza que la luz o los rayos X, pero de diferente longitud de onda; son los de mayor penetración por lo cual es posible obtener los registros de rayos gamma aún a través de las tuberías de revestimiento del pozo.

2. ELEMENTOS NATURALMENTE RADIACTIVOS.

Las rocas y sus derivados contienen una cantidad significativa de elementos naturalmente radiactivos (radioelementos). Sólo tres radioelementos se pueden encontrar naturalmente, estos son: el Potasio, Uranio y Torio, de estos el potasio es el que tiene una forma de decaimiento radiactivo más simple.

2.1 POTASIO.

El potasio tiene una forma simple de decaimiento radiactivo. Este se muestra en la tabla I. El ^{40}K es radiactivo, tiene una abundancia relativa de solo 0.0118 %, las fracciones de los isótopos del potasio que tiene lugar en la naturaleza no tienen significancia y la radiactividad del potasio es constante bajo todas las condiciones. Debido a que la simplicidad del esquema de decaimiento está caracterizado por una energía de 1.46 Mev, el potasio experimenta 3.3 emisiones gamma por segundo por gramo es decir tiene una actividad gamma de $3.3\text{YS}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

2.2 URANIO

El uranio consiste principalmente de dos isótopos, ^{235}U y ^{238}U , de los cuales el primero es el más abundante (99.73%). El decaimiento radiactivo del ^{238}U que se muestra en la tabla II, es complejo y pasa a través de 14 estadios, cada uno con desintegración característica y productos hijos cuyo elemento final estable es el ^{206}Pb . El uranio con sus productos de decaimiento es más radiactivo que el potasio. Sin embargo, es más importante darse cuenta que la emisión gamma principal está asociada con ^{214}Pb y

TABLA I ESQUEMA DE DECAIMIENTO CARACTERISTICO DEL ⁴⁰K

Esquema de Decaimiento	Vida media del Isótopo	Radiación	Gamma por Desintegración	Energía del Pajo Gamma
⁴⁰ K	1.3 10 a	β, γ	0.11	1.46Mev
(89%) ⁴⁰ Ca + β	Estable	-		
(11%) ⁴⁰ Ar + γ	Estable	-		

TABLA II ESQUEMA DE DECAIMIENTO CARACTERISTICO DEL ²³⁸U

Isótopo	Vida media	Radiación	Gamma/Des	Energía (Mev)
²³⁸ U	4.51X10 ⁹ a	α	-	
²³⁴ Th	24.1 d	β	0.08	
²³⁴ Pa	1.18 min	β	-	
²³⁴ U	2.48X10 ⁵ a	α	-	
²³⁴ Th	8X10 ⁴ a	α	-	
²²⁶ Ra	1.6X10 ³ a	α	0.04	
²²² Rn	3.82 d	α	-	
²¹⁸ Po	3.05 min	α	-	
²¹⁴ Pb	26.8 min	β, γ	0.60	0.29, 0.35
²¹⁴ Bi	19.8 min	β, γ	1.30	
²¹⁴ Po	1.6X10 ⁻⁴ seg	α	-	0.61, 1.12, 1.76
²¹⁰ Pb	21.3 a	β	0.04	
²¹⁰ Bi	5.01 d	β	-	
²¹⁰ Po	138.4 d	α	-	
²⁰⁶ Pb	Estable	-	-	

TABLA III ESQUEMA DE DECAIMIENTO CARACTERISTICO DEL ²³²Th

Isótopo	Vida media	Radiación	Gamma/Des.	Energía (MeV)
²³² Th	1.39x10 ¹⁰ a	α	-	
²²⁸ Ra	5.75 a	β	-	
²²⁸ Ac	6.13 h	β, γ	0.68	0.91, 0.96
²²⁸ Th	1.91 a	α	0.02	
²²⁸ Ra	3.64 d	α	0.04	
²²⁰ Rn	55.3 seg	α	-	
²¹⁶ Po	0.15 seg	α	-	
²¹² Pb	10.64 h	β, γ	0.52	0.24
²¹² Bi	60.6 min	β, γ	0.12	0.73
²¹² Po	3x10 ⁻⁷ seg	α	-	
²⁰⁸ Tl	3.1 min	β, γ	2.30	0.51, 0.58, 0.81
²⁰⁸ Pb	Estable	-	-	

^{214}Bi y no directamente con ^{214}U . El ^{214}Pb y ^{214}Bi son el octavo y el noveno producto hijo de la serie de decaimiento. Las vidas-medias acumuladas de los productos de decaimiento a partir de su formación son aproximadamente 330 000 años. Debe notarse que uno de los productos de decaimiento que preceden la formación de ^{214}Pb y ^{214}Bi es el gas ^{222}Rn y también que la octava de las desintegraciones está acompañada por la formación de partículas alfa las cuales como dijimos anteriormente son núcleos de helio.

2.3 TORIO.

El ^{232}Th es el isótopo principal del torio natural; semejante al ^{238}U tiene un proceso de decaimiento complejo hasta llegar a ^{208}Pb , como se muestra en la tabla III. El más fuerte emisor gamma es el noveno en la serie de decaimiento, ^{228}Tl . Las vidas-medias acumuladas hasta este punto en la serie de decaimiento es aproximadamente de ocho años.

3. ABSORCION DE RAYOS GAMMA.

En el vacío las radiaciones avanzan indefinidamente, pero en un medio sólido como las rocas, los rayos gamma pierden energía y acaban por ser absorbidos. La radiación gamma invierte su

energía en tres procesos, denominados efecto fotoeléctrico, efecto Compton y efecto de formación de pares.

El efecto fotoeléctrico se presenta cuando un rayo gamma cede toda su energía a algún electrón orbital de un átomo; la energía impartida al electrón orbital es energía cinética y al vencer la fuerza de atracción entre el núcleo y el electrón, provoca que éste sea expulsado de su órbita a considerable velocidad y dé lugar a la formación de un par iónico, este electrón de alta velocidad recibe el nombre de fotoelectrón.

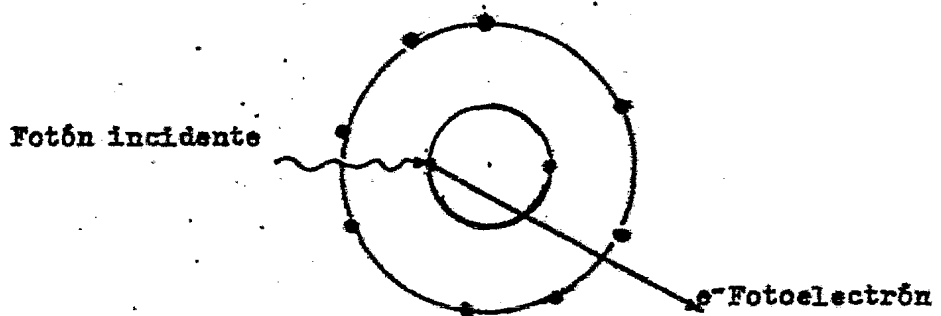


Fig. 1 EFECTO FOTOELECTRICO.

El efecto Compton se produce cuando un rayo gamma o fotón de mayor energía que el anterior (entre 100 KeV y 2 MeV) interactúa con un electrón orbital; éste cede solo parte de su energía, causando el lanzamiento de dicho electrón, y desvía su propia trayectoria, para continuarla con una energía menor.

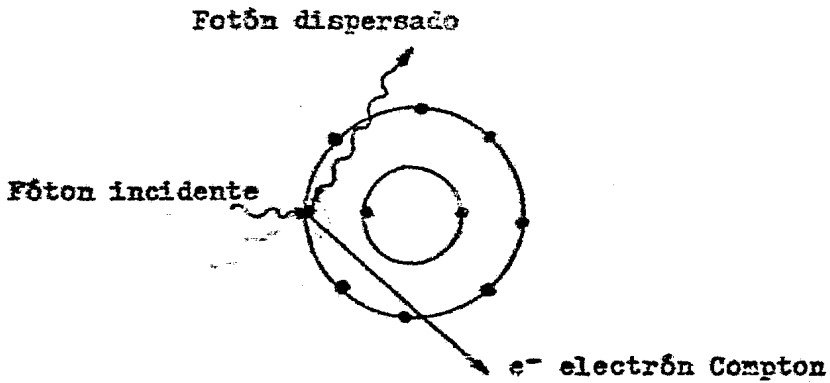


Fig 2. EFECTO COMPTON

En la producción de pares, el fotón se aniquila en las proximidades del núcleo del átomo y da lugar a la creación de un par de electrones, uno negativo y otro positivo; la masa de los electrones se crea a partir de la energía del fotón, de acuerdo con la ecuación de Einstein $E=Mc^2$. Este mecanismo se realiza cuando los niveles de energía son altos (mayores de 2 MeV) y es de menor importancia en el rango de los rayos gamma que se miden.

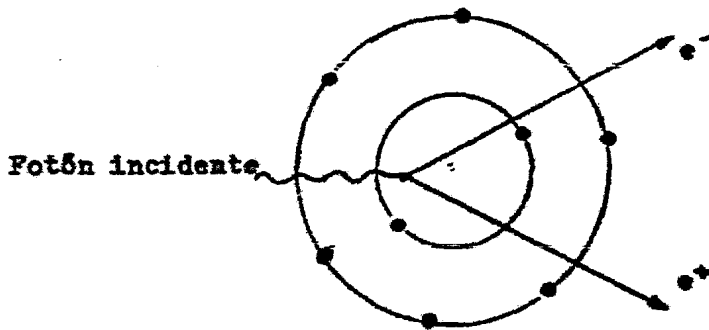


Fig 3. PRODUCCION DE PARES.

4.. INSTRUMENTOS DE MEDICION DE RAYOS GAMMA.

4.1 CAMARA DE IONIZACION

Este instrumento está formado por un cilindro metálico que contiene un gas inerte (radón) a presión, contiene además dos electrodos uno de los cuales es el cilindro metálico y el otro un alambre central aislado del cilindro. El alambre central tiene un potencial positivo de aproximadamente 100V, cuando una partícula cargada o un fotón de rayos gamma entra en el gas crea iones positivos pesados que emigran lentamente al cátodo, mientras que los electrones son acelerados hacia el ánodo, lo que genera una corriente (1/10 Amp).

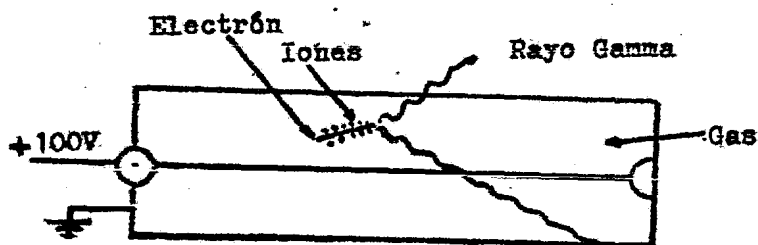


fig. 4 CAMARA DE IONIZACION

4.2 CONTADOR DE GEIGER MULLER

Es de similar característica a la cámara de ionización,

excepto que el electrodo central se mantiene a un voltaje mucho mayor, entre 600 y 1000 volts y el gas esta a baja presión. La ionización del gas ocurre de la misma manera que en la cámara de ionización, sin embargo en el contador Geiger-Mueller los electrones secundarios producidos por colisiones son atraídos rápidamente hacia el alambre central, éstos en su viaje a través del alambre adquieren la suficiente energía para expulsar electrones adicionales de los átomos del gas y crear más iones en su camino formándose una "avalancha" de electrones llegando a producir en el alambre una pulsación. El flujo de corriente es 10 veces más grande que en la cámara de ionización pudiéndose contar hasta 5000 pulsos por segundo.

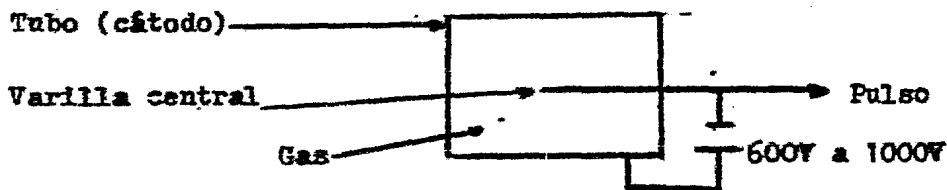


fig. 5 CONTADOR DE GEIGER MUELLER

4.3 CONTADOR DE CENTELLEOS.

Este tipo de contadores se basa en el centelleo de luz

que ciertos materiales emiten cuando incide sobre ellos una radiación. En un contador de centelleos se hace uso de cristales que pueden ser de ioduro de sodio que constituye el material fluorescente y algunas impurezas de talio. En el cristal de centelleos se produce un fotón. Cuando los electrones de los átomos del cristal que fueron excitados por las radiaciones gamma, pierden dicha energía vuelven a su nivel de energía, así al pasar de un estado de energía alto a un estado de energía bajo, los átomos emiten paquetes de luz que pueden ser del orden de la luz visible o de la luz ultravioleta. Esta luz golpea la superficie sensible a la luz de un fotocátodo, lo que causa la emisión de uno o más electrones primarios; estos electrones son atraídos por un primer ánodo, emitiendo en el choque tres o más electrones por cada uno recibido. Los electrones secundarios son acelerados hacia otro ánodo próximo que tiene un potencial más elevado, multiplicándose nuevamente por otro factor de tres aproximadamente. Este proceso de multiplicación continua varias veces hasta lograr una multiplicación interna cercana a un millón. Finalmente la corriente de salida es amplificada electrónicamente por lo que el pulso de salida será proporcional a la intensidad del minúsculo brote de luz inicial y por lo tanto a la intensidad de los rayos gamma incidentes. La eficiencia de estos contadores es muy alta por lo que es posible utilizar contadores pequeños y obtener mejores detalles de la formación registrada.

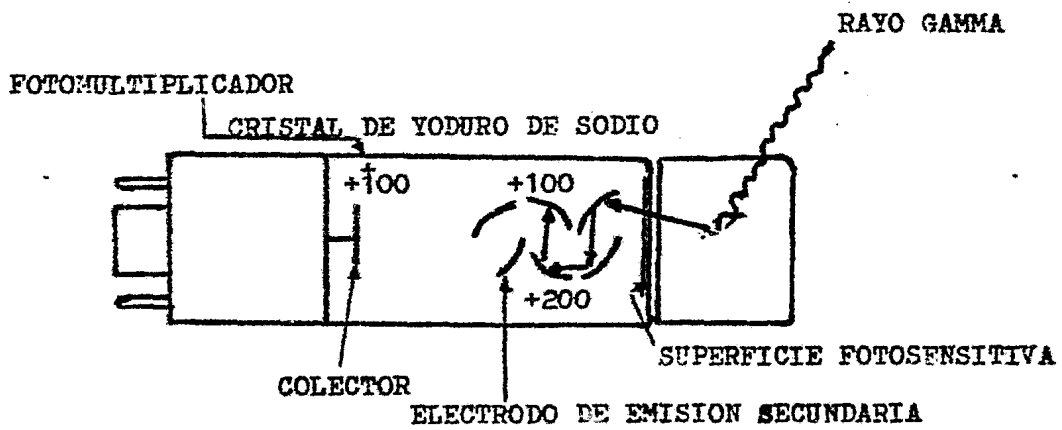


Fig 6 CONTADOR DE CENTELLEOS.

5. PRINCIPIOS BASICOS

El registro de rayos gamma naturales mide la radiactividad natural de las formaciones geológicas producto de la desintegración natural de los elementos radiactivos que estas contienen por lo que resulta muy útil en la evaluación de yacimientos radiactivos.

Los métodos interpretativos se basan en la proporcionalidad entre el área bajo la curva corregida (A) del registro de rayos gamma y el producto del espesor (T) y la ley media (\bar{G}) del estrato mineralizado, cuya expresión matemática es:

$$\bar{G} T = K A$$

2.1

Donde K es una constante de proporcionalidad determinada por calibración de instrumentos en pozos existentes en el área de estudio.

La ecuación anterior se justificará matemáticamente a continuación.

5.1 DERIVACION DE $\overline{GT-KA}$ PARA CAPAS HORIZONTALES

Para iniciar este desarrollo se tomará como referencia la figura 7, en esta se tomará como coordenada Z la vertical que va del terreno hacia abajo y τ es la distancia entre una sonda de registro y una delgada capa mineralizada de espesor ΔZ . Si se define a $\Delta N(\tau)$ como la razón de conteo producida por la capa delgada de mineralización localizada a una distancia Z_j del nivel del terreno; la razón de conteo será proporcional a la cantidad de mineral en la zona, la cual a su vez es proporcional al producto de la ley media del mineral $G(Z_j)$ y espesor ΔZ , esto se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$\Delta N(\tau) = \phi_n(\tau) G(Z_j) \Delta Z \quad 2.2$$

Donde $\phi_n(\tau)$ es la relación de $\Delta N(\tau)$ a $G(Z_j) \Delta Z$, y también refleja el hecho de que la mineralización en Z produce un efecto a una distancia τ de la sonda. Si se hace la razón de conteo tan pequeña de manera que el intervalo sea continuo se puede integrar sobre τ , lo que dará el incremento del área bajo la curva de razón de conteo que se produce en la zona de mineralización Z_j . Este incremento será designado como dA_n .

$$\Delta N(\tau) = \int_{\tau} \phi_n(\tau) d\tau \cdot G(Z_j) \Delta Z$$

$\lim_{\Delta N \rightarrow 0}$

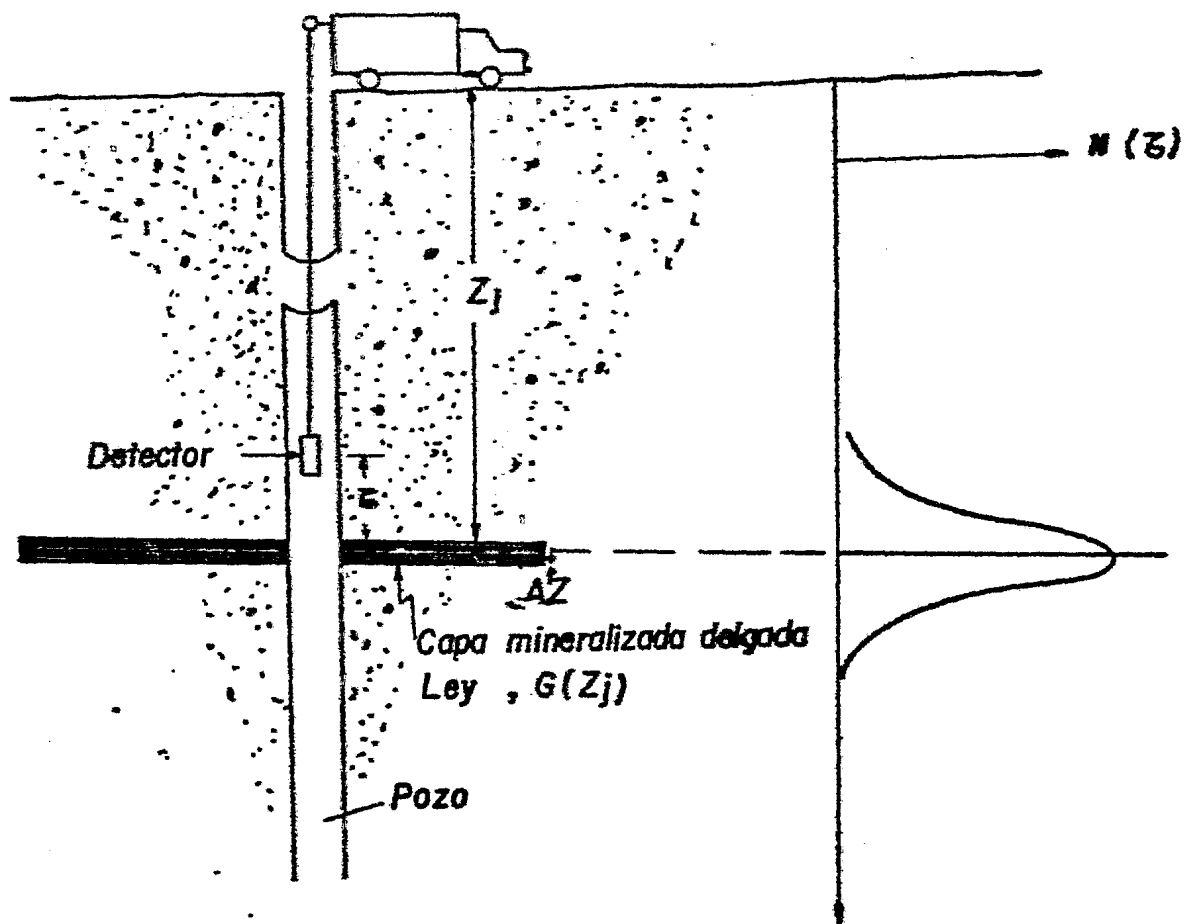


Fig-7.- DIAGRAMA ESQUEMATICO PARA DETERMINAR EXPERIMENTALMENTE $N(z)$ PARA UNA CAPA DELGADA HORIZONTAL Y RESULTADOS TIPICOS QUE DEBEN OBTENERSE.

$$dA_h = G(Z_s) \Delta Z \int_c \phi_h(\tau) d\tau \quad 2.3$$

Los límites de integración con respecto a τ deberán ser lo suficientemente amplios para incluir tácitamente los conteos debidos a la zona mineralizada en Z_s .

