



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

13  
28

DOSIMETRIA AMBIENTAL.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :  
RAUL ARANGO MIRANDA



MEXICO, D. F.



1995

FALLA DE ORIGEN

EXAMEN DE GRADUACION

TESIS CON FALLA DE ORIGEN  
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**

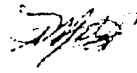
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

<b>Presidente</b>	<b>Prof. MANUEL NAVARRETE TEJERO</b>
<b>Vocal</b>	<b>Prof. GUILLERMINA BURILLO AMEZCUA</b>
<b>Secretario</b>	<b>Prof. TRINIDAD MARTINEZ CASTILLO</b>
<b>1er. Suplente</b>	<b>Prof. LUIS CABRERA MOSQUEDA</b>
<b>2do. Suplente</b>	<b>Prof. MARTIN JESUS SOBERON MOBARAK</b>

**DEPARTAMENTO DE QUIMICA INORGANICA Y NUCLEAR, FACULTAD DE  
QUIMICA, EDIFICIO "D", CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.**

**Asesor del tema:**                      **Prof. TRINIDAD  
MARTINEZ CASTILLO**



**Sustentante:**                              **RAUL ARANGO  
MIRANDA**



**Padres:** a ustedes con todo el agradecimiento  
y cariño que puedo ofrecerles.

M. En C. Trinidad Martínez, gracias por  
la paciencia, confianza y ayuda brindada, así como también  
a toda la gente del departamento de Química Nuclear.

A ti, que al leer estas líneas sientes que  
contribuiste de cualquier forma a que esto se lograra  
gracias...muchas gracias.

## **INDICE**

	N° PAGINA:
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	2
<b>OBJETIVOS.</b>	5
<b>CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS Y PRINCIPIOS DE RADIATIVIDAD.</b>	
I.1 Procesos de Decaimiento Radiactivo.	6
I.2 Ley Exponencial del Decaimiento Radiactivo.	16
I.3 Unidades de Radiación.	19
<b>CAPÍTULO II. FUENTES DE RADIACIÓN.</b>	
II.1 Rayos Cósmicos.	22
II.2 Irradiación Externa.	26
II.3 Irradiación Interna.	29
II.4 Irradiación Externa ( <b>FUENTES TERRESTRES DE RADIACION</b> ).	32
II.5 Exposición dentro de edificios.	33
II.6 Exposición al Aire Libre	34
II.7 Dosis equivalentes anuales debidas a la Radiación y Terrestre.	35
II.8 Irradiación Interna.	37
II.9 Radiactividad en la materia.	37
<b>CAPÍTULO III. DOSIMETRÍA.</b>	
III.1 Medición de la Dosis Absorbida	39
III.2. Criterios para la elección de un Dosímetro. Diferentes tipos de Dosímetros.	40
III.3. Fundamentos y principios de Dosimetría Termoluminiscente.	41
III.4 Dosimetría Termoluminiscente.	45
III.5. Seguridad Radiológica.	58

**CAPÍTULO IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE MUESTREO EN CASAS HABITACION EN EL POBLADO DE SAN RAFAEL, ESTADO DE MÉXICO.**

IV.1. Descripción general del área de San Rafael, Estado de México.	60
IV.2 Ubicación Geográfica.	61
IV.3 Geología y Topografía de la zona.	64
IV.4 Clima.	66
IV.5 Descripción del área urbana.	67
IV.6 Localización de los puntos de muestreo.	68
IV.7 Descripción de la forma de muestreo.	68

**CAPÍTULO V. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LECTURA DE DOSÍMETROS TERMOLUMINISCENTES.**

V.1 Preparado de Dosímetros a utilizar para el muestreo.	71
V.2 Calibración de Dosímetros (por lote).	73
V.3 Técnica de lectura de Dosímetros.	73
V.4 Descripción General del lector de Dosímetros "HARSHAW 4000 TLD SYSTEM"	74

**CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS.**

VI.1 Presentación de resultados.	78
VI.2 Discusión de resultados.	105

<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>107</b>
----------------------	------------

<b>GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS.</b>	<b>110</b>
---------------------------------------	------------

<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>119</b>
----------------------	------------

## **INTRODUCCIÓN.**

Durante el presente siglo, el ser humano ha desarrollado en forma continua múltiples avances en materia científica y tecnológica. Sin embargo, el desarrollo ha tenido como consecuencia aspectos desfavorables como son el agotamiento de los recursos naturales, la perturbación al medio ambiente y el posible daño causado a la población en general por cualquier actividad de este tipo. Es por ello que a la vez que se realizan por primera vez estas actividades, se busca que se desarrollen de la manera mas segura, higiénica y causando la menor perturbación posible al medio ambiente, a la población, al personal expuesto, además de optimizar recursos.

De todas las fuentes de radiación ionizante, la radiación natural es la que mas recibe la mayoría de la población mundial en nuestro planeta, y esta es mayor aún que la que producen todas las fuentes artificiales de radiación (las creadas por el ser humano).

El ser humano (y organismos vivos) desde la antigüedad ha estado expuesto a las radiaciones naturales procedentes de fuentes extraterrestres como son los rayos cósmicos, y de elementos radiactivos presentes en la corteza terrestre (como por ejemplo la que es aportada por el radón). De hecho es hasta este siglo que se empiezan a desarrollar los estudios y trabajos con las fuentes artificiales de radiación así como su producción y control, como por ejemplo la utilización de los rayos x para fines médicos.

Estas fuentes naturales de radiación también llamadas RADIACIONES DE FONDO, provienen tanto de la radiación solar como de la corteza terrestre, es decir, del subsuelo y son función de los materiales de construcción de las casas habitación, las diversas costumbres y tipos de vida de la población (los hábitos alimenticios, etc.), así como el establecimiento en ciertos lugares destinados para vivienda.

Las fuentes Naturales de Radiación se dividen a su vez en dos principales que son:

- **Fuentes Externas:** que pueden ser de origen extraterrestre (rayos cósmicos) o de origen terrestre, es decir los radionúclidos presentes en la corteza terrestre, en los materiales de construcción, etc.

- **Fuentes Internas:** son las que comprenden los radionúclidos presentes en la naturaleza que se incorporan al cuerpo humano a través del aire, agua y alimentos (ya sea por inhalación o ingestión).

Las fuentes naturales (entre ellas el radón) representan la más alta dosis de radiación que reciben las personas normalmente. La dosis equivalente efectiva anual media que proviene de fuentes naturales es de 2.4 mSv, con individuales que varían entre 1 hasta 5 mSv/año y en casos extremos hasta 1 o más. De esta, el radón representa la parte principal con 1.3 mSv/año (figura. 1)

Este estudio forma parte de un proyecto que desarrollan conjuntamente y como un convenio de cooperación, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) y el Departamento de Química Nuclear e Inorgánica de la Facultad de Química de la UNAM. En el cual se lleva a cabo (entre otras actividades paralelas) la medición y evaluación de estas radiaciones de fondo a nivel ambiental dentro y fuera de casas habitación para la población mexicana.

Como el monitoreo trata de cubrir la mayor parte de la zona metropolitana y sus alrededores, es así como surge la necesidad de este estudio. Es decir, el presente trabajo forma parte de una serie de monitoreos encaminados a medir la cantidad de radiación natural a la cual estamos expuestos diariamente y a cada momento, ya sea dentro o fuera de edificios y casas habitación.

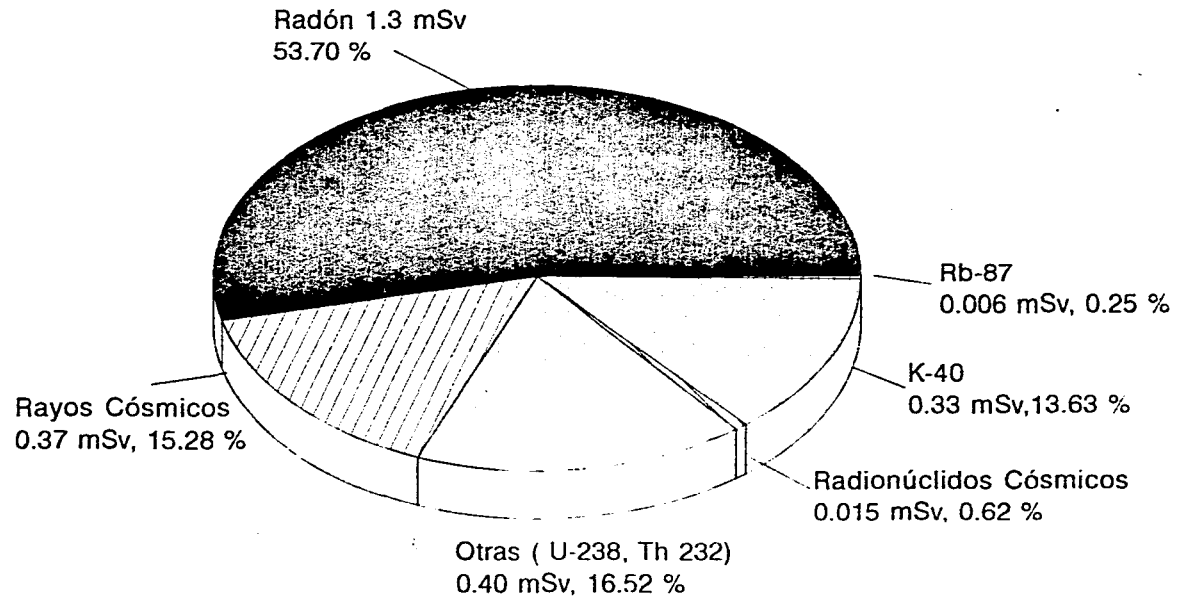
Para la realización de este trabajo se utilizó la Dosimetría Termoluminiscente (DTL), y aunque el fenómeno TL no es conocido a la perfección, el fundamento básico es cualitativamente bien entendido. Sin embargo, científicos de más de 50 países trabajan en la investigación y en las diversas aplicaciones del fenómeno. Es tal la importancia que ha adquirido el desarrollo de la TL y sus aplicaciones, que desde 1988 se lleva a cabo en México un Congreso sobre Dosimetría Termoluminiscente.



# Figura 1. Dosis Equivalente Efectiva anual.

## FUENTES NATURALES

---



Terrestres: 2.036 mSv (84.1 %) C3smicas: 0.385 mSv (15.9 %)  
Rad3n 1.3 mSv (53.70 %)

El presente trabajo comprende los siguientes puntos

- Capítulo I. Se tratan los principios de la radiactividad, los procesos de decaimiento, así como también lo que se refiere a los rayos cósmicos, su origen, sus características, etc.
- El capítulo II. Abarca lo relativo a las fuentes de radiación terrestre, es decir lo que llamamos radiación de fondo, así como sus características, los diferentes tipos que existen, etc.
- El capítulo III. Comprende la técnica en la que nos vamos a apoyar para realizar nuestras mediciones la cual es la Dosimetría, tratándose las características de ésta, los diversos tipos que existen con sus ventajas y desventajas, los fundamentos que rigen a la misma, la forma en que se mide la dosis absorbida, etc.
- El capítulo IV. Describe el lugar en que se realizó el monitoreo, y se trata de describir sus características generales, su ubicación geográfica, etc.
- El capítulo V. muestra la metodología utilizada para realizar la lectura de los mismos. Describe lo relativo a los dosímetros utilizados, así como el equipo utilizado para la evaluación de estos.
- El capítulo VI. Presenta los resultados, su análisis y finalmente las conclusiones.

### **OBJETIVOS**

- 1) Realizar el muestreo de casas habitación (dentro y fuera) utilizando para ello la Dosimetría Termoluminiscente, para con ello detectar posibles anomalías en los resultados, comparándolos con lo recomendado por la literatura.
- 2) Observar la variación de la dosis, comparando los resultados en interiores con los exteriores de las casas habitación, y con ello deducir si es que la construcción de las mismas actúa como fuente o como aislante.
- 3) Evaluar los factores que influyen y de que manera influyen, en la dosis registrada en el lugar de monitoreo; dichos factores pueden ser la localización de la zona de muestreo, altura sobre el nivel del mar, tipo de suelo de la zona, tipo de construcción de cada casa, así como las costumbres y los hábitos de sus moradores.

## CAPÍTULO I. FUNDAMENTOS Y PRINCIPIOS DE RADIATIVIDAD.

### *1.1. Procesos de decaimiento radiactivo.*

Mediante el uso de campos magnéticos, se demostró que hay distintos tipos de radiación, como son, radiación  $\alpha$ , radiación  $\beta$ , y radiación  $\gamma$ . Estos dos primeros tipos de radiación pueden ser desviados en un campo magnético (lo cual indica que se trata de partículas cargadas), no así la radiación  $\gamma$ , ya que es una forma de radiación electromagnética similar a la luz (algo similar a los rayos X en carácter, pero no en energía ni origen). Muchos años pasaron sin que se hiciera distinción alguna entre los rayos  $\gamma$  nucleares y los rayos X extranucleares que con frecuencia acompañan a las transformaciones radiactivas.

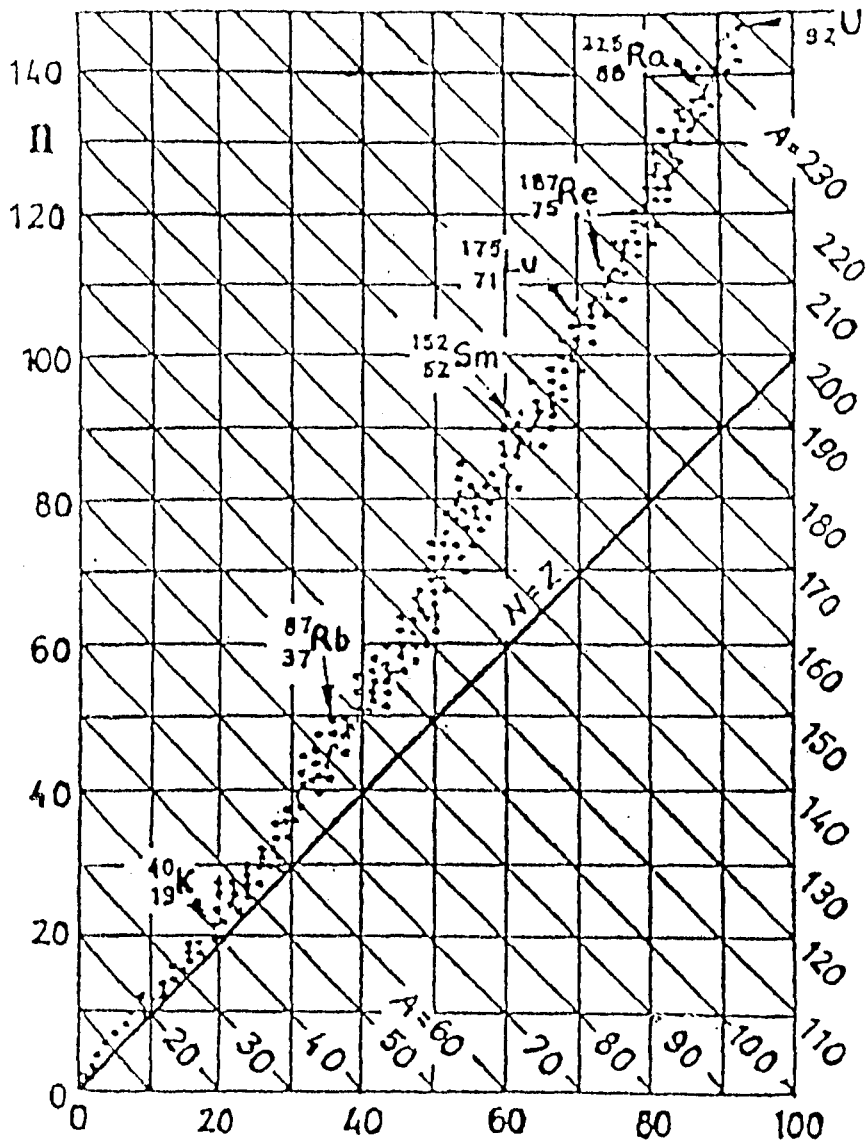
Si la relación  $Z:N$  para un núcleo dado difiere de la que se refleja en dicha figura, dicho núcleo se vuelve inestable y sufre algún tipo de decaimiento radiactivo para alcanzar estados de menor energía, y con ello mayor estabilidad (figura 2).

Para caracterizar el decaimiento radiactivo de cualquier elemento son importantes tres principales aspectos que son:

1. Tipo de emisión.
2. Energía de la emisión.
3. Vida media de la emisión.

En el decaimiento radiactivo deben satisfacerse ciertas leyes de conservación como son: ley de la energía total, ley del momentum angular, ley de la carga total, y la ley que dicta que el número de masa y el momentum angular del sistema deben permanecer constantes. De estas leyes, las tres primeras enunciadas son generales en física y las dos últimas son particulares de las reacciones nucleares.

Figura 2 Correlación entre el N° de protones (Z) y el N° de neutrones (N) en los núclidos naturales para el rango  $0 < Z < 100$ , (Vertes y Kiss, 1987).

