

1978



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**" EL METODO ELECTROMAGNETICO  
AEREO DE RAYOS GAMA "**

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**INGENIERO GEOFISICO**  
**P R E S E N T A :**  
**JOSE ARTURO NAVA AVILA CRUZ**

**MEXICO, D. F.**

**1981**



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.

## EL METODO ESPECTROMETRICO AEREO DE RAYOS . GAMA

### 1.- Principios de la Espectrometría de Rayos Gama.

- 1.1 Fenómeno de la Radioactividad.
- 1.2 Unidades de Medición.
- 1.3 Partículas Alfa, Beta, Rayos Gama y Rayos Cósmicos.
- 1.4 Características del Campo de Radiación Gama.
- 1.5 Interacción de la materia con los Rayos Gama.
  - 1.5.1 Efecto Compton.
  - 1.5.2 Efecto Fotoeléctrico.
  - 1.5.3 Efecto de Producción de Pares.

### 2.- Espectrometría de Rayos Gama.

- 2.1 Definición de Espectrometría.
- 2.2 Breve historia en la Espectrometría de Rayos Gama.
- 2.3 Técnicas Instrumentales y herramientas que se utilizan en la Espectrometría Moderna.
  - 2.3.1 Detectores.
  - 2.3.2 Acondicionamiento electrónico de la señal.

- 2.3.3 Análisis de la altura del pulso.
- 2.3.4 Estabilización del espectro.
- 2.3.5 Presentación y Grabación de datos.

3.- Exploración Aero-radiométrica.

- 3.1 Obtención de datos aero-radiométricos.
- 3.2 Procesado de datos aero-radiométricos.
- 3.3 Interpretación de datos aero-radiométricos.

4.- Espectrometría Aérea de Rayos Gama en el Area Zacatón.

- 4.1 Trabajo de Campo.
  - 4.1.1 Personal y Equipo utilizado.
  - 4.1.2 Técnica de prospección.
- 4.2 Procesado de la Información.
- 4.3 Interpretación de valores radiométricos del área Zacatón.

5.- Calibración de los espectrómetros de Rayos Gama aéreos y terrestres.

## 1.- Principios de la Espectrometría de Rayos Gama

1.1 Fenómeno de la Radioactividad.

1.2 Unidades de Medición.

1.3 Partículas Alfa, Beta, Rayos Gama y Rayos Cósmicos.

1.4 Características del Campo de Radiación Gama.

1.5 Interacción de la materia con los Rayos Gama.

1.5.1 Efecto Compton

1.5.2 Efecto Fotoeléctrico.

1.5.3 Efecto de Producción de Pares.

## 1.1 Fenómeno de la Radioactividad

Radioactividad es el proceso de emisión de partículas (alfa y beta) y energía (rayos gama) a partir de un núcleo inestable de elementos. Un elemento es radioactivo natural cuando éste se desintegra independiente de un proceso artificial, mientras que la radioactividad inducida es causada por el bombardeo de otras radiaciones. Durante la desintegración, el núcleo atómico emite radiación alfa o beta hacia los niveles inestables del núcleo, los cuales, se excitan con la emisión de rayos gama. Cada rayo gama tiene una longitud de onda característica o energía.

Un núcleo que se desintegra para formar otro núcleo es llamado padre y el producto es llamado hijo. El equilibrio radioactivo es establecido entre los elementos padre e hijo cuando el mismo número del núcleo y del hijo son formados en una unidad de tiempo. Un estado de desequilibrio existe cuando todo o parte de uno o más de los productos hijos o padres son físicamente movidos de las series de decaimiento. Por ejemplo: radón -222, el cual es un gas, es obviamente movible, mientras Uranio -234 y Radio -226 son solubles y pueden ser movidos de sus elementos padres a través de la solución.

La vida media de un núcleo es el tiempo (minutos, horas, días o años) requerido para que una mitad de la cantidad del núcleo decaiga en el siguiente núcleo hijo.

Las fuentes más importantes de radioactividad natural son:

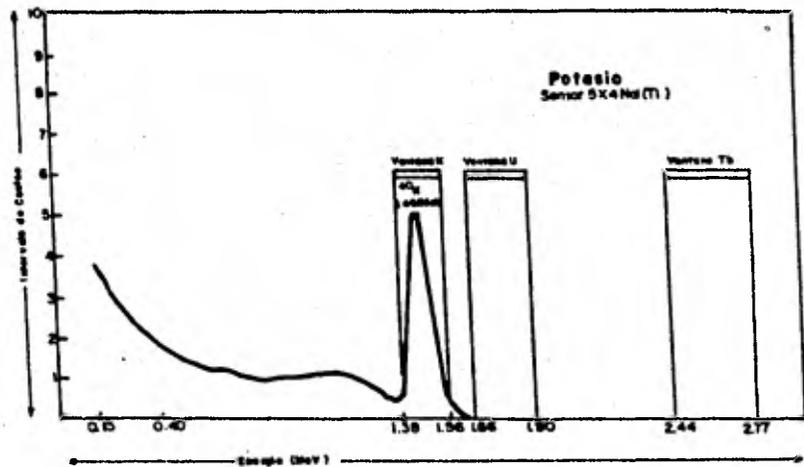
1.- Potasio (K).

Una pequeña fracción (0.012%) del potasio natural es el isótopo radioactivo  $K^{40}$ . El proceso de decaimiento radioactivo del  $K^{40}$  produce rayos gama de solamente una energía: 1.461 Mev, Fig. 1.1.1 Los productos del núcleo del  $K^{40}$  son estables.

2.- Uranio (U).

$U^{238}$  es el padre de la serie de decaimiento radioactivo del Uranio. Esta serie contiene 15 núcleos hijos, la mayoría de los cuales producen radiación gama de varias energías cuando están en decaimiento. Los miembros de la serie del Uranio, se muestran en la Tabla 1.1.1 pueden encontrarse juntos en un estado de equilibrio en el cual la razón de la abundancia de varios núcleos es mantenida constante. El espectro de rayos gama como resultado de la serie de Uranio en equilibrio es más complejo debido a los diferentes elementos que nos originan los diferentes energías de rayos gama. El Uranio, por sí mismo, no produce un rayo gama "característico", como se ve, el pico a 1.764 Mev debido a uno de sus núcleos hijos, Bismuto<sup>214</sup>, puede ser usado para su detección. Ver Fig. 1.1.2 Debe notarse que el uso de rayos gama para mediciones solamente es estrictamente correcto para un depósito, el cual está en equilibrio. Debido a que los

Fig. I.I.I. ESPECTRO DEL POTASIO.



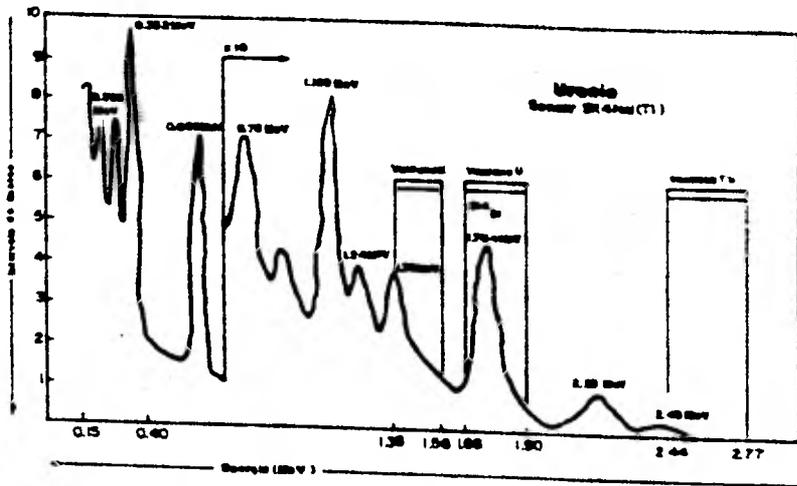
**TABLA III.**

**Cadena en la serie de decaimiento del U-238**

Isotopo	Radiación	Vida-Media
U <sup>238</sup>	α	4.507x10 <sup>9</sup> y
↓ Th <sup>234</sup>	β	24.1 d
↓ Po <sup>234</sup>	β	6.7 h
↓ U <sup>234</sup>	α	2.48x10 <sup>5</sup> y
↓ Th <sup>230</sup>	α	7.52x10 <sup>4</sup> y
↓ Ra <sup>226</sup>	α	1600 y
↓ Rn <sup>222</sup>	α	3.825 d
↓ Po <sup>218</sup>	α	3.05 m
↓ Pb <sup>214</sup>	β	26.8 m
↓ Bi <sup>214</sup>	β	19.7 m
↓ Po <sup>214</sup>	α	1.58x10 <sup>-4</sup> s
↓ Pb <sup>210</sup>	β	22.3 y
↓ Bi <sup>210</sup>	β	5.02 d
↓ Po <sup>210</sup>	α	138.4 d
↓ Pb <sup>206</sup>	estable	

a- Los isotopos que constituyen menos del 0.2% de los productos de decaimiento son omitidos.

Fig. 112. ESPECTRO DEL URANIO



miembros de la serie son diferentes elementos químicos, ellos pueden ser separados por procesos geoquímicos ordinarios tales como intemperismo, resultando un no-equilibrio. Si esto ocurre, entonces, la radioactividad -- del Bismuto<sup>214</sup> puede no mostrar la misma relación de -- contenido de Uranio como si lo hiciera bajo condiciones de equilibrio.

### 3.- Torio (Th).

Th<sup>232</sup> es el padre de otra serie de decaimiento radioactivo natural mostrado en la Tabla 1.1.2 La serie del Torio tiene 11 elementos hijos resultando un espectrograma complejo. Esta serie es encontrada en un estado de equilibrio debido a que los núcleos no son -- muy movibles bajo condiciones de intemperismo y además debido a que las vidas medias de los núcleos hijos son cortas. El núcleo hijo del Talio<sup>208</sup> emite un rayo gama característico con una energía de 2.615 Mev, Fig. 1.1.3

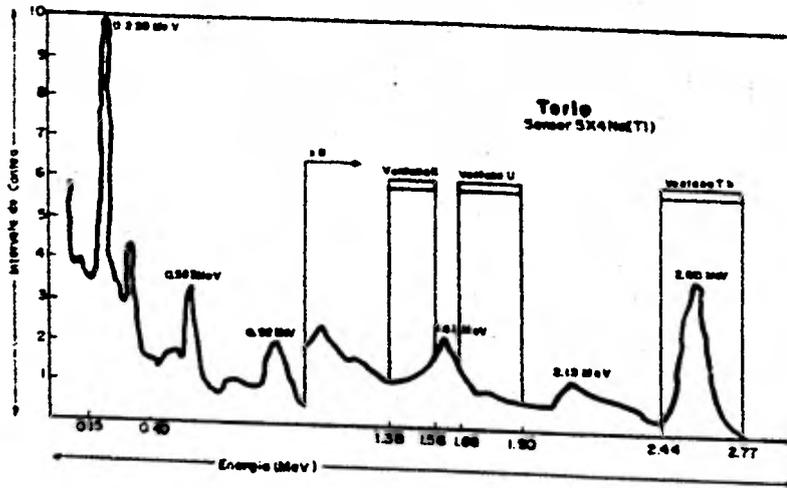
Las tres energías de rayos gama características asociadas con Potasio, Uranio y Torio las cuales son de interés en la prospección geológica y radiométrica -- son: K-1.461 Mev, U-1.764 Mev y Th-2.615 Mev.

TABLA I.1.2.

Serie de decaimiento del Th-232

Isotopo	Radiación	Vida-Media
Th <sup>232</sup>	α	1.38x10 <sup>10</sup> y
Ra <sup>228</sup>	α	6.7 y
Ac <sup>228</sup>	β <sup>-</sup>	6.13 h
Th <sup>228</sup>	α	1.91 y
Ra <sup>224</sup>	α	3.64 d
Rn <sup>220</sup>	α	55.3 s
Po <sup>216</sup>	α	0.158 s
Pb <sup>212</sup>	β <sup>-</sup>	10.64 h
Bi <sup>212</sup>	β <sup>-</sup> (64%)	60.5 m
	α (36%)	
64% $\left\{ \begin{array}{l} \text{Po}^{212} \\ \text{Tl}^{208} \\ \text{Pb}^{208} \end{array} \right.$	α	3.04x10 <sup>-7</sup> s
	β <sup>-</sup>	
	estable	

Fig 11.3. ESPECTRO DEL TORIO



## 1.2 Unidades de Medición

### Curie

La radioactividad es medida en unidades de Curies. El Curie es definido como  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones radioactivas por segundo. Un Curie es la medida de la longitud de la fuente. Un Curie de radio es aproximadamente un gramo, un Curie de Radón -222 es  $0.66 \text{ mm}^3$  a temperatura y presión standard, un Curie de U-238 es aproximadamente 3 000 kilogramos. Cuando una serie de decaimiento radioactivo está en equilibrio, la actividad de cada isótopo radioactivo producido, es exactamente la misma.

### Roentgen

Si los rayos gama atraviesan la materia sin pérdida de energía, no se producirá ningún efecto. Solamente aquellos fotones que interaccionan con el detector pierden energía y producen un efecto observable. -- Así la unidad de radioactividad de fuente, el Curie, no necesariamente describe la cantidad de energía absorbida por una masa o por el detector. La cantidad de radiación absorbida por unidad de volumen o masa de material es el Roentgen. Un Roentgen de radiación gama es aquel que produzca  $1.6 \times 10^{12}$  pares de iones por gramo de aire, dando en apariencia 83 Ergs de energía calorífica por gramo de aire.

Los escintilómetros y contadores geiger son

frecuentemente calibrados en términos de Miliroetgens (mR) por hora. Cuidadosas medidas han mostrado que un gramo de radio en equilibrio con sus productos de decaimiento y encerradas en .5 mm de platino producirán una actividad de rayos gama de 8.4 Roetngens por hora a una distancia de un centímetro.

#### Electrón Volt

La unidad de energía de rayos gama es el Electrón Volt. Representa la energía adquirida por un electrón cuando es acelerado por la diferencia de potencial de un volt. La energía es comúnmente expresada como millones de electrón-volts (Mev) o miles de electrón-Volts (Kev).

#### Volúmen del Cristal

El volúmen del cristal de un detector es de vital importancia en la capacidad de recolección de datos del espectrómetro.

Las siguientes tablas dan el volúmen en pulgadas y centímetros de algunos de los cristales de tamaño estandard.

Tamaño del cristal (pulg.)	Volúmen (pulg <sup>3</sup> )	Volúmen (cm <sup>3</sup> )
2 x 2	6.3	103
3 x 3	21	340
5 x 5	98	1600
6 x 4	113	1800
9 x 4	254	4100
11 1/2 x 4	415	6700

Cuentas por segundo (c.p.s.)

Señala el número de golpes por segundo generados en un aparato (escintilómetro) por una radiación gama. - Con frecuencia se utiliza como medida el miliroentgen (mR) hora, equivalente a  $7.5 \times 10^6$  golpes o cuentas-hora, o sea, 2050 cuentas por segundo.

### 1.3 Partículas Alfa, Beta, Rayos Gama y Rayos Cósmicos

La radioactividad es el proceso de decaimiento o cambios en el núcleo atómico. Hay tres tipos comunes de radioactividad en los productos de decaimiento. Estos son llamados rayos alfa, rayos beta y rayos gama; los rayos alfa y beta tienen masa y carga eléctrica y, por lo tanto, es más adecuado referirse a ellos como partículas.

#### Partículas Alfa ( $\alpha$ )

Las partículas alfa están en el núcleo de helio. Cada una consiste de cuatro partículas elementales: dos protones y dos neutrones. Tan pronto como sucede la expulsión de la partícula alfa del núcleo, ésta encuentra una órbita de electrones y se convierte en un átomo de helio neutro. Algunos átomos de helio migran a la superficie de la tierra y contribuyen al background de la atmósfera, el remanente se encuentra rodeando a los minerales de las rocas y no escapa a menos que sea liberado por la descomposición del mineral.

Las partículas alfa tienen una energía discreta y emiten el isótopo que puede identificarse por medidas de la energía característica de la partícula alfa. Los rayos alfa provienen de la desintegración de las series de decaimiento del Uranio y del Torio.

#### Partículas Beta ( $\beta$ )

Los rayos beta son normalmente electrones y como

tales poseen carga negativa. No tienen una energía característica. Están acompañados de la emisión de un neutrino. Debido a que los rayos alfa y beta poseen ambos masa y energía, su penetración a través de los materiales de la tierra es de unos pocos milímetros o menos. Por lo tanto, la detección de los rayos alfa y beta no permiten por sí mismos la aplicación de sensores remotos, como sucede con la detección de los rayos gama. En la Fig. 1.2.1. se ilustra el poder de penetración de los tres productos radioactivos de decaimiento.

#### Rayos Gama (γ)

El tercer tipo de decaimiento radioactivo y el más importante para nuestro propósito es la radiación - gama. Los rayos gama tienen su origen en un proceso de decaimiento nuclear más que en el proceso de decaimiento del electrón atómico (rayos X) o en el proceso de decaimiento termal del electrón. La Tabla 1.2.1 muestra la longitud de onda y la frecuencia, la cual es proporcional a la energía, del espectro electromagnético.

Debido a que los rayos gama no tienen carga eléctrica ni masa, son capaces de atravesar unos centímetros o más de materiales del tipo terrestre.

Cada isótopo gama emitido proporciona una o más energías características de rayos gama.

#### Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos no son una fuente geológica

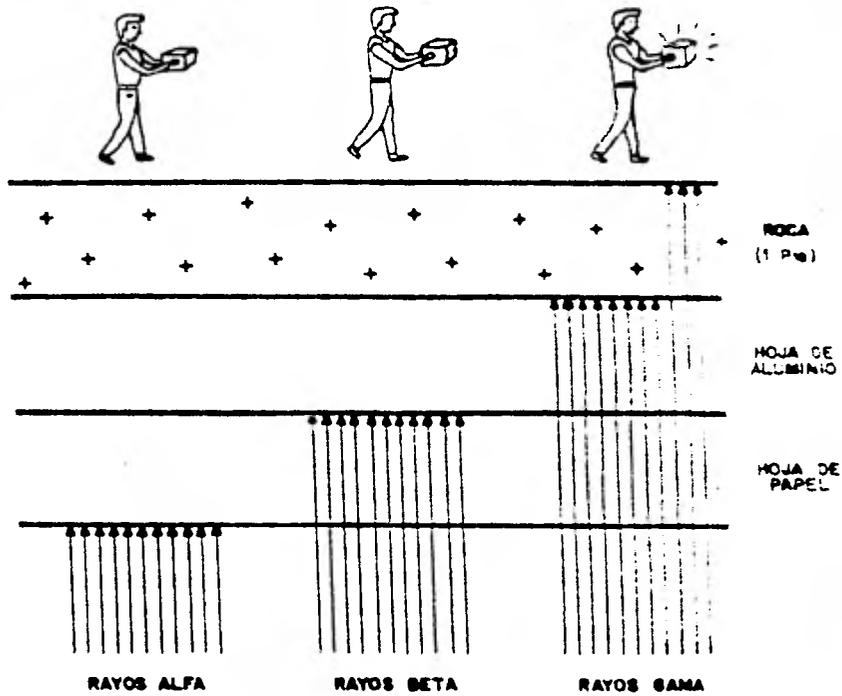


Fig. 1.2.1 PODER DE PENETRACION DE LA RADIACION

Tabla 1.2.1 Espectro electromagnético

NOMBRE DEL ESPECTRO	RANGO DE FRECUENCIA APROXIMADA (CICLOS POR SEGUNDO)
CORRIENTE DIRECTA Y MAGNETOESTATICA	0
FRECUENCIA DE LA LINEA DE POTENCIA	60
AUDIO FRECUENCIA (AF)	$2 \times 10^1$ — $2 \times 10^4$
FRECUENCIA MUY BAJA (VLF)	$10^4$ — $3 \times 10^6$
FRECUENCIA DE RADIO (RF)	$3 \times 10^6$ — $3 \times 10^8$
MICROONDAS (RADAR)	$3 \times 10^8$ — $3 \times 10^{11}$
INFRA ROJOS (IR)	$3 \times 10^{11}$ — $3 \times 10^{14}$
RAYOS ULTRAVIOLETAS VISIBLES (UV)	$3 \times 10^{14}$ — $3 \times 10^{16}$
RAYOS X (R-X)	$3 \times 10^{16}$ — $3 \times 10^{19}$
RAYOS GAMMA (R- $\gamma$ )	$3 \times 10^{19}$ — $3 \times 10^{23}$
RAYOS COSMICOS	$3 \times 10^{20}$ y mayores

de radiación. La atmósfera de la tierra es constantemente bombardeada por partículas cargadas, las cuales, se mueven a alta energía. La interacción de estas partículas con los componentes de la atmósfera dan como resultado una radiación secundaria que consiste de varios productos como electrones y fotones de rayos gama. Muchos de los rayos gama producidos son de alta energía, los cuales, después de la dispersión Compton (es el proceso por el cual un fotón de alta energía produce otros fotones de menor energía cuando éste choca con la superficie del terreno o el detector), constituyen una fuente de ruido en el espectro de rayos gama.

#### Efecto de los Rayos Cósmicos con la Latitud y la Altitud

La dependencia de los rayos cósmicos con la latitud se ilustra en la Fig. 1.2.2.a. Las cargas de las partículas primarias y los productos secundarios son absorbidos a través de colisiones con los constituyentes en la atmósfera de la tierra, el resultado es un marcado incremento en la intensidad de los rayos gama con un aumento de la elevación sobre el nivel del mar, como se ilustra en la Fig. 1.2.2.b. Los rayos gama que han sufrido el efecto Compton contribuyen al background. La contribución de los rayos cósmicos en la prospección terrestre es pequeña y prácticamente despreciable. Para trabajos de precisión aérea debe de corregirse este fenómeno, un método común es designar como background cósmico todos los elementos que tengan una energía arriba de 2.62

Fig 1.2.2. VARIACION DE LOS RAYOS COSMICOS CON LATITUD Y ALTITUD

Figura 1.2.2a Intensidad total de los Rayos Cosmicos al nivel del mar.

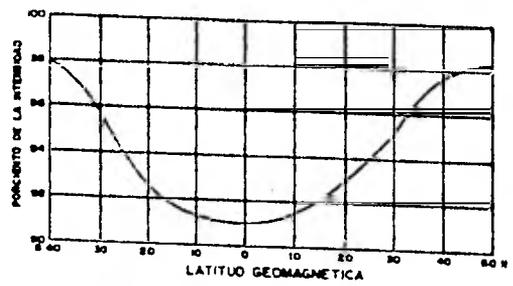
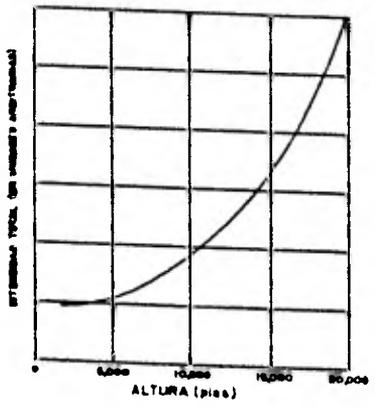


Figura 1.2.2b Intensidad total de Rayos Cosmicos



Mev (canal de Torio). La contribución de la dispersión Compton, debido a estos fotones de alta energía, es eliminada para los demás canales.

#### 1.4 Características del Campo de Radiación Gama.

En la detección de variaciones de los tres radioelementos en el campo por medio de la espectrometría aérea, es necesario entender el comportamiento del campo de radiación gama. El primer trabajo teórico sobre la variación en intensidad del campo de radiación gama con elevaciones sobre la superficie de la tierra, fue realizado por Eve (1911). El evaluó la intensidad de la radiación gama, medida en términos del número (n) de iones producidos por segundo por centímetro cúbico de aire y demostró que:

$$n = \frac{2\pi Q n_0}{\mu} \int_0^h e^{-\lambda z} dz \dots (1)$$

donde: Q - es el contenido medio de Radio en las rocas.

$n_0$  - es el número de iones producidos por centímetro por segundo en el aire a una temperatura y presión normal. Un centímetro de un Curie de Radio.

$\lambda$  - es el coeficiente de atenuación lineal de rayos gama en el aire.

$\mu$  - es el coeficiente de atenuación lineal de

rayos gama en el terreno.

$Z$  - es seno  $\theta$ , siendo  $(\pi/2 - \theta)$  el ángulo que subtende a un detector a una distancia  $h$  arriba de la superficie por un círculo en el terreno.

Gockerl (1910) realizó las primeras mediciones aéreas para calcular el efecto de ionización de la radiación gama a partir de la tierra usando un electroscopio montado en un globo y encontró una variación errática - con la altitud, probablemente debido a las fluctuaciones en la concentración de elementos que provienen del radón en la atmósfera.

Hess (1911, 1912) fue el primero en obtener resultados definitivos usando un globo y demostró que mientras la ionización decrece suavemente a distancias de - 1000 metros, arriba de los 2000m. se empieza a incrementar y a 5000 m. era dos o tres veces más el valor encontrado al nivel de la superficie. Estos resultados pueden ser explicados si la concentración de elementos hijos del radón decrece inicialmente con la altitud y para una mayor elevación la ionización se debe principalmente a una ionización cósmica.

Substituyendo  $x = l/z$  en la ecuación N°1, obtenemos una expresión comúnmente usada:

$$N = N_0 \int_1^{\infty} \frac{e^{-\lambda h x}}{x^2} dx = N_0 l z (\lambda h) \quad 2$$

donde:  $N_0$  - son las cuentas con un detector de rayos gama

a nivel del terreno.

N - es el conteo para una altitud h.

La función  $E_2$  es conocida como la integral exponencial, en la literatura rusa es referida como la función de King.

King (1912) generalizó la ecuación y obtuvo la variación de la intensidad de rayos gama N, con la altitud arriba de un disco circular de espesor d subtendiendo un ángulo  $2\theta$  sobre el punto de medición.

N está dado por:

$$N = \frac{2\pi n_0 \mu}{\mu} \left[ E_2(\lambda h) - E_2(\lambda h + \mu d) \right] - \cos\theta \left[ E_2\left(\frac{\lambda h}{\cos\theta}\right) - E_2\left(\frac{\lambda h + \mu d}{\cos\theta}\right) \right]$$

donde: Q,  $n_0$ ,  $\mu$ , h y  $\lambda$  son los mismos parámetros de la ecuación 1.

Debe señalarse que esta expresión ha sido recalculada en muchas ocasiones, Godby (1952), Darnley (1968), Duval (1971), Kellogg (1971) en algunas ocasiones errores matemáticos o tipográficos han ocurrido. A partir de esta ecuación puede calcularse el porcentaje de la radiación total detectada, P, originada a partir de un área circular que subtiende a un ángulo  $2\theta$  y está dado por:

$$P = 100 \times \frac{E_2(\lambda h) - \cos\theta E_2\left(\frac{\lambda h}{\cos\theta}\right)}{E_2(\lambda h)} \quad 4$$

Estos resultados son tabulados en la Tabla 1.4.1

Tabla L4.1  
Porcentaje de la radiación gama originada por una  
area circular debajo del punto de detección (altura 20m)

Porcentaje de la fuente infinita	Diámetro del Círculo (m)		
	Potasio <sup>a</sup> ( $\mu = 0.00580/m$ )	Uranio <sup>a</sup> ( $\mu = 0.00419/m$ )	Toro <sup>a</sup> ( $\mu = 0.00506/m$ )
10	74.5	76.2	73.6
20	110.9	113.3	110.0
30	143.4	146.8	154.1
40	176.1	180.6	190.1
50	211.5	217.2	229.5
60	252.2	259.5	279.5
70	302.7	312.3	333.5
80	372.7	395.8	415.2
90	493.3	513.4	598.5

<sup>a</sup> - Porcentaje de atenuación lineal para el oro a 0°C y 76cm de Hg

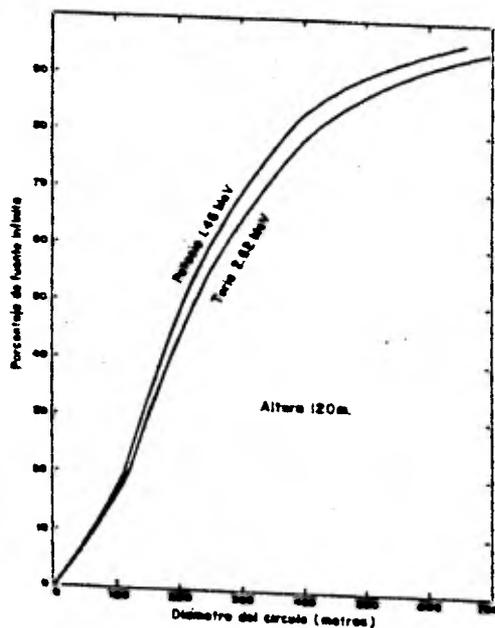
para el Potasio, Uranio y Torio sus energías de rayos gama a 1.46, 1.76 y 2.62 Mev.; en la Fig. 1.4.1 se muestra para el Potasio y Torio. Esto es válido para radiación gama no dispersada monoenergética, como se ve los "rayscan" gama son dispersión Compton que todavía contribuye a la ionización o a ser detectada.

La solución completa al problema de la transportación de rayos gama es extremadamente compleja, intervienen varios cientos de energías de rayos gama cada uno con diferentes coeficientes de atenuación y con múltiple dispersión en la tierra y en el aire. Si se tiene la ventaja de contar con una computadora de alta velocidad, la energía y la distribución angular de los rayos gama directos y la de las componentes de los rayos gama dispersados, pueden ser evaluados.

Esto ha sido realizado por Beck y sus ayudantes en Nueva York para efectos de evaluar la radiación gama a la que se está expuesto (también por armas nucleares).

Kirkegaard (1972) en forma independiente ha realizado cálculos similares aunados a la interpretación de rayos gama en el campo para exploración y llegó a soluciones similares. Ambos procedimientos de campo (Beck y Kirkegaard) resuelven la ecuación de transportación de Boltzmann para dos medios homogéneos semi-infinitos, uno ha sido en la superficie con una distribución uniforme de emisión de rayos gama y la otra en el aire. Para esta geometría particular, las matemáticas se han simplificado notablemente debido a la simetría. Ellos han sepa-

Figura 1.4.1. Porcentaje de la radiación gamma total detectada para áreas circulares debajo del detector



rado el flujo de rayos directo y el que ha sido dispersado. La naturaleza continua de la componente dispersada es ilustrada en la Fig. 1.4.2, ésto ha sido calculado por Kirkegaard y Loubvorg para una fuente homogénea de 1% de Potasio cubierta por una capa de 20 cms. de agua, la cual equivale aproximadamente a 200 m. de aire. La componente dispersada puede verse incrementada con cierta importancia para energías abajo de 500 Kev. Los resultados calculados para una fuente infinita de 1% de Uranio y 1% de Torio se muestran en la Fig. 1.4.3 y 1.4.4 La Fig. 1.4.5 ilustra la distribución de energía del flujo de rayos gamma y su contribución skyshine 1 m. arriba para un granito que contiene 3.4% de Potasio, 3 ppm. de Uranio en equilibrio y 12 ppm. de Torio.

La contribución "skyshine" es originada por rayos gama que provienen del suelo y que han sido dispersados hacia la superficie de regreso por el aire desde alturas arriba de 1m. El flujo "skyshine" está constituido por baja energía y contribuye aproximadamente en un 50% del flujo total para energías menores de 200 Kev. Para estas bajas energías, la radiación es virtualmente isotrópica teniendo una distribución angular uniforme debido a que los rayos gama han sufrido múltiples colisiones y han perdido todo el conocimiento de su dirección original.

En la Fig. 1.4.6 se tiene la distribución angular de un flujo de rayos gama típico a 1 m. ilustrando la suposición de que muy poco flujo proviene directamente de abajo del detector y que la mayoría de la radiación

Figura 1.4.2 Distribución de la energía del flujo de un fotón producido por potasio en arena ó en agua a una profundidad de 20cm.

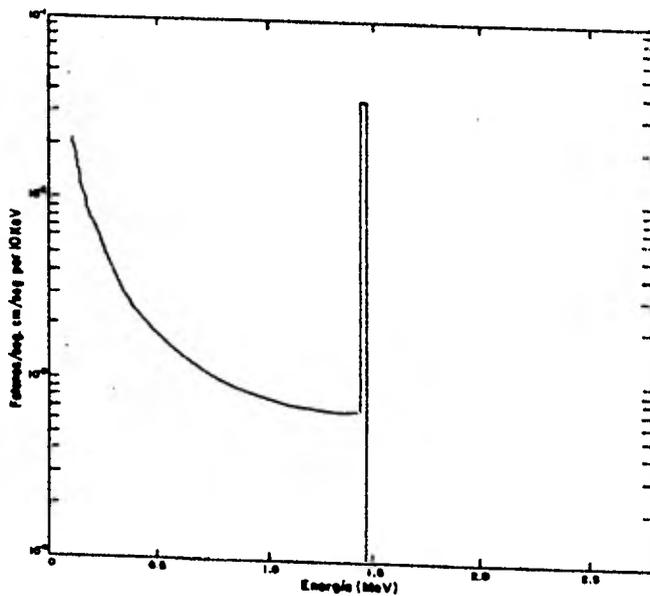


Figura 1.4.3 Distribución de la energía del flujo de un fotón producido por Uranio en arena ó en agua a una profundidad de 20cm.