El factor contenido en la integral de la ecuación 2.3 es un parámetro del sistema el cual se definirá como Δh .

Si se suman todos los elementos diferenciales de área en toda la mena, se tendrá el área bajo la curva de razón de conteo debido a una capa de espesor finito, es decir:

$$\sum dA_h = \Delta h \sum_{Z_1}^{Z_2} G(Z) \Delta Z \quad 2.4$$

el promedio de $G(Z)$ en un intervalo de Z_1 a Z_2 es:

$$\bar{G} = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \sum_{Z_1}^{Z_2} G(Z) \Delta Z$$

como $Z_2 - Z_1 = T$

$$\bar{G} T = \sum_{Z_1}^{Z_2} G(Z) \Delta Z \quad 2.5$$

y como $\sum dA_h = A_h$ de 2.4 y 2.5 se tiene

$$x_h = \Delta h \bar{G} T \quad 2.6$$

o bien

$$\bar{G} T = K_h A_h \quad 2.7$$

en la que $K_h = 1/\Delta h$

La ecuación 2.6 es válida para cualquier espesor, aún para para zonas mineralizadas muy gruesas. Si una capa es muy gruesa (comparada con el diámetro del volumen muestreado) y el grado de mineralización es constante, la relación A/T dará la razón de conteo N

$$N = \Delta h \bar{G} \quad 2.8$$

Por lo que, para zonas mineralizadas gruesas, K_h es la constante de proporcionalidad entre la ley media y la razón de conteo. Esta relación es muy importante pues es la base de los métodos para el cálculo de la ley media de yacimientos que se estudiarán en los siguientes capítulos.

5.2 DERIVACION DE $GT=KA$ PARA CAPAS INCLINADAS.

La situación física se puede observar en la figura 8 en esta la capa se encuentra inclinada un ángulo θ , la coordenada Z es nuevamente la vertical hacia abajo del terreno; la función ϕ será asignada en este caso como $\phi_i(\tau)$ y el espesor es $\Delta Z \cos \theta$. La ecuación 2.2 se transforma en:

$$\Delta N(\tau) = \phi_i(\tau) G(Z_j) \cdot \cos \theta \Delta Z \quad 2.9$$

y siguiendo el razonamiento utilizado en el caso de la capa horizontal para $\Delta N(\tau)$ se tiene

$$\begin{aligned} \Delta N(\tau) &= \int_{\tau} \phi_i(\tau) G(Z_j) \cos \theta \Delta Z \\ \lim_{\Delta N \rightarrow 0} dA_i &= G(Z_j) \cos \theta \Delta Z \int_{\tau} \phi_i(\tau) d\tau \end{aligned} \quad 2.10$$

nuevamente la integral es una constante del sistema que se definirá en esta ocasión como Δi entonces:

$$dA_i = \Delta i \cdot G(Z_j) \cdot \cos \theta \Delta Z \quad 2.11$$

sumando los elementos de área

$$\sum dA_i = \Delta i \sum G(Z_j) \cos \theta \Delta Z$$

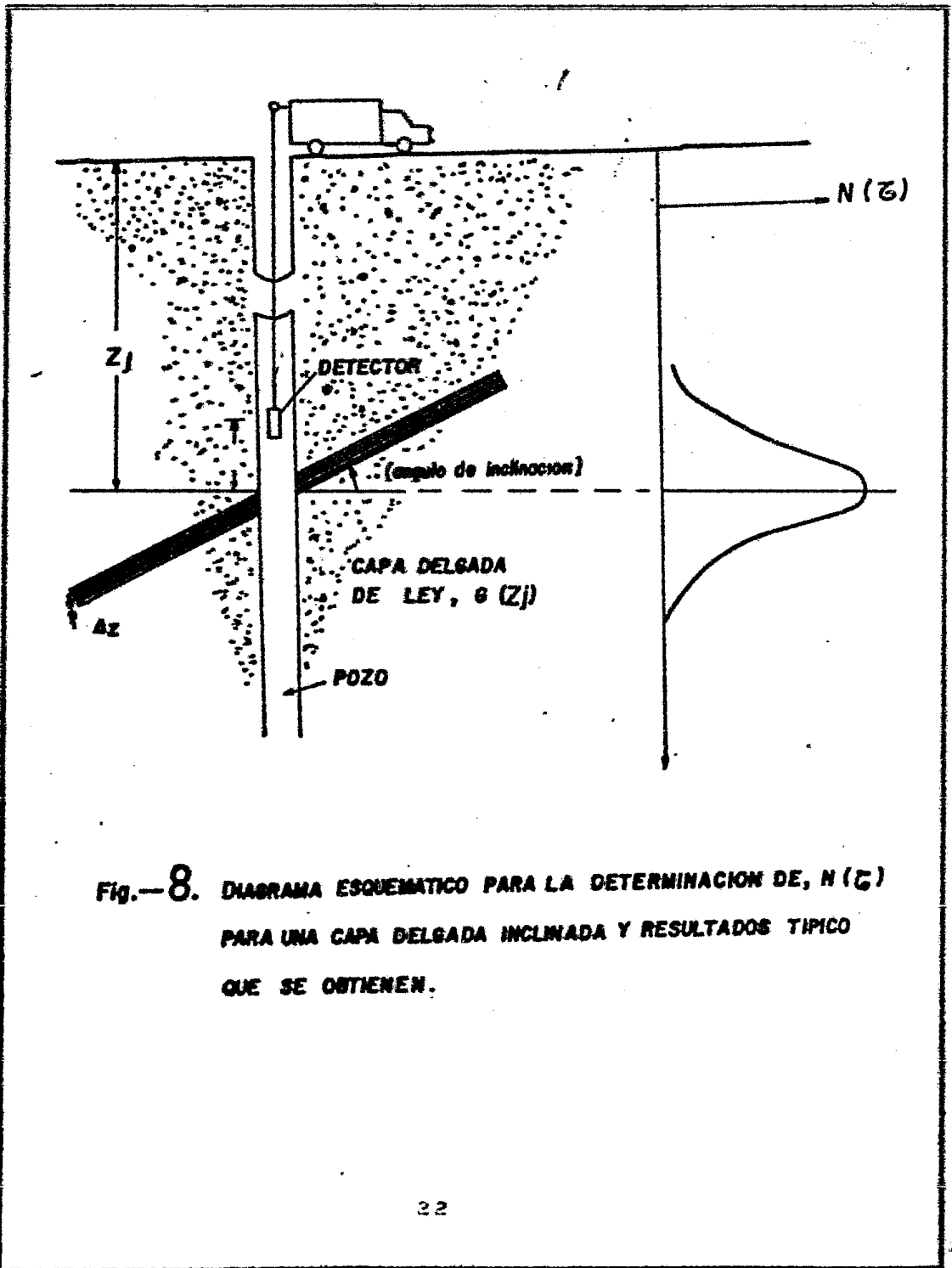


Fig.—8. DIAGRAMA ESQUEMATICO PARA LA DETERMINACION DE, $N(z)$ PARA UNA CAPA DELGADA INCLINADA Y RESULTADOS TIPICO QUE SE OBTIENEN.

El promedio de $G(Z)$ en el intervalo inclinado de Z_1 a Z_2

$$\begin{aligned} \bar{G} &= \frac{1}{(Z_2 - Z_1)} \sum_{Z_1}^{Z_2} [G(Z) \Delta Z]_i \\ \bar{G} &= \frac{1}{T_i} \sum_{Z_1}^{Z_2} [G(Z) \Delta Z]_i \\ \bar{G} T_i &= \sum_{Z_1}^{Z_2} [G(Z) \Delta Z]_i \\ A_i &= \Delta l \cos \theta \bar{G} T_i \end{aligned} \quad 2.12$$

Donde T_i es el espesor de la capa medido a lo largo del eje Z y el espesor medido normal al plano de la capa es $T_i \cos \theta$ haciendo:

$$K_i = 1/\Delta l \cos \theta$$

la ecuación 2.12 se transforma en :

$$\bar{G} T_i = K_i A_i \quad 2.13$$

Bajo las mismas condiciones que en el caso de capas horizontales, la relación A/T_i da la razón de conteo N

$$N = \Delta l \cos \theta \bar{G} \quad 2.14$$

Sin embargo como la razón de conteo en el centro de capas gruesas no depende del ángulo de inclinación, Por lo que las ecuaciones 2.8 y 2.14 serán iguales

$$\Delta_i \cos \theta G = \Delta h G$$

$$\Delta_i \cos \theta = \Delta h$$

por lo que

$$K_i = K_h$$

2.15

Aquí se observa un hecho muy importante, el factor K no depende del ángulo de inclinación por lo que no se necesitan hacer correcciones por el ángulo de inclinación de la capa.

6.4 CORRECCIONES

Las correcciones aplicables para la no linealidad del instrumento y para las variaciones de las condiciones físicas existentes en el pozo, darán como resultado una mejor interpretación. La no linealidad más significativa es el llamado "Tiempo muerto" que es el intervalo de tiempo que necesita un sistema de conteo

de pulsos para producir un pulso y prepararse a contar el siguiente, durante este lapso el sistema es inoperativo, por lo que un evento que ocurra en este tiempo no será detectado. La verdadera razón de conteo se obtendrá corrigiendo los datos con la siguiente fórmula:

$$N = \frac{\eta}{1 - \eta t} \quad 2.16$$

donde N es la razón de conteo corregida, η es la razón de conteo observada y t es el tiempo de resolución del instrumento, éste último dato es proporcionado por el fabricante del equipo.

Las otras correcciones debidas a la variación de las características físicas del pozo, reducen los valores del registro a una equivalencia con condiciones estándar de pozos a escala. Los valores numéricos de los factores de corrección son determinados por medio de gráficas proporcionadas por cada fábrica de equipos de registros; calculadas en sus respectivos pozos de calibración. Algunas de las condiciones de perforación para las que no se requiere corrección son las siguientes:

Diámetro del Pozo	4.5 pulgadas
Medio que llena el Pozo	aire

Recubrimiento del Pozo	ninguno
Contenido del Agua del Mineral	12 % por peso.
Desequilibrio	$\frac{G}{G_t} = 1$

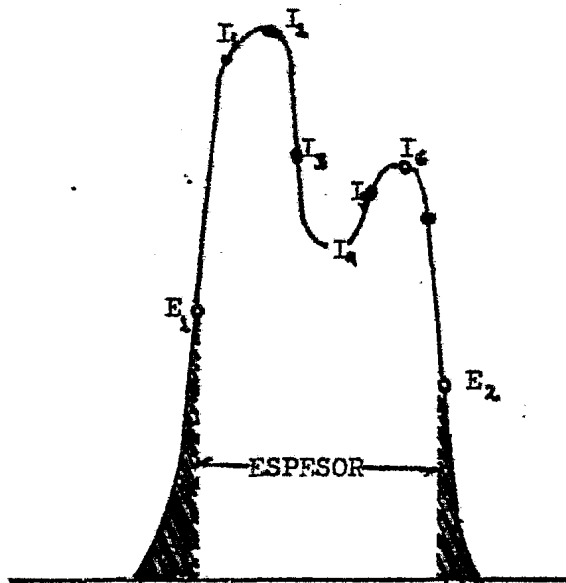
donde : G = ley verdadera, y G_t = ley media radiométrica del depósito.

Si estas condiciones varían se necesita aplicar correcciones con nomogramas (Rhodes y Mott). Cabe aclarar que las condiciones anteriores son las proporcionadas por la Comisión Americana de Energía (AEC).

III. INTERPRETACION CUANTITATIVA DE REGISTROS DE RAYOS GAMMA.

Hasta aquí se puede decir que para determinar la cantidad de mineral radiactivo presente en una formación geológica, se puede utilizar la ecuación 2.1.

La aplicación práctica de esta fórmula consiste en determinar el espesor T midiendo la distancia entre los puntos sobre los flancos de la anomalía que representan la mitad de la amplitud máxima del lado correspondiente de la anomalía, según se observa en la figura 9. Se calcula el área bajo la curva entre éstos dos puntos midiendo, a intervalos de medio o un pie, la cantidad de cuentas por segundo correspondiente sobre la anomalía, después usando la regla trapezoidal se suman éstos valores, conocidos también como deflexiones del registro, esto dará el área central; el área en los extremos de la anomalía se calcula sumando los valores extremos de la amplitud media y multiplicando éste resultado por un factor de 1.38 que es un factor de "cola" usado por la A.E.C. La suma del área central y el área de colas dará el área total que multiplicada por K y dividida entre T proporciona la ley media en el intervalo. En la figura 9 se muestran las expresiones utilizadas en el cálculo.



$$\bar{G} = \frac{K A}{T}$$

$$G = \frac{K \left[\frac{B}{4T} I_0 + 1.38 (E_1 + E_2) \right]}{T}$$

Fig 9. CALCULO DE LA LEY MEDIA EN UN INTERVALO POR LA FORMA CONVENCIONAL.

Para una mayor abundancia en el cálculo se recomienda ver a Hurtado C.M. tesis U.N.A.M. 1976.

Como se puede observar la validez de este método convencional depende de la interpretación total de la anomalía de tal manera que cuando una porción de anomalía se selecciona por separado por ejemplo, cuando existe una capa no radiactiva entre dos radiactivas o cuando existen capas de baja ley entre capas de alta ley, la exactitud se sacrifica. Este problema puede llevar a serios errores en la estimación de reservas especialmente cuando la mineralización es económicamente marginal.

Para salvar este problema existe un método iterativo (Scott 1963) el cual proporciona la ley media como una función de la profundidad y en este trabajo se propone la técnica de filtrado (Conaway 1978), a continuación se describen los dos métodos.

1 METODO ITERATIVO DE SCOTT

Considerese una zona mineralizada compleja como se muestra en la figura 10 en la que se observan diferentes espesores y contenidos de material radiactivo así como la respuesta obtenida con

el detector en línea continua. Si se construyen capas hipotéticas con espesor de medio pie cada una y con contenido radiactivo derivado de la zona compleja, estas capas producirán anomalías individuales, que combinadas por un método de ensaye y error, generarán una anomalía "aproximante" o sintética la cual se observa en la figura 10 con línea discontinua.

Para poder desarrollar este método es necesario establecer anomalías tipo de medio o un pie de espesor con contenido homogéneo de mineral radiactivo para lo cual es necesario construir modelos experimentales, pero debido a lo delgado de las capas es difícil controlar el escape del gas radón, por lo que el registro de prueba fue corrido (A.E.U.) en una zona de cuatro pies de espesor compuesta de mineralización homogénea por lo que se consideró esta zona como si estuviera formada por capas de medio pie con el mismo contenido de material radiactivo como se muestra en la figura 11. De este modo para obtener los valores de la anomalía tipo de medio pie, simplemente se sustraen valores sucesivos a lo largo de la anomalía de cuatro pies, este es : $B-A=a$, $C-B=b$, etc; el mismo procedimiento se utilizó para obtener la anomalía tipo de un pie.

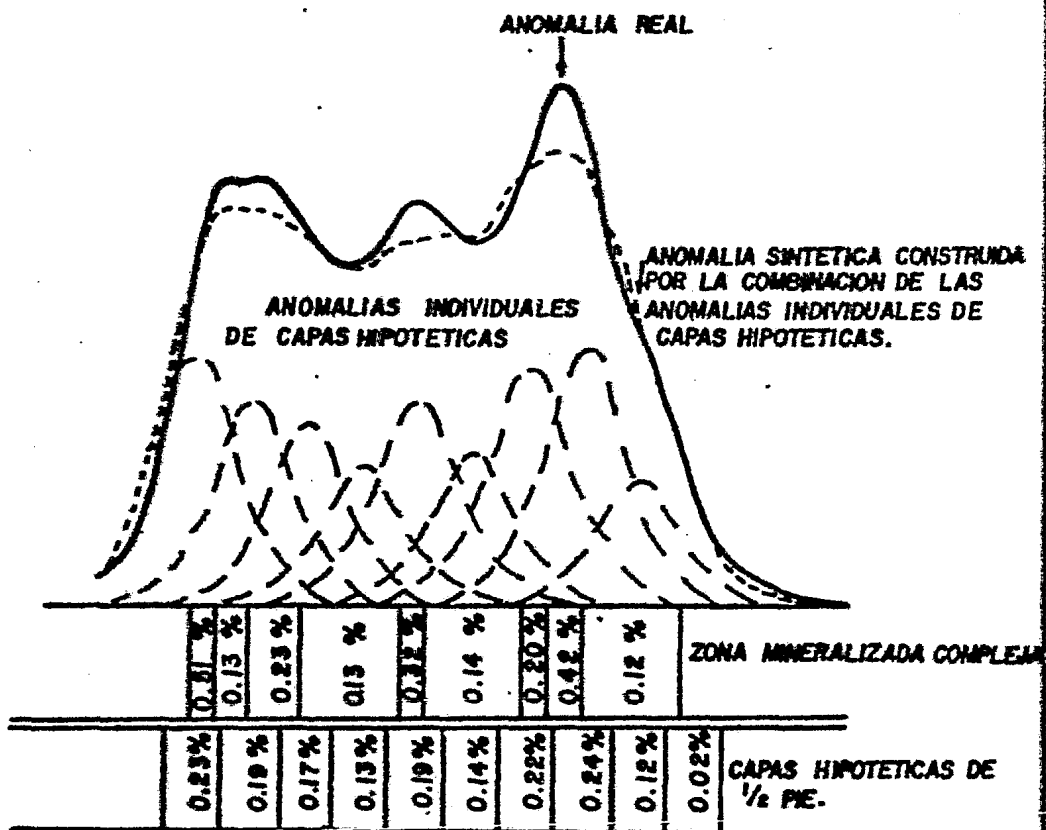


Fig. 10 ZONA MINERALIZADA COMPLEJA DIVIDIDA EN CAPAS HIPOTETICAS DE 1/2 PIE.

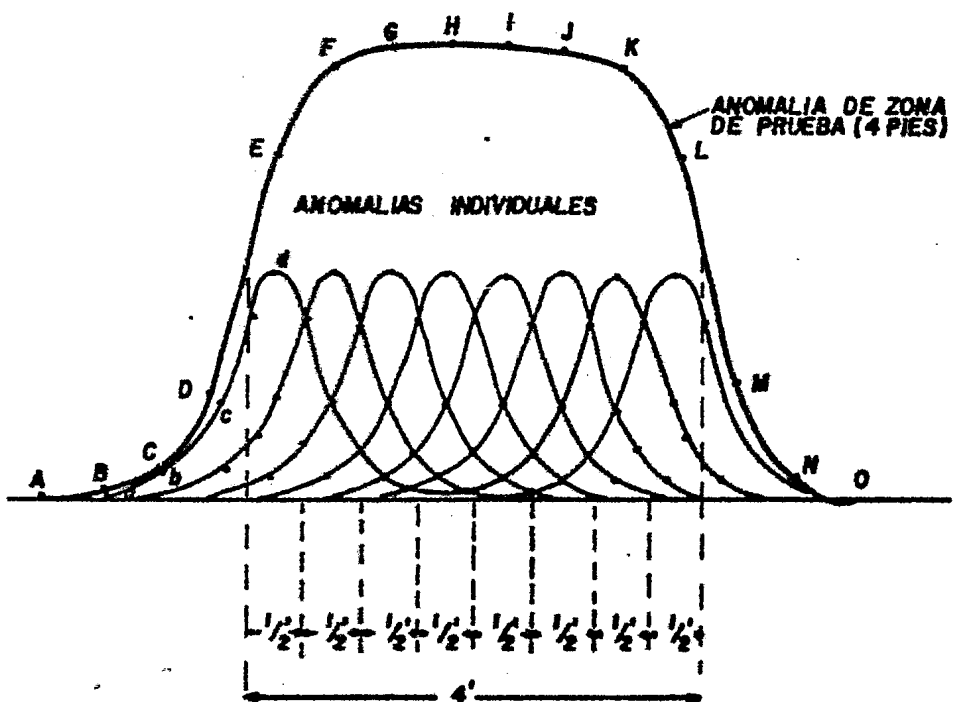


FIG 11 ANOMALIA REAL DE 4 PIES DE ESPESOR Y ANOMALIAS HIPOTETICAS DE $\frac{1}{2}$ PIE DE ESPESOR.