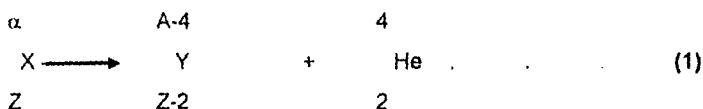


### Decaimiento alfa ( $\alpha$ ).

El decaimiento ( $\alpha$ ) es un proceso en el cual el núcleo padre se desintegra para dar un núcleo hijo más una partícula ( $\alpha$ ). La partícula  $\alpha$  es una partícula de helio doblemente ionizado ( $\text{He}^{++}$ ), que se mueve a alta velocidad.

Durante el proceso de decaimiento  $\alpha$  espontáneo, el núcleo padre pierde dos protones y dos neutrones, disminuyendo con ello su masa en cuatro unidades y su carga en dos unidades.

La desintegración puede representarse de la siguiente forma:



Así, las partículas  $\alpha$  se forman en el núcleo antes de ser emitidas. Los núclidos emisores de partículas  $\alpha$  se encuentran entre los núclidos pesados y con alto número atómico ( $Z > 79$ ), donde la relación  $N/Z$  es menor que la requerida en la figura 2 y puede alcanzarse una relación más alta y más favorable de  $N/Z$  a través del decaimiento  $\alpha$ ; cabe señalar que algunos núclidos que poseen  $Z < 79$ , también decaen por emisión  $\alpha$ .

En un principio se pensó que un radionúclido  $\alpha$  emisor solo poseía una energía de partícula  $\alpha$  asociada y no fue hasta cerca de la década de los treinta en que se descubrió la radiación del  $^{212}\text{Bi}$ , que emite partículas  $\alpha$  de diferentes energías.

Posteriores experimentos han demostrado que, en casos como el anterior, presentan partículas  $\alpha$  de energías diferentes, estas energías  $\alpha$  siempre son discretas, y que la energía remanente en exceso en el núcleo se emite en forma de fotón.

En la figura 3, se muestra el diagrama de decaimiento del  $^{226}\text{Ra}$  a  $^{222}\text{Rn}$ , en el que las dos flechas hacia abajo y hacia la izquierda señalan los dos tipos de decaimiento  $\alpha$ , además de la energía de las partículas  $\alpha$  y sus probabilidades.

Cuando se emite la partícula de menor energía, el núcleo de radón queda en un estado excitado, con una energía de aproximadamente 0.186 MeV más alta que el estado basal. Así y de forma casi inmediata, se emite un rayo  $\gamma$  de esta energía (mostrado en la figura por la línea ondulada). La probabilidad del 4% asociada a esta emisión del fotón, implica que en el restante 1% del número total de desintegraciones se emite como un electrón de conversión interna.

Las energías  $\alpha$  varían entre 1.8 MeV ( $^{144}\text{Nd}$ ) y 11.4 MeV ( $^{212}\text{Po}$ ), pero en general la gran mayoría se encuentra entre 4 MeV y 8 MeV.

El valor de  $\lambda$  depende en mucho de  $E_\alpha$  y de  $R$  (radio nuclear). Por eso, la vida media de las especies  $\alpha$  emisoras abarcan un amplio rango de tiempo, desde fracciones de segundo a millones de años.

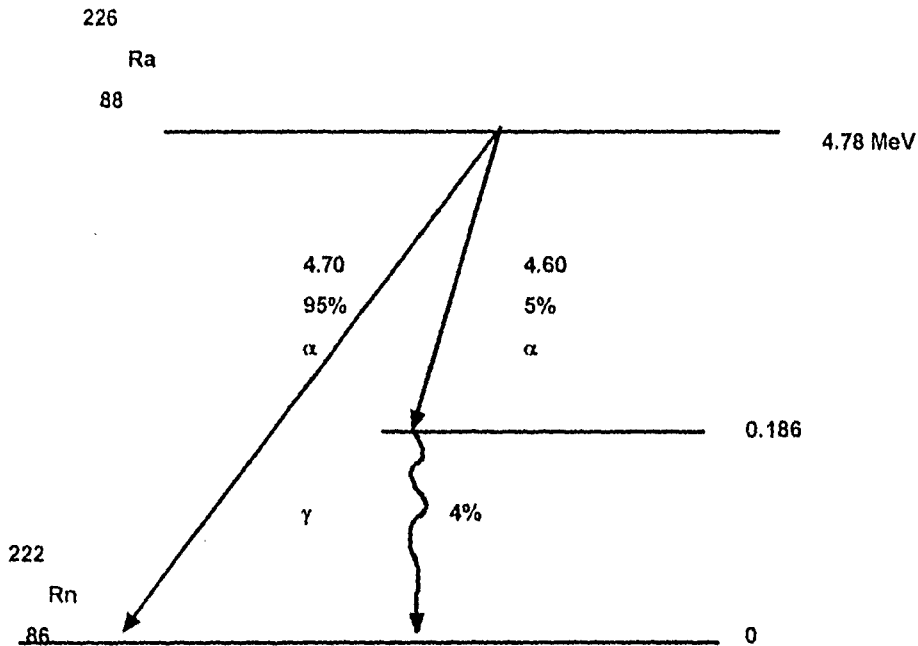
Puesto que el valor de  $R$  y  $Z$  muestra solamente una pequeña variación en las familias individuales de los emisores  $\alpha$  naturales (series del torio, actinio y uranio), el valor de  $\lambda$  depende en su mayor parte de  $E_\alpha$ .

Al pasar a través de la materia, las partículas  $\alpha$  pierden energía, principalmente por colisiones inelásticas con electrones que se encuentran a su paso, dando lugar con ello, a excitaciones y ionizaciones de los átomos y moléculas a los cuales pertenecen estos electrones

La enorme diferencia entre la masa de las partículas  $\alpha$  y los electrones, implica que la partícula  $\alpha$  solo pierde una pequeña fracción de su energía y que, virtualmente, no es desviada como resultado de la colisión. Así, las partículas  $\alpha$  son detenidas gradualmente en una trayectoria casi recta debido a un gran número de pequeñas pérdidas de energía.

La energía que una partícula  $\alpha$  pierde al pasar a través de la materia, se expresa generalmente en términos de la transferencia lineal de energía (LET), que está definida como la razón lineal de la pérdida de energía (absorbida localmente) por una partícula ionizante al atravesar un material; el LET depende de la energía de la partícula  $\alpha$ .

Figura 3 Esquema del decaimiento nuclear del  $^{226}\text{Ra}$  (Turner, 1986).



Las partículas  $\alpha$  son las que poseen radiaciones menos penetrantes de todos los isótopos radiactivos, y poseen los valores más altos de transferencia lineal de energía (LET). Existe una relación rango-energía; entendiéndose como rango el alcance o longitud de una trayectoria. Para cálculos aproximados, la energía de una partícula  $\alpha$  con rango entre 3 y 7 cm puede calcularse por la siguiente ecuación empírica:

$$R = 0.318 E^{3/2} \quad (2)$$

en donde:

E= la energía en Mev

R= rango promedio en cm (aire a 15 °C y 760 mm Hg.)

Las partículas  $\alpha$  más energéticas se encuentran entre los radionúclidos con vida media más corta.

Las partículas  $\alpha$  tienen rangos muy cortos y no son capaces de penetrar la capa más externa de la piel del ser humano. Es por ello que en realidad no representan un peligro externo para el ser humano.

Pero, sin embargo, si las partículas  $\alpha$  son capaces de penetrar al cuerpo humano por inhalación, ingestión o por contacto, como puede ser a través de una herida; pueden representar un peligro como emisor interno. Esto aunado a la emisión de rayos  $\gamma$  que puede acompañar a estas partículas.

### Decaimiento Beta ( $\beta$ ).

Algunos de los núcleos inestables que poseen una relación  $N/Z$  desfavorable, pueden alcanzar una relación más estable mediante el decaimiento  $\beta$ . De esta manera, los núcleos radiactivos pueden deshacerse del exceso de neutrones (emisión de negatrones), así como del exceso de protones (emisión de positrones).

Los procesos de decaimiento radiactivo que se designan en general como decaimiento  $\beta$  incluyen los siguientes tipos:

- a). El núcleo decae por emisión de negatrón, o emisión de un electrón, y se designa por  $\beta^-$ .
- b). El núcleo decae por emisión de positrón, y se designa por  $\beta^+$ .
- c). Captura de un electrón orbital por el núcleo, llamada también captura electrónica (CE).

Los tres anteriores tipos de decaimiento radiactivo también se conocen como transformaciones isobáricas, debido a que no involucran cambios en el número de masa aunque sí presentan cambios en la carga nuclear. Las partículas  $\beta$  son electrones rápidos que son emitidos por núcleos radiactivos.

A diferencia con las partículas  $\alpha$ , las partículas  $\beta$  de un elemento radiactivo no se emiten en grupos discretos de energía sin que se emitan en una distribución continua de energía que comprende desde valores de cero hasta un valor máximo ( $E_{\beta_{max}}$ ), que es característico del elemento.

Durante mucho tiempo, uno de los grandes interrogantes de la física nuclear fue que la energía de la mayoría de las partículas  $\beta$  era menor que la energía  $E_{\beta_{max}}$ .



Así, parecía que este proceso violaba la ley de conservación del momentum angular, dicho problema Pauli lo resolvió asumiendo que el decaimiento  $\beta$  incluye la emisión de otra partícula. Dicha partícula tiene el nombre de Neutrino ( $\nu$ ), y tiene un valor de spin de  $1/2$  lo cual le sirve para permitir la conservación del momentum angular; el Neutrino posee además una carga eléctrica de cero y una masa con valor cercano a cero.

Por medio de la teoría del decaimiento  $\beta$  se ha podido demostrar que, así como se emiten neutrinos durante el decaimiento de positrones, también se emiten antineutrinos ( $\bar{\nu}$ ) en el decaimiento de negatrones.

La teoría del neutrino también es útil para explicar el espectro de energía en el decaimiento  $\beta$ . Así, en términos generales, la energía liberada en el decaimiento  $\beta$  está distribuida entre el electrón y el neutrino.

La energía máxima de las partículas determina el máximo rango que la radiación puede tener en la materia, pero solo una pequeña porción de las partículas puede tener energías cercanas a  $E_{\beta_{max}}$ .

Al atravesar la materia, las partículas  $\beta$  pierden energía, esto es debido a colisiones inelásticas con electrones, algo similar a lo que ocurre con las partículas  $\alpha$ . Sin embargo, como el electrón y la partícula  $\beta$  poseen la misma masa, esto permite que el electrón pueda perder hasta la mitad de su energía en una sola colisión y además puede ser desviada; esto debido a que las partículas también se desvían al pasar cerca de un núcleo atómico. Como consecuencia de esto, incluso las partículas  $\beta$  que inician con la misma energía, pueden detenerse en puntos muy distantes uno del otro, y no tienen un rango fijo en la materia, aunque sí presentan una distancia o rango máximo de penetración.

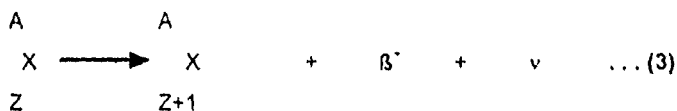
Así, para las partículas pesadas, como las partículas  $\alpha$ , que recorren caminos casi rectos, el rango (la penetración de la radiación a través del material absorbedor) y la longitud de trayectoria son lo mismo. Pero, como las partículas  $\beta$  sufren desviaciones en su trayectoria de línea recta, entonces, la longitud de la trayectoria es bastante mayor que la distancia que penetran.

Los electrones y los positrones, no pueden existir en el núcleo. Se supone que el negatrón o el positrón se crean en el momento en que el núcleo decae, mientras que en el proceso de captura electrónica el electrón desaparece y su masa se convierte en energía.

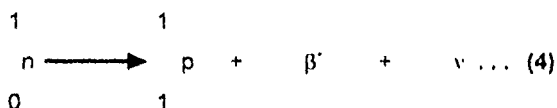
Los rayos  $\beta$  pueden tener la suficiente energía como para poder penetrar la piel del ser humano y por ello constituyen un peligro de radiación tanto externo como interno. Del mismo modo las partículas de alta energía (del orden de MeV) son capaces además de emitir bremsstrahlung.

### *Emisión de negatrones.*

El proceso se puede describir de la siguiente manera:

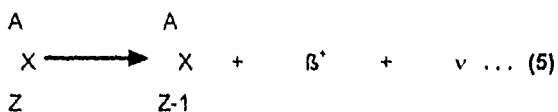


Sin embargo, si tomamos en cuenta los electrones, el átomo padre tiene  $Z$  electrones orbitales, y el átomo hijo tiene una carga de  $Z+1$ , o un protón más que el átomo padre y un neutrón menos; esto se presenta como el decaimiento de un neutrón, como se ilustra a continuación:

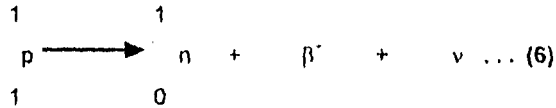


### *Emisión de positrones.*

El decaimiento de positrones o de partículas  $\beta^+$ , se puede describir de la siguiente manera:



Aquí, si se consideran la cargas atómicas netas, el núcleo hijo tiene un número atómico menor en una unidad que el núcleo padre. Si el decaimiento de los positrones puede interpretarse como la transformación de un protón en un neutrón, acompañada de la emisión de un positrón y de un neutrino, como se ilustra a continuación:

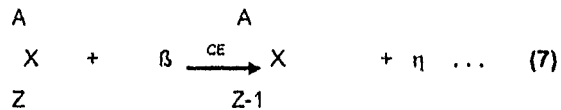


**Captura electrónica.**

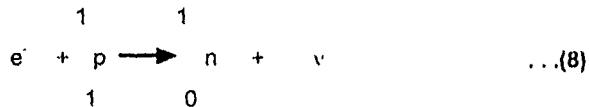
Es un proceso alternativo al decaimiento  $\beta$  positivo, en este proceso se reduce Z en una unidad sin cambiar A. La captura electrónica se descubrió en el año 1938, esto debido a que no se acompaña de radiación nuclear detectable, exceptuando el caso en que el producto queda en estado excitado y son emitidos rayos  $\gamma$ .

Durante el proceso de captura electrónica (en general en todos los procesos de decaimiento  $\beta$ ) se emite un espectro continuo de radiación electromagnética de baja intensidad, llamado bremsstrahlung interno, difícil de detectar en la emisión de rayos  $\gamma$  nucleares debido esto a su baja intensidad.

La captura electrónica es el proceso de decaimiento que predomina en los núcleos deficientes de electrones con número atómico  $>$  de 80. Así, y dado que los electrones que tienen mayor probabilidad de ser capturados son aquellos que se encuentran más cercanos al núcleo (electrones de la capa K), por ello es que la captura electrónica es conocida como captura K.



Dado que el número de protones en el núcleo hijo es uno menor que en el padre y el número de neutrones es uno más, la captura K puede interpretarse de la siguiente forma:



Si el vacío en la capa K es llenado por un electrón de la capa L, la diferencia en las energías de enlace de K y L puede emitirse como rayos x característicos o puede presentarse un proceso fotoeléctrico interno en el que se emita un electrón extranuclear adicional de cualquier otra capa (L, M, etc.), con una energía cinética igual a la energía característica de los rayos x menos su propia energía de enlace, entonces, estos son los llamados electrones Auger y el proceso se denomina Conversión Interna.

### **Radiación gamma ( $\gamma$ ).**

Los rayos  $\gamma$  son radiación electromagnética de origen nuclear que poseen longitud de onda corta, en la región de  $3 \cdot 10^{-9}$  cm hasta  $3 \cdot 10^{-11}$  cm. La relación entre la longitud de onda y la energía (E) es la siguiente:

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \dots (9)$$

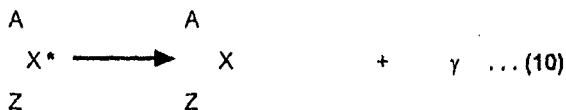
donde: h = constante de Planck

c = Velocidad de la luz

$\lambda$  = Longitud de onda

En el decaimiento de los núcleos por emisión de una partícula, ya sea  $\alpha$  o  $\beta$ , generalmente el núcleo queda excitado. Así, el núcleo efectúa la transición a un estado de menor energía y libera exceso de energía por emisión de rayos  $\gamma$  o por el proceso de conversión interna.

El decaimiento del tipo  $\gamma$  se representa de la siguiente manera:



donde el asterisco(\*) indica un núcleo excitado, y tanto el padre como el hijo tienen la misma estructura en cuanto a partículas nucleares. Las transiciones que resultan en la emisión  $\gamma$  dejan sin cambio a Z y A, siendo estas transiciones isoméricas.

Si  $E^*$  es la energía asociada al estado excitado y  $E$  es la energía del estado basal, entonces los rayos  $\gamma$  tienen una energía:

$$h \nu = E^* - E \quad \dots (11)$$

donde  $\nu$  es la frecuencia de los rayos  $\gamma$  emitidos.

La absorción de los rayos  $\gamma$  es diferente a la que poseen las partículas cargadas. Las partículas  $\alpha$  o  $\beta$  pierden su energía por colisiones inelásticas y se "desaceleran" hasta que se detienen. El caso de los rayos  $\gamma$  es diferente, debido a que, conforme atraviesan la materia su intensidad se reduce según la ecuación:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots (12)$$

Donde  $\mu$  es el coeficiente de absorción lineal ( $\text{cm}^{-1}$ ) del material absorbedor, que es función de la energía de la radiación y de la densidad del material, y  $x$  (en cm) el espesor del material absorbedor.

