

2
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

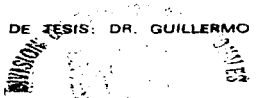
FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACION DE RADIO 226
EN ESTERILES DE URANIO POR
ESPECTROMETRIA GAMMA.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
F I S I C O
P R E S E N T A :
ARTURO ANGELES CARRANZA



DIRECTOR DE TESIS: DR. GUILLERMO ESPINOSA



FACULTAD DE CIENCIAS
REGION ESCOLAR

1997

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

M. en C. Virginia Abrin Batule
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
P r e s e n t e

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis: "Caracterización de Radio
C2a en estériles de Uranio por Espectrometría Gamma".

realizado por Arturo Angel's Carranza

con número de cuenta 7936100-5 , pasante de la carrera de Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario

DR. GUILLEPMO ESPINOSA GARCIA

Propietario

DR. MIGUEL ANGEL HERRERA ALDRADA

Propietario

FIS. JAVIER BORAU GARCIA

Suplente

M. EN C. FERMIN CASTILLO MEJIA

Suplente

DR. ARTURO DECEBRIL VILCHIS

Consejo Departamental de Estudios
DR. ROBERTO ALEJANDRO PUELAS MAJORGA

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Guillermo Espinosa G. por la sugerencia del tema y dirección de esta tesis.

A los profesores:

Dr. Miguel Angel Herrera Andrade.

Fis. Javier Borau García.

M. en C. Fermín Castillo Mejía.

y al estimado Dr. Arturo Becerril Vilchis, por su interés, valiosos comentarios y revisión de este trabajo.

A los apreciados Dr. Arturo Cervini L. y M. Gustavo Molina por su apoyo técnico, moral y humano. Así como a todos y cada uno de mis compañeros del ININ por sus sugerencias a este trabajo.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, por brindarme la ocasión de conocer el mundo de la investigación y experimentación en Física y Seguridad Radiológica.

A la facultad de Ciencias de la UNAM, y a todos los profesores de los cuales tuve oportunidad de escuchar sus interesantes cátedras.

A los Señores J.I. Goltzari, técnico en el proyecto de aplicación de Dosimetría del IFUNAM y al Sr. Alfredo Sánchez por su ayuda técnica y fotografía para la exposición del tema.

Al grupo de Servicios Auxiliares de Cómputo del IFUNAM, por su valioso apoyo y asesoría informática, especialmente al compañero y amigo C.Oscar Mendoza González, así como al Ingeniero Santiago Díaz Azuara y al C. José Juan Pliego Silva.

Dedicatoria

A mi amada esposa Ana por su paciencia y ayuda.

A mis queridos hijos Juliana y César.

Por que todo lo realizable en el futuro es por y para ellos.

A mis padres que me dieron la oportunidad de realizar mi carrera con su apoyo y cariño.

A mis hermanos, esperando que también logren sus metas inmediatas y futuras.

INDICE

INTRODUCCION.....	1.
CAPITULO I FISICA DE RADIACIONES.....	2.
1) ANTECEDENTES.....	2.
2) ASPECTOS BASICOS.....	5.
3) DESINTEGRACION RADIATIVA.....	10.
4) EL RADIO 226.....	17.
5) DEFINICIONES Y METODOS DE MEDICION.....	18.
CAPITULO II DETECCION DE LA RADIACION.....	20.
1) INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA.....	20.
2) METODOS DE DETECCION.....	25.
3) MATERIALES SEMICONDUCTORES.....	28.
4) DETECTORES SEMICONDUCTORES.....	32.
CAPITULO III ESPECTROMETRIA GAMMA.....	37.
1) GENERALIDADES Y CONCEPTOS.....	37.
2) PRINCIPIOS E INSTRUMENTACION.....	40.
3) CALIBRACION DEL SISTEMA.....	47.
4) INTERPRETACION Y ANALISIS DE ESPECTROS.....	52.
CAPITULO IV RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	55.
1) ANTECEDENTES.....	55.
2) MUESTREO Y PREPARACION DE MUESTRAS.....	57.
3) ANALISIS DEL ESPECTRO Y CARACTERIZACION DEL Ra-226.....	59.
4) ANALISIS DE RESULTADOS.....	68.
CAPITULO V CONCLUSIONES.....	70.
1) DISCUSION.....	70.
2) CONCLUSIONES.....	72.
REFERENCIAS.....	73.
APENDICE.1.....	76.

INTRODUCCION

En los procesos de producción y beneficio de minerales se obtienen grandes cantidades de materiales de desecho con altos contenidos de uranio natural. Por ello es importante, desde el punto de vista ambiental, conocer y evaluar las concentraciones de uranio y sus descendientes, especialmente el radio 226 por su alta "radiotoxicidad" (su vida media es de 1600 años). Estas características implican aspectos legales, de salud y ambientales en su manejo.

En este trabajo se presenta un método analítico para la caracterización del radio 226, su identificación por medio de su fotopico de energía y característica y cuantificación en actividad en estériles de uranio.

El método propuesto es por espectrometría gamma, en donde se propone el modelo matemático para eliminar del espectro el fotopico de uranio 235, que por su cercanía en energía (185.7 kevs), interfiere con el del radio 226 (186.2). Además de verificar mediante el plomo 214 la concentración de radio 226, pudiendo así reducir el tiempo de análisis con la consecuente reducción en costos.

Se seleccionó el procedimiento de análisis por espectrometría gamma, por presentar ventajas respecto a otros métodos analíticos, éstas ventajas son: simplicidad, rapidez en el análisis, confiabilidad en los resultados y exactitud, entre otras.

En el Capítulo I se describe brevemente la historia de la física de las radiaciones, su importancia; así como los conceptos básicos del decaimiento radiactivo, lo cual nos permite afrontar el problema planteado.

Debido a que las radiaciones ionizantes no son percibidas por los sentidos del ser humano, existen técnicas y métodos para su detección y cuantificación. El Capítulo II, describe un panorama global de dichas técnicas las cuales deben ser seleccionadas de acuerdo al tipo de radiación que se desea medir.

El Capítulo III se enfoca a la descripción de la Espectrometría Gamma, la cual fue elegida para la determinación del Ra-226 por ser éste un emisor gamma y el Radionucleido descendiente, el Plomo 214 también.

En el Capítulo IV se describen los antecedentes del problema de contaminación, como se llevo a cabo el experimento y los resultados del mismo. la discusión derivada de ellos.

Finalmente, la discusión del análisis de los resultados y las conclusiones se encuentran en el Capítulo V.

CAPITULO I

FÍSICA DE RADIACIONES.

1) ANTECEDENTES.

Hoy en día se celebra que, hace un siglo, a finales de 1895, el físico alemán Wilhelm Conrad Roentgen (Fig. 1.1) descubrió un tipo de "rayos invisibles" y penetrantes a los cuales dió el nombre de "Rayos X". Poco después del anuncio de Röntgen, el físico francés Henri Antoine Becquerel intentaba buscar alguna relación entre los "Rayos X" y una sal doble de potasio y sulfato de uranio que su padre había empleado en sus experimentos de fluorescencia. Derivado de sus trabajos, Becquerel demostró que la sal de uranio emitía radiación aún cuando no se expusiera a la luz solar (fluorescencia) y que éstos perduraban mucho tiempo. De esta manera fue como descubrió el fenómeno al que en el año de 1899 Marie Curie dió el nombre de Radiactividad ¹⁴.



Fig. 1.1 En 1895 el Físico alemán W.C. Roentgen descubrió los rayos x.

En 1899 observaron casi simultáneamente Becquerel (Figura 1.2) en Francia, y S. Meyer, von Schweidler y G. Gisel en Alemania, que las emisiones de ciertas sustancias radiactivas podían desviarse en un campo magnético en la misma dirección que los rayos catódicos, lo que demostraba que cuando menos una parte de las radiaciones consistía de partículas cargadas negativamente. Al mismo tiempo Ernest Rutherford en Inglaterra estudiaba la propiedad de penetración de las radiaciones en diversos materiales. Rutherford concluyó que las radiaciones emitidas por un compuesto de uranio eran de dos tipos: las primeras, a las que Rutherford llamó

radiación "alfa" (α), sólo penetraban una fracción de milímetro en la lámina de aluminio, en tanto que las segundas, que llamó radiación "beta" (β), requerían una lámina de mayor espesor (cm) para absorberles completamente ^{7,18,21}.



Fig. 1.2. Henry Becquerel en 1899 observó junto con otros, la naturaleza de las radiaciones.

En 1900 Marie y Pierre Curie (Figura 1.3) confirmaron el hecho de que los llamados rayos beta estaban asociados con cargas negativas. En experimentos posteriores demostraron que los rayos beta, al igual que los rayos catódicos consistían de electrones, por tanto un rayo beta era similar al electrón.

Un año antes el matrimonio Curie había comunicado al mundo científico el descubrimiento de dos nuevos elementos, ambos radiactivos: el radio y el polonio.

Por otro lado R. J. Strutt entre otros al notar la fuerte ionización que la radiación alfa producía, pensaron que quizás consistía de partículas con carga positiva de masa relativamente grande. Esto lo pudo confirmar Rutherford cuando logró desviar rayos alfa en un campo magnético muy intenso en sentido opuesto a la desviación de los rayos beta ^{22,17}.

En 1909 Rutherford y T. Royds concluyeron después de múltiples experimentos que la radiación alfa era similar a partículas de helio con doble carga positiva.



Fig. 1.3. Madam Curie. El matrimonio Curie descubrió el elemento radiactivo radio en 1899¹⁴.

En 1900 P. Villard de Francia, descubrió un tercer tipo de radiación que no se desviaba en un campo magnético, pero que sin embargo tenía gran poder de penetración y producía un efecto marcado en las placas fotográficas, a estas radiaciones se les conoce actualmente como radiación "Gamma" (γ)^{14,15}.

Al principio, la naturaleza de la radiación gama fue motivo de controversia. F. Paschen y W. H. Bragg pensaron que se trataba de partículas muy veloces, en tanto que C. G. Barkla y Rutherford, opinaban que eran radiaciones similares a los rayos X. Esto lo demostraron Rutherford y A. N. da C. Andrade en 1914, al desviar dichas radiaciones en un cristal adecuado, por lo que concluyeron que la radiación gamma era de naturaleza electromagnética similar a los rayos X pero de longitud de onda más corta.

En 1930 W. Bethe y H. Becker, en Alemania reportaron que al exponer la radiación del polonio a ciertos elementos ligeros (principalmente el Berilio), se obtenía una radiación de altísima penetración. En 1932 I. Joliot Curie y F. Joliot, descubrieron que cuando dichas radiaciones "penetrantes" se hacían incidir en material conteniendo hidrógeno (especialmente parafina), se producían protones los cuales eran "lanzados" a una gran velocidad. Los Joliot pensaron en ese momento que se trataba de radiación gamma mucho más penetrante que la conocida.

Fue en el año de 1932, cuando el inglés James Chadwick enunció que se podía tratar de partículas con masa similar a la del protón pero con carga eléctrica neutra, lo cual era consistente con algunos resultados experimentales que no se podían explicar de otra manera. En los años siguientes se confirmó la existencia de tales partículas, las cuales son conocidas actualmente como neutrones y que como ahora se sabe, forman parte de la estructura del núcleo atómico¹⁶.

2. ASPECTOS BASICOS.

A) Estructura del Atomo.

Derivado de los trabajos de Thomsom, Rutherford, Borh, Sommerfeld y otros sobre la estructura atómica, ahora se conocen razonablemente bien los fenómenos de la física atómica y las propiedades del núcleo entre otras. El modelo atómico simple supone la existencia de un "centro" llamado núcleo compuesto por protones y neutrones, llamados nucleones y una "nube" de electrones que se mueve alrededor del núcleo en órbitas definidas (figura 1.4.). Cada órbita contiene un cierto número de electrones y representa un nivel definido de energía donde el traslado de los electrones de un órbita a otra involucra cambios en ésta.

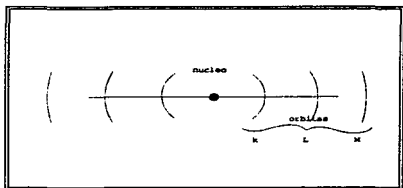


Fig 1.4. El átomo está constituido por un núcleo con protones y neutrones, y una nube de electrones distribuidos en órbitas a su alrededor.

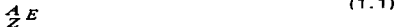
Por otro lado, los nucleones ocupan un volumen cuyas dimensiones son del orden de 10^{-14} m, en el "centro" del átomo. Cada nucleón tiene la misma masa que es de 1 u.m.a. (unidad de masa atómica = 1.6603×10^{-24} g) mientras que la masa del electrón es de solamente 0.00055 u.m.a.. Prácticamente toda la masa del átomo está concentrada en el núcleo²⁰.

Debido a que en un átomo los electrones tienen carga eléctrica negativa y el núcleo positiva, el movimiento electrónico se puede explicar en función de interacciones electromagnéticas entre los electrones y el núcleo. Pero en el núcleo que está constituido por neutrones con carga neutra y protones con carga positiva, la estabilidad no se puede atribuir a la atracción eléctrica, sino que parecería que la repulsión eléctrica entre los protones haría deshacer el núcleo.

El hecho de que el núcleo esté compuesto por neutrones y protones indica la presencia de otro tipo de interacción además de la electromagnética, que es mas intensa que la anterior y que se denomina "interacción nuclear" o "fuerte" y es la responsable de la unión de los nucleones y por tanto de la existencia del núcleo.

Un núcleo se identifica por el número de protones (número atómico Z) y el número total de nucleones que tiene (número másico A), por lo que el número de neutrones $N = A - Z$.

Dos núcleos que tengan el mismo Z y N se dice que pertenecen al mismo nucleido. Un nucleido se representa con el símbolo del elemento químico (E) al cual pertenece (según su Z), un superíndice a la izquierda que indica el valor del número másico (A) y a veces se escribe explícitamente el número atómico Z , escribiéndose como un subíndice del lado izquierdo de la siguiente manera:



La fuerza nuclear no requiere de una proporción fija de protones y neutrones en el núcleo. Aunque solo hay 92 elementos químicos naturales, hay del orden de 1440 nucleidos conocidos, de los cuales aproximadamente 340 existen en la naturaleza y alrededor de 1100 han sido producidos artificialmente. En los núcleos livianos los protones y neutrones tienen aproximadamente igual número ($Z \sim N$), pero en los núcleos más pesados el número de neutrones excede al de protones. Debe haber un exceso de neutrones para producir un efecto estabilizador, los cuales compensan el efecto de la repulsión coulombiana que tiende a romper el núcleo³.

Alrededor de 280 nucleidos son estables, pero la mayoría tiene una combinación de neutrones y protones que no los lleva a una condición de estabilidad; éstos se denominan inestables o radiactivos, (figura 1.5).

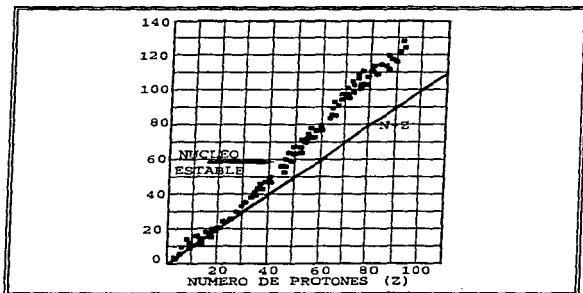


Fig. 1.5 La mayoría de los núcleos conocidos tienen una combinación de nucleones que los hace inestables. Los núcleos con $Z > 83$, $N > 126$ y $A > 209$ son inestables.

B) Radiación Nuclear.

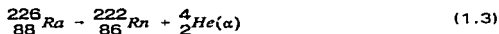
Un núcleo inestable adquiere estabilidad cuando experimenta una reordenación aleatoria, durante la cual se emiten partículas o radiación electromagnética, fenómeno conocido como decaimiento radiactivo.

Existen básicamente tres tipos de decaimiento radiactivo natural, que son alfa, beta y gamma:

-La desintegración alfa consiste en la emisión de una partícula compuesta de dos neutrones y dos protones. El núcleo residual tiene un número atómico dos unidades menor y un número de masa cuatro unidades menor que el núcleo originario, esto se representa de la siguiente manera; sea X el núcleo original y Y el resultante:



Un ejemplo de éste tipo de desintegración lo constituye el Radio-226, el cual emite una partícula alfa y se transforma en Rn-222 de la siguiente manera:



La mayoría de los emisores de partículas alfa son núcleos pesados, es decir casi todos los núcleos con $A > 150$ son emisores de partículas alfa.

La desintegración beta se divide en decaimiento beta menos y beta más. La primera consiste en la emisión de una partícula beta (β^-); y la transformación del núcleo original a un núcleo residual con el mismo número másico pero número atómico una unidad mayor que el original, es decir aparece un neutrón reemplazado por un protón para que se conserve la carga. El proceso se puede representar como:



En el segundo caso un núcleo con deficit de neutrones se transforma mediante el siguiente mecanismo: un protón se transforma en un neutrón, emitiendo una partícula de masa igual a la del electrón pero con carga positiva llamada positrón (β^+); esta "reacción" puede expresarse como:

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + \beta^- \quad (1.5)$$

-Decaimiento gamma.-En el caso de la desintegración alfa y/o beta, el núcleo puede haber quedado en un estado "excitado"; en este último caso el proceso es seguido por emisión de radiación electromagnética de energía/s definidas, esta es la emisión gamma.

En el proceso denominado transición isomérica, el núcleo tiene un estado metaestable con un período definido y "regresa" a un nivel energético menor con emisión de radiación gamma.

Otro proceso de desintegración que se observa en los núcleos con deficiencia de neutrones, es la captura electrónica, en este caso el núcleo capta un electrón de las órbitas electrónicas interiores, generalmente de la capa K (fig.1.4). Por lo general, esta órbita vacante es llenada por un electrón de una de las capas exteriores, dando lugar a la emisión de rayos X¹⁴.

En algunas transiciones isoméricas un núcleo excitado no emite radiación gama, si no que se deshace del exceso de energía expulsando un electrón orbital de la capa K. Este proceso se conoce como conversión interna, sólo una fracción de las transiciones isoméricas se realizan por conversión interna.

