

50  
2y'



# Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE CIENCIAS

Análisis de Contaminantes Radioactivos y  
Presencia del Radón y Productos de  
Decaimiento en Materiales de  
Construcción.

TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
F I S I C O  
P R E S E N T A  
CARLOS ERNESTO OROZCO DE LA GARZA

**FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

ANALISIS DE CONTAMINANTES RADIOACTIVOS  
Y PRESENCIA DEL RADON Y PRODUCTOS DE DECAIMIENTO  
EN MATERIALES DE CONSTRUCCION

INDICE

INTRODUCCION	0
CAPITULO I	4
FISICA DE RADIACIONES	
1.1.- Origen de la Radiación Nuclear .....	4
1.2.- Interacción de la Radiación con la Materia .....	11
1.3.- Equilibrio y Cadenas Radiactivas .....	20
CAPITULO II	33
ANALISIS	
II.1.- Metodología .....	33
II.2.- Espectroscopía gamma .....	38
II.3.- Determinación del Radón y sus Emanaciones de los Materiales .....	62

II.4.- Cálculo de las Curvas de Isodosis Correspondientes a una habitación por Gammas.....	66
II.5.- Cálculo de Contaminación de Radón en un Adulto .....	71
II.6.- Efectos Biológicos por Exposición por Gammas y por Radón .....	73
CAPITULO III	
RESULTADOS	
III.1.-Análisis comparativo de contaminantes radiactivos en materiales de construcción con otros países .....	77
III.2.-Conclusiones.....	80
APENDICE A	
Tablas y gráficas de los materiales analizados.....	83
APENDICE B	
Programas de Cálculo .....	136
BIBLIOGRAFIA	153

# INTRODUCCION

La medición de la radiación ionizante es un aspecto importante desde el descubrimiento de Becquerel. (24)

Actualmente se sabe que gran parte de la radiación recibida por el humano es debida a un proceso natural del medio ambiente.

Un individuo está expuesto a radiación cósmica, radiación gamma, a su propia radiación interna, a exposiciones por diagnóstico médico y eventualmente a exposiciones accidentales, (11) como se observa en la figura 1.1.

En este caso hay que remarcar la idea de que el "hombre", ha estado expuesto a casi todas estas radiaciones, durante miles y miles de años de la evolución de la tierra; de aquí la importancia de medir y evaluar cada una de ellas.

En este trabajo se presentan los siguientes objetivos:

- 1.- Determinar experimentalmente los elementos radiactivos naturales contenidos en los materiales más usados de construcción.
- 2.- Calcular teóricamente la exposición producida por estos materiales en una habitación modelo; realizando un mapeo del cuarto y obteniendo las curvas de nivel para un plano parale

lo al piso, localizado a la mitad de la sutura de la habitación. (curvas de isodosis)

- 3.- Calcular teóricamente las emanaciones de radón para la misma habitación.

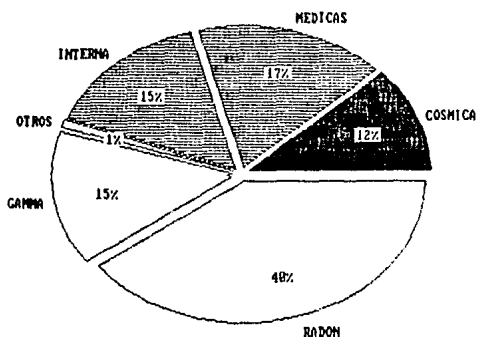


Figura 1.1 Relación porcentual de la radiación ambiental. <sup>(11)</sup>

En el punto 1; para la determinación de los elementos radiactivos contenidos en los materiales de construcción, se utilizó el método de espectroscopia gamma con el cual, dada una calibración, se pueden medir las energías y las actividades de las emisiones gamma producidas por los elementos radiactivos.

Para el punto 2; se diseña una habitación tipo, con materiales de uso común para la construcción, ( cemento, arena, tabique y yeso ) realizan-

do un cálculo teórico de la radiación ionizante, producidos por estos materiales; siendo esto importante si consideramos que el ser humano ha pasado su vida habitando originalmente en cavernas y posteriormente en construcciones, en donde estará expuesto a radiaciones naturales producidas por los propios materiales.

Finalmente conociendo las energías y las actividades para cada uno de los elementos, se calculan teóricamente las curvas de isodosis y las emanaciones de radón para una habitación tipo.

## CONTENIDO DE LA TESIS.

Este trabajo esta dividido en tres partes, en la primera se hace una breve referencia al descubrimiento de la radiactividad y a las investigaciones que permiten explicarla como un fenómeno nuclear. Se enuncian algunos efectos corpusculares de la radiación, se estudia la interacción de la radiación gamma con la materia, los distintos decaimientos y las cadenas de transformaciones a que dan lugar; siendo estos los aspectos fundamentales para el entendimiento de este trabajo.

En la segunda parte se explica el método seguido para la determinación del contenido de elementos radiactivos en los materiales de construcción, se detalla la instrumentación, así como la calibración para la obtención de las energías y actividades de las emisiones gamma observadas para cada material, y así determinar los diferentes isótopos contenidos en los materiales.

Se realiza el cálculo de las curvas de isodosis y se determinan las emanaciones de radón a partir de la información obtenida.

En la tercera parte se muestran los resultados y su comparación con los de otros países.

Por último se presentan las conclusiones de este trabajo y se agregan algunas recomendaciones.

Además en este trabajo se presentan dos apéndices.

El A contiene las gráficas y tablas de los materiales estudiados que nos permiten analizar el número de elementos radiactivos, sus energías gamma y sus actividades para cada material.

El B contiene los tres programas de cálculo que se desarrollaron para la elaboración de este trabajo:

- a).- El primero para la elaboración de gráficas.
- b).- El segundo para la obtención de las energías y las actividades para las emisiones gamma observadas.
- c).- El último calcula las curvas de isodosis.



# CAPITULO I

## ORIGEN DE LA RADIACION NUCLEAR

En el año de 1896 A. E. Becquerel, en el curso de sus investigaciones del fenómeno de la fluorescencia, descubrió incidentalmente que las sales de uranio ennegrecían las placas fotográficas; esto ocurrió al guardar una placa junto con un paquete de sulfato doble de uranio y potasio. Interesado en este fenómeno, pronto descubrió que el mismo ocurría con cualquier compuesto de uranio. Esta radiación se mostró capaz de atravesar el papel, el cartón y hasta láminas delgadas; producía además cargas eléctricas al atravesar el aire.

Marie Sklodowska y Pierre Curie, continuaron las investigaciones realizadas por Becquerel y encontraron que existían minerales de torio que tenían las mismas características, además descubrieron dos nuevos

elementos a los que llamaron Polonio y Radio.

Posteriormente los trabajos de Ernest Rutherford lograron establecer que existían tres clases de radiaciones: <sup>(24)</sup>

- "Rayos"  $\alpha$  ( alfa ): cuya carga es dos veces la del electrón, pero de signo positivo. Su masa es cuatro veces la masa del átomo de hidrógeno. También se les llama partículas alfa, que se identifican con núcleos de Helio.
- "Rayos"  $\beta$  ( beta ): fueron identificados como electrones, que se desplazan a velocidades cercanas a la de la luz.
- "Rayos"  $\gamma$  ( gamma ): capaces de atravesar placas metálicas gruesas, en tanto que las partículas  $\alpha$  y  $\beta$  se detienen al interponer en su camino unos centímetros de metal. Los rayos gamma también ionizan el aire que atraviesan. Se ha demostrado que la radiación gamma son ondas electroelectromagnéticas.

A este fenómeno de emisión de un elemento se le llamó radiactividad. Los experimentos de dispersión de Ernest Rutherford, permitieron construir un modelo del átomo, el cual consiste en un núcleo pequeño que concentra la mayor parte de la masa de aquel y de electrones que gravitan en torno del núcleo, las órbitas de los electrones se encuentran a gran distancia del núcleo. Investigaciones posteriores demostraron que el núcleo está compuesto por partículas: los protones y neutrones, conocidos como nucleones. Cada átomo se caracteriza por su número atómico  $Z$  y su masa atómica  $A$ . Los isótopos son núcleos que tienen el

mismo número atómico y diferente número de masa A. Los elementos están constituidos por diversas proporciones de sus isótopos.

El núcleo, formado por protones y neutrones, porta una carga eléctrica neta  $+Ze$ . Parecería que la masa del núcleo debiera ser la suma de las masas de los protones y de los neutrones, sin embargo resulta que la masa del núcleo es menor que la suma de las masas de los protones y neutrones que lo integran. La explicación de esta diferencia radica en que, cuando los protones y neutrones se combinan para formar un núcleo estable, algo de masa desaparece en forma de energía liberada; esta transformación de masa en energía esta gobernada por la expresión de Einstein:

$$E = mc^2 \quad (1.1)$$

Esto es, un núcleo estable posee una masa menor que la suma de las masas de sus componentes por separado, además no existe ninguna forma de agrupación de nucleones que partiendo de un número inicial de protones y neutrones, puedan pasar a otra agrupación cuya masa sea menor; en el caso de un núcleo inestable esto último no es así y existen agrupaciones de nucleones a los que puede pasar el núcleo, como se ilustra en la figura I.1.1 y por esta razón existe una probabilidad de que el núcleo emita partículas alfa o beta y se transforme en otro núcleo menos inestable o en un núcleo estable.

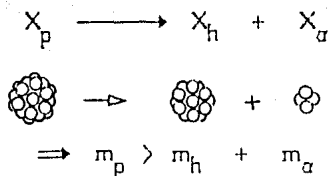
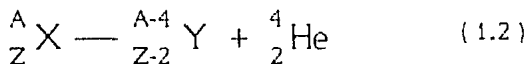


Figura 1.1.1 Algunas posibles formas de desintegración de un elemento.

### DESINTEGRACION ALFA

La desintegración alfa consiste en la emisión de una partícula alfa de un núcleo padre X, quedando como resultado un núcleo hijo Y; esto es,



utilizando el principio de conservación de la masa-energía y la relación (1.1) se puede escribir:

$$m_x c^2 = m_y c^2 + m_\alpha c^2 + E_y + E_\alpha \quad (1.3)$$

donde a  $E_y$  y  $E_\alpha$  son las energías cinéticas tanto del núcleo hijo como de la partícula alfa y considerando que el núcleo padre se encuentra en reposo, la conservación del momento lineal requiere que:

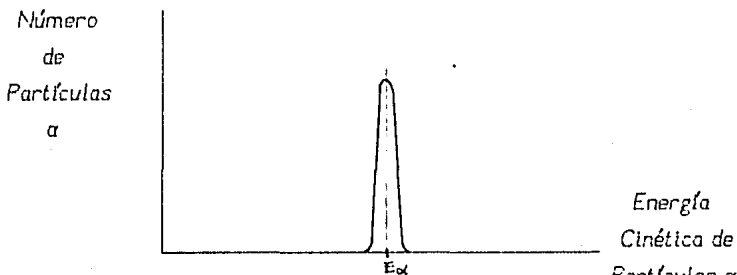
$$m_\alpha v_\alpha = m_y v_y \quad (1.4)$$

$$E_y = \left\{ \frac{4}{A-4} \right\} E_\alpha \quad (1.4a)$$

a partir de la expresión ( 1.3 ) se obtiene

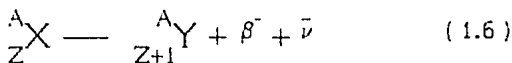
$$E_{\alpha} = \left\{ \frac{A-4}{A} \right\} [ m_x - m_y - m_{\alpha} ] c^2 \quad ( 1.5 )$$

que es la energía cinética de la partícula alfa, esta expresión muestra que las partículas alfa emitidas son monoenergéticas. (ver figura)



## DESINTEGRACION BETA

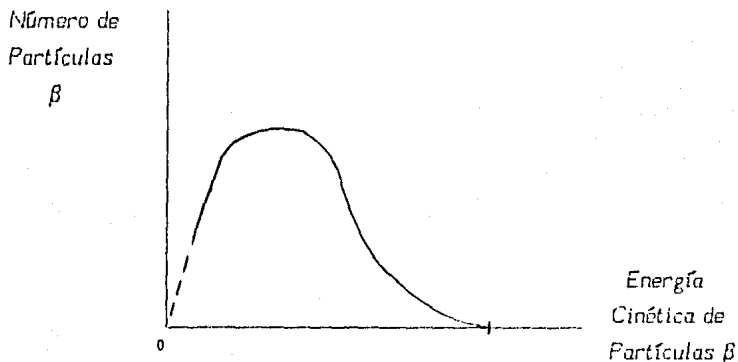
La desintegración beta consiste en la emisión de una partícula beta, esto es, un neutrón decae a un protón emitiendo un electrón, acompañado por un antineutrino, esto es:



donde  $\bar{\nu}$  es un antineutrino. por el principio de conservación de la masa-energía y la relación ( 1.1 ) se obtiene

$$m_x c^2 = m_y c^2 + E_\gamma + E_{\beta^-} + E_\nu \quad (1.7)$$

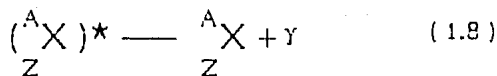
Con un análisis adecuado, se verifica que el espectro de energía de los electrones tiene una distribución continua con un corte bien definido.



Gráfica 1.1.3 Espectro de un emisor beta

### DECAIMIENTO GAMMA

Por lo general, los decaimientos alfa y beta, van acompañados por el decaimiento gamma; cuando un núcleo decae emitiendo ya sea una partícula alfa o ( $\gamma$ ) una beta, se transforma en otro núcleo de otro elemento y en general queda en un estado excitado, que decaerá a un estado menos excitado o al estado base, emitiendo un fotón, esto es:



donde el asterisco indica un núcleo excitado y la energía del fotón es:

$$h\nu = E^* - E \quad (1.9)$$

donde  $E^* - E$  es la diferencia de energía entre los dos estados. El decaimiento por radiación gamma está gobernado por la conservación del momento lineal y por la conservación de la masa-energía.

## INTERACCION DE LA RADIACION CON LA MATERIA

### INTERACCION DE PARTICULAS CARGADAS CON LA MATERIA

La interacción de partículas cargadas, con la materia es de importancia fundamental en la radiación ionizante, ya que se hace posible la medición de ésta.

Las interacciones electromagnéticas de partículas cargadas con la materia se clasifican en tres principales:

- a) Colisiones con los electrones atómicos.
- b) Radiación de frenado. (Bremsstrahlung)
- c) Dispersión elástica.

Cuando partículas cargadas atraviesan la materia chocan con los electrones atómicos y dan lugar a excitación e ionización de los átomos; en ciertas colisiones los electrones son expulsados del átomo con una considerable energía; si la energía transferida a los electrones en la colisión es grande en comparación con la energía de amarre, el electrón puede



considerarse libre.

Cuando los electrones son desacelerados en el campo de un núcleo emiten radiación electromagnética; la emisión de estos fotones, radiación de frenado, está relacionada con la deflexión de la trayectoria de la partícula incidente. En otras palabras el efecto de Bremsstrahlung se puede considerar como un efecto fotoeléctrico inverso, se crea un fotón cuya energía e impulso viene de la colisión de un electrón y un núcleo.

Las partículas cargadas al atravesar la materia sufren procesos de dispersión con el campo electromagnético del núcleo, la pérdida de energía de la partícula incidente ocasionada por la gran masa del núcleo, es pequeña y la radiación emitida en el proceso puede despreciarse.

## INTERACCION DE LA RADIACION GAMMA CON LA MATERIA

Se da el nombre de emisión gamma, a una radiación electromagnética cuya energía se libera al pasar los núcleos de los átomos de un estado excitado al fundamental o a otro menos excitado. Las emisiones gamma son radiaciones electromagnéticas de alta frecuencia y cuya energía es del orden de 0.001 - 3.00 Mev.

La acción de la radiación gamma sobre la materia, se traduce en la producción de partículas cargadas. Esta producción de partículas, generalmente electrones, proviene de la ionización de los átomos; los electrones originados de tal ionización adquieren energía suficiente para realizar más ionizaciones en otros átomos, y es precisamente la interacción de estas partículas con el medio lo que produce la transferencia de energía de la radiación a la materia.

La radiación gamma interactúa con la materia principalmente a través de tres procesos:

- 1) Efecto Fotoeléctrico.

- 2) Dispersión Compton.
- 3) Efecto de Producción de Pares.

## EFECTO FOTOELECTRICO

La radiación electromagnética posee una doble naturaleza: onda-corpusculo. Por un lado posee propiedades ondulatorias que se manifiestan en los fenómenos de interferencia, difracción, polarización, etc., por otro, se comporta como un flujo de partículas, fotones sin masa en reposo, que se desplazan a la velocidad de la luz en el vacío. Esto ocurre en los procesos de emisión y absorción de la radiación. La energía  $E$  de un fotón y su momento  $P$  para su correspondiente onda electromagnética de frecuencia  $\nu$  son:

$$E = h\nu \quad \text{y} \quad P = \frac{h\nu}{c} \quad (1.10) \text{ y } (1.10a)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $h$  la constante de Planck.

Los fotones se originan cuando los átomos, moléculas, iones y núcleos atómicos pasan de estados excitados a estados de menor energía, al frenar partículas cargadas y en la aniquilación de partículas.



Figura 1.2.1 . Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico se presenta al interaccionar fotones con los electrones de los átomos. Al interaccionar un fotón con uno de los electrones de un átomo, la energía  $h\nu$  del fotón es absorbida completamente por el electrón, adquiriendo éste suficiente energía para escapar del átomo obteniendo una energía cinética  $E_c$ .

Del principio de conservación de la energía se desprende la ley del efecto fotoeléctrico la cual es

$$E_c = h\nu - W \quad (1.11)$$

donde  $W$  es la energía necesaria para expulsar un electrón del átomo.

De acuerdo con los principios de conservación de la energía y del momento, los electrones libres no pueden absorber fotones, y el efecto fotoeléctrico sólo puede ocurrir en los electrones ligados a los átomos.

La máxima velocidad adquirida por los electrones emitidos depende de la frecuencia de los fotones incidentes.

Para cada átomo existe una frecuencia umbral que es  $\nu_0 = \frac{W}{h}$ , para la emisión de electrones.

## EFFECTO COMPTON

Se denomina efecto Compton a la interacción de un fotón con un elec-

trón libre, dando como resultado, el intercambio de energía povocando una disminución de la energía del fotón incidente y un aumento en la energía del electrón dispersado.

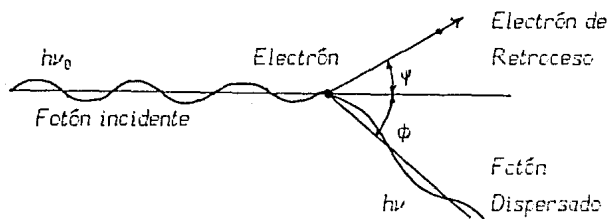


Figura 1.2.2 Efecto Compton.

La fórmula que da la frecuencia del fotón después de desviarse es

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + \frac{h\nu_0}{m_0c^2}(1 - \cos\phi)} \quad (1.12)$$

Como se observa la variación de la longitud de onda depende del ángulo  $\phi$  de deflexión del fotón y alcanza su valor máximo para la deflexión de  $180^\circ$ .

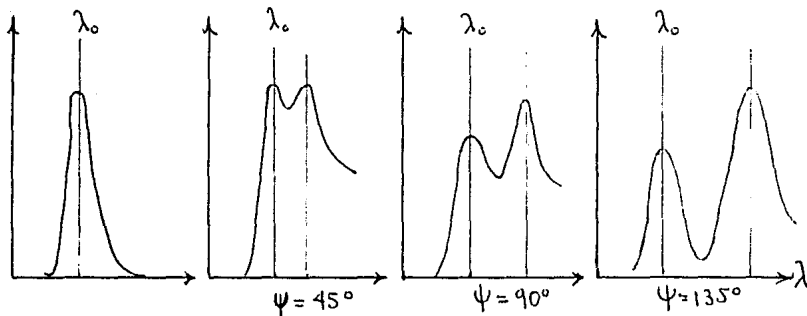
El electrón dispersor, que ha adquirido cierta velocidad al chocar con el fotón, se denomina electrón de retroceso. La energía cinética del electrón de retroceso es

$$E = h\nu_0 - \frac{h\nu_0}{1 + \epsilon(1 - \cos\phi)} \quad (1.13)$$

donde  $\epsilon = \frac{h\nu_0}{m_0c^2}$ , el valor máximo se alcanza cuando  $\phi = 180^\circ$  siendo  $\psi = 0^\circ$

$$E_{\max} = h\nu - \frac{h\nu_0}{1+2\epsilon} \quad (1.14)$$

la longitud de onda tiene un comportamiento que se muestra en seguida.



Grafica 1.2.1 Dispersión Compton de un fotón por un electrón en reposo. Las gráficas muestran el corrimiento de la radiación proveniente del molibdeno, dispersada por carbón.

### EFFECTO DE PRODUCCION DE PARES

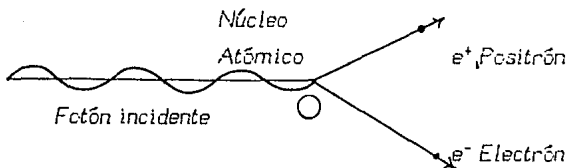


Figura 1.2.3 Efecto de producción de pares

La producción de pares consiste en la conversión de un fotón en un electrón y un positrón, este proceso sólo ocurre en las cercanías de partículas cargadas, principalmente núcleos atómicos. El fotón desaparece y en su lugar aparece un par electrón-positrón, cuya energía es:

$$h\nu = (E_{e^-} + mc^2) + (E_{e^+} + mc^2), \quad (1.15)$$

donde  $E_{e^-}$  y  $E_{e^+}$  son las energías cinéticas del electrón y del positrón respectivamente,  $\nu$  es la frecuencia del fotón; en la expresión anterior se observa que la mínima energía del fotón para la formación del par es la correspondiente a la energía de la suma de las masas de las dos partículas.