Por convención las unidades de las deflexiones (valores muestrados del registro) están en conteos por segundo corregidas por pérdidas en tiempo muerto y cualquier condición no estándar.

Una vez conocida la forma de las anomalías tipo de medio y un pie (figuras 12 y 13), se pueden establecer leyes equivalentes a lo largo de las anomalías tipo, estas leyes equivalentes se expresan en las tablas IV y V como valores promedio de los valores porcentuales de la anomalía tipo correspondiente.

T A B L A I V.

LEYES EQUIVALENTES A INTERVALOS DE 1/2 PIE A LO LARGO DE LA ANOMALIA TIPO DE 1/2 PIE.

Distancia al centro de la anomalía (pies)	Ley equivalente
± 0.0 -----	(1.00/2) $\bar{G}=0.50$ G
± 0.5 -----	(0.40/2) $\bar{G}=0.20$ G
± 1.0 -----	(0.09/2) $\bar{G}=0.04$ G
± 1.5 -----	(0.02/2) $\bar{G}=0.01$ G

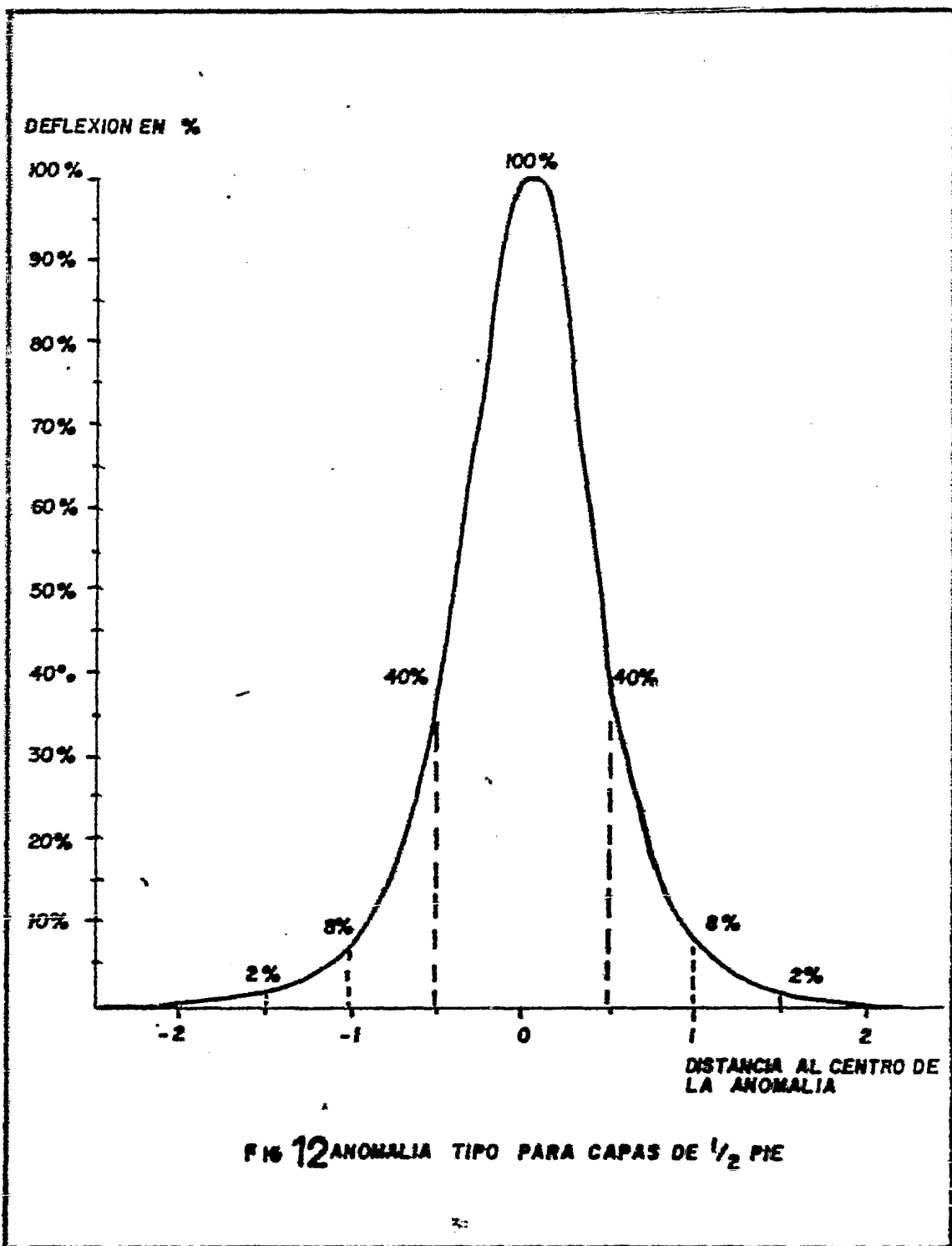
T A B L A V .

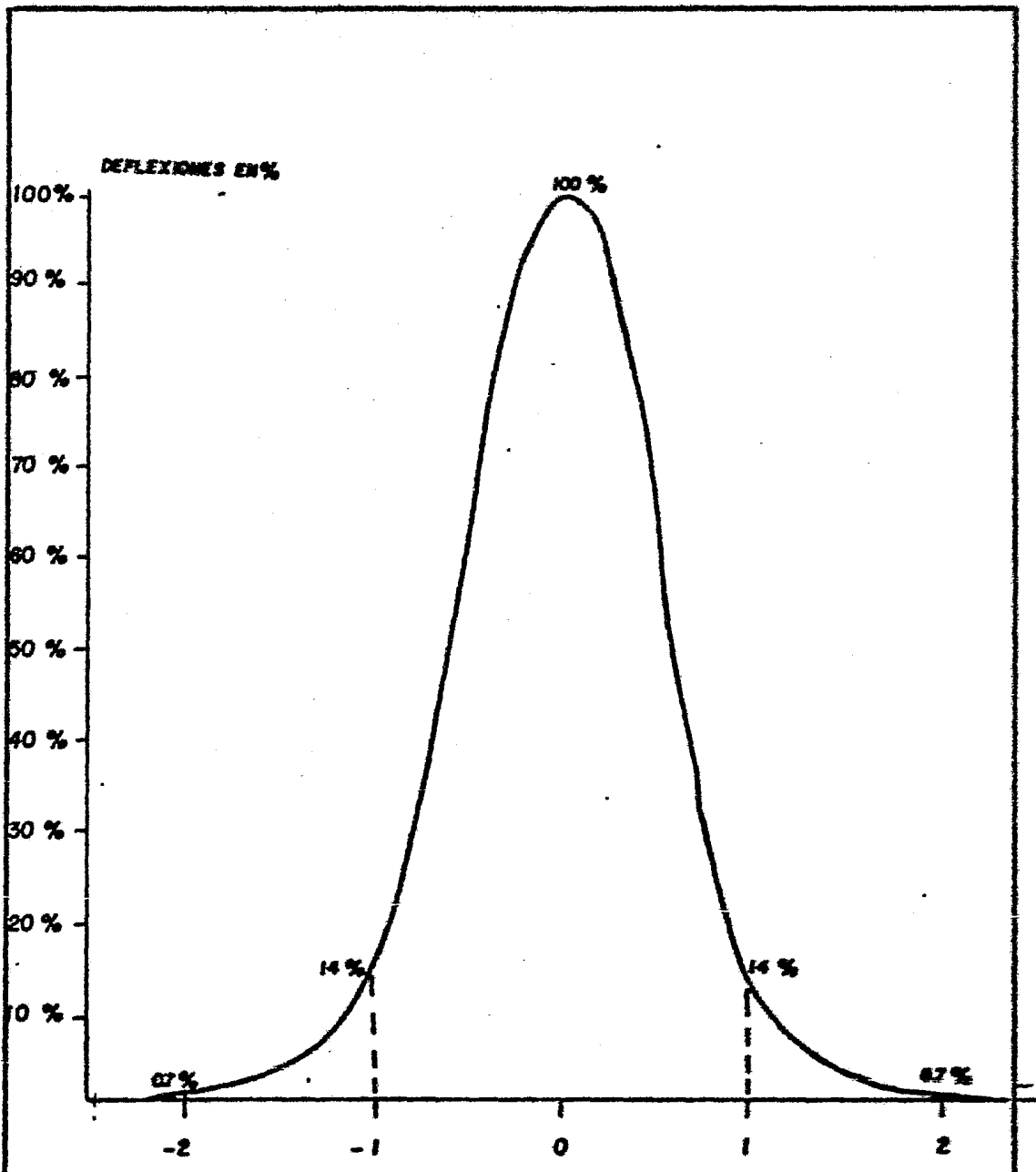
LEYES EQUIVALENTES A INTERVALOS DE 1 PIE A LO LARGO DE LA ANOMALIA TIPO DE UN PIE

Distancia al centro de
la anomalía (pies)

Ley equivalente

±0.0-----	(1.00/1.294)	$\bar{G} = 0.7728G$
±1.0-----	(0.14/1.294)	$\bar{G} = 0.1082G$
±2.0-----	(0.007/1.294)	$\bar{G} = 0.0054G$





DISTANCIA AL CENTRO DE LA ANOMALIA.

Fig. — 13

ANOMALIA TIPO PARA CAPAS DE 1/2 PIE.

2. GENERACION DE LA ANOMALIA SINTETICA.

Si se digitiza el registro a intervalos de medio pie y se representa por N cualquiera de estas lecturas, el área bajo la curva se puede calcular utilizando una sumatoria infinita por lo que el número de lecturas a medio pie será $2T$, por lo tanto:

$$\begin{aligned} A &= 2 \bar{N} T \\ \bar{G} T &= 2 \bar{N} T \cdot K \\ \bar{G} &= 2 K \bar{N} \end{aligned} \quad 3.1$$

que es de la misma forma que 2.8, entonces 3.1 se toma como la primera aproximación de la anomalía real.

Conviene enunciar los parámetros que tomarán parte en el proceso iterativo, estos son:

- \bar{g}_i = ley media asignada a las capas hipotéticas
- C_i = amplitudes de referencia en la anomalía real
- C_i^s = amplitudes en la anomalía sintética

Como se dijo anteriormente, se comienza por convertir a

las deflexiones del registro a ser interpretado en leyes equivalentes usando 3.1 ($g_i = C_i$), la discrepancia entre la anomalía sintética y la real será $C_i - C_i^3$. Entonces el valor de la anomalía sintética se calcula superponiendo los valores de las anomalías individuales, es decir se sumará el cien por ciento de la amplitud de la anomalía central, cuarenta por ciento de las amplitudes de las dos anomalías inmediatamente adyacentes al valor central, ocho por ciento de las amplitudes de las anomalías que se encuentran a un pie del valor central, dos por ciento de las anomalías que se localizan a pie y medio y promediando estas leyes medias.

$$C_i^3 = \frac{2E_{i-3} + 8E_{i-2} + 40E_{i-1} + 100E_i + 40E_{i+1} + 8E_{i+2} + 2E_{i+3}}{2+8+40+100+40+8+2}$$

$$C_i^2 = 0.005 [2(E_{i-3} + E_{i+3}) + 8(E_{i-2} + E_{i+2}) + 40(E_{i-1} + E_{i+1}) + 100E_i]$$

$$C_i^1 = 0.01(E_{i-3} + E_{i+3}) + 0.04(E_{i-2} + E_{i+2}) + 0.20(E_{i-1} + E_{i+1}) + 0.50E_i \quad 3.2$$

Como se puede apreciar, los coeficientes de la ecuación 3.2 son los mismos valores que aparecen en la tabla IV, en esta misma ecuación los subíndices sirven para localizar las capas de medio pie con respecto a la central localizada en i . Después que se ha hecho la nueva aproximación, se compara nuevamente la anomalía sintética con la anomalía real en cada posición

leída del registro y la nueva ley media está dada por:

$$\varepsilon_i(\text{nueva}) = \varepsilon_i + (C_i - C_i^2) \quad 3.3$$

Si el proceso comparativo de las dos anomalías no resulta óptimo, es decir, si los resultados comparativos indican que los valores absolutos de las diferencias es menor a un valor preestablecido, se realiza una segunda iteración. Todo este proceso se repite hasta diez veces si es necesario. En el proceso se puede observar que matemáticamente es posible que aparezcan valores negativos de la ley media calculada, lo que es físicamente imposible, sin embargo la ley media sobre la zona dada será correcto por lo que éste paso en el procesamiento del registro es innecesario e inválido, por lo que se elimina sustituyendo los valores negativos por cero.

El programa que realiza el proceso descrito anteriormente será tratado en el siguiente capítulo.

3. RESPUESTA AL IMPULSO GEOLOGICO (GIR)

Como se puede observar, el método iterativo de Scott re -

sulta un proceso matemático tedioso más que complejo, que se refleja en un tiempo excesivo de cálculo en computadora que es el principal inconveniente del método; por lo que se intentará obtener un método más simple y de igual confiabilidad que el anterior para determinar la distribución de uranio o cualquier otro material radiactivo a lo largo del pozo. Si se aborda el problema por medio de la teoría de señales, se sabe que la sonda detectará la señal original, provocada por el material radiactivo, superpuesta con ruido no deseado. La señal radiactiva es alterada por el medio. Considerese el caso de una capa infinitamente delgada de material radiactivo contenida en un medio homogéneo infinito, la función que expresa la distribución de material radiactivo es un impulso o "spike", esta situación se ilustra en las figuras 14.a y 14.b. Si se corre un registro de rayos gamma bajo condiciones ideales tales como conteos libres de ruido, detector puntual e intervalo de muestreo infinitesimal, la respuesta libre de ruido que se obtiene en el registro se puede observar en la figura 14.c. Esta curva se describe por la expresión:

$$\phi(z) = \frac{\omega}{2} e^{-\omega |z|} \quad 3.4$$

La ecuación 3.4 es conocida como la "respuesta al impul-

so geológico o GIR (geological impulse response). La forma de ob
tener la constante ϵ será discutida después.

4. DETERMINACION DEL GIR.

La forma de la respuesta al impulso geológica se ha deter-
minado experimentalmente en un modelo que contiene un " espesor
infinito " de material radiactivo adyacente a un " espesor infi-
nito " de material estéril. Este modelo se construyó para sor --
tear el problema de tener una capa infinitamente delgada de mi-
neralización. La respuesta que se obtiene al correr lentamente
un sistema de registro de una zona a otra, será una función muy
parecida a la función escalón como se observa en la figura No. 15
En esta figura se puede apreciar que la sonda no detecta el cam-
bio litológico como una subida brusca en el registro (esto daría .
el escalón ideal), sino que la sonda capta el cambio antes de lle-
gar a la discontinuidad.

Sabiendo que la derivada de la función escalón proporcio-
na la función impulso unitario, la derivada de la respuesta mos-
trada en la figura 15 dará la respuesta al impulso unitario geo-
lógico la que se aprecia en la figura 16. Para obtener la deriva-
da se utilizará la fórmula:

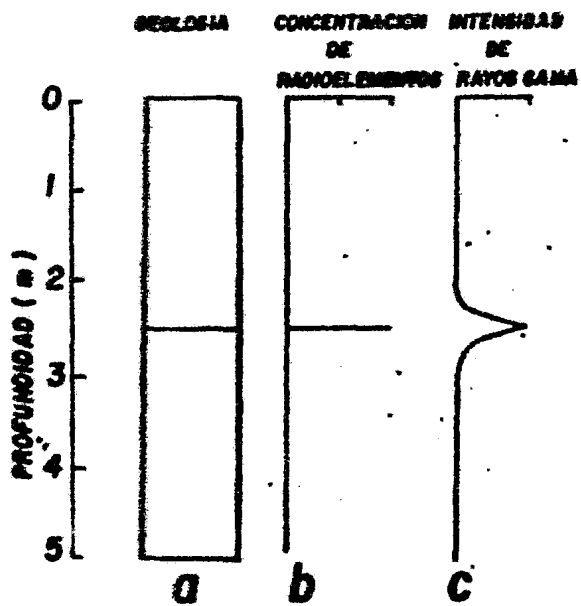


Fig-14.1 (a) COLUMNA GEOLOGICA MOSTRANDO UNA ZONA RADIATIVA INFINITAMENTE DELGADA ENTRE DOS CAPAS ESTERILES.

(b) CONCENTRACION DE RADIOELEMENTOS CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD.

(c) RESPUESTA LIBRE DE RUIDO DE UN DETECTOR PUNTUAL A UNA ZONA MINERALIZADA DELGADA (GIR)

RESPUESTA ESCALON GEOLOGICO)

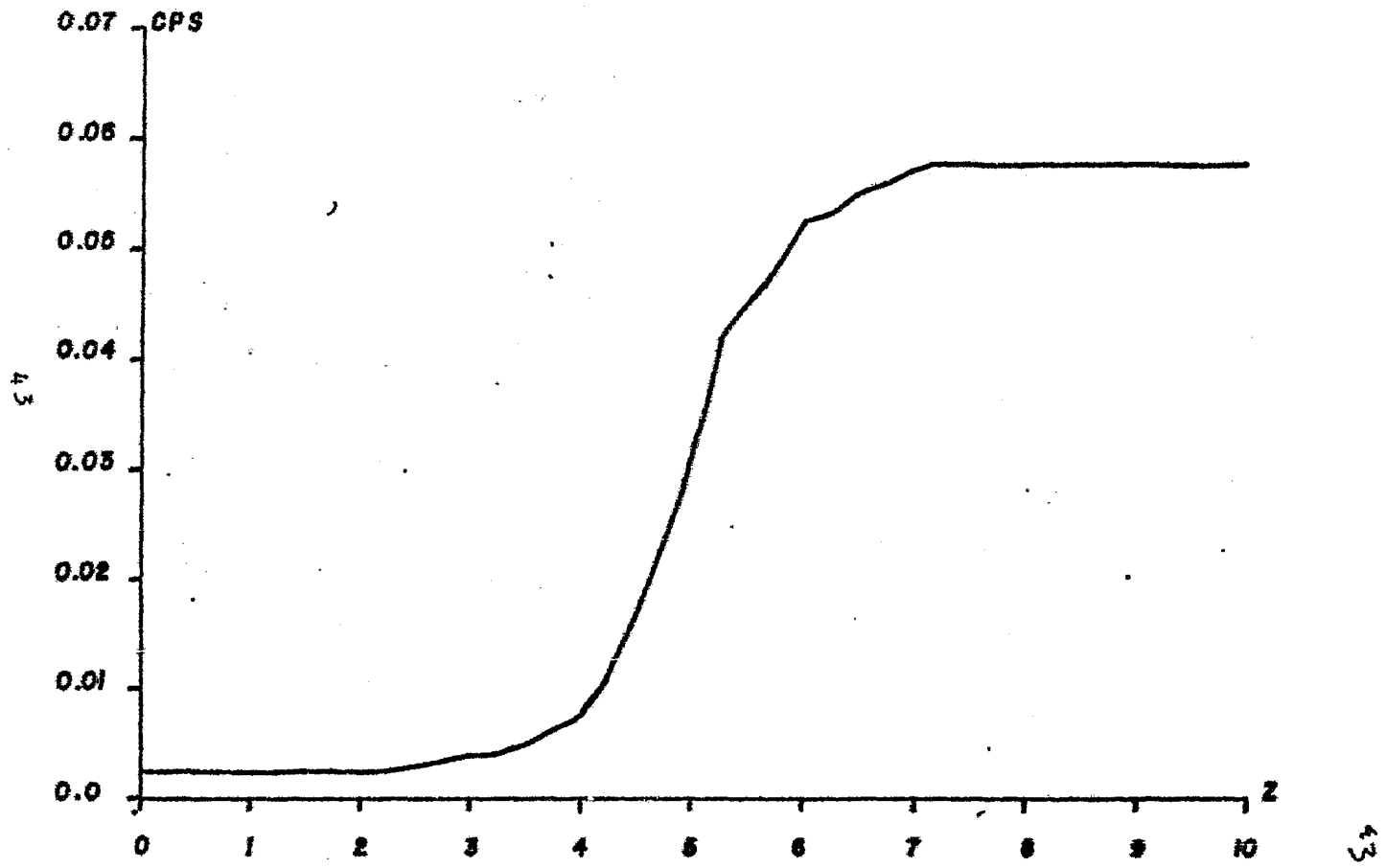


Fig. - 15

$$\hat{U}(Z_i) = \hat{\phi}(Z_i) = \frac{U(Z_{i+1}) - U(Z_i)}{\Delta Z (U_{max} - U_{min})} \quad 3.5$$

donde $U(Z_i)$ es la respuesta escalón geológico, U_{max} y U_{min} son, respectivamente, los valores asintóticos máximo y mínimo alcanzados por la curva e i es un contador entero que incrementa una vez cada ΔZ sucesivo en el registro.