Se resumen en la tabla 1.1. los procesos mas comunes de desintegración.

Proceso	Radiación			Efecto sobre el Núcleo	
	Tipo	Carga	mmasa (uma)	Carga	Masa (A) (uma)
Emisión alfa	partícula alfa	+ 2	4	-2	-4
Emisión beta	partícula beta menos	-1	0.0005	+1	0
	partícula beta mas	+ 1	0.0005	-1	0
Emisión gamma	Rayos gamma	0	0	0	0
Captura electrónica	Rayos X	0	0	-1	0

Tabla 1.1. Características de los principales procesos de desintegración radiactiva.

C) Velocidad de Desintegración.

La probabilidad de que un átomo radiactivo en particular se desintegre en la unidad de tiempo, es independiente tanto del destino de los átomos que lo rodean, como de su estado químico y de las condiciones físicas. Es por lo tanto un hecho gobernado exclusivamente por las leyes del azar, pudiendo ser por esto, tratado con métodos estadísticos.

Así, todo núcleo inestable de un nucleido dado tiene la misma probabilidad, por unidad de tiempo de desintegrarse. Esta probabilidad recibe el nombre de "Constante de Desintegración" λ .

Si en el instante t_0 existen N átomos radiactivos y al cabo de un lapso ($t_0 + dt$) se han desintegrado dN , entonces:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.6)$$

Esta es la ecuación fundamental del fenómeno de desintegración radiactiva. dN/dt es la velocidad de desintegración, comúnmente llamada **ACTIVIDAD** ⁹.

Una manera de representar el fenómeno de decaimiento radiactivo, es mediante los llamados esquemas de decaimiento. En ellos las líneas horizontales representan estados energéticos, las inclinadas con flecha hacia la derecha significan ganancia de carga positiva (emisión β^-) y hacia la izquierda pérdida de carga positiva (emisión α o emisión β^+). Las líneas verticales significan emisión de radiación gamma cuyo valor es la diferencia de los estados energéticos.

En la figura 1.6 se ilustran dos esquemas de decaimiento:

El Hierro-20 decae emitiendo una partícula β^- de 5.41 MeV de energía (máxima) y una gamma de 1.63 MeV convirtiéndose en Neón 20.

El Oxígeno-14 emite 2 partículas β^+ con energías (máximas) de 1.84 MeV en el 99 % de los casos (probabilidad de emisión) y de 4.1 MeV en el resto. En el primer caso queda en un estado excitado del Nitrógeno-14 que emite una gamma de 2.3 MeV (con la misma probabilidad de la emisión beta que le llevó a ese estado energético) de energía para llegar al estado energético mas bajo del mismo.

Cada núcleo puede desintegrarse en una forma definida. Los esquemas de desintegración o decaimiento son una media estadística y son constantes para cada nucleido en particular ^{17,19}.

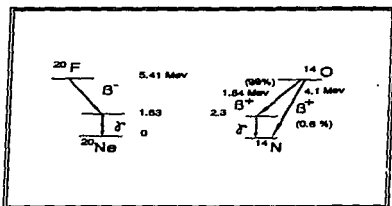


Fig.1.6. Esquema de decaimiento del Hierro-20 (emisor β^-) y del Oxígeno-14 (emisor β^+).

3. DESINTEGRACION RADIATIVA.

A) Ley de Decaimiento Radiactivo.

Si se integra la ecuación fundamental de la desintegración radiactiva para $N = N_0$ en el instante $t=0$, resulta:

$$N = N_0 \text{ EXP}(-\lambda t) \quad (1.7)$$

donde N = número de núcleos radiactivos.

N_0 = número de núcleos radiactivos iniciales.

λ = constante de desintegración.

t = tiempo.

como la actividad (A) es igual a dN/dt , y dN/dt es proporcional a N , se puede escribir la expresión anterior en la forma:

$$A = A_0 \text{ EXP}(-\lambda t) \quad (1.8)$$

que es la Ley de la desintegración radiactiva.

Representando A/A_0 en función de t , se obtiene la curva de desintegración del nucleido dado, en la cual se muestra su comportamiento exponencial negativo (fig. 1.7).

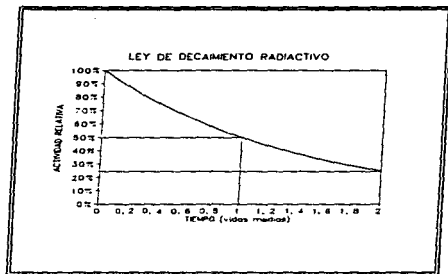


Fig. 1.7. La actividad de un radionucleido decrece en función a una exponencial negativa.

Si se reemplaza $A_0/2$ (que es la mitad de la actividad original) en lugar de A_0 en la ecuación 1.8, se tiene que:

$$\frac{A_0}{2} = A_0 \text{ EXP}(-\lambda t) \quad (1.9)$$

de donde

$$t = \ln\left(\frac{2}{\lambda}\right) = \frac{0.693}{\lambda} \quad (1.10)$$

este valor de tiempo t se denomina vida media y se denota como $T_{1/2}$.
de donde :

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} \quad (1.11)$$

B) Radiactividad y Cadenas Radiactivas Naturales.

Cerca de un tercio de 90 elementos²² que existen en la tierra tienen algún isótopo radiactivo, los cuales existen por diferentes razones:

La tierra es bombardeada constantemente por radiación cósmica la cual interacciona con la atmósfera y los elementos que la constituyen produciendo radionucleidos como el tritio (H-3) y el carbono 14 (C-14)²².

Algunos otros de vida media muy larga (del orden de 10^8 años) forman parte de la mezcla isotópica desde el origen del universo, como el K-40 y el Rb-87.

Número de masa	Serie	Padre	Vida media (en años)	Producto Final estable
4n	Torio	$^{232}_{90}\text{Th}$	1.39×10^{10}	$^{208}_{82}\text{Pb}$
4n + 1	Neptunio	$^{237}_{93}\text{Np}$	2.25×10^6	$^{209}_{83}\text{Bi}$
4n + 2	Uranio	$^{238}_{92}\text{U}$	4.51×10^9	$^{206}_{82}\text{Pb}$
4n + 3	Actinio	$^{235}_{92}\text{U}$	7.07×10^8	$^{207}_{82}\text{Pb}$

Tabla 1.2. Características principales de las series radiactivas naturales

Una parte de los elementos radiactivos encontrados en la naturaleza son miembros de cuatro series radiactivas. Cada serie está formada por una sucesión de productos que proceden, en último término de, un solo nucleído. Los nucleídos cuyos números de masa están dados por $A = 4n$, con n un número entero, se pueden desintegrar unos en otros disminuyendo el orden del número de masa. Los nucleídos radiactivos cuyos números de masa obedecen la expresión anterior se dice que son miembros de la serie $4n$ (serie del Thorio, figura 1.7). Los miembros de la serie $4n + 1$ (serie del neptunio, figura 1.8) tienen números de masa dados por $A = 4n + 1$, y los de las series $4n + 2$ y $4n + 3$ están especificados respectivamente por $A = 4n + 2$ (serie del uranio, figura 1.9) y $A = 4n + 3$ (serie del actinio).

Se muestra en la tabla 1.2. algunas características de dichas series radiactivas, sus núcleos originales, vida media y los núcleos finales de la serie.

La vida media del neptunio es tan corta comparada con la edad calculada del universo ($\sim 10^{10}$ años), que los miembros de esta serie no se encuentran actualmente en la naturaleza, aunque se han producido en el laboratorio mediante bombardeo con neutrones ⁸.

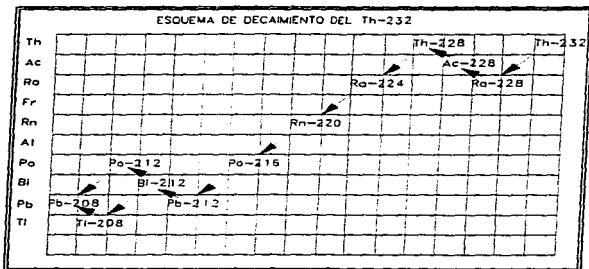


Fig.1.8. La Serie de decaimiento del Thorio la encabeza el Th-232 que tiene una vida media de 1.4×10^{10} años

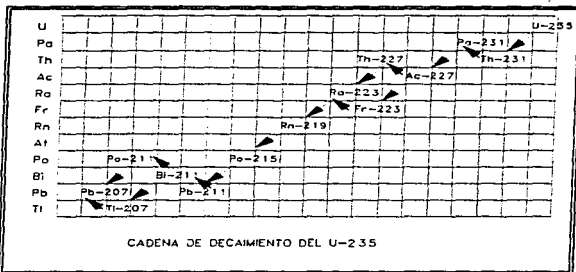


Fig.1.9. La Serie de decaimiento del Actinio la encabeza el U-235 que tiene una vida media de 7×10^8 años.

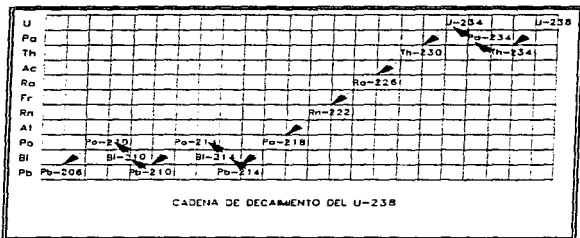


Fig.1.10. La Serie de decaimiento del Uranio la encabeza el Uranio 238 que tiene una vida media de 4.4×10^9 años. El Radio 226 forma parte de esta cadena radiactiva.

C) Crecimiento Radiactivo.

Cuando un conjunto de núcleos radiactivos N_1 , decaen en otro nucleido el cual es también radiactivo, la velocidad de formación del nucleido descendiente es igual (pero inversa) a la velocidad con la que decae el nucleido padre, que también decae con su propia constante de decaimiento. La expresión que nos relaciona el número de nucleos N_2 del nucleido descendiente en función del tiempo es ¹⁸:

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} (\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)) - N_{20} \exp(-\lambda_2 t) \quad 1.12$$

donde:

t = tiempo.

N_{10} = número de nucleos radiactivos del nucleido padre en el tiempo inicial $t = t_0$;

λ_1 = constante de decaimiento del nucleido padre.

λ_2 = constante de decaimiento del nucleido hijo.

N_{20} = número de nucleos radiactivos del nucleido hijo en el tiempo inicial $t = t_0$.

Cuando la vida media del padre es un "poco mayor" que la del hijo, es decir $\lambda_1 < \lambda_2$, para valores relativamente grandes de t , el segundo término exponencial se hace despreciable, y entonces, la ecuación 1.11 se convierte (para $N_{20} = 0$) en :

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} N_{10} (\exp(-\lambda_1 t)) = N_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad 1.13$$

Es decir que en estas condiciones el nucleido hijo decrecerá proporcionalmente a como decrece el padre. Dicha condición se conoce como equilibrio transitorio, y se muestra como ejemplo (figura 1.11) para el Th-227 (18.9 días) el cual genera al Ra-223 (con vida media de 11.2 días).

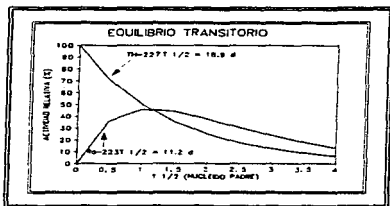


Fig. 1.11. Equilibrio transitorio entre el Th-227 y el Ra-223.

Cuando la vida media del padre es mucho mas grande que la del hijo, entonces la exponencial de $-\lambda_1$, es igual a 1; por otro lado λ_1 es muy pequeña comparada con λ_2 por lo que la diferencia $\lambda_2 - \lambda_1$ es prácticamente λ_2 y entonces la ecuación 1.11 se convierte en:

$$N_2 = N_{10} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad 1.14$$

El nucleido hijo crece hasta que iguala la actividad del padre la cual prácticamente se considera constante; esta condición se denomina equilibrio secular y se ilustra en la figura (1.12) para el Radio 226 (vida media de 1600 años) que decae en Rn-222 (con vida media de 3.18 días) ²².

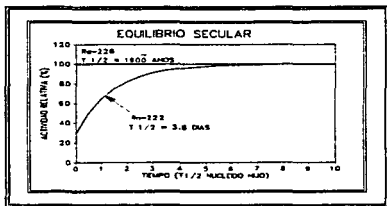


Fig. 1.12. El Rn-222 llega al equilibrio con el Radio 226 en un tiempo aproximado de 20 días.

Finalmente, cuando la vida media del hijo es más grande que la del padre, el radionucleido hijo llega a un máximo y entonces decae conforme a su propia vida media característica mientras que el padre se extingue mas rápidamente. En este caso nunca se llega al equilibrio, condición que se ilustra en la figura 1.13 para el Polonio 218 (vida media de 3.05 minutos) con su hijo el Plomo 214 (con vida media de 26.8 minutos).

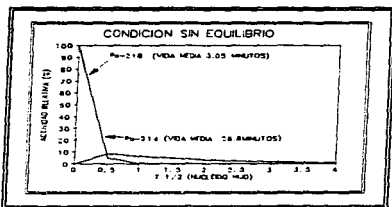


figura 1.13. Cuando la vida media del hijo es más grande que la del padre nunca se tiene equilibrio.

4. EL RADIO 226.

El radio fue descubierto poco después del polonio por los Curie a finales del siglo XIX., se encuentra en todos los minerales de uranio y diluido en aguas naturales; se estima que en los océanos hay 20000 toneladas⁴.

Es el elemento número 88 de la tabla periódica, pertenece al grupo II A, de los metales alcalino térreos. Se conocen aproximadamente 25 isótopos del radio, pero los más abundantes son el Radio-226 y el Radio-228.

Separado por medios químicos, el radio fue usado principalmente en medicina (hoy en día no se usa tan frecuentemente por recomendación del Comité Internacional de Protección Radiológica ICRP), para el tratamiento de cáncer. También se empleó en radiografía industrial y con él se preparaban pinturas luminosas en combinación con materiales "centelladores o luminiscentes", entre muchas otras aplicaciones comerciales²⁸.

Ninguno de los isótopos del radio es estable. Aunque el Ra-223, Ra-224 y Ra-228 se usaron como "trazadores", el Ra-226 fue el más empleado y se le considera por su vida media tan larga y tipo de emisión radiactiva como el más "peligroso" (radiotóxico) para la salud²⁸.

Por sus múltiples usos el Ra-226 fue por mucho tiempo extraído y separado de los minerales de uranio como producto principal, mientras que en épocas más recientes debido a las aplicaciones del uranio, el radio ha sido subproducto residual que ya ni siquiera se separa.

El radio 226 es el sexto nucleido de la cadena radiactiva que encabeza el U-238, decae por emisión alfa a radón 222 pasando del estado sólido a gaseoso (el radón es un gas noble). Debido a la vida media tan grande del Ra-226 (1600 años) comparada con la del Radón-222, si están confinados se encuentran en equilibrio

secular. Pero debido al estado gaseoso del radón, éste muchas veces se escapa del medio rompiéndose el equilibrio.
 Las características físicas más importantes del radio 226 se listan en la tabla 1.3.

Ra-226	
Número atómico:	88
Peso del elemento:	226.05
Vida media 1600:	años.
Radionucleido hijo:	Rn-222
Emisiones alfa:	4.78 MeV : 94.5 %; 4.60 MeV : 5.55%; 4.31 MeV : 0.0078%
Emisiones beta:	0.0878 MeV : 0.63 %; 0.087 MeV : 0.9 %; 0.0627 MeV : 0.63; 0.168 MeV : 1.2%; 0.18 MeV : 0.0031; 0.185 MeV : 0.1112
Emisiones gamma	0.1862 MeV : 3.28 %; 0.0117 MeV : 0.8%; 0.81 MeV : 0.18%; 0.0837 MeV : 0.29%; 0.0949 MeV : 0.1%; 0.309 MeV : 0.0067%

Tabla 1.3. Características físico-químicas del radio-226.

5. DEFINICIONES Y MÉTODOS DE MEDICIÓN.

A) Definiciones y Unidades.

A continuación se enumeran conceptos y definiciones frecuentemente empleados en física y en este tipo de trabajos.

a) Definiciones:

Número de masa (A). Es la suma del número de protones y neutrones en el núcleo.

Número Atómico (Z). Es el número de protones en el núcleo.

Nucleido. Es un átomo con características nucleares particulares.

Radionucleido. Es un nucleido no estable que emite radiación ionizante.

Isótopo. Serie de nucleidos que tienen el mismo valor de Z pero diferentes valores de A.

Constante de desintegración (λ). Es la probabilidad que tiene un núcleo inestable de desintegrarse y es particular para cada radionucleido.

Actividad. Es el número de desintegraciones de un nucleido radiactivo por unidad de tiempo.

Vida Media ($T_{1/2}$) . Tiempo en el cual la actividad o número de núcleos radiactivos llegan a la mitad.

Porcentaje de emisión gamma (%). Número de emisiones gamma promedio de una energía particular emitidas por cada 100 desintegraciones para cualquier radionucleido particular.

b) Unidades.

Unidad de masa atómica U.M.A.-Se define como un $\frac{1}{16}$ de la masa del átomo de oxígeno 16 igual a 1.6603×10^{-24} gramos.

Electrón-volt (eV). Se define como la energía adquirida por un electrón al atravesar un campo eléctrico generado por una diferencia de potencial de un volt. $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ Joules.

Becquerel (Bq). Unidad de actividad igual a una desintegración por segundo. La unidad en desuso de la actividad es el Curie (Ci) equivalente a 3.7×10^{10} Bq.

c) Medición de la Radiación.

Debido a que las radiaciones no se pueden percibir con nuestros sentidos, se han desarrollado métodos para su detección, los cuales se basan en la interacción de la radiación con la materia siendo temas fundamentales para la realización de este trabajo, dichos métodos e interacciones serán mas ampliamente explicados en el siguiente capítulo .

CAPITULO II

DETECCION DE LA RADIACION.

1) INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA.

La construcción de detectores de radiación se basa en el conocimiento de los mecanismos fundamentales mediante los cuales dichas radiaciones interactúan y pierden su energía en la materia.