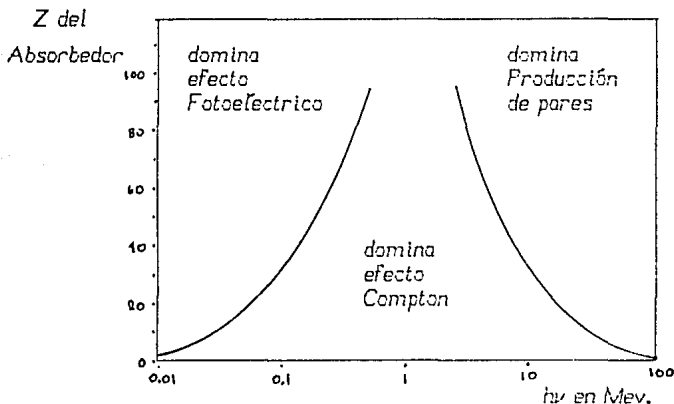
Debido esencialmente a estos tres fenómenos la radiación electromagnética sufre a lo largo de su trayectoria en un medio una atenuación de su intensidad, cuya variación al atravesar un espesor  $x$  de un medio viene dada por:<sup>(4)</sup>

$$I = I_0 e^{-\mu_0 x}, \quad (1.16)$$

donde  $I_0$  es la intensidad en  $x = 0$  y la cantidad  $\mu_0$ , característica del medio, se llama coeficiente total de atenuación, este coeficiente representa la probabilidad de interacción con el medio; cada uno de los efectos explicados con anterioridad tiene una probabilidad de ocurrencia, así de esta forma, la probabilidad de interacción en el efecto fotoeléctrico es de  $\tau$ , en la dispersión Compton es  $\sigma$  y en el efecto de producción de pares es  $\kappa$  y de esta manera se tiene que:

$$\mu_0 = \tau + \sigma + \kappa$$

( 1.17 )



Gráfica 1.2.2 Muestra la importancia relativa de las tres interacciones con relación a la energía  $h\nu$  del fotón en un intervalo de energías de 0.01 a 10.0 Mev., y el número atómico del material absorbente.

El estudio de los procesos de interacción de la radiación con la materia es fundamental, ya que debido a este comportamiento se hace posible su detección.

Como se observa de la gráfica 1.2.2 el efecto que más predomina para las energías de .05 a 1.5 Mev. es el fotoeléctrico y es precisamente este el observado en la experimentación.



## EQUILIBRIO Y CADENAS RADIACTIVAS

A la transformación espontánea de los isótopos inestables de un elemento químico en isótopos de otro elemento, acompañada de la emisión de partículas se la conoce como radioactividad; esta transformación espontánea está regida por la ley

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.18)$$

donde  $N_0$  es la cantidad de núcleos que hay en el volumen dado en el instante  $t = 0$ ,  $N$  la cantidad de núcleos que hay en este mismo volumen en el instante  $t$ , y  $\lambda$  la constante de desintegración. La constante de desintegración viene siendo, propiamente dicho, la probabilidad de desintegración de un núcleo en un segundo. Para caracterizar la inestabilidad de los núcleos en la desintegración se utiliza el concepto de vida media  $T_{\frac{1}{2}}$ , que es igual al tiempo que tarda en desintegrarse la mitad del número inicial de núcleos, en otras palabras:

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1.19)$$

la inestabilidad de los núcleos se incrementa, en termino medio, al au-

mentar el número másico, la radiactividad natural de los núcleos ligeros y medios es un fenómeno poco común; entre los átomos pesados, número másico mayor a 200, la radiactividad es un fenómeno casi general, esto se debe principalmente a que la fuerza de repulsión coulombiana empieza a tomar importancia en el núcleo atómico. Estos núcleos forman tres familias, series o cadenas radiactivas naturales y una artificial, tales series son: la del Uranio  $U^{238}$ , la del Torio  $Th^{232}$ , la del Actinio  $U^{235}$  y la del Neptunio  $Np^{237}$ , que se obtiene artificialmente; los números másicos de los miembros de cada una de las familias radiactivas vienen caracterizados por la fórmula:

$$A = 4n + a \quad (1.20)$$

donde  $n$  es un número entero,  $a = 0$  para la serie del Torio,  $a = 1$  en la serie del Neptunio,  $a = 2$  en la serie del Uranio y  $a = 3$  en la serie del Actinio; cada uno de estos núcleos mencionados, pasan por medio de transformaciones o desintegraciones sucesivas alfa y beta, para terminar en un núcleo estable el cual para la familia del Torio es  $Pb^{208}$ , para la del Neptunio es  $Bi^{209}$ , para el Uranio  $Pb^{206}$  y para el Actinio  $Pb^{207}$ . ( ver figuras 1.3.1 y 1.3.2 )

## DECAIMIENTO RADIATIVO EN SERIE

Primeramente estudiaremos el caso de tener un elemento A que decae a un elemento B y este a un elemento C; ya realizado este análisis, explicare el caso general para el decaimiento radiactivo en una familia. Se estudia el caso simple para llegar al caso general más fácilmente.

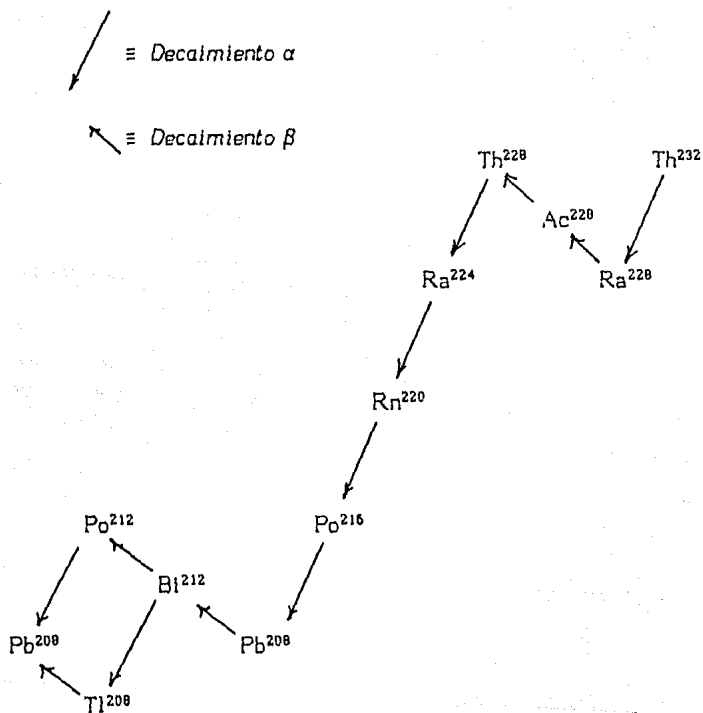


Figura I.3.1 Decaimiento del elemento Torio  $\text{Th}^{232}$ .  
 Elemento final  $\text{Pb}^{208}$ .  
 Se indica el tipo de desintegración.

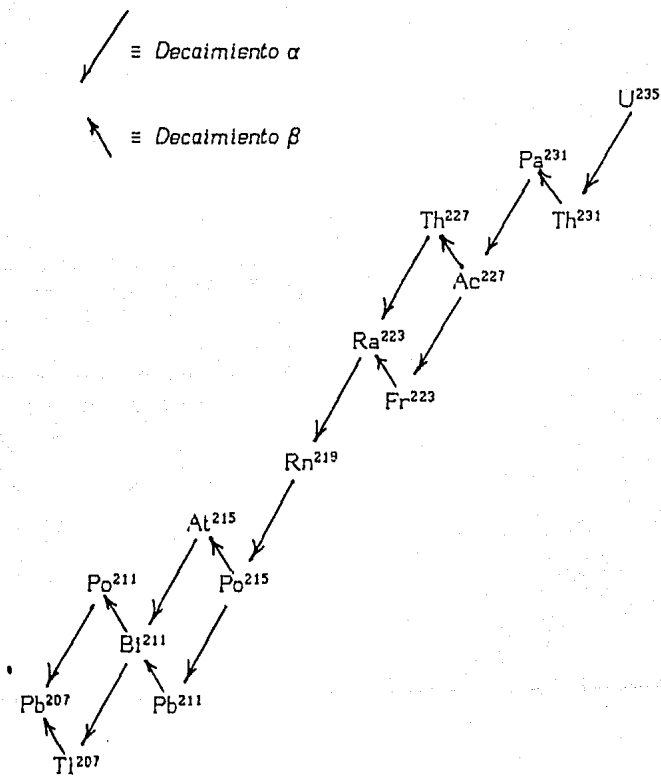


Figura 1.3.2. Decaimiento del elemento Actinio  $U^{235}$ .  
 Elemento final  $Pb^{207}$ .  
 Se indica el tipo de desintegración.

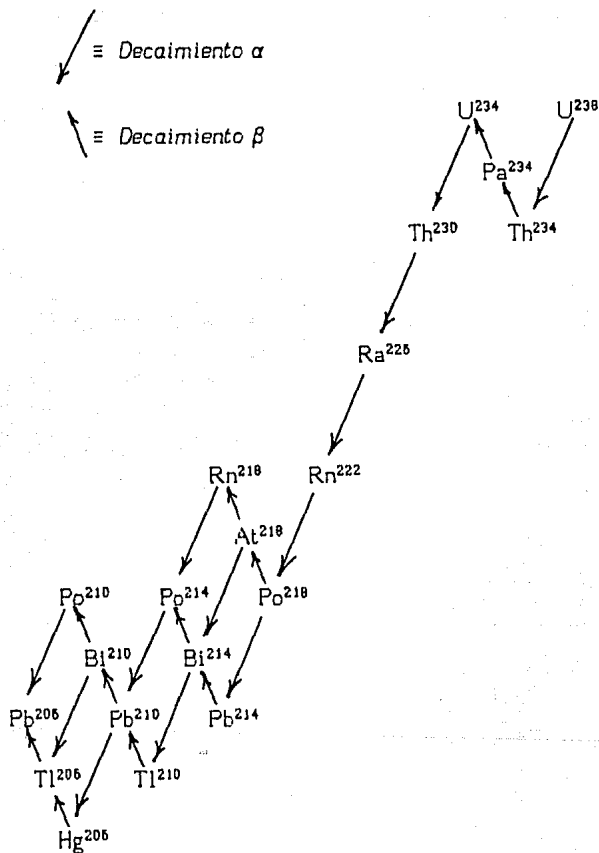


Figura 1.3.3 Decaimiento del elemento Uranio  $U^{238}$ .  
 Elemento final  $Pb^{206}$ .  
 Se indica el tipo de desintegración.

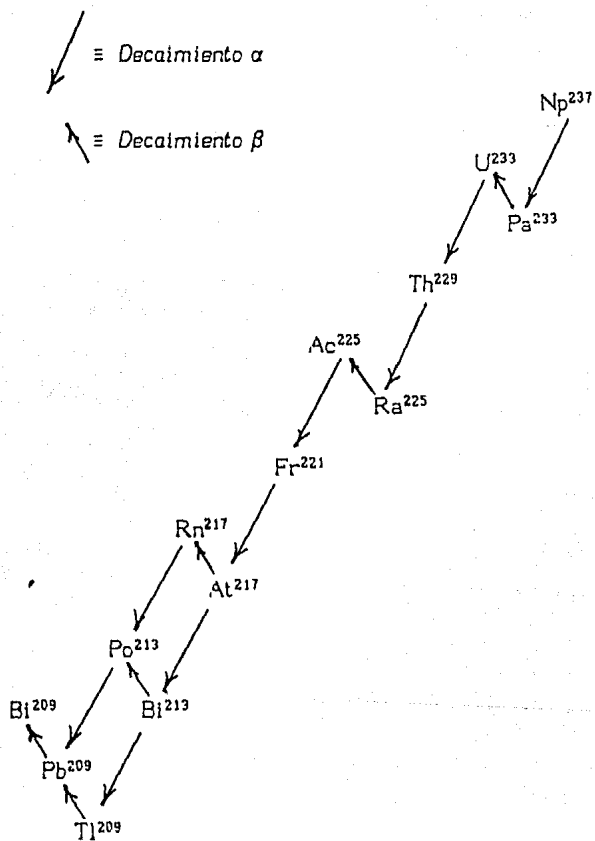
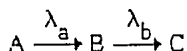


Figura 1.3.4 Decaimiento del elemento Neptunio  $Np^{237}$ .

Elemento final  $Bi^{209}$ .

Se indica el tipo de desintegración.

simbólicamente:



donde  $\lambda_a$  y  $\lambda_b$  son las constantes de desintegración de los núcleos A y B respectivamente; sea  $N_a$  y  $N_b$  el número de átomos de los elementos A y B, la ecuación diferencial que nos da el valor de  $N_b$  para cualquier tiempo es :

$$\frac{dN_b}{dt} = N_a \lambda_a - N_b \lambda_b$$

Como

$$N_a = N_{a0} e^{-\lambda_a t}$$

$$\Rightarrow \frac{dN_b}{dt} = N_{a0} e^{-\lambda_a t} - N_b \lambda_b \quad (1.21)$$

proponiendo una suma de exponenciales como la solución

$$N_b = N_{a0} \left\{ C_a e^{-\lambda_a t} + C_b e^{-\lambda_b t} \right\}$$

donde  $C_a$  y  $C_b$  son constantes a determinar; sustituyendo en (1.21) se obtienen los valores para  $C_a$  y  $C_b$ , tomando en cuenta la suposición de que al  $t = 0$   $N_b = 0$ .

$$C_a = \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a}$$

$$C_b = \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_b}$$

con lo que se obtiene una solución para la ec. ( 1.21 ) de

$$N_b = N_{ao} \frac{\lambda_a}{\lambda_b - \lambda_a} \left\{ e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t} \right\} \quad (1.22)$$

Tomando  $Act_b = N_b \lambda_b$  y  $Act_{ao} = N_{ao} \lambda_a$  como las actividades del elemento B y A al tiempo  $t = 0$ , se obtiene

$$Act_b = Act_{ao} \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \left\{ e^{-\lambda_a t} - e^{-\lambda_b t} \right\} \quad (1.23)$$

que es la actividad del elemento B en el tiempo.

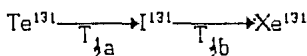
Como  $Act_a = Act_{ao} e^{-\lambda_a t}$  sustituyendo en la última expresión se obtiene

$$\frac{Act_b}{Act_a} = \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \left\{ 1 - \exp [ -(\lambda_b - \lambda_a)t ] \right\}$$

como  $T_{\frac{1}{2}} = \frac{\text{Ln}2}{\lambda}$  entonces

$$\frac{Act_b}{Act_a} = \frac{T_{\frac{1}{2}a}}{T_{\frac{1}{2}a} - T_{\frac{1}{2}b}} \left\{ 1 - \exp [ -(T_{\frac{1}{2}a} - T_{\frac{1}{2}b}) \lambda_b t / T_{\frac{1}{2}a} ] \right\} \quad (1.24)$$

En la figura I.3.3 se ilustra la expresión anterior para el caso del decaimiento siguiente. ( $T_{\frac{1}{2}a} < T_{\frac{1}{2}b}$ )



Donde:

$$T_{\frac{1}{2}a} = 1.25 \text{ días}$$

$$T_{\frac{1}{2}b} = 8.0 \text{ días}$$



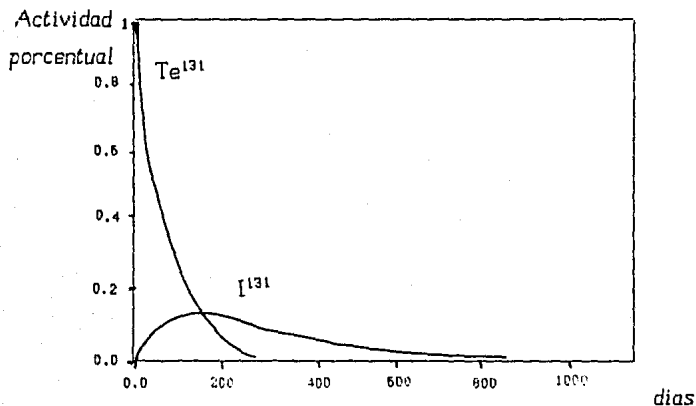


Figura 1.3.3 Decaimiento del elemento Te<sup>131</sup>

Si  $T_{\frac{1}{2}a} > T_{\frac{1}{2}b}$  se tiene que

$$\frac{T_{\frac{1}{2}a} - T_{\frac{1}{2}b}}{T_{\frac{1}{2}a}} > 0$$

lo que conduce a que la relación de actividades

$$\frac{\text{Act}_b}{\text{Act}_a} = \frac{T_{\frac{1}{2}a}}{T_{\frac{1}{2}a} - T_{\frac{1}{2}b}} \left[ 1 - \exp \left\{ - (T_{\frac{1}{2}a} - T_{\frac{1}{2}b}) \lambda_b t / T_{\frac{1}{2}a} \right\} \right]$$

para  $t \rightarrow \infty$

$$\frac{\text{Act}_b}{\text{Act}_a} = \frac{T_{\frac{1}{2}a}}{T_{\frac{1}{2}a} - T_{\frac{1}{2}b}}$$

Para  $T_{\frac{1}{2}a} \gg T_{\frac{1}{2}b}$  la expresión ( 1.24 ) puede aproximarse como

$$\frac{\text{Act}_b}{\text{Act}_a} \approx 1 - \exp \left\{ - \lambda_b t \right\}$$

Sea  $T_{\frac{1}{2}a} = T_{\frac{1}{2}b} ( 1 + \delta )$  donde  $\delta \ll 1$  sustituyendo en la ec. ( 1.24 )

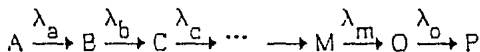
$$\frac{\text{Act}_b}{\text{Act}_a} = \frac{1 + \delta}{\delta} \left\{ 1 + \exp \left[ - \frac{\delta}{1 + \delta} \lambda_b t \right] \right\}$$

desarrollando en serie la parte exponencial y tomando únicamente hasta el segundo término se obtiene.

$$\frac{\text{Act}_b}{\text{Act}_a} \approx \lambda_b t \quad ( 1.25 )$$

## ECUACION GENERAL PARA EL DECAIMIENTO EN SERIE

En el caso general se tiene lo siguiente:



El número de átomos de  $N_o$  esta representado por la solución de la ecuación siguiente:

$$\frac{dN_o}{dt} = N_m \lambda_m - N_o \lambda_o \quad ( 1.26 )$$

donde M esta dada por una ecuación similar a ( 1.26 ) y así sucesivamente se tienen ecuaciones hasta llegar al elemento A. Proponiendo como solución de la serie de ecuaciones acopladas, una suma de expo-

nenciales dada por

$$N = N_{ao} ( C_1 \exp\{-\lambda_a t\} + C_2 \exp\{-\lambda_b t\} + \dots + C_n \exp\{-\lambda_n t\} ) \quad \Gamma_1$$

Tomando como condición inicial para  $N = 0$  en  $t = 0$  implica:

$$C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_m + C_n = 0 \quad \Gamma_2$$

sustituyendo la expresión anterior de  $N$  y tomando la última condición se tienen los valores de  $C_1, C_2, \dots, C_n$ .

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\lambda_a}{\lambda_n - \lambda_a} \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_a} \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_a} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_a} \\ C_2 &= \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_b} \frac{\lambda_b}{\lambda_n - \lambda_b} \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_b} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_b} \\ C_3 &= \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_c} \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_c} \frac{\lambda_c}{\lambda_n - \lambda_c} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_c} \\ &\vdots \\ C_x &= \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_x} \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_x} \dots \frac{\lambda_x}{\lambda_n - \lambda_x} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_x} \\ &\vdots \\ C_n &= \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda_n} \frac{\lambda_b}{\lambda_b - \lambda_n} \frac{\lambda_c}{\lambda_c - \lambda_n} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_n} \end{aligned} \right\} \Gamma_3$$

donde  $x$  se encuentra entre  $a$  y  $n$ .

A las expresiones  $\Gamma_1, \Gamma_2$  y  $\Gamma_3$  se les conoce como ecuaciones de Bateman. La figura siguiente muestra este proceso utilizando la serie del Torio  $Th^{232}$ :



Para finalizar sólo falta agregar que el estudio, tanto de la interacción de la radiación con la materia, como del equilibrio y cadenas radiactivas, toma una gran importancia para el análisis del contenido de los elementos radiactivos en los materiales de construcción, ya que a través de esta interacción de la radiación se hace posible su evaluación. Por otra parte la determinación del radón se obtendrá en función del decaimiento del elemento "padre".

## CAPITULO II

### METODOLOGIA DEL ANALISIS

Para la determinación de la cantidad de elementos radiactivos en los materiales de construcción, se propuso utilizar un método llamado Espectroscopía Gamma, éste para nuestro caso compuesto principalmente de un detector de germanio hiperpuro y un analizador de pulsos multicanal, que permite la medición de las energías y actividades para cada una de las emisiones gamma, ya que casi la totalidad de los elementos radiactivos naturales emiten al desintegrarse.

El detector de germanio hiperpuro cuenta con una respuesta lineal para el intervalo de 100 a 2000 keV. de energías y una resolución que

va de acuerdo con nuestras necesidades.

Este sistema permite realizar un muestreo en todo el intervalo de energías mencionado, para un material al mismo tiempo.

Con el objeto de aumentar la eficiencia en la detección, se construyó un recipiente para rodear al detector del material a analizar.