Ahora fijando nuestra atención en la parte derecha de la figura 16 en línea continua (se utilizará esta zona para una mejor visualización de resultados), aproximaremos esta parte por medio de un polinomio para lo cual se empleará la relación:

$$\int_{Z_1}^{Z_2} \left[\sum_{i=0}^n a_i z^i \right] z^j dz = \int_{Z_1}^{Z_2} \phi(z) z^j dz \quad j=0,1,\dots,n \quad 3.6$$

con un intervalo de integración de $Z_1 = 0$ a $Z_2 = 24$ y para $n = 3$ se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} 24a_0 + 288a_1 + 4608a_2 + 82944a_3 &= 0.5196667 \\ 288a_0 + 4608a_1 + 82944a_2 + 1592524.8a_3 &= 3.2241333 \\ 4608a_0 + 82944a_1 + 15925224.8a_2 + 31850496a_3 &= 33.3746133 \\ 82944a_0 + 1592524.8a_1 + 31850496a_2 + 655210203.4a_3 &= 428.4450133 \end{aligned}$$

y el polinomio aproximante es:

$$\phi(z)_{\text{aprox}} = 0.07121 - 0.00904z + 0.00048z^2 - 0.00001z^3 \quad 3.7$$

Esta aproximación se muestra en la figura 16 con línea discontinua.

Se puede considerar que el polinomio aproximante es una descomposición en serie de potencias de una función del tipo:

$$\phi(z) = K e^{-cz} \quad \forall z \geq 0 \quad 3.8$$

y por otro lado la serie de Mc.Laurin de e^x es:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad 3.9$$

para el caso $x = -cz$ sustituyendo en 3.8 y 3.9

$$\phi(z) = K \sum_{n=0}^3 \frac{(-cz)^n}{n!} \quad 3.10$$

se tendrá que de 3.10 y 3.7

$$K \left(1 - \frac{cz}{1} + \frac{c^2 z^2}{2} - \frac{c^3 z^3}{3!} \right) = 0.07121 - 0.00904z + 0.00048z^2 - 0.00001z^3$$

de donde:

$$K = 0.07121$$

y tres valores para C

$$C = \begin{cases} 0.12695 \\ 0.11611 \\ 0.09445 \end{cases}$$

cuyo promedio es $C = 0.1125$ por lo que C es aproximadamente el doble de K por lo que:

$$C = 2 K$$

si

$$C = \alpha \quad \Rightarrow \quad \alpha = 2 K$$

$$K = \frac{\alpha}{2}$$

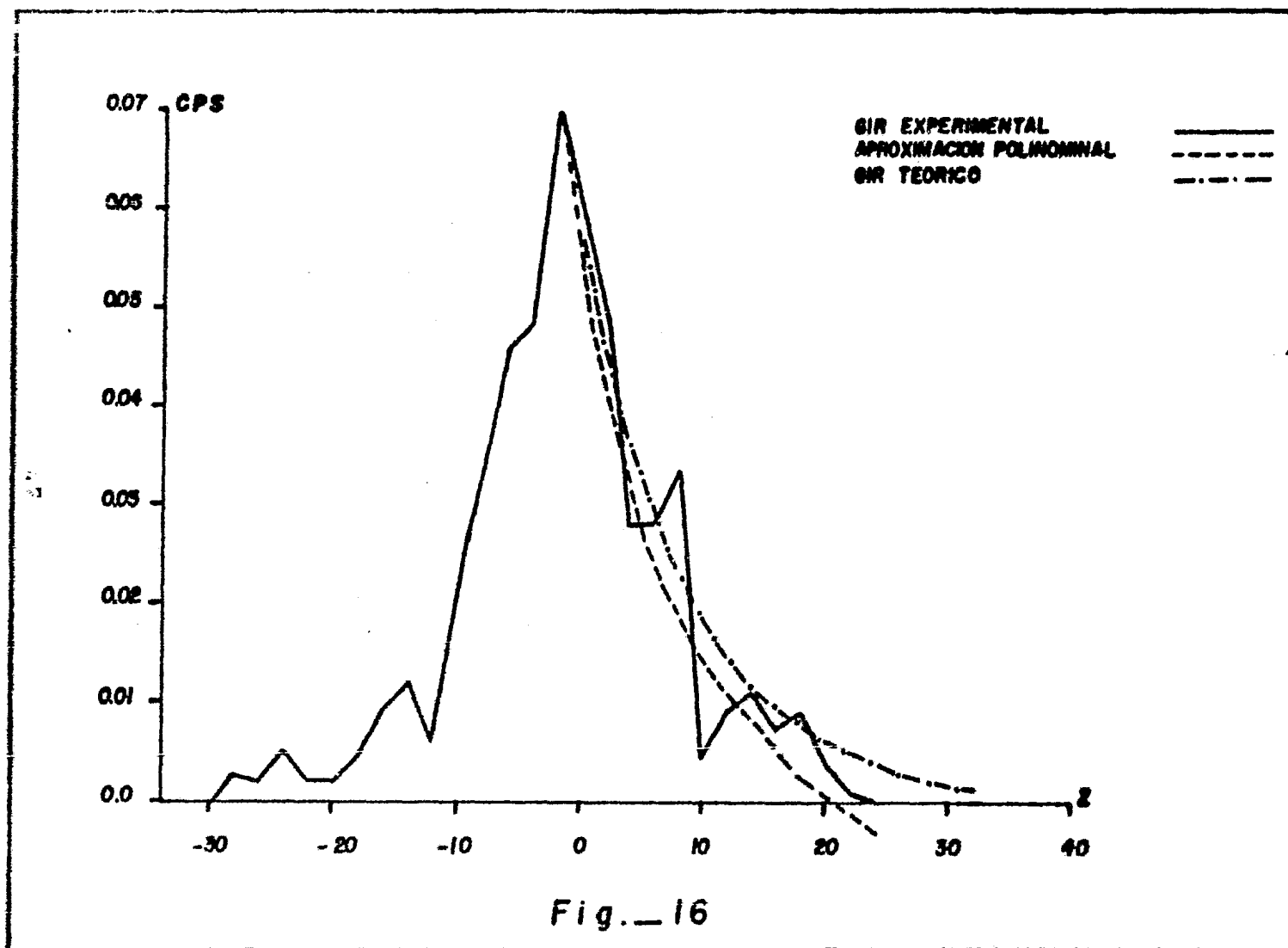
entonces

$$\phi(z) = K z^{-Cz} = \frac{\alpha}{2} z^{-\alpha z}$$

7.11

para la parte positiva de la respuesta al impulso unitario (fig.

7.11)



De lo anterior se puede decir que la respuesta al impulso geológico puede ser razonablemente aproximada por la función exponencial

$$\phi(z) = \begin{cases} \frac{R}{2H} e^{\alpha z} & -\infty \leq z \leq 0 \\ \frac{R}{2H} e^{-\alpha z} & 0 \leq z \leq \infty \end{cases}$$

o bien
$$\phi(z) = \frac{R}{2} e^{-\alpha |z|} \quad \text{como en 3.4}$$

La anterior forma de obtener la constante α resulta demasiado tediosa y solo se desarrolló para objetivizar la obtención de la expresión matemática del GIR. A continuación se presenta una manera más simple de obtener α y con ello una mejor aproximación del GIR teórico.

La constante α es un parámetro que depende de el diámetro del pozo, contenido de fluidos, densidad de la roca, pero no del contenido de radioelementos. La constante α puede encontrarse graficando el logaritmo natural de la razón de conteo de rayos gamma como una función de la profundidad. Una vez hecho esto se ajustan dos rectas aproximadas como se muestra en la figura 17 ; la pendiente de la gráfica semilogarítmica fuera de la zona radiactiva es igual a α ; usando los datos de la respuesta al impulso

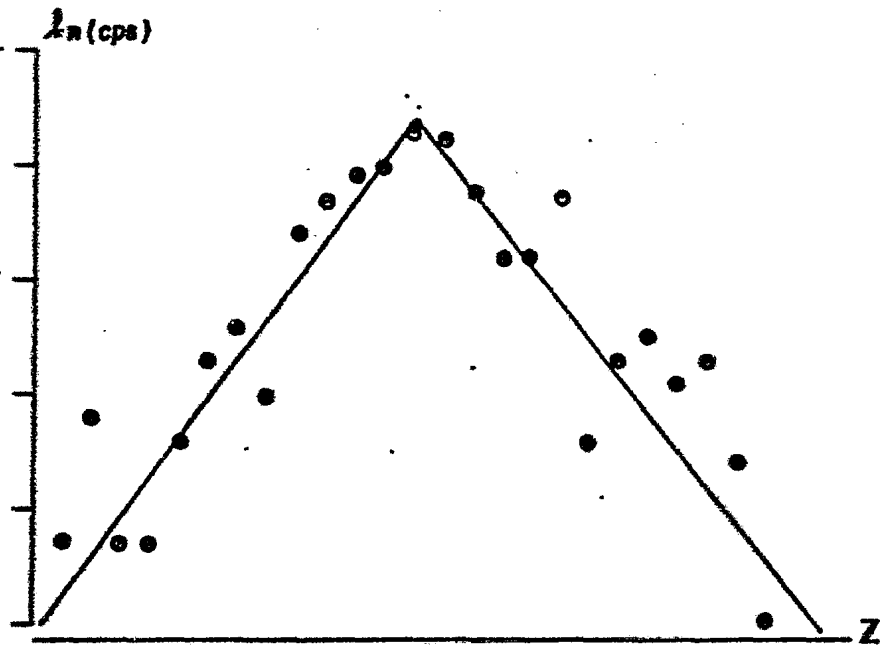


Fig. - 17

REGRESION LINEAL PARA OBTENER CC

geológico obtenido experimentalmente se tiene que $\alpha = 0.142$ el GIR teórico utilizando este valor se muestra en la figura 16 , a la derecha con línea discontinua y a puntos. En el capítulo IV se describirá un programa de TI-59 para la obtención de la constante α .

5. METODO DE FILTRADO.

Volviendo nuevamente al planteamiento hecho al principio del apartado anterior en el que se intenta determinar la ley media de un yacimiento radiactivo como función de la profundidad , la salida del sistema puede visualizarse como una entrada que ha pasado por una serie de filtros pasa-bajas de varias características tales como longitud del detector, intervalo de conteo y el GIR.

La figura 18 muestra una distribución simulada de material radiactivo $C(Z)$; el intervalo de digitización es de $\Delta Z=2\text{cm}$ con capas de espesores de 10cm , una variación lineal, tres capas de 2 cm -y una capa infinitesimal, con diferentes separaciones y leyes medias. La figura 19 muestra el registro de rayos gamma como sería visto por un detector puntual es decir, la distribución si-

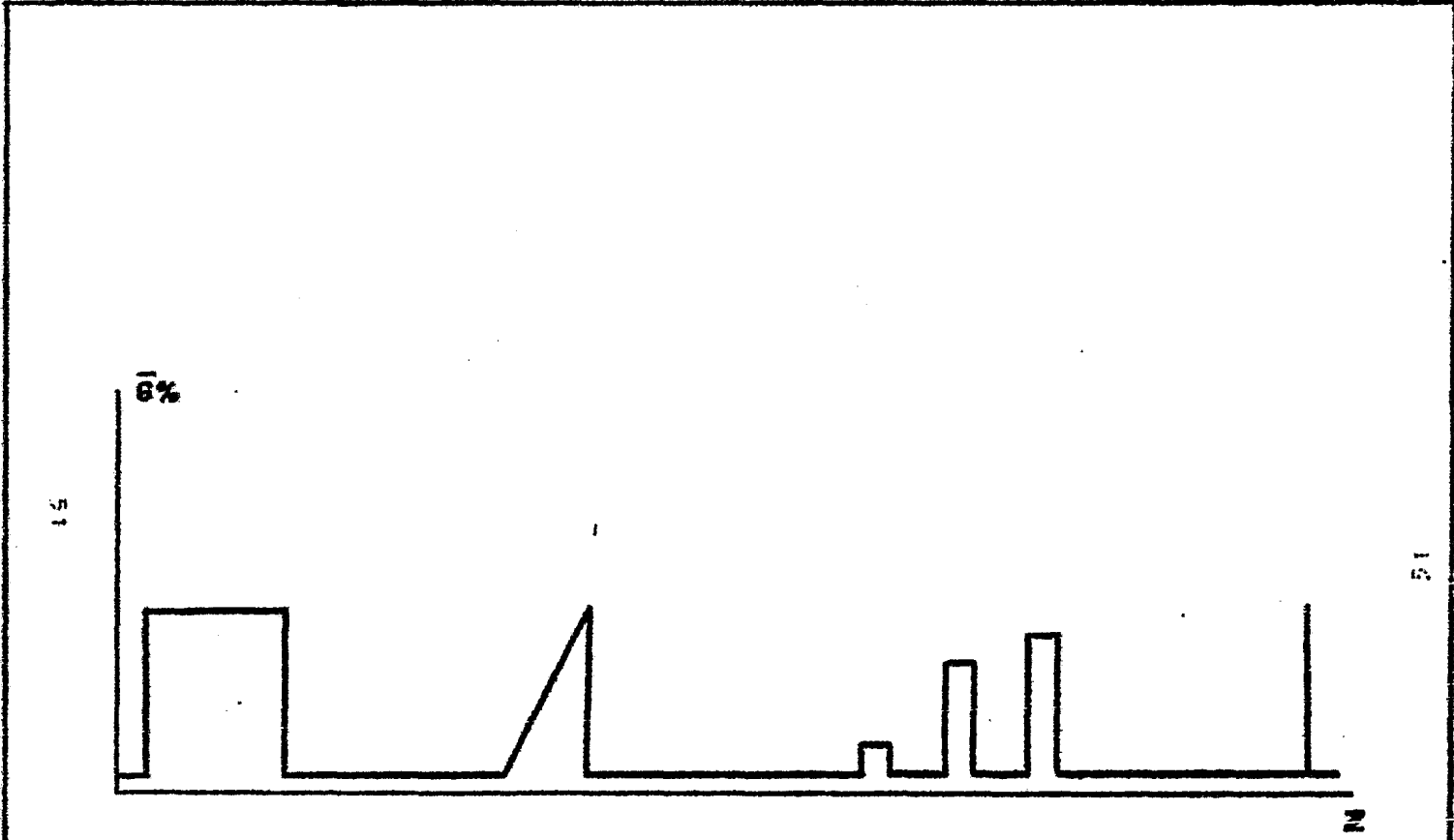


Fig. 18
DISTRIBUCION SIMULADA DE RADIOELEMENTOS

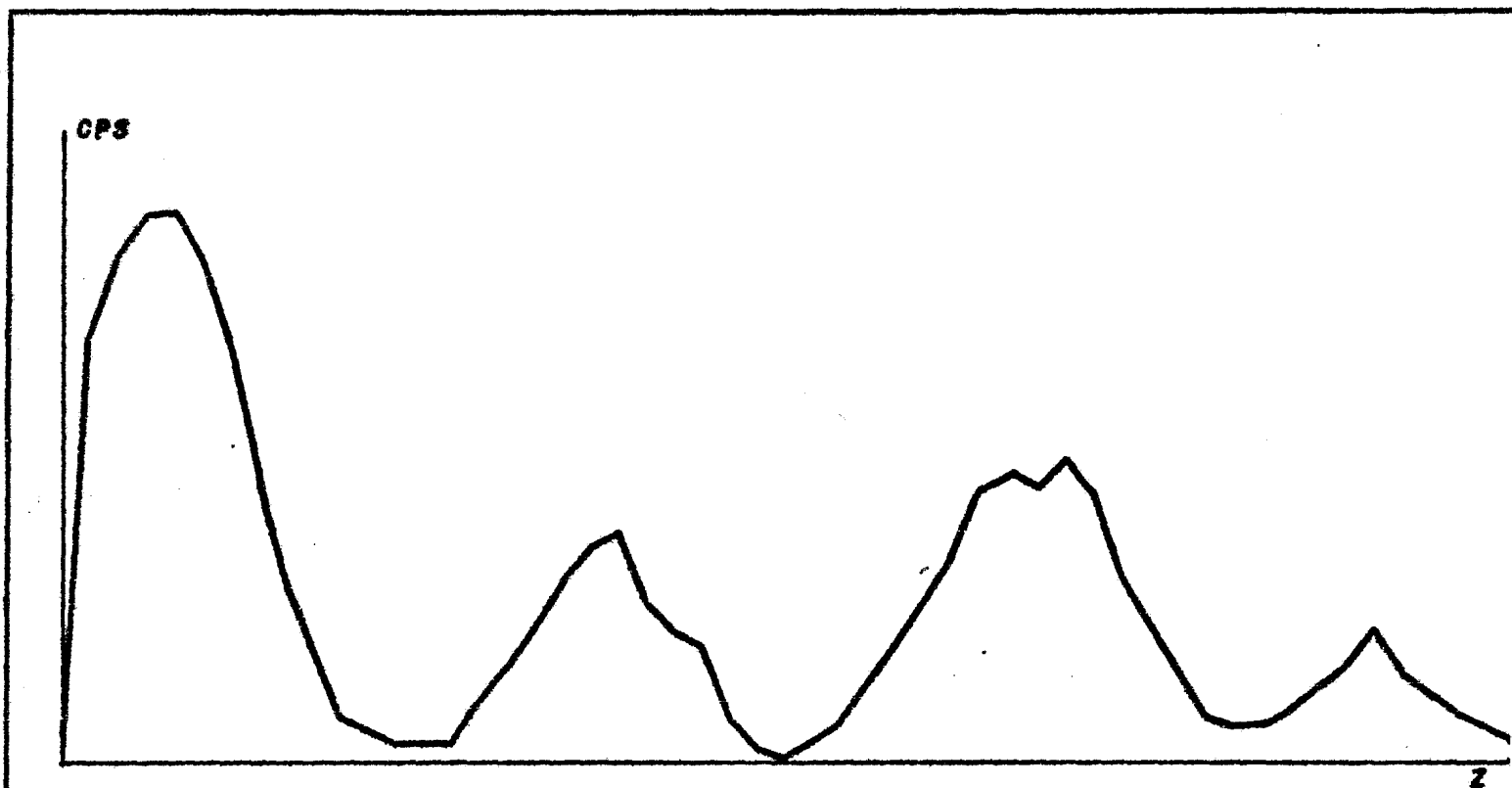


Fig. - 19

REGISTO SINTETICO DE RAYOS GAMA.

mulada ha sido convolucionada con la respuesta al impulso geológico para producir éste registro ideal de rayos gamma. Los parámetros utilizados para crear el registro ideal son $\kappa=0.14$, velocidad del registro $V=5$ cm/seg, tiempo de conteo $t=0.1$ seg, $\Delta Z=2$ cm y la constante de calibración $K=0.33$ ppm seg/cont. Para obtener la distribución original de radioelementos, es necesario DECONVOLUCIONAR el registro ideal de rayos gamma, por lo que es necesario diseñar un filtro que elimine el efecto del GIR.

Como se vió en la sección anterior la función $\phi(Z)$ provee una aproximación razonable del GIR. Se puede trabajar con $\phi(Z)$ en el dominio de las frecuencias para obtener un filtro inversor.