Tomando en cuenta la naturaleza de las tres formas de radiación mencionadas (alfa, beta y gama), éstas se pueden dividir en dos grupos: las partículas cargadas (alfa y beta) y las radiaciones sin carga eléctrica (por ejemplo la radiación gama).

A) Interacción de Partículas Cargadas.

Cuando una partícula cargada pasa cerca de un átomo, las fuerzas electrostáticas actúan entre ella y los electrones orbitales. Si pasa suficientemente cerca, puede resultar que uno de los electrones adquiera la energía suficiente para separarse del átomo, este proceso es el de ionización. El átomo, al perder un electrón, queda cargado positivamente y forma junto con el electrón, un par de iones.

Cuando la energía de la partícula cargada es insuficiente para arrancar el electrón, pero es suficiente para alcanzar una energía mayor dentro del átomo, éste átomo "excitado" vuelve a su estado normal, emitiendo generalmente fotones.

Si una partícula con cierta energía atraviesa un medio dado, la longitud del recorrido dependerá de la energía inicial y de la velocidad con que esa energía se pierde por unidad de recorrido. Este último factor se conoce como "ionización específica", que se mide en pares de iones por centímetro recorrido. Es aproximadamente de 4×10^4 para las partículas alfa y de 50 para partículas beta (Mientras mayor es la energía, serán producidos un mayor número de pares de iones totales pero, la ionización específica es la misma)^{2,6}.

Para las partículas alfa, dada su alta ionización específica, la distancia recorrida en un medio dado es pequeña. En aire, una partícula alfa de 3 Mev tiene un alcance promedio² de 1.6 cm.

A diferencia de las partículas alfa que tienen una energía definida, las beta pueden tener cualquier energía hasta un cierto máximo, determinado por la energía equivalente al cambio de masa que se opera durante la reacción nuclear.

Una partícula beta abandona el núcleo con una velocidad aproximadamente igual a la de la luz. Si pasa cerca de los electrones de un átomo, será desviada perdiendo energía. Cuanto mayor es el número de átomos que se encuentra, tanto más rápidamente perderá su energía, hasta ser capturada por un átomo.

Como la absorción de partículas beta depende básicamente del número de electrones que se encuentran en su camino, para materiales absorbentes de número atómico bajo será aproximadamente proporcional al peso por unidad de área o densidad superficial. La cantidad de material necesaria para detener las partículas beta depende de su energía y se llama alcance. Por ejemplo, se requieren aproximadamente 6.5 mm de aluminio para detener una partícula beta de una energía de 3 MeV y su alcance es entonces 1500 mg/cm² (las partículas alfa de la misma energía son frenadas por 0.015 mm de aluminio) *.

B) Interacción de radiación Gamma y X con la materia.

Aunque son conocidos un gran número de posibles mecanismos para rayos gamma con la materia, únicamente 3 de ellos son los que juegan un papel importante en la medición de la radiación: el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la producción de pares.

a) El Efecto Fotoeléctrico.

A finales del siglo XIX, algunos experimentos demostraron que la superficie de un metal emite electrones cuando incide sobre él luz de frecuencia relativamente "alta", este fenómeno se conoce como "Efecto Fotoeléctrico" (Fig. 2.1).

Uno de los aspectos del efecto fotoeléctrico que mayor confusión creó en sus descubridores, fue el que la distribución de la energía en los electrones emitidos es independiente de la intensidad y dependiente de la frecuencia de la luz, lo cual contradecía la teoría ondulatoria de la luz.

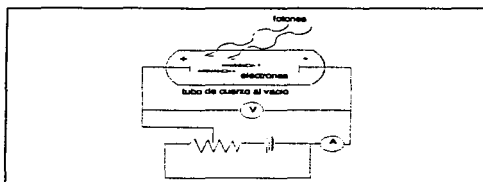


Fig.2.1 Observación experimental del efecto fotoeléctrico

En 1905 Albert Einstein encontró que la paradoja del efecto fotoeléctrico con la teoría electromagnética podía resolverse si se tomaba en cuenta una idea propuesta en 1900 por el físico alemán Max Planck. Planck intentó explicar las características de la radiación que emiten los cuerpos a temperaturas suficientemente elevadas como para ser luminosas. Planck supuso que la radiación se emitía discontinuamente como pequeños paquetes de energía denominados "cuantos". Planck descubrió que todos los cuantos asociados a una frecuencia determinada ν , tienen la misma energía y que esta energía, es directamente proporcional a dicha ν es decir $E = h\nu$ donde h es la constante de Planck y tiene el valor:

$$h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Einstein propuso que la luz no solamente se emitía en forma de cuantos, si no que también se propagaba como cuantos individuales. De acuerdo con esta hipótesis el efecto fotoeléctrico se puede explicar de la manera siguiente:

Un fotón interacciona con un átomo absorbedor con lo cual el fotón desaparece completamente; en su lugar es emitido un "fotoelectrón" del átomo de sus capas mas externas. La interacción se lleva a cabo con el átomo en conjunto y no se puede realizar con un electrón libre. Para rayos gama de suficiente energía, el origen mas probable de los fotoelectrones es la capa mas interna del átomo. El fotoelectrón aparece con una energía:

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

donde E_b representa la energía de amarre del electrón en su capa original.

Además de los fotoelectrones, la interacción también crea un átomo absorbedor ionizado con una vacante en una de sus capas. Esta vacancia es rápidamente llenada por la captura de un electrón libre del medio o mediante el reordenamiento de electrones de otras capas del átomo. Por lo tanto uno o mas fotones de rayos X característicos pueden también ser generados.

El efecto fotoeléctrico es el modo predominante de interacción para rayos gama de relativa baja energía. Una expresión aproximada de la probabilidad de la absorción fotoeléctrica τ por átomo en función de la energía E y el número atómico Z del absorbedor es:

$$\tau = K \frac{Z^n}{E^{3.5}} \quad (2.2)$$

con K = constante y el exponente n varía entre 4 y 5 en función de la energía de la radiación gama.

b) Efecto Compton.

La teoría cuántica de la luz predice que los fotones se comportan como partículas excepto en que su masa en reposo es cero.

Tomando en cuenta lo anterior se puede representar un choque entre un fotón y un electrón como en la mecánica clásica.

Al chocar el fotón con el electrón, éste se dispersa cambiando su dirección original en un ángulo Φ mientras que el electrón adquiere una parte de la energía del fotón original $h\nu$ (Figura 2.2). Debido a que todos los ángulos del fotón son probables, la energía transferida al electrón puede variar desde cero hasta una fracción "grande" de la energía del fotón.

La expresión que relaciona la energía transferida y el ángulo para cada interacción puede ser derivada de las expresiones para la conservación de la energía y el momentum.

De esta manera se puede demostrar que la energía del fotón dispersado $h\nu'$ es :

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos\phi)} \quad (2.3)$$

donde m_0c^2 es la energía del electrón (0.511 Mevs). La probabilidad de la dispersión compton por átomo del absorbedor depende del número de electrones disponibles y por lo tanto se incrementa linealmente \propto con Z.

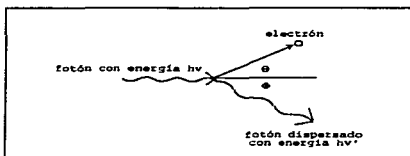


Fig. 2.2 Efecto Compton. Al incidir un fotón con una energía $h\nu$ en un electrón, se deflecta un ángulo Φ y se transfiere parte de su energía al electrón colisionado, disminuyendo su energía en función del ángulo a $h\nu'$.

c) Producción de Pares.

Además del efecto fotoeléctrico o la dispersión compton, también es posible que un fotón se materialice en un electrón y un positrón, proceso en el que la energía electromagnética se transforma en energía en reposo. Los principios de conservación se cumplen cuando un par electrón-positrón se crea cerca de un

núcleo atómico, (Fig. 2.3). La suma de las cargas es cero igual que la del fotón, el momentum lineal se conserva debido a que el núcleo se lleva suficiente momentum del fotón como para que ocurra el proceso, aunque por su masa relativamente grande, únicamente se lleva una fracción despreciable de la energía del fotón. La energía en reposo m_0c^2 de un electrón o positrón es de 0.511 MeV y, por tanto, la producción de pares requiere de una energía de por lo menos 1.02 MeV. Cualquier energía adicional del fotón se transforma en energía cinética del electrón y positrón.

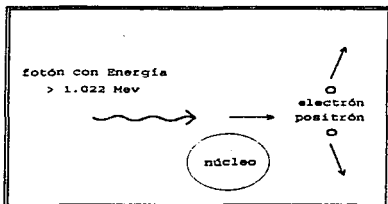


Fig. 2.3 Producción de pares. Un fotón con energía mayor a 1022 kevs, en presencia de un núcleo puede generar un par electrón-positrón.

La figura 2.4 muestra la probabilidad de interacción del efecto fotoeléctrico, la dispersión compton y la producción de pares para germanio, en función de su energía*.

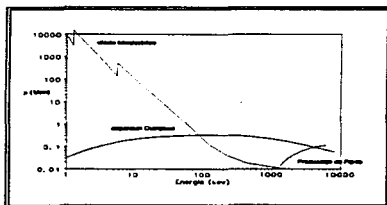


Fig. 2.4. Probabilidad de ocurrencia de efecto fotoeléctrico, compton y producción de pares.

2.MÉTODOS DE DETECCIÓN.

A)Métodos Generales.-Existen varios tipos de detectores, los cuales básicamente funcionan mediante la ionización o excitación que produce la radiación al incidir en ellos. Dependiendo de la aplicación, los más empleados son los de gas, centelladores, termoluminiscentes, de trazas, películas, semiconductores, etc., de los cuales éstos últimos son de los más modernos y debido a su importancia particular se presentan aparte ²⁰.

a)Detectores Gaseosos. Este tipo de detectores de radiación consisten en una cámara de gas con un electrodo central aislado de las paredes de la cámara. Una diferencia de potencial V se aplica entre la pared y el electrodo central a través de la resistencia R y derivada por un capacitor C conectado en paralelo como lo muestra la figura 2.5.

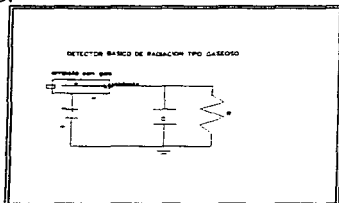


Fig.2.5.Esquema simplificado de un detector de gas. La ampolla de gas es el volumen activo en el cual interactúa la radiación produciendo ionización y excitación.

La radiación ionizante a su paso por el gas de la cámara produce pares de iones. Los de carga positiva se mueven hacia la pared de la cámara mientras que los de carga negativa se mueven hacia el electrodo central, por atracción del campo eléctrico. Con la condición que la constante de tiempo RC sea más grande que el tiempo necesario para la coelección de la carga, la carga Q que aparece en el capacitor por partícula detectada es función de V . La figura 2.6 muestra esta dependencia para radiación β y α , la cual se divide en cuatro regiones.

En la región I, existe una competencia entre la pérdida de pares de iones por recombinación y la eliminación de cargas por captación en los electrodos. Conforme aumenta V , la rapidez de desplazamiento de los iones aumenta por lo que la fracción de carga captada es más grande; a esta región se le conoce como de recombinación.

En la región II las pérdidas por recombinación son despreciables y prácticamente toda la carga producida es colectada, a esta región se le conoce como de Cámara de Ionización.

En la Región III la carga colectada se incrementa en un factor M, a través del fenómeno de multiplicación gaseosa. Este consiste en que los electrones resultantes de la ionización primaria son acelerados lo suficiente para producir ionización adicional, la multiplicación M es independiente de la ionización inicial y se conserva la proporcionalidad de las cargas eléctricas con dicha ionización, por lo que a esta región se le conoce como de Proporcionalidad.

En la IV región la multiplicación es tan grande que la carga generada es independiente de la ionización inicial. Esta región es conocida como Geiger Muller y los detectores que operan en esta región pueden emplearse para la detección de cualquier partícula ionizante, no importando la magnitud de ionización primaria que produzcan.

Por su naturaleza misma, el bajo Z del gas; este tipo de detectores son mas "eficientes" en la detección de partículas cargadas que para radiación electromagnética⁷.

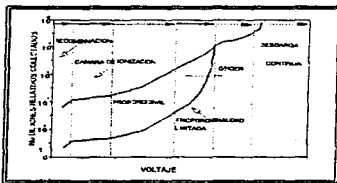


Fig. 2.6. Regiones de operación de un detector gaseoso en función del voltaje aplicado.

b) Detectores de Centelleo.

Algunos materiales emiten luz bajo la incidencia de radiación nuclear o luz ultravioleta. Esta propiedad se denomina "centelleo". Para que un material de este tipo pueda emplearse como detector de radiación debe de cumplir ciertas condiciones:

- que el tiempo en el cual emite luz después de la interacción de la radiación en él sea "corto".
- Que el centellador sea transparente a su propia emisión de luz, y ésta debe de tener una distribución "espectral" tal que las longitudes de onda correspondan a las sensibles empleadas en el electrodo sensible a la luz que emite electrones al incidir ésta en él (fotocátodo) el cual se asocia a un sistema detector.

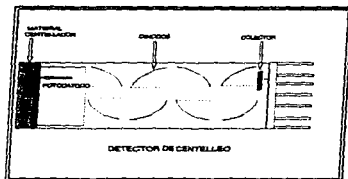


Fig. 2.7. Configuración de un detector centelleador típico.

Aunque es posible emplear materiales puros centelleadores, resulta ser más eficiente emplear materiales con impurezas activadoras las cuales mejoran la emisión de luz. La excitación en el material original es transferido a estas impurezas las cuales emiten luz característica de dicha impureza.

La aplicación mas importante de los centelleadores inorgánicos, es la detección de radiación gamma, debido a que su mayor densidad y número atómico da una mucho mejor "eficiencia" de detección.

El material empleado mas comúnmente en estas aplicaciones es el NaI activado con una pequeña fracción de talio, debido a que éste tiene "alta" emisión y pueden ser construidos en tamaños muy grandes. El tiempo de emisión es de aproximadamente 230 ns y debido a que es higroscópico, tiene que ser herméticamente encapsulado para su empleo.

Un arreglo completo de detector de centelleo, consiste en el material centelleador asociado ópticamente a un tubo fotomultiplicador. Este está constituido por un fotocátodo, una serie de "dinodos" que están a diferentes potenciales eléctricos y finalmente un electrodo colector. Al incidir radiación en el centelleador, éste emite luz la cual al incidir en el fotocátodo produce electrones los cuales son acelerados por la diferencia de potencial hacia el primer dinodo, donde al incidir se producen un número secundario de electrones que a su vez son acelerados a un tercer dinodo y sucesivamente a otros hasta llegar a un factor de multiplicación de entre 10^5 a 10^7 ; esta ganancia es suficiente para producir una señal eléctrica en el colector.

El material del fotocátodo es usualmente depositado como una capa semi-transparente por dentro de la cubierta de vidrio y esto permite buen contacto óptico entre el material centelleador y el fotocátodo. Los materiales empleados en los dinodos han sido: Cs-Sb(cesio-antimonio), Cs-Ag-Mg-O(cesio-plata-magnesio-oxígeno) y mas recientemente, GaP (galio-fósforo). La geometría del tubo debe estar configurada de manera que el campo eléctrico en la superficie del dinodo acelere los electrones hacia el siguiente dinodo. En la figura 2.7 se muestra la configuración de detector de centelleo típico.

3. MATERIALES SEMICONDUCTORES.

En muchas aplicaciones de detección de radiación, el uso de un medio detector sólido es muy ventajoso. Para la medida de electrones de alta energía o rayos gamma las dimensiones de un detector "sólido" pueden ser proporcionalmente mucho más pequeñas que el equivalente detector gaseoso, debido a que las densidades del sólido son del orden de 1000 veces las del gas.

Los detectores centelleadores ofrecen esta medio sólido de detección, aunque tienen algunas desventajas que se citarán posteriormente en comparación con los detectores semiconductores, los cuales tienen las siguientes propiedades.

A) Propiedades de los Materiales Semiconductores.

a) Estructura de Bandas en Sólidos.

La estructura periódica de los materiales cristalinos establece "bandas" de energía "permitidas" para los electrones del material. La energía de cualquier electrón dentro del material puro se confina a una de estas bandas de energía, las cuales están separadas por intervalos de energías prohibidas E_g . La banda de menor energía se denomina banda de valencia; corresponde a los electrones que están dentro de la estructura del cristal. La banda de mayor energía es donde se encuentran los electrones que pueden moverse a través del cristal. Los electrones en esta banda contribuyen a la conducción eléctrica del material. Las dos bandas están separadas por una banda prohibida E_g . El tamaño de esta banda determina si el material es "aislante" o "semiconductor". El número de electrones dentro del cristal es adecuado para llenar completamente todos los "lugares" disponibles dentro de la banda de valencia. En ausencia de excitación térmica tanto los aislantes como los semiconductores tendrían llena la banda de valencia y teóricamente no podrían conducir la electricidad.

En un metal la más energética de las bandas ocupadas no está llena. Por lo tanto, los electrones pueden moverse fácilmente a través del material debido a que necesitan adquirir solo una energía "pequeña" para ocupar los estados de energía más altos. Para los aislantes la banda prohibida es usualmente de 5 eV, mientras que para los semiconductores es del orden de 1 eV (Fig. 2.8) ¹⁰.

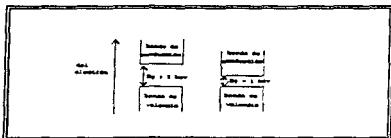


Fig. 2.8. Estructura de bandas en aislantes y semiconductores.

b) Portadores de Carga.

en un cristal a una temperatura diferente de cero, es posible que un electrón de la banda de valencia adquiera energía térmica suficiente para cruzar la banda prohibida y llegar a la banda de valencia. Este proceso de excitación no solamente "crea" un electrón en la banda de conducción, en la banda de valencia queda una vacante del electrón llamada "vacancia". La combinación de ambos es llamada par electrón-vacancia y es análogo al par de iones en los gases.