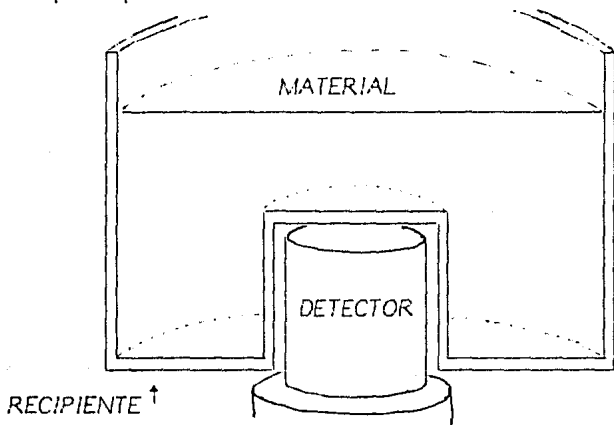


Figura II.1.1 Geometría del detector.

Para el análisis de los elementos radiactivos de los materiales de construcción, se contó con una amplia gama de materiales, ( 25; que son los que se consiguen en el área metropolitana ) clasificados por su tipo y formulación; se procedió a analizar cada material por separado, obteniendo las energías y las actividades para cada emisión observada: estos valores de las energías, se comparan con las energías de

emisión de elementos radiactivos naturales<sup>(25)</sup>, con esta comparación se obtienen los elementos radiactivos contenidos en los materiales de construcción. Para la determinación del Radón se calcula en base a la actividad del padre, el Radio, determinado para cada material en la parte anterior, calculando la cantidad de átomos emanados de Rn. Dadas las energías y las actividades, se calcula teóricamente la exposición, a esta radiación para una habitación tipo, entendiendo por exposición la cantidad de iones producidos en un centímetro cúbico de aire. Finalmente se realiza un cálculo aproximado del número de átomos de Rn presentes para la misma habitación tipo.

Así se obtienen los tablas y gráficas que se consignan en el apéndice A

La tabla siguiente muestra los materiales analizados.

*Tabla II.1.1 Materiales de construcción analizados*

<i>Material</i>	<i>Marca o tipo</i>	<i>Formulación</i>
<i>Cal</i>	<i>Forte</i>	} 94 % de óxido de calcio algo de carbonato de calcio y menos de 0.5 % de magnesio
<i>Cal</i>	<i>Tolteca</i>	
<i>Cal</i>	<i>Piracal</i>	
<i>Cal</i>	<i>Cuernavaca</i>	



Tabla II.1.1 Continuación de Materiales analizados

Material	Marca o tipo	Formulación
Yeso	Tixteca	Sulfato de calcio hidratado ( $\text{CaSO}_4$ )
Yeso	Maleico	
Yeso	El Tigre	
Yeso	Anáhuac	
Cemento blanco	Anáhuac	65 % $\text{CaO}$ ; 25.5 % $\text{SiO}_2$ 5.9 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 1.1 $\text{MgO}$ 0.6 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 0.1 $\text{SO}_3$
Cemento blanco	Cruz Azul	
Cemento gris	Cruz Azul	63.2 % $\text{CaO}$ 21.3 % $\text{SiO}_2$ 6.0 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ 2.7 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 1.8 % $\text{SO}_3$ 2.9 % $\text{MgO}$
	(Edo. Mex)	
Cemento gris	Cruz Azul	
Cemento gris	Moctezuma	
Cemento gris	Tolteca	
Cemento gris	Anáhuac	
Varilla		acero
Tabique	De la Huerta	variable
Tabique	Normal	" "
Adhesivo	Adheramic	" "
Adhesivo	Crest	" "

*Tabla II.1.1 Continuación de materiales analizados*

<i>Materiales</i>	<i>Marca o tipo</i>	<i>Formulación</i>
<i>Mármol</i>	<i>Café</i>	<i>variable</i>
<i>Mármol</i>	<i>Blanco y Rosado</i>	<i>" "</i>
<i>Arenas tipo 1</i>		<i>" "</i>
<i>tipo 2</i>		<i>" "</i>
<i>tipo 3</i>		<i>" "</i>

## ESPECTROSCOPIA GAMMA

La espectroscopía gamma es un método que se utiliza, entre otras, para la detección de emisores gamma. El sistema está formado por: un detector, un preamplificador, una fuente de voltaje, un amplificador, el analizador de pulsos y la computadora. Un diagrama del sistema se muestra en seguida.

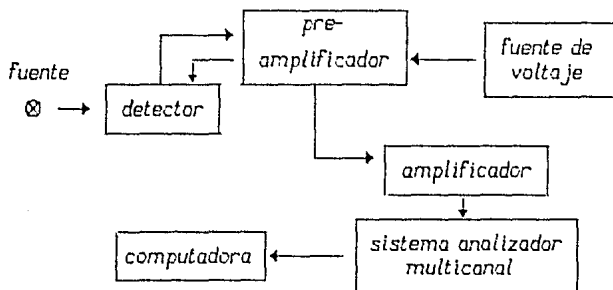


Figura II.2.1 Sistema para la detección de radiaciones gamma

El detector utilizado se basa en la interacción de la radiación con un material semiconductor, como lo es para nuestro caso el Germanio

hiperpuro, este material no es ni buen conductor de la electricidad ni buen aislante, los átomos de este elemento poseen cuatro electrones de valencia, es decir, cuatro electrones en su órbita externa; en el cristal de germanio, a muy baja temperatura, un átomo y sus vecinos comparten los electrones periféricos y se dice que están unidos por un enlace covalente, como lo muestra la figura siguiente.

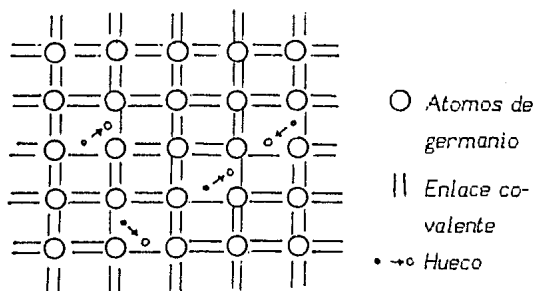


Figura 11.2.2 Cristal de germanio hiperpuro

Cuando la radiación incide sobre el cristal la energía absorbida rompe algunos de los enlaces y crea huecos, si se aplica en los extremos del cristal una diferencia de potencial, esos electrones formarán un pulso de corriente que puede medirse. La incidencia de la radiación aumenta la conductividad y la corriente producida es proporcional a la energía absorbida.

La figura siguiente muestra, mediante un diagrama a bloques, un analizador de pulsos multicanal.

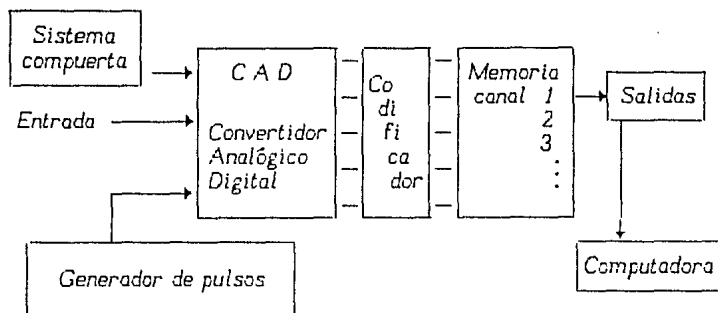


Figura 11.2.3 Sistema analizador de pulsos multicanal

El analizador multicanal opera principalmente bajo el principio de convertir una señal analógica, ( amplitud de pulso ) en un equivalente número digital, este pulso es producido en el detector, cuando en éste incide radiación, gracias a un circuito RC, este pulso no es más que el producto de la carga y descarga de un condensador, que se transforma en un número de pulsaciones. ( Figura 11.2.4 )

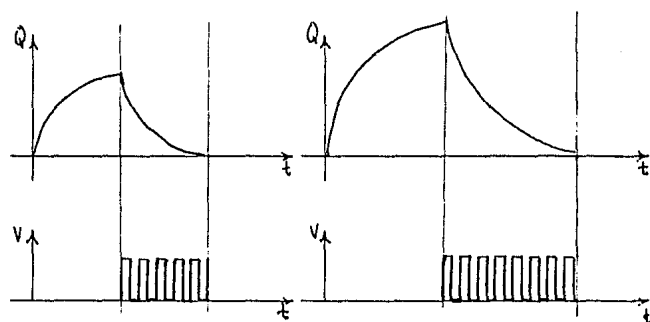


Figura 11.2.4 Conversión analógica-digital

Este número digital va asociado, gracias al codificador, con una localidad de memoria; al número de localidades de memoria se les conoce como canales y van, en cantidad, como  $2^n$ . (  $n = 10$  para este caso )

Haciendo un histograma en el cual se grafica el número de eventos obtenidos para un mismo canal, vs el número de canal, se obtiene una gráfica del material que se este analizando, a ésta se le llama espectro.

Obteniendo una relación entre el canal y la energía de la radiación incidente en el detector y además, entre el número de eventos y la actividad dado un material conocido, se podrá determinar bajo estas dos relaciones la energía y la actividad de los elementos desconocidos analizados.

## CALIBRACION POR ENERGIA

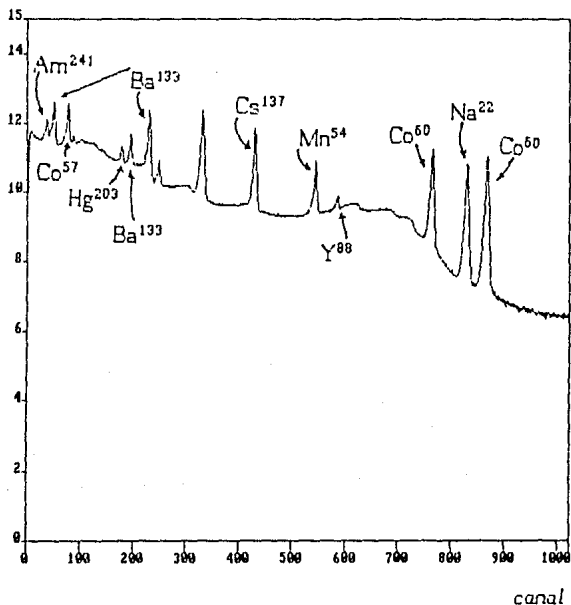
En primer lugar se tiene que obtener la relación entre el canal y la energía de emisión de una fuente radiactiva, esto se realiza de la siguiente manera. Se toma un grupo de fuentes radiactivas con energías de emisión conocidas, para nuestro caso tenemos el siguiente cuadro.

*Tabla 11.2.1 Fuentes de Calibración*

Elemento	energía ( kev )	Elemento	energía ( kev )
Am <sup>241</sup>	59.53, 26.3	Na <sup>22</sup>	1274.5
Ba <sup>133</sup>	356, 81, 302.86	Cs <sup>137</sup>	661.65
Co <sup>57</sup>	122, 136.5	Mn <sup>54</sup>	834.84
Hg <sup>203</sup>	279.19	Y <sup>88</sup>	1836, 898
Co <sup>60</sup>	1173.2, 1332.5		

Al obtener el espectro de todas las fuentes en su conjunto, se observan una serie de "picos" que se les llama fotopicos y van cada uno de ellos relacionados uno a uno con las energías de emisión de los elementos expuestos.

Numero de  
cuentas  
(log)

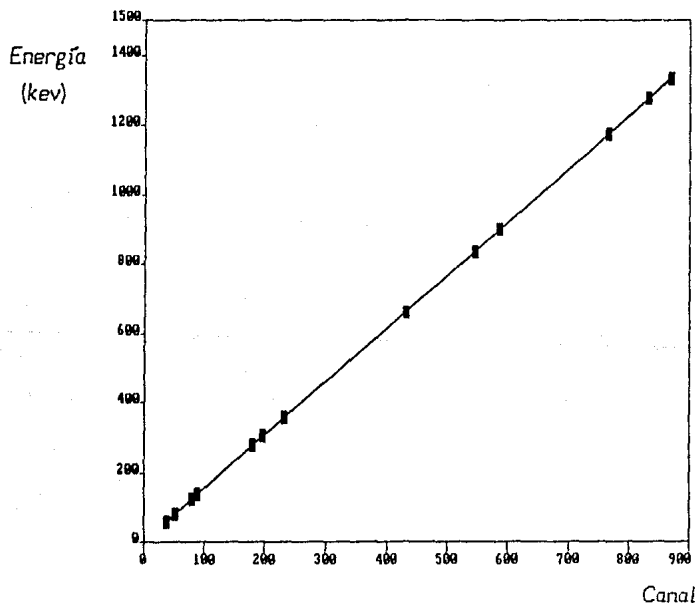


Gráfica 11.2.1 Espectro para la calibración canal energía.

Al identificar para cada emisión su fotopico correspondiente se obtiene la tabla siguiente que relaciona el canal y la energía correspondiente; a partir de éstas se obtiene, realizando un cálculo de mínimos cuadrados, la expresión que nos relaciona el canal con la energía.

Tabla 11.2.2 Resultados entre el canal y la energía.

Canal	Energía (kev)	Canal	Energía (kev)
38	59.53	432	661.65
52	81	545	834.84
79	122.06	586	898
88	136.47	766	1173.2
180	279.19	832	1274.54
197	302.86	870	1332.5
232	356.01		



Gráfica 11.2.2 Muestra los datos de la tabla anterior



Cuya relación es:

$$\text{Energía} = \text{Canal} \times 1.5478 - 8.066 \quad (\text{keV})$$

en el intervalo 59.53 a 1332.5 keV.

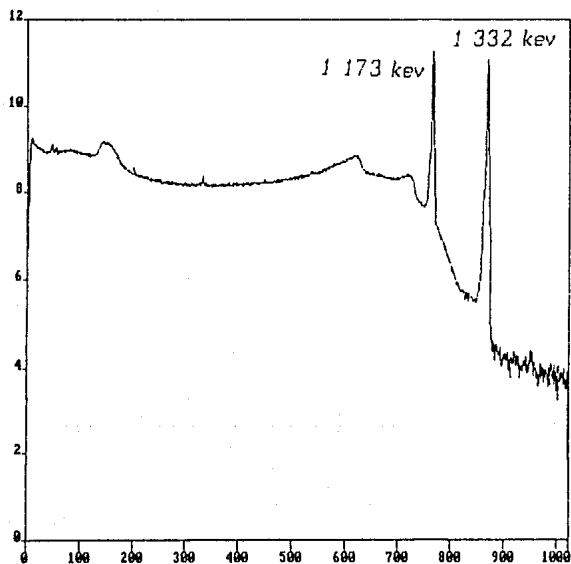
$$1 \text{ canal} = 1.54 \text{ keV.}$$

## CALIBRACION POR ACTIVIDAD

Para encontrar la expresión que nos determina la actividad de un elemento se requiere obtener la eficiencia del detector, esto se debe a que la radiación, al ser más energética, su frecuencia es más grande lo cual producirá que a medida que la energía aumenta, la probabilidad de que interaccione con la materia disminuya. Para encontrar esta relación se obtienen los espectros por separado de cada una de las fuentes ya mencionadas, esto se hace así para que no exista superposición de unas con otras, por los efectos producidos estudiados en los capítulos anteriores.

Así se obtienen los espectros siguientes y resultados.

Número de  
cuentas  
( log )

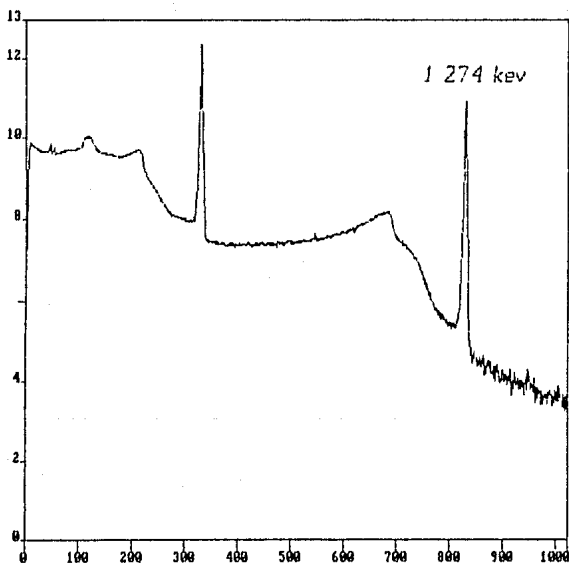


Canal

Gráfica 11.2.3

Espectro de  $Co^{60}$  actividad 414.4 Bq el 1/11/87  $T_{1/2} = 5.27$  años  
Energías de emisión 1.1732 y 1.3325.

Número de  
cuentas  
( log )

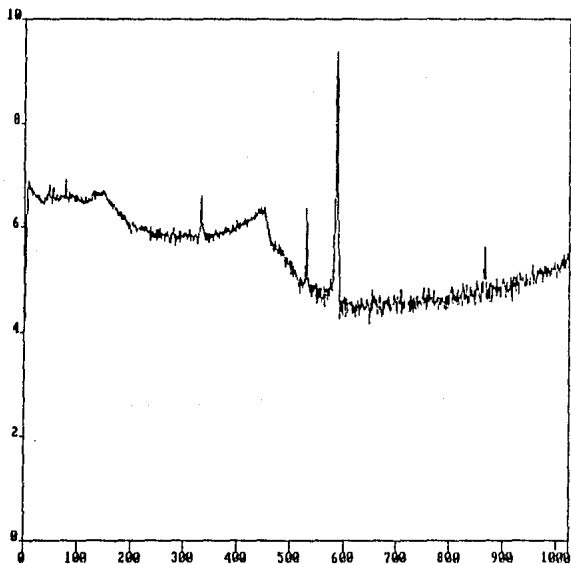


Canal

Gráfica II.2.4

Espectro de Na<sup>22</sup> actividad 410.7 Bq el 1/II/87  $T_{1/2} = 2.605$  años

Número de  
cuentas  
(log)

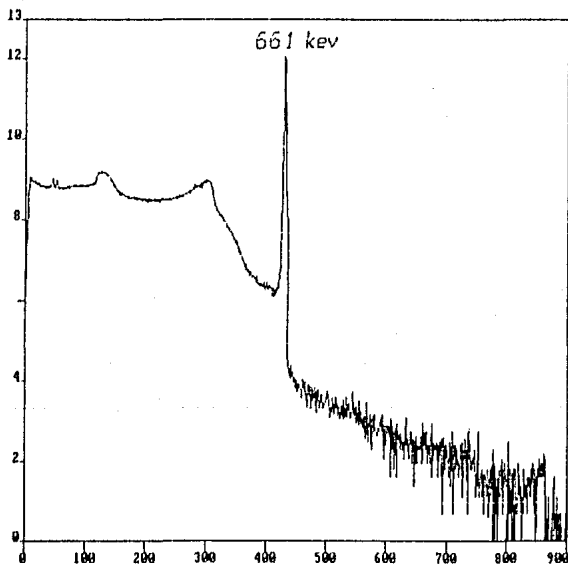


Canal

Gráfica 11.2.5

Espectro de  $Y^{88}$  actividad 418.1 Bq el 1/11/87  $T_{1/2} = 106.6$  días  
Energías de emisión 1.8361 y c.8980 Mev.

Número de  
cuentas  
(log)

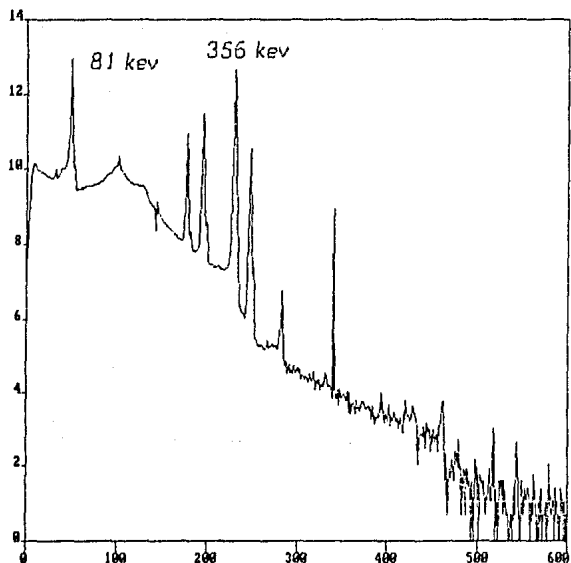


Canal

Gráfica 11.2.6

Espectro de  $Cs^{137}$  actividad 479.2 Bq el 1/11/87  $T_{1/2} = 30.17$  años  
Energía de emisión .66165 Mev.

Número de  
cuentas  
( log )



Gráfica 11.2.7

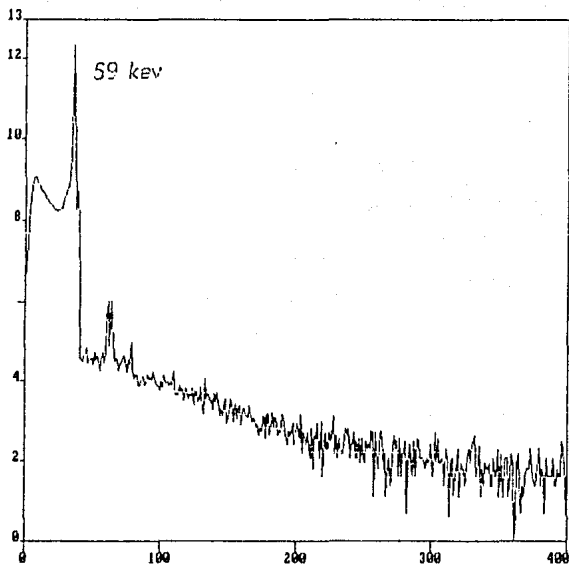
Canal

Espectro de  $Ba^{133}$  actividad 437.7 Bq el 1/11/87

Energías de emisión 0.356, 0.081, 0.3028 Mev. con  $T_{1/2} = 10.53$  años

Energías de emisión 0.0123, 0.633 Mev. con  $T_{1/2} = 38.9$  horas

Número de  
cuentas  
( log )

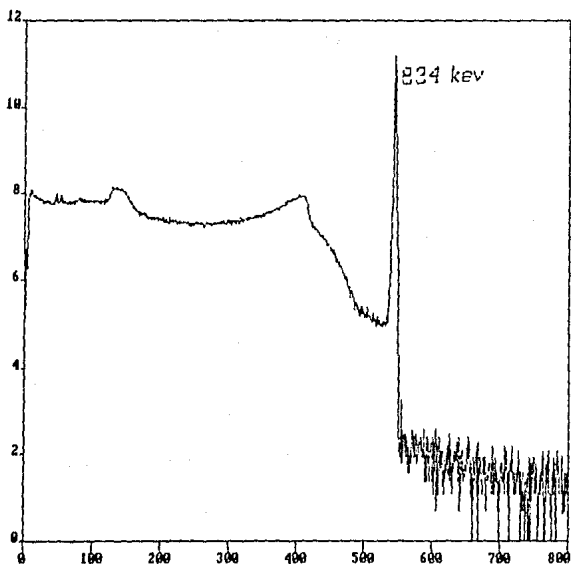


Canal

Gráfica 11.2.8

Espectro de  $Am^{241}$  actividad 456.2 Bq el 1/11/87  $T_{1/2} = 432$  años  
Energías de emisión 0.05953, 0.0263445 Mev.