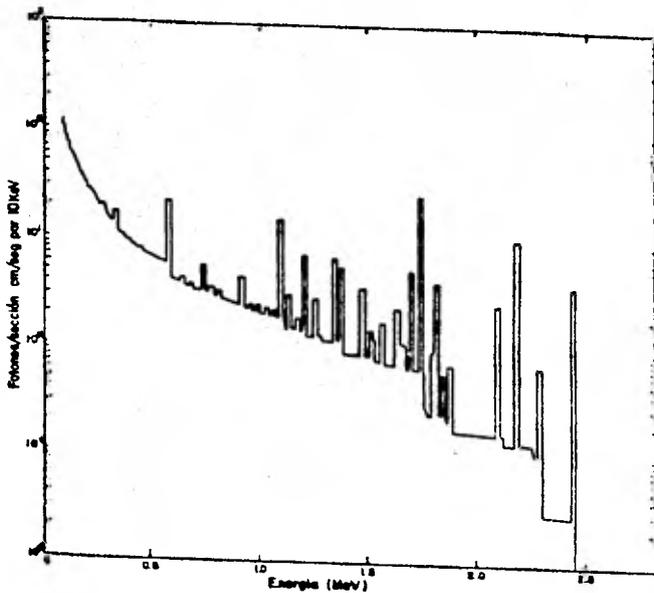


Figura 1.4.4. Distribución de la energía del flujo de un fotón producido por torio en arena ó en agua a una profundidad de 20 cm.

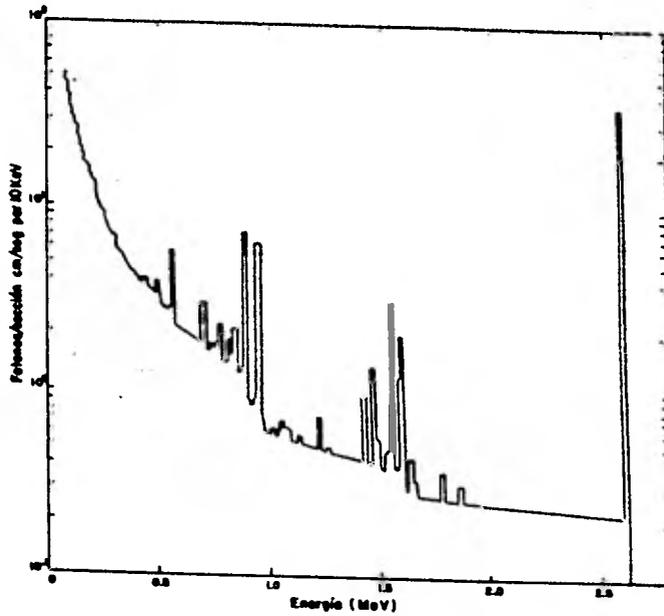


Figura 1.4.5 Distribucion del flujo total de fotones y la componente "Skyshine" (metro arriba de un granito tipico).

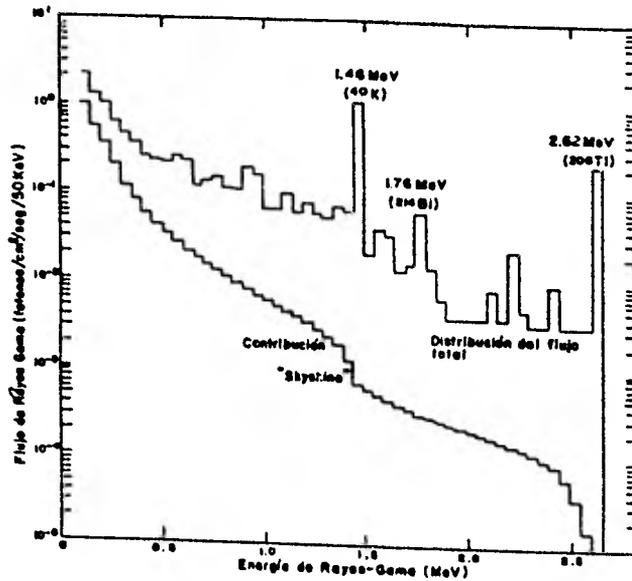
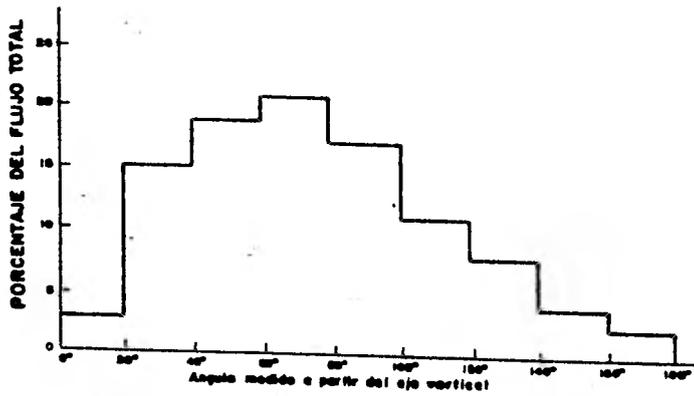


Figura 1.4.6 Distribucion angular del flujo de rayos gama a imetro.



viene en ángulos entre 60 y 80° con respecto a la vertical (Beck 1972).

### El Campo Gama del Quantum Primario

Los rayos primarios tienen un significado especial en los problemas de la Espectrometría de Rayos Gama. Los flujos de quantum son usualmente comparables con los flujos de la radiación dispersada y dependen solamente de la distribución de absorbentes sobre la línea que une la fuente radioactiva y el punto en observación.

Es importante para el campo del quantum primario los valores del coeficiente total de absorción de éste,  $\mu(X, Y, Z)$  será tomado en consideración solamente a lo largo de la línea que une la fuente puntual y el punto de observación. Se denotará la actividad de la fuente; es decir, el número de quantum primarios emitido por segundo a partir de un volumen  $dv(X, Y, Z)$  por  $q(X, Y, Z)dv$ ; donde  $q(X, Y, Z)$  tiene el significado de un volumen de actividad específico de la fuente. Consideraremos que las fuentes son isotrópicas.

Se hacen las siguientes consideraciones geométricas en el campo de la espectrometría gama:

- 1)  $\mu$  = constante sobre la línea que une la fuente y el punto de observación.
- 2) la densidad en el medio de absorción es un plano  $\mu = \mu(Z)$ , donde OZ es el eje normal al contacto de absorción.

Consideremos el campo de una fuente puntual con  $\mu = \mu(X, Y, Z)$ . Sea un núcleo con desintegración constante  $\lambda$  localizado en el origen. Denotaremos por  $P(t)$  la probabilidad de desintegración con la emisión de un quantum primario de energía  $E_0$  en el intervalo de tiempo  $(0, t)$ ; la probabilidad de que el quantum viaje una distancia  $r$  sin interactuar con los átomos del medio es denotada por  $P(r)$ . Tendremos que:

$$P(r) = e^{-\int_0^r \mu(x, y, z) dx}$$

La integración de  $\mu(X, Y, Z)$  es realizada a lo largo de la línea que une el origen y el punto de observación A;  $r$  es la distancia en esta línea a partir del origen. Sea un área  $ds$  tomada en A,  $d\Omega = ds \cos\theta/R^2$  es el ángulo sólido visto sobre el origen, donde  $\theta$  es el ángulo entre la normal a  $ds$  y la dirección a la fuente;  $R$  es la distancia entre la fuente y A. Debido a que ninguna dirección de escape del quantum es igualmente probable, la probabilidad de escape dentro del ángulo sólido  $d\Omega$  es  $P(\Omega) = d\Omega/4\pi$ . Por lo tanto, la probabilidad de que el quantum pase a través de  $ds$  en  $(0, t)$  es  $P_0 = P(t) P(R) P(\Omega)$ . El número del quantum que pase a través de esta superficie en el intervalo de tiempo  $(0, t)$  es, si la fuente consiste de un núcleo individual, igual a  $N_0 = 1P_0$ ; si la fuente contiene  $N$  núcleos idénticos, este número es  $NP_0$ . Si  $\lambda \ll 1$  y  $t = 1$  seg,  $P(t) = \lambda$ , por

lo tanto,  $NP(t) = \lambda N = q$  es la actividad de la fuente (el número de quantum emitidos por seg.). El flujo de quantum a través de  $ds$  es:

$$F_0 ds = NP_0 = \lambda NP(R)P(\Omega) = q P(R)P(\Omega)$$

Substituyendo los valores de  $P(R)$  y  $P(\Omega)$ , obtenemos:

$$F_0 = \frac{q \cos \theta}{4\pi R^2} e^{-\int_0^R \mu(x, y, z) dz} \dots\dots (1)$$

En la expresión (1) la cantidad  $F_0$  es el número de quantum primario que pasa a través de un área unitaria en 1 seg. y el cual se propaga en un ángulo  $\theta$  a una distancia  $R$  a partir de la fuente puntual.

Si  $\theta = 0$ , el flujo  $F$  coincide con el número de quantum primario, el cual pasa por segundo a través de una esfera con sección transversal unitaria, es decir, con una intensidad  $J$  sobre un punto  $A$ .

$$J = \frac{q}{4\pi R^2} e^{-\int_0^R \mu(x, y, z) dz} = \frac{F_0}{\cos \theta} \dots\dots (2)$$

El flujo  $F_0$  y la intensidad  $J$  debido a un cuerpo de determinada forma, es obtenida integrando sobre todas las fuentes elementales de radioactividad.

#### El campo de cuerpos simétricos

Como fuente auxiliar consideraremos un disco con densidad de superficie  $\nabla = \text{constante}$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{seg.}$ ). Determinemos el campo del quantum primario sobre un punto  $A$  en el eje del disco, si los espesores de las capas --

absorbentes son  $h_1$  y  $h_2$ , ver Fig. 1.4.7.

Conforme la ecuación (2), la intensidad de la radiación gama para un elemento superficial  $ds$  del disco está dada por:

$$dJ = \frac{\tau S ds d\varphi}{4\pi r^2} e^{-\int_0^r \mu(r) dr}$$

$$\text{donde } \varphi = \tau S ds d\varphi$$

La intensidad de radiación para un anillo de radio  $S$  y ancho  $ds$  es:

$$dJ = \frac{\tau S ds}{4\pi r^2} e^{-\int_0^r \mu(r) dr} \int_0^{2\pi} d\varphi$$

$$dJ = \frac{\tau S ds}{2 r^2} e^{-\int_0^r \mu(r) dr}$$

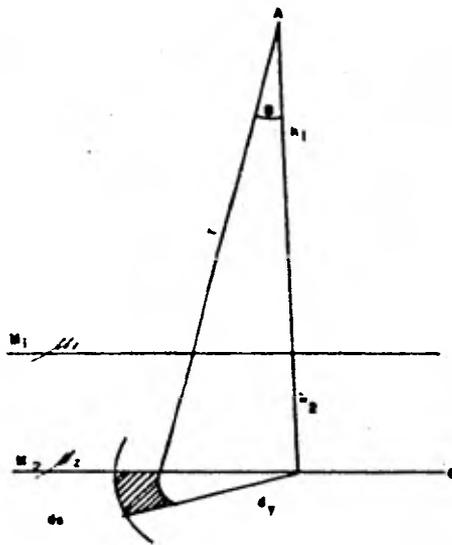
La integral que determina la absorción, tiene la forma:

$$\int_0^r \mu(r) dr = \int_0^{r_1} \mu_1 dr + \int_{r_1}^{r_2} \mu_2 dr = \mu_1 r_1 + \mu_2 (r_2 - r_1)$$

donde:  $r_1 = h_1 / \cos\theta$  y  $r_2 - r_1 = h_2 / \cos\theta$

$$\begin{aligned} \mu_1 r_1 + \mu_2 (r_2 - r_1) &= \mu_1 \frac{h_1}{\cos\theta} + \mu_2 \frac{h_2}{\cos\theta} \\ &= \frac{\mu_1 h_1 + \mu_2 h_2}{\cos\theta} \end{aligned}$$

Fig 1.4.7. DISCO



donde:  $\cos\theta = (h_1 + h_2)/r = h/r$

entonces: 
$$\int_0^r \mu(r) dr = \left( \frac{\mu_1 h_1 + \mu_2 h_2}{h_1 + h_2} \right) r = \mu r$$

donde:  $\mu = (\mu_1 h_1 + \mu_2 h_2)/h$  es el valor medio pesado del coeficiente de atenuación.

Además, de la relación  $r^2 = h^2 + y^2$  se sigue que  $\mathcal{S} d\mathcal{S} = r dr$ , por lo tanto, se obtiene:

$$d\mathcal{S} = \frac{\mathcal{S}}{2} e^{-\mu r} \frac{dr}{r} \text{ ----- (3)}$$

Por analogía, el flujo  $F_2$ , a través de un área horizontal puede escribirse como:

$$dF_2 = d\mathcal{S} \cos\theta = \frac{\mathcal{S} h}{2} e^{-\mu r} \frac{dr}{r^2} \text{ ----- (4)}$$

Los valores de  $\mathcal{S}$  y  $F_2$  para el disco son respectivamente:

$$\mathcal{S} = \frac{\mathcal{S}}{2} \int_{\mu h}^{\frac{\mu h}{\cos\theta}} e^{-\mu r} \frac{dr}{r} \text{ ----- (5)}$$

$$F_2 = \frac{\mathcal{S} h}{2} \int_{\mu h}^{\frac{\mu h}{\cos\theta}} e^{-\mu r} \frac{dr}{r^2} \text{ ----- (6)}$$

Las expresiones (5) y (6) constituyen las funciones integrales exponenciales.

Una función integral exponencial de n-ésimo orden está definida por la expresión:

$$E_n(x) = x^{n-1} \int_x^\infty e^{-z} \frac{dz}{z^n}$$

(n = 0, 1, 2, 3 ...);

$$E_n(0) = \frac{1}{n-1}; \quad E_n(x) = 0 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array}$$

$x \rightarrow \infty$

Para  $E_n(x)$  tendremos:

$$\left. \begin{aligned} \int_x^\infty E_n(z) dz &= E_{nH}(x) \\ \frac{dE_{nH}}{dx} &= -E_n(x) \\ E_{nH}(x) &= \frac{1}{n} [e^{-x} - x E_n(x)] \end{aligned} \right\} \text{--- (8)}$$

Usando la expresión (6), se encuentra que para el flujo del quantum sobre el punto A en el eje del disco será:

$$J = \frac{V}{2} \left[ E_1(\mu h) - E_1\left(\frac{\mu h}{\cos \theta_0}\right) \right] \text{--- (9)}$$

$$F_2 = \frac{V}{2} \left[ E_2(\mu h) - E_2\left(\frac{\mu h}{\cos \theta_0}\right) \right] \text{--- (10)}$$

Asignándole distintos valores a  $\theta_0$  y substituyendo  $V = q(z)dz$  e integrando, se pueden obtener valores para J y F de cuerpos geométricos con un significado práctico.

Campo para una placa radioactiva con densidad de fuente  $V = \text{const}$ , la cual, puede ser encontrada usando las expresiones (9) y (10).

Haciendo  $\theta_0 \rightarrow 90^\circ$  y como  $x \rightarrow \infty$ ,  $E_n(x) = 0$

$$J = \frac{V}{2} E_1(\mu h)$$

$$F_2 = \frac{V}{2} E_2(\mu h)$$

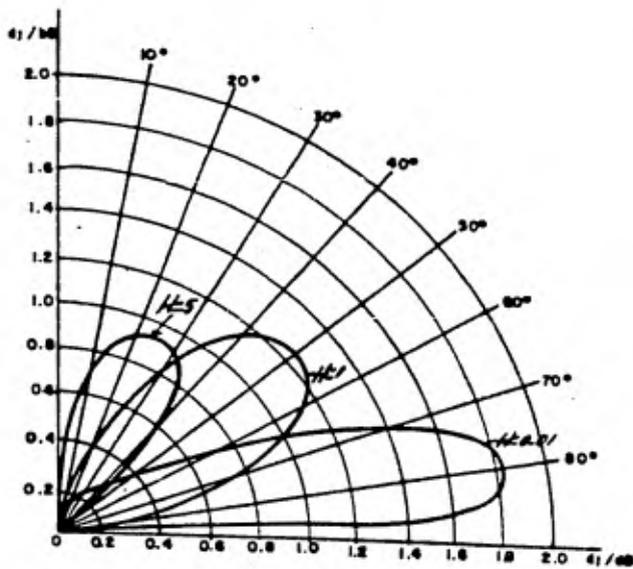
Diferenciando (9) con respecto al ángulo  $\theta_0$ , se obtiene la siguiente expresión para la distribución angular del quantum:

$$\frac{dJ}{d\theta} = \frac{V}{2} e^{-\mu h \sec \theta} \sec^2 \theta$$

La gráfica de  $dJ/d\theta$  para diferentes  $\mu h = H$  nos da la variación de la distribución angular del quantum primario para una placa de distintos espesores de absorción, ver Fig. 1.4.8.

Fig 1.4.8

VARIACION DE LA DISTRIBUCION ANGULAR DE EL CUANTUM PRIMARIO PARA UNA PLACA DELGADA A DIFERENTES  $u \cdot h$ .



## 1.5 Interacción de la materia con los Rayos Gama.

### 1.5.1. Efecto Compton

En 1923 Compton, haciendo incidir un haz de rayos de gran frecuencia, como son los X, sobre un trozo de grafito, pudo comprobar que se producía una gran difusión de estos rayos, cuya frecuencia había sido modificada respecto a la de los incidentes, variando de valor según el ángulo de difusión, quedando así demostrado una vez más el carácter dual de la luz: de naturaleza ondulatoria en los fenómenos de propagación, y corpuscular en cuanto a su interacción con la materia. Compton interpretó esto como un choque elástico entre el fotón, que se comporta como una verdadera partícula material, y el electrón atacado.

$$\text{Aquí } E = hf = \emptyset + \frac{1}{2} m_e v^2 = h_{f_0} + h_{f_1}$$

$h_{f_1}$  = energía del nuevo fotón

$$h = \emptyset + \frac{1}{2} m_e v^2 = \text{energía aplicada al electrón}$$

En el efecto Compton un rayo gama pierde energía al sufrir una colisión con un electrón libre, ver Fig.

#### 1.5.1.1.

Si  $I$  = número promedio de quantum portados por el haz incidente por seg. a través de un área de  $1 \text{ cm}^2$  normal al haz

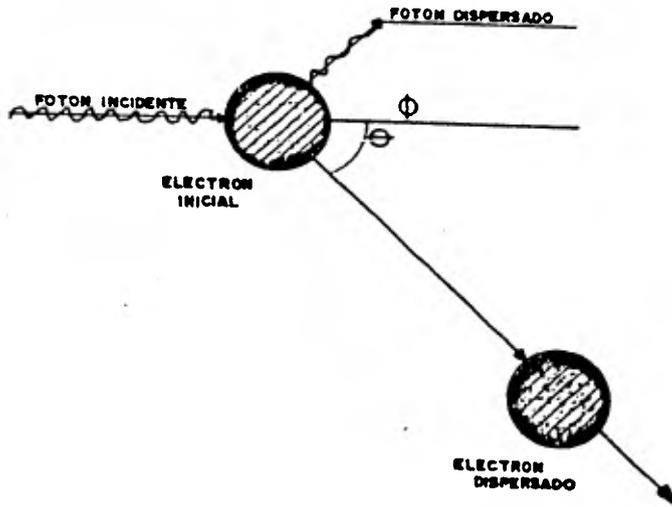
$\bar{S}$  = número promedio de quantum que sufren dispersión Compton por segundo en todas direcciones.

$\sigma_c$  = la sección de dispersión del átomo, entonces:

$$\bar{S} = \sigma_c \bar{I}$$

# EFFECTO COMPTON

Fig 1.5.1.1.



### 1.5.2. Efecto Fotoeléctrico

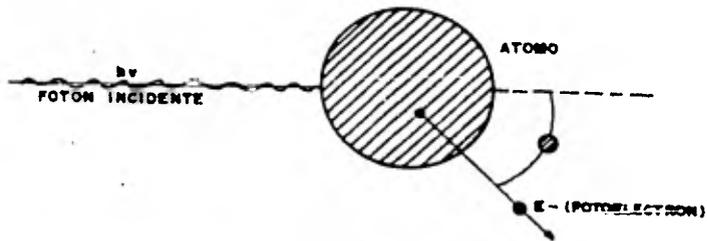
En el efecto Compton un fotón incidente no puede ser absorbido totalmente por un electrón libre, sin embargo, la absorción total puede tener lugar si el electrón está inicialmente ligado al átomo, ya que todo el átomo participa. El efecto fotoeléctrico puede ser visualizado como una interacción del fotón primario con la nube de electrones del átomo, en la cual, toda la energía del fotón ( $h\nu$ ) es absorbida y un electrón es emitido con una energía  $T = h\nu - Be$

En la Fig. 1.5.2.1. se tiene la representación esquemática del proceso fotoeléctrico. El fotón primario es completamente absorbido y un fotoelectrón es creado a un ángulo  $\theta$  con una energía  $T = h\nu - Be$ . El momento es conservado por el retroceso del átomo. Debido a que es esencial la presencia y participación del átomo, el efecto fotoeléctrico es considerado como una interacción entre el fotón incidente  $h\nu$  y el átomo.

Los rayos  $\delta$  son ondas electromagnéticas y, como tales, pueden considerarse formadas por partículas elementales, sin masa, llamados fotones o cuantos de luz.

REPRESENTACION ESQUEMATICO  
DEL PROCESO FOTOELECTRICO

Fig 1.5.2.1.



Planck estableció que la energía de un fotón tiene por valor

$$E = hf$$

$h$  = la constante de Planck ( $6.62 \times 10^{-27}$  ergios por seg.)

$f$  = frecuencia de la onda electromagnética (luz) utilizada

Postulado de Planck: cuando un fotón incide sobre la superficie de un metal, puede transferir a un electrón de esta superficie la suficiente energía para permitirle que escape atravesando la energía potencial que posea.

1            Como  $f = \frac{c}{\lambda}$

$c$  = velocidad de la luz

$\lambda$  = longitud de onda

entonces:             $E = h \frac{c}{\lambda}$

Einstein en 1905, en su teoría sobre el efecto fotoeléctrico, determinó que la energía  $E$  de un fotón es

$$E = hf = \phi + \frac{1}{2} m v_i^2$$

Cuando un fotón choca con un electrón de un átomo de la superficie de un metal, le comunica una energía  $\phi$ .

$$\text{Energía del electrón } E = \phi + \frac{1}{2} m v^2$$

$\phi$  = trabajo de extracción

La energía del fotón realmente aprovechada es

donde:             $\phi = E' = hf.$

$f_0$  = umbral de frecuencia fotoeléctrico ( $f < f_0$

no hay emisión de electrones)

$\phi$  bajo para metales alcalinos

### 1.5.3. Producción de Pares

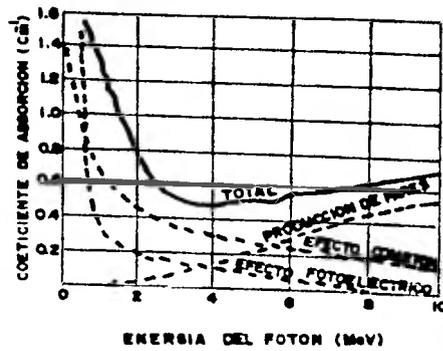
Para fotones de energías que sobrepasan dos veces la energía de reposo de los electrones; existe otro mecanismo a través del cual pueden ser absorbidos estos cuantos por la materia. Este fenómeno es la producción de pares, que consiste en la conversión de un quantum de energía  $h\nu$  en un par de electrones, uno  $e^-$  y el otro  $e^+$ , con la misma carga y la misma masa; así si  $h\nu = 2mc^2$  sólo se originan las partículas, pero generalmente  $h\nu = 2m_0c^2$  y el exceso de energía  $h\nu - 2m_0c^2$  aparece como energía cinética de los electrones.

En la gráfica 1.5.3.1. se puede mostrar las regiones en que tienen lugar estos tres procesos de interacción de los rayos gama con la materia.

Cuando una partícula  $\alpha$  penetra en una masa gaseosa, chocará con los núcleos de los átomos que la componen. En cada choque pierde parte de su energía cinética hasta quedar detenida, absorbida por algún núcleo, o bien, si alguno de los choques se ha producido contra uno de los electrones de los átomos gaseosos lo desplazará de su órbita si la partícula aún posee energía suficiente. El átomo quedará escindido en dos partes; una el electrón separado, que tiene carga negativa, y la otra el resto, con los mismos positrones y una carga cortical menor siendo, por tanto, positiva. Serán pues un par de iones primarios, de signo contrario, que tenderán a recombinarse en condiciones normales, pero si por el contrario situamos en sus proximidades un

## ABSORCION DE RAYOS GAMA

Fig 1.5.3.1.



electrodo positivo y otro negativo, con una diferencia de potencial suficiente, cada uno de los iones se irá hacia el electrodo de signo contrario, al suyo, según el esquema 1.5.3.2.

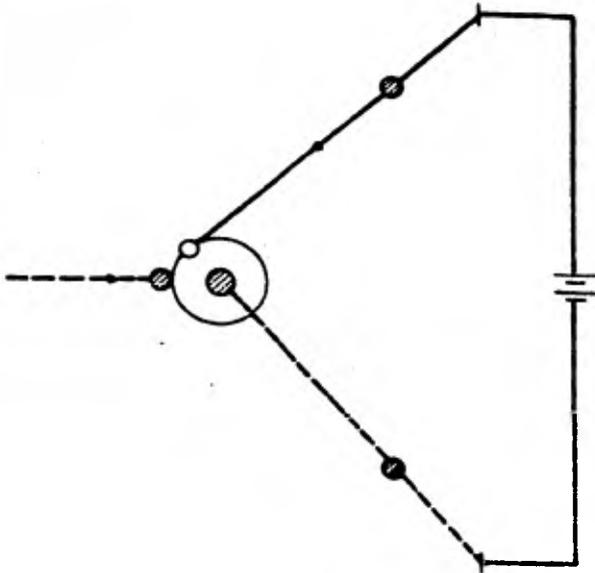
Si aplicamos una diferencia superior a la mínima precisa para alcanzar los electrodos, la energía cinética de los iones primarios podrá llegar a ser lo suficientemente grande para permitir que a su vez provoquen nuevos choques con los electrones de otros átomos produciéndose pares de iones secundarios, y si exageramos la tensión podremos llegar, por repetición del proceso, a la formación de nuevos pares que en avalancha alcanzarán los electrodos, y acusaremos en el receptor como una sola pulsación.

Se comprende que tratándose de partículas  $\beta$  el proceso sería semejante pero menor el número de pares iones producidos (por el tamaño más pequeño se reducen las posibilidades de choques). En cambio, como su velocidad es superior a la de los rayos  $\alpha$ , podrá ser aplicado un menor voltaje. Regulando éste, y la distancia entre la entrada de partículas y los electrodos, podrá establecerse un equilibrio que permita la recepción del total de iones o bien sólo de los creados por la radiación  $\beta$ .

El mecanismo de transporte de la energía  $\gamma$  se produce por efecto fotoeléctrico y de Compton.

PRODUCCION DE PARES

Fig 1.5.3.2



## 2.- Espectrometría de Rayos Gama

### 2.1 Definición de Espectrometría.

### 2.2 Breve historia en la Espectrometría de Rayos Gama.

### 2.3 Técnicas Instrumentales y herramientas que se utilizan en la Espectrometría Moderna.

#### 2.3.1 Detectores.

#### 2.3.2 Acondicionamiento electrónico de la señal.

#### 2.3.3 Análisis de la altura del pulso.

#### 2.3.4 Estabilización del espectro.

#### 2.3.5 Presentación y Grabación de datos.

## 2.1 Definición de Espectrometría.

El motivo de la espectrometría de los rayos gamma es obtener información acerca de la distribución de los tres elementos radioactivos: Uranio, Torio y Potasio. Estos elementos emiten radiación gamma cuya energía es característica del Isótopo emitido. Por consiguiente, a través de medir la intensidad y la energía de la radiación gamma sobre un área específica, teóricamente debe ser capaz de determinar la abundancia de los tres elementos. Probablemente ningún otro método requiere la consideración de tantas variables como la espectrometría de rayos gamma. Además de las variables normales de geometría y contrastes físicos de propiedades, es necesario considerar el tamaño, la eficiencia del detector, la velocidad a la cual se mueve el detector, los efectos de las variables meteorológicas tales como: presión barométrica, estabilidad del aire y el movimiento de masas grandes de aire.

El término espectrometría de rayos gamma es aplicado a cualquier sistema que separa la radiación gamma dentro de dos o más componentes de energía. Tales sistemas están formados por el detector y la consola. El detector, normalmente un cristal de Ioduro de Sodio, absorbe la radiación gamma y la convierte en un centelleo de luz o escintilación. La luz es recibida por un tubo fotomultiplicador que convierte el centelleo de luz a un

voltaje proporcional a la intensidad del parpadeo de luz. La consola separa el voltaje en un número de clases dependiendo de la magnitud, para obtener finalmente el espectro de los rayos gama incidentes.

## 2.2 Breve historia en la espectrometría de Rayos Gama.

Hay tres elementos en el medio ambiente, los cuales pueden ser detectados por la radiación gama emitida a través de los isótopos naturales asociados con ellos y son: Potasio, Uranio y Torio.

Por los años 1950, no había un método que distinguiera entre las distintas energías, el detector de radiación común era el contador Geiger, el cual, tenía únicamente una indicación de la energía o conteo total. Las ventajas de los detectores de Ioduro de Sodio activados con Talio son las siguientes:

- 1.- Tienen una potencia de varios cientos de veces más que el contador Geiger para el rango de energía de interés.

- 2.- Los pulsos de salida producidos tienen amplitud proporcional a la energía de la radiación gama que los origina.

Agregando una electrónica que sea capaz de diferenciar y contar los pulsos de acuerdo a sus amplitudes, fue posible separar las contribuciones de tres radioelementos de acuerdo a sus energías, esto, por definición, es la espectrometría de rayos gama.

Los rayos gama que son absorbidos en el detector

con cristales de Ioduro de Sodio, causan luz intermitente o escintilaciones cuya intensidad es proporcional a la energía de los rayos gama. El tubo fotomultiplicador, el cual está ópticamente acoplado al cristal, convierte las escintilaciones a su correspondiente señal eléctrica, la cual, puede ser amplificada y analizada por la electrónica adecuada. Ver Fig. 2.2.1.

La técnica de separar pulsos de acuerdo a sus amplitudes es conocida como Análisis de la Altura del Pulso. El método más elemental es usar un solo circuito discriminador, el cual, nos permitirá que todos los pulsos arriba de una cierta amplitud preestablecida (energía) sean contabilizados y los demás rechazados, o viceversa. Un arreglo más sofisticado usa dos de estos discriminadores predispuestos a dos niveles diferentes. Los pulsos que caigan dentro de estos dos niveles serán contabilizados mientras que los demás serán rechazados. Este arreglo es conocido como analizador individual de canal (Single Channel Analyser S.C.A.) Fig. 2.2.2.

Hasta mediados de la década de los 60's las proyecciones aero-radiométricas estaban limitadas a mediciones de "Cuenta Total". El primer sistema espectrométrico de rayos gama para uso aéreo consistía de lo siguiente en términos generales:

- escintilómetro, usualmente uno de 150 x 100 mm.

Figura 2.2.1 Detector Escintilador de Rayos Gama

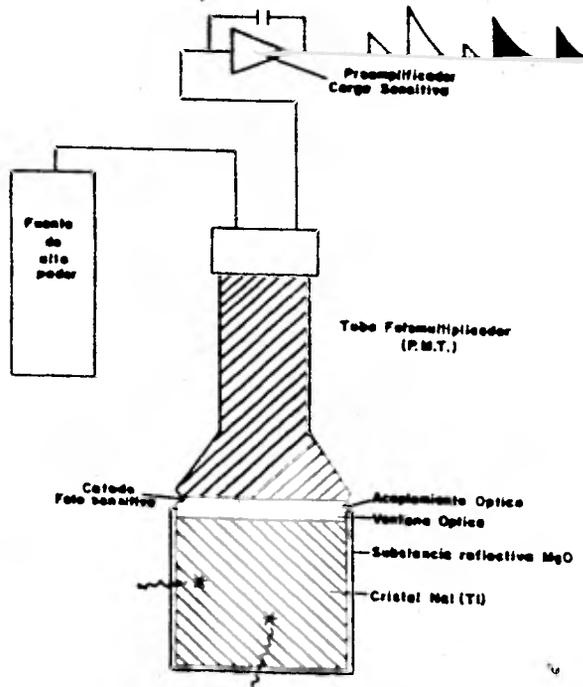
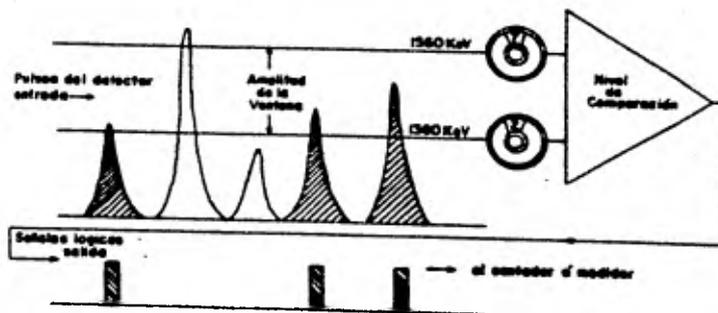


Figura 2.2.2 Analizador individual de canal



(6 x 4 pulg.).

- 4 canales de conteo, cada uno con un analizador individual de canal y su contador analógico.
- 4 canales de grabación.