Cualquier núcleo que cambia su estructura emitiendo rayos gamma ( $\gamma$ ) o cualquier otra partícula nuclear ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) se denomina núcleo radiactivo. Hoy en día se conoce la existencia de alrededor de 2000 núcleos radiactivos o radionúclidos, pero sólo 279 son estables.

## **1.2. Ley exponencial del decaimiento radiactivo.**

Existe la ley llamada "ley de decaimiento" que menciona la probabilidad de que los núcleos radiactivos decaigan; dicha ley es de carácter estocástico, ya que sólo cumple para muchos átomos radiactivos. La probabilidad de decaimiento es un valor característico de los átomos en cuestión.

Cuando se trata de una gran cantidad de átomos, se encuentra que todas las sustancias radiactivas siguen el mismo patrón general de decaimiento. Así por ejemplo, si se tiene una fuente radiactiva y alguna forma posible de contar los átomos que se desintegran en un intervalo determinado de tiempo, si se grafica el número de átomos presentes contra el intervalo de tiempo (determinado), en papel semilogarítmico, se obtendrá como resultado una línea recta, lo cual nos muestra que el decaimiento radiactivo es un fenómeno de tipo exponencial, en otras palabras, la misma fracción de átomos presentes decaen durante un lapso de tiempo determinado.

Si N representa el número de átomos presente en un intervalo de tiempo dado, y dN el número de desintegraciones durante el mismo intervalo de tiempo dt, tendremos entonces que:

$$dN/N = -\lambda dt \quad \dots (13)$$

Probabilidad de desintegración =  $-dN / N$

en donde el signo (-) significa que N disminuye con el tiempo. Entonces, la probabilidad de desintegraciones por unidad de tiempo ( $\lambda$ ), es :

$$\lambda = \left(-\frac{1}{N}\right) \left(\frac{dN}{dt}\right) = \text{constante} \quad \dots (14)$$

Donde lambda ( $\lambda$ ) es la constante de desintegración, la cual expresa la posibilidad de que un átomo decaiga en una unidad de tiempo; así, mientras mas alto es el valor de  $\lambda$ , mas rápido será el decaimiento del radioelemento.

Aún y cuando se ha intentado alterar  $\lambda$  por medio de cambios en las propiedades físicas o químicas de la mayoría de las sustancias radiactivas, ninguno de estos cambios la ha alterado en forma apreciable. Es por ello que es posible considerar a los núcleos radiactivos de acuerdo a sus periodos de decaimiento sin importar sus condiciones físicas o químicas.

En la práctica trabajando con materiales radiactivos, el procedimiento común para evaluar el numero de átomos y el cambio dN/dt, se hace de la siguiente manera; se determina una cantidad que sea proporcional a  $\lambda N$ , dicha cantidad es conocida con el nombre de ACTIVIDAD (A), y está dada por la ecuación :

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N \dots \left( \frac{\text{desintegraciones}}{\text{segundo}} \right) \dots (15)$$

que representa la velocidad a la cual ocurren las desintegraciones.

En el Sistema Internacional (SI) la unidad de la actividad es el Becquerel (Bq), que es equivalente a una desintegración por segundo (1 dps); sin embargo, aun es utilizado el Curie (Ci), que es equivalente a  $3.7 \cdot 10^{10}$  (dps). Si al tiempo  $t=0$  corresponden  $N_0$  átomos, entonces la ecuación anterior será:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad \dots (16)$$

Ahora si la ecuación anterior se expresa en forma exponencial y se multiplica por  $\lambda$ , entonces quedara de la siguiente manera:

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad \dots (17)$$

donde  $\lambda N_0 = A_0$  ... actividad inicial  
 $\lambda N = A$  ... actividad a un tiempo t

Entonces la actividad es:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \dots (18)$$

Si la actividad es expresada en forma logarítmica quedará :

$$\ln A = (\ln A_0) - (\lambda t) \quad \dots (19)$$

#### ***Vida media y Vida promedio.***

La vida media ( $T_{1/2}$ ) de un radioisótopo esta definida como el tiempo que transcurre para que un determinado número inicial de átomos decaiga a la mitad, o en otras palabras, es el intervalo de tiempo durante el cual la actividad disminuye a la mitad de su valor inicial. Cuando  $t = T_{1/2}$ , entonces el numero de átomos presentes es  $N = 1/2 N_0$ , así la vida media se define como :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad \dots (20)$$

#### ***Vida media biológica y efectiva.***

**Vida media biológica:** es el tiempo necesario para que el organismo elimine la mitad de la cantidad suministrada (dosis) de cualquier sustancia, por un proceso regular de su metabolismo.

Este período de tiempo es el mismo para isótopos estables que para isótopos radioactivos de un elemento cualquiera.

**Vida media efectiva:** es el tiempo necesario para que la cantidad de un elemento radioactivo fijado en el tejido del cuerpo, disminuya a la mitad de su cantidad original (en este caso a la mitad de su actividad original), como un resultado combinado del decaimiento radioactivo y la eliminación biológica.

### **1.3. Unidades de Radiación.**

- **Actividad (A):** La actividad de un determinado radionúclido en un estado particular de energía y en un momento dado es el cociente de  $dN:dt$  donde  $dN$  es el valor esperado del número de transiciones nucleares espontáneas desde ese estado de energía, que ocurren en un intervalo de tiempo  $dt$ .

Su unidad en el SI es el Becquerel (Bq) y su equivalencia es:

$$1 \text{ Bq} = 2.7027 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ pCi} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ pCi} = 0.037 \text{ Bq}$$

- **Dosis de Exposición (X):** El "Roentgen" (R) es la una unidad de dosis de exposición y esta referido únicamente a la radiación electromagnética y se define como la intensidad de radiación x o rayos gamma capaz de producir una unidad de cantidad de electricidad de cualquier signo en 0.001293 g de aire, o sea 1 cm<sup>3</sup> de aire en condiciones normales de temperatura y presión, lo cual es equivalente a la absorción de 87.7 ergios por cada gramo de aire.



Su unidad en el SI es el Coulomb por kilogramo (C/Kg) y se define como la intensidad de radiación x o y capaz de producir un coulumbio de carga electrostática de cualquier signo por Kg de aire, y sus equivalencias son:

$$1 \text{ C/Kg} = 3876 \text{ R}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/Kg}$$

- **Dosis Absorbida (D):** Para cuantificar la energía promedio depositada por la radiación ionizante en la materia se utiliza el concepto de "rad", y el rad esta definido como la cantidad de radiación que deposita una cantidad de energía de 100 ergios por cada gramo de material absorbente, esto es:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ ergios/g} = 10^{-2} \text{ Joules/Kg}$$

También se ha propuesto como unidad de dosis absorbida en el SI el "gray" (Gy) que se define como la cantidad de radiación absorbida que disipa un joule de energía por Kg. de material, esto es:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rads};$$

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

Sin embargo estas unidades de medición no son las que más representen el daño biológico causado por la radiación, debido a que dosis iguales de diferentes tipos de radiación producen diferente cantidad de daño biológico.

- **Dosis equivalente (H):** Es el producto  $D \cdot Q \cdot N$ , donde D es la dosis absorbida, Q el factor de calidad y N el producto de otros factores modificantes que incluyen el efecto de la rapidez de dosis, el fraccionamiento de la misma, etc. Su unidades el sievert (Sv) y es equivalente a:

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

Por su parte el "rem" (Roentgen equivalente man) es la unidad utilizada para medir el daño biológico y relaciona los efectos producidos por cualquier radiación ionizante al tejido humano, en base a los efectos producidos por la exposición a 1 roentgen de radiación electromagnética. El rem se define como el daño biológico causado cuando es absorbido 1 rad de radiación gamma.

- **Dosis Equivalente Efectiva (He):** se define en términos generales por la expresión:

$$He = Wt * Ht$$

donde , Ht: es la dosis equivalente media en el tejido t.

Wt es un factor de ponderación entre la perdida parcial de salud debido a efectos estocásticos resultantes de la irradiación del tejido t y la perdida total de salud debida a los efectos estocásticos cuando el cuerpo humano es irradiado uniformemente.

Los valores de Wt especificados por la ICPR son:

TEJIDO	Wt
Gónadas	0.25
Mama	0.15
Médula Osea	0.12
Pulmón	0.12
Tiroides	0.03
Superficies Óseas	0.03
Órganos y tejidos restantes	0.30

## CAPITULO II. FUENTES DE RADIACIÓN.

### ***II.1. Rayos Cósmicos.***

La radiación de alta energía que proviene del espacio exterior a la atmósfera terrestre es conocida como rayos cósmicos primarios. Por la interacción de estos rayos cósmicos con los núcleos de los átomos presentes en el aire son producidos los llamados rayos cósmicos secundarios y una gran variedad de productos de reacción (llamados núcleos cosmogénicos) tales como:  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{24}\text{Na}$ .

Los rayos cósmicos consisten de 87% de protones. 11% de partículas  $\alpha$ , y aproximadamente 1% de núcleos cuyos números atómicos (Z) se encuentran entre 4 y 26, y finalmente. de 1% de electrones de muy alta energía.

Una de las características importantes de los rayos cósmicos es que son altamente penetrantes ya que sus energías promedio fluctúan en el orden de  $10^{10}$  eV, aunque sus máximos niveles de energía pueden llegar a ser del orden de hasta  $10^{19}$  eV.

Las radiaciones primarias predominan en la estratósfera y se encuentran a una altura cercana a los 25 Km. En la actualidad se sabe que este tipo de radiaciones son generadas fuera de nuestro sistema solar y que solo una pequeña fracción de estas son de origen solar,

Sin embargo, esta fracción, aunque pequeña, adquiere importancia fuera de la atmósfera posteriormente a erupciones solares asociadas estas a la actividad de las manchas solares, que siguen un ciclo de 11 años.

Basados en estudios realizados con meteoritos, se sabe que la tasa de fluencia de los rayos cósmicos ha permanecido constante por al menos durante los últimos 2000 años, y que no ha variado en más de un factor de dos en los últimos  $10^{19}$  años.

El componente primario de la radiación cósmica puede dividirse en dos tipos de radiación las cuales son. radiación galáctica y radiación solar.

### ***Rayos cósmicos galácticos primarios.***

Los rayos cósmicos galácticos primarios están formados fundamentalmente de protones de alta energía los cuales penetran al sistema solar provenientes del espacio interestelar, acompañados además de iones de  ${}^4\text{He}$  en una proporción aproximada del 10%, de proporciones mucho menores de partículas más pesadas, así como también de electrones, fotones y neutrinos.

Aproximadamente, una de cada dos mil partículas posee una masa 20 veces mayor que el hidrógeno; entre esta variedad de partículas pesadas, los núcleos de hierro son bastante abundantes.

La densidad de flujo primario es afectada por el campo magnético terrestre, el cual desvía de vuelta al espacio a las partículas cargadas de bajas energías. Este efecto esta en función de la latitud geomagnética, de manera que la densidad de flujo de los protones de bajas energías que están dentro de las capas superiores de la atmósfera terrestre, es mayor en los polos que en las regiones ecuatoriales.

Así, de manera que una partícula cargada se aproxima a la atmósfera terrestre, esta partícula queda influida por el campo magnético de la tierra. Entonces, para poder atravesar la tierra, es necesario que la partícula posea cierto momentum; si no, esta partícula queda atrapada dentro del campo magnético de la tierra.

Esto da origen a dos cinturones de radiación (conocidos como los cinturones de Van Allen), que se observan a grandes alturas y además son simétricos con respecto al ecuador magnético.

Es debido a las diferencias entre la proporción de carga y masa de los protones y los electrones, que divergen en sus trayectorias, que se forme un cinturón interno que consiste de protones y otro cinturón externo que consiste de electrones.

Existe un fenómeno que consiste en un decremento repentino en la intensidad de los rayos cósmicos. dicho decremento es provocado por alteraciones magnéticas entre el sol y la tierra, dicho fenómeno se llama "efecto Forbush".

Así, tanto el efecto Forbush, el viento solar y el campo geomagnético contribuyen a la alteración de los rayos cósmicos de la siguiente manera: removiendo los núcleos que poseen muy bajo momentum. La interacción con la atmósfera es mucho más compleja e influye en la producción de partículas secundarias y en una disminución profunda del flujo primario.

Existen cinco principales reacciones que se llevan a cabo cuando los rayos cósmicos interactúan con el aire, y son las siguientes:



Las dos primeras ecuaciones ilustran la producción de mesones a partir de la interacción de neutrones con protones en la atmósfera. La tercera ecuación muestra la producción de muones, la cuarta ecuación muestra el decaimiento de piones y, de la misma manera, la última ecuación nos muestra el decaimiento de muones y una cascada electromagnética.

### ***Rayos cósmicos solares.***

El sol genera un flujo constante de partículas cargadas que poseen muy baja energía, el viento solar, que no es capaz de penetrar lo suficiente el campo magnético. Pero, ocasionalmente, se verifican grandes erupciones solares durante las cuales se liberan o producen un gran número de partículas cargadas, en su mayoría estas partículas son protones y partículas  $\alpha$ .

Como estas partículas poseen energías relativamente bajas, no suelen causar aumentos importantes en las dosis de radiación en la superficie terrestre.

Tabla 1. Composición de los rayos cósmicos ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) a  $54^\circ\text{N}$  cerca del máximo solar, en términos de la densidad de flujo vs profundidad atmosférica

Presión: Atm ( $\text{g/cm}^2$ )	Altitud: (km).	Muones	Electrones	Protones	Piones	Neutrones
20	26.70	$2.11 \cdot 10^{-2}$	4.33	$7.12 \cdot 10^{-1}$	$1.74 \cdot 10^{-3}$	8.02
50	20.80	$6.64 \cdot 10^{-2}$	5.07	$6.30 \cdot 10^{-1}$	$4.78 \cdot 10^{-3}$	$1.09 \cdot 10^{-1}$
100	16.30	$1.01 \cdot 10^{-1}$	3.94	$4.56 \cdot 10^{-1}$	$6.88 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-1}$
150	13.70	$1.13 \cdot 10^{-1}$	2.74	$3.21 \cdot 10^{-1}$	$6.92 \cdot 10^{-3}$	7.91
200	11.90	$1.11 \cdot 10^{-1}$	1.82	$2.21 \cdot 10^{-1}$	$5.93 \cdot 10^{-3}$	5.86
250	10.50	$1.03 \cdot 10^{-1}$	1.19	$1.49 \cdot 10^{-1}$	$4.70 \cdot 10^{-3}$	4.19
300	9.31	$9.34 \cdot 10^{-2}$	$7.71 \cdot 10^{-1}$	$1.00 \cdot 10^{-1}$	$3.60 \cdot 10^{-3}$	2.94
350	8.26	$8.33 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-1}$	$6.67 \cdot 10^{-2}$	$2.68 \cdot 10^{-3}$	2.04
400	7.33	$7.16 \cdot 10^{-2}$	$3.19 \cdot 10^{-1}$	$4.40 \cdot 10^{-2}$	$1.89 \cdot 10^{-3}$	1.38
450	6.50	$6.31 \cdot 10^{-2}$	$2.08 \cdot 10^{-1}$	$2.90 \cdot 10^{-2}$	$1.34 \cdot 10^{-3}$	$9.33 \cdot 10^{-1}$
500	5.73	$5.56 \cdot 10^{-2}$	$1.36 \cdot 10^{-1}$	$1.90 \cdot 10^{-2}$	$9.46 \cdot 10^{-4}$	$6.27 \cdot 10^{-1}$
550	5.02	$4.92 \cdot 10^{-2}$	$9.04 \cdot 10^{-1}$	$1.24 \cdot 10^{-2}$	$6.57 \cdot 10^{-4}$	$4.18 \cdot 10^{-1}$
600	4.35	$4.31 \cdot 10^{-2}$	$5.89 \cdot 10^{-2}$	$8.10 \cdot 10^{-3}$	$4.46 \cdot 10^{-4}$	$2.75 \cdot 10^{-1}$
650	3.75	$3.84 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-2}$	$6.23 \cdot 10^{-3}$	$3.04 \cdot 10^{-4}$	$1.81 \cdot 10^{-1}$
700	3.17	$3.44 \cdot 10^{-2}$	$2.77 \cdot 10^{-2}$	$3.35 \cdot 10^{-3}$	$2.05 \cdot 10^{-4}$	$1.19 \cdot 10^{-1}$
750	2.62	$3.10 \cdot 10^{-2}$	$1.95 \cdot 10^{-2}$	$2.13 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$	$7.72 \cdot 10^{-2}$
800	2.10	$2.81 \cdot 10^{-2}$	$1.41 \cdot 10^{-2}$	$1.36 \cdot 10^{-3}$	$9.22 \cdot 10^{-5}$	$5.02 \cdot 10^{-2}$
850	1.62	$2.56 \cdot 10^{-2}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$	$8.67 \cdot 10^{-4}$	$6.14 \cdot 10^{-5}$	$3.25 \cdot 10^{-2}$
900	1.15	$2.34 \cdot 10^{-2}$	$8.07 \cdot 10^{-3}$	$5.55 \cdot 10^{-4}$	$4.07 \cdot 10^{-5}$	$2.10 \cdot 10^{-2}$
950	0.71	$2.15 \cdot 10^{-2}$	$6.36 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-4}$	$2.69 \cdot 10^{-5}$	$1.35 \cdot 10^{-2}$
1033	0.00	$2.90 \cdot 10^{-2}$	$4.55 \cdot 10^{-3}$	$1.71 \cdot 10^{-4}$	$1.34 \cdot 10^{-5}$	$6.46 \cdot 10^{-3}$

NCRP No. 45, 1987

## ***II.2. Irradiación Externa.***

La irradiación externa proviene, principalmente, de dos fuentes de aproximadamente la misma magnitud y que son: la radiación cósmica y la radiación terrestre la cual proviene a su vez de los radionúclidos presentes en el medio ambiente.