El electrón en la banda de conducción puede moverse bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado. El vacancia representa una carga neta positiva, y tenderá a moverse en el campo eléctrico en dirección opuesta al electrón. El movimiento de ambas cargas eléctricas contribuye a la conductividad eléctrica del material.

La probabilidad por unidad de tiempo de que un par electrón-vacancia sea generado térmicamente está dado por :

$$p(T) = cT^{3/2} \text{EXP}\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.4)$$

donde

T = temperatura absoluta.

E_g = energía de la banda prohibida.

k = constante de Boltzman.

c = constante de proporcionalidad del material.

De acuerdo a la expresión anterior, la probabilidad de excitación térmica es fuertemente dependiente de la razón del valor de la energía de la banda prohibida y la temperatura absoluta. Los materiales con una banda prohibida "grande" tendrán una probabilidad de excitación térmica y consecuentemente tendrán una conductividad eléctrica pequeña, característica de los aislantes.

Si la banda prohibida es mucho mas pequeña, la excitación térmica podría ser suficiente para clasificar al material como un semiconductor. En ausencia de un campo eléctrico aplicado, los pares electrón-vacancia se recombinarían, y un equilibrio es establecido en el cual la concentración de pares electrón-vacancia en cualquier tiempo es proporcional a la velocidad de formación. Esta concentración de equilibrio es fuertemente dependiente de la temperatura y decrece drásticamente si el material se enfría.

En un campo eléctrico los electrones y vacancias se moverán en dirección del campo eléctrico en sentidos opuestos debido a las cargas contrarias. La velocidad de la "migración" es proporcional al campo eléctrico aplicado. A valores del campo eléctrico "altos" se llega a una velocidad de saturación a partir de la cual a incrementos más grandes de la magnitud del campo eléctrico la velocidad se incrementa poco. Algunos materiales semiconductores tienen una velocidad de saturación del orden de 10^7 cm/s, por lo cual "responden" muy rapido a la "generación-colección" de cargas eléctricas ¹⁰.

B) Impurezas en Semiconductores.

En un semiconductor puro, todos los electrones en la banda de conducción y las vacancias en la banda de valencia, en ausencia de otros factores que les generaran, serían producidos por excitación térmica. Bajo estas condiciones por cada electrón en la banda de conducción debería de haber un vacancia en la banda de valencia. Si p representa la concentración de vacancias en la banda de valencia y n de electrones en la banda de conducción, para el material i (intrínseco) entonces:

$$n_i = p_i$$

Donde p_i y n_i son conocidas como "densidad de portadores intrínsecos". Para materiales con una banda prohibida "grande" y a temperatura "baja" dichas densidades serán "pequeñas". Para germanio, que es un semiconductor típico, a temperatura ambiente la densidad de portadores es del orden de $2.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$.

a) Semiconductores tipo n.

En un material como el silicio, que es tetravalente, en la estructura cristalina normal, forma enlaces covalentes con los cuatro átomos de silicio mas cercanos como se ilustra en la Figura 2.9, las líneas representan un electrón de valencia normal involucrado en el enlace covalente. La excitación térmica en el material intrínseco consiste en la pérdida de uno de estos electrones, dejando en su lugar una vacancia.

El efecto de concentraciones pequeñas de impurezas en el semiconductor, si ésta es pentavalente, cuando está presente en pequeñas concentraciones (del orden de partes por millón), el átomo de la impureza ocupará un sitio substitutional dentro de la estructura tomando el lugar de un átomo de silicio. Debido a que hay cinco electrones de valencia alrededor del átomo de la impureza, hay un electrón libre en todos los enlaces covalentes formados de esta manera. Este electrón extra permanece muy ligeramente ligado a la estructura cristalina, por lo que se requiere de poca energía para llevarlo a la banda de conducción sin dejar una vacancia en su ausencia. Debido a que las impurezas de este tipo no forman parte de la estructura regular, los electrones extra asociados pueden ocupar una posición dentro de la banda prohibida. El tipo de impurezas anteriormente expuesto se llaman impurezas "donadoras" y forman materiales llamados tipo p. El efecto neto en un material semiconductor tipo p es que el número de electrones de conducción es mucho mas grande y el número de vacancias mucho mas pequeño que en el material puro. La conductividad eléctrica es entonces determinada casi exclusivamente por el flujo de electrones^{9,10}.

b) Semiconductores tipo p.

Análogamente al caso anterior si en lugar de una impureza pentavalente se adiciona una trivalente, entonces como dicha impureza tiene un electrón de valencia menos, esta vacancia significa una similar a cuando un electrón de valencia es excitado a la banda de conducción. Si un electrón es capturado para llenar esta vacancia, entonces participa en un enlace covalente que no es idéntico a la "magnitud" del cristal debido a que uno de los dos átomos participantes, es una impureza trivalente. Un electrón llenando esta vacancia, aunque permanece atado a un lugar específico, está menos firmemente sujeto que un electrón de valencia típico. Por lo tanto, estas impurezas forman "sitios aceptores" dentro de la banda prohibida. En este caso los "niveles" aceptores se ubican cerca de la parte baja de la banda prohibida debido a que sus propiedades son parecidas a las ocupadas por los electrones de la banda de valencia Fig. 2.9 .

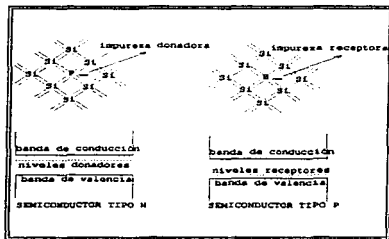


Fig.2.9. Si a una red cristalina como el Silicio se le agregan impurezas penta y trivalentes, se forman niveles energéticos en la banda prohibida resultando materiales tipo n y p respectivamente.

Debido a la excitación normal en el cristal, hay siempre algunos electrones disponibles para llenar las vacancias creadas por las impurezas aceptoras. Como la diferencia de energía entre el nivel aceptor típico y la parte mas alta de la banda de valencia es pequeña, una cantidad grande de los sitios aceptores son llenados por los electrones excitados. Como estos electrones provienen de la banda de valencia, entonces dejan vacancias en ésta, y la concentración de aceptores es más grande. La mayor disponibilidad de vacancias mejora la probabilidad de recombinación entre los electrones de conducción y éstos y, por lo tanto, decrece el número de equilibrio de los electrones de conducción".

4. DETECTORES SEMICONDUCTORES.

A) Energía de ionización y colección de iones.

Cuando una partícula cargada pasa a través de un semiconductor, produce muchos pares electrón-vacancia, directa e indirectamente, a lo largo de la trayectoria por donde pasa la partícula. El promedio de energía perdida por partícula incidente para producir un par electrón-vacancia es llamado energía de ionización, ϵ , y es independiente de la energía de la partícula incidente y del tipo de radiación incidente².

La ventaja de los detectores semiconductores es que la energía de ionización es mucho más pequeña que para otros. El valor de ϵ para germanio y silicio es de 3 eV que comparado con los cerca de 30 eV que se requieren para formar un par de iones en un detector típico de gas es 10 veces más pequeño².

Ningún material tipo p o n es apropiado por sí mismo para usarse como detector, por que existe un incremento en la conducción debido a las impurezas adicionadas. Por lo anterior se utilizan arreglos en los que se unen dos materiales tipo p y n (unión p-n), en el cual de un lado predominan las vacancias y en el otro los electrones (Fig 2.10)

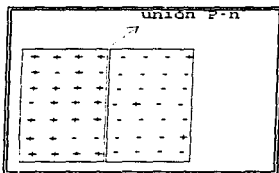


Fig. 2.10 En una unión p-n no polarizada, de un lado predominan las cargas positivas y del otro las negativas.

Si se aplica un campo eléctrico polarizante inverso mediante la aplicación de una diferencia de potencial, la mayoría de los vacancias se desplazan hacia el electrodo negativo, mientras que los electrones libres se moverán hacia el positivo (Figura 2.11). Cuando la unión p-n ha sido polarizada de esta manera, se produce una capa libre de portadores de carga llamada zona de depleción.

Después de la polarización, la conducción eléctrica cesa por que la región n no puede suministrar vacancias y la región p electrones. La capa depletada actúa como aislante y el cristal tiene baja conductividad requerida para su empleo como detector.

Cuando la radiación es absorbida en la zona de depleción o volumen activo, los electrones y vacancias libres se mueven según el campo eléctrico y se produce la señal en el circuito eléctrico externo.

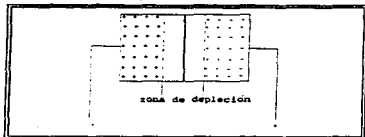


Fig. 2.11. Si se aplica un voltaje inverso a una unión p-n se forma una zona de depleción.

B) Detectores de germanio para radiación gamma.

4.1) Generalidades.

En un detector fabricado con una unión simple p-n, y pureza normal de germanio o silicio se consigue una región depletada o activa de tan solo unos cuantos mm, adecuada para la detección de radiación de corto alcance, pero no para radiación más penetrante como la gamma.

Se consiguen volúmenes activos más grandes reduciendo las impurezas en el material. Por problemas técnicos es más sencillo obtener niveles de impurezas mucho menores para germanio que para silicio. Debido a esto se han desarrollado detectores con características de impurezas de 10^{10} átomos /cm³ llamados detectores de germanio hiperpuro disponibles comercialmente, con regiones depletadas de unos cuantos centímetros, que son adecuados para detección de radiación gamma, de interés particular en el presente trabajo.

Los detectores de germanio se fabrican comercialmente en varias configuraciones de acuerdo al uso que se le asigne. En la figura 2.12 se ilustran algunas de estas configuraciones y sus características¹² son listadas en la tabla 2.1.

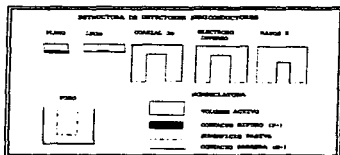


Fig.2.12. Configuraciones de detectores de germanio comerciales disponibles.

DETECTORES SEMICONDUCTORES	
TIPO	CARACTERISTICAS
Piano de Germanio	Alta resolución Ventana delgada Detección de aprox. 2 a 500 kevs.
Germanio para baja energía	Area grande Ventana delgada Detección de aprox. 6 a 1000 kevs.
Coaxial de Germanio	Alta eficiencia Alta resolución Detección de aprox. 45 a 10000 kevs.
Rayos X	Ventana delgada Alta eficiencia Detección de aprox. 8 a 10000 kevs.
Electrodo Inverso	Ventana delgada Resistente al daño por neutrones Detección de aprox. 8 a 10000 kevs.
Pozo (Germanio)	Geometría 4x. Alta eficiencia. Detección de aprox. 40 a 10000 kevs

Tabla 2.1. Características de detectores semiconductores comerciales.

4.2) Características Operacionales de los Detectores de Germanio.

Debido a que la banda prohibida para germanio es pequeña (0.7 eV), no se puede operar a temperatura ambiente, porque se produce la llamada corriente de fuga por la creación térmica de pares electrón-vacancia.

Por lo anterior el detector se monta generalmente en un encapsulado llamado crióstato, el cual está en contacto con una varilla metálica llamada dedo frío que a su vez es colocado dentro de un encapsulado al vacío. El dedo frío se sumerge en un recipiente térmicamente aislado (llamado dewar) con nitrógeno líquido (cuya temperatura es de 77 K) para ser enfriado por contacto térmico.

Para minimizar la colección de contaminantes en las superficies del detector que causan degradación, en su funcionamiento se hace vacío en el crióstato y el encapsulado del dedo frío.

Por otro lado, como el exterior del montaje del detector se encuentra expuesto a la temperatura ambiente y éste está próximo a la temperatura de nitrógeno líquido, es necesario un buen aislante térmico para prevenir la transferencia de calor desde la superficie externa hasta el detector, y es el vacío mencionado anteriormente el que hace esta función, además de los materiales reflejantes usados los cuales sirven como barreras térmicas.

Se ilustra a continuación el esquema del montaje de un detector semiconductor de germanio (Fig 2.12):

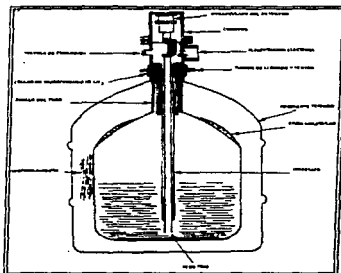


Fig.2.12. Esquema del montaje de un detector de germanio hiperpuro.

Un sistema detector se puede representar como un capacitor en el cual es depositada una carga eléctrica. El voltaje aplicado al detector produce un campo eléctrico para coleccionar la carga. Durante la colección de ésta, una pequeña corriente fluye y el voltaje "cae" a través de la resistencia; a esta variación temporal en el potencial se le conoce como pulso de voltaje.

Asociado al detector se emplea un preamplificador sensible a la carga eléctrica, el cual es aislado del alto voltaje por otro capacitor. En un pulso de voltaje el tiempo de "subida" del pulso está relacionado con el tiempo de colección de la carga, mientras que el tiempo de "bajada" es la constante de tiempo característico RC del amplificador mismo. La duración del tiempo de subida es desde unos nanosegundos hasta unos cuantos microsegundos, mientras que el de bajada es del orden de 50 microsegundos.

En estos preamplificadores el pulso de voltaje en la salida es proporcional a la carga colectada en el detector y es independiente de la capacitancia del detector. El Preamplificador debe ser colocado junto al detector para reducir la capacitancia de los cables, la cual puede degradar el tiempo de subida del pulso así como reducir

el tamaño de señal efectiva. El preamplificador también sirve para "acoplar" la alta impedancia del detector con la baja impedancia de los cables coaxiales que van hacia el amplificador.

Una de las características más importantes de los detectores de germanio es su "resolución" cuando se aplica en sistemas de "espectrometría". La respuesta ante radiación gamma incidente en el detector produce un número de pares vacancia-electrón, los cuales son proporcionales a la energía cedida de la gamma por efecto fotoeléctrico, Compton o producción de pares. En un sistema detector, estos pares vacancia-electrón se convierten en pulsos de voltaje los cuales son de "amplitud" proporcional a la energía incidente (en el caso del efecto fotoeléctrico). Si la amplitud de los pulsos de voltaje anteriormente mencionados se mide de alguna manera, entonces se puede conocer por comparación la energía de la gama incidente. Pero, además, debido a que la energía para producir pares vacancia-electrón es de tan solo 3 eV, como ya se dijo, se tiene una buena cantidad de pares para formar los pulsos de voltaje, los cuales tendrán una dispersión estadística pequeña con lo cual se pueden separar diferentes energías de la gama incidente con diferencias del orden de 1 o 2 keV.

El método usado para detectar y medir radiación gamma descrito anteriormente se denomina "Espectrometría Gamma" ¹⁰. Es usado ampliamente en muchos laboratorios y debido a su importancia general y particular en este trabajo será expuesto en el capítulo siguiente.

CAPITULO III

ESPECTROMETRIA GAMMA.

1) GENERALIDADES Y CONCEPTOS.

A) Generalidades.

Uno de los métodos analíticos más usados en la determinación de isótopos radiactivos es la espectrometría gama. Esta técnica tiene la ventaja de identificar y medir emisores gamma directamente en la muestra, con preparaciones muy sencillas, que en la mayoría de los casos consiste solamente en el envase de la muestra en forma apropiada.

La forma física y disposición (llamada geometría) en la cual la muestra se presenta al detector para su medición depende de su tipo, la composición del radionucleido y el nivel de actividad que se desea medir. Algunos envases o recipientes en los cuales se colocan las muestras son cajas petri de plástico o recipientes marinell[®]. Los aspectos más importantes que tienen que ser considerados para el empleo de éste método son: el tiempo de medición que varía de acuerdo al tipo de muestra y al "límite de detección" requerido, la eficiencia de detección, el volumen o peso de la muestra y el radionucleido de interés.

Algunos aspectos importantes para el empleo efectivo y seguro de esta técnica son:

-Dependiendo del tipo de muestra y volumen a analizar la geometría seleccionada para su medición puede ser: recipiente marinelli (por ejemplo para suelo o agua), filtro de aire (para muestreo de aire), caja Petri, etc.

-Se deben emplear para la calibración fuentes estándar certificadas por un laboratorio reconocido tomando en cuenta aspectos físicos como la densidad la cual debe ser similar a la de las muestras a analizar.

-Para asegurar que el sistema responde satisfactoriamente se debe sujetar a un programa de control de calidad.

-Es buena práctica participar en un programa de intercomparación con otros laboratorios de calidad, nacionales y extranjeros¹³.

B) Conceptos y Definiciones.

A continuación se enlistan algunos conceptos y definiciones empleados comúnmente

en espectrometría gamma:

Espectro.-Es una distribución de altura de pulsos producidos por la interacción de radiación gamma y X en un detector y acondicionados por dispositivos electrónicos para finalmente ser desplegados en un **MCA** (analizador multicanal).

Fotopico o Pico.-Es una formación gaussiana (Figura 3.1) en un espectro, producida por las interacciones de radiación gamma o X de cierta energía por efecto fotoeléctrico con el material del detector.

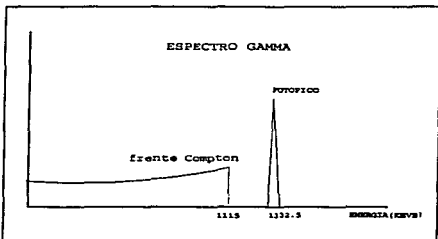


Fig. 3.1. Esquema de un espectro mostrando un fotopico y el frente Compton.

Frente Compton.- Es el borde en un espectro como el ilustrado en la (Figura 3.1), producido por las interacciones de mayor energía de emisiones gamma o X monoenergéticas por efecto Compton en el material detector, dada por la expresión:

$$E_{f_{max}} = E_0 - E_{\gamma} = \frac{E_0}{1 + \frac{mc^2}{2E_0}} \quad (3.1)$$

donde $E_{e_{max}}$ = Energía máxima del electrón dispersado.

E_0 = Energía inicial del fotón.

E_{γ} = Energía del fotón dispersado.

m = masa del electrón.

c = velocidad de la luz.