El bloque diagramático se muestra en la Fig. 2.2.3. Tres de los analizadores individuales de canal cubrían las amplitudes de los pulsos (bandas de energía) correspondientes al Potasio, Uranio y Torio, mientras que el cuarto cubría el rango de energía que abarcaba los tres anteriores, llamado "Cuenta Total".

En los siguientes años se produjeron varios sistemas basados en los conceptos anteriores, los cuales, encontraron una amplia aceptación dentro de la industria de la exploración.

Ahora incluiremos el espectro obtenido de una -- plataforma de calibración estandar, Fig. 2.2.4, y pasaremos a discutir los aspectos instrumentales de esta técnica.

Desde un punto de vista instrumental el motivo de la prospección radiométrica es grabar las intensidades de radiación por el detector en bandas de energía predeterminadas o "ventanas". Los factores instrumentales que pueden causar errores en este proceso son los siguientes:

- Conteo estadístico inadecuado para datos cuantitativos.

Figura 2.2.3

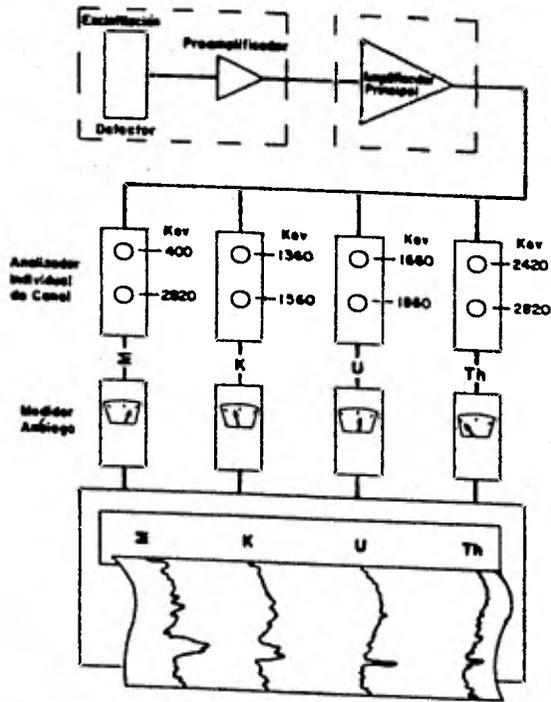
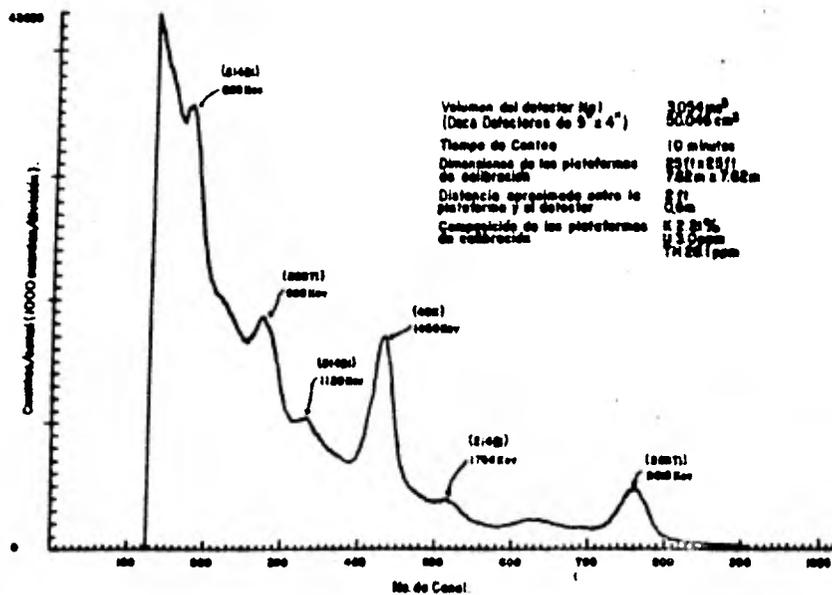


Figura 2.2.4 Espectro típico de la radioactividad natural



- Resolución inadecuada del detector debido a una calidad pobre de los cristales o a defectos en el ensamble.
- Deriva en la ganancia del detector, esto es, variaciones sistemáticas en la altura del pulso - que corresponderían a escintilaciones generadas para una energía determinada.
- Imprecisión o variación de los anchos de las - ventanas.
- Excesivo ruido en la amplificación del pulso y en la forma, causando una variación estadística adicional en la altura del pulso.
- Distorsión del espectro para altos conteos.
- Distorsión en la altura del pulso debido al recubrimiento en las cajas de los cristales para las altas energías de las fuentes cósmicas.

### 2.3 Técnicas instrumentales y herramientas que se utilizan en la espectrometría moderna.

Las técnicas instrumentales y las herramientas que se usan en una espectrometría moderna de rayos gama serán discutidas a continuación:

#### 2.3.1 Detectores

El detector de escintilaciones es aún el más comúnmente usado para exploración aérea o terrestre. La Fig. 2.2.1 muestra el cristal de  $\text{NaI(Tl)}$ , cuya -- abreviación corresponde a Ioduro de Sodio (activado con Talio). Este es el material más comúnmente usado en los detectores de escintilaciones para aplicación a la exploración por Uranio, ésto no quiere decir - que sea el único. Algunas veces se utilizan otro ti po de cristales inorgánicos aplicados a registros - de pozos como el Ioduro de Cesio con Sodio o Talio ( $\text{CsI(Na)}$ ,  $\text{CsI(Tl)}$ ) y Germanato de bismuto ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ). Los cristales de Ioduro de Cesio tienen una densidad de un 25% mayor que el Ioduro de Sodio con su correspondiente mayor eficiencia: como se ve, la habilidad para resolver picos espectrales (resolución) es menor para el Ioduro de Sodio. El Germanato de Bismuto tiene una densidad muy cercana al

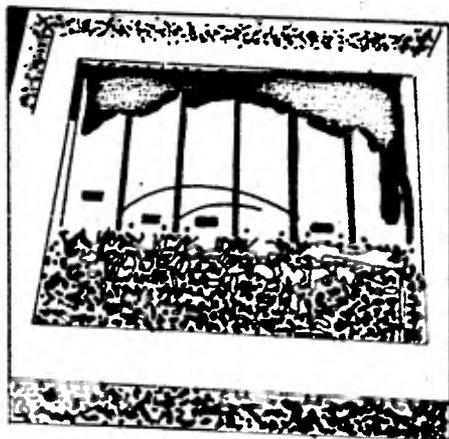
doble del Ioduro de Sodio, pero la resolución de los detectores hechos de este material es apenas adecuada al presente trabajo. Una clase completamente diferente de escintilómetros está basada en el uso de plásticos orgánicos, - estos materiales tienen bajos números atómicos y, por consiguiente, poca eficiencia para una completa absorción de los rayos gama de 0.5 - 3.0 Mev, el cual, es el rango de energía usado en la exploración por Uranio. Los detectores hechos de plásticos son menos costosos que los de cristales inorgánicos.

Para espectrómetros portátiles se utiliza un detector de escintilación con un tubo fotomultiplicador (photomultiplier tube P.M.T.) y un cristal de 76 x 76 mm. (3 x 3 pulg.). El número de fotomultiplicadores varía, la razón es que a veces se requiere tener un mejor control de la colección de la luz como escintilación.

Un tipo de detector que ha sido muy común últimamente, es uno de sección transversal 100 x 100 mm. (4 x 4 pulg.) por 406 mm. (16 pulg.) de largo con un tubo fotomultiplicador al final, e inclusive se han formado paquetes - de estos cristales formando totales de 512 pulg<sup>3</sup> (2 cristales, 1024 pulg<sup>3</sup> (4 cristales), 2048 pulg<sup>3</sup> (8 cristales) y 3072 pulg<sup>3</sup> (12 cristales). La Fig. 2.3.1.1 muestra un arreglo de este tipo.

Una medida común de la precisión de cualquier escintilómetro es la resolución de la energía del pico debido

Fig 2.3.1.1.



ARREGLO TIPICO DE SEIS DETECTORES No1 DE  
100X100X40mm (4X4X1 1/2") INSTALADOS  
EN UNA CAJA CON PROTECCION TERMICA Y ELECTRICA.

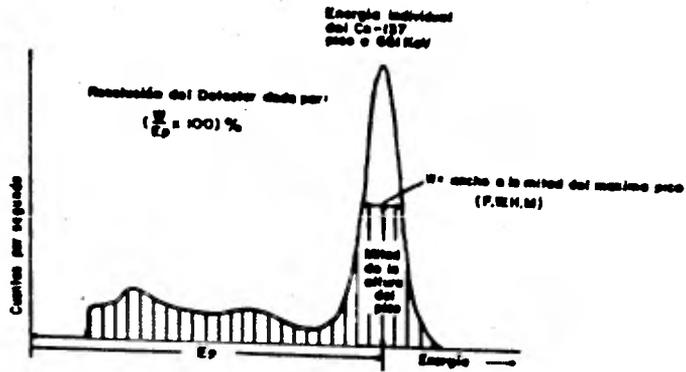
al Cs-137 a 661 Kev. Esto es una medida de la sutileza - del pico y, por lo tanto, implica una medida de la habilidad del detector para resolver dos picos cercanamente espaciados: La Fig. 2.3.1.2 muestra la forma en que la resolución del detector es calculada y especificada como un porcentaje.

Los detectores individuales usados en arreglos aéreos, tal como el de 100 x 100 x 406 mm. (4 x 4 x 16 - pulg.), deben tener una resolución de 9.5% o más.

Los rayos gama dentro del rango de 0.5 a 3.0 Mev, interaccionan con el Ioduro de Sodio a través de series de interacciones con electrones, durante lo cual la mayor parte de la energía es convertida a series de escintilaciones simultáneas. Si toda la energía de un rayo gama incidente es absorbida por el detector resultará que la escintilación producida dará como resultado una altura de pulso correspondiendo al total de la energía. Después de un gran número - de absorciones, algunos rayos no son completamente absorvidos por estar interaccionando en los bordes relacionando la altura de pulso con una incidencia de energía menor y, por lo tanto, no será contabilizado en la ventana adecuada de energía.

Los fotones absorbidos parcialmente, los cuales - aparecen en las ventanas de menor energía después del proceso de separación de pulsos, son reducidos en un nuevo tipo de detector conocido como detector "Phoswich" (phosphor-

Figura 2.3.1.2



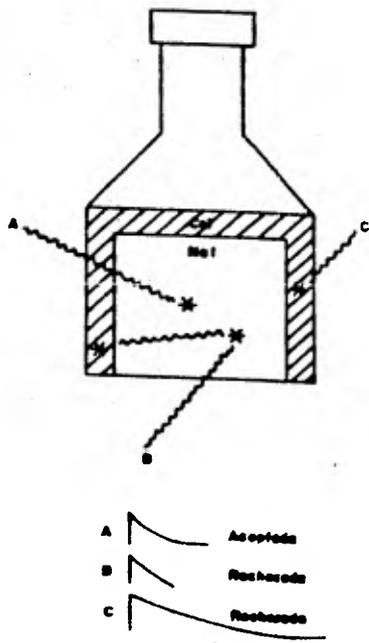
sandwich).

El principio es ilustrado en la Fig. 2.3.1.3 en donde el cristal es de una forma similar en donde el pastel es de Ioduro de Sodio y la cubierta el Ioduro de Cesio. El tiempo de desintegración de los dos materiales es diferente en una proporción de 4:1, de tal manera que es posible diferenciar entre los fotones que han sido completamente absorbidos en la porción central del Ioduro de Sodio (la parte activa del detector) y aquéllos que han sido absorbidos por ambas partes, o sea, aquéllos que han sido absorbidos parcialmente. Se utiliza una forma de discriminación de circuito para rechazar todos aquéllos que se encuentran total o parcialmente en la capa de Cesio y se aceptan solamente aquéllos que han sido completamente absorbidos por el Ioduro de Sodio. El detector "Phoswich" todavía se encuentra en una etapa experimental.

### 2.3.2. Acondicionamiento electrónico de la señal

Este es un término general usado para describir el proceso de extracción, filtrado o amplificación de señales analógicas de tal manera, que la señal contenida puede ser digitizada o presentarse en alguna forma visual o auditiva con el mínimo de ruido requerido. Para este caso el objeto es convertir las señales que aparecen en el ánodo del MT a un voltaje cuya amplitud es proporcional a las energías de los rayos gama.

Figure 2.3.1.3 Detector "PHOSWICH"



Los sistemas tienen un preamplificador sensitivo de carga para cada detector, usualmente localizado en la caja de los cristales, el cual convierte los pulsos de carga a pulsos de voltaje de una longitud razonable de manejo. Después sigue el amplificador principal que contiene filtros especiales, los cuales, dan forma a los pulsos con la mejor relación señal-ruido. Fig. 2.3.2.1.

### 2.3.3 Análisis de la altura del pulso.

Los analizadores multi-canales actualmente son usados para las medidas de la altura del pulso. Esto requiere el uso de un convertidor analógico a digital, lo cual, no es más que un voltímetro digital de alta velocidad. La amplitud de cada pulso que entra al detector es medido por el convertidor analógico a digital, el cual, le asigna a este pulso un número entre 1 y otro valor total de la escala, generalmente 256 ó 512.

Hay dos principios distintos de operación para convertir la altura del pulso a un número proporcional a éste. Uno es conocido como la Rampa de Wilkinson y el otro es el Método de Aproximaciones Sucesivas.

Con el principio de Wilkinson el Pulso del detector es usado para cargar un capacitor, el cual, es entonces linealmente descargado a cero, al mismo tiempo que los pulsos son contados por un oscilador de alta velocidad y el número en el contador al final de la descarga es convertido a un número en el canal, Fig. 2.3.3.1.

Figura 2.3.2.i Acondicionamiento de la Señal

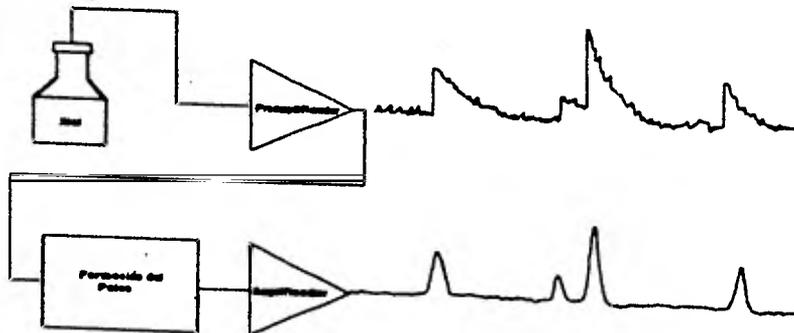
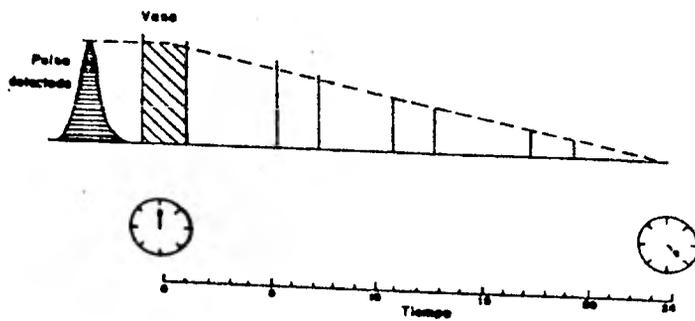


Figura 2.3.3.1 Principio de la Rampa de Wilkinson (A.D.C.)



El Método de Aproximaciones Sucesivas trabaja comparando el pulso de entrada con una serie de medidores, - Fig. 2.3.3.2. Este es un método mucho más rápido que el principio de Wilkinson; por ejemplo: para separar un pulso dentro de los 256 espacios, solamente requiero 8 medidores con 8 comparaciones, la dificultad está en tener comparaciones exactas y substraer de los medidores (voltajes desarrollados a través de resistores de precisión) los pulsos de entrada.

#### 2.3.4 Estabilización del espectro.

Todos los espectrómetros son susceptibles de sufrir derivas (drift) en el espectro, esto es, la posibilidad de que la altura del pulso correspondiente a una energía dada cambie en un período de algunas horas. Esto se manifiesta por sí solo como un cambio en la escala horizontal del espectro, causando que los picos espectrales se desplacen de los centros de las ventanas de conteo, Fig. 2.3.4.1.

Las principales causas de la deriva del espectro es que las ganancias de los tubos fotomultiplicadores son notoriamente dependientes de la temperatura y, en particular, no siempre estables a una temperatura constante, además de los cambios en la potencia del voltaje suministrado. Un cambio de 0.1% en la altura del voltaje aplicado a los tubos del fotomultiplicador cambia la altura del pulso en 1%.

Figura 2.3.3.2 Principio de Aproximaciones Sucesivas ADC.

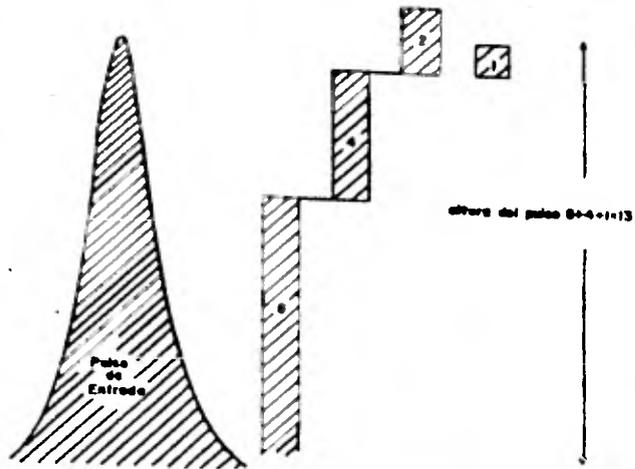
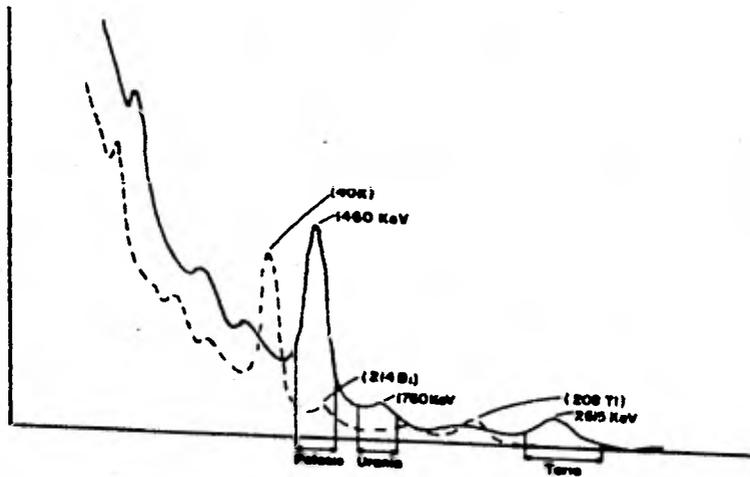


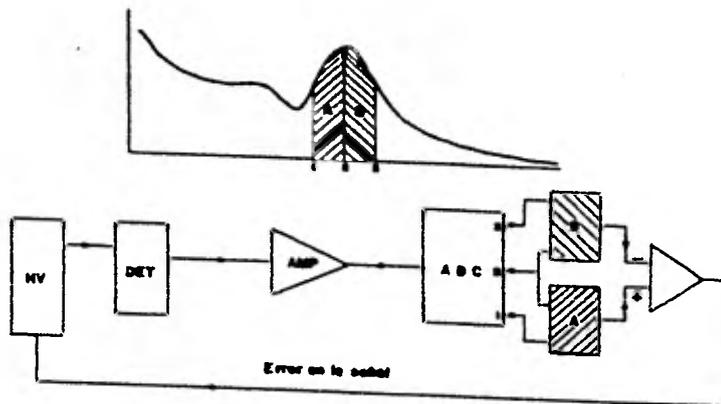
Figura 2.3.4.1 Deriva del Espectro



Suministros modernos de altura de voltaje diseñados específicamente para este efecto son ahora más adecuados para reducir esta causa en la deriva del espectro a proporciones razonables. La variación en la ganancia del tubo fotomultiplicador puede ser reducida a límites manejables a grupando los detectores en un ambiente controlado térmica mente.

Hay algunos espectrómetros con estabilización de espectro activa. Esto involucra monitorear los pulsos de tectados, los cuales, son conocidos debido a escintilaciones de cierta energía generada en el detector también por un radioisótopo especialmente implantado o una fuente de luz artificial. Dos ventanas de conteo adyacente están colocadas al centro de los picos espectrales generadas -- por la fuente implantada. El circuito está arreglado de manera que cuando los conteos sean iguales, no se generará ninguna salida, pero cuando difieran un error analógico es generado. Se dirá que es positivo cuando esté desplazado hacia la izquierda del centro y negativo si está desplazado a la derecha del centro. Este error puede ser usado para cambiar la ganancia del sistema para restablecer la relación apropiada entre los picos espectrales y las - ventanas de conteo, Fig. 2.3.4.2. Este problema algunas veces es resuelto en los sistemas aéreos con arreglos de largos detectores monitoreando los picos naturales del Po tasio o del Torio.

Figura 2.3.4.2 Estabilización del Espectro



### 2.3.5 Grabación de datos.

La mayor parte del equipo incorporado actualmente está basado en el manejo del hardware en mini-computadoras. La ventaja de esta tecnología en instrumentación de campo y tierra es la posibilidad para la corrección de datos en línea, comandos de entrada, etc. Módulo multicanal con la presentación al vuelo de los perfiles, cocientes, etc., es ta forma de presentación se realiza con equipo de monitoo--reo.

La grabación del espectro de rayos gama al final de cada período de conteo, es hecho sobre una cinta magné tica por medio del grabador analógico-digital.

Para efectuar una grabación espectral completa - se emplean dos arreglos de detectores separados; uno para el trabajo de campo y otro, mucho más pequeño, para detec tar el background, en particular radón atmosférico.

La Fig. 2.3.5.1 muestra un buen dispositivo aero-radiométrico en términos actuales.

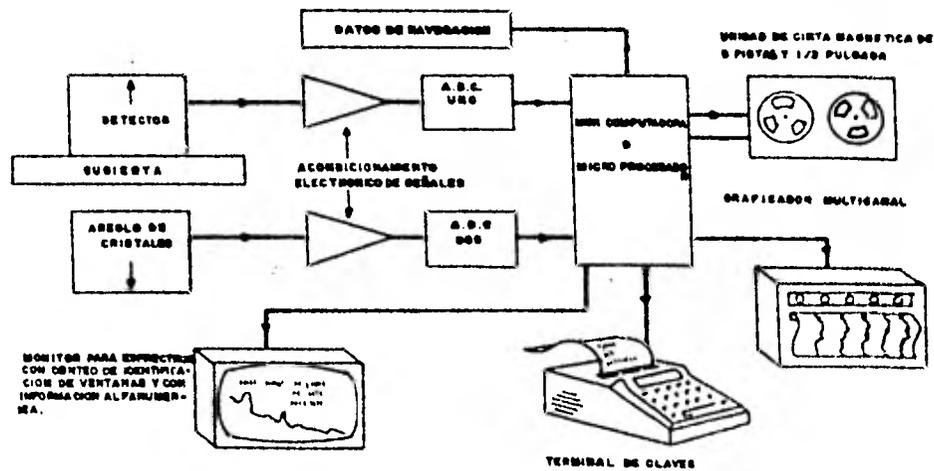


FIG. 2.3.5.1

3.- Exploración Aero-radiométrica.

3.1 Obtención de datos aero-radiométricos.

3.2 Procesado de datos aero-radiométricos.

3.3 Interpretación de datos aero-radiométricos.

### 3.1 Obtención de datos aero-radiométricos.

#### Diseño de Parámetros para la Prospección Aérea de Rayos Gama

- 1.- Tipo de Prospección (Cuenta Total  
o Espectrométrica)
- 2.- Espaciamiento de líneas de vuelo
- 3.- Altitud de Prospección
- 4.- Volúmen del detector

El flujo de rayos gama en las capas del aire y cerca de la superficie del terreno proviene en su mayor parte de las desintegraciones radioactivas de K, U y Th. La distribución de estos radioelementos sobre la superficie del terreno está controlada por la composición de la capa superficial y es modificada debido a varios procesos geológicos, los más importantes son intemperismo, erosión y transportación.

Las prospecciones se realizan comúnmente a la altura de 122 mts. La mayoría de las veces las líneas de vuelo son paralelas y son voladas en el sentido perpendicular al alineamiento de las estructuras para mejor definición de los contactos geológicos.

El detector común es de Ioduro de Sodio activo con Talio y el volúmen de los detectores varía desde 1 lt. para prospecciones de cuenta total a más de 50 lts. para prospecciones espectrométricas de alta sensibilidad. La energía natural gama se encuentra en el rango entre 0

y 3 Mev. El ancho de las ventanas son de 0.2 a 0.4 Mev centradas sobre los picos del Bi-214 y del Tl-208. Los fotopicos más comúnmente usados para el Bi-214 son a 1.12 y 1.76 Mev, para el caso del Tl-208 es a 2.62 Mev. En el caso del K-40 el fotopico se encuentra a 1.46 Mev.

En los datos espectrométricos la mayoría de las veces se utilizan cuentas por unidad de tiempo, pero puede convertirse a unidades cuantitativas después de la calibración. El principal sistema de grabación en los equipos es una cinta magnética, aunque también se utiliza graficadores para papel. Como instrumentos de navegación se utiliza el radar Doppler para posición en el vuelo de prospección. Cámara fotográfica de 35 mm para una posterior recuperación de vuelo. La radiación de "Fondo" debe ser medida todos los días, volando sobre agua a la altura de prospección o ascendiendo a más de 600 mts. sobre el terreno. La absorción exponencial de los fotones gama que provienen del terreno, requieren normalización en el aire para datos aéreos de rayos gama para una altura constante, usualmente la altura nominal de prospección.

Una corrección aparte, puede ser aplicada a los datos espectrométricos para radioisótopos en el aire, específicamente Bi-214. Estos isótopos resultan de la desintegración en el aire del Rn-222. Su medición requiere de un detector separado tal que, no detecte ninguna energía de rayos gama que provenga del terreno. Estas medidas solamente son hechas durante prospecciones de alta sensivi-

dad, cuando el volúmen del detector es de 25 a 55 lts.

### Tipo de Prospección

La primera decisión en la planeación de una prospección es decidir si va a ser de Cuenta Total o Espectrométrica.

Cuenta Total.- Este tipo de información es usada para mapeos geológicos, además, es tres veces más barata que la espectrometría y muchas veces se utilizan junto con la información aeromagnética. La desventaja es que obviamente no hace discriminación en los distintos elementos que están contribuyendo. Algunas áreas de alta radioactividad están asociadas a minerales fósiles pesados. Estos lugares son anómalos geológicamente y radiométricamente debido a que contienen U y Th (monacita y Zircon).

Espectrometría.- Esta nos permite una discriminación de los radioelementos pero su costo es de 3 veces o más al de Cuenta Total. Realizando una calibración adecuada, los resultados pueden ser reportados cuantitativamente en términos de ppm para eU y el eTh y en por ciento para K. La forma más realista para usar los datos espectrométricos en la exploración por U, es observar los cambios en la concentración que pueden estar relacionados con la mineralización de U. Algunas veces pueden ocurrir cambios importantes en la concentración de eU o en el cociente

eU/eTh sin que haya un cambio correspondiente en la Cuenta Total. Esto se debe, la mayoría de las veces, a cambios opuestos en eTh y/o concentración de K.

En resumen, el tipo de prospección es determinada por los resultados que se deseen y el dinero disponible.

#### Espaciamiento de las líneas de vuelo y altitud de Prospección

El tamaño del objetivo o del área, usualmente controlan los parámetros de espaciamiento de líneas de vuelo y altitud de prospección. Generalmente, espaciamiento mayor de 3 Km para anomalías regionales y para un mapeo geológico. Espaciamiento menor a 3 Km para localización de anomalías y para detalle geológico. Un relieve topográfico abrupto requiere de mayor altitud de vuelo. Como se ve, la resolución en el terreno decrece conforme la altitud se incrementa, el cubrimiento en el terreno crece con la altitud. También se observa que el conteo decrece conforme se incrementa la altura, debido a que los rayos gama son absorbidos por el terreno en forma exponencial a medida que se incrementa el espesor de la columna de aire.

Las Figs. 3.1.1 y 3.1.2 muestran la interacción entre el espaciamiento y la altura de prospección.

Fig 3.1.1.

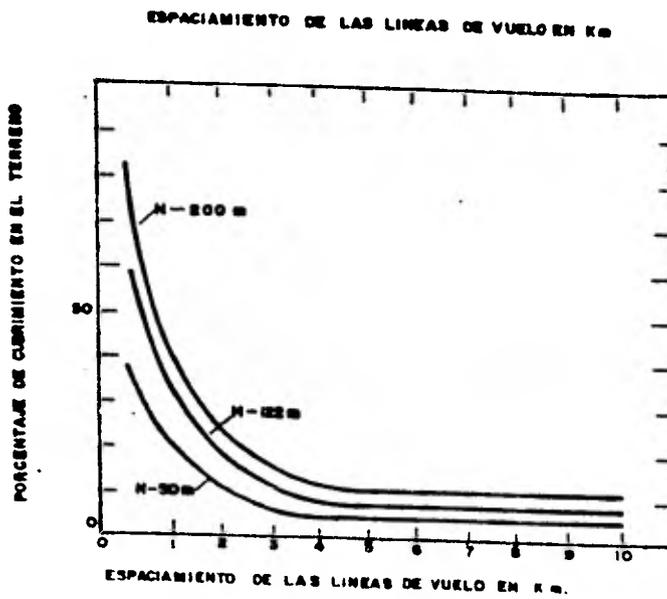
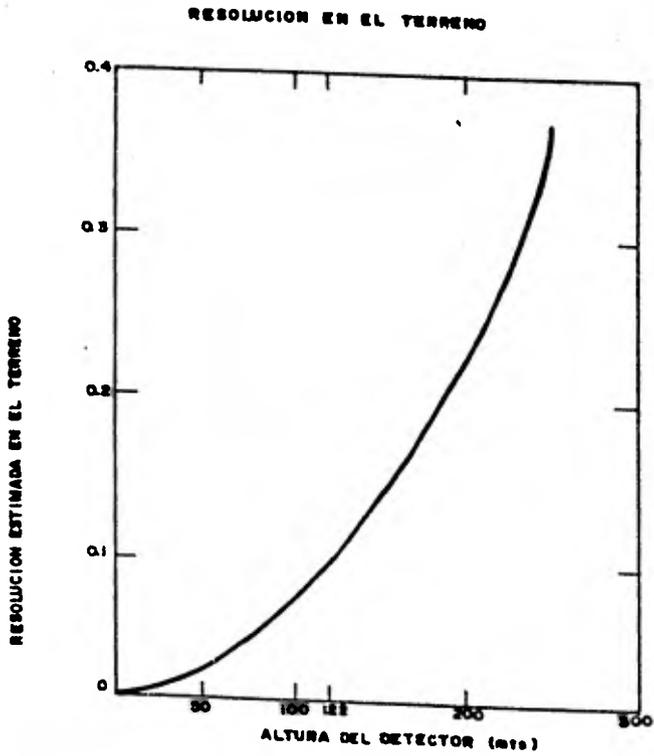


Fig 3.1.2



El porcentaje de cubrimiento decrece conforme el espaciamiento, entre las líneas de vuelo se incrementa para una altura fija. Por ejemplo, a 122 mts. de altura, el área cubierta es de 15% para 2 Km y solamente 6% para 5 Km.

La resolución en el terreno está definida como la capacidad de los datos aero-radiométricos para diferenciar extensiones geológicas de dimensión finita con diferente concentración de radioelementos.

La Fig. 3.1.2 muestra estimaciones de resolución, la curva en la figura ilustra un decremento en la resolución del terreno conforme la altitud se incrementa. La resolución de  $0.03 \text{ Km}^2$  a 50 mts. de altitud decrece a  $.11 \text{ Km}^2$  a 122 mts. de altitud.

Entonces, los factores a controlar para el espaciamiento entre líneas son dinero disponible, tamaño del área a prospectar y tamaño de los yacimientos.

#### Volúmen del detector

El efecto del volúmen del detector sobre la precisión está vista en la Tabla 3.1.1.

La mayoría de las prospecciones solamente -- usan el fótópico  $eU_1$  (1.76 Mev), especialmente cuando se usan 4 canales en el equipo. Para efectuar las mediciones en las dos ventanas de Uranio, se puede descartar la Cuenta Total. La Tabla 3.1.1 muestra las ventajas de -

TABLA 3.1.1.

Volúmen del detector (lvs)	K (cps)	K error (por ciento)	$U_1^a$ (cps)	$U_1$ error (por ciento)	$U_2^b$ (cps)	$U_2^b$ error (por ciento)	$T_h$ (cps)	$T_h$ error (por ciento)
54.5	$106 \pm 20$	$\pm 19$	$28 \pm 15$	$\pm 54$	$84 \pm 22$	$\pm 26$	$25 \pm 6$	$\pm 32$
27.3	$53 \pm 13$	$\pm 25$	$14 \pm 11$	$\pm 79$	$42 \pm 18$	$\pm 43$	$13 \pm 5$	$\pm 38$
13.6	$27 \pm 9$	$\pm 33$	$7 \pm 8$	$\pm 114$	$21 \pm 13$	$\pm 62$	$6 \pm 4$	$\pm 67$

a Con una ventana a 1.76 Mev (Fotopico)

b La suma de dos ventanas a 1.12 y 1.76 Mev (Fotopicos)

este procedimiento, además, si el objetivo es exploración por Uranio, los valores de Cuenta Total pueden tener un valor pequeño.