El campo de radiación externa consiste de radiaciones penetrantes y puede considerarse, como una primera aproximación, que irradian uniformemente el cuerpo. En primer lugar y en cuanto a la radiación cósmica, sucede lo siguiente: cuando las partículas primarias penetran en la atmósfera, las que tienen menores energías intervienen en reacciones nucleares (reacciones de estallamiento) con núcleos de los átomos presentes en el aire, produciendo así protones, neutrones, piones y kaones, así como también radiación electromagnética (rayos cósmicos secundarios) y una gran variedad de productos de reacción (núclidos cosmogénicos) como son el  $^3\text{H}$ ,  $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$  y  $^{22}\text{Na}$ .

Los protones, neutrones y piones de alta energía formados de esta manera, reaccionan a su vez con núcleos de aire para así formar más partículas secundarias. La mayor parte de estas partículas secundarias son electrones y muones (componente ionizante) y un menor número de neutrones. A este proceso se le denomina como cascada, y de esta manera es posible que se formen de un solo primario hasta  $10^8$  secundarios.

### ***Componente ionizante.***

La producción de iones por unidad de volumen en el aire libre es una medida de la tasa de fluencia del componente total de partículas cargadas de los rayos cósmicos, y suele expresarse como el número de iones por cada  $\text{cm}^3$  de aire a condiciones normales de temperatura y presión. Los valores que se reportan de la tasa de densificación iónica de los rayos cósmicos a nivel del mar y medidos en diferentes lugares, muestran una concordancia bastante aceptable que es de alrededor de  $2.1 / \text{cm}^3 \text{ s}$ , que a su vez, es el valor que se utiliza para el cálculo de la tasa del índice de la dosis absorbida.

En la atmósfera baja, la razón de dosis en el aire debida al componente ionizante es función de la altitud, duplicándose aproximadamente cada 1500 metros.

No obstante que esto no ocurre para los primeros 1000 metros en los cuales, la razón o rapidez de dosis total disminuye al aumentar la altura sobre la superficie terrestre, y esto se debe a que la atenuación de la radiación terrestre ocurre de manera más rápida que el incremento en la radiación cósmica.

La mayor parte de la población mundial vive en ciudades que se encuentran a la mitad entre los polos y el ecuador y cerca del nivel del mar, por lo que la rapidez de dosis absorbida, al aire libre, es de 32 nGy/h para el componente ionizante (UNSCEAR, 1982).

Al nivel del mar, la razón de dosis promedio en el aire es del orden de 30 (nGy/h) (para cualquier latitud) y se ve aumentada hasta un orden de 4 ( $\mu$ Gy/h) a una altitud de 12 km y en grandes altitudes.

Según un reporte de la UNSCEAR del año 1982, al aire libre, la razón de dosis absorbida debida al componente ionizante fue de 32 (nGy/h), dicho valor corresponde usualmente a la dosis equivalente efectiva. Cabe señalar aquí que, dentro de los edificios, las dosis son un poco menores, lo cual es debido a que las estructuras de los mismos ejercen un efecto protector.

Acorde con múltiples mediciones realizadas en edificios hechos con diferentes tipos de materiales de construcción como madera, concreto, etcétera (ya sea en casas habitación solas o en departamentos), se considera que el factor de protección debido a estas construcciones es en promedio de 0.8. Así entonces, la razón de dosis absorbida dentro de edificios y al nivel del mar es de aproximadamente 26 (nGy/h).

Entonces se sabe que, utilizando un valor de factor de calidad de 1 para el componente ionizante de los rayos cósmicos y de la misma manera un factor de ocupación de 0.8 dentro de los edificios, la dosis equivalente efectiva anual es estimada en 240 ( $\mu$ Sv) al nivel del mar.

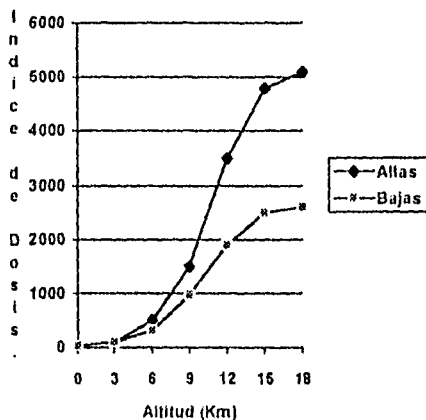
### ***Componente de neutrones.***

Tanto los protones como los neutrones contribuyen con gran parte del índice de dosis absorbida en la parte alta de la atmósfera terrestre, pero los neutrones pierden parte de su energía en colisiones elásticas y cuando se termalizan son capturados por el  $^{14}\text{N}$  para luego formar  $^{14}\text{C}$ .



Es debido a ello que la tasa de fluencia de neutrones se atenúa de manera considerable en la parte baja de la atmósfera, y al nivel del mar solo representa un porcentaje pequeño del índice de la dosis absorbida correspondiente a la parte baja de la atmósfera terrestre.

Figura 4. Índices de dosis absorbidas en aire en función de altitud y latitud geomagnética, para el componente ionizante (UNSCEAR, 1988).



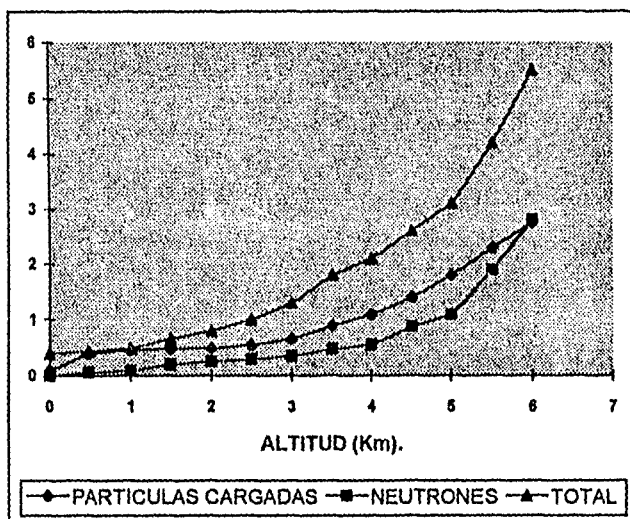
Así, la variación del componente de neutrones es similar a la del componente ionizante en lo que respecta a latitud y altitud. Es decir, la tasa de fluencia de los neutrones es aproximadamente de  $0.008 / \text{cm}^2 \text{ s}$ ; el índice de dosis absorbida promedio se calcula en  $0.8 \text{ (nGy/h)}$ , y el de dosis equivalente es de  $3 \text{ (nSv/h)}$  para los neutrones incidentes isotópicamente, lo que se refleja en un factor de calidad de 3.8.

Así también la UNSCEAR reporta en 1982 un valor de  $2.4 \text{ (nSv/h)}$  para la rapidez o razón de dosis equivalente efectiva debida al componente de neutrones.

La figura 5 muestra la variación de la dosis equivalente efectiva anual con la altitud según ecuaciones desarrolladas. Se puede notar que la dosis equivalente efectiva debida al componente de neutrones es pequeña al nivel del mar.

Existen países muy grandes con costas y montañas, como por ejemplo la ex U.R.S.S. o los E.U.A., en los cuales los valores no varían mucho, esto, debido a que la mayoría de los habitantes viven en zonas de baja altitud. No obstante, cabe mencionar a la ciudad de México en la cual, las exposiciones son altas, esto debido a que es una ciudad que se sitúa a altitud elevada (aproximadamente de 2400 msnm).

Figura 5. Variación de la dosis equivalente efectiva anual del componente ionizante y del componente de neutrones de los rayos cósmicos, en función de la altitud ( UNSCEAR, 1988).



### II.3. Irradiación Interna.

Diferentes radionúclidos son producidos por las reacciones que ocurren entre los rayos cósmicos y los núcleos de los átomos presentes en el aire (O,N,Ar) en su mayor parte producidos por reacciones de estallamiento y de captura de neutrones.

Cierta radiactividad puede añadirse a la radiactividad ambiental de la tierra, del polvo extraterrestre y de los meteoritos, pero esta fuente es bastante pequeña.

Aproximadamente  $10^7$  partículas de polvo bombardean a la Tierra cada año, y su contenido de radiactividad llega a ser de hasta 450 pCi / Kg; suponiendo esta máxima concentración, el límite superior de radiactividad proveniente de esta fuente es de solo 4.5 mCi:

$$((450 \cdot 10^{-12} \text{ Ci/Kg}) \cdot (10^7)) \text{ que es igual a } = 4.5 \cdot 10^{-3} = 4.5 \text{ mCi.}$$

Esta radiactividad se debe principalmente a núclidos ligeros como  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{46}\text{V}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ , etcétera. También se han detectado uranio, thorio y algunos otros elementos pesados en materiales provenientes de meteoritos.

La mayor parte de la radiactividad cosmogénica se produce por estallamiento, un proceso en el cual un núcleo se rompe en otros más ligeros por colisión con una partícula altamente energética que generalmente es un neutrón.

Los radionúclidos cosmogénicos son generalmente elementos ligeros, cuyas vidas medias varían entre algunos minutos y millones de años. los de vida media más corta, generalmente decaen antes de depositarse en la tierra (tabla 2).

### ***Radionúclidos Primordiales.***

Las fuentes terrestres de radiación son los radionúclidos de muy larga vida que han existido en la tierra desde su formación, hace varios billones de años, y que no han decaído sustancialmente.

Estos radionúclidos son llamados primordiales y entre los más importantes podemos citar al  $^{40}\text{K}$ , el  $^{87}\text{Rb}$ , el  $^{232}\text{Th}$  y el  $^{238}\text{U}$ . Los dos últimos radionúclidos encabezan respectivamente, series de 14 y 11 núclidos importantes que también contribuyen a las dosis provenientes de fuentes terrestres.

Además de los anteriores, el resto de los radionúclidos primordiales son isótopos de elementos que se encuentran a la mitad de la tabla periódica y que poseen vidas entre  $10^{10}$  y  $10^{15}$  años.

Tabla 2. Principales radionúclidos cosmogénicos.

Núclido	Vida Media a:años, d:días.	Veloc. Prom. (átomos/cm <sup>2</sup> s)	Inventario global (kg)	Principal núclido blanco
<sup>3</sup> H	12.36 a	0.25	3.5	N, O
<sup>7</sup> Be	53 d	0.08	0.0032	N, O
<sup>10</sup> Be	270 000 a	0.05	3.9*10 <sup>5</sup>	N, O
<sup>14</sup> C	5760 a	2.50	6.8*10 <sup>4</sup>	N, O
<sup>22</sup> Na	2.6 a	8.6*10 <sup>-5</sup>	0.0019	Ar
<sup>25</sup> Al	740 000 a	1.4*10 <sup>-5</sup>	1000	Ar
<sup>32</sup> Si	280 a	1.6*10 <sup>-4</sup>	1.4	Ar
<sup>32</sup> P	14.3 d	8.1*10 <sup>-4</sup>	0.0004	Ar
<sup>33</sup> P	24.4 d	5.8*10 <sup>-4</sup>	0.0006	Ar
<sup>35</sup> S	87.9 d	0.0014	0.0045	Ar
<sup>56</sup> Cl	380 00 a	0.0011	1.4*10 <sup>4</sup>	Ar
<sup>39</sup> Ar	270 a	0.0056	23	Ar
<sup>81</sup> Kr	210 000 a	10 <sup>-6</sup>	16.2	Kr

Kathren, 1984.

De los radionúclidos cosmogénicos, solo el <sup>14</sup>C y el <sup>3</sup>H contribuyen con cantidades apreciables a la dosis de radiación interna que recibe el hombre.

Algunos de ellos son emisores  $\alpha$  (<sup>147</sup>Sm) pero la gran mayoría son emisores  $\beta$ . Los emisores  $\alpha$  tienen  $T_{1/2}$  muy grandes y emiten partículas  $\alpha$  de energía relativamente baja. Además la mayoría de estos núclidos tienen abundancias isotópicas y elementales muy pequeñas y poca captación y concentración biológica, por lo tanto no son importantes contribuyentes en cuanto a la dosis ambiental.

La presencia de los radionúclidos primordiales y sus productos de decaimiento en todo ambiente (suelo, rocas, agua, alimentos, aire) y en los seres humanos, resulta en dosis de radiación tanto interna como externa (tabla 3).

## II.4. Irradiación Externa (FUENTES TERRESTRES DE RADIACION).

Los radionúclidos naturales que se encuentran en el medio ambiente terrestre son de dos tipos principales: los cosmogénicos y los naturales.

Así los radionúclidos cosmogénicos son producidos principalmente por la interacción de los rayos cósmicos con átomos blancos que se encuentran en la atmósfera terrestre, sin embargo, estos radionúclidos no tienen una contribución significativa a la dosis de radiación y externa a nivel del suelo. Por su parte el decaimiento de los radionúclidos naturales produce partículas  $\alpha$ , electrones y radiación electromagnética.

Tabla 3. Radionúclidos primordiales que no pertenecen a las series.

Núclido	Vida Media (años)	Abundancia Isotópica (%)	Decaimiento	Energía (Mev)
40K	$1.3 \cdot 10^9$	0.0118	Beta	1.32
50V	$6 \cdot 10^{14}$	0.25	Beta	-----
87Rb	$4.7 \cdot 10^{10}$	27.83	Beta	0.273
113Cd	$9.0 \cdot 10^{15}$	12.3	Beta	-----
115In	$5.0 \cdot 10^{14}$	95.7	Beta	0.49
123Te	$1.2 \cdot 10^{13}$	0.87	CE	-----
138La	$1.1 \cdot 10^{11}$	0.09	Alfa	0.27
142Ce	$> 5 \cdot 10^{16}$	11.1	Alfa	1.50
144Nd	$2.1 \cdot 10^{15}$	23.9	Alfa	1.83
147Sm	$1.1 \cdot 10^{11}$	15.0	Alfa	2.23
148Sm	$8.0 \cdot 10^{15}$	11.2	Alfa	1.95
149Sm	$> 10^{16}$	13.8	Alfa	<2.00
152Gd	$1.1 \cdot 10^{14}$	0.2	Alfa	2.14
156Dy	$2.0 \cdot 10^{14}$	0.06	Alfa	3 (?)
176Lu	$2.7 \cdot 10^{10}$	2.6	Beta	0.57, 0.31
174Hf	$2.0 \cdot 10^{15}$	0.17	Alfa	2.5
180Ta	$> 1.6 \cdot 10^{13}$	0.012	Beta	-----
187Re	$5.0 \cdot 10^{10}$	62.5	Beta	0.0026
190Pt	$7.0 \cdot 10^{11}$	0.013	Alfa	3.16
204Pb	$1.4 \cdot 10^{17}$	1.48	Alfa	2.60

Kahtren, 1984.

La radiación externa de los emisores  $\alpha$  y  $\beta$  presentes en el suelo o en el aire no contribuye de manera significativa a la dosis absorbida por los tejidos considerados de interés, ya que estos están recubiertos por lo menos por unos cuantos centímetros de piel, la cual absorbe la energía de las partículas  $\alpha$  y de los electrones emitidos por los radionúclidos naturales, por lo tanto solo se considera la contribución de la radiación  $\gamma$ . Los tres principales contribuyentes al campo de radiación  $\gamma$  terrestre son el  $^{40}\text{K}$  y los miembros de las series del Uranio y Thorio. La mayor parte de la radiación  $\gamma$  proviene de los 20 cm. superiores del suelo terrestre mas una pequeña contribución de los productos del radón presentes en el aire.

Al parecer la exposición dentro de los edificios es similar a la encontrada fuere de ellos, es decir al aire libre, esto es debido quizás a que hay un balance entre la protección que brindan los materiales de construcción y la geometría de la exposición a los radionúclidos presentes en las paredes cuando el individuo se encuentra dentro de una construcción.

### ***II.5. Exposición dentro de Edificios.***

El conocer los niveles de radiación dentro de los edificios (edificios públicos, oficinas, casas habitación, departamentos, etc.) es importante para poder evaluar la exposición a la cual esta expuesta la población o público en general, esto dado que la mayor parte de la población pasamos muchas horas de cada día dentro de ellos, ya sea cumpliendo funciones laborales, en el hogar, o incluso de esparcimiento, como es en una sala cinematográfica, un restaurante o un teatro o cualquier otro lugar de esparcimiento acostumbrado por los seres humanos. Los materiales de construcción de cada uno de estos edificios actúan como fuentes de radiación, pero al mismo tiempo atenúan la radiactividad proveniente del exterior.