Radiación de Fondo: "background".-Radiación proveniente de los materiales de construcción del blindaje, de las paredes del laboratorio y el medio en general.

FWHM (Full width at half maximum).-Es el Ancho de un fotopico a la mitad de su altura máxima, dado en canales o unidades de energía.

Centroide: Es el centro de "masa" de un fotopico dado en unidades de energía o en canales.

Resolución: Es la capacidad de un sistema de "distinguir" fotopicos cercanos de energías cercanas. Se define como el FWHM entre el número de canal o energía (la misma unidad de FWHM) de su centroide por 100 para reportarse en unidades porcentuales.

Área Neta.-Es el número de cuentas de un fotopico calculado restando las cuentas debidas a la radiación de fondo.

Razón Pico-Comptom: Para un detector semiconductor, se define como el número de cuentas netas en el fotopico de 1.3325 MeV de Co-60 entre el número promedio de cuentas netas de los canales correspondientes desde 1.040 hasta 1096 MeV que es la parte del intervalo de la región Compton asociada a la energía de 1.33 MeV.

Geometría: Estado y disposición física con respecto al detector del material radiactivo de la fuente o muestra de interés.

Marinelli.-Recipiente de material plástico diseñado para usarse con detectores de radiación.

Eficiencia: La eficiencia de un detector es la medida de cuántos pulsos ocurren por un número dado de emisiones gamma. En Espectrometría gamma se emplean varios tipos de definiciones de eficiencia:

-**Eficiencia Absoluta:** Es la razón del número de cuentas producidas en el detector y el número de emisiones gamma emitidas por la fuente.

-**Eficiencia Intrínseca:** Es la razón del número de cuentas producidas en el detector y el número de emisiones gamma que llegan a él.

-**Eficiencia Relativa:** Es la eficiencia de un detector con respecto a otro; comúnmente es la de un detector de Germanio relativa a uno de NaI de 3×3 a 25 cm de distancia (frontal) para el fotopico o pico de 1332.5 keV de una fuente puntual de Co-60.

-**Eficiencia de fotopico:** Es la eficiencia tomando en cuenta únicamente los pulsos que originan un fotopico; es función de la energía de la radiación gamma y la que

comúnmente se emplea y usa como simplemente Eficiencia.

Límite Inferior de Detección (LID).-Es una medida estadística de la actividad mínima que se puede medir en una muestra debido a la interferencia por la radiación de fondo. Es función de la eficiencia, el tiempo de conteo Tc y de la desviación estandar de la rapidez de conteo del fondo. Se emplea comúnmente para calcular a priori el tiempo de conteo de una muestra en función del valor mínimo de actividad que se desea alcanzar. El método mas comúnmente empleado es el U.S. NRC para 95 % de confianza que se define como:

$$LID(Bq) = 4.66 \sqrt{\frac{\text{FONDO}}{T}} \quad (3.2)$$

E_f Y T_c

Donde Fondo/T es la razón de conteo de las cuentas de radiación de fondo en la región del fotopico de interés.

Ef = Eficiencia en ctas/ γ de la energía de interés.

Tc = tiempo de conteo de la muestra.

Y = porcentaje de emisión de la emisión gamma.

2.PRINCIPIOS E INSTRUMENTACIÓN.

A)Análisis por altura de pulsos.

En algunos sistemas detectores el número de pares de iones o pares electrón-vacancia generados al incidir radiación de algún tipo en el volumen activo del detector, son proporcionales a la energía de la radiación incidente. Esto hace que en la electrónica asociada del sistema las amplitudes de los pulsos de voltaje sean análogamente proporcionales a la energía. El análisis por altura de pulsos se realiza empleando técnicas y dispositivos electrónicos desarrollados con este fin para clasificar la altura de los pulsos de voltaje y por tanto estimar la energía de la radiación incidente. En este tipo de análisis se basa la técnica conocida como espectrometría. Se han desarrollado algunos dispositivos electrónicos como el monocanal y multicanal, los cuales asociados a un detector y otros elementos electrónicos forman sistemas completos de espectrometría. A continuación se describe la instrumentación de un sistema típico de espectrometría gamma el cual es de nuestro interés.

B) Instrumentación de un Sistema de Espectrometría Gamma.

Un sistema típico de espectrometría gamma se compone de un detector (puede ser centellador de NaI o semiconductor) dentro de un "blindaje", alimentado por una fuente de alto voltaje y asociado a un preamplificador. Este a su vez se asocia a un amplificador de señal que se conecta a un dispositivo analizador por altura de pulsos, tal como lo muestra el diagrama de bloques en la Figura 3.2.

Cabe mencionar que los dispositivos electrónicos empleados usualmente en aplicaciones nucleares están estandarizados bajo el "Standard Nuclear Instrument Modules" (NIM), lo cual permite combinar módulos electrónicos de diferentes marcas, conservando la compatibilidad.

La función de cada uno de los elementos se describe a continuación.

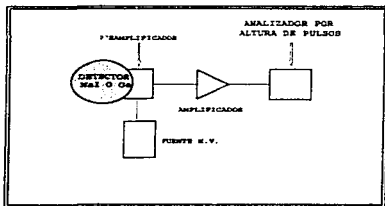


Fig.3.2. Diagrama de bloques de un sistema típico de espectrometría gamma.

a) Detector y fuente de alto voltaje. En la actualidad debido a su mayor resolución se prefiere usar los detectores de estado sólido o semiconductores sobre los centelladores, los cuales generalmente se usan para aplicaciones donde no se requiere una buena resolución. De los detectores semiconductores los de silicio y germanio son los más usados, dependiendo del tipo de aplicación se pueden escoger las diferentes configuraciones existentes en el mercado ya mencionadas en el capítulo anterior.

Para polarizar el detector es necesario contar con una fuente de alto voltaje, la cual usualmente debe proporcionar voltajes entre -4000 y 4000 volts. El voltaje de polarización es particular para cada detector y es recomendado por el fabricante. Este voltaje se selecciona de manera que sea tan bajo como para evitar una situación de descarga continua pero tan alto como sea posible para lograr una buena colección de pares electrón-vacancia. Además la fuente de voltaje debe ser estable para mantener los mismos gradientes de voltaje en el detector para conservar las características de colección.

Debido a que el detector puede sufrir daño si se polariza cuando se encuentra a temperatura ambiente, es común que las fuentes de alto voltaje modernas cuenten con un sensor de temperatura, el cual interrumpe la polarización si dicha temperatura no es adecuada.

c) Preamplificador y Amplificador.

Asociado al detector se emplea un preamplificador sensible a la carga eléctrica. El preamplificador convierte la carga eléctrica que es generada en el detector por acción de la radiación gamma, en pulsos de voltaje. A la salida del preamplificador un pulso de voltaje es una señal (vista con un osciloscopio) que parte de un valor de 0 volts a un valor del orden de millivolts en un tiempo muy corto llamado tiempo de subida, para después regresar a su valor de cero en un tiempo del orden de los microsegundos (figura 3.3) llamado tiempo de bajada.

En estos preamplificadores la amplitud del pulso de voltaje en la salida es proporcional a la carga colectada en el detector y es independiente de la capacitancia del detector. El preamplificador debe ser colocado junto al detector para reducir la capacitancia de los cables, la cual puede degradar el tiempo de subida del pulso así como reducir el tamaño de señal efectiva. El preamplificador también sirve para "acoplar" la alta impedancia del detector con la baja impedancia de los cables coaxiales que van hacia el amplificador.

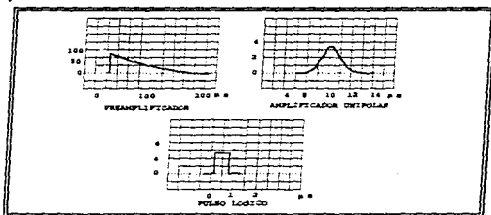


Fig. 3.3. Señales electrónicas de dispositivos electrónicos en un sistema de espectrometría gamma.

El amplificador. Sirve para darle "forma" al pulso de salida del preamplificador y para darle un tamaño adecuado a los estándares electrónicos para ser analizado o registrado. Como el tiempo de bajada del pulso es "largo" puede ser que no llegue al nivel "cero" antes de que otro pulso arribe; por esto es importante acortarlo y únicamente conservar la información proveniente del detector del tiempo de subida del pulso (Figura 3.3.). Para esto se emplea una técnica en la cual se deriva el pulso

para quitar la variación lenta del tiempo de bajada y posteriormente se integra para reducir el ruido con lo cual el pulso unipolar resultante es mucho mas corto. El circuito electrónico usado hoy en día es un filtro activo para frecuencias seleccionadas con el que una señal de forma cercana a la Gaussiana es producida, dando como resultado características óptimas de la relación señal-ruido y velocidad de conteo.

d) Analizador por Altura de Pulsos. Un analizador por altura de pulsos básico puede consistir de un discriminador electrónico el cual se ajusta arriba del nivel de ruido electrónico, que produzca un pulso lógico (Figura 3.3.) para su registro en un contador escalador. El contador escalador es un dispositivo electrónico que registra el número de pulsos lógicos que le llegan en un cierto tiempo establecido, este tiempo establecido para registro de pulsos se llama tiempo de conteo. Sin embargo, algunos datos consisten de una gran cantidad de pulsos con diferentes alturas, de los cuales en ocasiones solo una pequeña cantidad es de interés. Para estas aplicaciones se puede emplear un dispositivo llamado monocanal (SCA) y un escalador, u otro llamado Analizador Multicanal (MCA).

El monocanal tiene un discriminador de nivel bajo, que permite pasar sólo los pulsos más grandes que cierta altura seleccionable y uno de nivel alto que toma en cuenta sólo los pulsos mas pequeños que cierta altura, también seleccionable. La diferencia en el valor de los discriminadores se denomina ventana. Cuando la amplitud de la señal de entrada al monocanal se encuentra dentro de los niveles del discriminador se produce un pulso lógico de salida que puede ser registrado en un escalador. Si se requiere analizar un intervalo amplio de altura de pulsos, se puede ajustar un intervalo angosto de discriminadores y barrer desde un discriminador muy bajo hasta el más alto para registrar todos los pulsos.

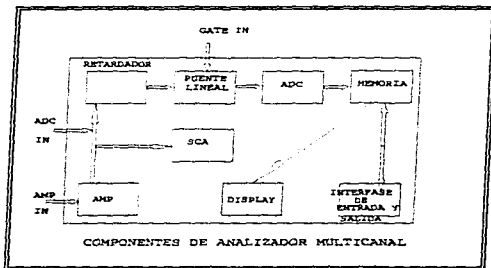


Fig. 3.4. Diagrama de un analizador multicanal (MCA) convencional.

Una manera de hacer lo anterior con un solo conteo, es usando un Analizador Multicanal (Figura 3.4). Este consiste en un SCA asociado con un dispositivo llamado Convertidor Analógico a Digital (ADC), una memoria y una pantalla. Algunos tienen preamplificador, amplificador, varios dispositivos de salida, funciones de análisis de datos, etc. El MCA es capaz de coleccionar datos en un intervalo amplio (generalmente de 10 volts) de altura de pulsos produciendo mejores resultados que un monocanal.

El pulso de entrada en el MCA, si está entre los límites del discriminador SCA; pasa al ADC, el cual lo convierte a un número proporcional a su amplitud y es adicionado en una localidad de memoria llamada canal de acuerdo a su valor. Dicha localidad de memoria tiene un tamaño típico de 2 milivolts para MCA's con 4096 canales. Después de coleccionar datos por un período de tiempo, la memoria contiene una lista de números correspondientes a la cantidad de pulsos registrados en cada canal. La pantalla despliega el contenido de los canales, dando una gráfica de canales contra cuentas. Esta distribución diferencial de altura de pulsos es conocida como espectro.

El concepto de multicanal ha evolucionado de manera que en la actualidad existen tarjetas electrónicas asociadas a una computadora personal (P.C.), los cuales hacen las funciones tradicionales del MCA y además tienen la ventaja de ser controlados por la P.C. y la de emplear sus sistemas de almacenamiento y programas especiales para analizar los espectros*.

Blindaje.- Para que el detector no registre radiación proveniente del ambiente que interfiera con la proveniente de la muestra, es necesario colocar un blindaje cubriéndolo de manera de la muestra se pueda colocar dentro (Figura 3.5).

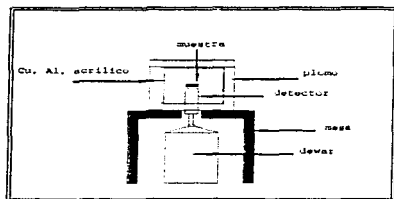


Fig. 3.5. Esquema de un detector de estado sólido con blindaje de plomo cilíndrico.

El material más empleado para la construcción de blindajes es el plomo, por su alto número atómico. Se construyen en diferentes geometrías, siendo más adecuado que la cavidad que contiene al detector sea lo más grande posible para evitar que la radiación compton retrodispersada de la muestra llegue al detector. Para medir

muestras ambientales es recomendable emplear blindajes de 10 cm de espesor con un recubrimiento interior de cobre aluminio y acrílico de algunos milímetros para atenuar la radiación dispersada y reducir la radiación de frenado (y por tanto el fondo⁸) y por lo menos 10 cm de distancia de espacio entre las paredes del blindaje y la muestra, aunque para muchas otras aplicaciones basta con un blindaje de 5 cm de espesor.

C) Instrumentación Seleccionada.

Debido a que para la identificación y cuantificación del Ra-226 y el manejo del orden de 12 muestras diarias, es importante contar con un detector de buena resolución que permita distinguir energías muy cercanas y un sistema eficiente para el almacenamiento y procesamiento de los datos. Para el presente trabajo se usó un sistema con un detector semiconductor de germanio hiperpuro y manejo del multicanal computarizado con los elementos y características siguientes (Figura 3.6):

-Detector de germanio hiperpuro marca Ortec modelo GEM-25185P con un cristal de 56.9 mm de diámetro y longitud de 56.5 mm. Voltaje de operación recomendado de + 3500 volts y las siguientes especificaciones de funcionamiento:

Resolución: (FWHM) en 1.33 Mev: 1.85 keV.
Razón pico compton: 55:1;
Eficiencia relativa: 25 %.
Resolución: (FWHM) en 0.122 Mev: 0.85 keV.

-Preamplificador.-Preamplificador marca Ortec Integrado al Det. Ge-hp.

-Gabinete o rack contenedor modular (NIM) marca Tennelec con capacidad para 12 módulos sencillos, con fuente de voltaje marca Tennelec modelo TB3 con alimentación de 110 V ADC, proporcionando voltajes de ± 6 , ± 12 y ± 24 volts.

-Fuente de alto voltaje marca Ortec modelo 659 (módulo sencillo), con intervalo de voltaje de hasta 5000 V, negativo o positivo e interruptor de alto voltaje en función de la temperatura del detector.

-Amplificador Lineal (Spectroscopy Amplifier) marca Ortec modelo 673, con un intervalo de ganancia de hasta 1500 y formación de pulso gaussiano con tiempos desde 0.5 hasta 6 μ s.

MCA.- Se escogió un módulo buffer Multicanal (Spectrum Master) (Figura 3.7), marca Ortec modelo 919 el cual tiene capacidad para hasta 4 MCA's independientes de hasta 16 k canales cada uno. Se conecta a una P.C. a través de una tarjeta de comunicaciones marca Ortec modelo 918 A opt. B, o bien a través del puerto serial

y se opera con un programa llamado Maestro II instalado en dicha P.C.. También contiene un ADC de 16 K, un multiplexor (el cual es un dispositivo que divide en regiones la totalidad de la memoria) para la entrada de los 4 MCA y un microprocesador 80186 el cual controla y procesa los comandos desde y hacia la P.C.

- Computadora personal marca Digital modelo DECpc 325 sx LP con monitor VGA a color con 4 megabytes de memoria RAM y disco duro de 200 megabytes con procesador 386 de 25 Mhz y coprocesador matemático, equipo que cumple los requerimientos establecidos por el fabricante de la electrónica y software asociados.
- Impresora marca Epson modelo 2500.
- Termo para nitrógeno líquido marca Ortec de 30 litros asociado al detector de Ge-hp.
- Blindaje cilíndrico de plomo de 5 cm de espesor.

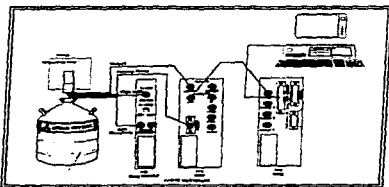


Fig. 3.6. Sistema de espectrometría gamma marca Ortec manejado por computadora personal.

Los programas de Cómputo empleados:

- Sistema Operativo DOS versión 5.
- Programa de emulación de Multicanal "Maestro II" (marca Ortec).
- Programas del software de análisis "Omnigam": Gerpar, Cib, An1, Peakplot, Convert (marca Ortec).

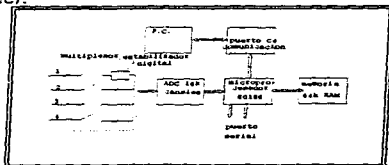


Fig. 3.7. Diagrama del módulo MCA Spectrum Master marca Ortec modelo 919 .

3. CALIBRACION DEL SISTEMA.

Para analizar muestras no conocidas con un sistema de espectrometría gamma se tiene que conocer en primer lugar, la relación que hay entre el número de canal en un MCA y la energía, esto es que el sistema esté calibrado en energía. Lo anterior permite conocer la energía de los fotopicos involucrados y por tanto el radionucleido al que pertenecen; también es necesario conocer la forma o "FWHM" para saber si hay interferencias de fotopicos con energías muy próximas y finalmente se debe conocer la eficiencia para determinar la actividad o concentración de actividad del o los radionucleidos involucrados.

A) Calibración en Energía.- Consiste en relacionar un valor de energía con cada canal del MCA, esta relación es lineal entre el 10 % y el 90 % del número de canales. Para cubrir un intervalo de energía desde 45 hasta 2000 keV aproximadamente, se cuentan una o mas fuentes con un mínimo de 3 energías gamma distribuidas en el intervalo de energía de entre 100 y 1800 keV. Se ajusta la ganancia del amplificador para conseguir que el centroide de los fotopicos tenga la relación de energía-canal deseada y haciendo finalmente mínimos cuadrados con el conjunto de pares de datos, para obtener el ajuste mas preciso ($E_{\gamma} = f(\text{canal})$).