Se ve claramente que los errores decrecen conforme se incrementa el volumen de los cristales. Si se usan pequeños volúmenes de cristales, los conteos deben ser de mayor tiempo para disminuir los errores estadísticos.

Para especificar el volumen del detector, vamos a calcular el conteo por unidad de volumen del detector para distintas alturas de vuelo. Las Figs. 3.1.3 y 3.1.4 muestran el conteo por unidad de volumen del detector contra la altura para dos sistemas espectrométricos de alta sensibilidad.

La Fig. 3.1.3 está aplicada a Cuenta Total, mientras que la Fig. 3.1.4 a datos espectrométricos.

Los volúmenes para prospecciones de Cuenta Total, raras veces excede de 10 lbs. y más comúnmente son 5 lbs. o menos.

Para un volumen grande a una altura de 122 mts., la Fig. 3.1.3 muestra un conteo de aproximadamente 670 cps para la roca cristalina y cerca de 360 cps para la roca sedimentaria, después de que se ha restado el fondo.

Para 5 lbs. a la misma altura podemos tener

Fig 3.1.3.

PREDICION DEL CONTEO TOTAL POR LITRO DE NaI COMO UNA FUNCION DE LA ALTURA DEL DETECTOR SOBRE EL TERRENO PARA DOS TIPOS DISTINTOS DE ROCAS.

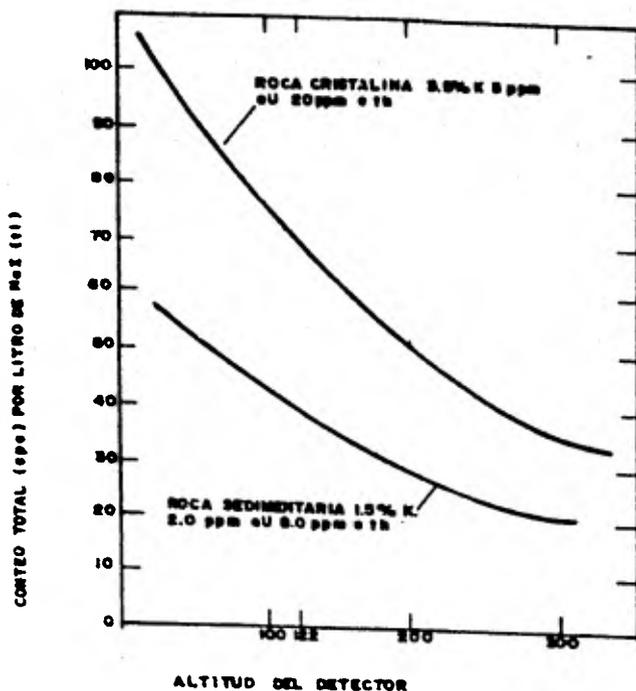
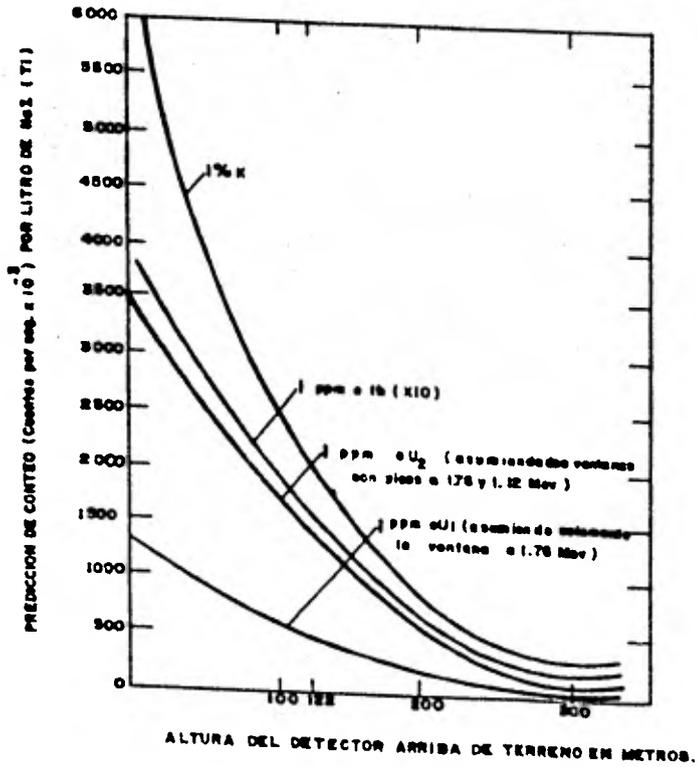


Fig 3.1.4.

PREDICION DEL CONTEO TOTAL POR LITRO DEL NaI  
COMO UNA FUNCION DE LA ALTURA DEL DETECTOR SOBRE  
EL TERRENO, PARA CONCENTRACIONES ESPECIFICAS.



conteos de cerca de 335 cps para la roca cristalina y de aproximadamente 180 cps para la roca sedimentaria.

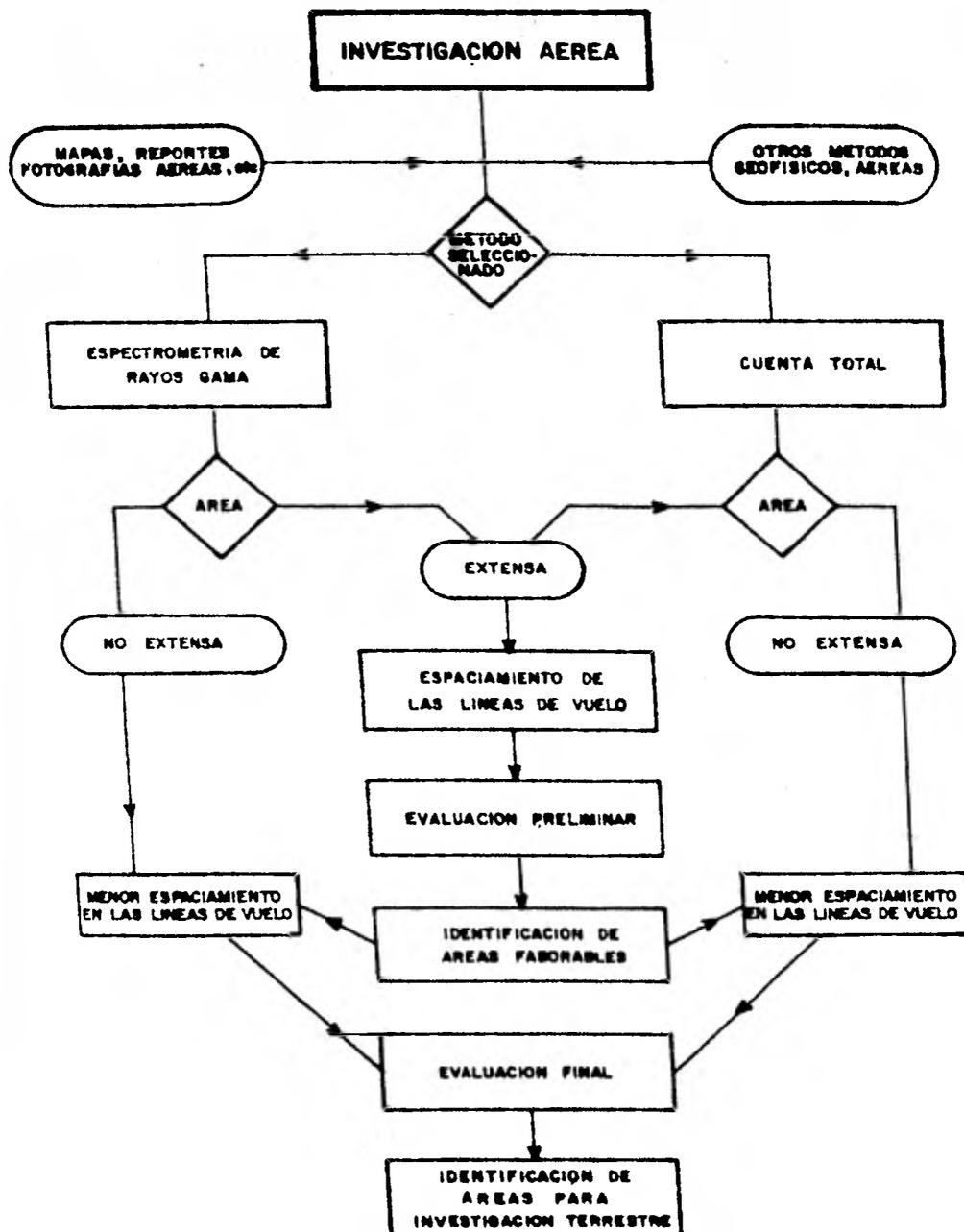
Usando la Fig. 3.1.4 para 20 lts. de detector a 122 mts. sobre el nivel del terreno se registrarán aproximadamente 36 cps para 1% K, 7 cps para 1 ppm de eU<sub>1</sub>, 18 cps para 1 ppm de eU<sub>2</sub> y 2 cps para 1 ppm de eTh.

Un cálculo sobre el valor del kilómetro lineal de prospección aérea hecho en junio de 1979 fue el siguiente:

Datos de Cuenta Total      1 Km lineal = \$4 Dlls.

Datos Espectrométricos      1 Km lineal = \$15 Dlls.

# DIAGRAMA DE FLUJO PARA SELECCIONAR AREAS FAVORABLES



### 3.2 Procesado de datos aero-radiométricos.

Las Tablas 3.2.1 y 3.2.2 ilustran los elementos hijos en la serie de decaimiento del  $U^{238}$  y del  $Th^{232}$ . Se registraron los rayos gama que provienen del  $B_1^{214}$  en la serie de decaimiento del Uranio y los del  $Tl^{208}$  en la serie del Torio. El Potasio puede ser medido directamente de los rayos gama emitidos por el  $K^{40}$ .

En los trabajos aéreos para medir la radioactividad natural en mapas geológicos o en la exploración del uranio, se usan detectores con gran volumen de cristales de Ioduro de Sodio. Debido a las características físicas del fotomultiplicador y del detector, la energía discreta del fotón de rayos gama, como se enlista en las Figs.: 1.4.2 y 1.4.4 no puede observarse y es necesario seleccionar ventanas de energía, las cuales, son más representativas del elemento en particular.

Un espectro de rayos gama típico a 120 mts. de altura, se muestra en la Fig. 3.2.1 Los picos a 2.62, - 1.76 y 1.46 Mev representan, respectivamente:  $Tl^{208}$  en la serie de decaimiento del Torio,  $Bi^{214}$  en la del Uranio y Potasio<sup>40</sup>. Estos rayos gama han sido generalmente aceptados porque son los más representativos para medir el Torio, Uranio y Potasio debido a que, relativamente, son abundantes y siendo de alta energía son menos afectados por la absorción atmosférica. Las ventanas de energía,

Tabla 32.1  
Serie de desintegración del U-238

Isotopo	Raducción	Vida Media
U <sup>238</sup>	α	4.507 x 10 <sup>9</sup> y
Th <sup>234</sup>	β	24.1 d
Po <sup>234</sup>	β	1.16 m
U <sup>234</sup>	α	2.48 x 10 <sup>5</sup> y
Th <sup>230</sup>	α	7.52 x 10 <sup>4</sup> y
Ra <sup>226</sup>	α	1600 y
Ra <sup>222</sup>	α	3.825 d
Po <sup>222</sup>	α	3.05 m
Pb <sup>214</sup>	β	26.8 m
Bi <sup>214</sup>	β	19.7 m
Po <sup>214</sup>	α	1.56 x 10 <sup>-4</sup> s
Pb <sup>214</sup>	β	22.3 y
Bi <sup>210</sup>	β	5.02 d
Po <sup>210</sup>	α	138.4 d
Pb <sup>206</sup>	estable	

Los isotopos que constituyen menos del 0.2% de los productos son omitidos.

Tabla 3.2.2  
Serie de desintegración del Th-232

Isotopo	Radiación	Vida Media
Th <sup>232</sup>	α	1.39 × 10 <sup>10</sup> y
↓		
Ra <sup>228</sup>	β <sup>-</sup>	6.7 y
↓		
Ac <sup>228</sup>	β <sup>-</sup>	6.13 h
↓		
Th <sup>228</sup>	α	1.91 y
↓		
Ra <sup>224</sup>	α	3.64 d
↓		
Rn <sup>220</sup>	α	55.3 s
↓		
Po <sup>216</sup>	α	0.158 s
↓		
Pb <sup>212</sup>	β <sup>-</sup>	10.64 h
↓		
Bi <sup>212</sup>	β <sup>-</sup> (64%)	60.5 m
↓	α (36%)	
Po <sup>212</sup>	α	3.04 × 10 <sup>-7</sup>
↓		
Tl <sup>208</sup>	β <sup>-</sup>	3.1 m
↓		
Pb <sup>208</sup>	estable	

64% [ Po<sup>212</sup>  
Tl<sup>208</sup>  
Pb<sup>208</sup> ]

36% [ Bi<sup>212</sup>  
Po<sup>212</sup> ]

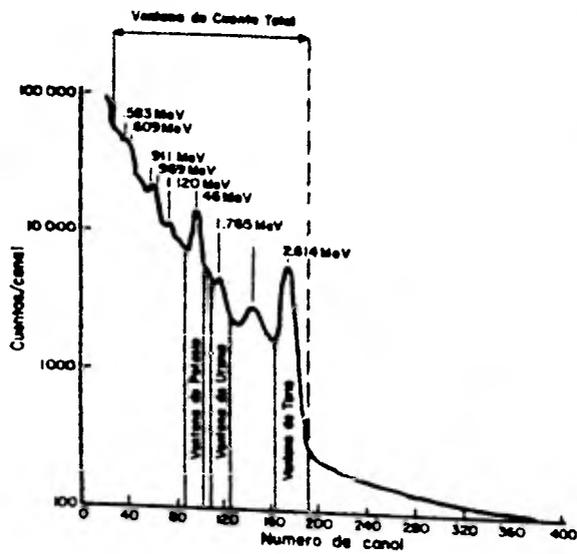


Figura 3.2.1. Espectro típico de Rayos Gama a 120 mts.

para detectar estos rayos gama, se muestran en la Tabla 3.2.3. Casi siempre se usa una ventana de cuenta total debido a que el conteo total refleja una variación litológica general y, por lo tanto, es muy usada en el mapeo geológico.

En los últimos años, es requisito en los trabajos de prospección para el gobierno de Canadá, una grabación total del espectro con 512 canales y en el futuro se convertirá en práctica común para todas las prospecciones aéreas en este país. Esta grabación total del espectro sobre una cinta magnética tiene la ventaja de que, después de la operación de prospección, el espectro puede ser calibrado con exactitud partiendo de las posiciones de los picos del Potasio y del Torio a 1.46 y 2.62 Mev, respectivamente.

Para poder relacionar los intervalos de conteo de las tres ventanas a concentraciones en el terreno, se necesitan cuatro etapas de corrección:

- 1.- Eliminación de la radiación de fondo o "background".
- 2.- Corrección Compton Stripping.
- 3.- Corrección Exponencial por altitud.
- 4.- Conversión del conteo de ventana a concentraciones en el terreno de Potasio, Uranio y Torio.

Tabla 3.2.3.

ANCHO DE LAS VENTANAS ESPECTRALES

ELEMENTO ANALIZADO	ISOTOPO USADO	RAYOS-GAMA ENERGIA (MeV)	ENERGIA DE VENTANA
POTASIO	$^{40}\text{K}$	1.46	1.37 — 1.57
URANIO	$^{214}\text{Bi}$	1.76	1.66 — 1.86
TORIO	$^{208}\text{Tl}$	2.62	2.41 — 2.81
CUENTA TOTAL			0.41 — 2.81

1.- Eliminación de la radiación de fondo o "background".

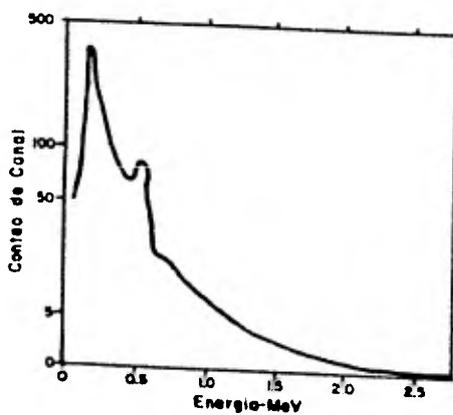
En cualquier prospección aérea existen tres fuentes que dan origen a la radiación de fondo.

- a) La radioactividad de la aeronave y su equipo.
- b) La radiación cósmica.
- c) La radioactividad que proviene de los productos hijos del gas radón en la serie de decaimiento del Uranio.

a) La radioactividad de la aeronave y su equipo se encuentra como una cantidad extra debido a la presencia de pequeñas cantidades de núcleos radioactivos naturales en el sistema detector y en las partes de la misma -- aeronave. Particularmente los relojes luminosos y las marcas de radio sobre los paneles deben ser quitados del avión.

b) El fondo cósmico es causado principalmente, por fotones generados por rayos cósmicos que interaccionan con núcleos presentes en el aire, la aeronave o en el mismo sistema detector. La contribución de los rayos cósmicos se incrementa con la altura pero manifiesta una pequeña variación de un día a otro. Pequeñas variaciones se observan con la latitud y con el undécimo año solar, y también con el tamaño de la aeronave. La fig. 3.2.2 muestra la generación de un espectro de rayos gama cósmicos obtenido -

Figura 3.2.2. Espectro C3smico



al abstraer el espectro del agua para dos altitudes distintas. El pico a .5 Mev se debe a la aniquilación de positrones creados por la producción de pares que se formaron a partir de fotones de rayos gama de alta energía en la estructura del avión o en el detector. La contribución en cada ventana de radioelementos puede eliminarse detectando con una ventana de alta energía de 5 a 6 Mev.

c) La más difícil de las fuentes de "background" o fondo para su eliminación, es el gas radón.

El gas radón tiene una vida media de 3.8 días, el intervalo de difusión dependerá de factores como presión del aire, viento, temperatura, tipo de suelo y cubrimiento del mismo. El plomo<sup>214</sup> y el bismuto<sup>214</sup> se presentan en aerosoluciones, por lo cual, su distribución dependerá de la acción del viento. En la mañana puede haber diferente radiación atmosférica de un lugar a otro separado unos kilómetros; conforme el día va avanzando la turbulencia del aire se incrementa tendiendo a mezclar el aire en grandes extensiones y reducir el fondo atmosférico cercano al terreno. La Fig. 3.2.3 muestra concentraciones de radón en un período de cuatro años sobre Cincinnati. Algunas variaciones anuales probablemente son debidas al atrapamiento del radón en el terreno por el congelamiento durante el invierno. Darnley y Grasty reportaron que un 70% de los fotones detectados en la ventana de Uranio provienen del radón en el aire. La Fig. 3.2.4 muestra algunas

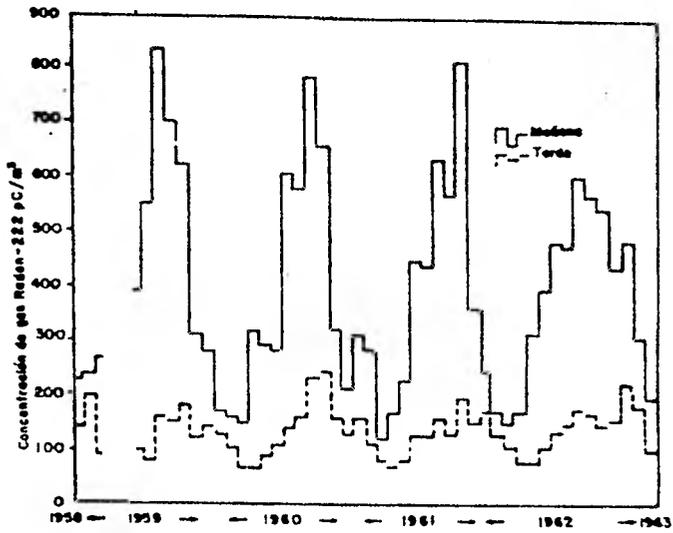


Figura 3.2.3 Promedio mensual (8.00 a 15.00hrs.) de concentración del gas radon 222 en Cincinnati.

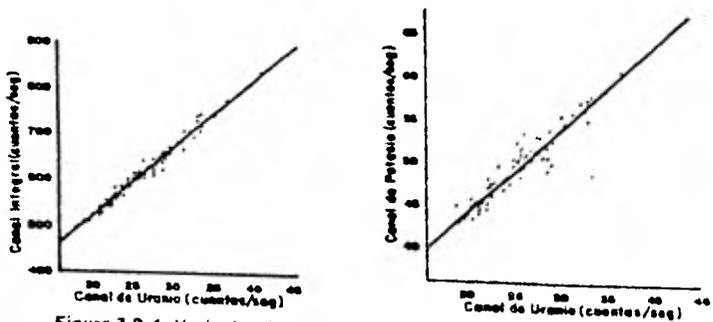


Figura 3.2.4. Variación del background sobre el agua para el potasio, uranio y cuenta total.

medidas de fondo tomadas por el Geological Survey de Canadá.

Los problemas para medir el fondo en el canal de Uranio se deben también a inversiones de temperatura. Ver Fig. 3.2.5.

Debido a que las mediciones en la ventana de Uranio son de vital importancia, es esencial que las medidas de fondo sean lo más exactas posibles. La técnica adoptada por el Geological Survey de Canadá ha sido volar sobre lagos a la altura de prospección antes de empezar el trabajo de producción. Debido a que por parte del agua no se tendrá alguna contribución, las mediciones que se detecten se deberán a la radiación de fondo. Un método distinto, cuando no se tienen lagos, ha sido el de mostrar el aire con filtros, midiendo la radiación de las partículas colectadas en los filtros de papel. Foote usa un escudo o capa de unos 10 cm. que cubre al detector de la radiación que viene del suelo para detectar la radiación atmosférica.

Otro procedimiento puede ser el de volar a alturas de unos 600 mts. en donde no se tiene influencia de la radiación que provenga del terreno.

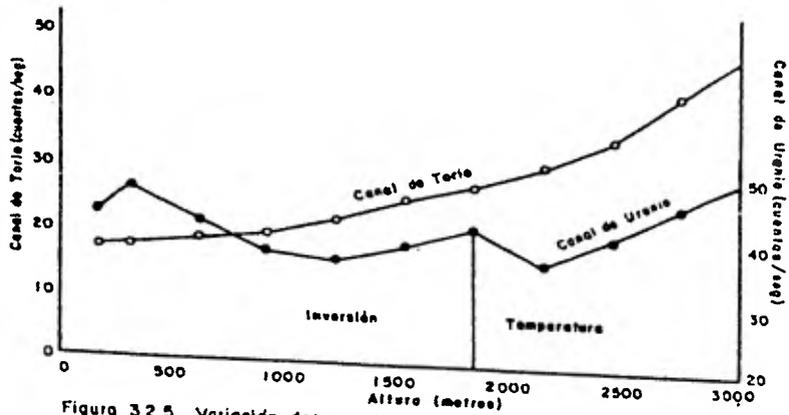


Figura 32.5 Variación del canal de Uranio y Torio sobre el Lago Ontario.

## 2.- Corrección Compton Stripping.

Debido a la dispersión Compton en el terreno y en el aire los fotones de Tl-208 a 2.62 Mev para algunas cuentas serán grabados en las ventanas de energía más baja a -- 1.76 Mev ventana de Uranio y a 1.46 Mev ventana de Potasio. Las cuentas en las ventanas de energía más baja pueden deberse a una absorción incompleta de los fotones a 2.62 Mev o a otros fotones de energía de rayos gama más baja en la serie de decaimiento del Torio. También de esta manera -- cuentas en el canal de Potasio pueden ser grabadas a partir de una fuente pura de Uranio.

Los coeficientes de los conteos en las ventanas de baja energía debido a la ventana de alta energía a partir de una fuente pura de Torio o de Uranio, son llamadas coeficientes de Stripping. Estos factores son llamados  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .

$\alpha$  alfa es el conteo de Uranio por conteo de Torio a partir de una fuente pura de Torio.

$\beta$  beta es el conteo de Potasio por conteo de Torio a partir de una fuente pura de Torio.

$\gamma$  gama es el conteo de Potasio por conteo de Uranio a partir de una fuente pura de Uranio.

Para poder relacionar los conteos en las tres ventanas a concentraciones en el terreno es necesario determinar estas constantes para el espectrómetro. Esto generalmente se obtiene con planchas de calibración, las cuales, son construidas con cantidades conocidas de Potasio, Uranio y Torio. Estas fuentes de calibración han sido construidas

en Ottawa por el Geological Survey de Canadá, en Grand Junction por el Departamento de Energía de U.S. y también en Irán. Partiendo de las medidas de estas "Plataformas de Calibración" (Test Pads), los conteos que se observan son una combinación lineal de las concentraciones de los radioelementos en cada una de las plataformas.

A partir de las medidas tomadas de cinco plataformas las incógnitas pueden ser evaluadas.

Las fórmulas básicas para la Corrección Compton son:

$$N_{Th} \text{ Corr} = N_{Th} - B_{gd} \text{ Th}$$

$$N_U \text{ Corr} = N_U - B_{gdU} - N_{Th} \text{ Corr}$$

$$N_K \text{ Corr} = N_K - B_{gdK} - N_{Th} \text{ Corr} - N_U \text{ Corr}$$

N = Conteo por unidad de tiempo

Bgd = cuentas debido al "background"

La corrección también puede hacerse en el sentido contrario, es decir, cuentas del Uranio o gamas de alta energía en el Bismuto, las cuales, aparecen en la ventana del Torio. Este efecto puede deberse a núcleos de alta energía en la serie de decaimiento del Uranio y también por problemas de resolución en el detector.

La magnitud de estos factores de stripping, los cuales pueden ser llamados "a, b, g," son muy pequeños excepto para el "a" Uranio dentro del Torio ( $U \rightarrow Th$ ) y generalmente son ignorados en la mayoría de las calibraciones.

### 3.- Corrección por altitud.

En un rango de altitud normal para prospecciones

aéreas, los conteos en cada ventana pueden ser adecuadamente representados por una simple expresión exponencial.

$$N = Ae^{-\mu H}$$

A = Conteo medido,

$\mu$  = Coeficiente de atenuación atmosférica,

H = Altura,

N = Conteo corregido a la altitud nominal de prospección.

#### 4.- Conversión a concentraciones en el terreno.

A partir de vuelos sobre pistas de calibración de concentración conocida, se puede obtener fácilmente la sensibilidad del espectrómetro en términos de cuentas por unidad de concentración por unidad de tiempo. Existen pistas de calibración en los Estados Unidos cerca de Las Vegas, en Sudáfrica y en Canadá cerca de Ottawa.

La Tabla 3.2.4 presenta un resumen de los coeficientes de Stripping  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\mu$ : los coeficientes de sensibilidad y atenuación atmosférica para cuatro diferentes de detectores cilíndricos de Ioduro de Sodio, los cuales, tienen 10 cm de espesor (Louborg 1977). Estos resultados han servido como una guía en el diseño de sistemas aéreos. Se nota un incremento de los cocientes de Stripping con la altitud debido a la dispersión Compton en el aire. Los parámetros Compton Stripping  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\mu$  son para fuentes infinitas al nivel del terreno.

**Tabla 3.2.4.**  
Constantes de Calibración para distintos detectores de NaI (TI)

Dimensiones del Cristal (mm)	Coeficientes de Stripping								
	Torio-dentro-Uranio (α)			Torio-dentro-Potasio (β)			Uranio-dentro-Potasio (γ)		
	0 m	50 m	125 m	0 m	50 m	125 m	0 m	50 m	125 m
102x102 (4x4 pulg)	0.47	0.50	0.53	0.65	0.68	0.73	0.99	1.02	1.07
152x102 (6x4 pulg)	0.41	0.41	0.47	0.57	0.59	0.63	0.94	0.97	1.01
229x102 (9x4 pulg)	0.39	0.41	0.44	0.52	0.55	0.58	0.90	0.93	0.97
292x102 (11.5x4 pulg)	0.37	0.40	0.43	0.50	0.52	0.56	0.88	0.91	0.95

Sensibilidades por detector

Dimensiones del Cristal (mm)	Sensibilidades en Cuentas/seg por Concentración de Radionucleidos								
	Ventana de Potasio 1 pCi K			Ventana de Uranio 1 ppm eU			Ventana de Torio 1 ppm eTh		
	0 m	50 m	125 m	0 m	50 m	125 m	0 m	50 m	125 m
102x102 (4x4 pulg)	5.7	3.1	1.4	0.52	0.30	0.15	0.26	0.16	0.086
152x102 (6x4 pulg)	13	7.1	3.4	1.2	0.70	0.36	0.62	0.39	0.21
229x102 (9x4 pulg)	29	16	7.9	2.7	1.6	0.83	1.4	0.90	0.50
292x102 (11.5x4 pulg)	47	27	13	4.4	2.6	1.4	2.3	1.5	0.84

Coeficientes de Atenuación Exponencial para alturas de 50 y 125 metros.

Dimensiones del Cristal (mm)	Coeficiente de Atenuación por metro x 10 <sup>2</sup>							
	Ventana de Potasio		Ventana de Uranio		Ventana en Torio		Ventana de Cuenta total	
	50 m	125 m	50 m	125 m	50 m	125 m	50 m	125 m
102x102 (4x4 pulg)	1.22	0.97	1.09	0.86	0.96	0.76	0.91	0.73
152x102 (6x4 pulg)	1.19	0.95	1.06	0.85	0.94	0.75	0.89	0.72
229x102 (9x4 pulg)	1.15	0.94	1.03	0.83	0.90	0.74	0.86	0.71
292x102 (11.5x4 pulg)	1.12	0.93	1.01	0.82	0.88	0.73	0.84	0.70

A continuación se presentará un ejemplo con un tipo de correcciones aplicadas a datos aero-radiométricos.

Es de importancia hacer notar que se han marcado valores como el de la altura de corrección a 50 mts. así como un máximo de elevación de 115 mts., puesto que se pensó en correcciones para valores tomados por un helicóptero de prospección aero-radiométrica.

Después de que la información radiométrica fue grabada digitalmente en cuatro canales, los pasos de procesamiento consisten en lo siguiente:

(1) Presuavizamiento de los datos.

Antes de cualquier procesamiento, los datos originales en cada canal radiométrico fueron presuavizados - con un filtro de caja de 3 puntos para reducir las fluctuaciones debidas a conteos estadísticos pobres.

$$N_1(X_i) = \frac{N_0(X_{i-1}) + N_0(X_i) + N_0(X_{i+1})}{3}$$

donde:

$N_0(X_j)$  = número original de cuentas en la posición  $X_j$ .

$N_0(X_i)$  = valor suavizado en la posición  $X_i$ .

(2) Determinación y corrección del conteo para el "background".

La estimación de las cuentas de "background" o fondo  $N_B(t)$  debido a fuentes cósmicas y atmosféricas, fueron hechas a varios tiempos  $t_i$  en un vuelo durante el cual el avión voló sobre una larga extensión de agua a la altura

de prospección. La interpolación lineal fue aplicada para un tiempo  $t$  entre dos tiempos adyacentes  $t_i$ :

$$N_B(t) = \left[ \frac{N_B(t_{i+1}) - N_B(t_i)}{t_{i+1} - t_i} \right] (t - t_i) + N_B(t_i)$$

donde:  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$

Entonces, para cada uno de los canales, se restaron los conteos respectivos de "background".

$$N_2(t) = N_1(t) - N_B(t)$$

donde:  $N_1(t)$  y  $N_B(t)$  son cantidades previamente definidas, y  $N_2(t)$  igual a cuentas en las que el background ha sido restado.

### (3) Corrección por elevación.

Para una interpretación sencilla, los datos originalmente grabados a distintas elevaciones de prospección son reducidos a una altura común sobre la superficie del terreno para todas las líneas de vuelo prospectadas. Para cada punto  $X_i$  de prospección, la altitud del avión fue --  $h_1(X_i)$  (pies), la cual es obtenida del presuavizamiento de los datos originales del radar altímetro.

$$\left[ h_1(X) \right] = \left[ h_0(X) \right] \text{ filtrado recursivamente}$$

donde  $h_0(X_j)$  es la grabación original sobre el radar altímetro en la posición  $X_j$ . La posición  $X_i$  es la correspondiente al tiempo  $t$ , tal que  $h_1(X_i) = h_1(t)$ . Si  $h_1(t) > 350$  pies, se preestablece el valor fijo de 350 pies para su aplicación.