Si se da el caso de que los materiales de construcción son de origen local, como es lo más frecuente, entonces se puede suponer que las concentraciones de los radionúclidos naturales presentes en el suelo o en el pavimento que rodea al edificio sean iguales o similares a las de los materiales de construcción. En dicho caso, se puede considerar que el valor de la relación existente entre el índice de dosis absorbida dentro de el edificio y fuera de él, varíe entre el valor de uno y dos, esto es debido a cambios en la geometría de la fuente y a la presencia de puertas y ventanas.

Los cálculos que toman en cuenta el grosor y las dimensiones de las paredes dan valores de 1.35 para las construcciones de ladrillo y un valor de 1.48 para las construcciones de concreto. Este valor, si se combina con el promedio del índice de dosis absorbida en aire, al aire libre que vale 55 (nGy/h), dará un valor de (72 nGy/h) para el índice de dosis absorbida dentro de edificios. Cabe hacer notar que es casi el mismo valor que el que se obtiene por mediciones directas realizadas dentro de los edificios.

## **II.6. Exposición al Aire Libre.**

La concentración de los radionúclidos primordiales en el suelo guarda una relación directa con la exposición al aire libre; está determinada en gran grado, por la radiactividad de las rocas fuente y en menor parte, por la naturaleza de los procesos implicados en la formación del suelo. Entonces, puede decirse que la radiactividad debida a la exposición al aire libre es causada en su mayor parte por el suelo.

Así por ejemplo, generalmente las rocas ígneas presentan mayor radiactividad que las sedimentarias y por su parte las rocas metamórficas poseen las concentraciones de las rocas de que derivan. Pueden existir excepciones, como algunas rocas fosfáticas que poseen alta radiactividad.

Los principales contribuyentes a la dosis absorbida en el aire son el  $^{208}\text{Tl}$  y el  $^{228}\text{Ac}$  de la serie del  $^{232}\text{Th}$ , mientras que para la serie del  $^{238}\text{U}$  el 99% es debido al  $^{214}\text{Pb}$  y al  $^{214}\text{Bi}$ , que a su vez son productos de decaimiento del  $^{222}\text{Rn}$ . Para un campo de radiación natural típico, una capa de 30 cm. sobre el suelo es la que contribuye de manera mas importante a la irradiación externa.

Se supone que la humedad atenúa la radiación del  $^{40}\text{K}$  y del  $^{232}\text{Th}$ , pero contrariamente aumenta la radiación de la serie del  $^{238}\text{U}$ , esto debido a que el agua del suelo inhibe la difusión del radón (UNSCEAR 1988). Esta suposición esta basada en que todos los productos de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  y del  $^{232}\text{Th}$  se encuentran en equilibrio radiactivo con sus precursores.

El índice de dosis absorbida terrestre promedio al aire libre debido a la radiación y para una altura de 1 metro sobre la superficie del suelo es de 44 (nGy/h).

En diferentes países se han realizado encuestas de gran escala, utilizando para ello diferentes métodos y tipos de instrumentación, para poder determinar las exposiciones promedio a la radiación y al aire libre. En la tabla 4 se presentan los resultados de estudios realizados en 23 países, y se encontró que el promedio aritmético de estos resultados es de 55 (nGy/hr)

Así, por ejemplo, se encontró en China un promedio de 80 (nGy/h) para todo el país y existen regiones en el mundo en que se supera el valor de 55 (nGy/h), como por ejemplo en dos provincias italianas, en Irán, Madagascar, Nigeria, Francia, Brasil e India. Estas variaciones son debidas pues a las variaciones en las concentraciones de los radionúclidos en el suelo de cada región.

### ***II.7. Dosis Equivalentes Efectivas Anuales debidas a la Radiación gamma ( $\gamma$ ) Terrestre.***

El valor del cociente entre el índice de dosis equivalente efectiva y el índice de dosis absorbida en aire se considera aproximadamente de 0.7 (Sv/Gy) para las exposiciones ambientales de rayos  $\gamma$  y de energías moderadas.

Se supone que este valor es válido tanto para hombres como para mujeres y también para los valores ambientales dentro y fuera de los edificios. Luego, considerando un valor de ocupación al aire libre de 0.2, la dosis equivalente efectiva anual debida a la radiación  $\gamma$  terrestre al aire libre será de:

$$55(\text{nGy/h}) * 0.7(\text{Sv/Gy}) * 8760(\text{h/a}) * 0.2 = 70 (\mu\text{Sv})$$

Por otro lado, para la exposición dentro de los edificios, y utilizando un factor de ocupación de 0.8, la dosis equivalente efectiva anual será de:

$$70(\text{nGy/h}) * 0.7(\text{Sv/Gy}) * 8760(\text{h/a}) * 0.8 = 340 (\mu\text{Sv})$$



La dosis equivalente efectiva total anual (la suma de exposición dentro de edificios y exposición al aire libre) proveniente de la radiación terrestre y promediada para la población mundial es de  $(340 + 70) = 410$  ( $\mu\text{Sv}$ ). Cabe señalar que, las contribuciones a la dosis equivalente efectiva anual total debida a la radiación terrestre del  $^{40}\text{K}$  y de los radionuclidos de las series  $^{238}\text{U}$  y del  $^{232}\text{Th}$  son de 150, 100 y 160 ( $\mu\text{Sv}$ ) respectivamente.

Tabla 4. Estimaciones del índice de dosis absorbida en aire, al aire libre, de fuentes terrestres de radiación a un metro sobre la superficie del suelo (UNSCEAR, 1988).

País	Año	No de mediciones	Índice de dosis absorbida en aire (nGy/h)		Estudio e instrumentación
			Promedio	Rango	
Austria	1980	> 1000	43	20-150	Terrestre en áreas pobladas, contador Geiger
Bélgica	1987	272	43	13-58	Terrestre, dosímetro termoluminiscente, espectrómetros gamma y cámara de ionización
Canadá	1984	33 áreas	24	18-44	Aéreo con detector de centelleo
China	1986	38661	80	60-120 (a)	Terrestre con cámaras de ionización y detector de centelleo
Dinamarca	1980	14 sitios	38	17-52	Terrestre con cámaras de ionización y espectrómetro gamma
EUA	1972	25 áreas (e)	46	13-100	Aéreo con detectores de centelleo
Finlandia	1980			65	
Francia	1985	5142	68	10-250	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
Holanda	1985	1049	32	10-60	Terrestre con cámara de ionización
Hungría	1987	123 sitios	55	20-130	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
Islandia	1982		28	11-83	
India	1986	2800	55	20-1100 (c)	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
Inglaterra	1984	1400	40	0-100	Terrestre con contador Geiger
Irlanda	1980	264	42	0-180	Terrestre con cámara de ionización
Italia	1972	1365	57	7-500	Terrestre con cámara de ionización
Japón	1980	1127	49	5-100	Terrestre con cámara de ionización y detector de centello
Noruega	1977	234	73	20-1200	Terrestre con cámara de ionización
Polenia	1980	352 sitios	37	15-90	Terrestre con dosímetros termoluminiscentes
RDA	1969	1005	85	24-270 (b)	Terrestre con cámara de ionización
RFA	1978	24739	53	4-350	Terrestre con detectores de centelleo
Rumania	1979	2372	81	32-210	Análisis de muestras de suelo por espectrometría gamma
Suecia	1979		80	8-4000	
Suiza	1964		60	(d)	Terrestre con cámara de ionización
Taiwan	1972	26		69	Análisis de muestras de suelo por espectrometría gamma

## ***II.8. Irradiación Interna.***

Los radionúclidos primordiales que están presentes en la biosfera terrestre que entran al organismo humano (ya sea por ingestión o por inhalación) contribuyen de manera significativa a la dosis total que se recibe. La dosis de irradiación interna que es absorbida por el cuerpo humano proviene de los radionúclidos naturales y casi exclusivamente del  $^{40}\text{K}$ , el  $^{87}\text{Rb}$ , el  $^{222}\text{Rn}$ , el  $^{220}\text{Rn}$  y el  $^{210}\text{Po}$  que es un producto descendiente del radón.

En la biosfera terrestre se encuentran presentes el  $^3\text{H}$  y el  $^{14}\text{C}$  y los demás núclidos presentes tienen abundancias menores, y, usualmente vidas medias mucho más largas y por lo tanto menor actividad específica y además son menos activos metabólicamente.

Los radionúclidos pesados son de interés particular ya que se encuentran distribuidos ampliamente en la biosfera terrestre y porque ellos además, y muchos de los radionúclidos de vida corta que pertenecen a las series radiactivas, son emisores de tipo  $\alpha$ . No solo debido a que las partículas  $\alpha$  son más energéticas que las partículas  $\beta$  o las  $\gamma$ , sino porque sus efectos biológicos son mucho mayores.

Los isótopos siguen el metabolismo normal del elemento del que proceden pero los radionúclidos de vida larga se mantienen usualmente en una concentración de equilibrio o se incrementan lentamente con la edad. Los radionúclidos de vida corta desaparecen por decaimiento, pero sus concentraciones en el cuerpo se restablecen constantemente debido a nuevas incorporaciones.

## ***II.9 Radiactividad en la materia.***

Tanto los materiales de construcción (cada ladrillo, bloque de concreto, el cemento, yeso, cal, la pintura, etc.), así como los muebles de las casas habitación (sillas, sillones, mesas, aparatos eléctricos y electrónicos, etc.) y muchos más de los materiales empleados en la construcción de casas y edificios y cada objeto que nos rodea, tienen de alguna forma un isótopo radiactivo natural y por lo tanto son consideradas fuentes naturales de radiación (radiación de fondo).

El ser humano y los demás seres vivos, tienen en su organismo microcantidades de elementos radiactivos naturales, entre los cuales destacan el  $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{67}\text{Zn(m)}$ ,  $^{75}\text{As(m)}$ ,  $^{77}\text{Se(m)}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{87}\text{Sr}$ ,  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{112}\text{Cd}$ ,  $^{115}\text{Sn}$ ,  $^{117}\text{Sn}$ ,  $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{135}\text{Ba}$ ,  $^{138}\text{Ba}$  y  $^{137}\text{Ba}$ ,  $^{204}\text{Pb}$  y  $^{226}\text{Ra}$  (Donde la m significa un elemento metaestable.)

Así por ejemplo, un hombre típico de 70 Kg. de peso emitirá alrededor de:

280 000 dpm, debidas al contenido de  $^{40}\text{K}$

140 000 dpm, debidas al contenido de  $^{14}\text{C}$

140 000 dpm, debidas al contenido de  $^{226}\text{Ra}$ .

La cantidad de radiación, dosis biológica (mrem/año) que recibe un ciudadano norteamericano en su país, se ha calculado de la siguiente forma:

Dosis típica USA/año

Médica	110	mrem
Ambiental	4.5	mrem
Miscelánea	2.6	mrem
Natural	130	mrem
-----		
Total	248	mrem

Además de que se reciben pequeñas dosis por radiación al ver el aparato de T.V., por portar reloj con carátula luminosa, el cual posee sales de  $^{226}\text{Ra}$ , etc. Además, por ejemplo el agua de lluvia contribuye con cerca de 80 (pCi/l), así como el agua natural, el aire que posee gases radiactivos tales como el Xe, Kr, Rn. Así como también la basura emite radiación debida al  $^{14}\text{C}$ . De la misma forma los alimentos que consumimos día con día también emiten radiactividad debida al  $^{226}\text{Ra}$  o al  $^{14}\text{C}$ , por ejemplo tenemos que el frijol seco contiene 6.1 (pCi/Kg) debido al  $^{226}\text{Ra}$  y también entre 800 y 4600 pCi/Kg debidos al  $^{40}\text{K}$ , también por ejemplo. la leche emite cerca de 3500 y 6400 (pCi/Kg) la carne contiene entre 2700 y 3300 (pCi/Kg), una cerveza 390 (pCi/Kg) (dichos datos fueron estimados en los U.S.A. en 1960).

## CAPITULO III. DOSIMETRIA.

### *III.1. Medición de la Dosis Absorbida.*

Actualmente la dosis absorbida se define como la energía promedio depositada por la radiación ionizante en un elemento de materia.

Existen diversos procedimientos para medir la dosis absorbida. Estos métodos se clasifican en absolutos y secundarios; a continuación se enunciarán las características de cada uno.

#### MÉTODOS ABSOLUTOS.

Un dosímetro se puede considerar como absoluto si es susceptible de ser construido y es posible usarlo en forma subsecuente para medir la energía absorbida sin la necesidad de calibrarlo en un campo de radiación conocido; entre los métodos absolutos para medir la dosis absorbida se encuentran la calorimetría y la ionización de gases.

Los métodos calorimétricos están basados en que la mayoría de los medios líquidos y sólidos más del 95% de la energía absorbida es transformada en calor, lo que ocasiona un aumento de temperatura, dicho aumento puede medirse de forma directa.

La energía restante, que es una pequeña cantidad, se puede medir por otros métodos, esta energía se pierde por cambios en la red cristalina o en la energía del enlace químico.

La dosimetría por ionización en gases esta basada en el principio de la curva de Bragg-Gray y hace uso de la cantidad  $W$ , definida esta como la energía total que se necesita proporcionar a un gas para formar un par de iones.

El valor de  $W$  puede ser calculado de forma independiente, lo que hace que estos dosímetros se utilicen para efectuar mediciones absolutas de la dosis absorbida.

### MÉTODOS SECUNDARIOS.

Estos dosímetros que deben ser calibrados para medir la energía absorbida, se encuentran los dosímetros de estado sólido y los dosímetros químicos. Los métodos de dosimetría química no se consideran absolutos, aunque si se pueden utilizar como patrones de referencia.

Con este tipo de dosímetros la dosis absorbida es determinada mediante el cambio químico producido, en un medio apropiado, por el paso de la radiación.

El rendimiento de la reacción química, o valor  $G$ , se expresa como el número de iones, radicales o moléculas del compuesto que se transforma en otra especie química por cada 100 eV de energía absorbida, y su valor puede obtenerse en condiciones muy controladas.

Los dosímetros de estado sólido no se pueden considerar como absolutos, esto es debido a que están basados en fenómenos muy complejos. Sin embargo estos dosímetros resultan de gran utilidad para efectuar mediciones precisas

#### ***III.2. Criterios para la elección de un dosímetro. Diferentes tipos de Dosímetros.***

Para comparar los diversos métodos existentes para la medición de la dosis absorbida, se establecen los siguientes parámetros:

- a. Equivalencia del dosímetro con el medio.
- b. Tipo y energía de la radiación.
- c. Intervalo de dosis.
- d. Rapidez de dosis.

e. Tamaño y facilidad de la ubicación.

f. Almacenamiento de la información (desvanecimiento).

Los métodos de estado sólido, en particular el de termoluminiscencia, se ajustan muy bien a los anteriores parámetros y por lo tanto presentan mayores ventajas con respecto a los otros métodos de medición de la dosis absorbida ya que tienen las siguientes características específicas:

1. No necesitan empaque especial.
2. La dosimetría se puede hacer aproximadamente puntual.
3. Cubren un amplio intervalo de dosis.
4. Son casi equivalentes al aire y al tejido (los más usuales).
5. Retienen la información por mucho tiempo.
6. No se necesitan conexiones entre el dosímetro y el equipo electrónico asociado.
7. Son casi independientes de la rapidez de dosis.
8. Son sensibles a casi cualquier tipo de radiación.
9. Se pueden usar varias veces y son baratos.
10. Se pueden preparar en el laboratorio.

En las siguientes figuras se puede apreciar lo sig: en la figura No. 6 la comparación de los dosímetros más usuales en lo que se refiere al intervalo de dosis que cubre cada uno, así se puede ver que tanto los dosímetros termoluminiscentes como los de ionización de gases cubren el intervalo más amplio. En la figura No. 7 se observan las características operacionales de algunos sistemas de dosimetría.

### ***III.3. Fundamentos y principios de Dosimetría Termoluminiscente.***

La dosimetría de la radiación ionizante es una necesidad fundamental en cualquier disciplina científica, si es que se quieren utilizar las radiaciones en forma apropiada, correcta y segura, ya que de otra manera pueden obtenerse resultados poco satisfactorios y poco confiables y lo que es aún peor pueden causarse daños al personal ocupacionalmente expuesto o a los materiales y equipos de trabajo.