En nuestro caso se calibró el sistema empleando una fuente estandar de Ba-133 y Eu-152 con una actividad de 0.27 μCi y 0.20 μCi respectivamente. Las energías de ambos radionucleidos se listan en la tabla 3.1. y se emplearon para la calibración las de 88, 778, 964 y 1408 keV. La función de calibración en energía es la siguiente y la gráfica de la función se ilustra en la Figura 3.7:

$$\text{Energía(keV)} = -0.341 + 0.250 * \text{canal} + 1.2872 E^{-9} * \text{canal}^2 \quad (3.3)$$

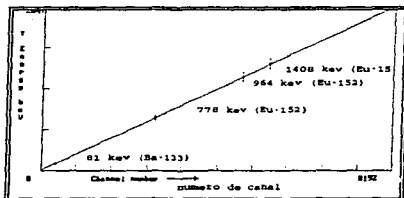


Fig. 3.7. Calibración en energía del sistema de espectrometría gamma.

B) La Calibración en FWHM se hace análogamente a la de energía. El FWHM de cada fotopico es función de la energía, siendo más ancho conforme aumenta ésta. Los valores intermedios se pueden interpolar o se hace un ajuste con el conjunto de pares de datos ($FWHM = f(E\gamma)$).

Para calibrar nuestro sistema se empleó la misma fuente para la calibración en FWHM dando como resultado la función siguiente, ilustrada en la Figura 3.8:

$$FWHM(keV) = 3.06 + 1.137E-3 \cdot canal - 2.58 E - 8 \cdot canal^2 \quad (3.4)$$

Bario-133	
Energía (Mevs)	% de Emisión
0.080997	32.9730
0.276400	06.9031
0.356010	60.5000
0.383850	8.6697
Eu-152	
0.1218	28.4
0.2447	7.5
0.3443	26.6
0.7789	13
0.964	14.6
1408	20.9

Tabla 3.1.

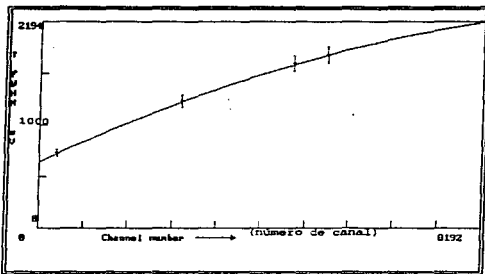


Fig. 3.8. Calibración en FWHM en función de la energía.

C) La Calibración en eficiencia se hace realizando un conteo análogo al descrito anteriormente, pero considerando el mayor número de energías distribuidas en el intervalo de 80 a 1800 kevs aproximadamente, (entre el Ba-133 y el Eu-152 se puede contar con 10 energías diferentes) de manera que cada fotopico a emplear tenga por lo menos 10000 cuentas de área neta. El área neta se calcula de la manera siguiente:

Se obtienen las cuentas totales de un fotopico como el ilustrado (Figura 3.9) sumando las de cada canal:

$$C_i = \sum_{l=n}^m C_l \quad (3.5)$$

Después se calculan las cuentas de fondo, calculando primero el promedio de cuentas de fondo para cada canal, sumando las cuentas de tres canales desde $n-3$ hasta $n-1$ antes del comienzo del fotopico y las de los tres después del fotopico desde $m+1$ hasta $m+3$; se obtiene el promedio de cuentas por canal dividiendo entre el número de canales considerados (6):

$$C_{fp} = \frac{\sum_{l=n-3}^{n-1} C_l + \sum_{l=m+1}^{m+3} C_l}{6} \quad (3.6)$$

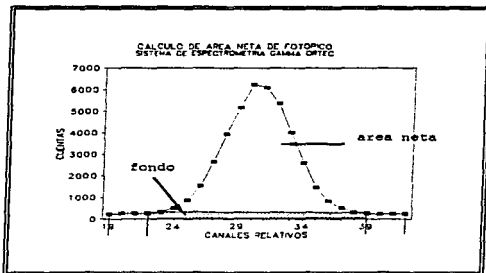


Fig. 3.9. Cálculo del área neta de un fotopico.

El número de canales que conforman el fotopico es :

$$N_f = m - n + 1 \quad (3.6)$$

Que multiplicado por el número promedio de canales nos da como resultado las cuentas de fondo totales :

$$C_f = C_{fp} N_f \quad (3.7)$$

De donde las cuentas netas o área neta será:

$$C_n = C_i - C_f \quad (3.8)$$

Obtenidas las cuentas netas de cada fotopico de cierta energía e, se dividen éstas entre las gamas (γ/s) emitidas por segundo para cada energía siendo la eficiencia:

$$E_f = \frac{Cn_e}{\frac{Y}{S}} \quad (3.9)$$

Nuestro sistema, igual que para la calibración en energía y FWHM se calibró con el estándar de Ba-133 y Eu-152 como se mencionó y se obtuvieron las dos funciones de calibración en eficiencia (Figura 3.10), para energías menores a 160 kevs:

$$\ln E_f = -50.55 + 19.11 * \ln E_n - 1.92 * \ln E_n^2 \quad (3.10)$$

y para energías mayores a 160 kevs:

$$\ln E_f = -0.954 - 0.1060 * \ln E_n - 5.76 * \ln E_n^2 \quad (3.11)$$

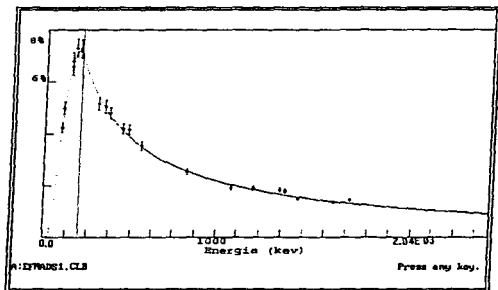


Fig. 3.10. Calibración en eficiencia para el sistema de espectrometría gamma ortec con geometría marinelli de 0.5 litros.

4. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE ESPECTROS .

B) Interpretación de Espectros.

Además de los fotopicos normales producidos por la interacción por efecto fotoeléctrico de una gama característica de un radionucleido, existen algunos picos generados por otros mecanismos que deben de considerarse cuando se interpreta un espectro:

Si hay producción de pares, los positrones se aniquilan con el material del detector produciendo dos gamas de 511 kevs. Cada una de ellas puede salirse del material del detector sin interactuar con él o dejar parte de su energía por efecto Compton, si una o ambas salen del detector (escapar) la energía depositada es igual a la original menos 511 ó 1022 kevs respectivamente produciendo fotopicos los cuales se denominan picos de escape simple o doble escape (Figuras 3.11 y 3.12).

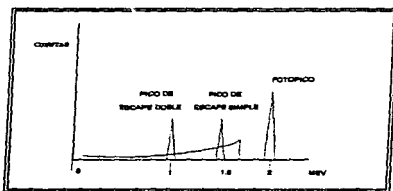


Fig.3.11. Espectro mostrando picos de escape simple y doble.

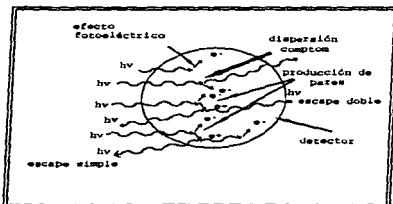


Fig.3.12. Mecanismos de interacción de la radiación gama con el detector.

Si la razón de conteo es muy alta, el pulso producido por una gamma de cierta energía se puede sumar al producido por otra de energía diferente, dando como resultado un pico de energía igual a la suma de energías de las gammas. Es por esto que se deben de buscar las condiciones para que el tiempo muerto en el detector sea pequeño (máximo 10 %) y hacer correcciones por el conteo perdido por suma. (Figura 3.13).

En ocasiones se tienen fotopicos que son mas anchos de lo esperado según la calibración en FWHM; esto es porque hay radionucleidos con energías ligeramente diferentes que contribuyen a lo que se llaman dobletes, o en ocasiones hasta más de dos energías se traslapan dando origen a multipletes, los cuales se pueden resolver por diversas técnicas ⁷.

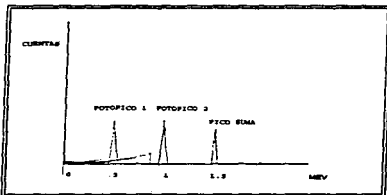


Fig. 3.13. Espectro mostrando el efecto de picos suma.

Cuando se observa un espectro hay que diferenciar el tipo de efectos descritos para hacer un análisis congruente y aceptable.

B) Análisis.

Cuando se tiene un espectro (de un Sistema Calibrado en energía, FWHM y eficiencia) en el cual aparecen fotopicos, lo primero que se hace es identificar el radionucleido consultando tablas de radionucleidos que correspondan con la energía del fotopico en el espectro. Es común que el radionucleido en cuestión emita radiación gamma de más de una energía con las cuales se pueda confirmar la presencia de dicho radionucleido. Otro criterio es pensar la viabilidad de dicho radionucleido de acuerdo a si es posible su existencia en dicho laboratorio porque se trabaje normalmente, o si le permite su vida media la detección en un tiempo razonable, etc.

Una vez identificado el radionucleido (y por tanto conocido el porcentaje de emisión para la línea de energía en cuestión) dado que la eficiencia tiene unidades de cuentas/gamma para una cierta energía, se calcula su actividad A_c , calculando el área

neta C_n del fotopico y dividiéndola entre el tiempo de conteo T_c , la eficiencia E_f , y el porcentaje de emisión para ese radionucleido de la manera siguiente:

$$A_c = \frac{C_n \text{ (cuentas)}}{T_c \text{ (seg)} \% \text{ (gamas/desintegración)} E_f \text{ (cuentas/gama)}} \quad (3.12)$$

dando como resultado desintegraciones sobre segundo (Bq). Si se desea obtener la concentración de actividad, basta dividir la expresión anterior por el peso o volumen para normalizar las medidas.

Existen actualmente programas de cómputo que realizan el procedimiento anteriormente descrito (de acuerdo al diagrama de flujo de la figura 3.14) y aún mas, calculan actividad con corrección por decaimiento (aún durante el conteo mismo), restando picos de fondo, o hasta resolviendo multipletes. En el caso del análisis para Ra-226, el programa comercial que se empleó presenta el inconveniente de que para resolver multipletes se pide como condición aparte de una excelente calibración en energía, una cierta diferencia en kevs y que las líneas de energía involucradas se encuentran en las bibliotecas de radionucleidos que emplea para la identificación. Y en este caso la energía del Ra-226 (186.2 keV) es muy cercana a la del U-235 (185.7) siempre presente en las muestras ^{17,18}. Por lo tanto, este inconveniente se resolvió usando otra línea de emisión del U-235 como se explica en el capítulo siguiente.

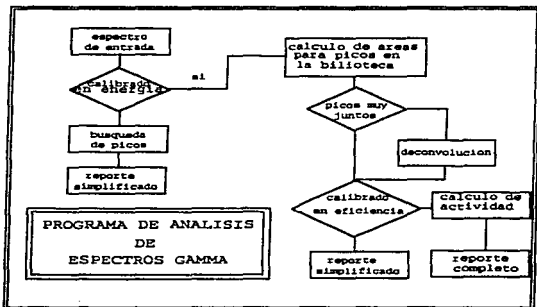


Fig. 3.14. Diagrama de flujo de un programa comercial de análisis de espectros.

CAPITULO IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

1) ANTECEDENTES.

La planta de beneficio de uranio en Villa Aldama, Chihuahua (Figura 4.1), cerró su operación hace 25 años después de funcionar desde 1969 hasta 1971. Como resultado de su operación, en el terreno donde se asentó se acumularon 47 000 toneladas de residuos (llamados estériles de uranio) del proceso de extracción del uranio del mineral. Estos residuos provienen de un proceso químico, el cual en el transcurso de la operación de la planta fue modificado varias veces por lo que la composición química de los estériles también es variable. Los estériles, contienen entre otros Radio-226, el cual por tener una vida media de 1600 años, su tipo de emisión y comportamiento químico son potencialmente peligrosos.

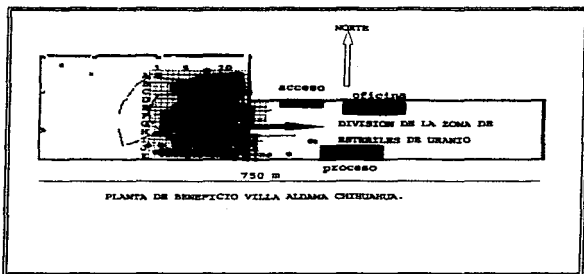


Fig. 4.1. Planta de Beneficio de Uranio en Villa Aldama Chihuahua.
Ubicación de la presa de estériles de uranio que fue descontaminada.

La instalación que perteneció al desaparecido URAMEX (Uranio Mexicano) fue heredada al órgano estatal Fomento Minero, el cual determinó la descontaminación del sitio. Se consideró en un principio la posibilidad de inmovilizar los estériles en su sitio original, idea que fue descartada por varias razones, entre ellas la cercanía de asentamientos humanos y que la presa de estériles se encuentra sobre un acuífero que abastece de agua a la ciudad. Por lo anterior se decidió que los estériles se reubicaran en un lugar con las siguientes características¹⁸:

-Lejanía de los centros de población y lo suficientemente cerca para hacer

económicamente razonable su traslado.

-Poca precipitación y mantos acuíferos con una profundidad que hiciera poco probable la incorporación del Radio 226 a éstos.

Por estas razones se decidió trasladar los estériles a una mina de uranio porque en ese sitio el impacto ambiental sería mínimo³⁷. Se consideró en consecuencia la sierra de Peña Blanca, donde se ubican las minas El Nopal I, Las Margaritas y Puerto III entre otras (Figura 4.2).

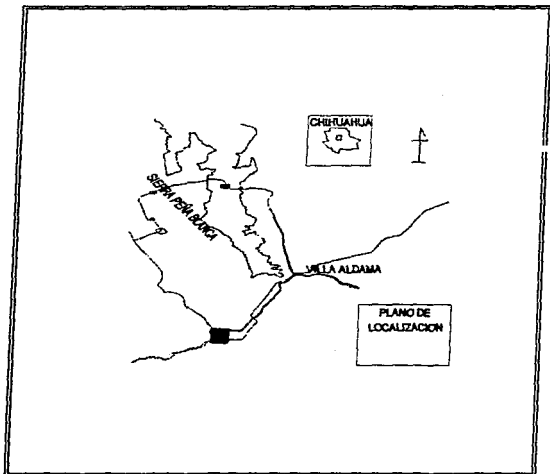


Fig. 4.2. Mapa de localización de la planta de Villa Aldama y Peña Blanca, lugar a donde se trasladaron los estériles de uranio.

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS) que es el órgano regulador en México en materia nuclear, determinó como criterio de descontaminación que la concentración de Ra-226 fuera menor a 185 Bq/Kg (en base seca) en los primeros 25 cm de suelo promediados en 100 m² al retirar los estériles. Por ello fue necesario evaluar durante el retiro del material la concentración de Ra-226.

2) MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS.

Debido a los requerimientos de la CNSNS, se dividió la zona contaminada en cuadros de 10 x 10 m (Figura 4.1) para tomar las muestras de estériles.

Al inicio se contaron y analizaron aproximadamente 10 muestras de material, el cual contenía estériles, fácilmente identificables por su color rosado, para medir el orden del contenido de Ra-226. Posteriormente conforme se retiraba el material de la instalación (Figura 4.3), y aparecían los estériles mezclados con suelo se volvían a tomar muestras para verificar las concentraciones de Ra-226.

El muestreo se hizo tomando de cada cuadro una muestra con peso aproximado de dos kilogramos, teniendo cuidado de no mezclar el material y aplicando procedimientos de protección radiológica para el personal de muestreo. Posteriormente, dichas muestras (del orden de 15 por día) fueron depositadas en bolsas de plástico y etiquetadas con la fecha, ubicación de la toma y nombre del muestreador. Después se llevaron a un laboratorio para su preparación, acondicionamiento y posterior conteo y análisis.

Las muestras se colocaron en una mesa cubierta de plástico y papel absorbente, dejándose secar a temperatura ambiente durante aproximadamente un día. Al igual que durante el muestreo, durante la preparación de las muestras se emplearon procedimientos de protección radiológica para evitar la contaminación del personal.

Se prepararon recipientes marinelli de 0.45 L (Figura 4.4), cubiertos en el interior con una bolsa de plástico, preservando el volumen útil con el objetivo de reusar los recipientes sin necesidad de descontaminarlos.

Secas la muestras se procedió a tamizarlas empleando malla del número 10 (1.68 mm de retícula) y envasarlas en los marinellis, pesándose y etiquetándose para llevarse al laboratorio de conteo y análisis^{22,12}.

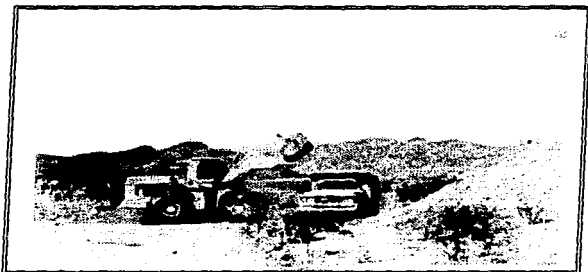


Fig. 4.3. La descontaminación consistió en trasladar los estériles de uranio a la mina en la Sierra de Peña Blanca.

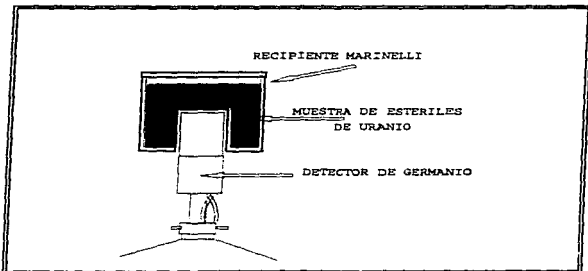


Fig. 4.4. Geometría marinelli. En esta geometría la muestra rodea al detector obteniéndose una buena eficiencia en el conteo.