Entonces, la corrección al altímetro fue apli-

cada como sigue:

$$N_3(t) = N_2(t) e^{-\mu [h_1(t) - h_c]}$$

donde:

$h_c$  = altura a la que se corregirán los datos = 150 pies

$\mu$  = coeficiente de atenuación

Algunos ejemplos de valores para las  $\mu$  son los siguientes:

$$\mu(U) = 0.0017 \text{ pies}^{-1}$$

$$\mu(\text{Th}) = 0.0017 \text{ pies}^{-1}$$

$$\mu(k) = 0.0023 \text{ pies}^{-1}$$

$$\mu(\text{C.T}) = 0.0020 \text{ pies}^{-1}$$

(4) Corrección por la dispersión Compton.

$$N_4^U(t) = N_3^U(t) - \alpha N_3^{\text{Th}}(t)$$

$$N_4^K(t) = N_3^K(t) - \beta N_3^{\text{Th}}(t) - \gamma N_4^U(t)$$

$N_4(t)$  = conteo final

$\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  = coeficientes de stripping

Ejemplo de los coeficientes de stripping:

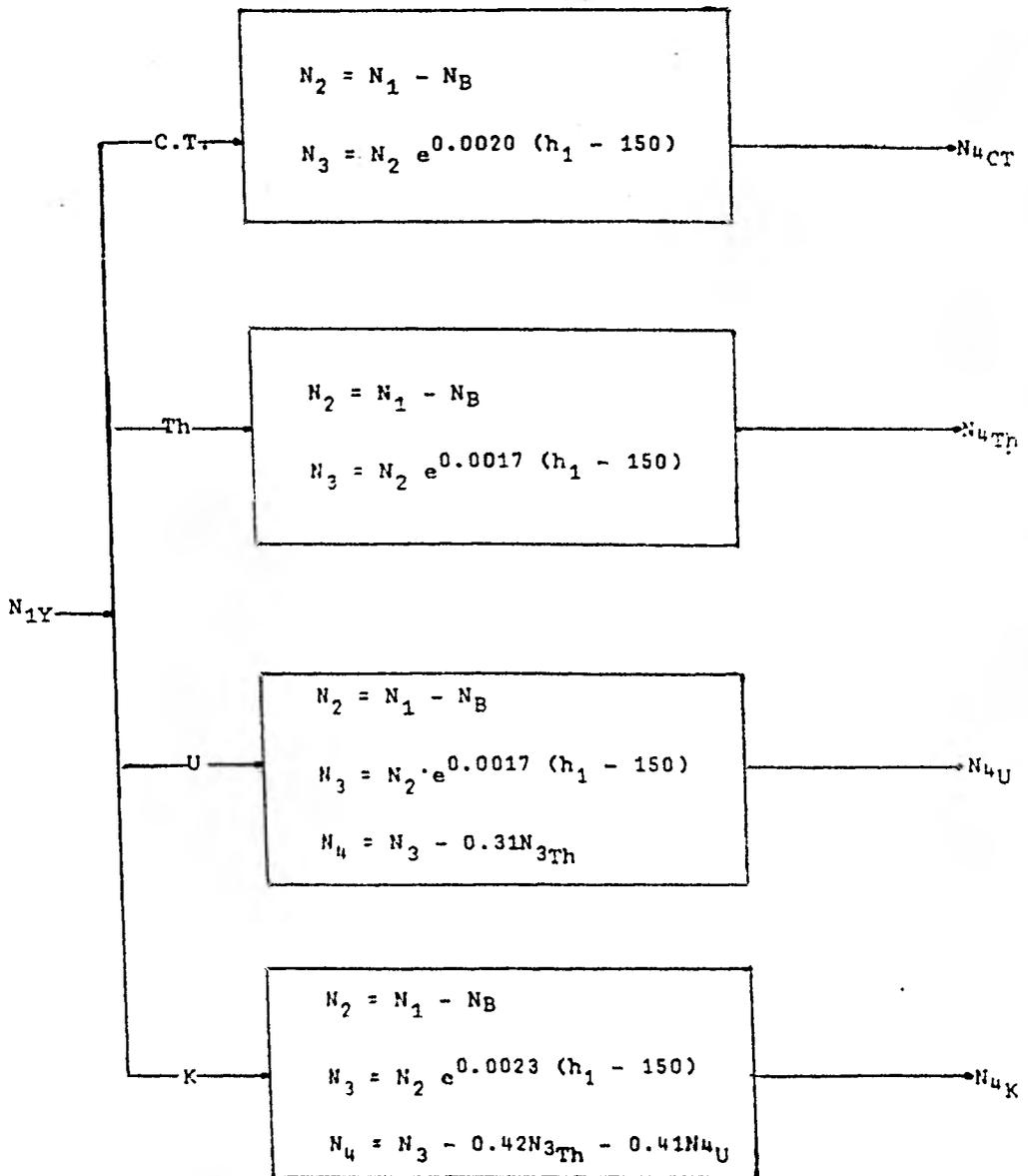
$$\alpha = 0.35$$

$$\beta = 0.42$$

$$\gamma = 0.41$$

(5) Resumen para cada uno de los cuatro canales:

los:



$N_{4Y}$  = valor final corregido para el canal Y.

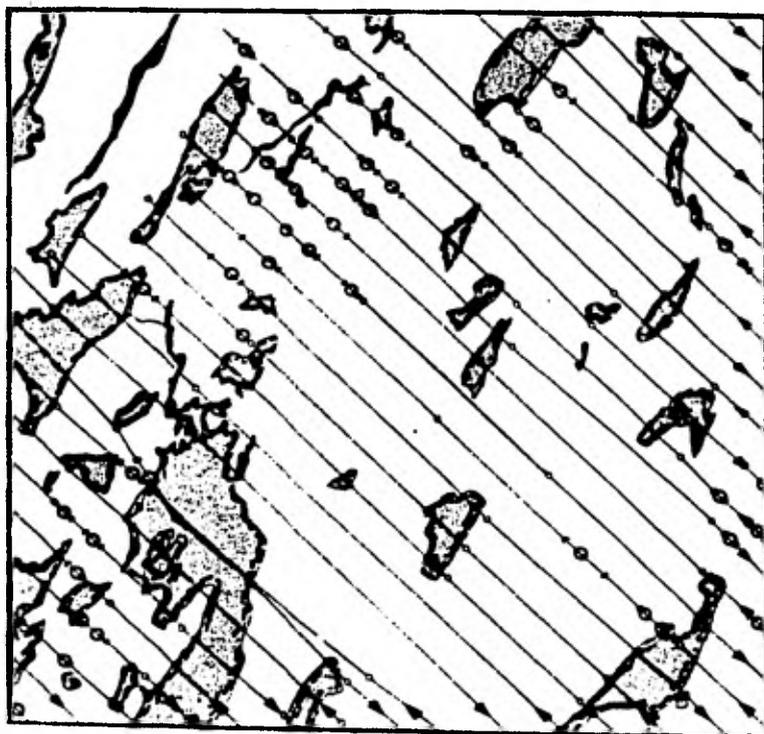
### 3.3 Interpretación de datos aero-radiométricos

La forma de presentación de los resultados fue considerada por Darnley (1972) y varios métodos de presentación de datos fueron comparados. La descripción de los resultados, sus ventajas y desventajas son descritas en seguida.

Los resultados de los primeros espectrómetros de rayos gama consistían de una grabación analógica sin correcciones, haciendo solamente una simple presentación de datos. Los contornos no eran realizados o solamente limitados para el thorio. Una forma común de presentación de datos fue el uso de una simbología superpuesta a una línea de vuelo para indicar cuando una anomalía excede de un valor arbitrario para algún factor dado.

La Fig. 3.3.1 es una ilustración de este tipo de mapas de anomalías para Uranio. A pesar de que este tipo de presentaciones no es cara es insuficiente de acuerdo con Darnley desde varios puntos de vista: (1) es subjetiva (2) no hay corrección compton y muchas anomalías pueden ser causadas por altos valores del thorio; (3) el background usado es el promedio de radiación sobre el nivel del terreno y, por lo tanto, la información que puede provenir de la base de la radiación y dar las condiciones geoquímicas es ignorada; (4) como ninguna corrección al terreno fue aplicada algunas anomalías pueden ser causadas por los altos topográficos.

Figura 3.3.1. Ejemplo de presentación de datos; símbolos sobre la línea de vuelo indicando valores anómalos que existen al background en un factor dado.



FIDUCIAL

- ANOMALIA 1.5-2 BACKGROUND
- ANOMALIA 2-2.5 BACKGROUND
- ⊞  $\frac{1}{4}$  DEL ANCHO DEL PICO DE LA ANOMALIA
- $\frac{1}{4}$  MILLA
- ALTURA 150 (pies)
- ESPACIAMIENTO DE LINEAS  $\frac{1}{4}$  DE MILLA
- ↘ DIRECCION DE VUELO



Para la Fig. 3.3.2 se marcan los conteos de Uranio y Torio para los picos anómalos, mostrando además sus respectivos backgrounds (usada con el mismo fin que el -- ejemplo anterior). Esto mejora la cantidad de información útil en el mapa.

De una mayor elaboración es el contenido del contorno del torio sumado al mapa de anomalías como se - muestra en la Fig. 3.3.3. Debido a que el conteo de Torio es más fácil de reproducir, estadísticamente es de mayor importancia que el conteo de Uranio éste puede ser usado como ayuda en la interpretación de la geología.

La Fig. 3.3.4 muestra otro tipo de presentación de datos, un mapa de perfiles. Aquí los valores de los datos han sido graficados sobre un mapa de líneas de vuelo a lo largo de estas líneas de vuelo. Esto nos muestra la interrelación radiométrica línea a línea y sus rasgos similares pueden ser relacionados. En este ejemplo particular, ninguna consideración fue hecha por atraso en la posición de graficado debido al tiempo constante empleado en la - prospección. Entonces, las líneas adjuntas están lateralmente desplazadas debido a que éstas fueron voladas en direcciones opuestas.

Darnley (1972) también señaló que la elaboración de la presentación de datos no está garantizada si las estadísticas de los conteos son inadecuadas.

Recientemente, otros esfuerzos han sido realizado

Figura 3.3.2. Presentación de datos ejemplo 2: Los valores dnomalos de Uranio y Torio se presentan con sus respectivos backgrounds.

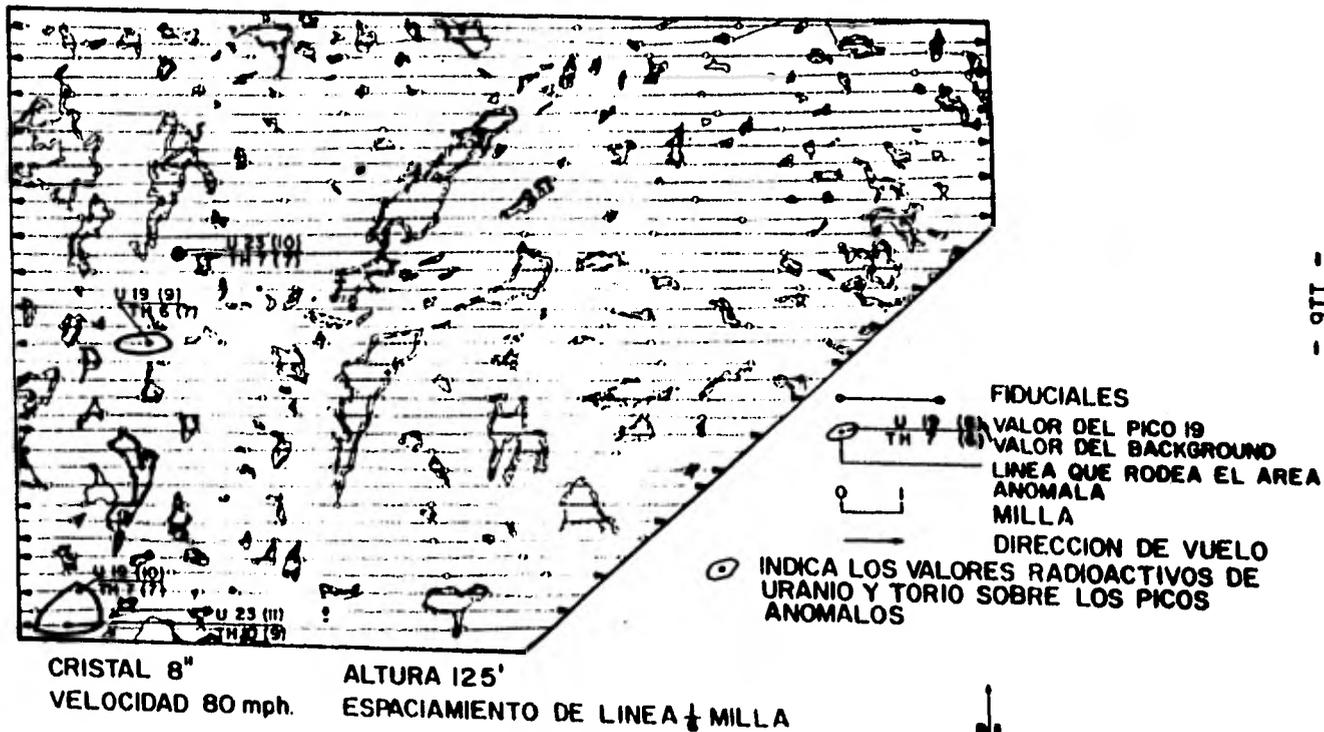
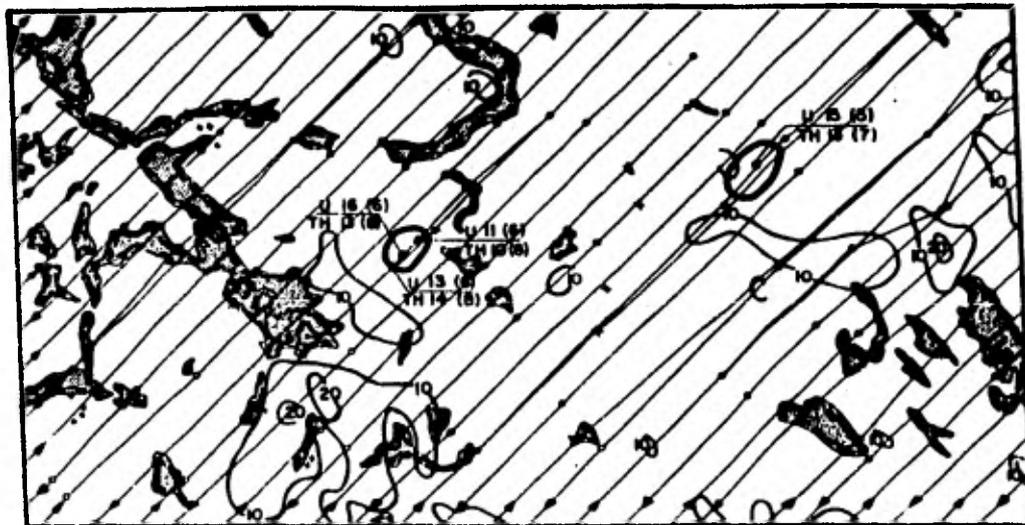


Figura 3.3.3 Presentación de datos ejemplo 3, similar a la fig. 3.3.2 pero con el contorno del Torio en la vecindad de la anomalía.



 DIRECCION DE VUELO  
 CONTORNOS DE TORIO  
 INTERVALO DE CONTORNO 10.0cps.  
 VALOR DEL PICO 19  
 VALOR DEL BACKGROUND 

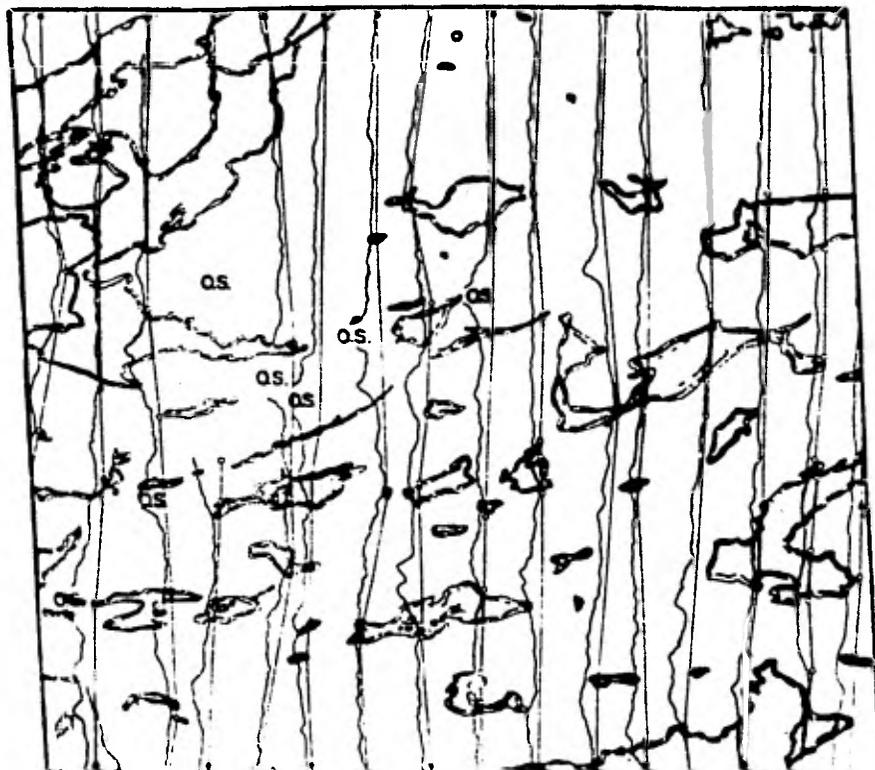
U 19 (8)  
TH 7 (6)

° FIDUCIALES

 INDICA LOS VALORES DE URANIO Y TORIO  
 SOBRE EL PICO ANOMALO

ALTURA 150'  
 ESPACIAMIENTO DE LINEAS 1/4 DE  
 MILLA  
 MILLAS  
 CRISTAL 6"  
 VELOCIDAD 55mph.

Figura 3.3.4. Presentación de datos ejemplo 4:  
Un mapa de perfiles.



\*FIDUCIAL

CRISTAL 6"

DIRECCION DE VUELO

ALTURA 150'

0 1 MILLA

1000 O (FUERA DE ESCALA O.S.)

PERFIL A ESCALA

dos en la obtención de datos de manera que faciliten la interpretación. El uso de tratamientos estadísticos para -- realizar los datos, filtrado, análisis de los factores, el uso del color para combinar la información obtenida de los tres radio elementos en un mapa.

Un mapa de desviación standard ha sido usado comúnmente como una forma de representación de datos por el Departamento de Energía de E.U. para su Programa de Evaluación Nacional del Uranio como recurso. Richardson y Carson (1976) utilizaron este tipo de presentación de datos para la Formación Athabasca en el Norte de Saskatchewan, la cual produce un nivel no uniforme de radioactividad y, por lo cual, se dificulta elaborar su contorno.

Para producir este tipo de mapas de desviación standard ( o mapa de anomalías) el valor medio del equivalente de Uranio para cada línea de vuelo, fue calculado y los puntos que excedieran la media por 1, 2, 3 ó más desviaciones standard son indicadas por 1, 2, 3 ó más estrellas graficadas arriba de la línea de vuelo. Un ejemplo de Richardson y Carson (1976) Fig. 3.3.5, muestra el mapa geológico para un área y el mapa de anomalías de Uranio - para la misma área. El mapa muestra anomalías en varias líneas de vuelo cerca del contacto entre el gneiss (1) y el grupo Virginia River Schist (3a). También se presentan anomalías de Uranio en la parte sureste de los gneiss cerca del contacto con la biotita (2) y la diorita, y la uni-

Figura 33.5 Comparación del mapa Geológico y un mapa del equivalente de Uranio para los lagos Nyberg

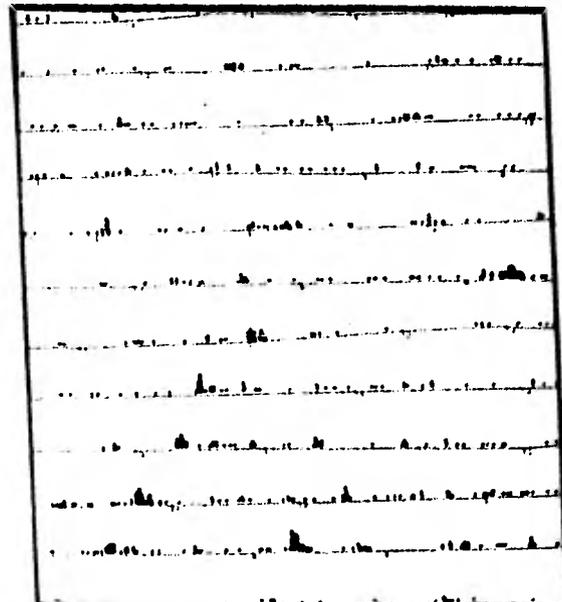
57 00'



57 00'

13 27 15'

0 20 KMS



eU

dad (3). Los autores sugieren que estas zonas de anomalía pueden ser geológicamente favorables para depósitos de Uranio.

En áreas de geología bien conocida los valores obtenidos para todos los datos calculados sobre cada unidad de roca, pueden ser tratados como se hizo anteriormente. En esta forma las desviaciones standard corresponden a una unidad de roca dada más que a los valores obtenidos para una línea de vuelo específica. Potts (1976) presenta un mapa de contornos de esta desviación standard para el equivalente de Uranio, llamándolo "significance factor map". Los factores de significancia son múltiples fracciones de la desviación standard arriba o abajo de la media y puede considerarse "el grado de rareza" de la cantidad. Las figs. 3.3.6 y 3.3.7 muestran el mapa de contornos de conteo de Uranio y el mapa del factor de significancia de valores de Uranio para un área en Sudamérica (después de Potts, 1976) respectivamente. La diferencia entre estos dos mapas es sorprendente; uno indica el área con el mayor número de desviaciones standard y el otro el mayor número de conteos en donde la distancia entre ambas áreas de interés es de 10 Km.

Una representación a color de datos aero espectrométricos (Linden, 1976), muestra la relación de radiación gama para el K, U Th en la forma en que las columnas están coloreadas sobre las líneas de vuelo. Para la proyección se usó un detector de NaI (Tl) de 250 x 125 mm., -

Figura 3.3.6. Mapa de cantornos de los conteos de Uranio.

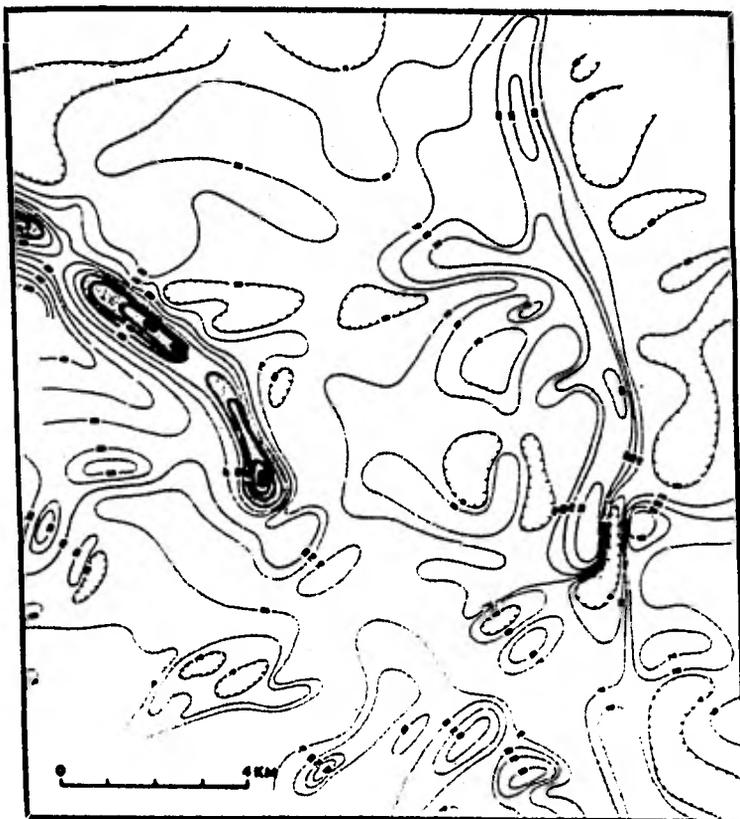
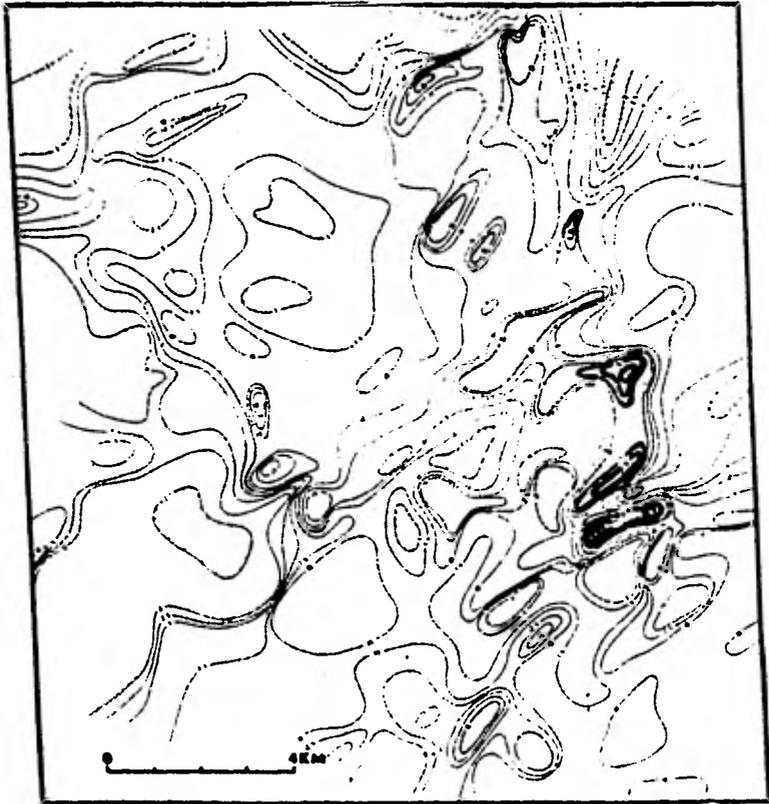


Figura 3.3.7. Mapa de contornos del factor de significancia.



un espaciamiento entre las líneas de vuelo a 200 mts., a una altura de 30 mts. La grabación digital de los datos fue a cada .4 seg., representando aproximadamente 40 mts. de línea de vuelo. Cada medida es tomada para representar la radiación gama a partir de un área de 40 mts. x 200 mts. y es representada sobre un mapa de escala 1:50 000 como un área de 0.8 mm. x 4.0 mm.

Linden (1976) describe el proceso como sigue: -- "Dentro de esta área son graficadas tres columnas orientadas al centro. La longitud de las columnas son proporcionales a la radiación que las relaciona con cada elemento. Potasio es representada por el color amarillo, Uranio por el rojo y Thorio por el azul. Cada grupo de tres columnas es separado del próximo grupo por un espacio en blanco equivalente al ancho de una columna. Hay espacio suficiente para especificar 20 diferentes niveles de intensidad de radiación. En área de contenidos anormales de alto o bajo contenido de K, U y Th es posible mejorar la solución incrementando el contraste entre la intensidad de los elementos".

Tammenmaa (1976) aplicó series digitales en el tiempo en el análisis de la aero-radiometría para obtener filtros que mejorarán la resolución en el campo y reducir la distorsión de anomalías radiométricas.

Gunn (1978) planteó la deconvolución de datos -- aero-radiométricos y la posibilidad de utilizar la "continuación de campo" como se aplica en datos gravimétricos y

magnéticos.

Tammenmaa and Grasty (1977) demostraron la continuación de campo de la radiación gama.

Richards (1977) también aplicó el filtrado digital para datos aero-radiométricos para eliminar el ruido estadístico.

La técnica conocida como "Factor de Análisis" fue aplicada a los datos aero-radiométricos por Duval (1976-1977). Básicamente la técnica puede ser considerada como un método de separación del K, U y Th dentro de grupos de coordenadas similares, donde los tres ejes coordenados son K, U y Th. Un procedimiento similar fue descrito por Killeen -- (1976). Las áreas en las cuales los datos caen en grupos con coordenadas similares son colocadas o sombreadas en los mapas. Newton y Slaney (1978) desarrollaron y clasificaron un sistema para datos aero-radiométricos en un área basada en pruebas de líneas de vuelo, las cuales, fueron estudiadas a detalle por fotogeología asignando marcas radiométricas a cada tipo de roca. Una vez hecha la clasificación en esta pequeña parte, ellos la utilizarían para clasificar el área completamente. Los autores establecen que las zonas anómalas con alta radioactividad, la mayoría de las veces cruzan cuerpos litológicos y pueden ser usados como indicadores, para la exploración de Uranio. Más resultados de esta investigación fueron presentados por Slaney (1978).

Ziegler (1976) discutió algunas aplicaciones

de geoestadística para datos aero-radiométricos. Algunas de las técnicas tratadas incluyen localización de segmentos de máxima variación de datos, técnica "Robust", análisis de grupo, análisis discriminatorio y presentación de datos por medio de histogramas, y mapas en tres dimensiones de distribución de frecuencia por línea de vuelo para cada formación geológica dada.

Footé (1976) revisó la presentación de datos incluyendo las siguientes:

- 1.- Perfiles de intensidad de radiación de la línea de vuelo para Potasio, Uranio y Thorio y sus cocientes.
- 2.- Histogramas mostrando la distribución de datos.
- 3.- Datos de radiación por medio de unidades geológicas superficiales.
- 4.- Datos de radiación por medio de línea de vuelo mostrando una variación estadística a partir de la media.
- 5.- Datos de línea de vuelo sobrepuestos a mapas geológicos.

The "Zoning Technique" usada por primera vez en 1968 descrita por Hogg se muestra a continuación.

Primero los canales de Thorio, Uranio y Potasio son representados en una grabación analógica. Los límites

de cambios considerables son marcados sobre perfiles. Estas sub-unidades son descritas semicuantitativamente por un código alfa-numérico donde K, U y Th se refieren a los canales de Potasio, Uranio y Torio, respectivamente, y la potencia de la señal es indicada por símbolos (+) fuerte, ( ) regular y (-) débil a los cuales se relacionan con niveles preseleccionados Fig. 3.3.8. Un graficador puede ser usado para producir un mapa de perfiles que contenga un perfil de conteo total para las zonas marcadas y el código anotado, Fig. 3.3.9. Estos mapas pueden ser coloreados usando diferentes intensidades para la amplitud de las cuentas y diferentes colores para cada radio elemento K, U y Th. La ventaja de esta técnica es que toda la información es presentada en un solo mapa. La principal desventaja es el gran tiempo involucrado en los pasos del procedimiento.

Otra presentación de datos (Hogg 1977) consistió de una impresión por computadora de las anomalías con un criterio específico conocido. Entonces, para cada anomalía un conjunto de datos estadísticos es graficado incluyendo número de la línea de vuelo, número del fiducial más cercano a la anomalía, amplitud de la anomalía, extensión media (izq.), extensión media (derecha), extensión total media como se muestra en la Fig. 3.3. 10. En la parte superior se refiere a los parámetros calculados a partir del strip, suavizamiento, corrección por altitud de un perfil de --

Figura 3.3.8 La técnica "zoning" aplicada en un perfil de cuenta total.

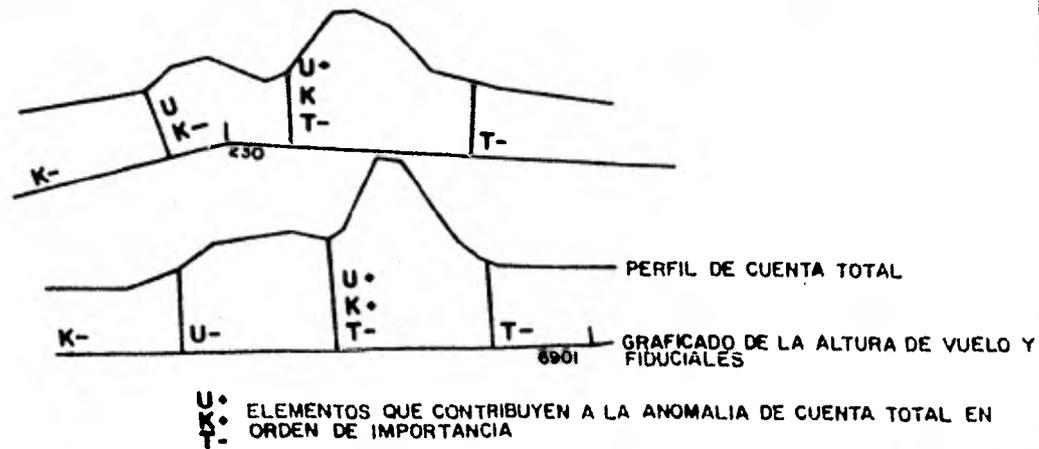
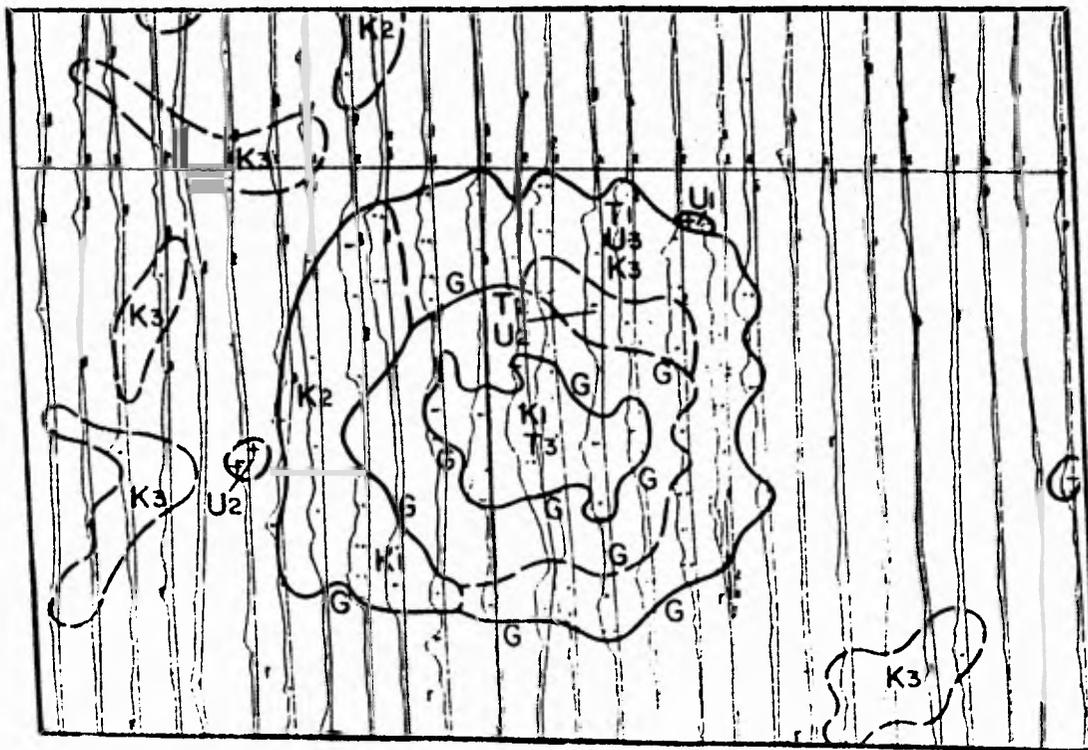


Figura 3.3.9. El mapa "Zoned" basado en perfiles de cuenta total.