Aplicando la transformada de Fourier a la ecuación 3.4:

$$F[\phi(z)] = \int_0^{\infty} \phi(z) e^{-i\omega z} dz$$

$$F[\phi(z)] = \int_0^{\infty} e^{-\kappa z} e^{-i\omega z} dz$$

$$\phi(\omega) = \frac{\kappa}{\kappa + i\omega} \int_0^{\infty} e^{-z(\kappa + i\omega)} dz + \frac{\kappa}{\kappa - i\omega} \int_0^{\infty} e^{-z(\kappa - i\omega)} dz$$

$$\phi(\omega) = \frac{\kappa}{\kappa + i\omega} \int_0^{\infty} e^{-z(\kappa + i\omega)} dz + \frac{\kappa}{\kappa - i\omega} \int_0^{\infty} e^{-z(\kappa - i\omega)} dz$$

$$\Phi(\omega) = \frac{\alpha}{2} \left[\frac{1}{\alpha - i\omega} e^{Z(\alpha - i\omega)} \Big|_0^{\infty} - \frac{1}{\alpha + i\omega} e^{-Z(\alpha + i\omega)} \Big|_0^{\infty} \right]$$

$$\Phi(\omega) = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{1}{\alpha - i\omega} + \frac{1}{\alpha + i\omega} \right)$$

$$\Phi(\omega) = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{2\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \quad 3.12$$

Como se señaló anteriormente el registro ideal se obtiene de la convolución del GIR teórico con la distribución real de material radiactivo.

$$C(Z) = G(Z) * \phi(Z)$$

en el dominio de las frecuencias se tiene

$$C(\omega) = G(\omega) \cdot \Phi(\omega)$$

por lo que si se desea obtener la distribución real de radioelementos:

$$G(\omega) = C(\omega) \frac{1}{\Phi(\omega)} \quad 3.13$$

Entonces el operador inversor o filtro está dado en el dominio de las frecuencias como:

$$\begin{aligned}\Phi^{-1}(\omega) &= \frac{1}{\Phi(\omega)} \\ &= \frac{2}{\alpha} \frac{\alpha^2 + \omega^2}{2\alpha} \\ \Phi^{-1}(\omega) &= 1 + \frac{\omega^2}{\alpha^2}\end{aligned}\quad 3.14$$

transformando al dominio del espacio :

$$\mathcal{F}^{-1}[\Phi^{-1}(\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi^{-1}(\omega) e^{i\omega z} d\omega$$

$$\Phi^{-1}(z) = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega z} d\omega + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\omega^2}{\alpha^2} e^{-i\omega z} d\omega \right)$$

$$\Phi^{-1}(z) = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega z} d\omega + \frac{1}{\alpha^2} \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 e^{i\omega z} d\omega \right)$$

La primera integral corresponde a la función impulso unitario y la segunda corresponde a su segunda derivada (Javid y Brenner 1972) por lo que:

$$\Phi^{-1}(z) = \delta(z) - \frac{1}{\alpha^2} \delta''(z) \quad 3.15$$

La distribución de material radiactivo a lo largo del pozo se obtiene convolucionando el operador inversor 3.15 con el registro medido de rayos gamma $C(Z)$

$$g(z) = \delta^{-1}(z) * C(z)$$

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta^{-1}(z) C(z-z) dz$$

$$g(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(z) C(z-z) dz - \frac{1}{\alpha^2} \int_{-\infty}^{\infty} \delta''(z) C(z-z) dz$$

$$g(z) = C(z) - \frac{1}{\alpha^2} \frac{d^2}{dz^2} C(z) \quad 3.16$$

Lo que quiere decir que la distribución de material radiactivo se obtendrá restando la segunda derivada del registro medido, multiplicada por un factor $1/\alpha^2$, del mismo registro medido; ante la imposibilidad de contar con la expresión teórica del registro medido, se aproximará la segunda derivada de los datos digitizados del registro en el punto Z_i por:

$$\frac{d^2 C}{dz^2} \Big|_i = \frac{1}{(\Delta Z)^2} [C(Z_{i+1}) + C(Z_{i-1}) - 2C(Z_i)] \quad 3.17$$

donde ΔZ es el intervalo de muestreo, la cantidad de material ra diactivo en el punto Z_i está dado por:

$$g(Z_i) = C(Z_i) - \frac{1}{\alpha \Delta Z^2} \left[C(Z_{i+1}) + C(Z_{i-1}) - 2C(Z_i) \right]$$

$$\dot{g}(Z_i) = -C(Z_{i+1}) \frac{1}{(\alpha \Delta Z)^2} + C(Z_i) \left[1 + \frac{2}{(\alpha \Delta Z)^2} \right] - C(Z_{i-1}) \frac{1}{(\alpha \Delta Z)^2}$$

o bien

$$g(Z_i) = C(Z_i) * \left(-\frac{1}{(\alpha \Delta Z)^2}, 1 + \frac{2}{(\alpha \Delta Z)^2}, -\frac{1}{(\alpha \Delta Z)^2} \right)$$

esto indica que el operador inversor se reduce a un filtro de tres puntos

$$\left[-\frac{1}{(\alpha \Delta Z)^2}, 1 + \frac{2}{(\alpha \Delta Z)^2}, -\frac{1}{(\alpha \Delta Z)^2} \right] \quad 3.18$$

El factor de calibración del sistema, K , y el tiempo de conteo $\Delta t = \Delta Z / V$, pueden incorporarse al filtro como sigue.

$$-\frac{K}{\Delta t (\alpha \Delta Z)^2}, \frac{K}{\Delta t} + \frac{2K}{\Delta t (\alpha \Delta Z)^2}, -\frac{K}{\Delta t (\alpha \Delta Z)^2} \quad 3.19$$

Este no es un operador exacto sin embargo el error introducido dependerá del parámetro ΔZ ; entre más corto sea ΔZ , la la aproximación será mejor. Este operador puede ser aplicado a los

datos del registro empleando convolución discreta para recobrar la distribución real de radioelementos; esta convolución puede realizarse fácilmente en una computadora digital usando un algoritmo simple como la subrutina FOLD dada por Robinson y Sílvia (1978); ante la imposibilidad de transportar una computadora a los centros de trabajo se puede hacer un estudio preliminar utilizando un programa para TI-59 en las zonas de mayor interés en el registro. Ambos programas serán tratados ampliamente en el siguiente capítulo.

6. RELACION ENTRE EL METODO ITERATIVO Y EL METODO DE FILTRADO

Al llegar a este punto surgen tres preguntas relacionadas con los dos métodos estudiados: ¿Son los resultados de los dos métodos equivalentes?; ¿Cuál es más eficiente?; ¿cuales son las ventajas y desventajas de cada uno? . Las respuestas a estas preguntas pueden obtenerse de consideraciones teóricas y estudios de computadora; en este capítulo se analizarán las primeras.

El corazón del algoritmo iterativo dado por Scott es en realidad una convolución según se puede apreciar en la ecuación 3.4 que se puede expresar de la siguiente manera:

$$S_i^0 = S_i * (0.01, 0.04, 0.20, 0.50, 0.20, 0.04, 0.01)$$

y si se representa por S al arreglo de leyes medias equivalentes se tendrá:

$$C_i^j = S_i * S_i^j$$

que es la convolución digital, entonces se observa que la contribución del i -ésimo paso en la iteración al valor de la distribución de material radiactivo $g(Z)$ está dado por la discrepancia $C_i - C_i^j$ que se llamará $b_i(Z)$, entonces se tiene:

Estado inicial.	$b_0(Z) = C(Z)$
Contribución 1a. iteración	$b_1(Z) = C(Z) - C(Z) * S(Z)$
" 2a. "	$b_2(Z) = C(Z) - 2C(Z) * S(Z) + C(Z) * S(Z) * S(Z)$
" 3a. "	$b_3(Z) = C(Z) - 3C(Z) * S(Z) + 3C(Z) * S(Z) * S(Z) - C(Z) * S(Z) * S(Z) * S(Z)$

onde $C(Z)$ es el registro medido. Expresando estas discrepancias en el dominio de las frecuencias

$$B_0(\omega) = C(\omega)$$

$$B_1(\omega) = C(\omega) - C(\omega) \cdot S(\omega)$$

$$B_1(\omega) = C(\omega) - 2C(\omega)S(\omega) + C(\omega)S^2(\omega)$$

$$B_2(\omega) = C(\omega) - 3C(\omega)S(\omega) + 3C(\omega)S^2(\omega) - C(\omega)S^3(\omega)$$

en la i -ésima iteración será

$$B_i(\omega) = C(\omega) [1 - C(\omega)]^i \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

Se puede demostrar que la suma acumulativa de las discrepancias dará el registro procesado después de n iteraciones esto es:

$$G_n(\omega) = \sum_{i=0}^n B_i(\omega) = \sum_{i=0}^n C(\omega) [1 - C(\omega)]^i$$

$$G_n(\omega) = C(\omega) \sum_{i=0}^n [1 - S(\omega)]^i$$

3.20

Ahora analizando la convergencia de la sumatoria

$$\sum_{i=0}^n [1 - S(\omega)]^i$$

haciendo $1 - S(\omega) = a$ se tiene

$$\sum_{i=0}^n a^i = 1 + a + a^2 + \dots + a^{n-1} + a^n \quad 3.21$$

multiplicando ambos miembros por a

$$\sum_{i=0}^n a^{i+1} = a + a^2 + a^3 + \dots + a^n + a^{n+1} \quad 3.22$$

restando 3.22 de 3.21 y simplificando

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n a^i - \sum_{i=0}^n a^{i+1} &= 1 - a^{n+1} \\ \sum_{i=0}^n (a^i - a^{i+1}) &= 1 - a^{n+1} \\ \sum_{i=0}^n a^i (1 - a) &= 1 - a^{n+1} \\ \sum_{i=0}^n a^i &= \frac{1 - a^{n+1}}{1 - a} \end{aligned}$$

regresando a la forma original

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n [1 - S(\omega)]^i &= \frac{1 - [1 - S(\omega)]^{n+1}}{1 - [1 - S(\omega)]} \\ \sum_{i=0}^n [1 - S(\omega)]^i &= \frac{1}{S(\omega)} + \frac{[1 - S(\omega)]^{n+1}}{S(\omega)} \end{aligned}$$

Se sabe que $S(\omega)$ es la transformada de Fourier de la función mostrada en la Tabla IV, que son las leyes equivalentes a intervalos de medio pie utilizados para generar la anomalía sintética, esta transformada tomó valores de 0 a 1 según se aprecia

en la figura 20 por lo que cuando n es muy grande;

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[1 - s(\omega) \right]^i = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{s(\omega)} + \frac{\left[1 - s(\omega) \right]^{n+1}}{s(\omega)} \right\}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[1 - s(\omega) \right]^i = \frac{1}{s(\omega)}$$

entonces la ecuación 3.20 se transforma en:

$$G_n(\omega) = C(\omega) \cdot \frac{1}{s(\omega)}$$

que es idéntica a la ecuación 3.13.

Lo anterior demuestra que la técnica de filtrado y el método iterativo de Scott para el procesado de registros de rayos gamma son teóricamente operaciones equivalentes.

7. INTERVALO DE MUESTREO.

En el análisis de la sección 4 se ha asumido un detector puntual; es importante considerar también el efecto de un detector de longitud finita L ; su efecto es análogo a convolucionar el registro de rayos gamma del detector puntual, figura 14c, con un

pulso rectangular de longitud L . En el dominio de las frecuencias es equivalente a la multiplicación por una función $H(\omega)$ la cual es :

$$F(\omega) = L \frac{\text{sen} \frac{\omega L}{2}}{\frac{\omega L}{2}} \quad 3.23$$

La figura 21 muestra los espectros de amplitud del GIR ideal (curva a) y convolucionado con detectores de longitudes 2, 8, 15, y 25 centímetros (curvas b - e respectivamente). La mayor frecuencia de información es la frecuencia de Nyquist f_n que viene dada por :

$$f_n = \frac{1}{2 \Delta Z}$$

Las frecuencias de Nyquist son mostradas para varios valores de ΔZ por líneas verticales discontinuas en la figura 21

Regresando nuevamente a la ecuación 3.23, ésta tiene amplitud cero en $1/L$, $2/L$, $3/L$, etc. (ciclos/cm), en la figura 21 puede verse que el mayor volumen de información en el espectro

de amplitud está en frecuencias menores que el primer corte en cero o sea en $1/L$. Se puede decir que la frecuencia de Nyquist es igual a $1/L$ esto es:

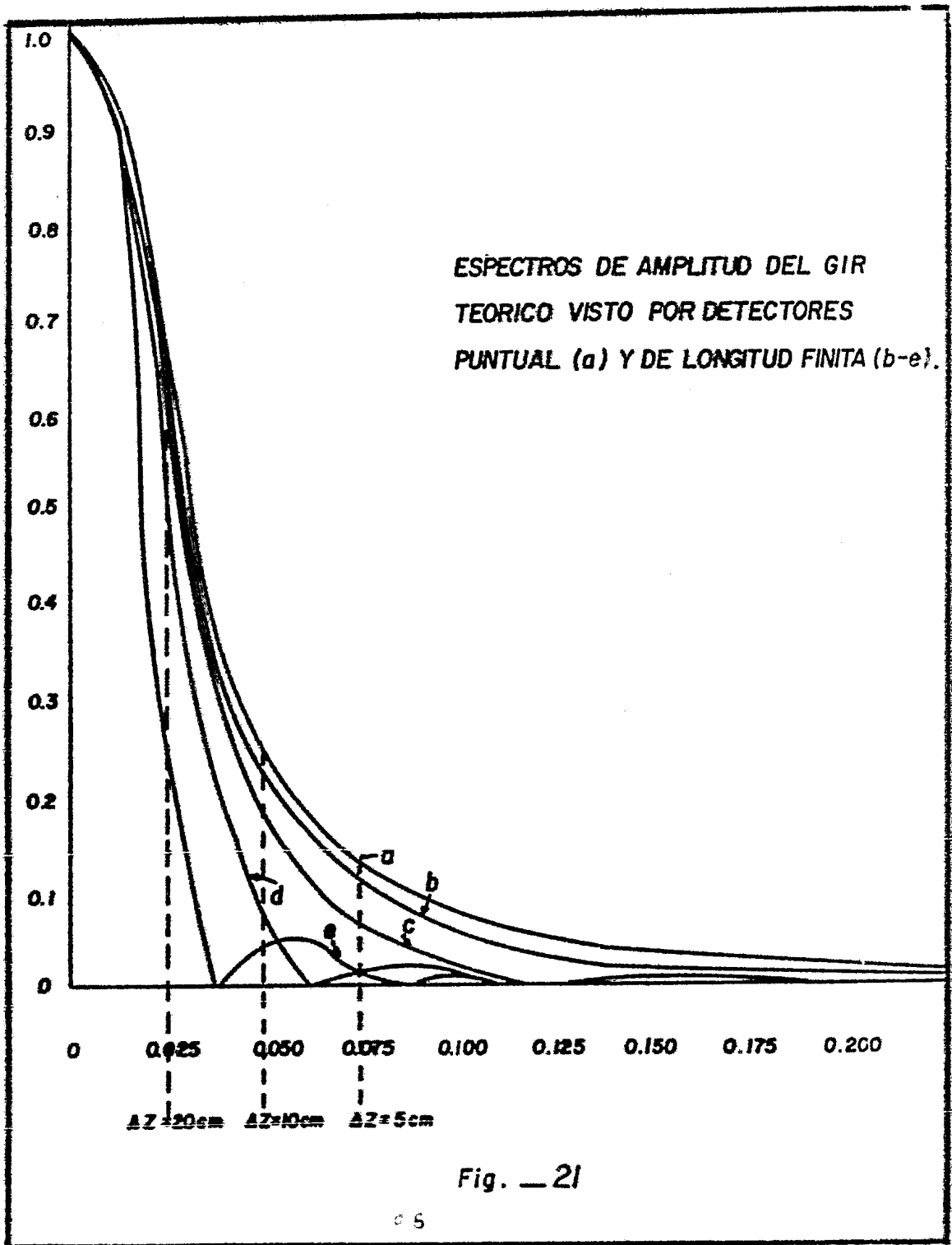
$$f_n = \frac{1}{2\Delta Z} = \frac{1}{L}$$

$$\Delta Z = \frac{L}{2} \quad 3.24$$

Es claro en la figura 21, que si bien un intervalo de muestreo, por decir 10 cm, es bueno para el detector de 25 cm, no dará buenos resultados con detectores de 2 o 8 cm. Esto es debido, a que para éstos detectores una considerable porción de la señal existe en frecuencias mayores que la de Nyquist para un intervalo de 10 cm; por lo tanto, tomando en consideración 3.24, se puede usar un intervalo de muestreo equivalente a la mitad de la longitud del detector o menor, de preferencia un intervalo de 1 o 2 cm cuando se cuente con un equipo digital o un digitizador en el caso de equipo análogo.

3.7 LA CONSTANTE α

Un error en la determinación de la constante α distorsiona-



rá la forma del registro procesado, pero no afectará la precisión del cómputo de la ley media sobre una zona mineralizada entera, esto se debe a que el filtro inversor es lineal y normalizado de tal manera que la suma de los coeficientes es uno.

Para mejores resultados α deberá determinarse bajo condiciones lo más cercanas posible a las condiciones reales, sin embargo, se ha logrado observar experimentalmente que en los primeros cincuenta metros un valor de $\alpha = 0.14$ cm da buenos resultados en tanto que abajo de esta profundidad, $\alpha = 0.18$ cm será más apropiado para procesar cualquier registro.

I V A P L I C A C I O N

1. PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA CONSTANTE ALFA (TI-58, 59)

En la figura 22 se muestra la respuesta al impulso geológico obtenida con este programa, con línea continua se observa la respuesta experimental y con línea discontinua el GIR teórico utilizando el valor calculado de α con este programa. Para calcular la respuesta experimental el programa utiliza la ecuación 3.5 se normalizan y se almacenan a partir de la memoria once , una vez hecho esto utiliza la mitad de los datos para realizar una regresión lineal, con los valores logarítmicos de estos datos, para esto utiliza como subrutina el programa 01 del módulo de programas. Una vez concluida la regresión, calcula la pendiente de la recta ajustada y aparece en la pantalla el valor de ésta que corresponde al valor de α . A continuación se proporcionan las instrucciones de uso y parámetros empleados.

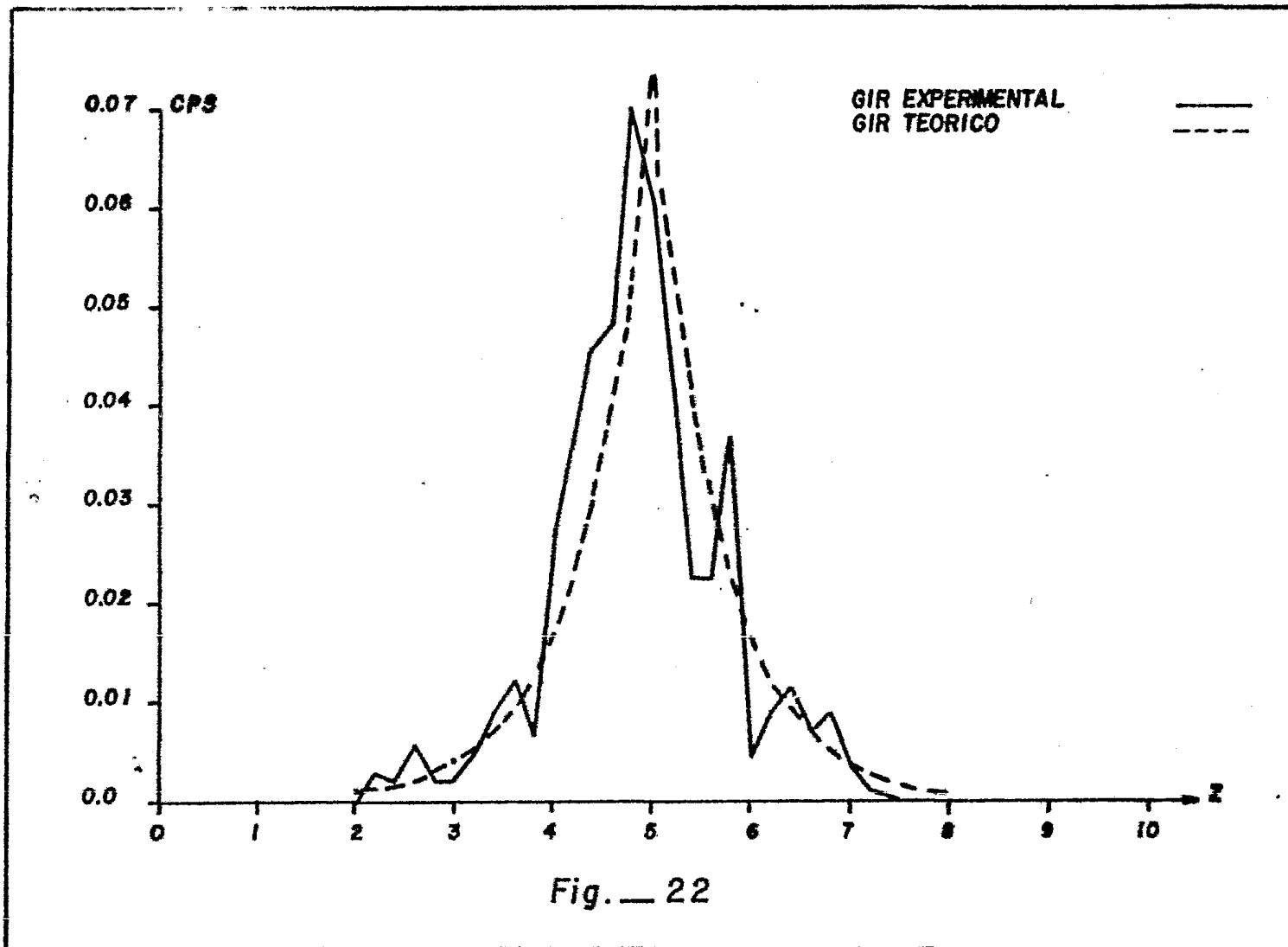


Fig. — 22



PROGRAM DESCRIPTION

El programa calcula primero la derivada de la función escalón, después normaliza estos valores y utiliza la mitad de los datos para efectuar una regresión lineal y obtener el valor de alfa; antes de que este resultado aparezca, un 1 será flasheado.