Figura 6. Intervalos de dosis que cubren los sistemas de Dosimetría más comunes.  
 (Azorin, 1987. Dosimetría Termoluminiscente)

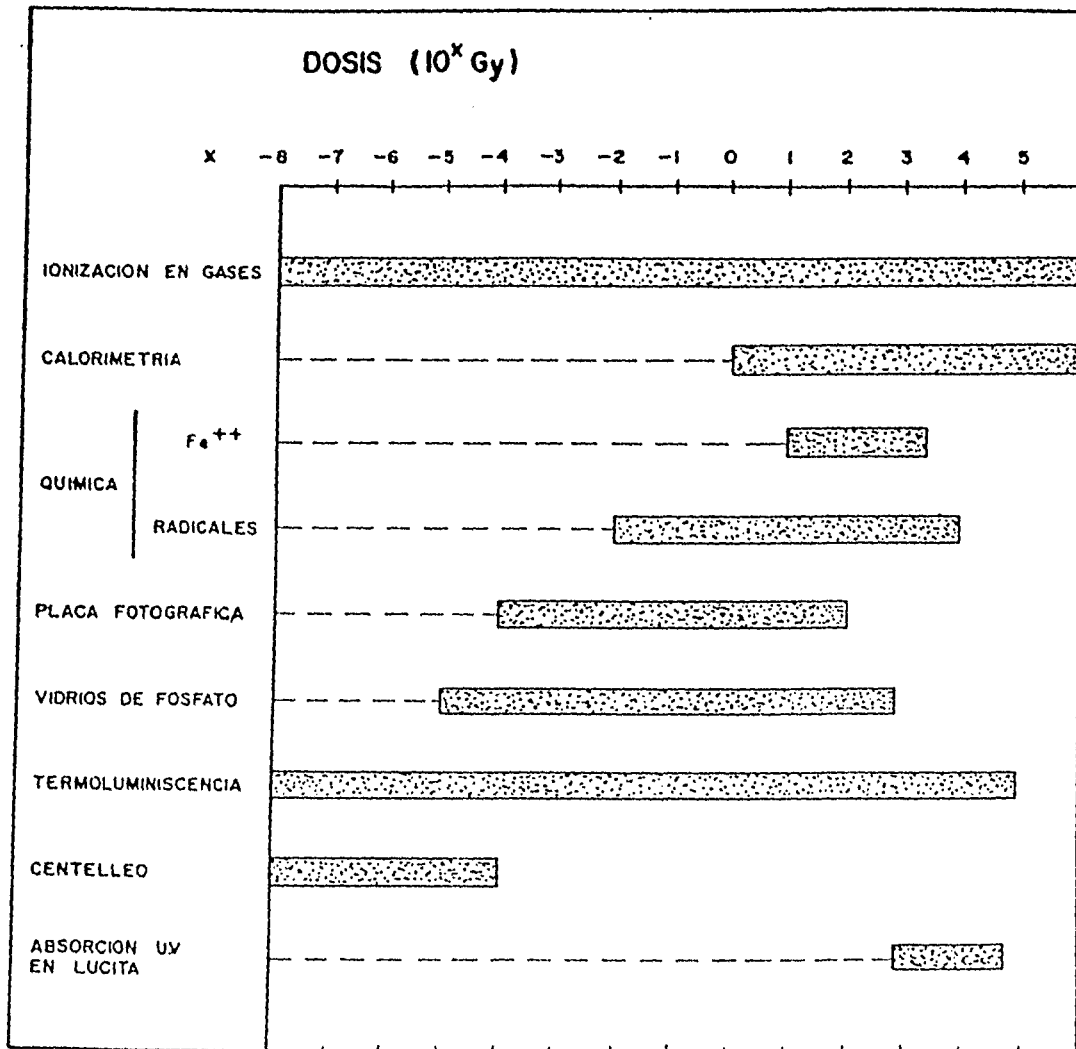


Figura 7. Características operacionales de algunos sistemas de Dosimetría (Azorín, 1987, Dosimetría Termoluminiscente)

METODO		CARACTERISTICAS							
		ABSOLUTO	TODO TIPO DE RADIACION	BAJA RAPIDEZ DE DOSIS	ALTA RAPIDEZ DE DOSIS	BAJAS DOSES	ALTAS DOSES	DIMENSIONES PEQUEÑAS	ALMACENAMIENTO DE LA INFORMACION
ESTADO SÓLIDO	IONIZACION EN GASES	●	●	●	●	●	●	●	
	CALORIMETRIA	●			●		●		
	QUIMICA		●		●		●		
	COLORACION EN VIDRIOS			●	●	●	●	●	●
	TERMOLUMINISCENCIA		●	●	●	●	●	●	●
	ABSORCION U. V. EN LUCITA				●		●	●	●
	CENTELLEO		●	●		●			
	BARRERA SUPERFICIAL			●		●		●	
	PLACA FOTOGRAFICA		●	●	●	●			●



Ante la gran diversidad de fuentes de radiación que pueden ser utilizadas, se requiere que la dosimetría abarque un amplio intervalo de dosis así como diversos tipos de radiación.

La termoluminiscencia ha demostrado su eficacia en lo que se refiere a su aplicación abarcando los campos de dosimetría ambiental, dosimetría personal, dosimetría clínica, etc.

La Luminiscencia Térmicamente Estimulada llamada erróneamente en la actualidad TERMOLUMINISCENCIA (TL), es la base de uno de los métodos más modernos de dosimetría de la radiación ionizante

Sir Robert Boyle describió este fenómeno en el año de 1663 cuando informó que había observado una extraña luminosidad al calentar un diamante en la oscuridad de su recámara; de otra forma también Oldenberg en 1705 y más tarde Becquerel en 1883 hablaron sobre el fenómeno de TL.

La primera vez que la TL se utilizó para medir radiación ionizante fue en 1895 y la hicieron Wiedemann y Schmidt; sin embargo, las primeras mediciones en el sentido moderno fueron realizadas en Viena en 1930 por Urbach, quien también descubrió la TL en halogenuros alcalinos.

La teoría sobre la curva TL que se utiliza en la actualidad para la estimación de las trampas fue desarrollada, para cinética de primer orden por Randall y Wilkins (1945), por Garlick y Gibson para cinética de segundo orden (1948) y lo más actual en este campo lo ha desarrollado Chen para una cinética de orden general (1984).

Las aplicaciones prácticas de la TL se iniciaron después de la segunda Guerra Mundial, en la Universidad de Winsconsin, donde Daniels comenzó a estudiar el LiF (1953). Más tarde, en 1960, Cameron, en la misma universidad, reanudó las investigaciones sobre la TL del LiF introduciendo a este impurezas de Mg y Ti llegando así a desarrollar el famoso TLD-100 (LiF: Mg, Ti), el cual, aún y cuando presenta algunas características desfavorables, sigue siendo todavía el dosímetro termoluminiscente (TLD) el más popular.

En México, la investigación acerca del fenómeno de TL y sus aplicaciones se inició en 1968.

Desde entonces existen diversos grupos o sectores del quehacer científico, técnico e industrial que la aplican en diferentes formas como la protección radiológica, radiodiagnóstico, radioterapia, monitoreo ambiental, dosimetría personal, dosimetría de neutrones, etc.

### **III.4. Dosimetría Termoluminiscente.**

#### **LUMINISCENCIA.**

- Luminiscencia en sólidos.

La luminiscencia se presenta en un gran variedad de materiales tales como cristales inorgánicos, vidrios, cerámicas, polietileno, teflón y en materiales biológicos. No obstante, que los materiales de interés actual en lo que concierne a la Dosimetría son los sólidos dieléctricos con un intervalo amplio de transparencia óptica. Es la existencia de defectos en la red cristalina de un sólido lo que puede generar la producción del fenómeno de luminiscencia que se da cuando un cristal es expuesto a la radiación ionizante.

Los cristales reales no presentan una estructura perfecta ideal, tienen dentro de la configuración de su red una gran cantidad de defectos, por ejemplo, defectos puntuales como la vacancia producida por la ausencia de un ión en una posición que es normalmente ocupada en la red cristalina

Dichos iones (o átomos) que son capaces de ocupar un espacio que normalmente debería estar vacío dentro de la red son llamados iones intersticiales y pueden ser resultado de átomos de cristales desplazados de su posición normal dentro de la red o bien a átomos de impurezas.

Cuando el sólido es sometido a la radiación ionizante, se producen entonces electrones libres y a consecuencia de ello se generan agujeros.

Dichos electrones portadores de carga emigran por el cristal hasta quedar atrapados en estos defectos y con ello se forman los llamados centros de color, que a su vez, son determinadas configuraciones electrónicas originadas por defectos en la red cristalina, y cuyos niveles de energía producen bandas de absorción óptica en longitudes de onda a las que el cristal es generalmente transparente. La posibilidad de absorber luz hace que el cristal tome un color y por ello a estas configuraciones se les nombra centros de color.

El fenómeno de luminiscencia recibe nombres particulares dependiendo del agente excitante y/o el tipo de energía que se proporciona a los centros luminiscentes para desexcitarlos. Así, si esta energía es suministrada por radiación de frecuencia óptica, al fenómeno se le da el nombre de radiofotoluminiscencia y si la desexcitación se logra por medio de energía térmica, el fenómeno se llamará Termoluminiscencia (TL).

Ciertos sólidos previamente irradiados tienen la propiedad de emitir luz, si se eleva su temperatura a un valor suficiente por debajo de su temperatura de incandescencia. A este fenómeno se le conoce como radioluminiscencia térmicamente estimulada; sin embargo y por razones históricas (Námbi 1975), se le llama radiotermoluminiscencia o simplemente termoluminiscencia (TL).

La importancia de este fenómeno en la dosimetría de la radiación ionizante radica en el hecho de que la cantidad de luz emitida es proporcional a la dosis absorbida por el material irradiado.

El mecanismo general para explicar el fenómeno de TL es el siguiente: al ser irradiado el cristal, su estructura sufre alteraciones por la ionización; en este proceso se liberan electrones de la red y se generan dos tipos de entes móviles: electrones y agujeros, ambos son portadores de carga, que pueden viajar por el cristal hasta quedar atrapados en defectos de la red, generando así centros de color.

Los electrones y agujeros permanecen atrapados hasta que se proporciona al material la energía suficiente para liberarlos, volviéndolos con ello a su estado natural antes de la irradiación.

Cuando esto ocurre, se desprenden del exceso de energía que adquirieron, con la subsecuente emisión de fotones de luz visibles.

Si la energía que se proporciona al cristal para que los entes móviles vuelvan a su estado original es energía térmica, es cuando se produce el fenómeno de TL (Schulman, 1965).

A la energía que es necesaria para liberar a los electrones y agujeros atrapados se le denomina energía de activación o profundidad de la trampa.

No obstante que este fenómeno se conoce desde 1683, hasta la fecha no existe una teoría que pueda explicar completamente el fenómeno de TL. En todos los modelos que tratan de explicarlo se acepta la existencia de tres entes operativos para describirlo, los cuales son:

- Ente móvil o portador de carga (agujero o electrón).
- Centro luminiscente o centro de recombinación.
- Trampas.

El proceso se puede explicar en forma cualitativa de la siguiente forma: al interaccionar la radiación ionizante con el sólido, se puede proporcionar la energía suficiente para generar los entes móviles.; es decir, proporciona la energía suficiente para elevar a los electrones de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC) dejando los correspondientes agujeros en la banda de valencia, a este se le llama modelo de bandas (figura 8).

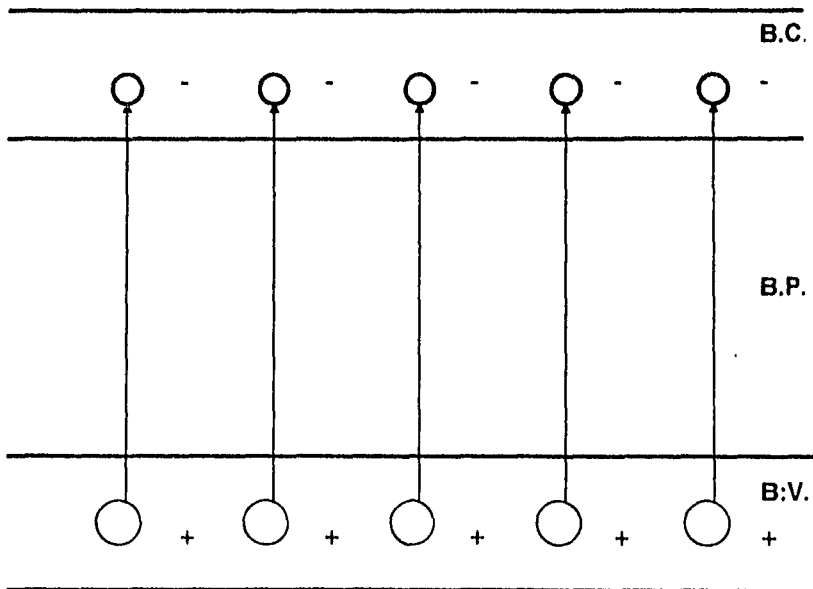
Estos portadores de carga (electrones y agujeros) viajan por el cristal hasta que se recambian, o son atrapados en estados metaestables de energía que existen en la banda prohibida, asociados con defectos de material.

La energía térmica que se proporciona al material al calentarlo después de ser irradiado, libera el ente móvil que estaba atrapado, el cual después de viajar a través del cristal se recombina con un centro luminiscente que existe en la banda prohibida emitiendo un fotón de luz visible.

Debido a que el proceso de emisión luminosa implica la desocupación de varias trampas de diferentes energías, el ente móvil es liberado a diferentes temperaturas, lo que da lugar a una curva de termoluminiscencia la cual es característica propia de cada material (figura 9).

Como la luz emitida corresponde a diferentes longitudes de onda, es importante conocer la calidad espectral de dicha luz emitida, es decir, el espectro de emisión, el cual también es característica propia de cada material.

Figura 8. Producción de entes móviles o portadores de carga. (Azorín, 1987, Dosimetría Termoluminiscente).



La figura 10 muestra la curva de termoluminiscencia y el espectro de emisión característicos para dosímetros de sulfato de calcio activado con disprosio ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ). Para explicar el proceso de termoluminiscencia se han propuesto varios modelos, los cuales presentan discrepancias en lo que se refiere a los elementos físicos que realizan la función de ente móvil (electrones o agujeros), trampas y centros luminiscentes.

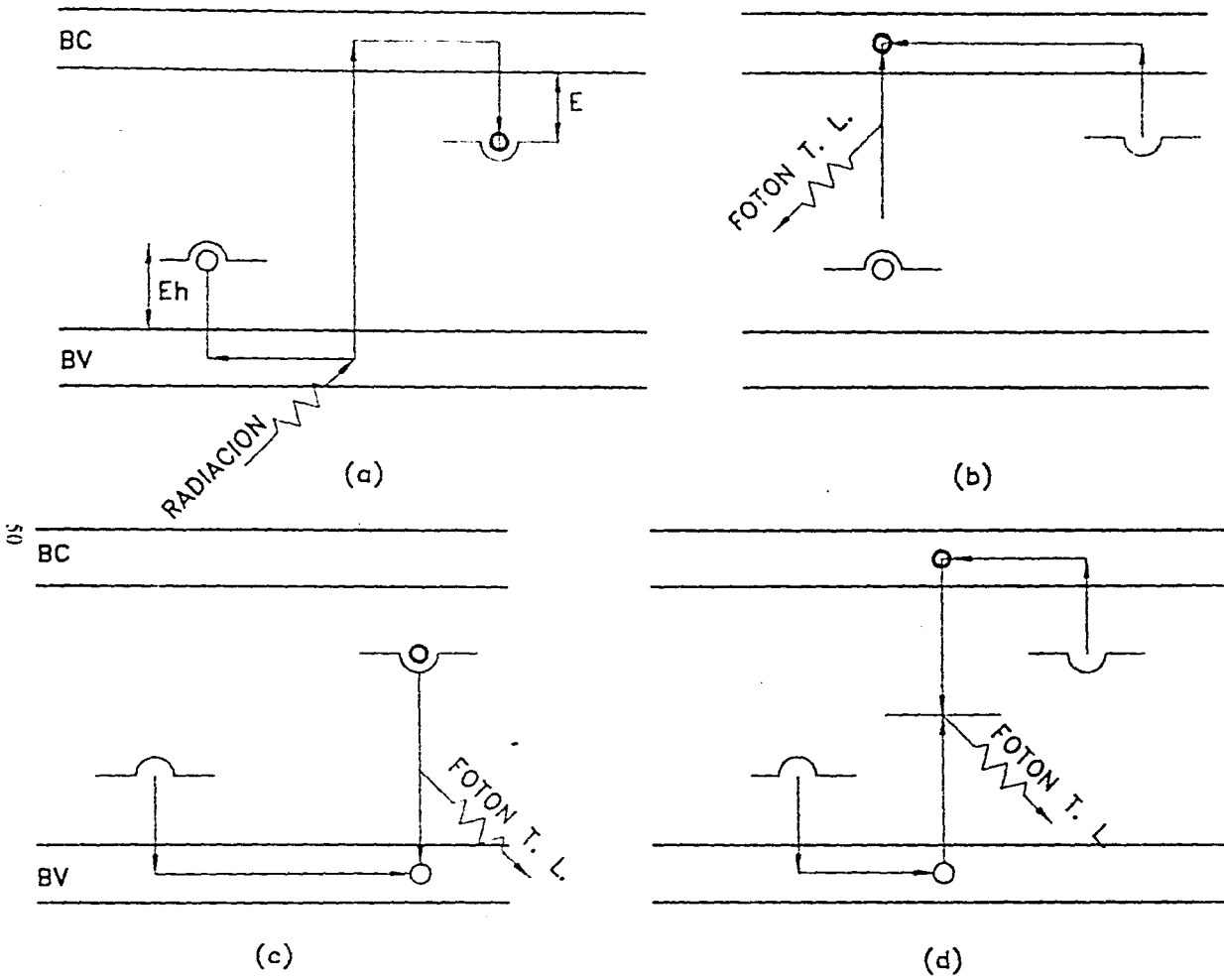
Esto ha dado lugar a dos diferentes corrientes de opiniones. Una de ellas considera que el centro F no interviene en el proceso además de que consideran que la emisión luminosa se debe a la captura de agujero por centros luminiscentes; la otra corriente considera que dicho centro interviene en forma importante.