ABG(1) -	AMPI	MWL1	ARL1	MWR1	ARR1	THW1	TAR1	LINEA 120
	68.0	.20	10.1	.44	20.2	.84	30.3	FS 6281
ALBG(2) -	AMP2	MWL2		MWR2		THW2	TAR2	SBL 2
	34.1	.12		.07		.19	7.9	44.3

CUENTA TOTAL																
3000 CPS POTASIO				1500 URANIO				TORIO			0					
300	0/100			0/100			I	I	I	I	K	U	TH	TC		
I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I		
715			K				U				T		48	30	22	1061
720			K				U				T		50	23	23	1020
730			K				U				T		55	18	23	1164
735			K				U				T		54	16	23	1000
740			K				U				T		49	19	27	1147
745			K				U				T		54	21	28	1203
750			K				U				T		50	22	27	1311
758			K				U				T		55	23	28	1225
750			K				U				T		54	22	28	1245
770			K				U				T		55	24	28	1211
775			K				U				T		46	31	27	1119
780			K				U				T		38	35	28	1299
785			K				U				T		44	38	27	1367
790			K				U				T		49	44	23	1493
795			K				U				T		48	44	20	1267
800			K				U				T		52	42	23	1346
810			K				U				T		55	55	30	1956
815			K				U				T		52	68	33	2398
820			K				U				T		49	61	37	2131
825			K				U				T		48	45	40	1773
830			K				U				T		45	35	32	1591
840			K				U				T		44	26	25	1249
845			K				U				T		44	17	24	1146
850			K				U				T		45	15	22	1092
855			K				U				T		47	17	21	994
860			K				U				T		40	24	20	1028
865			K				U				T		44	30	22	1128
870			K				U				T		48	30	27	1270
880			K				U				T		36	35	28	1325
885			K				U				T		37	40	24	1371
890			K				U				T		39	37	22	1321
895			K				U				T		35	31	23	1156
900			K				U				T		39	29	23	1142
910			K				U				T		44	29	22	1043
915			K				U				T		43	27	24	1159

U	TH	K	TC	U/TH	U/K	U/TC(X1000)	TH/K	ALT
68	33	52	2398	2.06	1.31	28.36	.63	327

Figura 3.3.10 Impresión de Anomalías por computadora.

Uranio equivalente con las siguientes consideraciones (1) background atmosférico (2) background local más background atmosférico.

Se grafica una línea para mostrar la forma de la anomalía. Abajo son graficados los eventos y los cocientos.

Otra forma de clasificación de datos ha sido descrita por D.B. Morris (1977). El conteo en los canales para los tres radioelementos son expresados, como por porcentaje del canal de cuenta total por medio de un proceso de normalización. Entonces, la posición de la anomalía es localizada sobre un diagrama como se muestra en la Fig. - 3.3.11. El diagrama tiene 100% de eK, 100% de Th y 100% de eU en las tres esquinas del triángulo. Cualquier anomalía puede ser localizada sobre el diagrama por medio del porcentaje relativo en que contribuye a la cuenta total el canal 2 (K), el canal 3 (U) y el canal 4 (Th). El diagrama es dividido en 9 áreas.

Un ejemplo de la aportación de la clasificación de anomalías por medio de este sistema es presentado en la Tabla 3.1.1. Ejemplos de tres anomalías son analizadas por medio de este proceso y ellas caen en las áreas S, K y L, respectivamente.

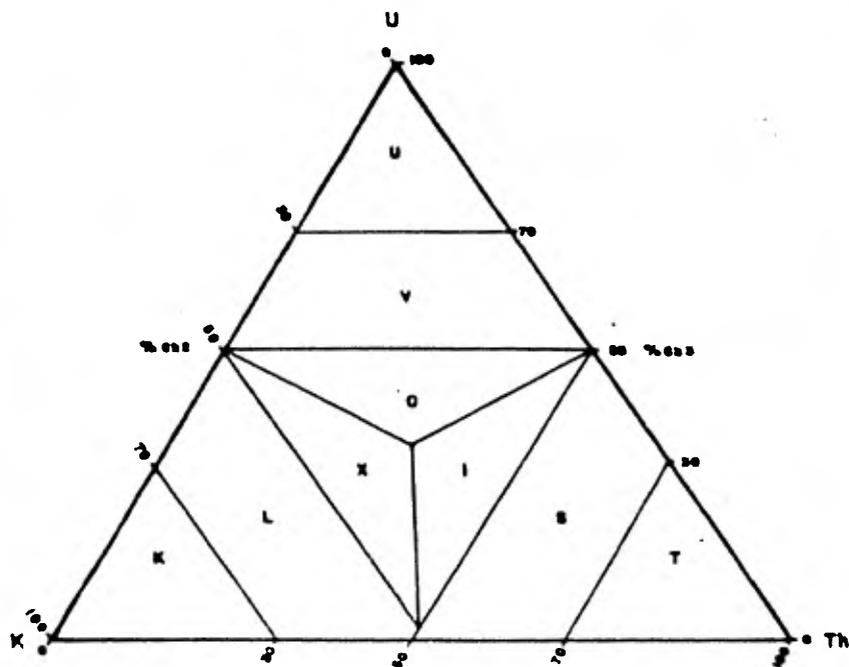


Figura 3.3.11 Diagrama que ilustra un proceso para la clasificación de anomalías dentro de 9 áreas

Tabla 3.1.1.

Ejemplo de tres anomalías clasificadas como S,KyL  
viendo las áreas de la figura 3.3.11

Línea 5881									
Anomalia No. 6	Canal 1				Pico	Cuentas Background	Corregidas Anomalia	%	
Tiempo del pico	6478	Segs.							U/Th cociente
1/2 ancho tiempo 1	6476	Segs.	Canal 1	200.	124.	76.			Th/K cociente
1/2 ancho tiempo 2	6482	Segs.	Canal 2	31.	21.	10.	35		tipo de anomalia
Altura del Pico	426	Pics	Canal 3	11.	10.	2.	0		
Cuentas del Pico	707.	CPS	Canal 4	19.	8.	11.	65		Fuente
Ch 3 tiempo del pico	6475	Segs.							Th+U/K
Anomalia No. 7	Canal 1				Pico	Cuentas Background	Corregidas Anomalia	%	
Tiempo del Pico	6578	Segs.							U/Th cociente
1/2 ancho tiempo 1	6575	Segs.	Canal 1	131.	99.	72.			Th/K cociente
1/2 ancho tiempo 2	6605	Segs.	Canal 2	29.	13.	17.	46		Anomalia tipo
Altura del Pico	471	Pics	Canal 3	15.	9.	6.	44		
Cuentas del Pico	514.	CPS	Canal 4	16.	6.	9.	41		Fuente
Ch 3 tiempo del pico	6580	Segs.							Mosier 90
Anomalia No. 8	Canal 1				Pico	Cuentas Background	Corregidas Anomalia	%	
Tiempo del Pico	6600	Segs.							U/Th cociente
1/2 ancho tiempo 1	6575	Segs.	Canal 1	116.	50.	67.			Th/K cociente
1/2 ancho tiempo 2	6605	Segs.	Canal 2	31.	10.	21.	61		Anomalia tipo
Altura del Pico	468	Pics	Canal 3	13.	9.	4.	4		
Cuentas del Pico	599.	CPS	Canal 4	15.	6.	9.	35		Fuente
Ch 3 tiempo del pico	6597	Segs.							K+U/Th

1  
103  
1

Efecto geométrico para mediciones aéreas

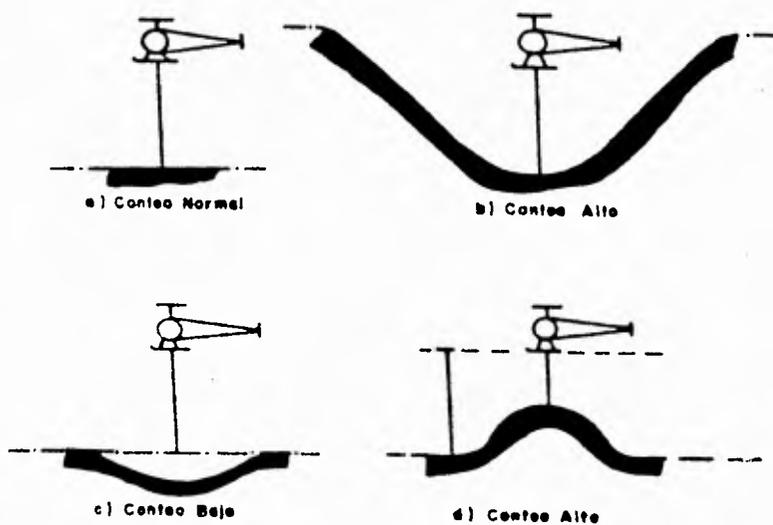
Hablando de una manera general, no existe mucha variación de una geometría 2 // (un plano) para reconocimientos aéreos si el terreno no es muy abrupto.

Para prospecciones en áreas planas se utilizan aviones de ala fija con un gran arreglo de detectores (3048 pulg.<sup>3</sup>); para trabajos con una topografía muy abrupta se utilizan aviones más versátiles o helicópteros debido a que es difícil de que un avión de ala fija pueda mantener una elevación constante sobre un terreno abrupto.

La elevación de la aeronave es corregida por la fórmula exponencial, pero las correcciones geométricas usualmente son aplicadas en un sentido cuantitativo.

La Fig. 3.3.12 ilustra el efecto de una fuente geométrica y la altura para los conteos registrados en mediciones aero-radiométricas. La aeronave es capaz de mantener una elevación constante sobre terreno plano (a) o sobre amplios cambios topográficos (b), pero sobre valles angostos (c) o en colinas (d) la altura será mayor a  $h$  o menor a  $h$ , respectivamente.

Figura 3.3.12 Efecto de la geometría de la fuente y la altura para espectrometría aérea



4.- Espectrometría Aérea de Rayos Gama en el  
Area Zacatón.

4.1 Trabajo de Campo.

4.1.1 Personal y Equipo utilizado.

4.1.2 Técnica de prospección.

4.2 Procesado de la Información.

4.3 Interpretación de valores radiométricos  
del área Zacatón.

#### 4.1 Trabajo de Campo

##### 4.1.1 Personal y Equipo utilizado

Una brigada aérea se compone de piloto, copiloto, instrumentista, mecánico y un Geofísico como coordinador de la brigada.

El piloto y copiloto se encargan de efectuar los vuelos en las áreas previamente establecidas y con el espaciamiento indicado, así como, la dirección adecuada - tratando de mantener una altura constante hasta donde la topografía del terreno lo permita.

El instrumentista se ocupa de manejar el equipo de prospección, debiendo tener cuidado en marcar el inicio y el final de cada una de las líneas, así como, llenar el reporte de instrumentista en el que se anota, principalmente: el número de línea, el fiducial y fotografía en el que se inicia y termina cada una de las líneas, el nombre del área que se está volando, temperatura, presión barométrica, escalas de graficado en las ventanas del espectrómetro, velocidad de graficado, etc. Ver Tabla - - 4.1.1.

El geofísico elabora un informe en el que se señalan áreas de interés para una verificación posterior, ya sea terrestre o por helicóptero; así también, debe cuidar que el equipo de prospección esté bien calibrado (operación que se efectúa todos los días de trabajo), en el caso de trabajar por periodos, en el primer día de calibración se debe tener especial cuidado en que los cambios de tem-

peratura no sean demasiado bruscos en los cristales, lo que pudiera ocasionar la ruptura de los mismos; es decir, la temperatura deberá incrementarse aproximadamente unos 5°C por hora hasta llegar a la temperatura ambiente.

#### 4.1.2 Técnica de prospección

Se volaron las líneas a lo largo del área delimitada por la Carta Detenal Zacatón dirección E -- W, si el inicio fue del lado E la línea se termina en la parte W, misma dirección en la que principiaría la siguiente línea para terminarla del lado Este y así comenzar la otra en este lado.

Se siguió un espaciamiento entre líneas de un kilómetro a una altura aproximada de 100 mts., estos parámetros siguen principalmente el objetivo que se persigue en este trabajo, en nuestro caso para fines regionales, se ven justificadas estas variables; la cámara fotográfica trabaja a cada 2 seg., el espectrómetro toma valores a intervalos de 1 seg. grabándose en cintas magnéticas y teniendo también una grabación analógica en papel especial con los siguientes perfiles: radar-altímetro, Potasio-40, Bi-214, Tl-208, Cuenta total y cociente Bi-214/Tl-208.

El área para estudio queda comprendida en la Carta Detenal "Zacatón", misma en la cual el copiloto marca aproximadamente las trayectorias de vuelo señalando el lugar sobre el que está volando el avión y numerándolo con el correspondiente en el cuenta fotos en ese momento, de esta manera, se tiene una relación aproximada del número de fotografía que corresponde a ese lugar para una posterior recuperación de trayectorias de vuelo.

Del trabajo de brigadas aéreas se obtiene la cinta magnética con la información aero-radiométrica - grabada, el display analógico, el borrador de la carta recuperada, los reportes de instrumentista y las películas de las trayectorias de vuelo.

La película y el borrador de las trayectorias de vuelo pasan al Área de Recuperación para una ubicación adecuada de las trayectorias, identificando rasgos y características topográficas de la película en el plano y asignándole el número correspondiente de fotografía hasta tener ubicada la trayectoria de vuelo con la precisión que se necesite según el objetivo de la prospección.

Enseguida a la Recuperación, se procede a Digitizar las áreas voladas y recuperadas, es decir, se obtiene de los puntos recuperados sus coordenadas.

Los valores de la digitización son enviados a procesamiento para que, junto con las cintas magnéticas, se proceda a la elaboración de iso-radas.

Los datos fueron captados por un equipo radiométrico de la marca "Geometrics" con un volumen total - de 1600 pulg.<sup>3</sup>. Este equipo utiliza un graficador analógico, es decir, se imprimen los valores radiométricos en perfiles sobre un rollo de papel así también se cuenta - al mismo tiempo con grabación sobre cintas magnéticas, - además una cámara fotográfica de 35 mm. programada para trabajar a cada 2 seg., radar-altímetro el cual va detectando la altura entre el terreno y el avión.

Todo el equipo antes mencionado se adaptó a un avión "Islander", para efectuar exploración aero-radiométrica.

#### 4.2 Procesado de la Información

Durante el procesamiento, los datos fueron corregidos con los siguientes valores:

##### 1.- Fondo o "Background"

Líneas 1-13	Líneas 14-28
$F_{CT} = 745.7$	$F_{CT} = 743.8$
$F_P = 70.0$	$F_P = 70.0$
$F_B = 46.2$	$F_B = 46.2$
$F_T = 32.4$	$F_T = 32.4$

##### 2.- Compton-Stripping

Coef. de Stripping	=	.513 + .00040 (h)
Coef. de Stripping	=	.638 + .00040 (h)
Coef. de Stripping	=	1.070 + .00050 (h)
Coef. de Stripping a	=	.136
Coef. de Stripping b	=	.093

##### 3.- Corrección exponencial por altura

Altura de referencia	=	125 mts.
Coef. de Atenuación CT	=	.0070
Coef. de Atenuación P	=	.0095
Coef. de Atenuación B	=	.0085
Coef. de Atenuación T	=	.0075

La altura ha sido normalizada y convertida a metros con la siguiente fórmula (temperatura y presión barométrica son tomadas del reporte de vuelo del instrumentista).

$$h = 0.3048 \times hr \times (Pr/1013.3) \times (273.1/(273.1 + Te))$$

donde:

hr = lectura del radioaltímetro (en ft)

Pr = presión barométrica (en mb)

Te = temperatura (en °C)

Además a los canales radiométricos se les aplicó un filtro pesado tipo binomial de 21 puntos.

Los valores de fondo para esta prospección se obtuvieron realizando vuelos a 2000 ft de altura para tener la captación de la radiación en el medio ambiente sin la influencia de la radiación que proviene de las rocas en el terreno.

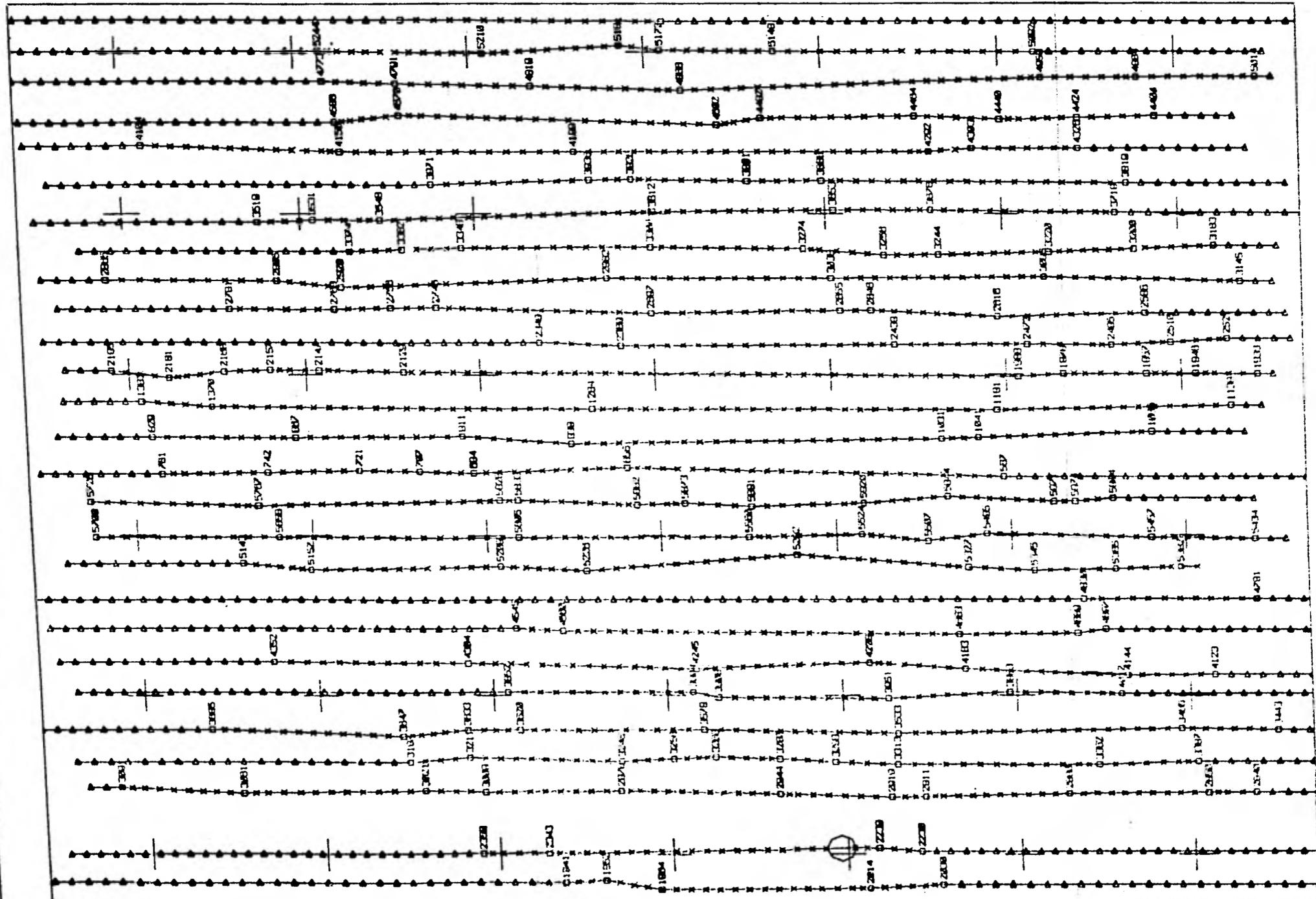
El área fue volada en dos días de trabajo, por lo que se tienen dos fondos de corrección, el primero con el que se corrigen de la línea 1-13 y el segundo fondo en el que se evalúan las líneas 14-28 correspondientes al segundo día de trabajo.

Mapa de líneas de vuelo

Los números que aparecen en el mapa corresponden a un número de fotografía, el cual se encuentra ubicado en el lugar sobre el que pasaba el avión en el instante de ser tomada esa fotografía.

Para ese número de fotografía corresponde un valor de Cuenta Total, de Potasio, Uranio, Torio y Radar Altimetro; es de esta manera como los valores radiométricos son ubicados en una cartografía adecuada.

El paso de la identificación de la fotografía con el lugar a la que ésta corresponde, es conocido como Recuperación de Trayectorias de Vuelo.



URANIO MEXICANO  
 GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA  
 PROCESADO: UNIDAD DE INFORMATICA

AREA F13259 ZACATON  
 DELEGACION CENTRO  
 PROCESO: 1/22-Jul-81

MAPA DE LINEAS DE VUELO  
 ○ Pto. de posicion recuperada  
 × Pto. de posicion interpolada  
 ▲ Pto. de posicion extrapolada

Coordenadas: U. T. Mercator  
 X1= 772.00 X2= 808.50  
 Y1= 2518.50 Y2= 2548.50  
 Escala: Kms

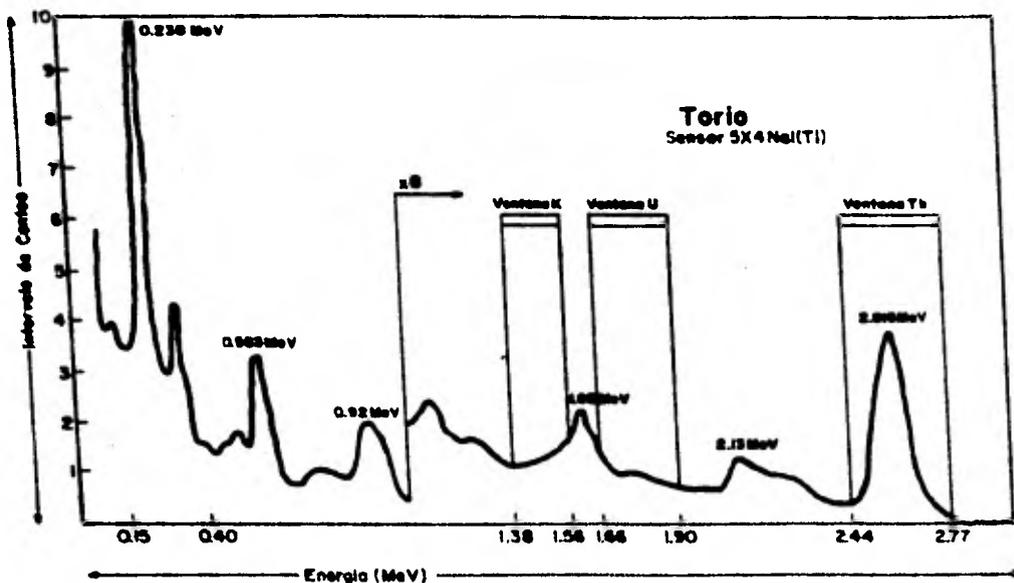
Configuraciones de Torio.

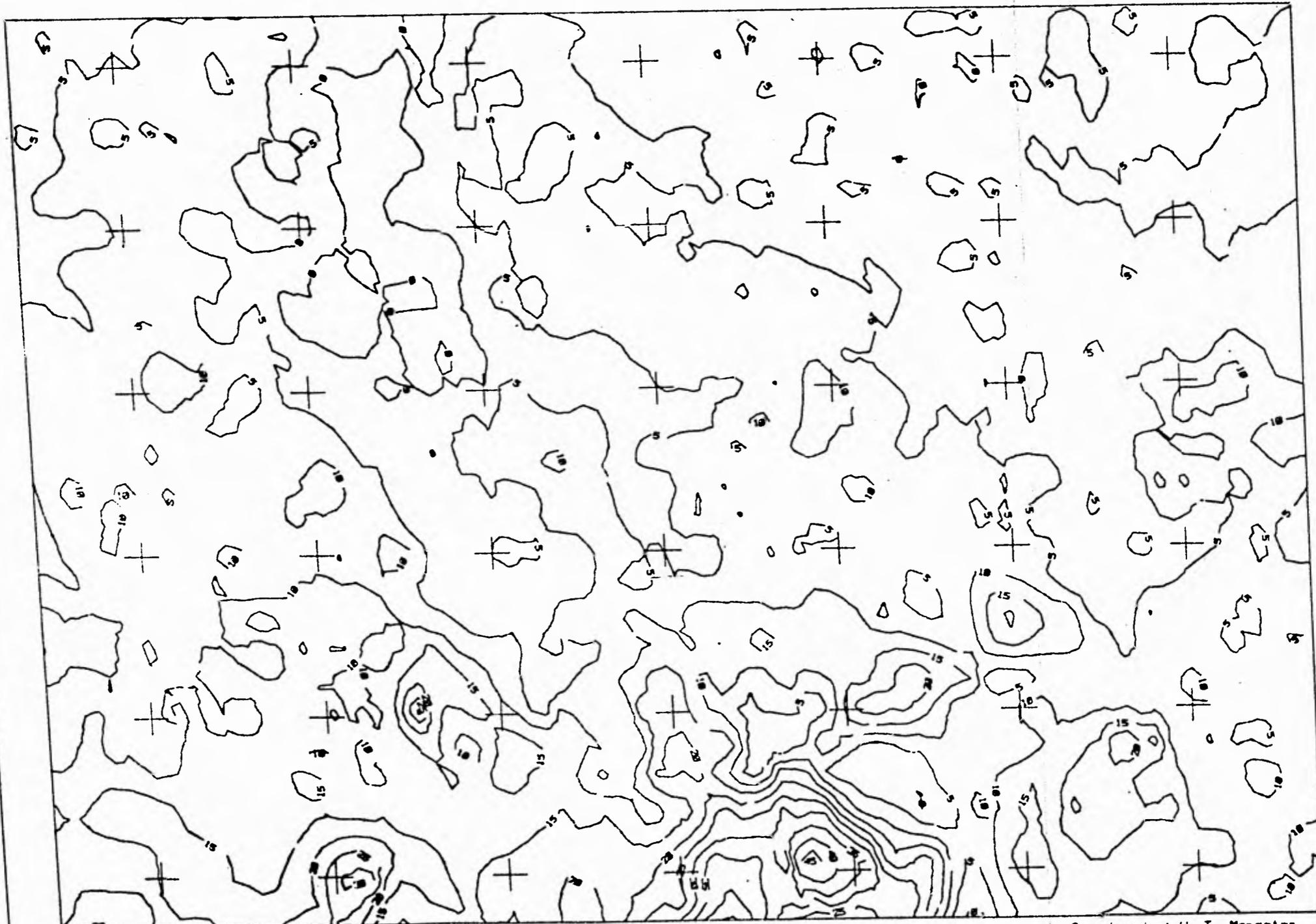
Para la detección del Torio se utilizó como elemento radiactivo dentro de esta serie de decaimiento al Tl-208 (Talio-208), debido a las características de alta energía que presenta el espectro de este elemento, el espectrómetro trabajó con la ventana entre 2.44 y 2.77 Mev.

Media = 7.4 c.p.s. (cuentas por seg.)

Desv. Est. = 6.1 c.p.s.

Gráfica que muestra el espectro del Torio





URANIO MEXICANO  
 GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA  
 PROCESADO: UNIDAD DE INFORMACION

AREA FISICA ZACATON  
 DELEGACION CENTRO  
 PROCESO: 1/22-Jul-81

Canal: Torto (cps)  
 Medida= 7.4  
 Des.Est.= 6.1  
 Intervalo= 5.0

Coordenadas U. T. Mercator  
 X1= 772.00 X2= 808.50  
 Y1= 2518.50 Y2= 2546.50  
 Escala: Kms

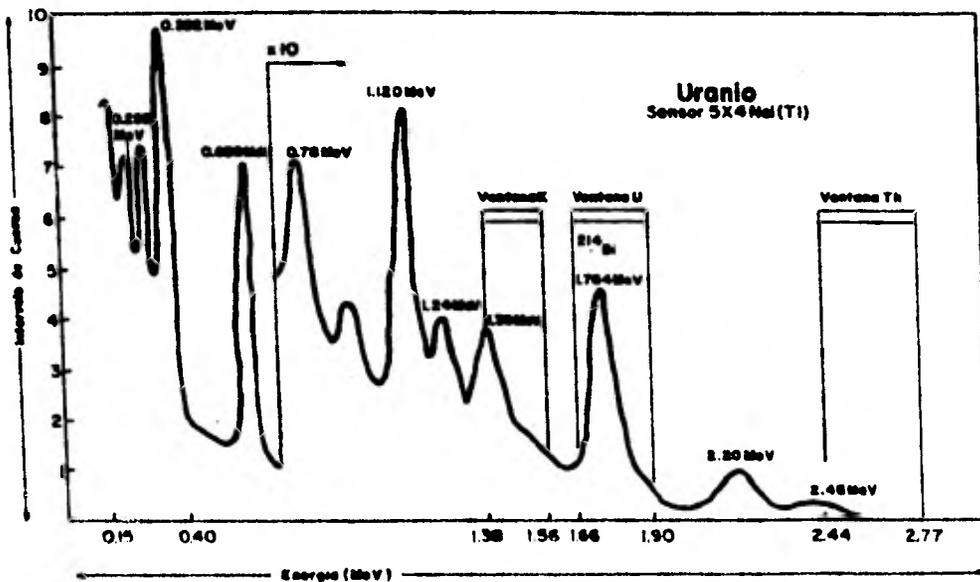
Configuraciones de Uranio

Para detectar la presencia del Uranio se utiliza como elemento radioactivo dentro de la serie de decaimiento al Bi-214 (Bismuto -124), el cual, es registrado en el espectrómetro dentro del rango de energía de 1.66 a 1.90 Mev.

Media = 2.4 c.p.s. (cuentas por seg.)

Desv. Est. = 3.5 c.p.s.