USER INSTRUCTIONS

STEP	PROCEDURE	ENTER	PRESS	DISPLAY
1	Ajustar a Ceros las Memorias		2nd CMs	0
2	Inicializar el Programa		A	6
	Introducir datos			
3	Profundidad inicial	Zin	R/S	Zin
4	Intervalo de Muestreo	ΔZ	R/S	ΔZ
5	Valor Máximo del Escalón	Cmax	R/S	Cmax
6	Valor Mínimo del Escalón	Cmin	R/S	Cmin
7	Valores Digitizados del Escalón	C(Zi)	R/S	C(Zi)
	⋮	⋮	⋮	⋮
8	Inicia Cálculo de la Derivada		B	
9	Para obtener los valores del GIR y α		R/S	ϕ(Zi)
			⋮	⋮
			R/S	α

USER DEFINED KEYS	DATA REGISTERS (R0-R9)		LABELS (Op 08)																		
A Prepare Memorias	0	0	[Grid of 16x2 key labels]																		
B Deriva	1	1																			
C Regresión Lineal	2	2																			
D	3	3																			
E	4	4																			
F Almacena Datos	5	5																			
G Deriva	6	6																			
H	7	7																			
I	8	8																			
J Normaliza	9	9																			
FLAGS	0	1	2	3	4	5	6	7	X	8	9										



LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS	LOC	CODE	KEY	COMMENTS
0	26	Lbl		5	00	00		11	0	31	SBR
1	11	A		6	95	=		1	25	CLR	
2	06	G		7	55	÷		2	26	Lbl	
3	42	Sto		8	93	RCL		3	18	C'	
4	00	00		9	09	09		4	69	OP	
5	26	Lbl		6	0	95	=	5	20	20	
6	16	A'		1	72	StoInd		6	43	RCL	
7	91	R/s		2	00	00		7	08	OP	
8	69	OP		3	91	R/s		8	44	SUM	
9	20	20		4	69	OP		9	03	OP	
1	0	72	StoInd	5	20	20		12	0	43	RCL
1	00	00		6	69	OP		1	07	OP	
2	16	A'		7	21	21		2	32	Xst	
3	26	Lbl		8	17	B'		3	73	RCLInd	
4	12	B		9	26	Lbl		4	00	00	
5	42	RCL		7	0	25	+	5	23	In Y	
6	00	00		1	71	SBR		6	26	St flg	
7	25	-		2	42	Sto		7	08	g	
8	01	1		3	26	Lbl		8	28	Σ+	
9	04	4		4	10	E'		9	92	DSZ	
2	0	95	=	5	43	RCL		13	0	09	9
1	42	Sto		6	00	00		1	18	C'	
2	04	04		7	67	Xst		2	36	Pgm	
3	43	RCL		8	13	C		3	01	01	
4	00	00		9	73	RCLInd		4	32	Xst	
5	32	Xst		8	0	00		5	91	R/s	
6	21	SBR		1	25	+		6	26	Lbl	
7	42	Sto		2	43	RCL		7	42	Sto	
8	01	1		3	09	09		8	01	1	
9	02	2		4	95	=		9	01	1	
3	0	42	Sto	5	72	StoInd		14	0	42	Sto
1	01	01		6	00	00		1	00	00	
2	43	RCL		7	69	OP		2	92	RTN	
3	08	08		8	20	20		3			
4	65	X		9	10	E'		4			
5	53	1		9	0	26	Lbl	5			
6	43	RCL		1	13	C		6			
7	09	09		2	01	1		7			
8	25	-		3	66	Pause		8			
9	43	RCL		4	43	RCL		9			
4	0	10	10	5	07	07		0			
1	64	1		6	42	Sto		1			
2	95	=		7	10	10		2			
3	42	Sto		8	43	RCL		3			
4	09	09		9	09	09		4			
5	26	Lbl		10	55	÷		5			
6	12	B'		1	02	2		6			
7	43	RCL		2	95	=		7			
8	01	01		3	59	Int		8			
9	67	Xst		4	42	Sto		9			
5	0	85	+	5	09	09					
1	73	RCLInd		6	71	SBR					
2	01	01		7	42	Sto					
3	25	-		8	36	Pgm					
4	73	RCLInd		9	01	01					

MERGED CODES

02	03	72	05	08	09
03	04	73	06	14	07
04	05	74	08	22	09

TEXAS INSTRUMENTS
INCORPORATED

2. PROGRAMA PARA METODO ITERATIVO (FORTRAN).

Esta versión del proceso iterativo para el cálculo de la ley media solo emplea el "corazón" del programa GAMLOG (Scott 1962) para capas de medio pie. El programa realiza sus cálculos a partir de los datos que se describen en el listado, las variables que utiliza para generar la anomalía sintética son los siguientes:

GLOG arreglo de leyes equivalentes de lecturas del registro
GOLD arreglo de leyes interpretadas en iteraciones previas
GNEW arreglo de leyes interpretadas en la actual iteración
DOLD arreglo de diferencias GLOG - GOLD
DNEW arreglo de diferencias GLOG - GNEW
D arreglo de profundidades
DMAX diferencia DNEW mayor
ITER contador de iteraciones

El programa empieza por generar leyes equivalentes empleando la ecuación 3.1 que son tomadas como la primera aproximación, después las anomalías para las capas hipotéticas son establecidas y superpuestas empleando las relaciones 3.2 y 3.3 , aquí la ano.-

malía sintética se compara con la anomalía real y se grafican ambas por la subrutina PREPA. Después de la comparación una segunda aproximación se efectúa y se grafica con la anomalía real; este proceso es repetido hasta diez veces. Si los resultados comparativos indican que los valores absolutos de las discrepancias es menor que 0.005 el proceso es detenido imprimiendo y graficando los valores de la anomalía sintética generada en la última iteración así como los valores iniciales de la anomalía real.

```

*****
**** PROGRAMA CALCULA LA LEY MEDIA DE UN YACIMIENTO RADIACTIVO
**** EMPLEANDO EL ALGORITMO ITERATIVO DE SCOTT. ESTA VERSION SOLO
**** EMPLEA EL CORAZON DEL PROGRAMA GAMLOG DE SCOTT (1962)
**** LOS PARAMETROS EMPLEADOS SON:
**** N= # DE MUESTRAS DEL REGISTRO
**** CA= CTE. DE PROPORCIONALIDAD DEL POZO
**** CORR= FACTOR DE CORRECCION DEL POZO
**** DELTAP= INTERVALO DE MUESTREO (0.5)
**** DLAST= PROFUNDIDAD DE LA PRIMERA MUESTRA DEL POZO
**** DIMENSION: GLOG(200), GOLD(200), GNEW(200), DNEW(200), DOLD(200)
****              D(200)
**** CALL ASSIGN(1,'OTXIS.DAT')
**** CALL ASSIGN(3,'GAMALOG.DAT')
**** READ(1,*) N,CA,CORR,DELTAP,DLAST
**** READ(1,*)(GLOG(I),I=1,N)
**** DO 1 I=1,N
****   GLOG(I)=CA+GLOG(I)+CORR*2.
****   CONTINUE
****   DO 10 I=4,N
****     GOLD(I)=GLOG(I)
****     CONTINUE
****     GOLD(N+1)=0.
****     GNEW(N+1)=0.
****     GOLD(N+2)=0.
****     GNEW(N+2)=0.
****     GNEW(N+3)=0.
****     GOLD(N+3)=0.
****     DO 20 I=4,N
****       GOLD(I)=GLOG(I)-((GOLD(I-3)+GOLD(I+3))*0.01+(GOLD(I-2)+GOLD(I+2))
****       1 *0.04+(GOLD(I-1)+GOLD(I+1))*0.2+GOLD(I)*0.5)
****     CONTINUE
****     DO 30 I=4,N
****       ITER=1.10
****       DO 30 I=4,N
****         GNEW(I)=GOLD(I)+GOLD(I)
****         IF(GNEW(I)) 24,30,30
****         GNEW(I)=0.
****         CONTINUE
****         CALL PREPR(GLOG,GNEW,N)
****         DO 40 I=4,N
****           DNEW(I)=GLOG(I)-((GNEW(I-3)+GNEW(I+3))*0.01+(GNEW(I-2)+GNEW(I+2))
****           1 *0.04+(GNEW(I-1)+GNEW(I+1))*0.2+GNEW(I)*0.5)
****         CONTINUE
****         DMAX=0.
****         DO 50 I=4,N
****           IF(ABS(DNEW(I))-DMAX)50,50,29
****         DMAX=ABS(DNEW(I))
****         CONTINUE
****         IF(DMAX<0.005)06,32,32
****         DO 60 I=4,N
****           GOLD(I)=GNEW(I)
****           DOLD(I)=DNEW(I)
****         CONTINUE
****         CONTINUE
****         SUM=0.
****         WRITE(3,400)
****         FORMAT(1H1,15X,'PROFUNDIDAD',15X,'LEY MEDIA',15X,'VALORES INICIA
****         2  LES')
****         DO 70 I=1,N
****           DLAST=DLAST+DELTAP
****           D(I)=DLAST
****           SUM=SUM+GNEW(I)*DELTAP
****           WRITE(3,14)D(I),CA+I*JL,GLOG(I)

```


C(KK)=DOT

DO 35 LL=1,M

NNN=(Y(LL,K)-YMIN)/UNIT+20.5

35 C(NNN)=X(LL)

WRITE(3,36)C.L

36 FORMAT(' ',13I1,7,T12,I5)

40 CONTINUE

RETURN

END

3. PROGRAMA PARA FILTRADO (FORTRAN)

Este programa utiliza el filtro de tres puntos dado por la relación 3.18 para obtener la distribución real de material radiactivo a lo largo del pozo; los datos que emplea el programa se dan en el listado, las variables utilizadas en el programa son :

REG . arreglo de deflexiones del registro
F arreglo de coeficientes del filtro
FF arreglo de las leyes medias obtenidas por convolución

Para realizar la convolución utiliza la subrutina FOLD dada por Robinson y Silvia (1978-) modificada para centrar el filtro y evitar efectos de desplazamiento de las leyes medias interpretadas.

La salida del programa es la impresión de los coeficientes del filtro y su gráfica, así como la distribución real de material radiactivo a lo largo del pozo y su gráfica.

```

*****
PROGRAMA PARA CALCULAR LA LEY MEDIA DE UN YACIMIENTO RADIACTIVO
TIPO EMPLEANDO LA TECNICA DEL FILTRO INVERSOR
LOS PARAMETROS EMPLEADOS SON:
CTE=CTE. DE PROPORCIONALIDAD DEL POZO
DELTAT=INTERVALO DE MUESTREO DEL REGISTRO
DELTAZ=INTERVALO DE MUESTREO DEL REGISTRO
ALFA=CTE. DEL GIR
M=N DE COEFICIENTES DEL FILTRO (3)
N=N DE MUESTRAS DEL REGISTRO
CORR=FACTOR DE CORRECCION DEL POZO
*****
DIMENSION REG(400),ZZ(400),FF(400),F(10),C(400)
CALL ASSIGN(1,'ENTRADA.DAT')
CALL ASSIGN(2,'GAMA.DAT')
READ(1,*) CA,DELTAT,DELTAZ,ALFA,M,N,CORR
READ(1,*,END=205) (REG(I),I=1:N)
DO 200 I=1,N
  REG(I)=REG(I)*2.*CA*CORR
CONTINUE
*****
GENERA EL FILTRO (FOURIER)
DEMI=(ALFA*DELTAZ)**2
DO 11 I=1,M
  LI=I-2
  IF(LI) 30,31,30
  F(I)=1./DEMI
  GO TO 11
31  F(I)=2./DEMI+1.
CONTINUE
WRITE(2,49)
49  FORMAT(25X,'+++ COEFICIENTES DEL FILTRO+++')
DO 50 I=1,M
  WRITE(2,71) F(I)
71  FORMAT(//.35X,F10.3)
CONTINUE
WRITE(2,86)
86  FORMAT(////.35X,'+++GRAFICA DEL FILTRO+++')
CALL GRAFI(F,N,2,1)
*****
REALIZA LA CONVOLUCION DEL FILTRO CON EL REGISTRO
CALL FOLD(M,F,N,REG,LC,C)
DO 100 J=1,N
  IF(C(J).LT=.0) C(J)=0.
  FF(I)=C(I)
CONTINUE
WRITE(2,88)
88  FORMAT(1H1,25X,'+++CONVOLUCION+++')
DO 90 I=1,N
  WRITE(2,72) FF(I)
72  FORMAT(//.32X,F10.3)
CONTINUE
WRITE(2,88)
88  FORMAT(1H1,////.35X,'+++GRAFICA DE LA DISTRIBUCION REAL
      DE RADIONUCLEIDOS+++')
CALL GRAFI(FF,N,2,1)
CALL EXIT
END
SUBROUTINE FOLD(LA,A,LB,B,LC,C)
DIMENSION A(1),B(1),C(1)
LA=(LA-1)/2+1
LC=LA+LB-1
CALL ZERO (LC,C)
DO 10 J=1,LC
  DO 10 I=1,LA

```

```

K=I+J-I
C(K)=A(I)+B(J)+C(K)
IF(J-LAA)10,2,2
IF(I-LA)10,5,5
C(J-LAA+1)=C(J)
CONTINUE
DO 40 L=LH+1,LC
C(L-LAA+1)=C(L)
CONTINUE
RETURN
END
SUBROUTINE ZERO(LX,X)
DIMENSION X(1)
IF(LX) 30,30,10
DO 20 I=1,LX
X(I)=0.0
RETURN
END
SUBROUTINE GRAFI(X,N,ITIPO,IBAR)
DIMENSION X(1),ISAL(12),XX(25)
DATA II,FAST,IBLNC/'I','*',' '
IF(ITIPO-1) 11,10,11
XMIN=0.
XMAX=40.
GO TO 13
XMIN=X(1)
XMAX=XMIN
DO 12 I=1,N
IF(X(I)-XMAX) 101,101,102
XMIN=X(I)
IF(X(I)-XMAX) 12,12,103
XMAX=X(I)
CONTINUE
IF(XMAX-ABS(XMIN)) 1,1,2
XMAX=ABS(XMIN)
GO TO 3
XMIN=-XMAX
IF(ITIPO-3)13,104,13
XMIN=2.3059*ALOG(XMIN)
XMAX=2.3059*ALOG(XMAX)
DX=XMAX-XMIN
XXX=XMIN
DO 14 I=1,25
XX(I)=XXX
IF(ITIPO-3) 106,105,106
XX(I)=10.*XXX
XXX=XXX+DX/24.
CONTINUE
WRITE(2,16)(XY(I),I=1,24,2)
FORMAT(11X,12F10.3)
WRITE(2,17)(XX(I),I=1,23,2)
FORMAT(6X,12F10.3)
WRITE(2,18)
FORMAT(11X,'+',.24('-----'))
DO 22 I=1,N
DO 19 J=1,121
ISAL(J)=IRLWC
CONTINUE
DO 20 J=1,121,10
ISAL(J)=II
CONTINUE
XXX=X(I)
IF(ITIPO-3)11,1,110,111
XXX=2.3059*ALOG(XXX)
IX=1-IX((XXX-XMIN)/120./DX+1,51)
IF(LAA=1) 10,20,11

```

```
31      ISAL(IX)=IAST
      GO TO 8
40     IF(IX-61)4,4,6
      DO 5 J=IX,61
5      ISAL(J)=IAST
      GO TO 8
6      DO 7 J=61,IX
      ISAL(J)=IAST
      WRITE(2,21)X(I),ISAL
91     FORMAT(1X,F10.4,12I1,/)
92     CONTINUE
      WRITE(2,18)
      WRITE(2,17)(XX(I),I=1,23,2)
      WRITE(2,16)(XX(I),I=1,24,2)
      RETURN
      END
```

4. PROGRAMA PARA FILTRADO (TI - 58, 59)

Utiliza los mismos datos de entrada del programa anterior, almacena las deflexiones corregidas a partir de la memoria trece, los coeficientes del filtro son almacenados en las memorias diez, once y doce; la convolución se empieza a efectuar a partir de la etiqueta D y la salida es la distribución real de radioelementos y la ley promedio en el intervalo.

En seguida se proporcionan las instrucciones de uso, el listado y el resultado de un ejemplo.

PROGRAM DESCRIPTION

El programa corrige los datos del registro para condiciones no estandar y por tiempo muerto, calcula los coeficientes del filtro inversor y los convoluciona con las deflexiones corregidas del registro.

USER INSTRUCTIONS

STEP	PROCEDURE	ENTER	PRESS	DISPLAY
1	tiempo muerto	t	A	t
2	tamaño del registro	n	R/S	0
3	Deflexiones del Registro	Ci	R/S	Ci
		:	:	:
4	Factor de Corrección del Pozo	CORR	R/S	CORR
5	Factor de Calibración del Pozo	K	R/S	K
6	Constante alfa	α	R/S	α
7	Intervalo de Muestreo	ΔZ	R/S	ΔZ
8	Iniciar el Cálculo		B	

USER DEFINED KEYS	DATA REGISTERS (R1-R9)		LABELS (Op 08)
A Almacena Datos	1	0	
B Calcula Filtro	1	1	
C Da Resultados	2	2	
D Auxiliar Convulsión	3	3	
E	4	4	
A Almacena Datos	5	5	
B Corrige Datos	6	6	
C Convulsión	7	7	
D	8	8	
E	9	9	

PARA EL PROGRAMA DE FILTRADO (TI-58, 59)

1. El presente informe tiene por objeto describir el procedimiento de filtrado de los datos de la encuesta de opinión pública sobre el programa de filtrado de los inmigrantes en el extranjero, en el período comprendido entre el 1 de enero de 1958 y el 31 de diciembre de 1959.

2. Los datos de la encuesta fueron obtenidos a través de una muestra aleatoria de los inmigrantes que ingresaron al país durante el período mencionado.

3. El procedimiento de filtrado consistió en la selección de los inmigrantes que cumplían con los requisitos establecidos en el programa de filtrado.

4. Los resultados del filtrado se detallan en el anexo que acompaña a este informe.

5. Se concluye que el programa de filtrado de los inmigrantes en el extranjero ha sido exitoso en la selección de los inmigrantes que cumplen con los requisitos establecidos.

6. El presente informe fue elaborado por el personal de la Oficina de Estadística y Censos, del Departamento de Estadística y Censos, del Poder Ejecutivo Central.

7. Los datos de la encuesta fueron obtenidos a través de una muestra aleatoria de los inmigrantes que ingresaron al país durante el período mencionado.

8. El procedimiento de filtrado consistió en la selección de los inmigrantes que cumplían con los requisitos establecidos en el programa de filtrado.

9. Los resultados del filtrado se detallan en el anexo que acompaña a este informe.

10. Se concluye que el programa de filtrado de los inmigrantes en el extranjero ha sido exitoso en la selección de los inmigrantes que cumplen con los requisitos establecidos.