Número de  
cuentas  
( log )



Canal

Gráfica 11.2.9

Espectro de  $Mn^{54}$  actividad de 606.8 Bq el 1/11/87  $T_{1/2} = 312.2$  días



de las gráficas anteriores se obtiene la tabla siguiente.

*Tabla II.2.3 Relación entre la energía y el número de cuentas de los elementos, normalizados a una actividad de 37 Bq.*

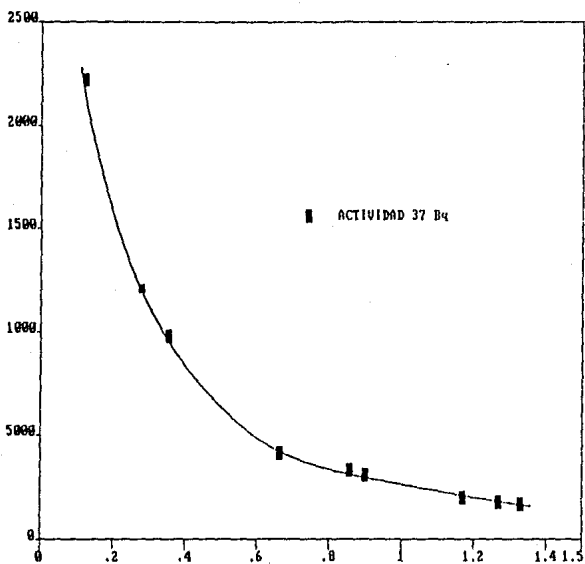
<i>Energía (Mev)</i>	<i>Número de cuentas</i>
0.122	222 093
0.279	119 250
0.356	97 517
0.662	41 220
0.855	32 950
0.898	30 771
1.17	19 626
1.27	17 841
1.33	16 398

La gráfica A.10 muestra la curva que nos representa el comportamiento de la disminución del número de cuentas a medida que aumenta la energía de la radiación gamma incidente, para un espesor dado.

La expresión que determina este comportamiento es:

$$\text{Factor de Eficiencia} = \exp [ - 2.036 \times \text{Energía} ]$$

Número de  
cuentas

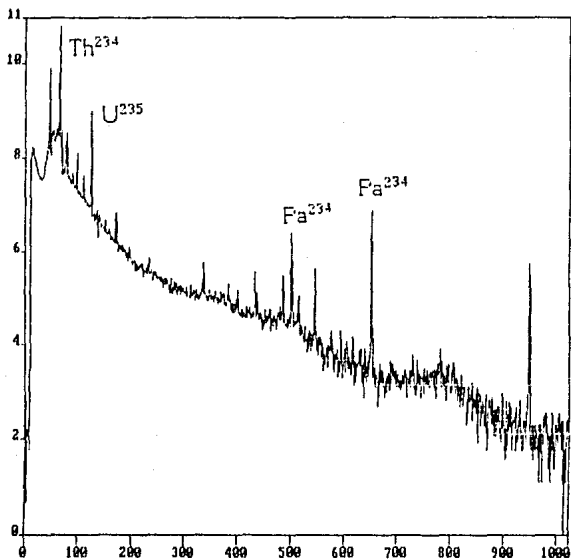


Energía (Mev)

Gráfica 11.2.10 Eficiencia cuantica del detector

Finalmente tomando el espectro de un gramo de nitrato de uranilo a diferentes concentraciones, en agua ( 4 espectros ), se obtiene la función final para la actividad de una emisión cualquiera.

Número de  
cuentas  
( log )

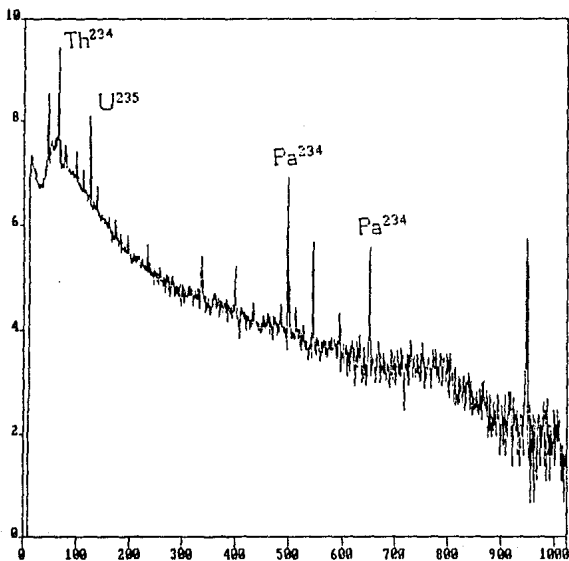


Gráfica 11.2.11

Canal

*Spectro de un gramo de nitrato de uranilo  
disuelto en un litro de agua*

Número de  
cuentas  
( log )

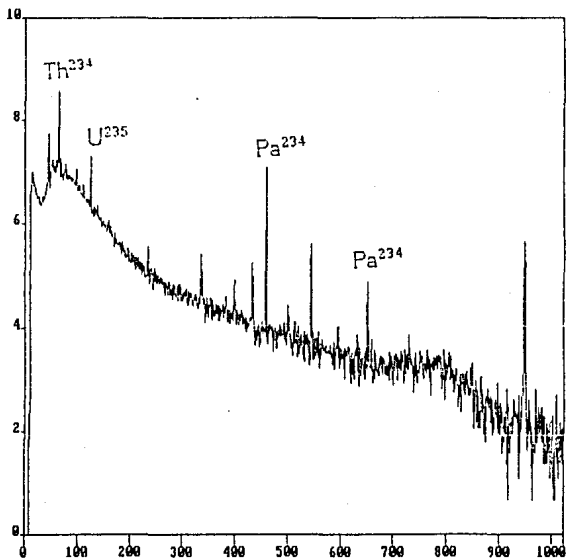


Gráfica II.2.12

Canal

*Espectro de medio gramo de nitrato de uranilo  
disuelto en un litro de agua*

Número de  
cuentas  
(log)

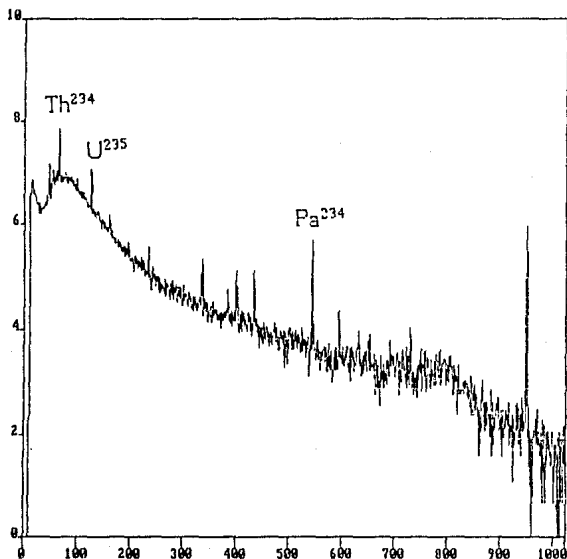


Gráfica II.2.13

Canal

Espectro de un cuarto de gramo de nitrato de uranilo  
disuelto en un litro de agua

Número de  
cuentas  
( log )



Gráfica II.2.14

Canal

*Espectro de un octavo de gramo de nitrato de uranilo  
disuelto en un litro de agua*

Analizando el decaimiento de los elementos  $\text{Th}^{234}$ ,  $\text{Pa}^{234}$  y  $\text{U}^{235}$  se obtiene la siguiente tabla.

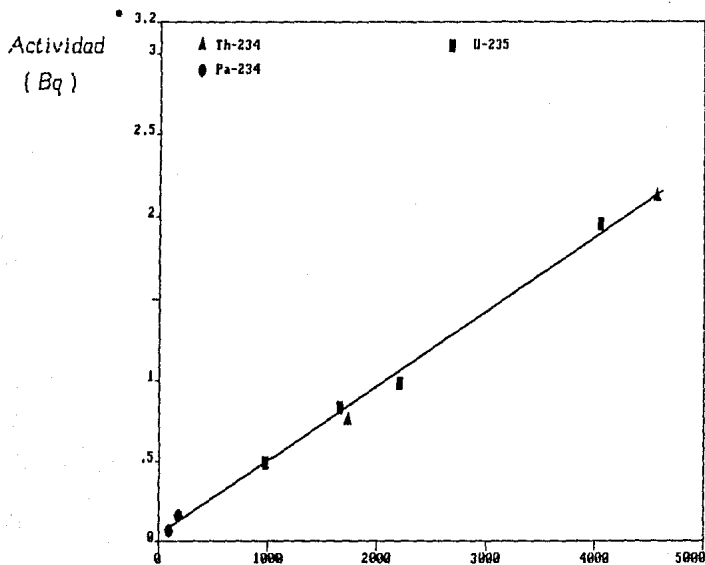
Tabla II.2.4 Relación de la actividad y número de cuentas ajustado por el factor de eficiencia cuantica.

Elemento	Número de cuentas	Actividad en Bq. ( x 37)
Th <sup>234</sup>	1 729	0.745
	4 570	2.105
U <sup>235</sup>	969	0.487
	1 660	0.825
	2 210	0.975
	4 055	1.949
Pa <sup>234</sup>	94	0.069
	178	0.162

La gráfica II.2.15 muestra el resultado de esta calibración y la expresión que nos determina la actividad a partir del número de cuentas es:

$$\text{Actividad} = 2.82 \cdot 10^{-4} \text{ Núm. de Cuentas} + 0.0672$$

x 37



Numero de cuentas

Gráfica II.2.15 Calibración por Actividad

así se encuentran las relaciones finales para la calibración.

Para la energía.

$$\text{Energía} = \text{Canal} ( 1.5478 ) - 8.066$$



Para la actividad.

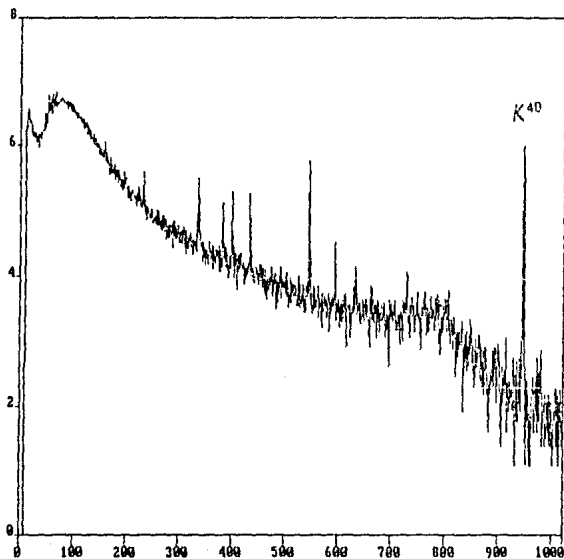
$$\text{Actividad} = 2.82 \cdot 10^{-4} \text{ Ncuen} [ 2 - \exp(-2.036 \text{ Ene}/1000) ] + 0.0672$$

donde Ene = energía y Ncuen = número de cuentas ( área de pico )

## ANALISIS DE UN ESPECTRO CUALQUIERA

Para el análisis de un espectro cualquiera se requiere obtener primeramente el espectro llamado de fondo, éste sería el espectro del ambiente circundante. Al obtener cualquier otro espectro, tenemos que restarle el espectro de fondo para así determinar la contribución del material. Ya obtenida la resta se obtienen la contribución neta del material analizado. Todos los espectros se realizaron con un tiempo de análisis de 15 000 segundos.

Número de  
cuentas  
( log )



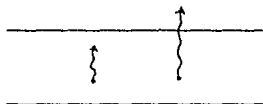
Canal

Gráfica 11.2.16 Espectro de fondo.

## DETERMINACION DEL RADON Y SUS EMANACIONES DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION

El radón forma parte de las cadenas de desintegración naturales ( ver Capítulo I.4), éste se encuentra en estado gaseoso y es precisamente por esta razón que tiene gran importancia; cuando ocurren las desintegraciones en las cadenas radiactivas, un elemento en estado sólido pasa, al desintegrarse, a estado gaseoso y posteriormente este pasa nuevamente a estado sólido.

Si tomamos por ejemplo, un bloque de concreto, se tendrán



decaimientos al radón, estos átomos de radón se difundirán en el bloque y algunos de ellos lograrán salir del material antes de que decaigan al Polonio.

Existen varios isótopos del radón pero solo el  $Rn^{222}$  tiene importancia

ya que los demás tienen una vida media muy pequeña: Por ejemplo, el  $Rn^{220}$  con vida media 56.6 seg., únicamente los átomos que forman la superficie podrán escapar al aire circundante, como en general se puede decir que todos los pisos, paredes y techos llevan un revestimiento, este es suficiente para reducir drásticamente la emanación del  $Rn^{220}$ , por lo que sólo se considera la emanación de  $Rn^{222}$ . Según algunos autores<sup>(4)</sup> el porcentaje de  $Rn^{222}$  que logra escapar del material es de aproximadamente del 63 %.

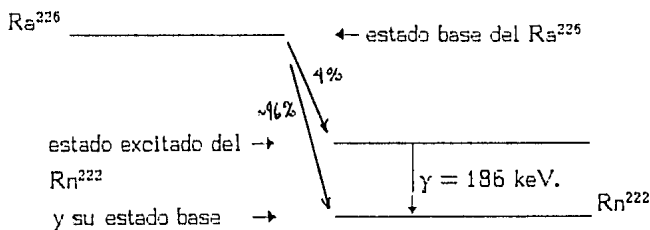


Figura 11.3.1 Decaimiento del  $Ra^{226}$

Del número de desintegraciones del antecesor al  $Rn^{222}$ , determinados para cada uno de los materiales, se calcula el número de átomos emanados de éstos. Sólo el 4% de los decaimientos de  $Ra^{226}$  van acompañados de la emisión de radiación gamma de 186 keV., esto quiere decir que sólo se detectan el 4% de los decaimientos de  $Ra^{226}$  hacia el  $Rn^{222}$ , entonces, a partir del número de desintegraciones del  $Ra^{226}$  multiplicándolo por 100/4 se obtiene el número de átomos producidos de  $Rn^{222}$  y multiplicándolo por 0.63 se obtiene el número de átomos emanados.

Tabla II.3.1 Muestra los resultados obtenidos del análisis anterior.

Materiales	$Ra^{226TM}$ des/kg/seg	átomos producidos de $Rn^{222}$ /kg/seg	átomos emanados de $Rn^{222}$ /kg/seg
Cal Forte	15.09	377.3	245.3
Tolteca	8.8	220.0	143.0
Pirical	22.86	571.5	371.5
Cuernavaca	17.81	445.3	289.4
Yeso Tixteca	10.4	260.2	169.4
Meleico	8.21	205.2	133.4
El Tigre	5.88	147.0	95.5
Anáhuac	10.08	252.2	163.9
Cemento blanco			
Anáhuac	22.24	556.0	361.4
Cruz Azul	21.64	541.2	351.8
Cemento gris			
Cruz Azul	9.80	245.0	159.2
Cruz Azul Edo.	18.06	451.5	293.5
Moctezuma	11.61	290.2	188.6
Tolteca	15.76	394.0	256.1
Anáhuac	15.84	396.2	257.5
Tabique normal	11.99	299.7	194.8
de la huerta	18.01	450.2	292.6
Adhesivo Adheramic	12.92	323.2	210.1
Crest	4.88	122.1	79.4
Mármol Cáfè	6.06	151.7	98.6
blanco y rosado	4.94	123.6	80.3

Tabla II.3.1 Continuación

Material	$Ra^{226}$ <sup>TM</sup> des/kg/seg	átomos producidos de $Rn^{222}$ /kg/seg	átomos emanados de $Rn^{222}$ /kg/seg
varilla	2.45	61.37	39.9
arena tipo 1	8.66	216.5	140.7
tipo 2	8.39	208.5	135.6
tipo 3	15.94	398.5	259.0

<sup>TM</sup> Estos datos son el resultado de la normalización de los datos obtenidos en la sección anterior.

Los resultados anteriores son de gran importancia para la determinación de la cantidad de átomos existentes de  $Rn^{222}$  en una habitación ( sección II.5 ), para así evaluar la cantidad de átomos que podrán decaer a  $Po^{218}$  en el momento de la inhalación para un adulto y finalmente se realiza una comparación con otros países de la cantidad emanada de algunos materiales de construcción.

## CALCULO DE LAS CURVAS DE ISODOSIS CORRESPONDIENTES A UNA HABITACION POR GAMMAS

En esta sección muestro las curvas de isodosis calculadas para una habitación de 4 metros de largo, 4 metros de ancho y 2.3 metros de altura con una ventana al centro de 2 metros de largo en uno de sus muros y una puerta en uno de sus muros como se muestra en la figura II.4.1

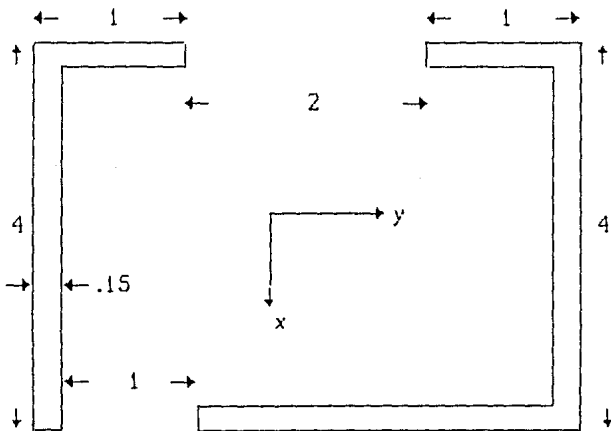


Figura II.4.1. Geometría de la habitación. ( en metros )

Las curvas de isodosis se calculan en un plano situado a la mitad de la altura, plano  $x - y$ , y la altura a lo largo del eje  $z$ .

El procedimiento de cálculo de las curvas es el siguiente:

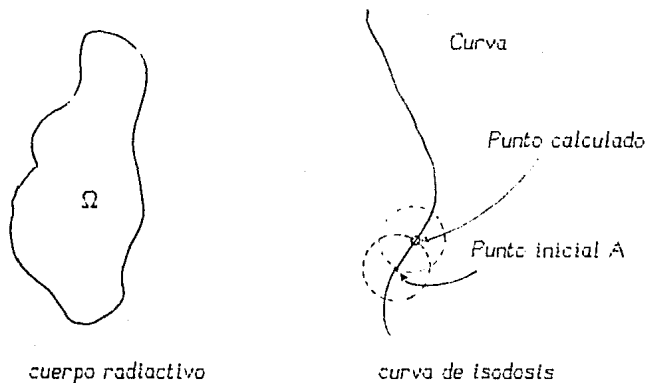


Figura 11.4.2. Ejemplificación del cálculo de curvas.

Se toma un punto inicial A y se calcula la exposición en éste debida al material  $\Omega$ , se traza un disco imaginario alrededor del punto A de diámetro  $\delta$  ( $\delta \ll 1$ ), y se realiza un muestreo para determinar que puntos del perímetro del disco tienen la misma exposición que el punto A, de esta forma al encontrar otro punto, se repite el procedimiento para localizar más puntos y así encontrar una curva.



La exposición en un punto  $P_0$  en el plano  $x - y$  debida a un bloque es:

$$\dot{X} = \Gamma_0 \frac{\alpha}{d^2}$$

$$\dot{X} = \sum_{i=0}^k \Gamma_i \alpha_i \left[ \int \int \int \frac{dx dy dz}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2} \right]$$

donde  $\alpha_i$  es la actividad de la fuente  $i$ -ésima.

$\Gamma_0, \Gamma_i$  es una constante llamada gamma característica.

$k$  es el número de elementos.

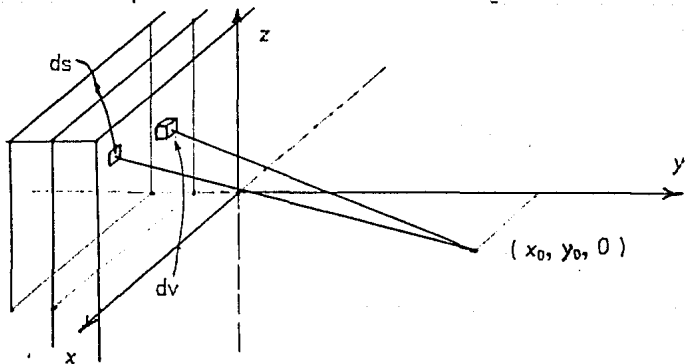
$d$  es la distancia de la fuente al punto de observación.

y los límites de integración:

$$-D \leq y \leq D \quad : \quad -L \leq x \leq L \quad : \quad -M \leq z \leq M$$

donde  $L$  es el largo,  $M$  es lo alto y  $D$  el espesor.