Entre los autores que consideran que el centro F juega un papel importante existen tres tendencias:

- a) Los centros F actúan como trampas para agujeros, los que al ser liberados viajan por la banda de conducción hasta recombinarse con centros luminiscentes donde existen agujeros.
- b) Las impurezas actúan como trampas para agujeros, los que al ser liberados migran por la banda de valencia hasta que se recombinan con un centro F emitiendo un fotón de luz.
- c) El centro F actúa como centro de recombinación para iones intersticiales.

También se han propuesto modelos matemáticos, sin embargo, hasta la fecha estos sólo han servido para interpretar parcialmente el fenómeno y no existe un modelo totalmente aceptado.

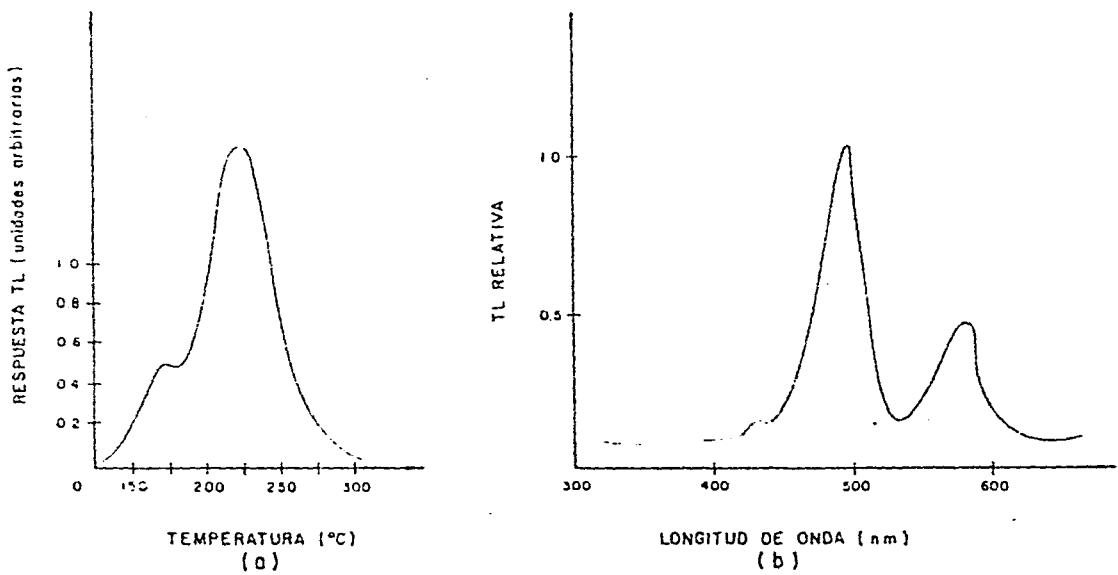
Estos modelos se basan en la suposición de que una vez liberado el ente móvil, la probabilidad de encontrarlo en un determinado nivel de energía y que escape es calculable. También supone que una vez liberado el ente móvil, la probabilidad de que vuelva a ser atrapado es muy baja, y además que la intensidad termoluminiscente es directamente proporcional a la rapidez con que el ente móvil es liberado de sus trampas durante el calentamiento.



(a) EXPOSICION DEL CRISTAL A LA RADIACION  
 b), c) Y d) CALENTAMIENTO DEL CRISTAL PREVIAMENTE IRRADIADO.

Figura 9. Diagrama de bandas de energía para explicar el fenómeno de Termoluminiscencia (Azorín, 1987, Dosimetría Termoluminiscente)

Figura 10. Curva de Termoluminiscencia y espectro de emisión característicos de dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ . (Azorín, 1987, Dosimetría Termoluminiscente).



a) Curva termoluminiscente y b) espectro de emisión del Sulfato de calcio activado con disprasio, material que actualmente se usa mucho para dosimetría.



### ***Formación de la curva termoluminiscente.***

El proceso de la emisión luminosa durante el calentamiento del cristal implica la desocupación de las trampas en el cristal.

Este proceso se muestra en la Figura 11. La curva superior representa la probabilidad de desocupación de las trampas en función de la temperatura; así, a baja temperatura dicha probabilidad es cero o casi despreciable, ya que los portadores de carga no tienen la suficiente energía cinética para escapar del pozo de potencial.

A medida que aumenta la temperatura, la probabilidad de que las trampas se desocupen aumenta y generalmente lo hace desde cero a uno en un intervalo de temperatura de 10 a 323 °K (50°C).

Durante este intervalo de temperatura, una fracción de los portadores de carga liberados se dirige hacia los centros de recombinación haciendo que disminuya la población de portadores de carga atrapados. por lo que la intensidad de luz emitida alcanza un máximo dando origen a un patrón de luminiscencia en función de la temperatura, a esta se le llama curva TL. (Levy, 1974).

Si el cristal contiene más de un tipo de trampas (que es lo mas común), este proceso se repite para cada grupo de trampas; dando lugar a varios puntos de máxima intensidad de emisión luminosa en la curva TL, los cuales se conocen comúnmente como picos TL.

Cada pico está caracterizado por la temperatura a la cual se presenta la máxima intensidad de la emisión ( $T_m$ ), por la energía de activación o profundidad de la trampa ( $E$ ) y por el factor preexponencial o factor de frecuencia ( $s$ ).

### ***Espectro de emisión.***

El hecho de que la luz emitida corresponda a fotones de diferente energía, da lugar a un registro de su intensidad en función de la longitud de onda de la misma, que se conoce como espectro de emisión TL; éste, también puede presentar varios puntos de intensidad máxima, a los cuales se les llama picos de emisión.

### ***Cinética del fenómeno de termoluminiscencia.***

Se han llevado a cabo muchos intentos para tratar de entender la cinética del fenómeno TL con un modelo, primordialmente para estudiar las propiedades de los defectos y tener una herramienta para la determinación de las trampas, de los parámetros como son, las energías de activación y los factores de frecuencia.

A causa de los cambios en la densidad de los electrones y de los agujeros durante la estimulación térmica, los cálculos están basados en una energía de nivel simple esquematizado en las diferentes teorías fenomenológicas.

La simplicidad del modelo consiste en un nivel de trampas sencillo y un nivel de recombinación, las soluciones analíticas parecen ser razonables para explicar el fenómeno de TL. Por otro lado, nuevos materiales son investigados y reportados cada año y las aplicaciones de TLD en los diferentes campos, se expanden y progresan continuamente.

El proceso físico que da lugar a la emisión termoluminiscente de un sólido, está relacionado con el movimiento de portadores de carga (electrones y agujeros) entre diferentes estados de energía debidos a las imperfecciones en la red cristalina del sólido.

El estudio de la cinética del proceso TL implica por lo tanto, la investigación de las transiciones electrón-agujero entre estados de energía relacionados con las diferentes imperfecciones (defectos e impurezas), tanto durante la irradiación de la muestra, como también durante el proceso de lectura (calentamiento).

Los diversos fenómenos relativos a la excitación TL y al proceso de lectura se describen con referencia a las transiciones de electrones y agujeros entre la BV y la BC del material TL y los estados localizados de los centros de atrapamiento y recombinación.

La descripción de dichos procesos se lleva a cabo mediante parámetros relacionados con las imperfecciones, tales como la energía de activación o la profundidad de la trampa (E), probabilidades de recombinación ( $\rho$ ), factor de potencia o factor preexponencial (s).

Dichos parámetros determinan el tipo de cinética que se puede esperar, (así por ejemplo, la linealidad de la respuesta TL en función de la dosis, dependencia de la rapidez de dosis durante la irradiación) de primer orden, segundo orden o cualquier otro tipo de cinética durante la lectura.

Debe hacerse notar que los niveles de energía implicados son estados metaestables, por lo general de vidas medias muy largas.

De hecho la diferencia entre centros de recombinación y trampas radica en que la vida media de los centros de recombinación se mantiene larga aún y cuando la muestra se calienta, mientras que en las trampas los portadores de carga son liberados térmicamente con relativa facilidad.

Esta liberación ocurre dentro de un estado excitado, muy a menudo en la banda correspondiente; es decir, los electrones son liberados en la banda de conducción y los agujeros en la de valencia.

Mientras que los electrones y los agujeros, en sus respectivos centros de recombinación, permanecen en sus sitios y su papel en el proceso de recombinación es más pasivo: ya que se recombinan con los portadores de carga de signo opuesto, teniendo en cuenta que estos últimos están libres de moverse o se encuentran en la vecindad y por lo tanto son elevados a un estado excitado mediante una transición permitida.

Para explicar la simplificación del proceso, la mayoría de los autores (como Horowitz, 1984) considera trampas para electrones y centros de recombinación para agujeros, sin embargo, debe tenerse en cuenta que, existe la misma probabilidad de que ocurra el proceso simétrico; es decir, que los agujeros sean liberados de sus trampas y se recombinen con los electrones en los centros de recombinación.

Así, asumiendo trampas para los electrones y centros de recombinación para agujeros, y suponiendo que a una temperatura constante (T) se tienen n electrones excitados, existen dos mecanismos principales de transición radiactiva posibles, uno de cinética de primer orden y otro de cinética de segundo orden.

### **MATERIALES TERMOLUMINISCENTES.**

Los principales materiales TL existentes pueden dividirse en dos grupos principales: los materiales de número atómico efectivo bajo ( $7 < Z_{ef} < 8$ ) y con respuesta prácticamente independiente de la energía, pero que tienen baja sensibilidad a la radiación, tales como el  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , LiF, BeO, etc.

El otro grupo que poseen una muy alta sensibilidad con un número atómico efectivo alto ( $15 < Z_{ef} < 18$ ) y respuesta dependiente de la energía a bajo nivel de energía ( $E < 150$  keV), tales como el  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaSO}_4$ , etc.

Los materiales más utilizados para dosimetría son los compuestos inorgánicos preparados sintéticamente, a los que se les han incorporado impurezas en forma artificial para que actúen como activadores.

Dentro de los compuestos que son los más importantes para las aplicaciones dosimétricas se encuentran los siguientes: Fluoruro de litio (LiF) activado con Mg, Ti o con Mg, P. Fluoruro de calcio ( $\text{CaF}_2$ ) natural o activado con tierras raras. Sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) activado con tierras raras. Sulfato de bario ( $\text{BaSO}_4$ ) activado con tierras raras. óxido de aluminio ( $\text{CaSO}_4$ ) activado con carbono y el óxido de berilio (BeO). Estos materiales se pueden usar en forma de cristales o en polvo.

En el ININ se han efectuado estudios acerca de la Termoluminiscencia de minerales mexicanos (Azorín 1982). Así mismo, se han llevado a cabo investigaciones sobre el desarrollo de materiales termoluminiscentes sintetizados en el laboratorio, las cuales han conducido al desarrollo de Dosímetros Termoluminiscentes de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , o Tm para vigilancia radiológica ambiental (Azorín J. Gutiérrez A. 1986) y para dosimetría personal (Azorín J., Gutiérrez A. 1984, 1987).

Como durante el desarrollo de este trabajo se utilizaron dosímetros de sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ ), el interés se centrará en describir dicho material en particular y como objeto principal de estudio.

### ***Sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ):Dy.***

El  $\text{CaSO}_4$  es uno de los materiales TL más sensibles que existen. Este material fue el primero que se usó para medir radiación ionizante (Wiedemann and Schmidt, 1895).

El primer  $\text{CaSO}_4$  sintético estuvo activado con Mn (Palmer, et al, 1965); el cual, no obstante que tiene una sensibilidad muy alta, presenta un solo pico en su curva TL a muy baja temperatura, por lo cual muestra un desvanecimiento excesivo (60 % en las primeras 10 h y entre 40 y 85% en los primeros tres días después de la exposición).

Otro tipo de  $\text{CaSO}_4$  TL es aquel activado con Sm, el cual es alrededor de 2.5 veces más sensible que el  $\text{CaSO}_4:\text{Mn}$ , su curva TL presenta un pico a 473 °K y su espectro de emisión un máximo de 600 nm. Este material tiene un desvanecimiento bajo a temperatura ambiente, pero es muy sensible a la luz.

Los últimos materiales TL en la serie del  $\text{CaSO}_4$ , y los más interesantes debido a que tienen una respuesta mucho más estable que los anteriores son el  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$  y el  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ .

El primer método para preparar estos materiales fue propuesto por Yamashita (Yamashita, et al, 1971) y consiste en lo siguiente:

Los activadores en la forma  $Dy_2O_3$  y  $Tm_2O_3$  se disuelven en  $H_2SO_4$  concentrado. Esta solución se calienta a 523 °K y se agrega el  $CaSO_4$ , evaporando a 573 °K hasta obtener los cristales de  $CaSO_4$ . Los cristales obtenidos se pulverizan y tamizan, entre 75 y 200  $\mu m$ . Finalmente, el polvo microcristalino se calienta a 1023 °K durante 2 h en un crisol de óxido de aluminio, seguido por un tratamiento térmico final a 673 °K durante 15 min.

El método desarrollado dentro de los laboratorios del ININ (Azorín et al, 1980; 1984 a; Azorín and Gutierrez, 1989) para crecer cristales de  $CaSO_4$  es el más efectivo para producir el material TL en polvo y es el resultado de una gran cantidad de experimentos para determinar las condiciones óptimas de crecimiento para producir cristales de  $CaSO_4$  sin ningún activador.

La preparación que ellos efectúan se realiza de la siguiente forma: se disuelven 20 g de  $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$  en 225  $cm^3$  de  $H_2SO_4$  concentrado, añadiendo los activadores en la concentración deseada.

Todos los reactivos se mezclan en forma homogénea y se colocan en un sistema sellado para evaporar a 553 °K durante 12 h arrastrando con ello el ácido evaporado mediante un flujo de aire conectado al sistema.

El vapor del ácido, después de ser condensado, es atrapado en una solución de NaOH. La cristalización se controla variando tanto la temperatura como el flujo de aire.

Una vez concluida la evaporación, se obtienen cristales cuyas dimensiones dependen tanto de los reactivos iniciales como del tipo y concentración de los activadores.

Los cristales así obtenidos, se lavan varias veces para quitarles el ácido remanente y se colocan en un crisol de Pt para someterlos a un tratamiento térmico a 973 °K durante 1 hr. Finalmente, el producto se pulveriza y se selecciona polvo con tamaño de grano entre 80 y 200  $\mu m$ .

El rectivo inicial con el que se crecen cristales de mayores dimensiones es el  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ya que a partir de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$  o  $\text{CaSO}_4$  se obtienen cristales más pequeños. Sin embargo, si se agrega  $\text{H}_2\text{NO}_3$  concentrado a la mezcla inicial, es posible obtener cristales más grandes.

Las pastillas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + PTFE se preparan de la misma manera que las pastillas de LiF. Es decir el material TL en polvo se mezcla con resina de politetrafluoroetileno (PTFE) en polvo, en una proporción de 2:1, y se coloca una muestra de esta mezcla en un dado de acero inoxidable, aplicando una presión de aproximadamente 1 GPa a temperatura ambiente.

Las pastillas así obtenidas se sinterizan por más de 5 hr en atmósfera inerte, a una temperatura ligeramente inferior a la temperatura de fusión del PTFE.

### ***III.5 Seguridad Radiológica.***

El objetivo de la Protección Radiológica es capacitar a la sociedad para derivar los beneficios de la aplicación de las radiaciones ionizantes o de los procesos acompañados por la emisión de tales radiaciones reduciendo al mínimo el riesgo y los efectos nocivos para la salud de los individuos, sus descendientes, la población en general y el medio ambiente.

Por lo tanto la Protección Radiológica debe considerar tres aspectos principales que son: la protección al personal ocupacionalmente expuesto; la protección del público en general y la protección del medio ambiente.

Dentro de un análisis de riesgo en seguridad radiológica tenemos que, un riesgo a la salud es la probabilidad de daño, la enfermedad o la muerte como resultado de una actividad profesional. La estimación del riesgo esta relacionada con los propósitos individuales, su probabilidad y severidad.

La evaluación de un riesgo pretende proporcionar una relación cuantitativa entre la dosis de radiación recibida y la probabilidad o posibilidad de los efectos de la radiación.

Las posibilidades son utilizadas para desarrollar y modificar los estándares de exposición a la radiación, que basados en información disponible, plantean un pequeño riesgo comparado con los beneficios obtenidos. La estimación del riesgo es función de la extrapolación del riesgo, dependiendo de la magnitud de este y de la razón de dosis, y es simulado por medio de modelos matemáticos.

La mayor parte de los riesgos estimados publicados se basan en modelos lineales que suponen una sobre-estimación del riesgo y, por lo tanto, proporcionan un límite superior a los riesgos actuales.