111 01
 112 48
 113 04
 114 48
 115 00
 116 00
 117 42
 118 05
 119 97
 120 07
 121 19
 122 18
 123 76
 124 14
 125 71
 126 42
 127 42
 128 14
 129 65
 130 42
 131 10
 132 85
 133 53
 134 42
 135 11
 136 65
 137 42
 138 12
 139 54
 140 95
 141 42
 142 05
 143 02
 144 44
 145 04
 146 13
 147 76
 148 19
 149 73
 150 00
 151 65
 152 73
 153 01
 154 95
 155 44
 156 05
 157 44
 158 08
 159 43
 160 00
 161 67
 162 13
 163 62
 164 20
 165 24

3100
 3101
 3102
 3103
 3104
 3105
 3106
 3107
 3108
 3109
 3110
 3111
 3112
 3113
 3114
 3115
 3116
 3117
 3118
 3119
 3120
 3121
 3122
 3123
 3124
 3125
 3126
 3127
 3128
 3129
 3130
 3131
 3132
 3133
 3134
 3135
 3136
 3137
 3138
 3139
 3140
 3141
 3142
 3143
 3144
 3145
 3146
 3147
 3148
 3149
 3150
 3151
 3152
 3153
 3154
 3155
 3156
 3157
 3158
 3159
 3160
 3161
 3162
 3163
 3164
 3165
 3166
 3167
 3168
 3169
 3170
 3171
 3172
 3173
 3174
 3175
 3176
 3177
 3178
 3179
 3180
 3181
 3182
 3183
 3184
 3185
 3186
 3187
 3188
 3189
 3190
 3191
 3192
 3193
 3194
 3195
 3196
 3197
 3198
 3199
 3200

111 01
 112 48
 113 04
 114 48
 115 00
 116 00
 117 42
 118 05
 119 97
 120 07
 121 19
 122 18
 123 76
 124 14
 125 71
 126 42
 127 42
 128 14
 129 65
 130 42
 131 10
 132 85
 133 53
 134 42
 135 11
 136 65
 137 42
 138 12
 139 54
 140 95
 141 42
 142 05
 143 02
 144 44
 145 04
 146 13
 147 76
 148 19
 149 73
 150 00
 151 65
 152 73
 153 01
 154 95
 155 44
 156 05
 157 44
 158 08
 159 43
 160 00
 161 67
 162 13
 163 62
 164 20
 165 24

Ejemplo:

227 01 1
 228 00 0
 229 03 3
 230 02 2
 231 01 1
 232 07 7
 233 02 2
 234 01 1
 235 69 DP
 236 02 02
 237 00 0
 238 00 0
 239 02 2
 240 01 1
 241 02 2
 242 04 4
 243 02 2
 244 07 7
 245 69 DP
 246 03 03
 247 69 DP
 248 05 05
 249 98 ADV
 250 43 RCL
 251 10 10
 252 99 PRT
 253 98 ADV
 254 87 IFF
 255 01 01
 256 99 PRT
 257 98 ADV
 258 43 RCL
 259 12 12
 260 99 PRT
 261 98 ADV
 262 92 RTH
 263 76 LBL
 264 42 STO
 265 00 0
 266 00 0
 267 02 2
 268 07 7
 269 01 1
 270 07 7
 271 04 4
 272 05 5
 273 69 DP
 274 02 02
 275 69 DP
 276 05 05
 277 98 ADV
 278 92 RTH
 279 00 0

RE REM

0.056

0.105

0.231

0.293

0.286

0.341

0.384

0.267

0.220

0.114

LEV FROM

1.105

Datos Pozo 1 Pag. 91

$\alpha = 0.14$

5. ITERACION Y FLTRADO EN PRACTICA.

En el capítulo tercero se demostró que los dos métodos son teóricamente equivalentes para la obtención de la distribución real de elementos radiactivos. Ahora se tratará de establecer más claramente la diferencia entre ellos; mientras que un método intenta modelar el yacimiento radiactivo con capas de medio o un pie, el otro intenta producir un tren de impulsos, cada uno de los cuales representa la ley media en ese punto de tal manera que uniendo los valores de igual amplitud y adyacentes se pueda modelar más exactamente al yacimiento. Para lograr ésto se obtuvo el filtro dado por la ecuación 3.18, el cual intenta eliminar el efecto del GIR y obtener de esta forma el registro ideal. Como se mencionó anteriormente éste no es un operador exacto ya que para obtenerlo se utilizó una aproximación de la segunda derivada de los datos digitizados, sin embargo, observando el efecto de éste filtro sobre el GIR en la figura 23, obtenida con el programa GAMA, se observa que el GIR ha sido comprimido a un impulso con un error muy pequeño (0.33%). El efecto del método iterativo sobre el GIR se observa en la figura 24 en la que se aprecia que después de diez iteraciones el GIR ha sido reducido a un impulso. Estos dos resultados corroboran la equivalencia de las dos técnicas con la diferencia de que el método de filtrado a procesado una mayor cantidad de datos en menos tiempo de cómputo.

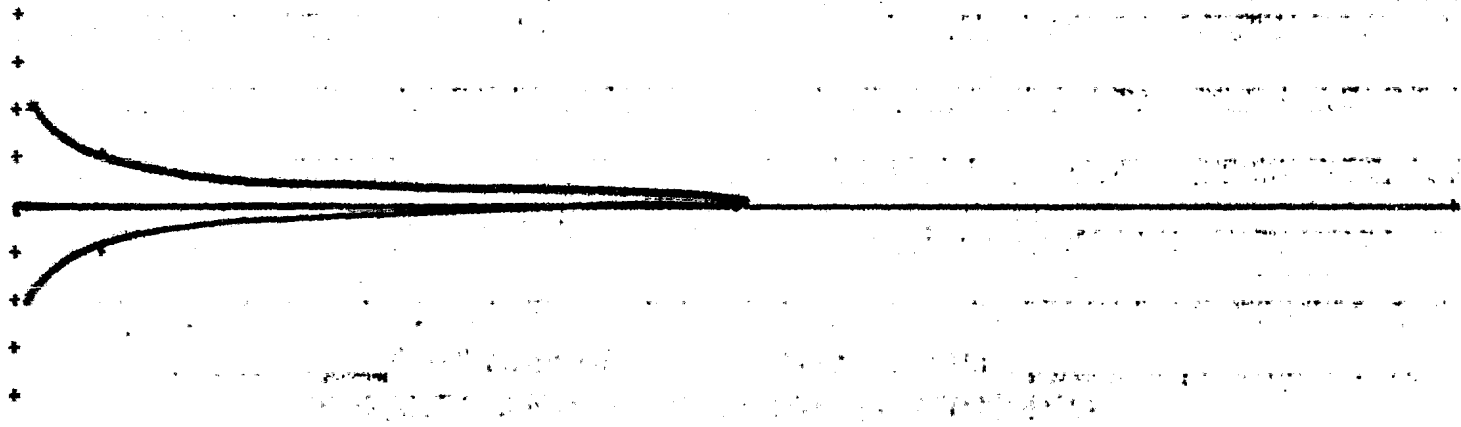
+++GRAFICA DE LA ANOMALIA REAL Y SINTETICA ++

PLC-24

1 DIVISION*

0.00280

1
2
3
4
5
6
7
8
9

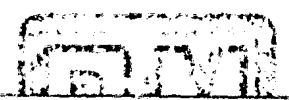


+++SUMA+++

0.140

+++GRAFICA DE LA DISTRIBUCION REAL DE RADIOELEMENTOS+++

	0.184E-01	0.502E-01	0.821E-01	0.114E+00	0.146E+00	0.178E+00
	0.245E-02	0.343E-01	0.662E-01	0.980E-01	0.130E+00	0.162E+00
0.245E-02*	I	I	I	I	I	I
0.759E-02*	I	I	I	I	I	I
0.606E-01	I	I	I	I	I	I
0.194E+00	I	I	I	I	I	I
0.606E-01	I	I	I	I	I	I
0.759E-02*	I	I	I	I	I	I
0.245E-02*	I	I	I	I	I	I
	0.245E-02	0.343E-01	0.662E-01	0.980E-01	0.130E+00	0.162E+00
	0.184E-01	0.502E-01	0.821E-01	0.114E+00	0.146E+00	0.178E+00



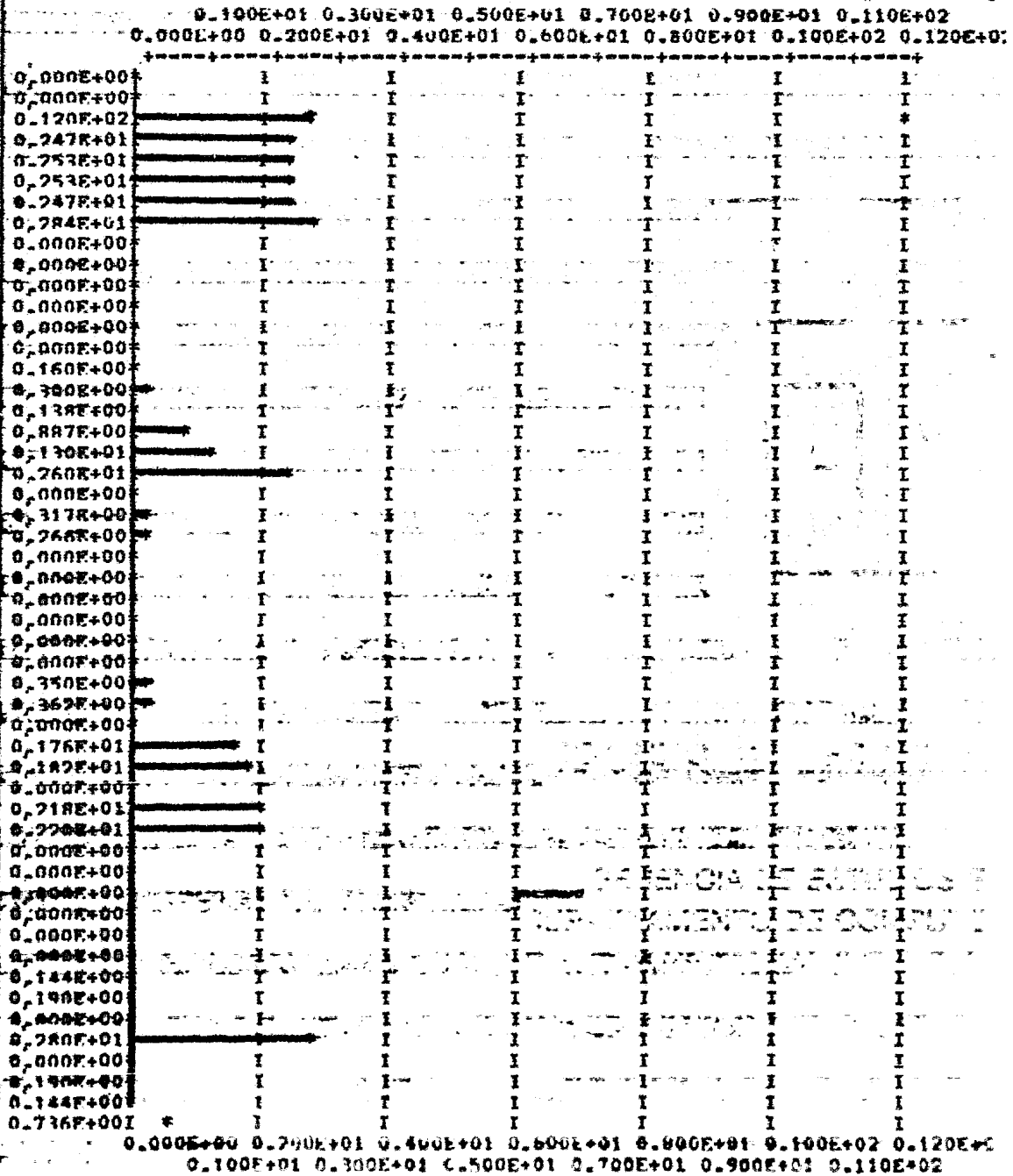
+++GRAFICA DE LA DISTRIBUCION REAL DE RADIOELEMENTOS+++

	0.158E-04	0.475E-04	0.791E-04	0.111E-03	0.142E-03	0.174E-03
	0.000E+00	0.316E-04	0.633E-04	0.949E-04	0.127E-03	0.158E-03
0.000E+00*	I	I	I	I	I	I
0.671E-05*	I	I	I	I	I	I
0.190E-03	I	I	I	I	I	I
0.671E-05*	I	I	I	I	I	I
0.000E+00*	I	I	I	I	I	I
	0.000E+00	0.316E-04	0.633E-04	0.949E-04	0.127E-03	0.158E-03
	0.158E-04	0.475E-04	0.791E-04	0.111E-03	0.142E-03	0.174E-03



Fig 27

+++ GRAFICA DE LA DISTRIBUCION REAL DE RADIOELEMENTOS+++



T A B L A V I .

	POZO 1	POZO 2	POZO 3
FACTOR K	0.0000950	0.0000080	0.0000104
FACTOR DE CORRECCION	1.20	1.40	1.00
PROFUNDIDAD	10'	4.7'	0'
	D E F L E X I O N E S (cps).		
	420	2500	550
	580	5010	775
	700	9999	1100
	985	12750	600
	720	13000	320
	400	15100	15
	100	16300	120
	42	11050	230
	0	9450	135
	27	5005	85
	78		
	190		
	525		
	315		
	105		

INTERVALO DE MUESTREO = 1/2 pie

Analizando ahora el efecto del filtro, sobre las anomalías tipo de medio y un pie, utilizadas por el método iterativo para generar la anomalía sintética, se observa en las figuras 25 y 26 las anomalías tipo después de ser deconvolucionadas. Rigurosamente hablando se puede decir que han sido reducidas a un spike pues el error cuadrático medio es de 0.40% para la anomalía tipo de medio pie y de 0.10% para la anomalía de un pie.

El proceso del registro sintético de la figura 19 con GAMA recobra la distribución simulada utilizada para generar el registro sintético. Este resultado se observa en la figura 27 que comparada con la figura 19 produce un error cuadrático medio de 0.26%.

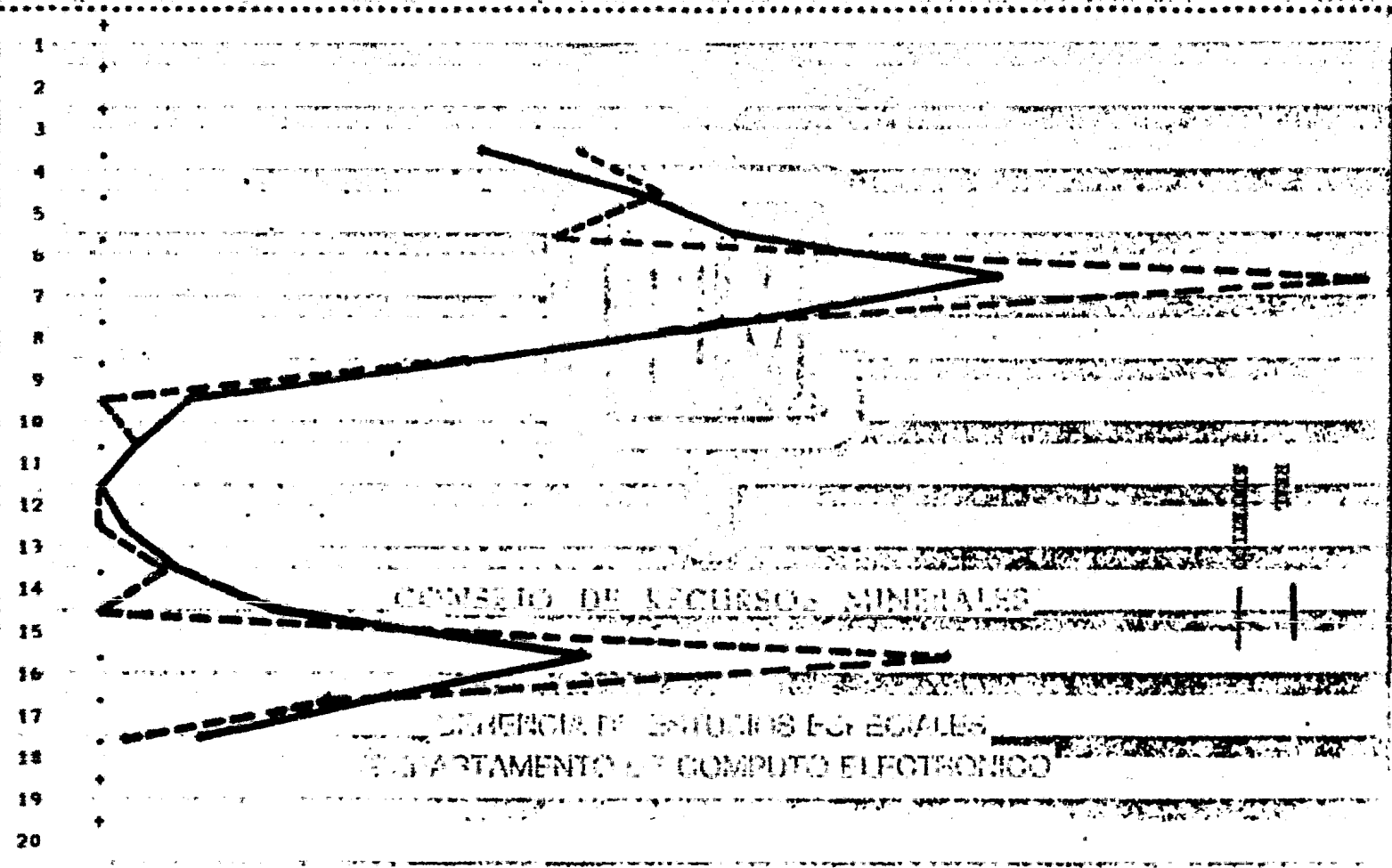
El procesado de registros reales utiliza los datos de los pozos dados en la tabla VI. Estos registros fueron procesados con los programas GANALOG y GAMA. Los resultados se muestran en los listados. Los tres primeros corresponden al método iterativo siendo la anomalía real la de línea continua y la anomalía sintética la de línea discontinua, los restantes listados correspondientes a los pozos antes señalados muestran los resultados obtenidos al utilizar GAMA con un valor de $\sigma = 0.14$.

En las figuras 28, 29 y 30 se muestran la anomalía real y

los resultados anteriores graficados a la misma escala para facilitar la comparación de las anamalias. Si bien los registros procesados no son exactamente iguales, si son muy parecidos; observándose también una mayor cantidad de ruido en los registros procesados con el método iterativo lo que representa una diferencia en eficiencia computacional a favor del filtrado inverso.