Para simplificar este análisis hicimos lo siguiente:



se coloca una superficie situada a la mitad del espesor de la pared, con el objeto de evaluar una integral de superficie en lugar de una integral volumétrica.

$$I_1 = \iiint \frac{dx \, dy \, dz}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2}$$

en lugar de integrar  $I_1$  integramos  $I_2$

$$I_2 = \iint \frac{dx \, dz}{(x - x_0)^2 + (\epsilon - y_0)^2 + z^2}$$

Donde  $\epsilon$  es la distancia al plano  $(x - z)$  de la figura.

Integrando  $I_2$  se obtiene:

$$\iint \frac{dx \, dz}{(x - x_0)^2 + (\epsilon_0 - y_0)^2 + z^2} = \int \frac{1}{(y_1^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \operatorname{angtg} \left( \frac{x - x_0}{(y_1^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \right) dz$$

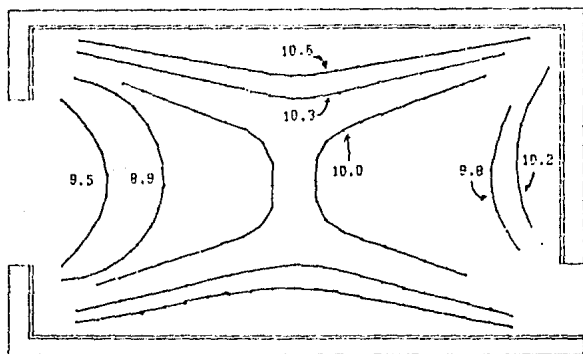
tomando  $y_1 = \epsilon_0 - y_0$ .

⇒

$$\dot{X} = \sum_i^k \Gamma_i \alpha_i \int_{-M}^M \left( \frac{1}{(y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \operatorname{angtg} \left( \frac{x - x_0}{(y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}} \right) \right) dz$$

Se hizo un programa para evaluar la expresión anterior y elaborando otro para determinar las curvas de isodosis de donde obtenemos la representación siguiente.

Jun 17 1:01:06 pm



ptsc

Gráfica II.4.1 Curvas de Isodosis ( $\mu\text{R}/\text{h}$ ).

Considerando las características expuestas al inicio de esta sección.

De la gráfica II.4.1, se observa que la dosis más alta está en la cercanía de las paredes y la menor en el centro de la habitación, con una variación del orden de  $0.6 \mu\text{R}/\text{h}$ .

## CALCULO DE CONTAMINACION DE RADON EN UN ADULTO

Tomando las características dadas para una habitación de la sección anterior y considerando que no existe ventilación de la misma, estimaré la cantidad de átomos de radón, emanados por segundo, para de esta forma calcular el máximo número de desintegraciones del radón existentes en una habitación en un período de 8 horas, que correspondería al tiempo que una persona pasa en una habitación cuando duerme.

Por otra parte considerando que la persona que habita fuera un adulto, se tendrá en promedio, un volumen de ventilación pulmonar de 500 mililitros en respiración normal; un total de 12 respiraciones por minuto, da 6 litros por minuto en volumen.<sup>(13)</sup> De la tabla expuesta en la sección 3 del capítulo II retomamos los valores para el cemento y la arena y considerando una relación para la mezcla del concreto de 1-4 respectivamente, encontramos que por cada kilogramo de concreto habrá 144.4 átomos emanados por seg.

Considerando que tanto el piso como el techo son de concreto y los muros de tabique con revestimiento de yeso, la contribución será: para el piso y el techo, siendo el peso específico del concreto de  $2400 \text{ kg/m}^3$ , considerando a ambos de 10 cm de espesor y de  $4 \times 4$  metros de largo y ancho, resulta una emanación de radón de 561716 átomos por seg. Para los muros, cuyo peso específico es de  $2000 \text{ kg/m}^3$  se tiene una contribución de 843484 átomos emanados por seg, y finalmente para yeso, con peso específico de  $650 \text{ kg/m}^3$  se obtiene el valor de 66586 átomos emanados por seg; sumando estos tres resultados se obtiene un total de 1471786 átomos emanados de  $\text{Rn}^{222}$  por seg en la habitación.

Como el volumen es de  $4 \times 4 \times 2.3$  la cantidad de átomos de  $\text{Rn}^{222}$  por litro por seg es de 39.994 y como un adulto realiza 12 respiraciones por min. que corresponde a .1 litros por seg. esto nos indica que a lo más tendremos 3.9994 átomos de  $\text{Rn}^{222}$  por seg. en el volumen pulmonar.

Como la vida media del  $\text{Rn}^{222}$  es de 3.8235 días = 330350 seg. se tiene que para un segundo 0.0000084 átomos de  $\text{Rn}^{222}$  decaerán en  $\text{Po}^{218}$ . Tomando este resultado se obtiene que para un adulto se tendrá como número máximo de átomos absorbidos en un lapso de 8 horas la cantidad de 0.2416. Este número de átomos de  $\text{Po}^{218}$  absorbidos por el ser humano representa una contaminación de elementos radiactivos, que a su vez dará como resultado una fuerte exposición, debido al decaimiento via partículas alfa y beta, tanto del  $\text{Po}^{218}$  como de alguno de sus hijos.

## EFFECTOS BIOLÓGICOS POR EXPOSICIÓN POR GAMMAS Y POR CONTAMINACIÓN DEL RADÓN

Los efectos biológicos por radiación son muy variados, cuando se somete a una persona a una fuerte irradiación en un período de tiempo muy corto, los efectos producidos aparecen en un tiempo relativamente corto; pero si al contrario se somete a una irradiación pequeña en un tiempo largo, los efectos llegarán a aparecer hasta la segunda, tercera o cuarta generaciones.

En la tabla II.6.1 se resumen los efectos biológicos de la radiación y los valores de exposición.

En la tabla II.6.2 se muestran los límites aceptables y ambientales para el personal ocupacionalmente expuesto y población en general.

De acuerdo con los resultados del capítulo II.4 la exposición recibida por una persona en el modelo de habitación estudiado es de 0.1 R/año quedando dentro de los límites de la radiación ambiental.

Tabla 11.5.1 Los efectos más importantes producidos por la radiación

Exposición R*	Efectos biológicos probables
5 000	Muerte instantánea.
1 000	Daño severo a los sistemas gastrointestinal y nervioso. Leucopenia. Resultado fatal.
500	Letal en un 50 % de los casos.
100	Leucopenias medias, doleres de cabeza. ( Dosis Terapéutica )
10	Leucopenia, vomitos, enegresimiento de las uñas caída de pelo.

Tabla 11.6.2 Exposiciones aceptables® y ambientales

5 R*/año	Exposición aceptable para el personal ocupacionalmente expuesto.
0.5 R*/año	Exposición aceptable para el personal no ocupacionalmente expuesto.
0.25 R*/año	Población en general

® ICRP.

\*R =  $2.58 \times 10^{-4}$  J/kg.

## CONTAMINACION POR RADON

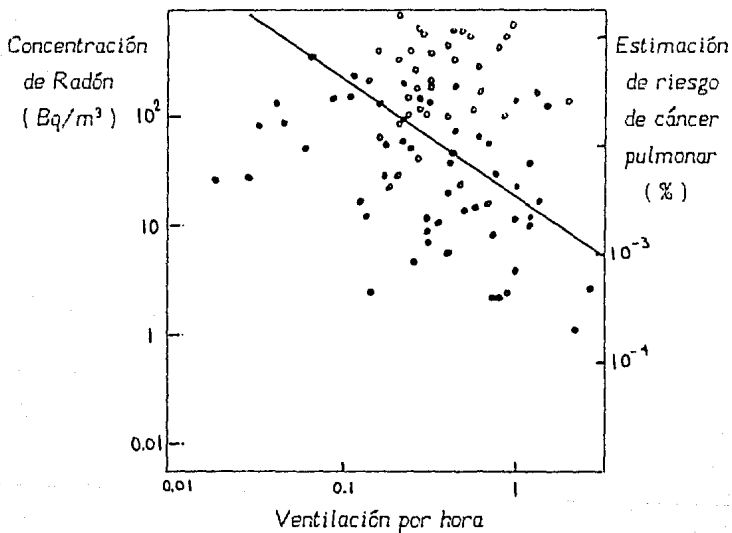
La cifra de concentración de Radón encontrada es de 39 994 átomos por metro cúbico, en la investigación teórica realizada; en la realidad se ve disminuida por los materiales de recubrimiento que normalmente se emplean en las construcciones acabadas y además puede variar dependiendo de la ventilación; en este estudio se consideró la no existencia de esta. El riesgo de daño físico producido por las concentraciones de radón indudablemente tienen una dependencia respecto de su magnitud y sin duda se ve afectado por la circulación de aire.

En una investigación hecha a este respecto en los Estados Unidos en casas habitación ubicadas en distintas localidades, se encontraron los resultados que se muestran en la gráfica II.6.1 en la que además aparecen estimaciones del riesgo de cáncer pulmonar para ocupantes permanentes de por vida de esas habitaciones; en este estudio, los parámetros de concentración de radón y ventilación, rigurosamente carecen de correlación, si acaso la tienen es tan débil que la recta trazada esta lejo de mostrar una tendencia real.

En el estudio teórico realizado hay que tomar en cuenta que sólo el 0.0839 de los átomos de  $Rn^{222}$  por metro cúbico pasaran a  $Po^{218}$  en un segundo, lo que de acuerdo con los valores expuestos en la gráfica II.6.1 da una estimación de riesgo de cáncer pulmonar de  $10^{-4}$  por ciento, en otras palabras una de cada 10 000 personas.



Gráfica 11.6.1 Concentración de radón vs ventilación considerando una estimación de riesgo de cáncer pulmonar.



## CAPITULO III

### ANALISIS COMPARATIVO DE CONTAMINANTES RADIOACTIVOS EN MATERIALES DE CONSTRUCCION, CON OTROS PAISES.

Para la comparación de los contenidos radiactivos de los materiales de construcción con otros países hay que tomar en cuenta dos aspectos muy importantes, uno son las características del material en cuestión, y el otro, que en el decaimiento radiactivo la emisión gamma detectada sólo corresponde a un porcentaje del total de los decaimientos. Por ejemplo para  $Ra^{226}$  la emisión gamma de 186.18 kev sólo es emitida en el 4% de los decaimientos.

La tabla siguiente muestra el contenido radiactivo<sup>(13)</sup> de los isótopos  $Ra^{226}$  y  $K^{40}$  observados en diferentes países.

Tabla III.1 de comparación de los datos obtenidos en este trabajo con los obtenidos por otros países

Pais	Material	$K^{40}$ ( Bq/Kg )	$Ra^{226}$ ( Bq/Kg )
Finlandia	Cemento	240	22
	Tabique	966	78
	Concreto	360	49
Alemania F.	Cemento	240	< 26
	Tabique	640	59
	Concreto	770	74
Suecia	Cemento	240	55
	Tabique	960	96
	Concreto	820	48
Noruega	Cemento	240	30
	Tabique	1100	100
	Concreto	720	26
Este trabajo ( México )	Cemento	380	77
	Tabique	117	299
	Concreto	248	246

En la tabla siguiente se muestran los resultados obtenidos para el radón, en comparación con los obtenidos por otros países.

Tabla III.2 de emanaciones de Radón

<i>País</i>	<i>material</i>	<i>emanaciones Rn ( Bq/Kg )</i>
<i>Suecia y Dinamarca</i>	<i>Concreto</i>	440
	<i>Tabique</i>	0.17
<i>Noruega</i>	<i>Concreto</i>	—
	<i>Tabique</i>	28
<i>Este trabajo ( México )</i>	<i>Concreto</i>	144.4
	<i>Tabique</i>	194.8

Las conclusiones referentes a esta sección se encuentra en los párrafos 2, 6 y 7 de la sección siguiente.

## CONCLUSIONES

El método propuesto para la determinación de los elementos radiactivos, resultó eficiente ya que para cada material examinado se obtuvo, el contenido de elementos radiactivos más probables y sus actividades para cada uno de ellos.

Se observa de las tablas expuestas en el capítulo 2 sección 2, que existen diferencias en la cantidad de elementos radiactivos encontrados en los materiales de construcción, para los diferentes grupos, ésta radica principalmente por el origen y formulación de cada uno de ellos.

Hay que tomar en cuenta que este estudio se realizó únicamente con los materiales existentes en el Distrito Federal y no se hizo un análisis regional de estos.

Considerando que la exposición de la habitación tipo, en promedio es del orden de  $8 \mu\text{R}/\text{h}$ , tenemos que sumando la exposición para un año, resulta de  $0.0292 \text{ R}/\text{año}$ .

El contenido de elementos radiactivos, y las emanaciones de radón, varían dependiendo de varios factores a saber: la amplia

gama de proporciones para la mezcla del concreto, ya que en esto radica su conformación y dando lugar a cambios en los contenidos de los radionúcleos para cada tipo de mezcla, la no homogeneidad del material, las pequeñas grietas provocadas por resequedad subsecuente al momento del colado o a esfuerzos de tensión en algunas piezas. lo que dá como consecuencia que el Rn pueda escapar con mayor facilidad del material.

Los valores encontrados para las actividades de los materiales de construcción se comparan en orden de magnitud con los determinados para los mismos materiales en otros países y las diferencias no son ajenas a las características locales de los materiales.

Dados los resultados expuestos se concluye la conveniencia de construir habitaciones y locales con ventilación adecuada.

Por otro lado, y esto es de gran importancia, se requiere que, con base en estudios específicos detallados. se creen los mecanismos adecuados a fin de lograr que la fabricación de materiales de construcción se realice bajo control que garantice límites aceptables que no deban ser excedidos por las cantidades de elementos radiactivos que contengan esos materiales, como se está realizando en otros países.

En el proceso de la desintegración radiactiva. no siempre existe una emisión gamma, lo que conduce a que el contenido de elementos radiactivos sea mayor al observado, esto no modifica la exposición a la radiación, ya que la parte no observada no contribuye. Además también existen elementos radiactivos

que emiten fuera de los límites de validez del trabajo, con respecto a este punto, como las energías no observadas están entre 0 y 59 kev y 1500 kev en adelante, se puede decir que esta contribución es pequeña ya que la mayoría de los elementos naturales emiten con energías entre 60 y 1500 kev.

Es de recomendarse que para eliminar completamente el  $Rn^{220}$  no se dejen las construcciones con materiales aparentes, sino que se recubran con algún tipo de material, como pueden ser : el papel tapiz, pintura, etc..

Recomiendo, para disminuir la cantidad tanto de radón como de la exposición a radiación gamma, que se utilicen los materiales que contengan la menor cantidad de elementos radiactivos de cada grupo.

*Tabla C.1. Materiales de menor contenido de elementos radiactivos. (des/seg/Kg)*

<i>Material</i>	<i>Actividad total</i>	<i>Material</i>	<i>Actividad total</i>
<i>Cal Tolteca</i>	<i>41.11</i>	<i>Cemento Gris</i>	
<i>Yeso Tixteca</i>	<i>29.74</i>	<i>Moctezuma</i>	<i>106.3</i>
<i>Cemento Blanco</i>		<i>Adhesivo</i>	
<i>Cruz Azul</i>	<i>320.97</i>	<i>Adheramic</i>	<i>84.75</i>
<i>Mármol ( Blanco</i>		<i>Tabique normal</i>	<i>194.21</i>
<i>Rosado )</i>	<i>51.1</i>	<i>Arena tipo 2</i>	<i>135.35</i>

## APENDICE A

Las siguientes tablas y gráficas muestran las energías y actividades de los fotopicos encontrados para cada material analizado.

### Nomenclatura.

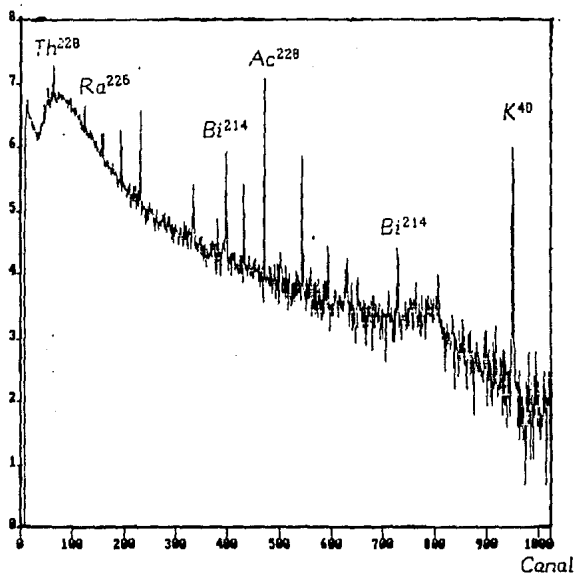
- A  $\equiv$  Número del fotopico encontrado.
- B  $\equiv$  Número de canal.
- C  $\equiv$  Energía ( keV ) ( Error asociado a la medición  $\pm 3$  keV )
- D  $\equiv$  Area del fotopico ( Ancho 7 puntos )
- E  $\equiv$  Actividad ( Bq ) ( Error asociado a la medición  $\pm 0.0051$  Bq )
- F  $\equiv$  Actividad Real ( Bq ) (Actividad obtenida restando el fondo)
- $\equiv$  Fuera de los límites de validez ó valor nulo.  
( Intervalo de validez en Energías 59 a 1460 keV. )  
( Intervalo de validez en Actividades 0.50 a 50.0 desintegraciones por seg )



Tabla A.1 Datos del espectro del material Cal Forte.  
Cantidad 561.25 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energia</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	14	—	—	—	—
2	45	61	154	4.10	4.10
3	55	77	641	9.17	5.51
4	66	94	1080	13.76	13.76
5	97	—	—	—	—
6	127	188	573	8.47	8.47
7	161	241	473	7.43	—
8	197	296	327	5.88	5.88
9	234	354	1206	15.09	11.54
10	337	513	422	6.88	—
11	384	586	101	3.55	—
12	400	611	808	10.91	4.81
13	434	663	405	6.73	2.77
14	503	770	78	3.29	3.29
15	546	837	923	12.14	1.59
16	595	912	201	4.58	0.96
17	630	—	—	—	—
18	653	—	—	—	—
19	730	1121	201	5.10	1.25
20	806	—	—	—	—
21	896	1378	81	3.33	3.33
22	950	1462	1805	21.31	—

Número de  
cuentas  
(log)

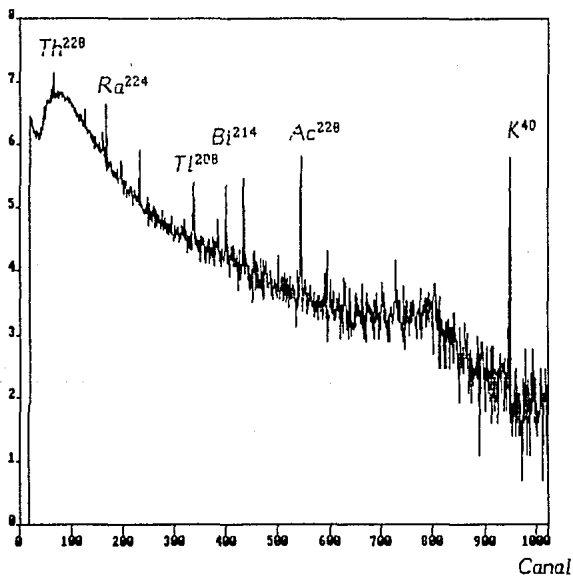


Gráfica A.1 Espectro del material Cal Forte.

Tabla A.2 Datos del espectro del material Cal Tolteca.  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	55	77	245	5.03	1.70
3	66	94	755	10.36	10.36
4	126	186	604	8.80	8.80
5	161	241	242	13.32	—
6	197	296	264	5.25	5.25
7	234	354	86	3.40	—
8	337	513	554	8.25	1.29
9	384	586	50	3.03	—
10	400	611	388	6.54	—
11	434	663	384	6.51	2.55
12	493	754	99	3.51	3.51
13	546	837	731	10.10	—
14	595	912	177	4.32	0.70
15	730	1121	83	3.36	—
16	806	1239	109	3.62	3.62
17	950	1462	1649	19.68	3.33

Número de  
cuentas  
(log)



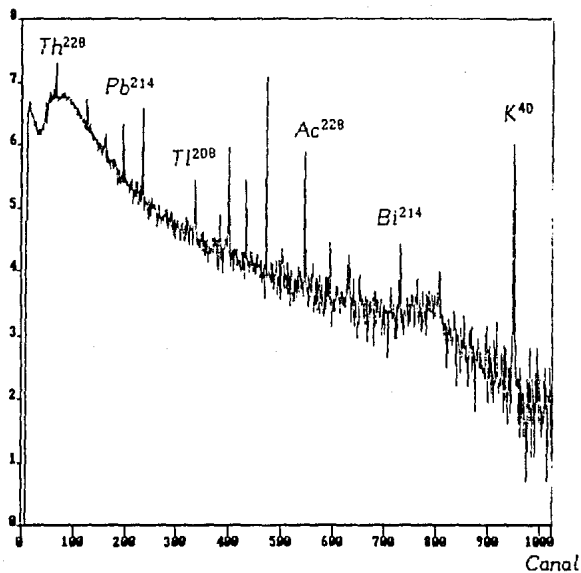
Gráfica A.2 Espectro del material Cal Tolteca

Tabla A.3 Datos del espectro de Cal Piracal.