3) ANÁLISIS DEL ESPECTRO Y CARACTERIZACIÓN DEL Ra-226.

A) Identificación del Contenido Radiológico de los estériles de Uranio.

Se contaron y analizaron inicialmente 27 muestras de las 380 totales, con tiempos de conteo variables desde 3600 hasta 60000 segundos (En la figura 4.5 se muestra un espectro típico colectado). Por el análisis de los espectros gamma de las muestras y la información de origen se identificaron los siguientes radionucleidos (tabla 4.1.)^{16,23,24}.

Energía (keV)	Radionucleido	% de emisión γ /100 desint.
63.3	Th-234	3.9
74.8	Pb-214;- 212	6.3 ; 10.7
77.1	Pb-214;- 212	10.7; 18
83.7	Th-228	1.2
87.04	Pb-214 -212	4,8;8
92.6	Th-234	5,6
143.56	U-235	10.5
154.06	Ra-223	5
163.4	U-235	4.8
186	U-235;Ra-226	54; 3.6
205	U-235	4.7
241.8	Pb-214	7.3
269.4	Ra-223	13.6
271.2	Rn-219	10,6
295.1	Pb-214	18.7
352	Pb-214	36,6
609.4	Bi-214	45
665.6	Bi-214	1.6
768.4	Bi-214	5
786	Bi-214	1.1
806.2	Bi-214	1.2

Tabla 4.1. Contenido radiológico de los estériles de Uranio.

Energía (keV)	Radionucleido	% de emisión γ /100 desint.
934.1	Bi-214	3.2
1001	Pa-234m	0.6
1120.4	Bi-214	15.2
1155.3	Bi-214	1.9
1238	Bi-214	5.9
1377.8	Bi-214	4.8
1460.8	K-40	10.7
1765.7	Bi-214	15.4

Tabla 4.1. (continuación).

La información previa que se tuvo de las muestras analizadas fue:

- Que estaban contaminadas con los residuos de la separación de uranio del mineral original.
- Que el material tenía mas de 20 años acumulado en ese sitio.

Con la ayuda anexa de la información preliminar, de los espectros se confirmó que:

-Había U-238, el cual se localizó por la presencia de sus hijos inmediatos, el Th234, (63.3 y 92.6 KeV) y el Pa-234m (1001 KeV).

-Se identificó la presencia de U-235 (143, 163, 185.7 y 205 keV) y la de sus descendientes el Ra-223 (154.2 y 269.4; 144.2 KeV) y Rn-219 (271.2 KeV).

-Se identificó la presencia de Ra-226 a través de sus descendientes, el Pb-214 (352, 295, 241.9, etc) y el Bi-214 (609.4, 768, etc.).

Cabe señalar que el U-238, llega al equilibrio con sus descendientes el Th-234 y el Pr-234m en un término de días, mientras que ambos por si solos no se mantendrían por su vida media tan corta (24.1 días y 1.1 minutos)⁷.

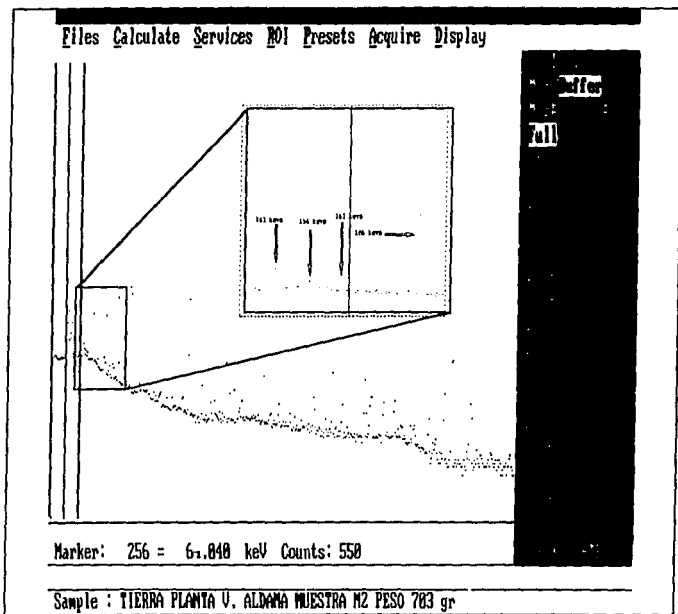


Fig. 4.5. Espectro típico de estériles de uranio, se muestran en detalle los fotopeaks con energías correspondientes al U-235 (143, 163 y 185.7 keV), Ra-223 (154 keV) y Ra-226 (186 keV).

B) Cálculo de Actividad de Ra-226.

Análogamente al caso del U-238 con sus descendientes, la presencia de los hijos del Radio 226, el Pb-214 y Bi-214, (con vida media de 26.8 y 19.9 minutos), además del fotopico de 186 keV en los espectros colectados, confirmó la presencia en las muestras del Ra-226.

Debido a que el Ra-226 es emisor gamma, y su única energía de emisión de 186.2 keV (con un porcentaje de emisión de 3.59 %, las demás no son apreciables por su muy pequeño porcentaje de emisión < 0.1 %) corresponde o se traslapa con la energía de 185.7 keV de U-235, presente en las muestras, para calcular la actividad del Ra-226 es necesario quitar la componente del U-235 en el fotopico doble (doblete). Como el U-235 tiene otras líneas de energía para calcular su actividad, es posible conocida ésta, calcular la parte correspondiente de cuentas netas en la energía de 185.7 keV de U-235 y por tanto conocer las cuentas netas del Ra-226 en 186.2 keV.

Para realizar lo anterior, se empleó el fotopico de 163.4 keV de energía del U-235 debido a que el de 143.7 keV aunque de mayor porcentaje de emisión, tiene una interferencia con el fotopico de 144.2 keV de Ra-223 presente en las muestras.

El cálculo para quitar la componente del uranio del doblete se hizo de la siguiente manera:

Usando la ecuación 3.13 del capítulo 3 para calcular la actividad del U-235, y usando el fotopico de 163 keV.:

$$A_{U-235} = \frac{C_{n_{U-235,163keV}}}{E_{f_{163keV}} \%_{U-235,163keV} T_c} \quad (4.1)$$

con A_c = actividad; C_n = cuentas netas; T_c = tiempo de conteo; % = porcentaje de emisión en gammas/desintegración.

Análogamente para 185.7 keV:

$$A_{U-235} = \frac{C_{n_{U-235,185.7keV}}}{E_{f_{185.7keV}} \%_{U-235,185.7keV} T_c} \quad (4.2)$$

como la actividad es independiente del fotopico empleado, igualando el lado

derecho de 1 y 2 , y despejando las cuentas netas para 185.7 keV:

$$Cn_{U-235_{185.7}} = \frac{Cn_{163} Ef_{185} \%U-235_{185.7}}{Ef_{163} \%U-235_{163}} \quad (4.3)$$

Si se tiene una función f, del tipo $f(x,y,z) = xy/z$; la incertidumbre de f (σ_f) se calcula con la expresión para propagación de incertidumbres en el caso de un producto y/o cociente:

$$\sigma_f = f \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_z}{z}\right)^2} \quad (4.4)$$

donde σ_x ; σ_y ; σ_z ; son las incertidumbres en las variables x, y y z. aplicando la ecuación 4.4 en 4.3 :

donde

$$f = Cn_{U-235_{185.7}} \quad (4.5)$$

Como los porcentajes de emisión tienen una incertidumbre muy pequeña reportada en la literatura , se consideran como una constante y entonces:

$$\sigma Cn_{U-235_{185.7}} = \frac{\%U-235_{185.7}}{\%U-235_{163}} \sigma \left(\frac{Cn_{163} Ef_{185}}{Ef_{163}} \right) \quad (4.6)$$

llamando k a :

$$k = \frac{\%U-235_{185.7}}{\%U-235_{163}} \quad (4.7)$$

y

$$\sigma \left(\frac{Cn_{163} k e v s Ef_{185}}{Ef_{163}} \right) = \sqrt{\left(\frac{\sigma Cn_{163}}{Cn_{163}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma Ef_{163}}{Ef_{163}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma Ef_{185}}{Ef_{185}} \right)^2} \quad (4.8)$$

Finalmente el área neta para el Radio (186 keV) es igual a :

$$Cn_{Ra-226} = Cn_{186} - Cn_{U-235_{186.7}} \quad (4.9)$$

donde la incertidumbre asociada de acuerdo a la expresión para la incertidumbre de una suma o diferencia:

$$\sigma Cn_{Ra-226} = \sqrt{(\sigma Cn_{186})^2 + (\sigma Cn_{U-235_{186.7}})^2} \quad (4.10)$$

la concentración de actividad para Ra-226 en Bq/Kg:

$$Conc \text{ Activ}_{Ra-226} (Bq/kg) = \frac{Cn_{Ra-226}}{Tc\%_{Ra-226} \cdot Ef_{186} \text{ peso}(kg)} \quad (4.11)$$

la incertidumbre asociada:

$$\sigma Conc \text{ Activ}_{Ra-226} (Bq/kg) = \sigma \frac{Cn_{Ra-226}}{Tc\%_{Ra-226} \cdot Ef_{186} \text{ peso}(kg)} \quad (4.12)$$

$$\sigma Conc \text{ Activ}_{Ra-226} (Bq/kg) = \frac{1}{Tc \%_{Ra-226} \text{ peso}} \sigma \frac{Cn_{Ra-226}}{Ef_{186}} \quad (4.13)$$

y

$$\sigma \frac{Cn_{Ra-226}}{Ef_{186}} = \frac{Cn_{Ra-226}}{Ef_{186}} \sqrt{\left(\frac{\sigma Cn_{Ra-226}}{Cn_{Ra-226}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma Ef_{186}}{Ef_{186}}\right)^2} \quad (4.14)$$

Usando los valores de la eficiencias y porcentajes de emisión de las energías involucradas (U-235: 163 y 185.7 keV y Ra-226 186 keV), de la ecuación de

calibración en eficiencia para geometría marinelli de 0.45 L (ecuaciones 3.11 y 3.12 del capítulo 3) y de la tabla de radionucleidos consultada:
Eficiencia en geometría marinelli para 163 keV = 0.0464.
Eficiencia en geometría marinelli para 186 keV = 0.0425.
Porcentaje de emisión para U-235 en 163 keV = 0.048.
Porcentaje de emisión para U-235 en 186 keV = 0.575.
Porcentaje de emisión de Ra-226 en 186.2 keV = 0.0359

El área neta del U-235 en 185.7 keV resulta ser: $C_n \text{ U-235 (185.7 keV)} = 12.28 \cdot C_n \text{ 163 keV}$.

Debido a que en la literatura varían los porcentajes de emisión hasta casi en un 10 %, para conocer el número de cuentas en el fotopico de 185.7 keV para uranio, se contaron una solución preparada de uranio y material de uranio mezclado con suelo, (tierra) resultando una relación promedio de: $C_n \text{ U-235 (185.7 keV)} = 10.8 \cdot C_n \text{ 163 keV}$.

El cual difiere en un 10 % del valor calculado anteriormente. Se optó por usar éste por ser más confiable.

Y el área neta del Ra-226 se calcula como la diferencia. $C_{\text{tas 186 keV}} - C_n \text{ U-235 (185.7 keV)}$.

El tiempo de conteo necesario para tener espectros estadísticamente adecuados y poder calcular la contribución del U-235 en el fotopico del Ra-226, fue de 3 horas por lo menos. Debido a que se tenían del orden de 15 muestras diarias, un sólo sistema de detección y una jornada laboral de 8 horas, no era posible analizar más de 3 muestras diarias. Se buscó por medio de las primeras muestras (23), algún método para hacer más rápidamente la evaluación del radio. Esto se hizo relacionando la actividad del Pb-214 (hijo del Ra-226) con el Ra-226 como se explica más adelante.

4) RESULTADOS

Los datos (necesarios para la evaluación del Ra-226) de cada uno de los espectros de las primeras 23 muestras contadas, se capturaron en una hoja de cálculo comercial (Quatro Pro). Se insertaron las acuciones correspondientes para calcular las cuentas pertenecientes al Ra-226 y su incertidumbre (Tabla 4.2), para posteriormente calcular la concentración de actividad del mismo (Tabla 4.3). Se hizo el análisis de cada espectro con el programa comercial, obteniéndose los valores (ordenados) de concentración de actividad para el Pb-214 en la tabla 4.3.

no archivo	área cuentas 163 keV	error %	área cuentas 186 keV	error %	área cuentas 185.7 U	área cuentas Ra-226	error %
1	1183	15.5%	16485	1.3%	12776	3708.6	5.3%
2	2603	19.2%	112740	0.5%	28112	84627.6	6.4%
3	697	12.8%	10700	1.3%	7527	3172.4	30.6%
4	4217	12.3%	149323	0.4%	45543	103779.4	5.4%
5	796	22.5%	22228	1.0%	8596	13631.2	14.3%
6	972	13.6%	15911	1.1%	10497	5413.4	26.5%
7	3541	15.1%	147740	0.4%	38242	109497.2	5.3%
8	300	27.7%	10105	1.6%	3240	6865	22.6%
9	7206	10.7%	335620	0.3%	77824	257795.2	3.3%
10	17294	7.4%	882329	0.2%	186775	695553.8	2.0%
11	7156	12.9%	405313	0.3%	77284	328028.2	3.1%
12	663	19.3%	12888	1.3%	7160	5727.6	24.3%
13	467	37.9%	18824	1.2%	5043	13780.4	14.0%
14	652	31.9%	28211	0.9%	7041	21169.4	10.7%
15	8351	12.4%	562220	0.2%	90190	472029.2	2.4%
16	9736	11.0%	569376	0.2%	105148	464227.2	2.5%
17	807	29.4%	28095	1.0%	8715	19379.4	13.3%
18	21980	6.9%	825638	0.2%	237384	588254	2.8%
19	3233	21.7%	229652	0.4%	34916	194735.6	3.9%
20	792	29.4%	35681	0.9%	8553	27127.4	9.3%
21	16544	8.8%	959359	0.2%	178675	780683.8	2.0%
22	681	25.1%	43068	0.8%	7354	35713.2	9.3%
23	16362	12.5%	1388182	0.2%	176709	1211472.4	1.8%

Tabla 4.2. Valores de las áreas netas de los espectros contados. Las áreas de 185.7 y 186.2 fueron calculadas con Q-Pro mientras que la de 163 y 186 fue obtenida con el emulador de multicanal.

Pb-214 (Bq/Kg)	error %	Ra-226 (Bq/Kg)	error %
45	6.0%	44.19152	53.1%
801	6.0%	948.4961	6.4%
826	6.0%	1091.392	30.3%
842	6.0%	1099.16	5.4%
875	6.0%	1211.908	14.1%
920	6.0%	930.9983	26.3%
1129	6.0%	1379.353	5.2%
1610	6.0%	1664.725	22.4%
2413	6.0%	3040.149	8.2%
2517	6.0%	3267.026	8.0%
2940	6.0%	3318.585	9.0%
3391	6.0%	3040.006	24.1%
4387	6.0%	4740.815	13.8%
4460	6.0%	5133.757	10.6%
4612	6.0%	5799.142	8.4%
5307	6.0%	6335.562	9.5%
6380	6.0%	6666.444	13.2%
6430	6.0%	6715.308	9.8%
7240	6.0%	8611.981	9.9%
8139	6.0%	9325.344	9.3%
8765	6.0%	10034.84	8.0%
10032	6.0%	12285.62	9.3%
13687	6.0%	15988.37	8.8%

Tabla 4.3. A partir del área neta calculada para Ra-226, se calcularon las concentraciones de actividad.

A) ANÁLISIS DE RESULTADOS.

De los valores obtenidos en cada muestra de la concentración de actividad para Pb-214 y Ra-226 (valores corregidos restándoles la contribución de U-235), se buscó la relación entre éstos, para lo cual se hizo una gráfica, tomando como variable independiente el valor del Pb-214 y como dependiente el Ra-226 (Figura 4.6).

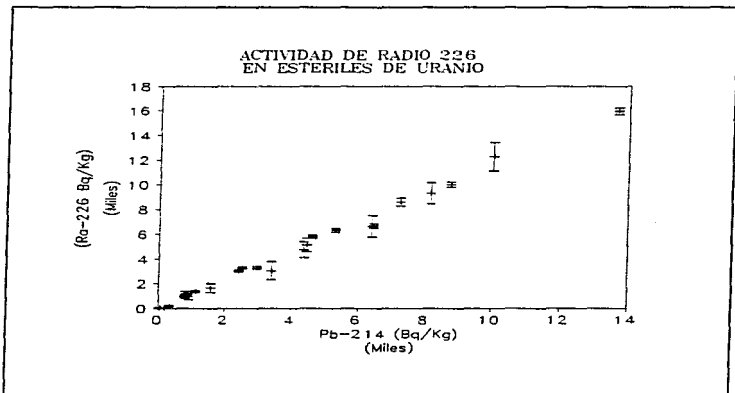


Fig. 4.6. En la gráfica se ilustra la relación entre la concentración de actividad corregida para Ra-226 y su descendiente el Pb-214.

De la observación de la gráfica anterior se aprecia una relación lineal entre las dos variables. Por esto se hizo una regresión lineal dando como resultado la expresión siguiente, ilustrada en la figura 4.7:

$$AC_{Ra-226} \text{ (Bq/Kg)} = AC_{Pb-214} * 1.15 \text{ (Bq/Kg)} \quad (4.15)$$

donde

AC_{Ra-226} = concentración de actividad del Ra-226,

AC_{Pb-214} = concentración de actividad del Pb-214.