+++GRAFICA DE LA ANOMALIA REAL Y SINTETICA ++

1 DIVISION= 0.00318



CONSEJO DE RECURSOS MINERALES

DIRECCION DE ESTUDIOS ESPECIALES

DEPARTAMENTO DE COMPUTO ELECTRONICO

SINTETICA

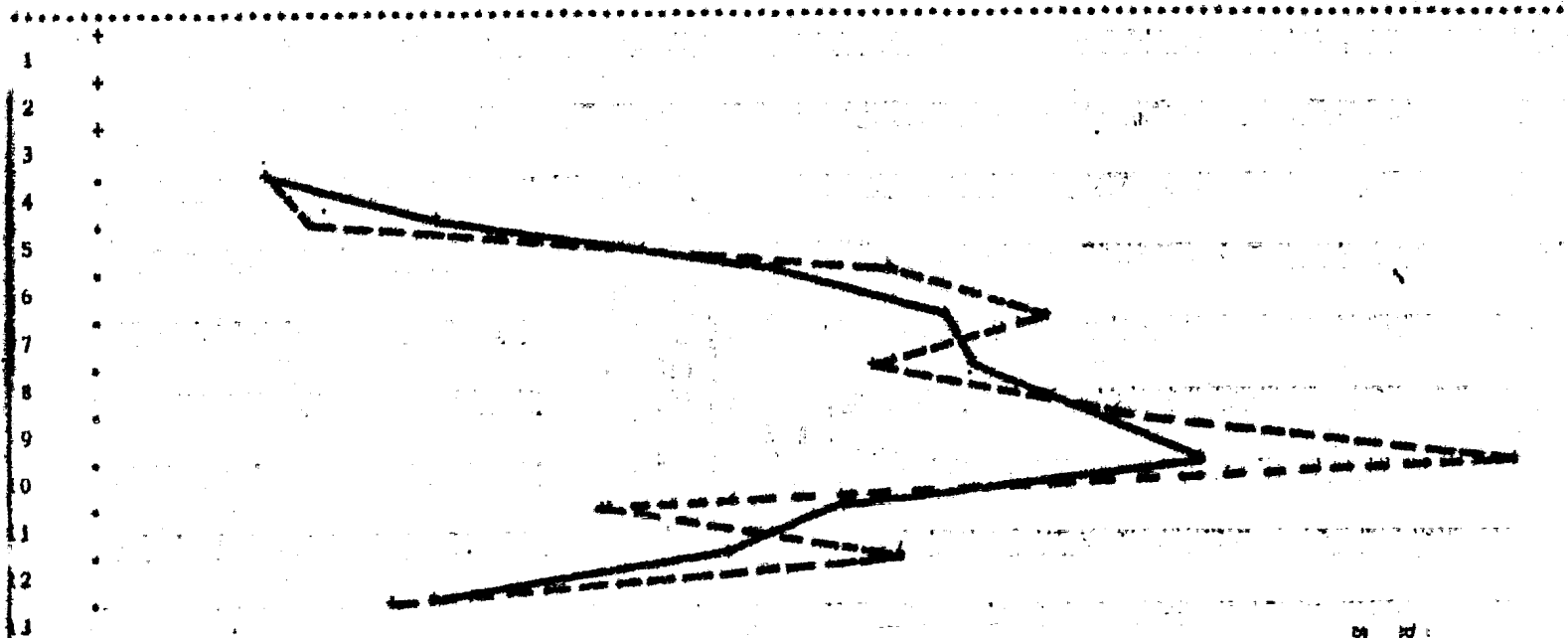
REAL

+++GRAFICA DE LA ANOMALIA REAL Y SINTETICA ++

++

1 DIVISION=

0.00469



+++SUMA+++

1.150

REAL
SINTETICA

I DIVISION=

0.00028

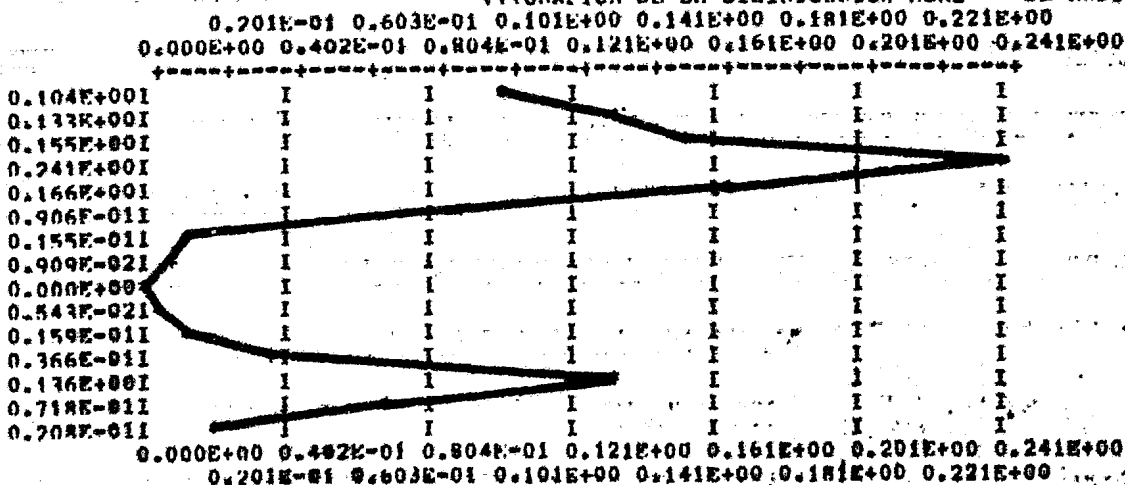
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15



CONSEJO DE RECURSOS MINERALES

GERENCIA DE ESTUDIOS ESPECIALES
DEPARTAMENTO DE COMPUTO ELECTRONICO

+++GRAFICA DE LA DISTRIBUCION REAL DE RADIOELEMENTOS+++



LOS DATOS DEL PORD 1

CONVERSION DEL FILTRO COM:

0.021

0.072

0.136

0.037

0.016

0.005

0.000

0.009

0.015

0.091

0.166

0.241

0.125

0.133

0.104

+++CONVERSION+++

+++GRAFICA DE LA UISTRIBUCION REAL DE RADIOELEMENTOS+++

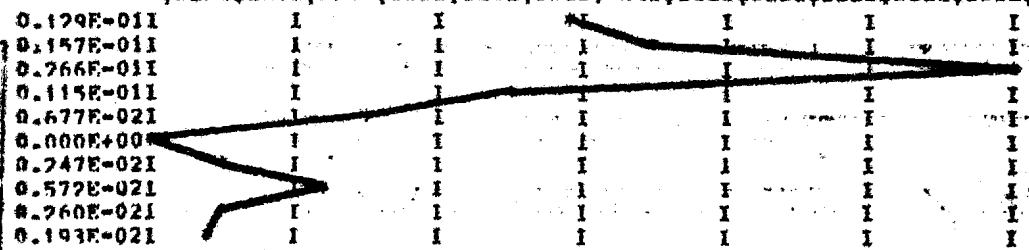
0.833E-01	0.138E+00	0.193E+00	0.248E+00	0.307E+00	0.357E+00
0.560E-01	0.411E+00	0.165E+00	0.220E+00	0.276E+00	0.330E+00
0.105E+001	I	I	I	I	I
0.231E+001	I	I	I	I	I
0.293E+001	I	I	I	I	I
0.286E+001	I	I	I	I	I
0.341E+001	I	I	I	I	I
0.384E+001	I	I	I	I	I
0.237E+001	I	I	I	I	I
0.720E+001	I	I	I	I	I
0.114E+001	I	I	I	I	I
0.560E-01	0.411E+00	0.165E+00	0.220E+00	0.276E+00	0.330E+00
0.833E-01	0.138E+00	0.193E+00	0.248E+00	0.307E+00	0.357E+00



+++CONDUCCION+++

+++GRAFICA DE LA DISTRIBUCION REAL DE RADIOELEMENTOS+++

0.222E-02 0.666E-02 0.111E-01 0.155E-01 0.200E-01 0.244E-01
 0.000E+00 0.444E-02 0.888E-02 0.133E-01 0.178E-01 0.222E-01 0.266E-01



0.000E+00 0.444E-02 0.888E-02 0.133E-01 0.178E-01 0.222E-01 0.266E-01
 0.222E-02 0.666E-02 0.111E-01 0.155E-01 0.200E-01 0.244E-01

CONVOLUCION DEL YLTIMO CON
 LOS DATOS DEL POSO .5

- 0.002
- 0.003
- 0.006
- 0.002
- 0.000
- 0.007
- 0.011
- 0.027
- 0.018
- 0.013

+++CONVOLUCION+++

CPS

REGISTRO REAL ———
REGISTRO PROCESADO CON GAMALOG - - - - -
REGISTRO PROCESADO CON GAMA - · - · -

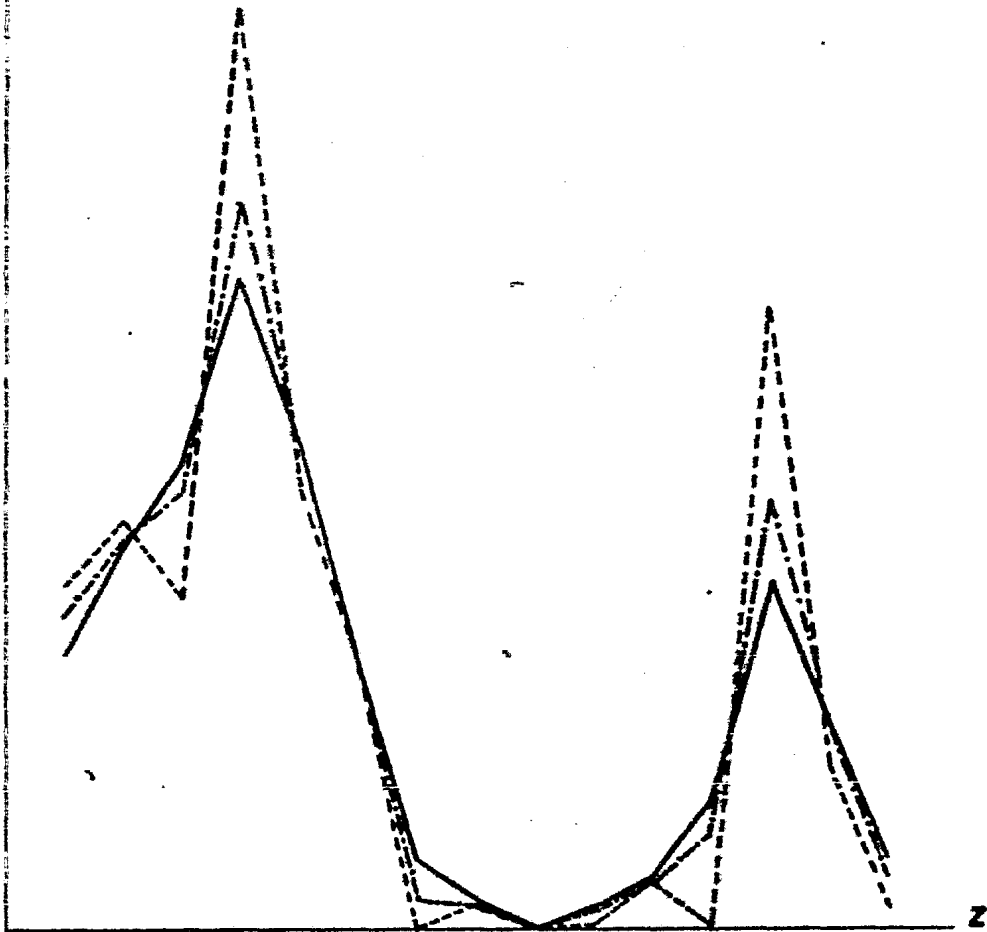


Fig. — 28 POZO 1

CPS

REGISTRO REAL
REGISTRO PROCESADO CON GAMALOG
REGISTRO PROCESADO CON GAMA

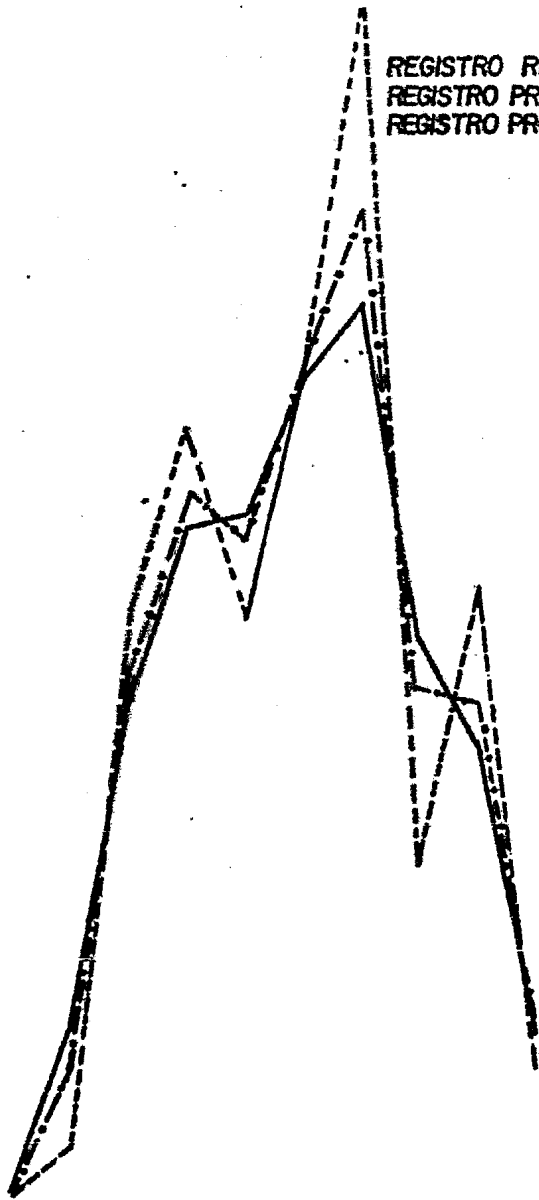


Fig. 29 POZO 2

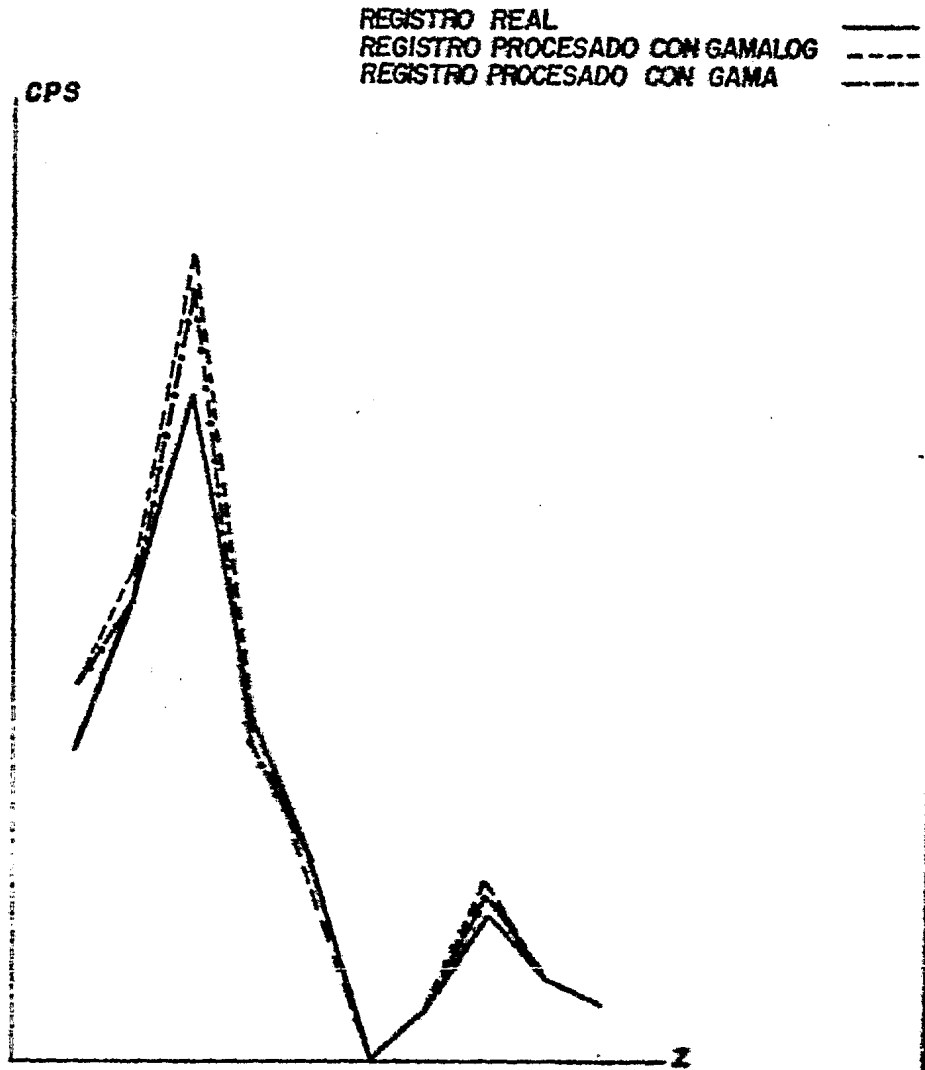


Fig.—30 POZO 3

V . C O N C L U S I O N E S .

Claramente se puede detectar que el problema de obtener una distribución real de radioelementos a lo largo del pozo a partir de un registro de rayos gamma es complejo. Sin embargo, los dos métodos estudiados lo tratan de hacer menos complejo. Se ha demostrado que la técnica iterativa y la técnica de deconvolución, para procesar Registros de Rayos Gamma, son operaciones teóricamente equivalentes. De los ejemplos presentados en el capítulo cuatro es claro que, en tanto que la técnica de filtrado y la iterativa dan resultados muy similares, el método de deconvolución es mucho más eficiente computacionalmente, es decir, la técnica del filtro inversor requiere generalmente menos del 5% del tiempo de cómputo del método iterativo. Por ejemplo, para procesar una anomalía de 15 muestras el método iterativo requiere de 1359 multiplicaciones y 1688 sumas o sustracciones, en cambio, el método de filtrado solo requiere de 45 multiplicaciones y 30 sumas o sustracciones.

Debido a que la convolución discreta es una operación secuencial, la técnica de filtrado utiliza poca memoria por lo que los datos pueden ser procesados en una minicomputadora o una microcomputadora y hasta en calculadoras programables como se de -

mostró en el presente trabajo.

De lo anterior se puede decir que se ha contestado la tercera pregunta planteada en la sección 5 del capítulo III.

Los errores que pueden causar que el registro de rayos gamma procesado se aparte del ideal pueden ser errores de digitización, muestreo demasiado largo en un intervalo de interpretación, errores en la determinación de la constante de calibración del sistema (K) . Estos errores son especialmente importantes para la exactitud de los cálculos.

Por otro lado, si la forma asumida del GIR no es correcta, o si un error se comete al determinar σ , entonces la forma del registro procesado será distorsionada; sin embargo, la ley promedio computada sobre la anomalía no será afectada debido a que el filtro (ec. 3.18) es normalizado.

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

1. Arroyo Carrasco A. ; Teoría de señales y su aplicación en el análisis de registros geofísicos de pozos, Tesis UNAM 1981.
2. Brandy P.J.; Integración geológico-geofísica de datos radiométricos., Tesis UNAM 1976.
3. Bringham E.O.; The Fast Fourier Transform., Prentice Hall, Englewood Cliff N.J. 1974.
4. Conaway J.G. y Killen P.G.; Quantitative uranium determinations from gamma ray logs by applications of digital time series analysis. Geophysics V. 45, No. 10, 1973.
5. -----, Bristow Q, Killen P.G.; Optimization of gamma ray logging technique for uranium. Geophysics V. 45, No. 2, 1980.
6. -----.; Deconvolution of gamma ray log in the case of dipping radioactive zones., Geophysics V. 46, No. 2, 1981.
7. Duffin Z.H.; Quadratic corrections for the Z-effect applied to the inversion of broadband gamma ray logs from uraniumiferous zones., Geophysical Prospecting V. 30, No. 6, 1982.
8. Fink J.B.; On K-factors and gamma log calculation., Geophysics V. 43 No. 11, 1978.
9. Gómez Rixero O.; Registros de pozos, Parte I Teoría e Interpretación., México D.F, 1975.
10. Guptasarma D.; Optimization of short digital filters for increased accuracy. Geophysical Prospecting V.30, No. 4, 1982.
11. Hurtado C.M.; Aplicación de los registros radioactivos de pozos a la evaluación de yacimientos de sales potásicas. Tesis UNAM 1976.
12. Javid y Brenner.; Analysis Transmission and Filtering of Signals Mc. Graw-Hill 1971
13. Kanasewich E.r.; Time Sequence Analysis in Geophysics., Universidad de Alberta 1973.
14. Kogan M.R, Nazarov I.M y Gridman D.Sh.; Gamma spectrometry of natural environments and formations. Theory of the method and applications to Geology and Geophysics. XXXXXX. 1964
15. Moore D.C.; Interpretation of total gamma logs in thin and dipping beds., Geophysics V. 45 No. 12, 1980.

16. Rhodes D.F y Mott W.E.; Quantitative interpretation of gamma ray spectral logs., Geophysics V. 31 No. 2, 1966.
17. Robinson E.A. y Silvia M.T.; Digital Signal Processing and Time Series Analysis., Holden-Day Inc., 1978.
18. -----; Multichannel Time Series Analysis and Deconvolution., Holden-Day Inc. 1978.
19. Scott J.H., Medd P.H., Drouillard R.F, Mudra P.J.; Quantitative interpretation of gamma ray logs. Geophysics V. 26 No. 2, 1961.
20. -----; The GAMLOG computer program., U.S. Atomic Energy Commission rep. RMG-143. Grand Junction Colorado 1962.
21. -----, Computer analysis of gamma ray logs. Geophysics V. 28.No. 3, 1963.
22. Shank J.L.; Recursion filters for digital processing. Geophysics V. 32 No. 1, 1967.
23. Sokolnikoff y Redherffer.; Mathematics of Physics and Modern Engineering. Mc. Graw-Hill 1966.
24. Soonawala N.M. y Telford W.M.; Movement of radon in overburden. Geophysics V. 45 No. 8, 1980.
25. Telford W.M, Geldart L.P, Sheriff R.E, Keys P.A; Applied Geophysics., Cambridge University Press, 1977.
26. Texas Instruments Incorporated.; Personal Programming., Texas Instruments Learning Center 1979.
27. Varios.; Manual of Geophysical Hand-Calculator Programs TI-Vol. SEG, 1981.
28. XXXXXX; Radiometric reporting methods and calibration in uranium exploration., International Atomic Energy Agency, 1976.