Cantidad 488.6 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	44	—	—	—	—
3	54	75	363	6.29	2.62
4	66	94	716	9.95	9.95
5	126	186	832	11.17	11.17
6	161	241	583	8.58	4.81
7	197	296	536	8.10	8.10
8	210	316	338	6.03	6.03
9	234	354	1041	13.35	9.80
10	336	511	754	10.36	3.40
11	383	—	—	—	—
12	400	611	905	11.95	5.84
13	434	663	411	6.77	2.81
14	503	—	—	—	—
15	546	837	931	12.21	1.66
16	596	914	219	8.10	1.14
17	630	—	—	—	—
18	730	1121	193	4.51	0.66
19	806	—	—	—	—
20	866	1332	79	3.33	3.33
21	915	1408	68	3.18	3.18
22	950	1462	1694	20.16	—
23	981	1510	66	3.18	3.18

Número de  
cuentas  
(log)

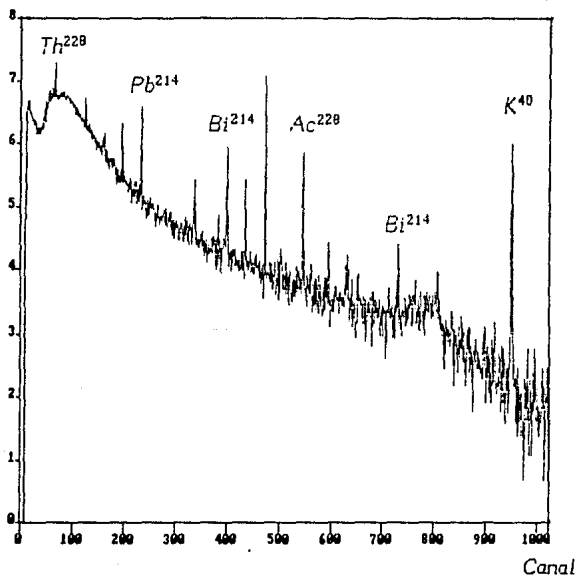


Gráfica A.3 Espectro del material Cal Piracal.

Tabla A.4 Datos del espectro del material Cal Cuernavaca.  
Cantidad 563.1 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	47	—	—	—	—
3	54	75	674	9.50	5.84
4	66	94	675	9.54	9.54
5	126	186	724	10.03	10.03
6	160	—	—	—	—
7	197	296	712	9.91	9.91
8	234	354	940	12.28	12.28
9	336	511	604	8.80	1.85
10	383	584	298	5.58	0.85
11	400	611	948	12.39	6.29
12	434	663	613	8.88	4.92
13	546	837	871	11.58	6.29
14	595	912	188	4.44	0.81
15	630	—	—	—	—
16	730	1121	231	4.92	1.07
17	806	—	—	—	—
18	950	1462	1684	20.05	—

Número de  
cuentas  
( log )



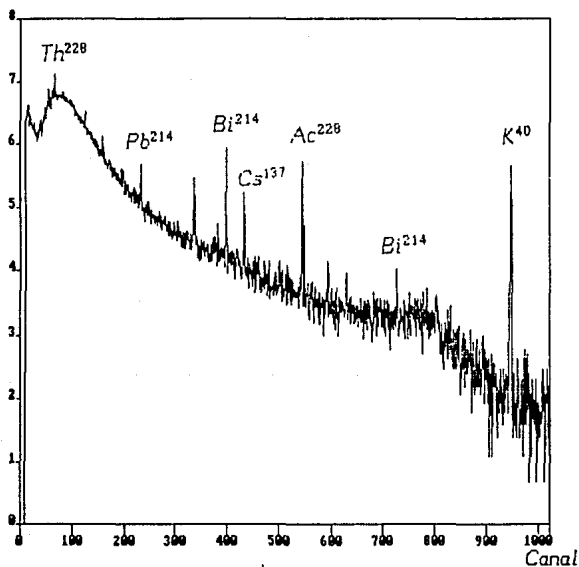
Gráfica A.4 Espectro del material Cal Cuernavaca.



Tabla A.5 Datos del espectro del material Yeso Tixteca.  
Cantidad 920.55 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	16	—	—	—	—
2	55	77	380	6.43	2.77
3	66	94	520	7.91	7.91
4	127	188	679	9.58	9.58
5	161	241	538	8.10	—
6	195	—	—	—	—
7	234	354	414	6.80	3.25
8	337	513	600	8.73	1.77
9	400	611	434	7.03	0.92
10	434	663	421	6.88	2.92
11	546	837	831	11.17	0.62
12	593	—	—	—	—
13	730	1121	142	3.95	—
14	950	1462	1608	19.27	—
15	961	—	—	—	—

Número de  
cuentas  
(log)

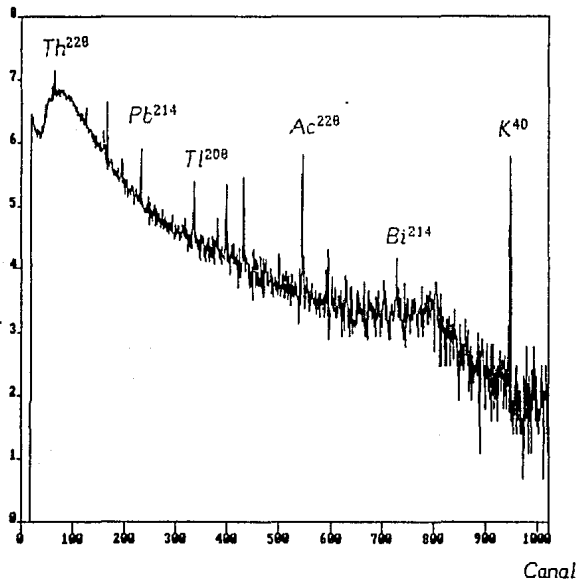


Gráfica A.5 Espectro del material Yeso Tixteca.

Tabla A.6 Datos del espectro del material Yeso Meleico.  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energfa</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	20	—	—	—	—
2	55	77	89	3.40	—
3	66	94	743	10.25	10.25
4	127	188	550	8.21	8.21
5	161	241	431	6.99	—
6	197	296	306	5.69	5.69
7	234	354	451	7.17	3.62
8	337	513	382	6.47	—
9	384	586	276	5.36	0.62
10	400	611	481	7.51	1.40
11	434	663	496	7.65	3.70
12	452	—	—	—	—
13	502	768	127	3.81	3.81
14	546	837	949	12.39	1.85
15	595	912	282	5.43	1.81
16	629	—	—	—	—
17	730	1121	151	4.07	—
18	805	1237	97	3.51	3.51
19	950	1462	1614	19.31	—

Número de  
cuentas  
(log)

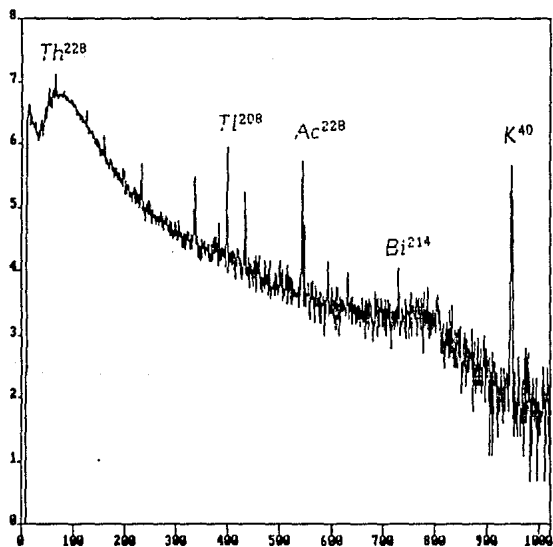


Gráfica A.6 Espectro del material Yeso Maleico.

Tabla A.7 Datos del espectro del material Yeso El Tigre.  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	46	—	—	—	—
3	55	77	130	3.84	—
4	66	94	932	12.21	12.21
5	127	188	324	5.88	5.88
6	161	241	197	4.55	—
7	197	296	295	5.55	5.55
8	215	324	59	3.10	3.08
9	234	354	287	5.47	1.92
10	337	513	410	6.77	—
11	384	586	142	3.95	—
12	400	611	424	6.91	0.81
13	434	663	391	6.58	2.62
14	546	837	842	11.28	0.74
15	595	912	184	4.40	0.77
16	630	—	—	—	—
17	896	1378	110	3.62	3.62
18	950	1462	1524	18.39	—

Número de  
cuentas  
(log)



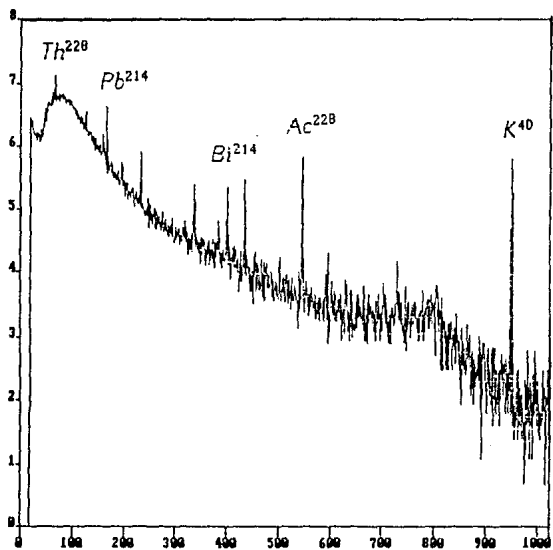
Canal

Gráfica A.7 Espectro del material Yeso El Tigre.

*Tabla A.8 Datos del espectro del material Yeso Anáhuac.  
Cantidad 949.6 gramos.*

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	16	—	—	—	—
2	55	77	380	6.43	2.77
3	66	94	520	7.91	7.91
4	127	188	679	9.58	9.58
5	161	241	538	8.10	0.62
6	195	—	—	—	—
7	234	354	414	6.80	3.25
8	337	513	600	8.73	1.77
9	400	611	434	7.03	0.92
10	434	663	421	6.88	2.92
11	546	837	831	11.17	0.62
12	593	—	—	—	—
13	730	1121	142	3.95	—
14	950	1462	1608	19.28	—
15	961	—	—	—	—

Número de  
cuentas  
(log)



Canal

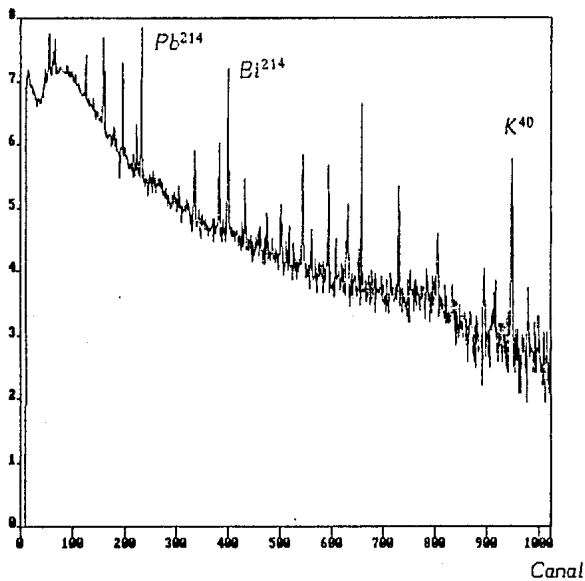
Gráfica A.8 Espectro del material Yeso Anáhuac.



Tabla A.9 Datos del espectro del material Cemento Blanco Anáhuac. Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	47	—	—	—	—
3	56	78	3021	34.34	30.34
4	61	—	—	—	—
5	66	94	2621	29.86	29.86
6	90	131	553	8.25	8.25
7	97	—	—	—	—
8	127	188	1894	22.24	22.24
9	161	241	4718	51.73	44.25
10	181	272	99	3.51	3.51
11	197	296	2256	26.05	26.05
12	225	340	726	10.06	10.06
13	234	354	4299	47.36	43.44
14	306	465	167	4.25	4.25
15	337	513	1133	14.32	7.36
16	383	584	1021	13.14	8.39
17	400	611	3339	37.33	31.22
18	434	663	269	5.29	1.33
19	476	728	324	5.88	5.88
20	503	770	197	4.55	4.55
21	520	796	158	4.14	4.14
22	546	837	912	12.02	1.48
23	562	861	226	4.84	4.84
24	595	912	761	10.43	6.80
25	610	936	83	3.36	3.36
26	632	970	623	8.99	5.92
27	653	1002	205	4.62	4.62
28	730	1121	738	10.18	6.32
29	806	1239	337	6.03	6.03
30	896	1378	190	4.47	4.47
31	949	1460	1627	19.46	—
32	981	1510	125	3.77	3.77

Número de  
cuentas  
( log )

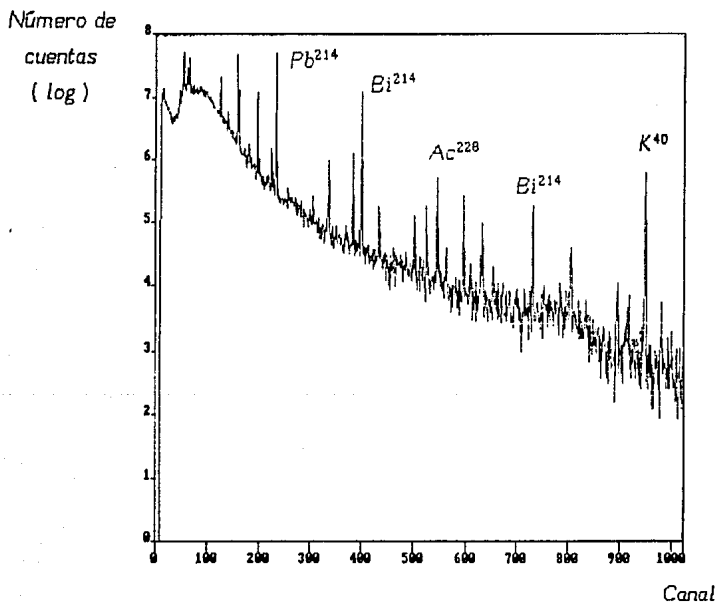


Gráfica A.9 Espectro del material Cemento Blanco Anáhuac.

Tabla A.10 Datos del espectro del material Cemento Blanco Cruz Azul. Cantidad 992.75 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	46	—	—	—	—
3	56	78	2700	30.67	27.01
4	61	86	249	5.10	—
5	66	94	2667	30.30	30.30
6	88	128	293	5.55	5.55
7	127	188	1821	21.49	21.49
8	142	211	484	7.54	7.54
9	161	241	3750	41.62	34.15
10	172	258	522	7.95	7.95
11	181	272	182	4.40	4.40
12	198	298	1570	18.87	18.87
13	225	340	568	8.43	8.43
14	234	354	3975	43.95	40.26
15	306	465	158	4.14	4.14
16	337	513	982	12.73	5.77
17	384	586	1183	14.84	10.10
18	401	612	3234	36.22	31.08
19	434	—	—	—	—
20	477	730	305	5.66	5.66
21	503	770	89	3.40	3.40
22	528	809	166	4.21	4.21
23	546	837	876	11.62	1.07
24	563	863	215	4.73	4.73
25	596	914	621	8.99	5.36
26	610	936	140	3.95	3.95
27	633	971	566	8.39	5.32
28	653	1002	149	4.03	4.03
29	731	1123	617	8.91	5.06
30	753	1157	104	3.58	3.58
31	807	1241	297	5.58	5.58

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
32	834	1282	150	4.07	4.07
33	879	1352	112	3.66	3.66
34	897	1380	170	4.25	4.25
35	951	1463	1729	20.54	—

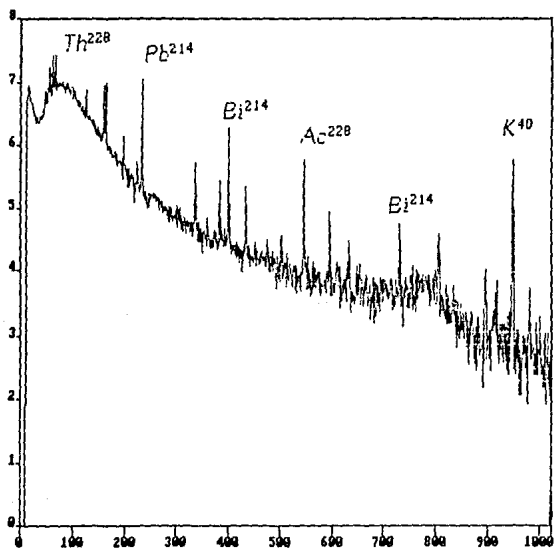


Gráfica A.10 Espectro del material Cemento Blanco Cruz Azul.

Tabla A.11 Datos del espectro del material Cemento Gris Cruz Azul. Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	46	—	—	—	—
3	55	77	1625	19.46	15.79
4	66	94	1481	17.94	17.94
5	127	188	703	9.80	9.80
6	161	241	1984	23.19	15.72
7	197	296	657	9.36	9.36
8	225	340	321	5.84	5.84
9	234	354	1764	20.90	17.35
10	337	513	542	8.14	1.18
11	383	584	397	6.62	1.88
12	400	611	1238	15.39	9.28
13	434	663	346	6.10	1.77
14	502	768	247	5.06	5.06
15	546	837	849	11.36	4.51
16	595	912	217	4.77	1.14
17	632	970	247	5.06	5.06
18	730	1121	349	6.14	2.29
19	806	1239	253	5.14	5.14
20	949	1460	2843	32.15	9.13

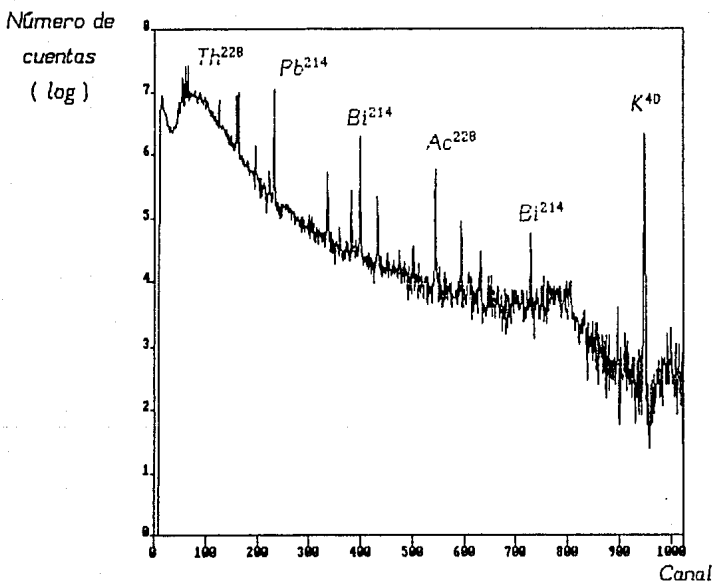
Número de  
cuentas  
( log )



Gráfica A.11 Espectro del material Cemento Gris Cruz Azul.

Tabla A.12 Datos del espectro del material Cemento Gris Moctezuma. Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	55	77	792	10.76	7.10
3	66	94	1194	14.95	14.95
4	127	188	875	11.61	11.61
5	161	241	1248	15.50	8.02
6	197	296	748	10.29	10.29
7	225	340	223	4.81	4.81
8	234	354	1559	18.76	15.28
9	401	612	1266	15.69	9.58
10	434	663	310	5.73	1.77
11	503	—	—	—	—
12	546	837	671	9.47	—
13	596	914	286	5.47	1.85
14	610	936	162	4.18	4.18
15	633	971	277	5.36	2.29
16	731	1123	159	4.14	—
17	805	—	—	—	—
18	831	—	—	—	—
19	897	1380	143	3.99	3.99
20	950	1462	2853	32.26	9.25
21	337	513	489	7.58	0.63
22	384	586	281	5.43	0.70



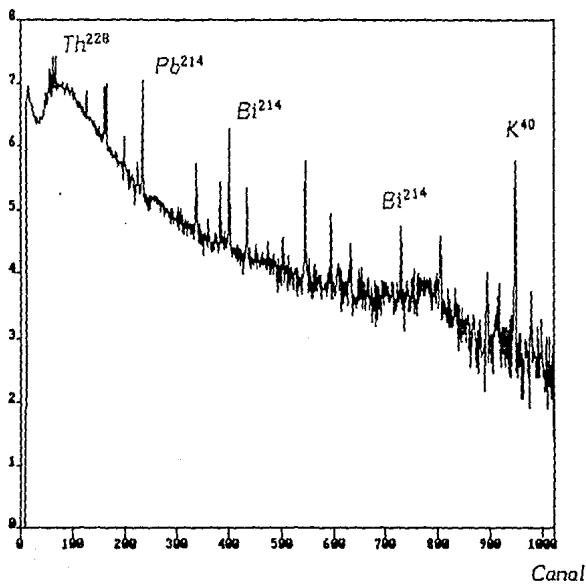
Gráfica A.12 Espectro del material Cemento Gris Moctezuma.



Tabla A.13 Datos del espectro del material Cemento Gris Tolteca. Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	56	77	1405	17.16	13.50
3	66	94	1167	14.65	14.65
4	99	188	1273	15.76	15.76
5	127	241	2093	24.34	16.87
6	161	296	407	6.73	6.73
7	181	340	462	7.33	7.33
8	197	354	1225	15.28	11.73
9	225	513	540	8.14	1.18
10	234	584	588	8.62	4.62
11	337	611	1114	14.13	4.33
12	383	663	449	1.18	3.22
13	400	837	918	12.06	1.52
14	434	860	129	3.85	3.85
15	476	912	320	5.85	2.22
16	503	970	275	5.36	2.29
17	730	1121	332	5.96	2.11
18	736	—	—	—	—
19	806	1239	314	5.77	5.77
20	950	1462	2912	32.85	9.84

Número de  
cuentas  
(log)

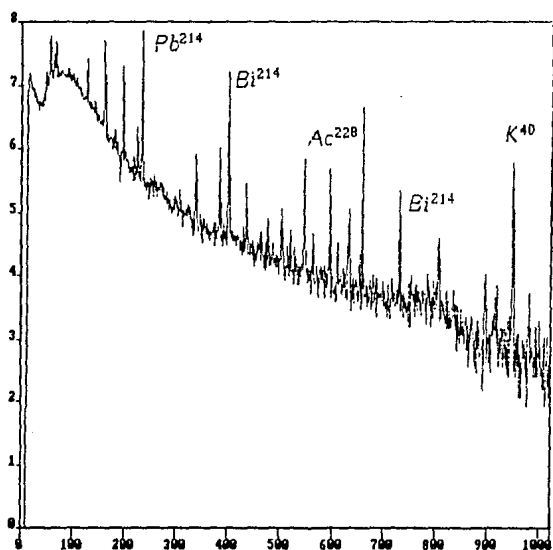


Gráfica A.13 Estectro del material Cemento Gris Tolteca.