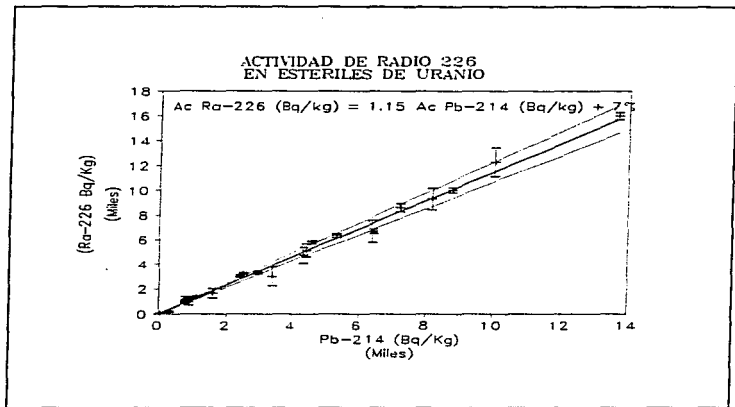


Fig. 4.7. La relación entre el Ra-226 y el Pb-214 resultó ser lineal con una pendiente de 1.15.

Normalizando cada dato experimental a 1 (x_i) y tomando como valor promedio \bar{x} (de la expresión para la desviación estándar ecuación 4.16) el valor ajustado con la ecuación lineal obtenida, se calculó la desviación estándar dando como resultado de 7% la desviación para 95 % de confianza (2σ).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad 4.16$$

CAPITULO V

CONCLUSIONES

1) DISCUSIÓN.

Como la vida media de los hijos del Ra-226 es muy corta con respecto a éste, aplicando las expresiones del apéndice I para el cálculo de actividad del Ra-226 y sus descendientes, resulta que en el término de 25 días se igualan las actividades del Ra-226 y el Pb-214, es decir llegan al equilibrio secular (Figura 5.1). Debido a que el hijo del Ra-226 es el Rn-222 que es gaseoso, dependiendo de donde se encuentre el radio y genere el radón, hay una pérdida de éste que se dispersa en el aire (como sucede en las paredes de las casas habitación).

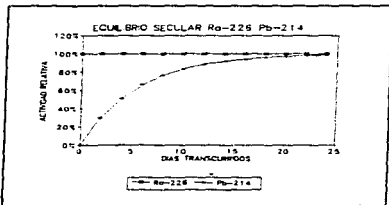


Fig. 5.1. el Pb-214 llega al equilibrio secular con el Ra-226 en aproximadamente 20 días .

Si el radón no se dispersara en el aire, la actividad del Ra-226 sería la misma que la del Pb-214 y entonces calculando la actividad de éste se conocería la del Ra-226. Sin embargo, el estado físico del radón rompe con el equilibrio secular y de antemano se desconoce en que medida o proporción.

Durante su preparación, las muestras de estériles se secan y tamizan, con lo cual se podría pensar que el radón presente en las muestras se dispersa y pierde. Si lo anterior ocurre, entonces el Pb-214 presente en la muestras con una vida media de 19.9 minutos empezaría a decaer más rápidamente que como se genera (Figura 5.1) y en el término de 3 horas casi se extinguiría (llegaría a menos 5 % de su actividad antes del tamizado).

Por otro lado el tiempo necesario para que se genere el radón (e igualar su actividad) como decaimiento indirecto del radio sería de varios días, de acuerdo a la tabla 5.1.

Debido a que el conteo de muestras se realizó en todos los casos por lo menos 3 horas y no más de un día después de su preparación, si el radón se hubiese perdido totalmente durante el tamizado, la cantidad de Pb-214 presente durante el análisis sería del orden del 16 % de la actividad del radio (tabla 5.3, para 24 horas de crecimiento).

h o r a s transcurri- das.	Actividad Ra-226.	Actividad Rn-222. relativa al Ra-226	Actividad Po-218. relativa al Ra-226	Actividad Pb-214. relativa al Ra-226	Actividad Bi-214. relativa al Ra-226
24	100 %	16 %	16 %	16 %	16 %
48	100 %	30 %	30 %	30 %	30 %
72	100 %	40 %	40 %	40 %	40 %
96	100 %	50 %	50 %	50 %	50 %

Tabla 5.1. Crecimiento de la actividad relativa del radón por el decaimiento del Ra-226.

Lo anterior nos indica que durante el tamizado y secado de las muestras sólo se pierde una fracción "pequeña" del radón en una forma "aproximadamente constante" o con poca variación, lo que se ve reflejado en los resultados de la actividad de Pb-214 obtenidos en relación a la actividad de Ra-226 en cada muestra.

Los estudios del escape de radón conocido como "poder de emanación", en sólidos muestran que, éste es bajo en porcentaje respecto al radón generado. En la tabla 5.2 se ilustra el porcentaje de escape en algunos sólidos. Aunque los estériles de uranio no son un sólido (físicamente son polvo), lo anterior nos da una idea de que es congruente el porcentaje de radón que se puede escapar de ellos.

Para suelo se ha encontrado que el incremento en la temperatura y algunas mezclas aumentan el poder de emanación. Esto principalmente atribuido a un efecto superficial, en el que las moléculas de humedad desplazan y disuelven átomos de radón absorbidos²⁹.

material	granito	basalto	cuarzita	roca volcánica	cuarzo
escape de Radón %. producido	15	6	7	1	9

Tabla 5.2. Razones de escape de radón con su producción en algunos sólidos²⁹.

2)CONCLUSIONES.

a) La relación encontrada en el conteo y análisis de las 23 primeras muestras contadas y analizadas permitió conocer la concentración de actividad del Ra-226 conociendo la del Pb-214.

b) La anterior relación se usó para evaluar las restantes 357 muestras, medidas durante el proceso de descontaminación de la instalación.

c) El tiempo de conteo se reduce significativamente evaluando el Ra-226 a través del Pb-214, (con la consecuente reducción de costos) debido a que:

-El Pb-214 (351.9 KeV) no tiene energías interferentes para su evaluación.

-La energía de 351.9 keV del Pb-214 tiene un porcentaje de emisión del 37 %, que comparado con el del Ra-226 (3.28%), es del orden de 10 veces más grande, lo cual hace que tenga fotopicos con un área mucho mayor que la del radio.

-El fondo en el blindaje de Pb-214 es de 2.2 Bq (para la geometría marinelli 4.5 L). El límite inferior de detección para Pb-214 con un tiempo de conteo de 10 minutos es de 4.5 Bq. Comparado con los cientos a miles de Bq de Pb-214 presentes en los estériles, este tiempo de conteo es más que suficiente para su medición y consecuentemente la evaluación del Ra-226 también.

d) El método es confiable y tiene una incertidumbre menor al 10 %, de acuerdo a la dispersión calculada.

e) El empleo de un sistema de análisis de espectros computarizado, permite hacer el almacenamiento, análisis y reporte de los espectros rápidamente (del orden de 5 minutos). Esto hace que se puedan contar y analizar del orden de 32 muestras diariamente. Así se evaluaron las muestras restantes durante la descontaminación con un promedio de 20 muestras diarias analizadas (todas las muestreadas).

f) Los resultados de la medición del Ra-226 en el presente trabajo, se emplearon para el informe final presentado a FIFOMI (Fideicomiso de Fomento Minero) titulado como "Informe Final sobre el traslado y descontaminación radiológica de la planta de Villa Aldama Chihuahua " y que fue presentado a la CNSNS para su consideración.

g) El método se puede emplear en situaciones de contaminación similares.

REFERENCIAS

- 1) **Beiser Arthur**, Conceptos de Física Moderna, Mc Graw Hill, 1977.
- 2) **Glenn F. Knoll**, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Son. N. Y. 1979.
- 3) **Debertin Klaus**, Gamma and x-Ray Spectrometry with Semiconductors Detectors, Physical Science and Engineering Division, North Holland 1988.
- 4) **Bagnall K.W.**, Chemistry of the Rare Radioelements, Academic Inc. Press, New York.
- 5) **Holaday, Rushing, Coleman**, Control of Radon and Daughters in Uranium Mines and Calculation on Biologic Effects, Department of Health, Education and Welfare, U.S.A.
- 6) **Nicholson P.W.**, Nuclear Electronics. John Wiley & Son. London 1974.
- 7) **Evans R.D.**, The Atomic Nucleus, Mc Graw Hill, 1955.
- 8) **IAEA**, Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. International Atomic Energy, Viena 1989.
- 9) **Espinosa Guillermo**, Trazas Nucleares Sólidas, UNAM-IFUNAM 1994.
- 10) **Quintanar Robles L.** Espectrometría Gama para Determinar Uranio, Torio y Potasio en Rocas, Tesis, Fac. de Ciencias UNAM, 1977.
- 11) **Ortec**, Experiments in Nuclear Science, Ortec, Juliode 1976.
- 12) **Dale W. Nix, Power**, Application of Germanium Detectors to Environmental Monitoring, US Environmental Protection Agency. 1979. Washington. D.C.
- 13) **Kocher David**, Radioactive Decay Data Table U. S. Department of Energy, Washington. 1981.
- 14) **Glasstone Samuel**, Source Book on Atomic Energy, Trad. Editorial Continental.
- 15) **U.S. Department of Energy**, DOE Methods for Evaluating Environmental and Waste Management Samples. 1994.
- 16) **S.S. Hussain. Oubelaid, Marchetti**, Sample Collection and Measurement of Soil, Bedrock and Building Materials, Laboratorio Di Misura ENEA-DISP, Rome Italy.

- 17) **Hevery George. Paneth.** A Manual of Radioactivity, Oxford University Press, London.
- 18) **Ralph E. Lapp.** Nuclear Radiation Physics. Prentice Hall. Inc. N.J. 1963.
- 19) **Beers Yardley,** Introducción a la Teoría de los Errores, Editorial ETHA, Buenos Aires.
- 20) **Faires R.A. Parks,** Radioisótopos, Técnicas de Laboratorio. Editorial Universitaria de Buenos Aires. 1960.
- 21) **Bevington Phillips,** Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, Mc Graw Hill.
- 22) **UNAM, CFE, ININ,** Determinación de Radionucleidos en Alimentos, México 1990.
- 23) **Cernushi Felix. Greco,** Teoría de Errores en Mediciones, Editorial Universitaria de Buenos Aires. 1968.
- 24) **ANSI,** Calibration and Usage of Germanium Detectors for Measurement of Gamma Rays emission of Radionuclides, US, 1978.
- 25) **CEDEX,** Curso de Medición de Radiactividad Ambiental, Madrid 1978.
- 26) **Martinez Lobo Antonio.** Determinación de Radio 226 por Espectrometría Gama. Centro de Investigaciones Energéticas, medioambientales y Tecnológicas. Madrid 1988.
- 27) **Richard Blanchard; U.S. Department of Health, Education, and Welfare.** An Emanation System for Determining small Quantities of Radium-226. Washington 1964. Public Health Service.
- 28) **Sergio Bazan Barrón.** Génesis y Deposición de los Yacimientos de Molibdeno y Uranio, en el Distrito de Villa Aldama, Chihuahua. Sociedad Geológica Mexicana. México 1978.
- 29) **IAEA,** The Environmental behaviour of Radium. International Atomic energy, Viena 1990.
- 30) **Bradley H. Turk, Jed Harrison.** Developing Soil Gas and Entry Potentials for Substructure Surfaces and Assesing Rn-222 Control Diagnostic Techniques. Health Physics Society, vol 59. No 4. Pergamon Press. U.S. 1990.

31) **H.Mao , Y. Pan, R. Li.** Remediation of Inactive Mining & Milling Sites. Bureau of Safety Protection and Health, China National Corporation Republic of China. China 1990.

32) **H.L. Scoth, K. W. Marlow.** Gamma-Ray Emission Probabilities of the daughters of U-238. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A286 (1990) 549-555. North Holland.

33) **Kevin M. Miller, Peter Shebell, G.A.K.** In Situ Gamma-Ray Spectrometry for The Measurement of Uranium In Surface Soils. Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy, 376 1994. Health Phisycs Society N.Y. U.S.

34) **K.Siemon, R.A. Sterlund, J.Van Aarle.** A New Measurement of the Gamma-Ray Intensities of Pa-234m Accompanying The Decay of U-238. Appl. Radiation Isotope Vol 43 No 7 pp 873-880, 1992. Great Britain.

35) **Lin W.J. and Harbottle G.** Gamma Ray Emission Intensities of Ra-226 in Equilibrium With Its Daughter Products. J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. 153,137. 1991.

36) **Sergio Ajuria Garza.** Presentación de Informes Técnicos sobre Trabajos Experimentales. México 1975.

37) **M.A. Ruiz, Gustavo Molina, Arturo Angeles, Vidal Rojas.** Experiencia en el Proceso de Traslado y Almacenamiento de Estériles de Uranio de la Ciudad de Aldama a la Sierra de Peña Blanca, en el Estado de Chihuahua, México. III Congreso Regional sobre Seguridad Radiológica y Nuclear, Cusco (Perú). 1995.

38) **Espinosa, G. Silva, R.J.** Cr-39 Nuclear Track Detector for Identification Of Pu-239 and Am-241 Alpha Contamination. J. of Radioanal. and Nuclear Chem. vol. 194,185 (1995).

39) **Espinosa, G, Meyer , K, Gammage, R, B.** Soil Measurements by Nuclear Track Detectors Radiation Measurements. Vol. 25, 347 (1995).

40) **Espinosa G.** The Applications of Nuclear Track Detectors in Transuranic Contamination Problems. Radiation Measurements. vol. 25, 347 (1995).

APENDICE 1

CALCULO PARA OBTENER LA ACTIVIDAD DE LOS DESCENDIENTES DEL RADIO 226 HASTA EL Pb-214.

Sea N_1 el número de átomos de Ra-226, luego la velocidad con la que decae o actividad es:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda N_1 \quad (1)$$

para su hijo inmediato la velocidad con la que se produce es igual a con la que decae el Ra-226 y se extingue con la suya propia:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (2)$$

multiplicando ambos miembros por $\exp(\lambda_2 t)$:

$$\exp(\lambda_2 t) \frac{dN_2}{dt} + \exp(\lambda_2 t) \lambda_2 N_2 = \exp(\lambda_2 t) \lambda_1 N_1 \quad (3)$$

de donde

$$d \frac{N_2 \exp(\lambda_2 t)}{dt} = \exp(\lambda_2 t) \lambda_1 N_1 \quad (4)$$

usando para N_1 la expresión del decaimiento radiactivo, considerando que al tiempo $t=0$ $N_1=N_{10}$:

$$d \frac{N_2 \exp(\lambda_2 t)}{dt} = \exp(\lambda_2 t) \lambda_1 N_{10} \exp(-\lambda_1 t) \quad (5)$$

re-arreglando e integrando ambos miembros:

$$\int d(N_2 \exp(\lambda_2 t)) = \lambda_1 N_{10} \int \exp((\lambda_2 - \lambda_1) t) dt \quad (6)$$

$$N_2 \exp(\lambda_2 t) = \frac{\lambda_1 N_{10} \exp((\lambda_2 - \lambda_1) t)}{\lambda_2 - \lambda_1} + C \quad (7)$$

para encontrar el valor de la constante de integración al $t=0$:

$$N_1 = N_{10}; N_2 = N_{20}; N_3 = N_{30}; N_4 = N_{40} \quad (8)$$

aplicando el hecho de que la vida media del Ra-226 es mucho mayor que la del Rn-222, y por tanto la constante de desintegración de éste último es mucho mas grande que la del primero:

$$(\lambda_2 - \lambda_1) \approx \lambda_2 \quad (9)$$

$$C = N_{20} - \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2} \quad (10)$$

sustituyendo el valor de C en la ecuación N:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_{10}}{\lambda_2} (1 - \exp(-\lambda_2 t)) + N_{20} \exp(-\lambda_2 t) \quad (11)$$

para N3:

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3 \quad (12)$$

multiplicando ambos miembros por $\exp(\lambda_3 t)$:

$$\exp(\lambda_3 t) \frac{dN_3}{dt} + \exp(\lambda_3 t) \lambda_3 N_3 = \exp(\lambda_3 t) \lambda_2 N_2 \quad (13)$$

de donde

$$\frac{d(N_3 \exp(\lambda_3 t))}{dt} = \exp(\lambda_3 t) \lambda_2 N_2 \quad (14)$$

sustituyendo la expresión anteriormente encontrada para N_2 :

$$d(N_3 \exp(\lambda_3 t)) = \exp(\lambda_3 t) \lambda_2 \left(\lambda_1 \frac{N_{10}}{\lambda_2} (1 - \exp(-\lambda_2 t)) + N_{20} \exp(-\lambda_2 t) \right) dt \quad (15)$$

reordenado, y usando el hecho de que:

$$(\lambda_3 - \lambda_2) = \lambda_3 \quad (16)$$

se integra:

$$\int d(N_3 \exp(\lambda_3 t) - \lambda_2 N_{20}) \int \exp((\lambda_3) t) dt \quad (17)$$

de donde:

$$N_3 \exp(\lambda_3 t) = \frac{\lambda_2 N_{20}}{\lambda_3} \exp(\lambda_3 t) + C \quad (18)$$

se encuentra el valor de la constante de integración para el tiempo $t=0$ y :

$$N_3 = \frac{N_{20} \lambda_2}{\lambda_3} (1 - \exp(-\lambda_3 t)) + N_{30} \exp(-\lambda_3 t) \quad (19)$$

Para el tercer descendiente:

$$\frac{dN_4}{dt} = \lambda_3 N_3 - \lambda_4 N_4 \quad (20)$$

procediendo de manera análoga al anterior pero considerando que la vida media del anterior y éste son del mismo orden:

se llega a:

$$N_4 = \frac{\lambda_2 N_{20}}{\lambda_4} (1 - \exp(-\lambda_4 t)) + \frac{\lambda_2 N_{20}}{\lambda_4 - \lambda_3} (\exp(-\lambda_4 t) - \exp(-\lambda_3 t)) + \frac{\lambda_3 N_{20}}{\lambda_4 - \lambda_2} (\exp(-\lambda_3 t) - \exp(-\lambda_2 t)) + N_{40} \exp(-\lambda_4 t) \quad (21)$$

luego para conocer la actividad de cada uno de ellos para el tiempo que se desee, simplemente se obtiene el número de átomos en ese tiempo y se multiplica por la constante de decaimiento correspondiente:

$$A_1 = N_1 \lambda_1; A_2 = N_2 \lambda_2; A_3 = N_3 \lambda_3; A_4 = N_4 \lambda_4. \quad (22)$$