Gráfica que muestra el espectro del Uranio





URANIO MEXICANO  
 GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA  
 PROCESO: UNIDAD DE INFORMATICA

AREA FISAS ZACATON  
 DELEGACION CENTRO  
 PROCESO: 1/22-Jul-81

Canal: Uranto (cps)  
 Medie= 5.4  
 Des.Est.= 3.5  
 Intervalo= 5.2

Coordenadas: U. T. Mercator  
 X1= 772.00 X2= 808.50  
 Y1= 2518.50 Y2= 2546.50  
 Escala: Kms

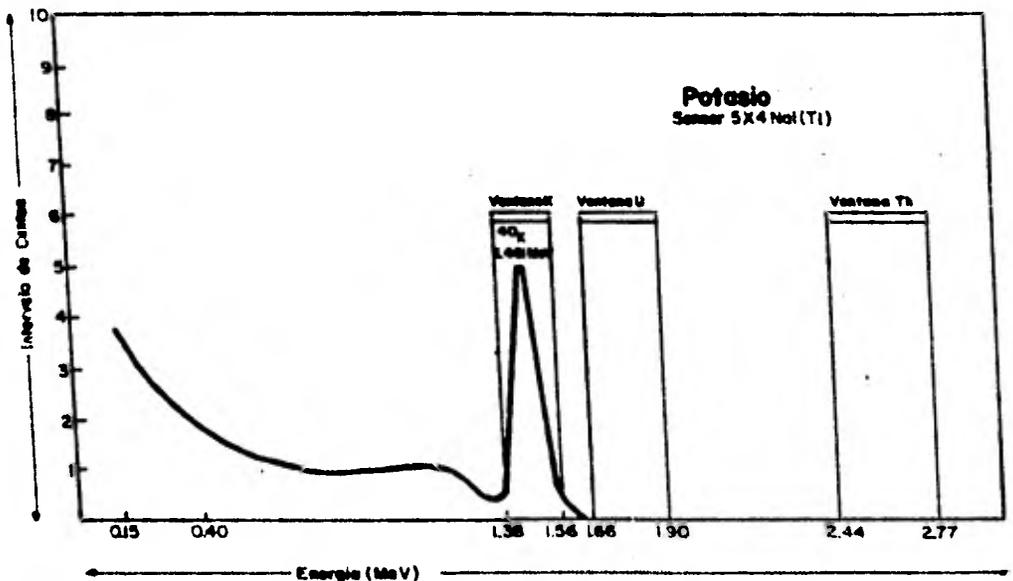
Configuraciones de Potasio

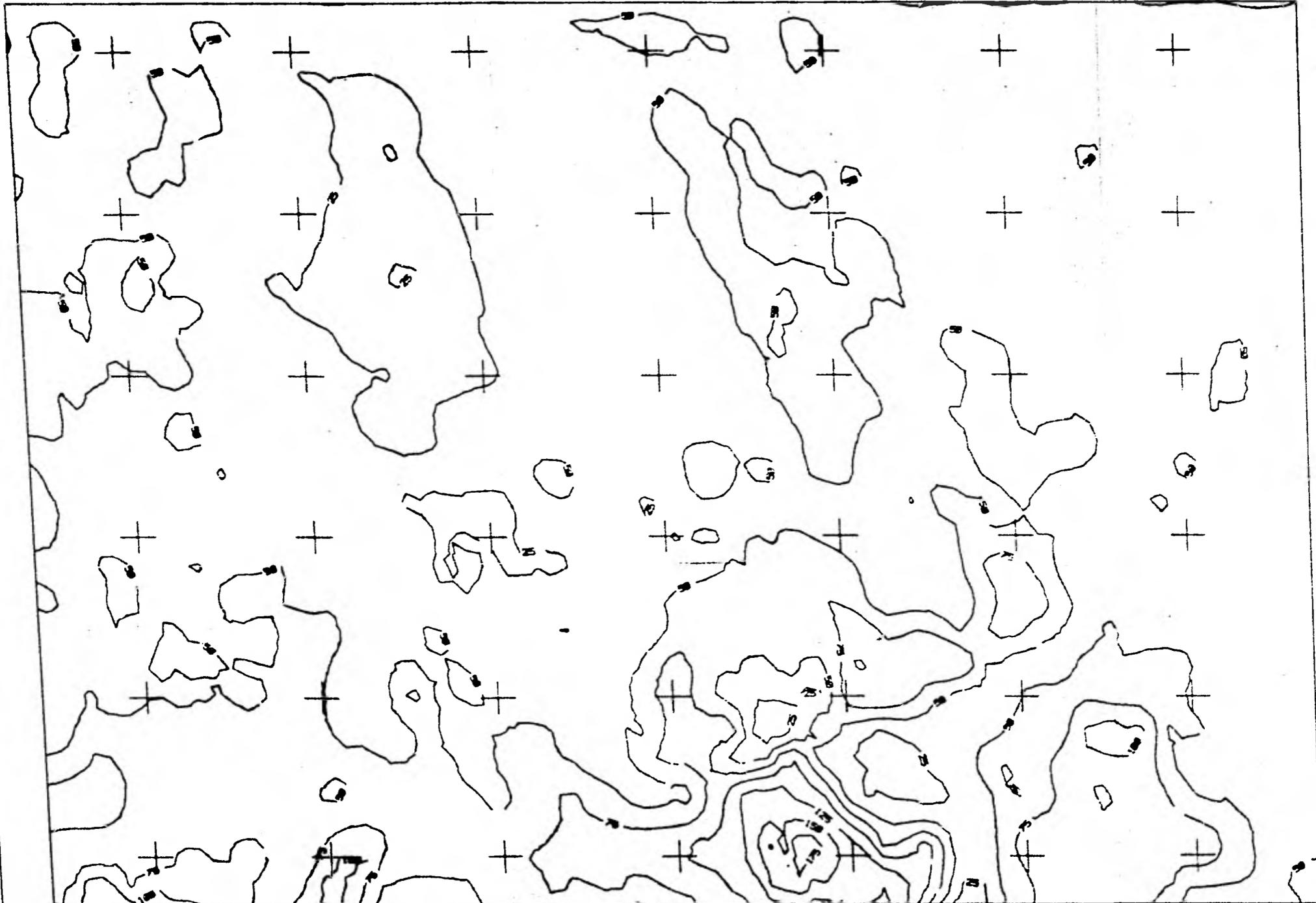
Para la detección de Potasio se utiliza el K-40  
(Potasio -40) con una ventana entre 1.38 y 1.56 Mev

Media = 46.8 c.p.s. (cuentas por seg.)

Desv. Est. = 19.9 c.p.s.

Gráfica que muestra el espectro del Potasio





URANIO MEXICANO  
 GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA  
 PROCESADO: UNIDAD DE INFORMATICA

AREA FIDESA ZACATON  
 DELEGACION CENTRO  
 PROCESO: 1/22-Jul-81

Canal: Potosi (cpe)  
 Medie= 46.8  
 Des.Est.= 19.9  
 Intervalo= 25.0

Coordenada: U. T. Marcelor  
 X1= 772.20 X2= 608.50  
 Y1= 2518.50 Y2= 2548.50  
 Escala:  Kms

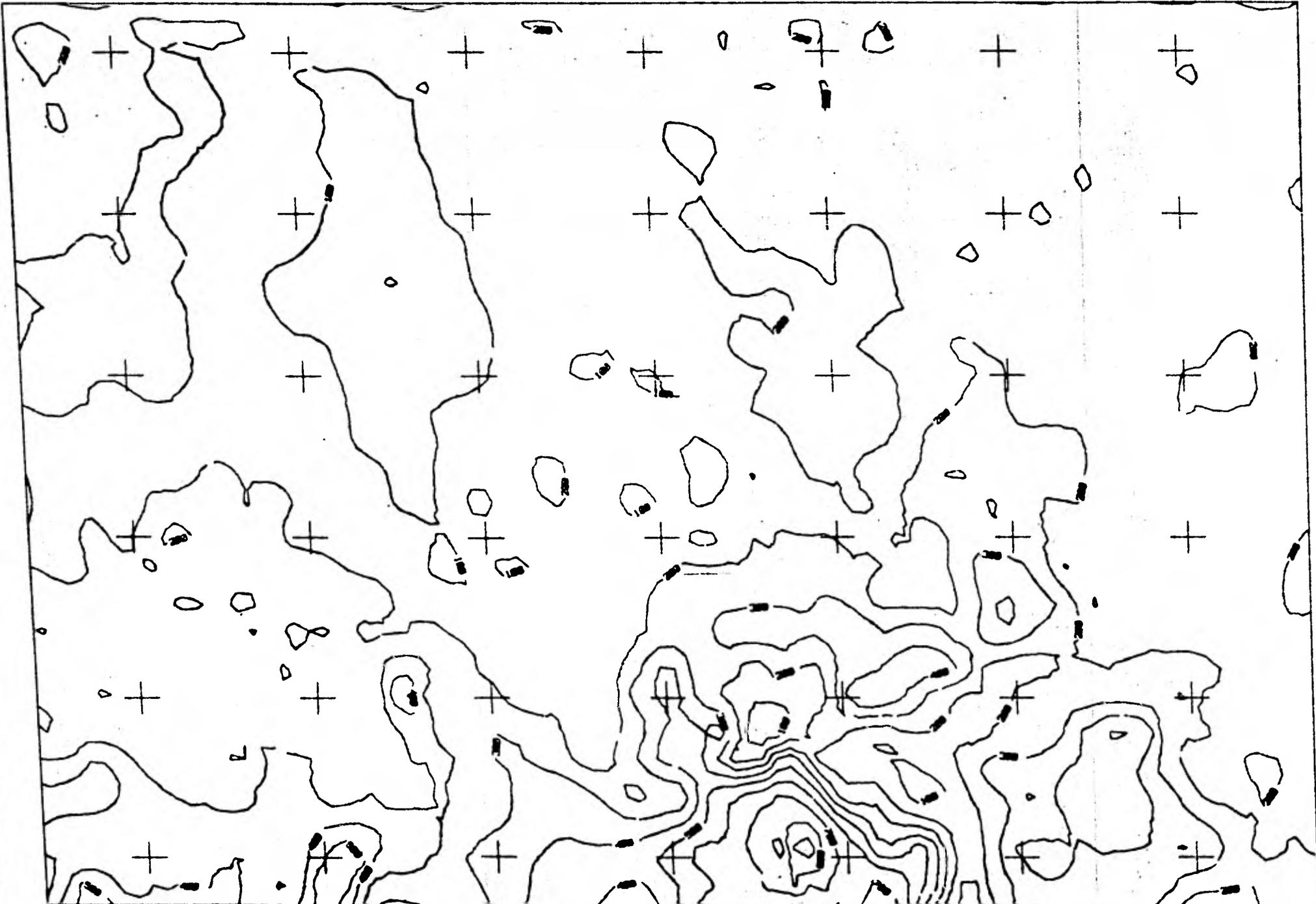
Configuraciones de Cuenta Total

Esto se obtuvo con el espectrómetro trabajando en un rango aproximado desde .4 Mev hasta 2.6 Mev, es decir, el detector registraba toda la energía que cayera dentro de esta ventana.

Para esta ventana se tiene:

Media = 206.4 c.p.s. (cuentas por seg.)

Desv. Est. = 105.4 c.p.s.



URANIO MEXICANO  
GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA  
PROCESADO: UNIDAD DE INFORMACION

AREA F13858 ZACATON  
DELEGACION CENTRO  
PROCESO: 1/22-Jul-81

Cont: Cuenta Total (cps)  
Medio = 208.4  
Des.Est. = 105.4  
Intervalo = 100.0

Coordenadas: U. T. Mercator  
X1 = 772.00      X2 = 808.50  
Y1 = 2518.50    Y2 = 2548.50  
Escala:  Kms

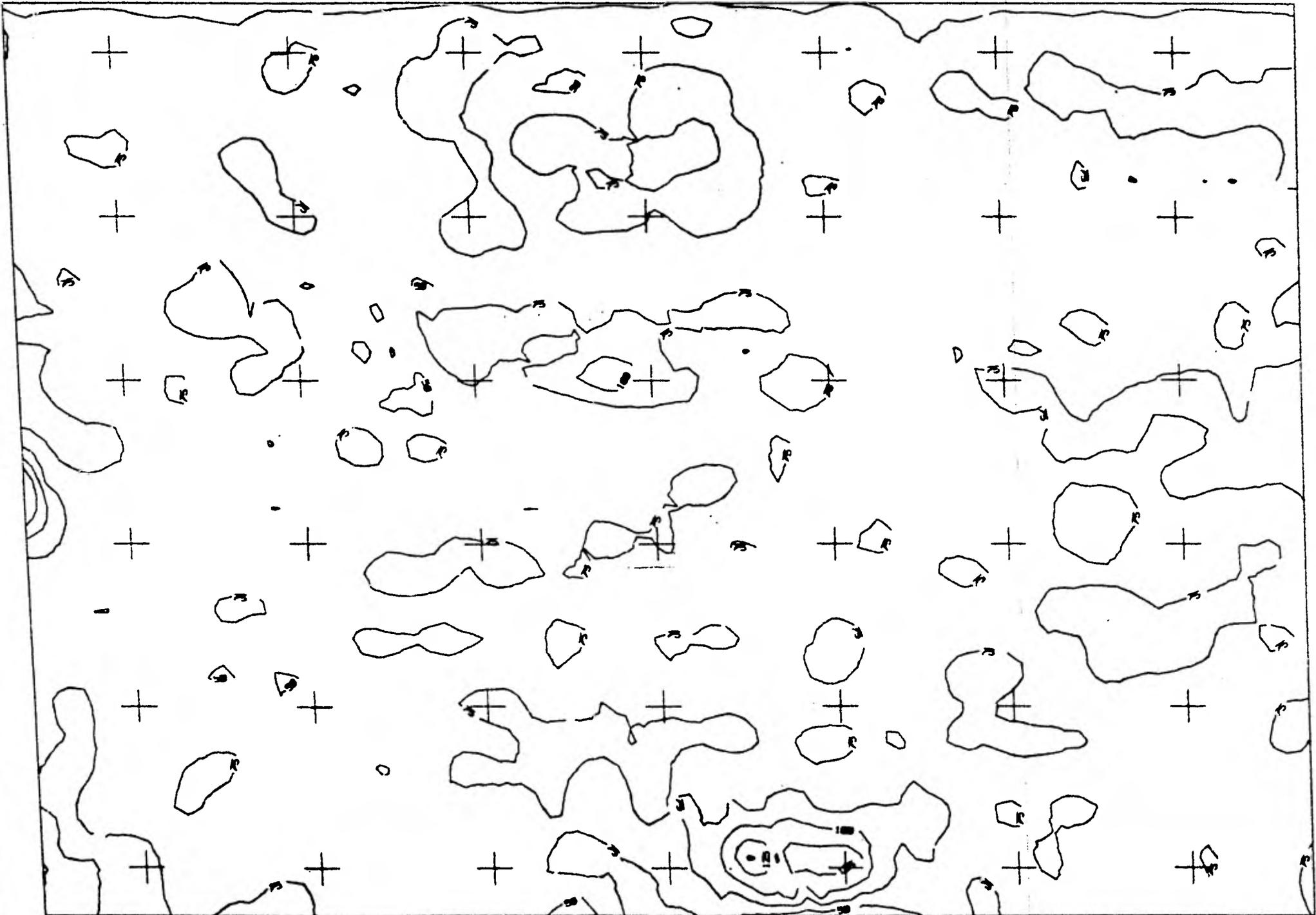
Configuraciones de Alturas

El avión está equipado con un radar altímetro, el cual, va registrando las alturas entre el terreno y el avión, la idea del vuelo para el presente objetivo es mantener una altura aproximada de 100 mts.

En el display analógico se obtiene la gráfica de estas alturas, este perfil invertido nos dará a groso modo la topografía del terreno por donde voló el avión.

Media = 68.9 mts.

Desv. Est. = 10.8 mts.



URANIO MEXICANO  
 GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA  
 PROCESADO: UNIDAD DE INFORMATICA

AREA F13858 ZACATON  
 DELEGACION CENTRO  
 PROCESO: 1/22-Jul-81

Canal: Radar-altimetro(mts)  
 Medio= 88.8  
 Des.Est.= 10.8  
 Intervalo= 25.0

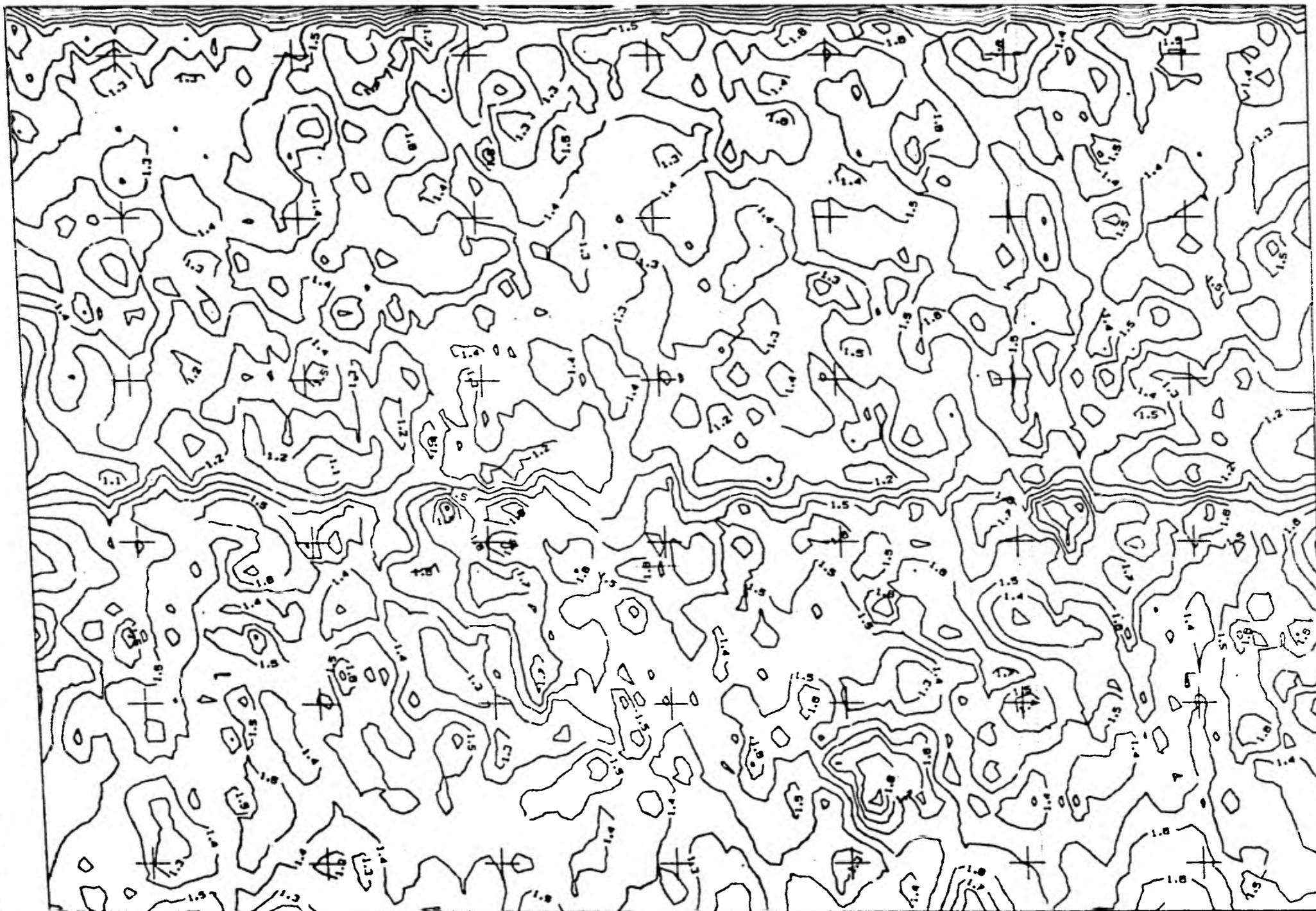
Coordenadas: U. T. Mercator  
 X1= 772.00 X2= 808.50  
 Y1=2518.50 Y2=2546.50  
 Escala:  Kms

Configuraciones de Uranio/Torio

Como auxiliar en la interpretación se obtiene un mapa del cociente Uranio/Torio, el cual nos permite analizar en forma conjunta áreas en las cuales el Uranio predomina sobre el Torio o viceversa.

Media = 1.4 c.p.s. (cuentas por segundo)

Desv. Est. = 0.1



URANIO MEXICANO  
 GERENCIA DE INFRAESTRUCTURA  
 PROCESADO: UNIDAD DE INFORMATICA

AREA F13858 ZACATON  
 DELEGACION CENTRO  
 PROCESO: 1/22-Jul-81

Canal: Uruano/Torta  
 Med: 1.4  
 Des.Est.: 0.1  
 Intervalo: 0.1

Coordenadas: U. T. Mercator  
 X1= 772.00 X2= 808.50  
 Y1= 2518.50 Y2= 2548.50  
 Escala:  Kms

AREA F13859 ZACATON  
DELEGACION CENTRO  
PROCESO: 1/22-Jul-81

Línea 1 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
5 Coord. entre los fiduciales: 3882 4060  
615 Datos entre los fiduciales: 3623 4237  
37.4 Kms. con informacion util en  
83 Puntos entre los fiduciales: 3626 4236

Línea 2 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
4 Coord. entre los fiduciales: 4460 4716  
545 Datos entre los fiduciales: 4268 4889  
Bucle entre los fiduciales: 4493 4569  
37.7 Kms. con informacion util en  
92 Puntos entre los fiduciales: 4268 4878

Línea 3 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
604 Datos entre los fiduciales: 4920 5608  
No hay coordenadas de esta línea  
????? No se pudo empalmar

Línea 4 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
11 Coord. entre los fiduciales: 5680 6182  
595 Datos entre los fiduciales: 5647 6202  
35.4 Kms. con informacion util en  
89 Puntos entre los fiduciales: 5652 6196

Línea 5 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
10 Coord. entre los fiduciales: 6394 6774  
610 Datos entre los fiduciales: 6233 6842  
36.0 Kms. con informacion util en  
84 Puntos entre los fiduciales: 6234 6838

Línea 6 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
8 Coord. entre los fiduciales: 6886 7370  
591 Datos entre los fiduciales: 6862 7452  
36.9 Kms. con informacion util en  
89 Puntos entre los fiduciales: 6865 7447

Línea 7 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
6 Coord. entre los fiduciales: 7704 8024  
672 Datos entre los fiduciales: 7476 8147  
36.5 Kms. con informacion util en  
85 Puntos entre los fiduciales: 7480 8144

Línea 8 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 10-Jun-80(1)  
7 Coord. entre los fiduciales: 8246 8704  
635 Datos entre los fiduciales: 8177 8811  
36.9 Kms. con informacion util en  
86 Puntos entre los fiduciales: 8182 8808

Línea 9	====>	Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 10-Jun-80(1)		
		5 Coord. entre los fiduciales:	9090	9394
		664 Datos entre los fiduciales:	8848	9511
		36.5 Kms. con información util en		
		84 Puntos entre los fiduciales:	8850	9506
Línea 10	====>	Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 10-Jun-80(1)		
		2 Coord. entre los fiduciales:	9582	9660
		591 Datos entre los fiduciales:	9548	10138
		37.3 Kms. con información util en		
		45 Puntos entre los fiduciales:	9554	10136
Línea 11	====>	Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 10-Jun-80(1)		
		10 Coord. entre los fiduciales:	10286	10926
		648 Datos entre los fiduciales:	10173	10820
		32.4 Kms. con información util en		
		79 Puntos entre los fiduciales:	10176	10796
Línea 12	====>	Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 10-Jun-80(1)		
		9 Coord. entre los fiduciales:	10868	11400
		554 Datos entre los fiduciales:	10853	11406
		34.1 Kms. con información util en		
		83 Puntos entre los fiduciales:	10854	11400
Línea 13	====>	Reporte de Correcciones: 1/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 10-Jun-80(1)		
		12 Coord. entre los fiduciales:	11452	11968
		816 Datos entre los fiduciales:	11445	12429
		Bucle entre los fiduciales:	12045	12211
		32.8 Kms. con información util en		
		82 Puntos entre los fiduciales:	11452	12032
		1 Datos no grabados		
Línea 14	====>	Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 12-Jun-80(1)		
		7 Coord. entre los fiduciales:	1134	1522
		619 Datos entre los fiduciales:	960	1578
		37.9 Kms. con información util en		
		92 Puntos entre los fiduciales:	966	1578
Línea 15	====>	Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 12-Jun-80(1)		
		7 Coord. entre los fiduciales:	1658	2172
		618 Datos entre los fiduciales:	1609	2226
		33.9 Kms. con información util en		
		79 Puntos entre los fiduciales:	1610	2220
Línea 16	====>	Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 12-Jun-80(1)		
		5 Coord. entre los fiduciales:	2276	2766
		548 Datos entre los fiduciales:	2260	2807
		34.2 Kms. con información util en		
		81 Puntos entre los fiduciales:	2262	2801
Línea 17	====>	Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81		
		Avions: XC-GAU Vuelos 12-Jun-80(1)		

	11	Coord. entre los fiduciales:	3866	4390
	560	Datos entre los fiduciales:	3854	4413
	34.5	Kms. con informacion util en		
	86	Puntos entre los fiduciales:	3859	4411
Línea 18 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	7	Coord. entre los fiduciales:	4698	5042
	633	Datos entre los fiduciales:	4447	5079
	35.6	Kms. con informacion util en		
	84	Puntos entre los fiduciales:	4450	5074
Línea 19 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	9	Coord. entre los fiduciales:	5172	5582
	552	Datos entre los fiduciales:	5109	5660
	35.0	Kms. con informacion util en		
	82	Puntos entre los fiduciales:	5109	5659
Línea 20 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	7	Coord. entre los fiduciales:	5730	6290
	617	Datos entre los fiduciales:	5695	6311
	35.1	Kms. con informacion util en		
	82	Puntos entre los fiduciales:	5698	6306
Línea 21 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	10	Coord. entre los fiduciales:	6366	6748
	538	Datos entre los fiduciales:	6335	6872
	34.1	Kms. con informacion util en		
	83	Puntos entre los fiduciales:	6338	6867
Línea 22 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	7	Coord. entre los fiduciales:	7038	7438
	603	Datos entre los fiduciales:	6928	7530
	36.1	Kms. con informacion util en		
	85	Puntos entre los fiduciales:	6934	7526
Línea 23 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	6	Coord. entre los fiduciales:	7638	7942
	547	Datos entre los fiduciales:	7564	8110
	35.2	Kms. con informacion util en		
	81	Puntos entre los fiduciales:	7568	8110
Línea 24 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	6	Coord. entre los fiduciales:	8208	8652
	589	Datos entre los fiduciales:	8146	8735
	34.8	Kms. con informacion util en		
	81	Puntos entre los fiduciales:	8152	8732
Línea 25 ****> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81				
		Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)		
	8	Coord. entre los fiduciales:	8808	9172
	598	Datos entre los fiduciales:	8770	9327
	35.4	Kms. con informacion util en		
	85	Puntos entre los fiduciales:	8773	9326

Línea 26 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)  
7 Coord. entre los fiduciales: 9546 10028  
677 Datos entre los fiduciales: 9365 10041  
36.6 Kms. con informacion util en  
86 Puntos entre los fiduciales: 9370 10036

Línea 27 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)  
6 Coord. entre los fiduciales: 10184 10488  
541 Datos entre los fiduciales: 10086 10626  
35.7 Kms. con informacion util en  
83 Puntos entre los fiduciales: 10086 10621

Línea 28 \*\*\*\*> Reporte de Correcciones: 2/22-Jul-81  
Avion: XC-GAU Vuelo: 12-Jun-80(1)  
2 Coord. entre los fiduciales: 10868 10992  
658 Datos entre los fiduciales: 10660 11317  
39.0 Kms. con informacion util en  
83 Puntos entre los fiduciales: 10660 11312

\*\*\*\*= COMENTARIOS =\*\*\*\*

La altitud se estimo en 2100.0 mts. sobre el nivel del mar.

REPORTE DE CORRECCIONES: 1/22-Jul-81

Clave del vuelo: 8006101

Informacion radiometrica corregida por:  
fondos, stripping y altura.

Los fondos restados son:

F. C.T= 745.7  
F. Pot= 70.0  
F. Bis= 46.2  
F. Tal= 32.4

Los coeficientes de la correccion de stripping son:

ALFA= .513+ .00040\*ALT  
BETA= .638+ .00040\*ALT  
GAMA=1.070+ .00050\*ALT  
BE= .136  
DE= .093

Formula exponencial para la correccion de altura.

Altura de referencia= 125.0 mts.

mu de C.T= .0070  
mu de Pot= .0095  
mu de Bis= .0085  
mu de Tal= .0075

La altura se normaliza y se convierte a metros.  
La temperatura es tomada del reporte de vuelo.

A los canales radiometricos se les aplica  
un filtro pesado tipo binomial de 21 puntos.

REPORTE DE CORRECCIONES: 2/22-Jul-61

Clave del vuelo: 9006121

Informacion radiometrica corregida por:  
fondos, stripping y altura.

Los fondos restados son:

F. C.T= 743.6  
F. Pots= 68.2  
F. Sig= 44.7  
F. Tals= 36.5

Los coeficientes de la correccion de stripping son:

ALFA= .513+ .00040\*ALT  
BETA= .638+ .00040\*ALT  
GAMA=1.070+ .00050\*ALT  
BE= .136  
DE= .093

Formula exponencial para la correccion de altura.

Altura de referencia= 125.0 mts.

mu de C.T= .0070  
mu de Pots= .0095  
mu de Sig= .0085  
mu de Tals= .0075

La altura se normaliza y se convierte a metros.  
La temperatura es tomada del reporte de vuelo.

A los canales radiometricos se les aplico  
un filtro pesado tipo binomial de 21 puntos.

A continuación utilizaremos las correcciones que se emplearon en la elaboración de las configuraciones anteriores para corregir valores radiométricos en un punto determinado, para lo cual supondremos que las mediciones en los cuatro canales fueron las siguientes:

Cuenta Total C.T. = 1000

Potasio P = 100

Bismuto B = 100

Talio T = 100

Los valores de Fondo o "Background" fueron :

$F_{C.T.} = 752$

$F_P = 72.3$

$F_B = 44.3$

$F_T = 40.7$

Como coeficientes de Stripping se utilizaron:

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha (h)$$

$$\beta = \beta_0 + \Delta\beta (h)$$

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma (h)$$

$$a = .136$$

$$b = .093$$

donde:  $\alpha_0 = .513$                        $\Delta\alpha = .00040$

$\beta_0 = .638$                                $\Delta\beta = .00040$

$\gamma_0 = 1.070$                             $\Delta\gamma = .00050$

por lo tanto:  $\alpha = .563$

$\beta = .688$

$$\delta = 1.12$$

$$a = .136$$

$$b = .093$$

Además como altura de referencia o altura a la cual se corregirán todos los datos se empleará  $h_0 = 125$  mts.

Para diferenciar la altura de referencia con la altura a la cual se tomaron los valores aero-radiométricos utilizaremos  $h_0$ .

1.- Corrección por Fondo o "Background"

$$C.T._1 = C.T. - F_{C.T.}$$

$$P_1 = P - F_P$$

$$B_1 = B - F_B$$

$$T_1 = T - F_T$$

Substituyendo valores:

$$C.T._1 = 1000 - 752$$

$$C.T._1 = 248$$

$$P_1 = 100 - 72.3$$

$$P_1 = 27.7$$

$$B_1 = 100 - 44.3$$

$$B_1 = 55.7$$

$$T_1 = 100 - 40.7$$

$$T_1 = 59.3$$

2.- Corrección Compton - Stripping

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ B_2 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta & \beta \\ b & 1 & \alpha \\ 0 & a & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_1 \\ B_1 \\ T_1 \end{bmatrix}$$

Si llamamos A a la matriz

$$A = \begin{bmatrix} 1 & b & a \\ b & 1 & 1 \\ 0 & a & 1 \end{bmatrix}$$

y substituimos valores

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1.12 & .688 \\ .093 & 1 & .563 \\ 0 & .136 & 1 \end{bmatrix}$$

donde:  $|A| = .828$

y la matriz inversa será:

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} A^*$$

donde  $A^*$  es la adjunta de la matriz A

$$\text{Si } A^* = \begin{bmatrix} |A_{11}^T| & |A_{12}^T| & |A_{13}^T| \\ |A_{21}^T| & |A_{22}^T| & |A_{23}^T| \\ |A_{31}^T| & |A_{32}^T| & |A_{33}^T| \end{bmatrix}$$

y  $A^T$  es la transpuesta de la matriz A, así utilizando los valores y efectuando operaciones

$$A^* = \begin{bmatrix} .923432 & -1.026432 & -.05744 \\ -.093 & 1 & -.499016 \\ .012648 & -.136 & .89584 \end{bmatrix}$$

entonces:

$$A^{-1} = \frac{1}{.828} A^*$$

así tendremos que:

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ B_2 \\ T_2 \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} P_1 \\ B_1 \\ T_1 \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} P_2 \\ B_2 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -42.27 \\ 28.42 \\ 54.59 \end{bmatrix}$$

### 3.- Corrección por Altura

Los coeficientes de atenuación para los distintos elementos fueron las siguientes:

$$\begin{aligned} \swarrow \text{C.T.} &= .0070 \\ \swarrow P &= .0095 \\ \swarrow B &= .0085 \\ \swarrow T &= .0075 \end{aligned}$$

finalmente:

$$\begin{aligned} \text{C.T.}_c &= \text{CT}_1 & \text{C.T. (h - h}_0) \\ P_c &= P_2 & P (h - h_0) \\ B_c &= B_2 & B (h - h_0) \\ T_c &= T_2 & T (h - h_0) \end{aligned}$$

y así los valores corregidos serán:

$$C.T._c = 248$$

$$P_c = -42.27$$

$$B_c = 28.42$$

$$T_c = 54.59$$

Todas las alturas empleadas anteriormente fueron normalizadas con la expresión siguiente:

$$h = (0.3048)h + (P_b/1013.3) \left( 273.1 / (273.1 + T_c) \right)$$

h = lectura del radar-altímetro (pies)

$P_b$  = presión barométrica (mb)

$T_c$  = temperatura (°c)

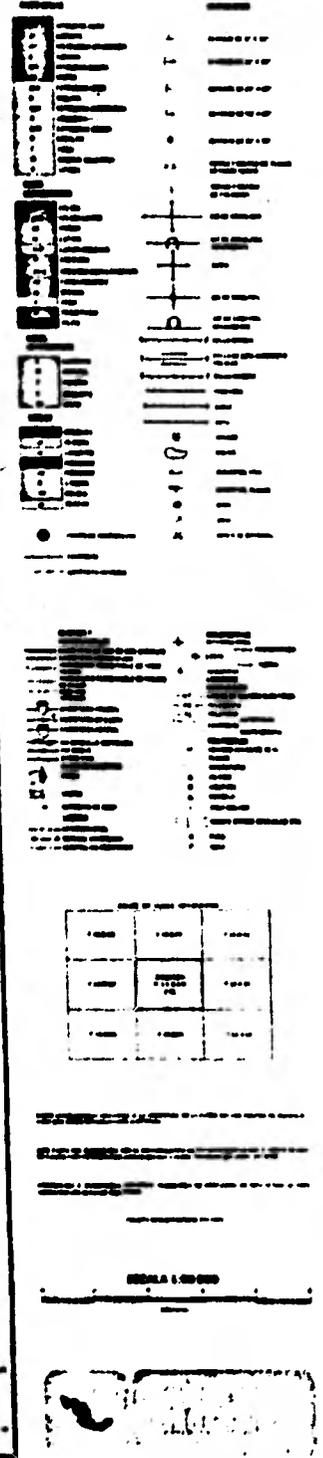
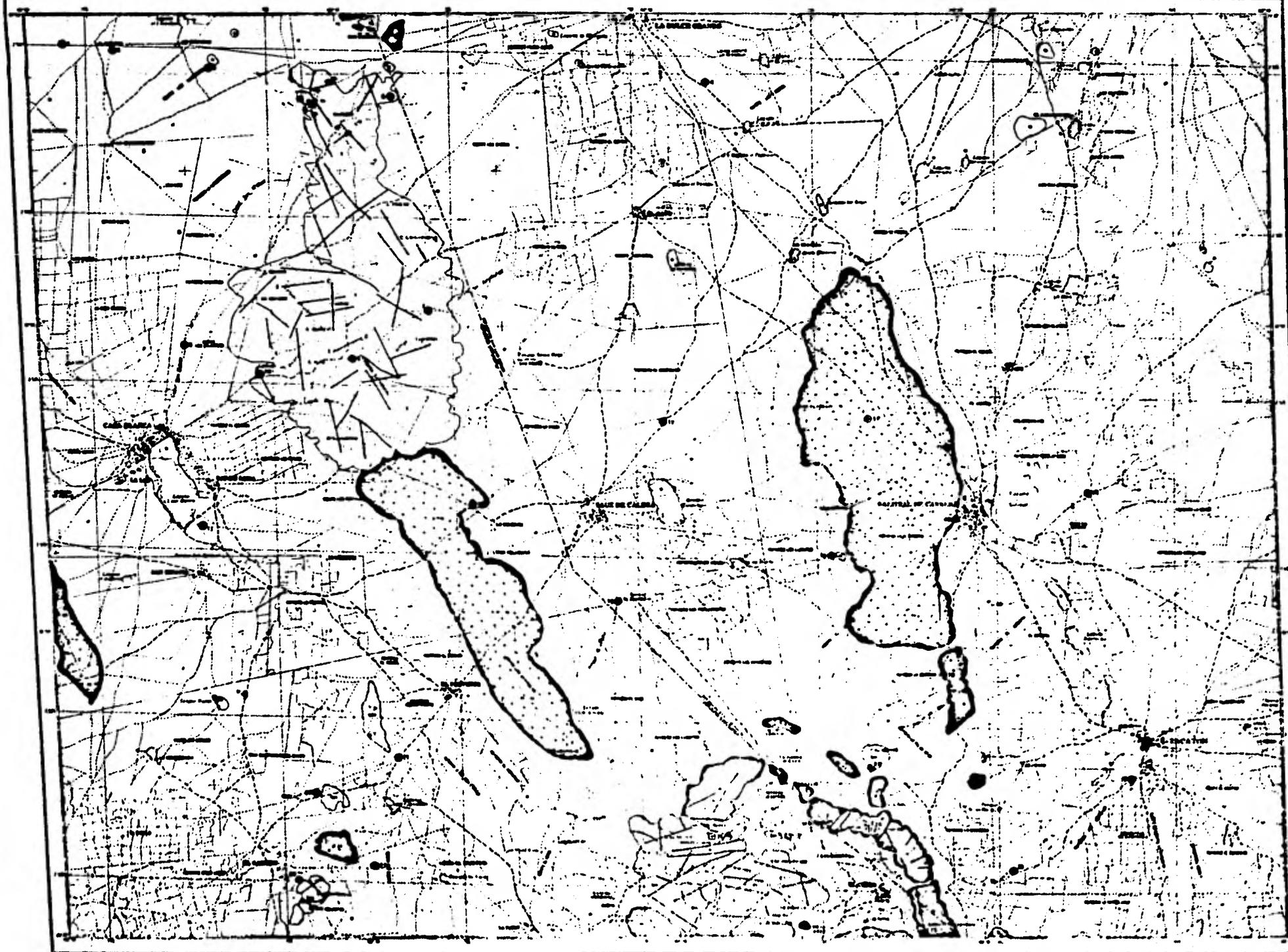
#### 4.3 Interpretación de valores radiométricos del área Zacatón.