Tabla A.14 Datos del espectro del material Cemento Gris Cruz Azul. Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	47	—	—	—	—
3	56	78	2365	27.16	23.50
4	66	94	1793	21.20	21.20
5	78	112	224	4.81	4.81
6	127	188	1493	18.06	18.06
7	161	241	2516	28.75	21.26
8	197	296	1819	21.46	21.46
9	225	340	256	5.18	5.18
10	234	354	3633	40.40	36.85
11	337	513	907	11.95	4.99
12	383	584	646	9.213	4.48
13	400	611	2762	31.30	25.20
14	434	663	53	3.03	—
15	476	728	188	4.44	4.44
16	503	770	446	7.15	7.15
17	513	785	89	3.44	3.44
18	546	837	634	9.10	—
19	560	—	—	—	—
20	595	912	409	6.77	3.14
21	608	932	57	3.07	3.07
22	632	970	325	5.88	2.81
23	730	1121	725	10.06	6.22
24	806	1239	138	3.92	5.92
25	834	1282	121	3.74	3.74
26	896	1378	131	3.85	3.85
27	950	1462	2736	31.04	8.03
28	980	1508	109	3.63	3.63

Número de  
cuentas  
( log )



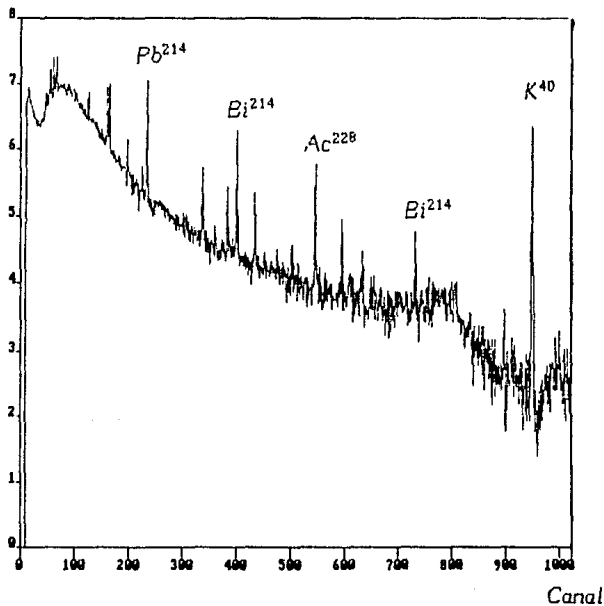
Canal

Gráfica A.14 Espectro del material Cemento Gris Cruz Azul.

Tabla A.15 Datos del espectro del material Cemento Gris  
Anáhuac. Cantidad 959.8 gramos

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	46	—	—	—	—
3	56	78	1136	14.36	10.69
4	66	94	1468	17.80	17.80
5	127	188	1218	15.21	15.21
6	161	241	1662	19.83	12.36
7	197	296	1042	13.36	13.36
8	225	340	103	3.55	3.55
9	234	354	1615	19.35	15.80
10	337	513	702	9.80	2.85
11	383	584	598	8.73	3.99
12	400	611	1113	14.09	7.99
13	434	663	252	5.11	1.15
14	503	770	96	3.48	3.48
15	546	837	672	9.51	—
16	595	912	278	5.40	1.78
17	632	970	197	4.55	1.48
18	663	—	—	—	—
19	730	1121	353	6.18	2.33
20	806	1239	316	5.81	5.81
21	894	—	—	—	—
22	950	1462	2783	31.52	8.51
23	979	1507	89	3.44	3.44

Número de  
cuentas  
(log)

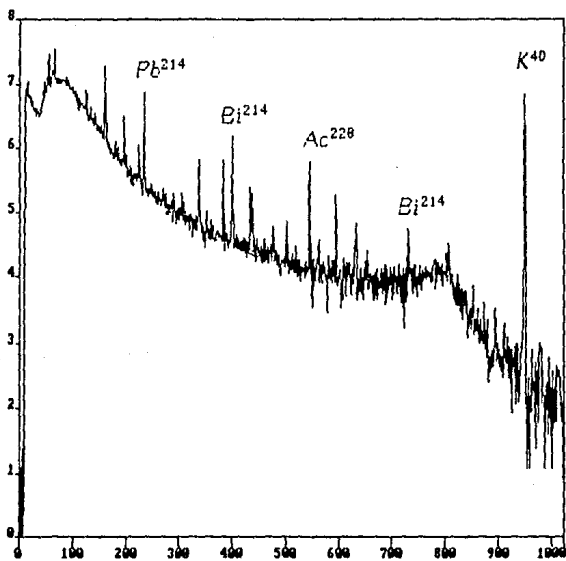


Gráfica A.15 Espectro del material Cemento Gris Anáhuac

Tabla A.16 Datos del espectro del material Adhesivo Crest.  
Cantidad. 816.9 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	14	—	—	—	—
2	54	75	1003	12.95	9.29
3	66	94	1087	13.84	13.84
4	126	186	143	3.99	3.99
5	160	239	590	8.66	8.66
6	197	296	158	4.14	4.14
7	225	340	97	3.16	3.16
8	234	354	916	12.06	8.51
9	336	511	763	10.43	3.48
10	383	584	427	6.96	2.22
11	400	611	720	10.03	3.92
12	434	663	245	5.032	1.07
13	502	—	—	—	—
14	546	837	747	10.28	10.28
15	561	860	124	3.77	3.77
16	595	912	278	5.40	1.78
17	609	934	227	4.85	4.85
18	632	970	310	5.74	2.70
19	730	1121	303	5.66	1.81
20	804	1236	153	4.11	4.11
21	949	1460	1637	19.57	—

Número de  
cuentas  
(log)



Canal

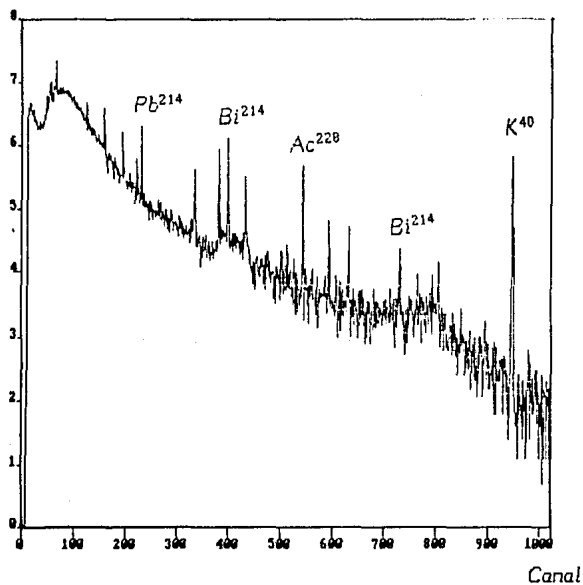
Gráfica A.16 Espectro del material Adhesivo Crest.



Tabla A.17 Datos del espectro del material Adhesivo Adheramic.  
Cantidad 843.9 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	44	—	—	—	—
3	56	78	1001	12.95	9.29
4	66	94	783	10.66	5.07
5	126	186	807	10.91	10.91
6	161	241	1467	17.79	10.32
7	197	296	543	8.18	8.18
8	225	340	193	4.51	4.51
9	234	354	811	10.95	7.40
10	337	513	654	9.32	2.37
11	383	584	424	6.919	2.18
12	400	611	813	10.98	4.88
13	434	663	395	6.62	2.63
14	476	728	120	3.74	3.74
15	503	—	—	—	—
16	546	837	785	10.69	—
17	595	912	315	5.77	2.15
18	633	971	184	4.40	1.33
19	654	1004	97	3.51	3.51
20	730	1121	311	5.74	1.88
21	805	1237	182	4.40	4.40
22	950	1462	1721	20.46	—

Número de  
cuentas  
(log)

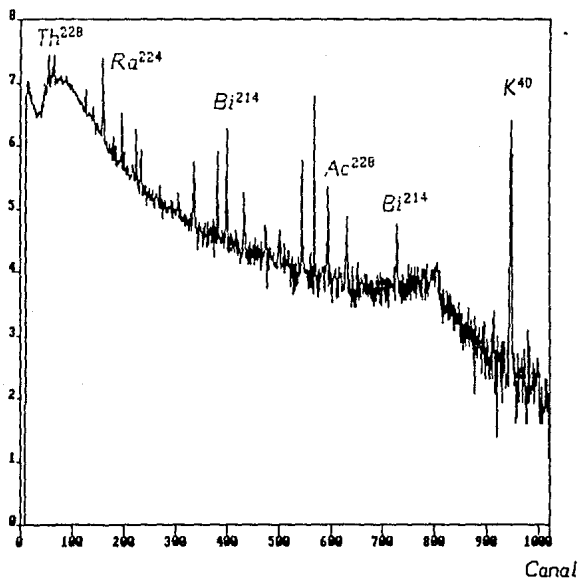


Gráfica A.17 Espectro del material Adheramic

Tabla A.18 Datos del espectro del material Tabique.  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	área	actividad	act-real
1	14	—	—	—	—
2	47	—	—	—	—
3	56	78	1812	21.39	17.72
4	61	—	—	—	—
5	66	94	1813	21.42	21.42
6	88	128	415	6.80	6.80
7	127	188	910	11.99	11.99
8	142	211	445	7.14	7.14
9	161	241	2903	32.78	25.31
10	197	296	695	9.73	9.73
11	218	329	229	4.88	4.88
12	225	340	781	10.65	10.65
13	234	354	1574	18.91	15.36
14	337	513	608	8.84	1.88
15	383	584	834	11.21	6.47
16	400	611	1234	15.35	9.25
17	434	663	182	4.04	—
18	476	728	454	7.21	7.21
19	503	770	211	4.69	4.69
20	546	837	849	11.35	0.81
21	596	914	570	8.44	4.81
22	632	970	342	6.07	2.99
23	653	1002	84	3.38	3.38
24	730	1121	320	5.85	2.07
25	895	1377	71	3.22	3.22
26	915	1408	99	3.52	3.52
27	950	1462	3204	35.93	12.91

Número de  
cuentas  
(log)

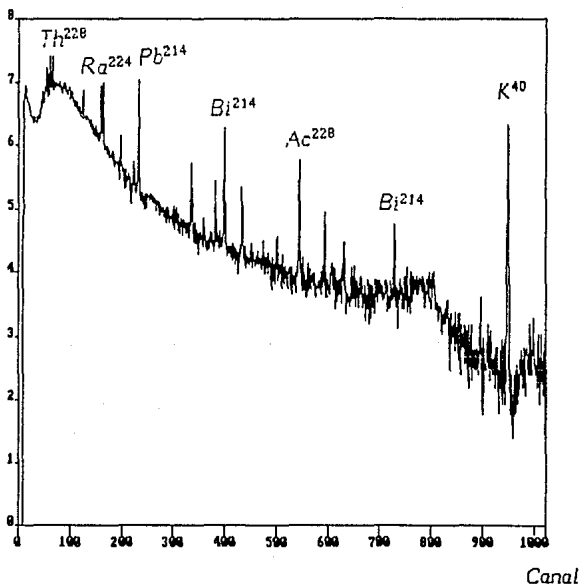


Gráfica A.18 Espectro del material Tabique.

Tabla A.19 Datos del espectro del material Tabique de la huerta.  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	45	61	148	4.03	4.03
3	56	78	1888	22.20	18.54
4	61	—	—	—	—
5	66	94	2337	26.86	26.86
6	126	186	1486	18.01	18.01
7	161	241	4448	48.91	41.44
8	197	296	287	5.47	5.47
9	225	340	585	8.58	8.58
10	234	354	1811	21.38	17.83
11	306	465	366	6.29	6.29
12	336	511	1063	13.58	6.62
13	400	611	1248	15.50	9.39
14	434	663	189	4.47	—
15	476	728	315	5.77	5.77
16	502	—	—	—	—
17	513	785	88	3.40	3.40
18	520	—	—	—	—
19	546	837	660	9.36	—
20	562	861	237	4.95	4.95
21	595	912	706	9.84	6.22
22	619	—	—	—	—
23	632	970	636	9.14	6.07
24	730	1121	263	5.25	1.41
25	806	1239	378	6.44	6.44
26	949	1460	3999	44.22	21.20
27	383	584	941	12.32	7.58

Número de  
cuentas  
(log)

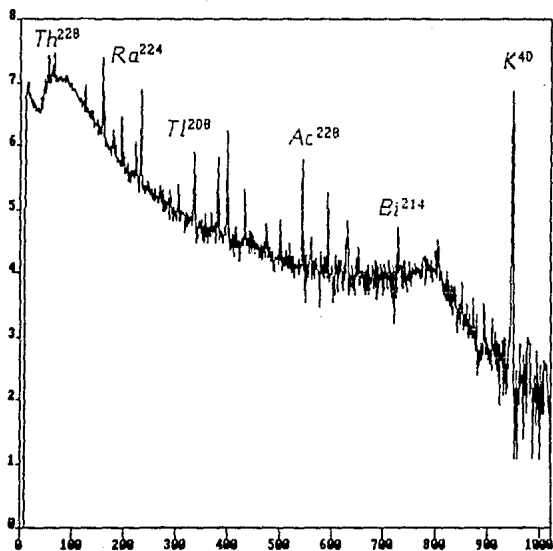


Gráfica A.19 Espectro del material Tabtque de la Huerta.

Tabla A.20 Datos del espectro del material Arena.  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	46	—	—	—	—
3	56	78	1546	18.61	14.95
4	66	94	1422	17.32	17.32
5	89	129	515	7.84	7.84
6	127	188	591	8.66	8.66
7	161	241	2503	28.60	21.13
8	181	272	366	6.33	6.33
9	197	296	436	7.03	7.03
10	225	340	417	6.85	6.85
11	234	354	1405	17.17	13.62
12	306	465	333	5.96	5.96
13	337	513	888	11.76	4.81
14	357	—	—	—	—
15	583	—	—	—	—
16	400	611	1080	13.76	7.66
17	434	663	377	6.44	2.48
18	476	728	205	4.62	4.62
19	503	770	247	5.07	5.07
20	546	837	738	10.18	—
21	561	860	274	5.33	5.33
22	595	912	536	8.10	4.48
23	610	936	48	2.99	2.99
24	663	971	439	7.07	3.99
25	730	1121	184	4.40	—
26	806	1239	243	5.03	5.03
27	950	1462	5051	54.87	31.86
28	979	—	—	—	—

Número de  
cuentas  
(log)



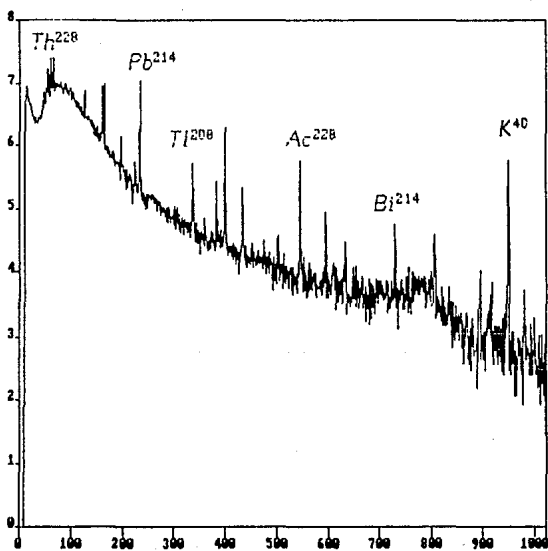
Gráfica A.20 Espectro del material Arena.



Tabla A.21 Datos del espectro del material Arena.  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	14	—	—	—	—
2	46	—	—	—	—
3	56	78	1347	16.54	12.87
4	66	94	1411	17.21	17.21
5	89	129	432	6.99	6.99
6	127	188	567	8.39	8.39
7	161	241	2043	23.83	16.35
8	197	296	831	11.17	11.17
9	225	340	433	6.99	6.99
10	234	354	1252	15.54	11.98
11	324	493	86	3.40	3.40
12	337	513	771	10.54	3.58
13	383	584	715	9.95	5.21
14	400	611	1104	14.02	7.92
15	434	663	285	5.48	1.52
16	477	730	97	5.52	3.52
17	502	768	73	3.26	3.26
18	546	837	720	9.99	—
19	595	912	505	7.77	4.14
20	632	970	247	5.07	1.99
21	730	1121	298	5.58	1.73
22	806	1239	122	3.77	3.77
23	896	1378	106	3.56	3.56

Número de  
cuentas  
(log)



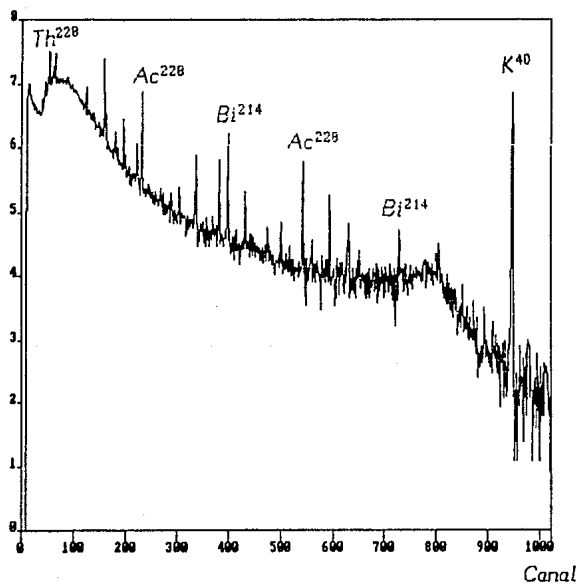
Gráfica A.21 Espectro del material Arena

Canal

Tabla A.22 Datos del espectro del material Arena  
Cantidad 1000 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	16	—	—	—	—
2	44	—	—	—	—
3	47	—	—	—	—
4	56	78	1036	13.32	9.65
5	66	94	1220	15.20	15.20
6	90	131	98	3.52	3.52
7	126	186	1290	15.94	15.94
8	161	241	2914	32.89	25.42
9	181	272	78	3.29	3.29
10	197	296	290	5.51	5.51
11	218	329	265	5.25	5.25
12	225	340	270	5.29	5.29
13	234	354	1426	17.35	13.80
14	337	513	468	7.36	—
15	383	584	887	11.73	6.99
16	400	611	947	12.36	6.25
17	434	—	—	—	—
18	476	728	489	7.58	7.58
19	503	770	166	4.21	4.21
20	546	837	572	8.47	—
21	562	861	56	3.07	3.07
22	595	912	582	8.58	4.96
23	632	970	240	4.99	1.92
24	730	1121	254	5.14	1.29
25	806	1239	144	3.99	3.99
26	950	1462	4378	48.17	25.16

Número de  
cuentas  
( log )

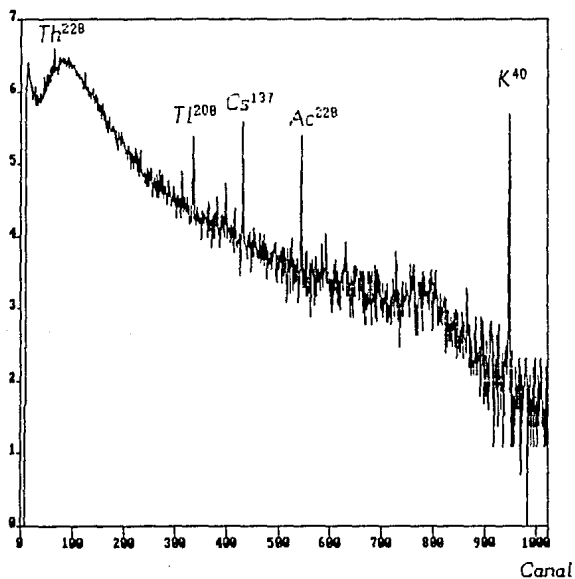


Gráfica A.22 Espectro del material Arena

Tabla A.23 Datos del espectro del material Varilla.  
Cantidad 2489 gramos.

A	B	C	D	E	F
f-pico	canal	energía	area	actividad	act-real
1	15	—	—	—	—
2	66	94	303	5.66	5.66
3	126	186	347	6.11	6.11
4	337	513	493	7.62	—
5	383	584	195	4.51	—
6	400	611	166	4.22	—
7	418	638	127	3.81	3.81
8	434	663	356	6.22	2.26
9	546	837	571	8.43	—
10	631	968	98	3.52	3.52
11	895	—	—	—	—
12	912	—	—	—	—
13	950	1462	1372	16.79	—

Número de  
cuentas  
(log)

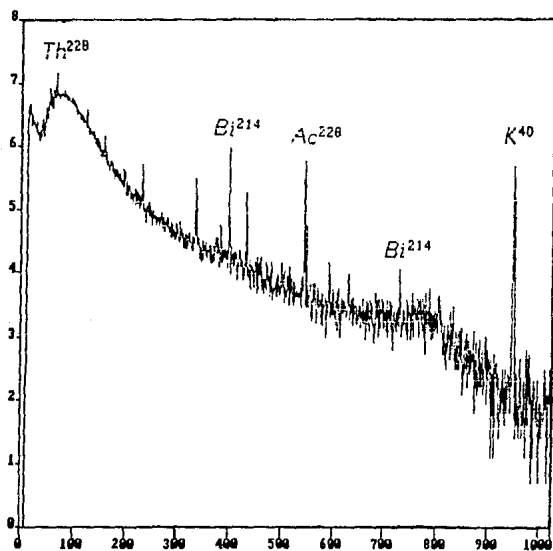


Gráfica A.23 Espectro del material Varilla

Tabla A.24 Datos del espectro del material Marmol ( Blanco Rosado ) Cantidad 1144.7 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	55	77	526	7.99	4.32
3	66	94	926	12.17	12.17
4	126	186	302	5.66	5.66
5	161	241	602	8.77	1.29
6	197	296	306	5.69	5.69
7	234	354	436	7.03	3.48
8	237	358	521	7.92	7.92
9	383	584	196	4.55	—
10	400	611	666	9.44	3.33
11	434	663	344	6.07	2.11
12	502	—	—	—	—
13	546	837	762	10.43	—
14	595	912	182	4.40	0.77
15	632	970	305	5.66	2.59
16	730	1121	301	5.88	1.77
17	762	—	—	—	—
18	950	1462	1456	17.68	—

Número de  
cuentas  
(log)



Canal

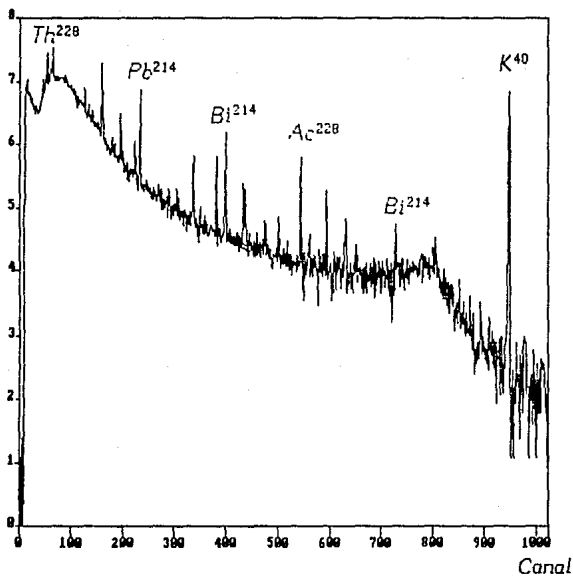
Gráfica A.24 Espectro del material Marmol ( Blanco Rosado )



Tabla A.25 Datos del espectro del material Marmol cafe cantidad 1007.0 gramos.

A	B	C	D	E	F
<i>f-pico</i>	<i>canal</i>	<i>energía</i>	<i>area</i>	<i>actividad</i>	<i>act-real</i>
1	15	—	—	—	—
2	55	77	418	6.85	3.18
3	66	94	514	7.84	7.84
4	126	185	347	6.11	6.11
5	163	244	710	9.88	9.88
6	197	296	794	10.77	10.77
7	234	354	1322	16.28	12.72
8	337	513	328	5.92	—
9	383	584	178	4.33	—
10	400	611	1036	13.28	7.18
11	434	663	245	5.03	1.07
12	500	—	—	—	—
13	546	837	694	9.73	—
14	595	912	171	4.29	—
15	630	—	—	—	—
16	730	1121	167	4.22	—
17	806	1239	176	4.33	4.33
18	896	—	—	—	—
19	950	1462	1773	20.98	—

Número de  
cuentas  
(log)



Gráfica A.25 Espectro del material Marmol cafe

Para la determinación de los elementos radiactivos es necesario comparar las energías tabuladas anteriormente, <sup>(26)</sup> con las energías de emisión de los elementos radiactivos naturales, dando como resultado la siguiente tabla de elementos más probables.

Tabla A.26 Elementos probables y sus energías de emisión.

Elemento	Energía ( keV )	Elemento	Energía ( keV )
Th <sup>230</sup>	67.7	Ac <sup>228</sup>	463
Th <sup>228</sup>	94.4	Be <sup>7</sup>	477.5
Th <sup>230</sup>	100.0	Tl <sup>208</sup>	511
Ac <sup>228</sup>	129.0	Rn <sup>222</sup>	510.3
Ce <sup>144</sup>	133.5	Tl <sup>208</sup>	583.2
U <sup>235</sup>	185.7	Bi <sup>214</sup>	609.3
Ra <sup>226</sup>	186.0	Bi <sup>212</sup>	661.6
Ac <sup>228</sup>	209.0	Cs <sup>137</sup>	665.6
Pb <sup>212</sup>	238.6	Bi <sup>212</sup>	727.2
Ra <sup>224</sup>	241.0	Ac <sup>228</sup>	755
Pb <sup>214</sup>	241.9	Ac <sup>228</sup>	768.4
Ra <sup>223</sup>	269.4	Bi <sup>214</sup>	772
Ac <sup>228</sup>	270.0	Ac <sup>228</sup>	782
Pb <sup>214</sup>	295.2	Bi <sup>214</sup>	786
Pb <sup>212</sup>	301.0	Ac <sup>228</sup>	795
Ac <sup>228</sup>	328.0	Bi <sup>214</sup>	806
Ac <sup>228</sup>	338.5	Ac <sup>228</sup>	841
Pb <sup>214</sup>	352.0	Tl <sup>208</sup>	860

Tabla A.26 Continuación

<i>Elemento</i>	<i>Energía ( kev )</i>	<i>Elemento</i>	<i>Energía ( kev )</i>
Ac <sup>228</sup>	911	Bi <sup>214</sup>	1238.2
Bi <sup>214</sup>	934	Bi <sup>214</sup>	1281.1
Ac <sup>228</sup>	969	Bi <sup>214</sup>	1377.7
Pa <sup>234</sup>	1001	Bi <sup>214</sup>	1408.0
Bi <sup>214</sup>	1120.4	K <sup>40</sup>	1461.0
Bi <sup>214</sup>	1155.3		

Hay que resaltar que además de los elementos de las cuatro cadenas radiactivas existen otros elementos, como el K<sup>40</sup> que se encuentra en grandes cantidades en nuestro entorno.

## APENDICE B

### PROGRAMAS

Se utilizó el programa " menu.sav "(\*) como programa de utilería para la determinación de los picos de cada espectro.

Se realizó un programa para listar las parejas de puntos de cada espectro para posteriormente con la ayuda del programa energraph graficar los espectros. Este se lista en seguida.

Programa listalog.sav

```
10 Dim Nom$(12)
20 Input"NOMBRE: ",Nom$
```

(\*) Tesis (ref. # 16 ).

```

30  Short Dat(1024)
40  Open\1,4\Nom$
50  For I=1 To 1024
60  Get\1,I\Dat(I)
70  If Dat(I) = 0 Then Goto 90
80  Dat(I) = Log(Dat(I))
90  Next I
100 Close
110 For I=1 To 1020 Step 5
120 @ Tab(1); I-1;Tab(10);Dat(I);Tab(20);Dat(I+1);Tab(30);Dat(I+2);
Tab(40);Dat(I+3);Tab(50);Dat(I+4)
130 Next I
140 @ Tab(1);1020;Tab(10);Dat(1020);Tab(20);Dat(1021);Tab(30);Da
t(1022);Tab(40);Dat(1023)
150 End

```

Se desarrolló un programa para el cálculo de la energía y la actividad para cada pico encontrado, dadas las expresiones del capítulo 2 sección 2.

Programa lienac.sav

```

10  Dim Nom$(11)
20  Input"  NOMBRE DEL ESPECTRO  ",Nom$
30  Print
40  Input"  NUMERO DE PICOS ENCONTRADOS  ",Nup
50  Dim Ncan(Nup),Ncue(Nup),A(7),A1(7)

```

```

60 Print
70 For I=1 To Nup
80 Print Using" DAME EL CANAL DEL PICO ### ",I;
90 Input " ",Ncan(I)
100 Next I
110 Open\1,4,1\Ncm$
120 For I=1 To Nup
130 J=Ncan(I)-3
140 H=Ncan(I)+3
150 Can=1 : Sum=0
160 For K=J To H
170 Get\1,K\Num
180 A(Can)=Num
190 Can=Can+1
200 Next K
210 For M=0 To 6
220 P=7-M
230 A1(P)=A(P)-A(7)
240 Sum=Sum+A1(P)
250 Next M
260 Ncuc(I)=Int(Sum)
270 Next I
280 Close
290 Can=1
300 Pen=1.5478 : Ord=-8.066
310 Pen1=2.92E-04 : Ord1=0.0672
320 Mu=-2.036

```

```

330 @< <ONTROL><P><ESC> " Esc : On Esc Gto Sig
340 *Det : Goto Det
350 *Sig : Print
360 Print" ESPECTRO ",Nom$
370 Print
380 @< NO. CANAL ENERGIA(keV) AREA ACTIVIDAD(nCi)"
390 For I=1 To Nup
400 If Ncan(I)<38 Then Goto Err
410 If Ncue(I)<26 Then Goto Err
420 Ene=Pen*Ncan(I)+Ord
430 Are=2*Ncue(I)-Ncue(I)*Exp(Mu*Ene/1000)
440 Ac=Are*Pen1+Ord1
450 @ Tab(4);Can;Tab(11);Ncan(I);Tab(24);Int(Ene);Tab(37);Int(Are);
Tab(48);
460 @ Using"##.###",Ac : Goto Corr
470 *Err : @ Tab(4);Can;Tab(11);Ncan(I);" FUERA DE LOS LIMITES
DE VALIDEZ "
480 *Corr : Can=Can+1
490 Next I
500 End

```

Los programas siguientes se realizaron en lenguaje C a diferencia de los anteriores para aumentar la rapidez y eficiencia. Estos calculan las curvas de isodosis para una habitación de acuerdo con lo expuesto en el capítulo 2 sección 4.



```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
/* wdecla.h
 * programa para la definicion de constantes, variables
 * caracter y hexadecimal
 */
#define ESC 0x1b
#define BIP 0x07
#define EQII 0xc0
#define EQSI 0xda
#define EQID 0xd9
#define EQSD 0xbf
#define HORS 0xc4
#define VERS 0xb3
#define ESQID 0xbc
#define ESQSI 0xc9
#define ESQSD 0xbb
#define ESQII 0xc8
#define HORD 0xcd
#define VERD 0xba
#define ESQD 0xb8
#define ESQD1 0xbd
#define ESQD2 0xb7
#define ESQD3 0xd3

#define SESC "%c%c%c%c",ESC,'='
#define PT printf

```

```
#define PTT          printf("%s"
#define PFT          printf("%c%c",ESC
#define PCT          printf("%c%c%d%d",ESC
```

```
#include<stdio.h>
```

```
#include<math.h>
```

```
/* decl.h
```

```
*/
```

```
struct variables {
```

```
    double   pro[20][2],
            z,enerf[35],act[35],
            rad,limi,lims,
            zd,yd,
            x0,y0,
            x1,y1,
            delta,eps,
            eva,ele,
            gam[50],
            act[50],
            rad,rad1,
            inix,iniy,
            limi,lims,
            xm,ym,
            f,x,y,z,
```

```
        f,x2,x3,  
        prof,largo,alt,  
        f0;  
};
```

```
#include"wdecla.h"  
/*  arreglo.c  
*/  
void arreglo()  
{  
    PFT,'H');  
    PFT,'J');  
    for (i=10;i<=60;i++){  
        term_cur(1,i);  
        PFT,HORS);  
        term_cur(2,i);  
        PFT,HORD);  
    }  
    for (i=3;i<=5;i++){  
        term_cur(i,9);  
        PFT,VERS);  
        term_cur(i,11);  
        PFT,VERD);  
    }  
    for (i=16;i<=18;i++){
```

```

    term_cur(1,9);
    PFT,VERS);
    term_cur(i,11);
    PFT,VERD);
}
for (i=3;i<=15;i++){
    term_cur(i,59);
    PFT,VERD);
    term_cur(i,61);
    PFT,VERS);
}
for (i=10;i<=60;i++){
    term_cur(20,i);
    PFT,HORS);
    term_cur(19,i);
    PFT,HORD);
}
term_cur(1,9);
PFT,ESQI);
term_cur(1,61);
PFT,EQSD);
term_cur((2,9);
PFT,VERS);
term_cur(2,10);
PT(" ");
term_cur(2,11);
PFT,ESQSI);

```

term\_cur(2,59);  
PT(" ");  
term\_cur(2,61);  
PFT,VERS);  
term\_cur(20,9);  
PFT,EQII);  
term\_cur(20,61);  
  
PFT,ESQD);  
term\_cur(6,9);  
PFT,EQII);  
term\_cur(6,10);  
PFT,HORS);  
term\_cur(6,11);  
PFT,ESQD);  
term\_cur(15,9);  
PFT,EQSI);  
term\_cur(15,10);  
PFT,HORS);  
term\_cur(15,11);  
PFT,ESQD2);  
term\_cur(15,59);  
PFT,ESQD3);  
term\_cur(15,60);  
PFT,HORS);  
term\_cur(15,61);  
PFT,EQID);  
term\_cur(23,1);

```

}

#include"decl.h"
/*  ajuste.c
*/
extern void evalua();
extern struct variables Dat;
double ajuste()
{
    double bet,alf,yp,fp,n;
    Dat.eps=0.01;
    Dat.delta=0.1;
    bet=3.141592/2.0;
    alf=bet;
    Dat.xm=Dat.x1;
    Dat.ym=Dat.y1;
    evalua();
    Dat.f0=Dat.eva;
    n=1;
    do{
        xp=Dat.delta*cos(alf);
        yp=Dat.delta*sin(alf);
        Dat.xm=Dat.x1+xp;
        Dat.ym=Dat.y1+yp;
        evalua();
    }
}

```

```

fp=Dat.eva;
n=2*n;
if ( fp == Dat.f0 ) brak;
if ( fp > Dat.f0 )
    alf=alf-bet/n;
else
    alf=alf+bet/n;
}while ( abs(fp-Dat.f0) > Dat.eps );
Dat.x1=xm;
Dat.y1=ym;
}

```

```

#include"decl.h"
/* principal.c
*/
extern void datos();
extern void arreglo();
extern void ajuste();
struct variables Dat;
main()
{
    double inc ;
    int l,j;
    inc=0.2;
    datos();
}

```

```

arreglo();
for (i=0;i<=2;i++){
    Dat.x1=0.0;
    Dat.y1=1.0-inc*i;
    ajuste();
}
}

```

```

#include"decl.h"
/*  evalua.c
*/
extern struct variables Dat;
extern void integral();
void evalua()
{
    double sum;
    int i;
    Dat.rad1=0.0;
    Dat.x0=Dat.xm;
    Dat.y0=Dat.ym;
    Dat.limi=Dat.alt/2.0;
    Dat.lims=-Dat.alt/2.0;
/*  caso 1      */
    Dat.x2=Dat.prof/2.0;

```



```

Dat.x3=-Dat.prof/2.0;
Dat.x4=Dat.x0;
Dat.y=-Dat.larg/2.0-Dat.y0;
integral();
Dat.rad1=Dat.rad12+Dat.rad;
/* caso 2 */
Dat.x2=-Dat.larg/2.0+1.0;
Dat.x3=-dat.larg/2.0;
Dat.x4=Dat.y0;
Dat.y=Dat.prof/2.0-Dat.x0;
integral();
Dat.rad1=Dat.rad1+Dat.rad;
/* caso 3 */
Dat.x2=Dat.larg/2.0;
Dat.x3=Dat.larg/2.0-1.0;
Dat.x4=Dat.y0;
Dat.y=Dat.prof/2.0-Dat.x0;
integral();
Dat.rad1=Dat.rad1+Dat.rad;
/* caso 4 */
Dat.x2=Dat.prof/2.0;
Dat.x3=-dat.prof/2.0;
Dat.x4=Dat.x0;
Dat.y=Dat.larg/2.0-Dat.y0;
integral();
Dat.rad1=Dat.rad1+Dat.rad;
/* caso 5 */

```

```

Dat.x2=dat.larg/2.0;
Dat.x3=-dat.larg/2.0-1.0;
Dat.x4=Dat.y0;
Dat.y=-Dat.prof/2.0-dat.x0;
integral();
Dat.rad1=Dat.rad1+Dat.rad;
/* caso 6 */
Dat.limi=Dat.prof/2.0;
Dat.lims=Dat.prof/2.0;
Dat.x2=Dat.larg/2.0;
Dat.x3=-Dat.larg/2.0;
Dat.y=-Dat.alt/2.0;
integral();
Dat.rad1=Dat.rad1+Dat.rad;
/* caso 7 */
Dat.y=Dat.alt/2.0;
integral();
Dat.rad1=Dat.rad1+Dat.rad;
sum=0.0
for (i=0;i<=Dat.ele;i++){
    sum=sum+Dat.gam[i]*Dat.act[i];
}
Dat.rad=sum*Dat.rad;
}

```

```

#include"decl.h"
/* funcion.c
*/
extern struc variables Dat;
void funcion()
{
    double term1,term2,term3,term4,term11,term21,term31,term41,
        term5;
    term1=pow(pow(Dat.y,2)+pow(Dat.z,2),-0.5);
    term1=1.0/term1;
    term2=Dat.x2-Dat.x4;
    term3=atan(term2*term1);
    term4=term1*term3;
    term11=pow(pow(Dat.y,2)+pow(Dat.z,2),-0.5);
    term11=1.0/term11;
    term21=Dat.x3-Dat.x4;
    term31=atan(term21*term11);
    term41=term11*term31;
    term5=term4-term41;
    Dat.f=term5;
}

```

```

#include"decl.h"
/* integral.c
*/

```

```

extern struct variables Dat;
extern void function();
void Integral()
{
    double a1,a2,l,t[100],var,fun,fun1,fun2,rfun,por,sfun,por1,e0;
    int i,j,h,k;
    e0=0.01;
    a1=Dat.lim1;
    a2=Dat.lim2;
    l=a2-a1;
    Dat.z=a1;
    function();
    fun1=Dat.f;
    Dat.z=a2;
    function();
    fun2=Dat.f;
    t[0]=(fun1+fun2)*l/2.0;
    for (k=1;;k++){
        h=pow(2,k-1);
        sfun=0;
        for (j=1;j<=h;j++){
            var=a1+((2*j)-1)*l/pow(2,k);
            Dat.z=var;
            function();
            rfun=Dat.f;
            sfun=sfun+rfun;
        }
    }
}

```

```

i=k-1;
t[k]=t[i]/2.0+sfun*1/pow(2,k);
por=t[k]/t[i];
por1=abs(1-por);
if (por < e0) break;
}
Dat.rad=t[k];
}

```

linkobj a juste.o arreglo.o datos.o evalua.o funcion.o integral.o  
principal.o c=expo

## BIBLIOGRAFIA

- 1 Annals of the ICRP  
"Biological Effects of Inhaled Radionuclides"  
Publicación 31 1979
  
- 2 G. Campos Venuti, S. Colilli, A. Grisanti  
"Indoor Exposure In Region of Central Italy"  
Radiation Protection Dosimetry  
Vol. 7 No. 1-4
  
- 3 H. Cember  
"Introduction to Health Physics"  
Pergamon Press  
1969
  
- 4 K. D. Cliff, J. C. H. Miles, K Broun  
"The Incidence And Origin Of Radon And Its  
Decay Products in Building"  
National Radiological Protection Board  
February 1984

- 5 R. Eisberg, R. Resnick  
"Física Cuántica"  
Editorial Limusa, México  
1979
- 6 G. Espinosa et al  
"Natural Radioactivity in Mexican Building Materials"  
Nuclear Tracks and Radiation Measurements  
Vol 12. P 767-770 (1986)  
Ed. Pergamon Press
- 7 G. Espinosa  
"Radon Measurements in Homes and Building  
in Mexico"  
Radiation Protection Dosimetry  
Nuclear Tech. Publishing (1990)
- 8 R. D. Evans  
"The Atomic Nucleus"  
McGraw-Hill Book Company, New York  
1972
- 9 M. Field Jones  
"The Natural Background Gamma Radiation Exposure  
In The Metropolitan Area Of The Valley Of Mexico"  
Tesis Doctoral, Houston, Texas  
1982

- 10 E. Fenyves, O Haiman  
"The Physical Principles Of Nuclear Radiation  
Measurements"  
Academic Press  
1969
- 11 K. H. Folkerts, G. Keller, H Muth  
"Experimental Investigation On Difusion And  
Exhalation Of  $^{222}\text{Rn}$  and  $^{220}\text{Rn}$  From Building  
Materials"  
Radiation Protection Dosimetry  
Vol. 7 No. 1-4
- 12 Ma. I. Gamboa  
"Determinación de Uranio en Agua por Trazas  
en Sólidos"  
Facultad de Ciencias. UNAM, México  
Tesis, 1983
- 13 A. C. Guyton  
"Tratado de Fisiología Médica"  
Interamericana McGraw-Hill  
7º Edición 1988
- 14 H. Kiefer, R. Maushart  
"Radiation Protection Measurements"  
Pergamon Press 1972



- 15 G. F. Knoll  
"Radiation Detection And Measurements"  
John Wiley & Sons 1979
- 16 E. López Y.  
"Automatización de un Sistema Analizador  
Multicanal"  
Facultad de Ciencias. UNAM, México  
Tesis, 1986.
- 17 A.M. Marko  
"Biological Effects of Ionizing Radiation"  
Atomic Energy Canada Limited  
1981
- 18 J. P. Mckelvey  
"Física del Estado Sólido Y de Semiconductores"  
Editorial Limusa  
1980
- 19 R. Mustonen  
"Method for Evaluation of Radiation From Building  
Materials"  
Radiation Protection Dosimetry  
Vol. 7 No. 1-4

- 20 W. J. Price  
"Nuclear Radiation Detection"  
McGraw-Hill Book Company  
1964
- 21 J. Stein  
"Isótopos Radiactivos"  
Editorial Alhambra, Madrid  
1972
- 22 R. H. Stuewer  
"The Compton Effect"  
Science History Publication  
New York 1975
- 23 G. A. Swedjemark, L. Mjones  
"Radon and Radon Daughter Concentrations In  
Swedish Homes"  
Radiation Protection Dosimetry  
Vol. 7 No.1-4
- 24 B. M. Yavorski, A. A. Detlaf  
Manual de Física  
Editorial Mir Moscu  
1972.

25 Tabla nuclear  
General Electric  
1984