La zona Zacatón se encuentra delimitada por la carta Degetenal "Zacatón", ubicada por las siguientes coordenadas geográficas: al Norte 23°00', al Sur 22°45', 102°20' al Oeste y 102°00' al Este, ver figura 4.3.1.

Fisiográficamente, la zona de estudio se encuentra ubicada en la Mesa Central del Norte y que junto con la Mesa Central del Sur forman las subprovincias en que se divide la Mesa Central Mexicana.

Esta provincia se encuentra limitada al N por la provincia de Sierras y Bolsones en E.U.; al W, por la Sierra Madre Occidental; al E, por la Sierra Madre Oriental y en la parte meridional al Sur de San Luis Potosí, por la Mesa Central del Sur.

La Mesa Central del Norte de México abarca las partes centrales norte de las Sierras Madres Occidental y Oriental, y consiste de grandes llanuras y bolsones o áreas en forma de cuencas cerradas, de diversas longitudes, se presenta ésta como un plano inclinado que va elevándose de N a S desde el Río Bravo hasta San Luis Potosí. Normalmente, las sierras que se encuentran en esta provincia presentan un rumbo NW - SE y están formadas en su mayoría por rocas sedimentarias con abundancia notable de calizas cretácicas.



El presente es un mapa de estudio y no debe ser utilizado para fines de navegación. Se recomienda utilizar mapas de navegación para fines de navegación.

DIRECCION DE ESTUDIOS ECONOMICOS  
COMISION DE ESTUDIOS DEL TERRITORIO NACIONAL

ZACATON F-13-B-66

En extensiones locales pueden observarse sedimentos Triásicos o Jurásicos y, en otras menos comunes, sedimentos Paleozoicos formando parte de los núcleos de las sierras.

Las rocas eruptivas o volcánicas, como andesitas y riolitas, son abundantes; así también, los basaltos.

Además, se manifiestan sierras poco sinuosas o con alturas uniformes y flancos escarpados, abruptos y surcados por barrancos con surcos en forma de V.

En la zona de estudio se presentan dos rasgos principales como son el representado por Los Cerros el Tepozan localizados al NW con una altura de 2330 mts. - S.N.M. con una orientación aproximada N -- S; en la parte Sur del área se presentan dos prominencias, una se manifiesta por el Cerro Salto el Gato y la otra por el Cerro el Tepozan, con alturas de 2600 mts. y 2450 mts. S.N.M. respectivamente.

Las elevaciones antes mencionadas están constituidas principalmente, por rocas metamórficas, rocas extrusivas de composición ácida y rocas sedimentarias calizas.

Las zonas planas que forman los valles son de rellenos aluviales y se encuentran ampliamente distribuidos en el área de estudio; las corrientes que corren

son de régimen intermitente y son las que alimentan las pequeñas lagunas distribuidas dentro del área, las alturas que presentan estos valles son de aproximadamente - 2000 mts. S.N.M.

En el lugar de estudio afloran rocas que varían en edad desde el Triásico Sup. hasta el reciente; esto se encuentra representado por rocas Metamórficas, Sedimentarias marinas y Continentales, Igneas Extrusivas, -- así como, suelos aluviales y lacustres.

Por lo que se puede observar en el campo, las rocas metamórficas son las que forman el basamento en esta zona, sobre la cual descansan en discordancia las rocas sedimentarias de la formación Cuesta del Cura, las que a su vez subyacen en discordancia a las rocas volcánicas del Terciario, las rocas sedimentarias continentales sobreyacen en discordancia a las rocas volcánicas ácidas estratigráficamente, además de que se encuentran descansando en discordancia tanto sobre las rocas metamórficas como sobre rocas sedimentarias marinas y por último suelos recientes que descansan sobre los diferentes tipos de rocas.

Las rocas más importantes desde el punto de -- vista de mineralización son las rocas metamórficas, sedimentarias marinas y las rocas volcánicas ácidas; en las rocas calcáreas se encuentran varias minas de Plomo, Plata y Zinc que actualmente se encuentran en explotación.

Las rocas metamórficas representadas en su generalidad por esquistos en los que se localizan varias minas de Antimonio.

En las rocas volcánicas ácidas se localiza una mina de fosforita.

En los caminamientos realizados en el campo se visitaron las áreas que por interpretaciones geológica-geofísica, presentaron anomalías de interés, la zona más favorable resultó ser un lugar a unos diez metros al Sur de la mina de fosforita en donde se obtuvieron valores anómalos de hasta 600 c.p.s. con respecto a un fondo tomado sobre la tendencia de 100 c.p.s.; también se visitó el área del Tepoztan al norte del poblado del Cerro en la cual se obtuvieron valores de 300 c.p.s. con respecto a un fondo de 75 c.p.s.

Las áreas restantes en las que se manifestó valores superiores al fondo o background en tres veces o más a este factor a través del análisis de los valores en los planos de iso-radas, no presentaron interés, pues se debían a cambios litológicos, efecto geométrico, valores detectados a horas tempranas en las cuales el radón aún no ha sido dispersado y, por lo tanto, incrementa nuestras mediciones, etc.

5.- Calibración de los espectrómetros de Rayos  
Gamma aéreos y terrestres.

## Calibración de los Espectrómetros de Rayos Gama aéreos y terrestres

En los últimos años se han estado incrementando programas de reconocimiento de Uranio en todo el mundo. Muchos miles de kilómetros de líneas de alta sensibilidad para espectrometría de rayos gama, se han estado volando anualmente para efectos de delinear áreas favorables en la exploración por Uranio.

En particular, el Geological Survey de Canadá ha constituido fuentes de concreto para calibración y utiliza los coeficientes de "stripping" para calibración, tal que, los conteos tomados en prospección aérea pueden ser convertidos a concentraciones de Potasio, Uranio y Torio (Grasty y Darnley 1971, Grasty) (Figs. 5.2, 5.3)

El procedimiento de calibración usando las plataformas es esencialmente el mismo que el adoptado por Adams y sus colaboradores para un laboratorio de espectrómetros de rayos gama. Las ecuaciones que relacionan los conteos corregidos en las tres ventanas K, U y T con la concentración de estos elementos  $K_{conc}$ ,  $U_{conc}$  y  $T_{conc}$  están dadas por: (Tabla 5.2)

$$T_{conc} = T/K_1 \quad (1)$$

$$U_{conc} = (U - \alpha T)/K_2 \quad (2)$$

$$K_{conc} = [K - \beta T - \gamma (U - \alpha T)] / K_3 \quad (3)$$

Donde:  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  son las tres sensibilidades medidas en términos de conteos por unidad de concentración del radio elemento respectivo. Los coeficientes de sensibilidad se obtienen de vuelos sobre pistas de calibración. Las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  son comúnmente llamadas los coeficientes de stripping. (Fig. 5.1)

Figura 5.1 Coeficientes de Striping

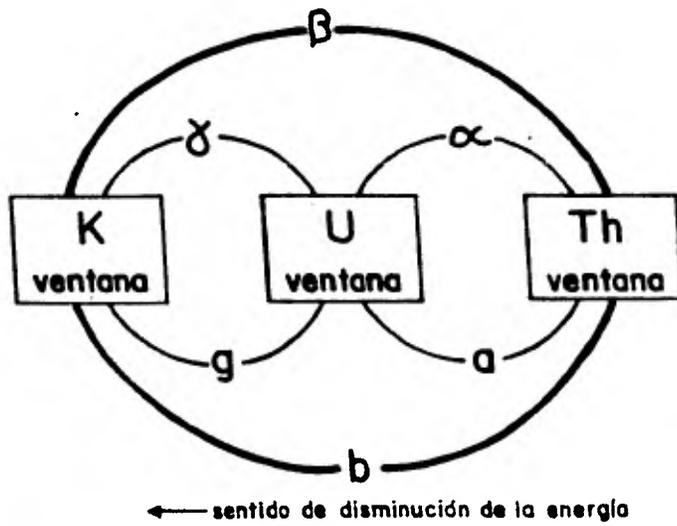


Fig 5.2 Distribución de las plataformas de calibración en Walker Field, Grand Junction, Colorado.

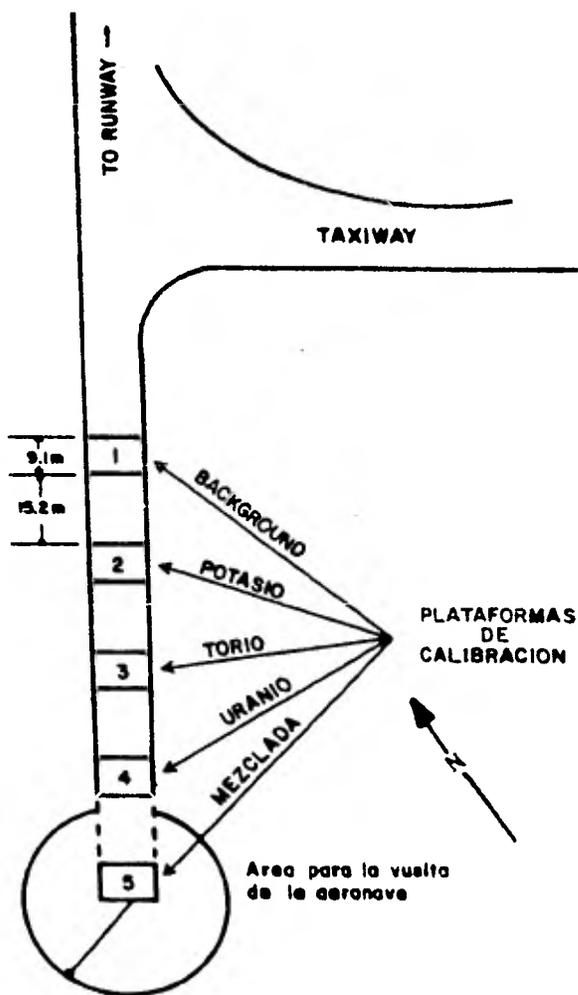
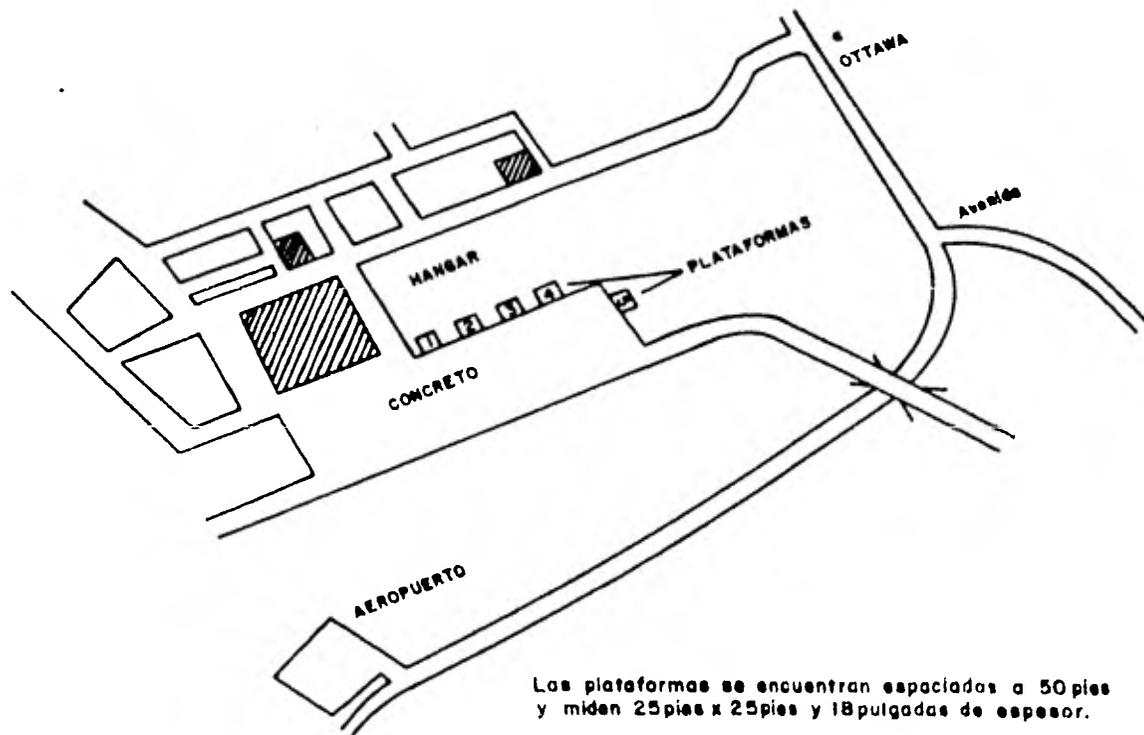


Fig. 5.3 Mapa que muestra la localización de las plataformas de calibración en Ottawa, Canadá.



**TABLA 5.2**  
**Concentraciones de las Plataformas de Calibración para Sistemas**  
**espectrométricos aéreos.**

Localización	Número de Plataformas	K% ± 1σ	eU ppm ± 1σ	eTh ppm ± 1σ
Canada <sup>1</sup> (Uplands Airport, Ottawa)	1	1.70 ± 0.08	2.4 ± 0.2	8.9 ± 0.6
	2	2.27 ± 0.10	7.3 ± 0.2	12.6 ± 0.7
	3	2.21 ± 0.08	3.0 ± 0.3	26.1 ± 0.9
	4	2.21 ± 0.01	2.9 ± 0.3	40.8 ± 1.9
	5	2.33 ± 0.09	11.7 ± 0.3	13.2 ± 0.7
		K% ± 2σ	eU ppm ± 2σ	eTh ppm ± 2σ
Estados Unidos <sup>2</sup> (Walker Field, Grand Junction)	1	1.45 ± 0.01	2.2 ± 0.1	6.3 ± 0.1
	2	5.14 ± 0.09	5.1 ± 0.3	8.5 ± 0.3
	3	2.01 ± 0.04	5.1 ± 0.2	45.3 ± 0.7
	4	2.03 ± 0.05	30.3 ± 1.6	9.2 ± 0.3
	5	4.11 ± 0.06	20.4 ± 1.3	17.5 ± 0.3
Irañ <sup>3</sup> (Tehran)	1	2.31	1.80	7.91
	2	2.23	18.84	8.79
	3	2.17	2.80	46.0
	4	2.30	9.71	19.1
	5	2.09	1.93	9.11
Lake Mead Test Range <sup>4</sup> (U.S.A.)	-	2.5	2.6	11.6
Breckenridge Test Range <sup>5</sup> (Canada)	-	2.0	0.9	7.7

<sup>1</sup> Gresty y Darnley (1971).      <sup>4</sup> Foste (1978).  
<sup>2</sup> Stromswold (1978).      <sup>5</sup> Gresty y Charbonneau (1974).  
<sup>3</sup> D. Biehn, pers. comm. (1978).

Estas ecuaciones asumen que una fuente de Uranio no tendrá ninguna contribución en la ventana de Torio y también que una fuente de Potasio no tendrá influencia, tanto en la ventana de Uranio como en la ventana de Torio. En realidad hay rayos-gama de 2.20 Mev y 2.45 Mev correspondientes al Bi-214 dentro de la cadena de decaimiento del Uranio que pertenecen a una fuente pura de Uranio y que han sido detectados en la ventana de Torio. Para la ventana de Torio con un ancho de 400 Kev y centrada en el pico de Talio a 2.61 Mev y la ventana de Uranio con un ancho de 200 Kev y centrada en el pico del Bi-214 a 1.76 Mev, aproximadamente el 5% del número de conteos detectados en la ventana de Uranio para una fuente pura de Uranio aparecerán en la ventana de Torio. En circunstancias pequeñas, esta conexión es pequeña, pero para rocas con alto cociente Uranio-Torio se pueden originar errores considerables en la estimación de la concentración de Torio.

Para espectrómetros de rayos gama que utilizan un cristal, el efecto del Potasio dentro de la ventana de Uranio puede considerarse despreciable. Para sistemas aéreos con arreglos múltiples de cristales aunando el problema de la ganancia en el detector, la resolución puede verse disminuida al grado de que algunos conteos que vengan de una fuente pura de Potasio, puedan aparecer en la ventana de Uranio. Debe notarse que normalmente los conteos de Potasio son mayores que los de Uranio, por lo tanto, un aumento por pequeño que sea en la ventana de Uranio es de importancia.

Actualmente muchos sistemas aéreos utilizan más de una ventana en las mediciones de Uranio. Poote y Humphrey (1976) usan ventanas múltiples arriba de 1.0 Mev para reducir los errores debido a un conteo pobre que ocurre cuando se utiliza solamente una ventana convencional a 1.76 Mev. Ellos reportaron un incremento en exactitud de un 10%.

Debido a que el Geological Survey de Canadá esta

ba planeando tener sistemas multicanales, los cuales, tendrían capacidad de utilizar varias ventanas para las mediciones de Uranio y en vista de las aproximaciones involucradas en el presente método de calibración, se decidió desarrollar un método general de calibración, el cual, pueda satisfacer los requerimientos de multiventanas de Uranio y Torio y que se pudiera corregir entre unas y otras ventanas.

Los conteos grabados a 0.61 Mev y 1.12 Mev de las ventanas de Bi-214 pueden sumarse a los conteos en la ventana a 1.76 Mev para dar el total de la ventana de Uranio. Para un detector fijo en una fuente, las configuraciones en cada una de las tres ventanas pueden ser linealmente relacionadas a las tres concentraciones de radioelementos. Consecuentemente, es un problema sencillo formular un conjunto general de ecuaciones que relacionen los conteos en cada ventana a concentraciones radioactivas del terreno.

Para mediciones de las plataformas de calibración, las ecuaciones son:

$$K = E_{KK} K_{\text{conc}} + E_{KU} U_{\text{conc}} + E_{KT} T_{\text{conc}} + B_K \quad \text{--- (4)}$$

$$U = E_{UK} K_{\text{conc}} + E_{UU} U_{\text{conc}} + E_{UT} T_{\text{conc}} + B_U \quad \text{---- (5)}$$

$$T = E_{TK} K_{\text{conc}} + E_{TU} U_{\text{conc}} + E_{TT} T_{\text{conc}} + B_T \quad \text{--- (6)}$$

$B_K$ ,  $B_U$  y  $B_T$  son el "background" o fondo en los conteos originados por la radioactividad del terreno que rodea las plataformas, la radioactividad del avión y el equipo más la contribución de los rayos cósmicos y la radioactividad del aire. Las  $E_{IJ}$  son las constantes a determinar y que dan el conteo en la ventana I por unidad de concentración del elemento J.

En términos más convencionales del método de calibración, las constantes  $E_{KK}$ ,  $E_{UU}$  y  $E_{TT}$  son las sensibilidades de Potasio, Uranio y Torio, equivalentes a  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$ , en las ecuaciones (3), (2) y (1). Los cocien-

tes de stripping están dados por:

$$\alpha = E_{UT} / E_{TT} \text{ - - - - - (7)}$$

$$\beta = E_{KT} / E_{TT} \text{ - - - - - (8)}$$

$$\gamma = E_{KU} / E_{UU} \text{ - - - - - (9)}$$

Debido a la interferencia entre todas las ven  
tanas, es necesario definir tres nuevas constantes:

Coef. de S.  $\alpha$  es el Torio dentro del Uranio

Coef. de S. a es el Uranio dentro del Torio

Coef. de S.  $\beta$  es el Torio dentro del Potasio

Coef. de S. b es el Potasio dentro del Torio

Coef. de S.  $\gamma$  es el Uranio dentro del Potasio

Coef. de S. g es el Potasio dentro del Uranio

Estas nuevas constantes a, b y g están dadas

Por:

$$a = E_{TU} / E_{UU} \text{ - - - - - (10)}$$

$$b = E_{TK} / E_{KK} \text{ - - - - - (11)}$$

$$g = E_{UK} / E_{KK} \text{ - - - - - (12)}$$

Ver Fig. 5.1.

Cada una de las ecuaciones (4), (5) y (6) tienen cuatro incógnitas, por lo tanto, a partir de las mediciones en las cinco plataformas de calibración, estas cuatro incógnitas pueden ser calculadas. Esto puede obtenerse utilizando la técnica de mínimos cuadrados para obtener los distintos valores  $E_{IJ}$ .

Para un sistema aéreo, las plataformas no pueden ser consideradas de tamaño infinito y consecuentemente los factores de sensibilidad no pueden ser aplicados a datos aéreos. Además de que se ha calculado a nivel del terrono, lo cual, solamente se puede aplicar a instrumentos terrestres. Para poder obtener las sensibilidades de sistemas aéreos se deben hacer vuelos sobre pistas de calibración.

Para mediciones sobre pistas de calibración, los conteos corregidos por "background" o fondo en las tres ventanas son relacionados a los conteos corregidos  $T_c$ ,  $U_c$  y  $K_c$  por las ecuaciones:

$$T = T_c + aU_c + bK_c \quad (13)$$

$$U = T_c + U_c + gK_c \quad (14)$$

$$K = T_c + U_c + K_c \quad (15)$$

Estos conteos corregidos son proporcionales a las concentraciones de la pista de calibración.

Resolviendo las ecuaciones por  $T_c$ ,  $U_c$  y  $K_c$  se obtiene:

$$T_c = \frac{T(1 - g\beta) + U(b\alpha - a) + K(ag - b)}{A} \quad (16)$$

$$U_c = \frac{T(g\beta - \alpha) + U(1 - b\beta) + K(b\alpha - g)}{A} \quad (17)$$

$$K_c = \frac{T(\beta - \beta) + U(a\beta - \beta) + K(1 - a\alpha)}{A} \quad (18)$$

donde  $A = 1 - g\beta - a(\alpha - g\beta) - b(\beta - \alpha)$

Estas ecuaciones se reducen a las ecuaciones (1), (2) y (3) cuando  $a$ ,  $b$  y  $g$  son iguales a cero.

La tabla 5.1 muestra los resultados de calibración para dos sistemas aéreos, uno con buena resolución y otro de resolución pobre. Una ventaja de este procedimiento en particular, es que el coeficiente del valor del Potasio dentro del Uranio, es un buen indicador de la resolución del sistema. Un sistema de resolución pobre, debido al detector o a cristales malos, muestra un alto coeficiente de Potasio dentro del Uranio. En particular este alto valor sugiere que el espectro para este sistema puede verse desplazado en relación a las ventanas.

**TABLA 5.1 RESULTADOS DE LA CALIBRACION.**

<u>COEFICIENTE DE CALIBRACION</u>	<u>SISTEMA CON BUENA RESOLUCION</u>	<u>SISTEMA CON POBRE RESOLUCION</u>
TORIO DENTRO DE URANIO ( $\alpha$ )	0.48	0.42
TORIO DENTRO DE POTASIO ( $\beta$ )	0.51	0.48
URANIO DENTRO DE POTASIO ( $\gamma$ )	0.97	0.95
URANIO DENTRO DE TORIO ( $\alpha$ )	0.07	0.12
POTASIO DENTRO DE URANIO ( $\theta$ )	0.03	0.40

PARA LAS SIGUIENTES VENTANAS

POTASIO	——	1.37 - 1.57 MeV
URANIO	——	1.66 - 1.86 MeV
TORIO	——	2.41 - 2.81 MeV

Debido a la dispersión en el aire de la alta energía de los rayos gama de Tl-208 a 2.61 Mev dentro de la ventana de Uranio, el valor del coeficiente de stripping debe ser ajustado para la altura particular de las mediciones aéreas como fue descrito por Grasty (1976). De manera similar, si se usan multicanales de Uranio y Torio, puede ser necesario corregir algunos de los coeficientes de calibración por la altitud del equipo aéreo.

Ejemplo de las constantes de Sensividad y -  
los cocientes de Stripping.

Valores tomados sobre las plataformas de ca-  
libración.

<u>Plataforma</u> <u>de Calibración</u>	<u>Cuentas por Minuto</u>		
	Torio Tl-208	Uranio Bi-214	Potasio K-40
<u>Background</u>	10	15	40
Th < 3ppm			
U < 1ppm			
K < 1%			
<u>Torio</u>	800	245	400
Th = 150ppm			
U < 1ppm			
K < 1%			
<u>Uranio</u>	20	2200	1100
Th < 3ppm			
U = 200ppm			
K < 1%			
<u>Potasio</u>	15	20	4000
Th < 3ppm			
U < 1ppm			
K = 7%			

Las constantes de sensibilidad relacionan el intervalo de conteo corregido en cualquier canal con la abundancia del isótopo.

Cantidad de Torio

que a caído en el canal de Uranio  $\alpha = \frac{N_u - b_u}{N_{th} - b_{th}} = \frac{245 - 15}{800 - 10} = \frac{230}{790} = .29$

Cantidad de Torio

que a caído en el canal de Potasio  $\beta = \frac{N_K - b_K}{N_{th} - b_{th}} = \frac{400 - 40}{790} = \frac{360}{790} = .46$

Cantidad de Uranio

que a caído en el canal del Potasio  $\gamma = \frac{N_K - b_K}{N_u - b_u} = \frac{1100 - 40}{2200 - 15} = \frac{1060}{2185} = .49$

Las constantes de sensibilidad serán:

$$K_1 = \frac{Th(\text{ppm})}{N_{th} - b_{th}} = \frac{150}{790} = 0.19 \frac{\text{ppm}}{\text{cuentas/min.}}$$

$$K_2 = \frac{U(\text{ppm})}{N_u - N_{th} - b_u} = \frac{200}{2200 - 29(20) - 15} = 0.10 \frac{\text{ppm}}{\text{cuentas/min.}}$$

$$K_3 = \frac{K(\%)}{N_K - N_{th} - N_u - b_K} = \frac{7}{2185} = .0028 \frac{\text{ppm}}{\text{cuentas/min.}}$$

Los coeficientes de Stripping son función del

tamaño y la geometría del detector, la geometría entre el detector y la fuente de radiación. Entonces, es necesario usar diferentes cocientes de Stripping para los distintos tamaños de los cristales.

Concentraciones de las Plataformas de Calibración  
para sistemas espectrométricos terrestres.

Localización	Núm. de Plataforma	K%	eU ppm	eTh ppm
Canada <sup>1</sup>	PK-1-OT	0.8	—	—
	PK-2-OT	1.8	—	—
	PK-3-OT	3.0	—	—
	PK-4-OT	—	10	—
Ofens (Bell's Careers)	PU-5-OT	—	45	—
	PU-6-OT	—	450	—
	PT-7-OT	—	—	8
	PT-8-OT	—	—	60
	PT-9-OT	—	—	300
	PB-10-OT	0.2	0.2	1
Canada <sup>2</sup>	PK-1-C	1.4	—	—
	PK-2-C	2.4	—	—
	PU-3-C	—	30	—
Capitari	PU-4-C	—	300	—
	PT-5-C	—	—	45
	PT-6-C	—	—	385
	PB-7-C	0.5	1	2
Diamerco <sup>3</sup>	0	1.0	0.8	2.4
	1	7.0	4.2	2.7
	2	0.8	8.3	151.
Ries	3	1.0	188.	8.
Sud Africa <sup>4</sup>	Uranio-Plataforma 1	0.29	3731	290
	Uranio-Plataforma 2	.33	2078	202
	Uranio-Plataforma 3	.29	1295	114
	Uranio-Plataforma 4	.37	458	44
	Uranio-Plataforma 5	.33	12	0.9
Potsdabe	Torio - Plataforma 1	11.66	280	12570
	Torio - Plataforma 2	11.66	102	3870
	Torio - Plataforma 3	11.66	88	3080
	Potasio-Plataforma	10.1	0.4	0.9
	C.T. Mixed Plataforma	11.2	763	4385
Sud Africa <sup>4</sup> Beaufort West	Background Plataforma	0.33	0.9	0.9
Estados Unidos <sup>5</sup>	Background	2	5	10
	Potasio	7.8	5	10
Grand Junction and Field Site (Proposed)	Uranio	2	300	10
	Torio	2	30	700
	Mix C.T.	4	350	290

<sup>1</sup>Killeen and Conway (1978).

<sup>2</sup>Richardson and Killeen (1978).

<sup>3</sup>Lovberg et al. (1978).

<sup>4</sup>Corner and Teese (1978).

<sup>5</sup>Evans (1978).

## BIBLIOGRAFIA

- |   |      |  |
|---|------|--|
| Baird G. Jon  | 1978 | Nuclear Exploration Techniques. Scintrex   |
| Bazúa Luis Felipe                                   | 1980 | Informe Sobre la Corrección en la Computadora de la Información Aeroradiométrica. (URAMEX)                           |
| Bristow Q.  | 1979 | Gamma Spectrometrics Methods in Uranium Exploration and Airborne Instrumentation. Geological Survey of Canada.       |
| Chanbornneau B. W.,<br>Grasty R. L. y<br>Bristow Q. | 1979 | Airborne Radiometrics Surveys for Uranium.   |
| García Reyes Miguel                                 | 1976 | Radioactividad y Calor en la Depresión Central del Estado de Chiapas (Chiapa de Corzo). Tesis Profesional I.P.N.     |
| Grasty R. L.  | 1978 | A General Calibration Procedure for Airborne Gamma-Ray Spectrometers.  |
| Grasty R.L.   | 1979 | Gamma Spectrometrics Methods in Uranium Exploration. Theory and Operational Procedures. Geological Survey of Canada. |
| Killeen P. G.                                       | 1979 | Gamma Ray Spectrometric Methods in Uranium Exploration. Geological Survey of Canada.                                 |

- |   |      |  |
|---|------|--|
| Kogan M. R., Nazarov<br>I. M. y Gridman D. Sh.            | 1969 | Gamma Spectrometry of<br>Natural Environments<br>and Formations. Theory<br>of the Method Applica-<br>tions to Geology and<br>Geophysics. Translated<br>from Russian. |
| Louborg L., Grasty<br>R.L. and Kirkegaard P.              | 1977 | A Guide to the Calibra-<br>tion Constants for Aerial<br>Gamma-Ray Surveys in<br>Geoexploration.  |
| Lovborg Leif,<br>Kirkegaard Peter and<br>Rose-Hansen John | 1973 | Quantitative Interpreta-<br>tion of the Gamma-Ray<br>Spectra from Geologic<br>Formations.  |
| Pitkin J. A. and<br>Joseph S. Duval                       | 1980 | Design Parameters<br>for Aerial Gamma-Ray<br>Surveys. Geological<br>Survey of Canada.  |
| Spector Allan and<br>Parker Wilf                          | 1979 | Computer Compilation and<br>Interpretation of<br>Geophysical Data.   |