Por ejemplo, es difícil diferenciar entre un cáncer inducido por radiación de uno inducido por otros factores. A continuación se muestran algunos ejemplos de un órgano y el límite del riesgo que este puede soportar:

- Riesgo de Inducción de Cáncer Fatal

Cáncer (órgano)	Riesgo
Hueso	0.5 mSv <sup>-1</sup>
Pulmones	2.0 mSv <sup>-1</sup>
Tiroides	0.5 mSv <sup>-1</sup>
Pecho	2.5 mSv <sup>-1</sup>
Cuerpo entero	10.0 mSv <sup>-1</sup>

Así por ejemplo, el órgano con mayor riesgo a la exposición a la radiación del Ra o de sus descendientes es el pulmón, claro, siempre que estos se hallen localizados en dicho órgano.



## **CAPITULO IV. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE MUESTREO EN CASAS HABITACIÓN EN EL POBLADO DE SAN RAFAEL, ESTADO DE MÉXICO.**

### ***IV.1. Descripción General del área de San Rafael, Estado de México.***

El poblado de San Rafael, se encuentra ubicado en la parte Oriente del Estado de México, dentro del municipio de Tlalmanalco, aproximadamente a 50 Km. del centro de la Capital del País. El poblado fué fundado hace alrededor de 100 años, inicialmente debido al establecimiento de la fábrica de papel, San Rafael, creandose la infraestructura para el desarrollo urbano.

Debido a esto el desarrollo urbano se llevo a base de seis tipos diferentes de construcciones, con alrededor de un total 700 casas habitación construidas por la compañía papelera, siendo la parte central del desarrollo las instalaciones de la planta papelera con varias hectáreas; son tres de estos desarrollos los que cuentan con el mayor número de casas habitación; uno con cerca de 300 casas, otro con cerca de 50 casas; esto a su vez sirve de alguna manera para dividir al poblado en dos principales secciones.

La siguiente sección del pueblo comprende un área principal de alrededor de 200 casas construidas de un solo tipo y otras dos secciones mas de alrededor de 50 casas habitación cada una

A lo largo de los últimos 25 o 30 años se han construido en forma irregular algunas casas habitación más, tal vez 300 o mas, pero estas en forma particular y no como zonas habitacionales bien establecidas.

Hoy en día y según el último censo de Población y Vivienda (INEGI 1990) el poblado de San Rafael cuenta con alrededor de 30000 o 35000 habitantes.

Su situación económica hoy en día ya no depende de la Compañía Papelera tanto como en el pasado, y mucha gente sale a trabajar y estudiar también a los alrededores, en su mayoría a la Zona Metropolitana del D.F.

San Rafael se encuentra ubicado en medio de una zona montañosa, para ser más precisos se encuentra muy cercano de las faldas del volcán Iztaccíhuatl, dentro de la Sierra Nevada.

#### ***IV.2. Ubicación Geográfica.***

El poblado de San Rafael se encuentra a una distancia aproximada de 54.8 Km. del D.F. y a una altura de 2 537 msnm en su parte central. Se encuentra ubicado dentro del sistema orográfico conocido como Sierra Nevada, el cual a su vez se encuentra en la parte oriental de la cuenca conocida como Valle de México y marca el límite occidental del estado de Puebla y la línea limitrofe con los estados de México y Morelos.

Dicho sistema orográfico es de extensión relativamente corta, encontrándose entre los paralelos 18° 50' y 19°57' de latitud norte y los meridianos 98°30' y 98° 45' de longitud W de Greenwich.

Tiene una dirección de nor-noroeste a sur-sureste, encontrándose entre los elementos principales que la constituyen, de norte a sur, por sus dimensiones y altura: los cerros Tlaloc, Telapón, Papayo, el Ventorrillo y, principalmente las grandes elevaciones de cimas nevadas del Iztaccíhuatl y el Popocatepetl, las cuales se unen por intermedio del Llano de Pelagallinas y los cerros de las Minas y Venacho.

El Iztaccíhuatl es la montaña que ocupa el tercer lugar del país en altitud, pues tiene 5 280 msnm en su parte más alta. Se localiza a 64 Km. al SE de la Ciudad de México y tiene una longitud aproximada de 15 Km.

La Unidad de Explotación Forestal de San Rafael, se localiza parcialmente en el área montañosa de la falda occidental del Iztaccíhuatl, y es la que posee extensos bosques, que en el pasado se explotaban, pero en la actualidad ya no. Limita con el Parque Nacional Izta-Popo, que se inicia a una altitud de 3600 msnm. (figura 12).



### **IV.3. Geología y Topografía de la zona.**

El Iztaccihuatl se considera un conjunto de volcanes apagados y de mayor antigüedad que el Popocatepetl; su origen se remonta al Mioceno y está formado por una gruesa capa de Andesita de hornblenda e hiperstena, sobre un núcleo de dacita (Tamayo 1962).

De acuerdo a la carta Edafológica (SPP, 1979) el tipo de suelo de la región del poblado de San Rafael es en su fase física predominantemente gravoso y según la carta su descripción es la siguiente: Jd + Bh / 1.

- Jd: Fluvisol Dístico: son suelos que se encuentran cerca de la sierra y que resultan del escurrimiento de la sierra a los llanos, por lo cual se depositan arenas o arcillas en estos.
- Bh: Cambisol Húmico: Del latín Humus tierra; suelo caracterizado por tener en la superficie una capa de color oscuro o negro que es rico en materia orgánica, muy ácida y pobre en nutrientes.
- 1: corresponde a la clase textural del suelo, que en este caso es gruesa. En general el suelo de esta zona es gravoso en su drenaje interno; posee los siguientes cationes intercambiables: Na: 1.8 (Meq / 100g); K: 0.8 (Meq / 100g); Ca 17.5 (Meq / 100g); Mg: 11.6 (Meq / 100g);
- P: 24.1 ppm.

Según la carta Geológica (SPP 1979), la región del poblado y sus alrededores tienen un tipo de suelo denominado aluvión.

En la zona montañosa posee rocas sedimentarias, con una brecha sedimentaria que es roca clástica de grano grueso; se observan lentes arenosos y pequeñas capas arenosas. Su edad proviene del Terciario superior, el área tiene una altura (según curvas de nivel de entre 2500 y 2700 msnm).

Las principales elevaciones de la Sierra Nevada, incluyendo el Iztaccihuatl, se formaron sobre todo en el Plioceno y cubrieron bajo sus lavas andesíticas, complejos volcánicos más antiguos, del Oligoceno-Mioceno.

Según el autor T. Paredes en su estudio "Circulación de las aguas subterráneas en la falda occidental del Iztaccihuatl" (1925), los tipos de rocas que forman esta montaña están constituidos por andesitas de hornblenda, andesitas de hiperstena, basaltos andesíticos o transicionales, conglomerados, brechas y arenas volcánicas.

En la población de San Rafael, las formaciones pleistocenas cubren a la Formación Tarango del Plioceno Superior y a las rocas volcánicas Iztaccihuatl y Xochitepec, subyacentes.

En dicho poblado y debido a la fuerte erosión, subsisten elementos reducidos del abanico aluvial reciente, pero más al norte se encuentran casi intactos a una altura cercana a los 2600 msnm.

Los mencionados abanicos aluviales representan la Formación Tarango, que consisten de material andesítico y traquítico, formando de esta manera conglomerados, gravas, arenas y paleosoles, todos derivados de la destrucción por erosión, tanto del complejo volcánico del Terciario medio como de los volcanes del Terciario superior al que corresponde la Formación Tarango.

El lado Oeste del Iztaccihuatl estuvo glaciado en el Pleistoceno superior de cuatro a seis veces, y si los sedimentos que se han encontrado son de origen glacial, esto supone que la subetapa más temprana cubrió casi toda la montaña, bajando a 2450 msnm en algunas localidades y hasta la orilla de la parte central plana de la cuenca.

En cuanto a la Topografía de la zona, la vertiente occidental del Iztaccihuatl es en extremo accidentada; en dicha vertiente se presentan muy variadas inclinaciones del terreno, sin embargo se considera que la inclinación media es de 25 a 35 grados.

Entre las barrancas más importantes que se encuentran en dicha vertiente occidental se encuentran las de El Negro, Trancas, Toncoxco, Cosamala, Nespayantla, etc; en donde se localizan algunas de las masas puras de Oyamel (Abies) de mayor importancia dentro de la Unidad de Explotación Forestal, San Rafael.

#### **IV.4. Clima.**

En el transcurso del año se manifiesta una marcada oscilación media mensual en San Rafael, donde varía de 9.2 a 14.1° C. Las temperaturas más bajas del año se registran en diciembre y enero con valores de 6.0 a 9.6 °C y las mínimas extremas con valores de -5.5 a -11 °C con una media de -0.4 a 7.1 °C.

Las temperaturas más altas se presentan en abril y mayo, con variaciones de 8.1 a 14.1 °C. Las temperaturas máximas extremas que se presentan varían desde 20.5 a 32.6 °C y se presentan en diferentes meses del año.

Es interesante hacer notar, que después de que se registran las temperaturas medias mensuales más altas a partir del mes de mayo, hay un descenso de estas en el mes de julio y un nuevo aumento en agosto, esto debido posiblemente a una ligera disminución en la precipitación, y a partir del mismo mes de agosto comienzan nuevamente a ascender.

Aunque no se observa una variación regular en las oscilaciones de temperatura, las mínimas variaciones de 8.3 a 13.7 °C se presentan de julio a septiembre, tal vez debido a la mayor humedad proveniente de las precipitaciones, y las mayores oscilaciones, de 12.9 a 19.4 °C se registran de diciembre a marzo.

También en San Rafael se presenta una época de sequía que corresponde a los meses en los que llueve menos, que son de diciembre a marzo; el mes con mayor precipitación es julio.

La precipitación total anual es en general alta, con cerca de 980 mm de lluvia. El número de días con lluvia apreciable (más de 1 mm) es cercano a los 127. Los meses con mayor número de días con lluvia apreciable son junio, julio y agosto.

San Rafael tiene también cerca de 165 días despejados y cerca de 160 días nublados pero, en este punto cabe hacer notar que estos valores son función de la altitud de la zona y del factor fisiográfico. Otro factor muy relacionado con la altitud son las heladas cerca de 80 días en San Rafael y otro son las nevadas aunque este factor es prácticamente despreciable en el poblado debido a su escasa frecuencia (dos en los últimos 30 años).

Un factor mas a considerar son las tormentas eléctricas que en San Rafael son cerca de 70 dias al año (Anaya, Ana L.; Méx. 1980) .

#### ***IV.5. Descripción del área urbana.***

El área urbana de San Rafael se encuentra distribuida a lo largo de 4 Km. aproximadamente y a lo ancho ocupa un área cercana a los 2 Km. Puede decirse que el poblado esta orientado en el eje oriente/poniente en su parte principal. Así, San Rafael tiene la característica de ser cruzado de poniente a oriente en su mayor parte por la carretera estatal Tlalmanalco \ San Rafael, cuya distancia en este trayecto comprende 6 Km. Es por esta razón el que el poblado se encuentre ubicado a lo largo del último tramo de esta via , en un trayecto que abarca aproximadamente 1.5 Km. de la misma.

Fuera de esta vía principal, se encuentran áreas urbanizadas con no mas de cinco o seis cuadras en su parte principal y es por ello, que no es muy grande a lo ancho, es decir de norte a sur.

La urbanización del poblado se comenzó como se mencionó a mediados de siglo, cuando la papelera ubicada en esta zona comenzó a construir casas habitación para sus trabajadores. Así es como existen tres principales zonas habitacionales ubicadas en la parte baja del poblado (al poniente de la Compañía papelera) y otras dos zonas con una cantidad menor de casas habitación (ubicadas al poniente). también ubicadas en su parte alta. Pero a lo largo de las últimas dos décadas (70's y 80's) el poblado ha sido urbanizado por casas particulares y no por pequeñas zonas habitacionales o unidades habitacionales grandes.

De hecho en el poblado no existe hoy en día una zona habitacional con grandes edificios ni tampoco existe una unidad habitacional del INFONAVIT por ejemplo. La urbanización ha sido paulatina y cada familia ha desarrollado la arquitectura de su propiedad de acuerdo a sus intereses y gustos propios.



Debido a esto, ha sido necesario, que las autoridades municipales vayan proporcionando los servicios urbanos a la gente conforme los van requiriendo y solicitando. Por lo tanto San Rafael era un lugar hasta hace unos 15 años, el cual se podía observar una urbanización regular, con buena planeación, pero hoy en día se pueden observar los asentamientos humanos en cerros y a los que difícilmente se les pueden proporcionar todos los servicios.

#### ***IV.6 Localización de los puntos de muestreo.***

En el siguiente mapa pueden observarse los 10 puntos en los cuales se realizó el monitoreo. La distribución de los mismos se efectuó de la forma más homogénea, para que los puntos abarcaran la mayor área posible de la zona urbana de San Rafael, para así tener un muestreo general de todo el poblado.

#### ***IV.7. Descripción de la forma de muestreo.***

El monitoreo fue realizado durante seis meses, como se trataba de que el estudio se hiciera de la forma más representativa y confiable, se siguió un formato que mes con mes se realizaba de la misma manera, y que consistía en lo siguiente:

1. En cada casa habitación se colocaron dos portadosímetros, uno en interior y otro en exterior, cada uno de los cuales tenía siempre dos pastillas por duplicado para tener resultados más confiables.
2. Los dosímetros en el interior de las casas se colocaron a una altura que varió entre 1.5 m y 1.8 m, dependiendo esto de la casa en la cual eran colocados, ya fuera por la distribución de los muebles y/o por que se trataba de que el dosímetro quedara bien seguro (por ejemplo, fuera del alcance de los niños)

3. A su vez los dosímetros colocados en el exterior de las casas se colocaban en un lugar en el que no recibieran los rayos solares en forma continua pero que tampoco estuvieran en la sombra permanentemente; es decir se trataba de que estuvieran al aire libre para ello se colocaron a una altura que variaba entre 1.5 m y 2.0 m.

4. Desde un principio se seleccionó el lugar que pareció mas indicado, cumpliendo las anteriores características, para que este sitio permaneciera sin cambiarse a lo largo de los seis meses de muestreo.

5. En interiores se colocó cada portadosímetro en una de las paredes de la estancia o sala de cada casa; asegurandolo con cinta adhesiva; a su vez a los dosímetros colocados en el exterior de la casa se les ponía un pequeño tramo de hilo de algodón y se colgaban tambien de un punto cerciorandose de que quedaran bien asegurados.

6. En cuanto se llegaba el día para cambiar los dosímetros de cada casa se llevaba ya preparado el nuevo portadosímetro y así se retiraba el anterior dejando en su lugar el nuevo portadosímetro para el siguiente período a muestrear.

7. En suma se tuvieron dos lecturas, tanto dentro como fuera de cada casa, es decir cuatro lecturas cada mes y esto multiplicado por seis meses son veinticuatro lecturas en total por casa, y tomando en cuenta que fueron diez casas monitoreadas se tuvo un total de 240 lecturas.

De estas se tomó un promedio para cada casa, ya que como se mencionó anteriormente se tuvieron lecturas por duplicado en cada portadosímetro y de cada uno de estos se tomó el promedio de dos dosímetros. Es decir al final se tuvieron 120 lecturas promedio.



## **CAPÍTULO V. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE LECTURA DE DOSÍMETROS TERMOLUMINISCENTES.**

### ***V.1. Preparado de Dosímetros a utilizar para el muestreo.***

Inicialmente es importante señalar las características que tiene el lote de dosímetros propiedad del ININ y que, en calidad de préstamo para realizar dicho estudio se me proporcionó. Dicho lote consta de 120 dosímetros en forma de pastilla de alrededor de 1.5 cm. de diámetro. El material del cual están contruidos los dosímetros es  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + PTFE (politetrafluoretileno). Dicho lote tiene una fecha de elaboración del 18 de noviembre de 1992. Todas las pastillas tienen un peso que varía entre los 28 mg. como mínimo hasta los 35.5 mg. como máximo teniendo la mayoría, un peso cercano a los 32 mg. y 33 mg. El peso promedio de cada una de las pastillas que conforman dicho lote es de: 33.15 mg.

Dentro de la preparación de los dosímetros a utilizar para el muestreo, pueden identificarse las siguientes etapas:

1. Inicialmente es necesario identificar cada una de las pastillas con que cuenta el lote y es indispensable pesarlás una por una para saber el peso de cada una de las 120 pastillas.

Lo anterior es con el fin de que al conocer el peso de cada pastilla y conociendo la cantidad de radiación absorbida en nC (INTENSIDAD TL) se puede conocer entonces la cantidad de UNIDADES DE EXPOSICIÓN en Roentgen (mR) recibidos por cada una de las pastillas.

2. Una vez que se tienen identificados cada uno de los dosímetros se escogen 40 pastillas con el siguiente criterio: ya que el monitoreo es en 10 casas habitación y como en cada casa se coloca un portadosímetro en el interior y otro portadosímetro en el exterior esto da un total de 20 portadosímetros. Y como en cada portadosímetro se colocaron dos dosímetros (pastillas) esto nos da un total de 40 dosímetros a preparar por cada vez que se va a monitorear, cada 30 días.

Para seleccionar los 40 dosímetros a utilizar se sigue el siguiente criterio: se seleccionan las 40 pastillas de manera que su peso varíe lo menos posible, así, fueron seleccionados procurando que la diferencia en el peso no fuera mayor a 2.0 mg. Lo anterior con el propósito de tener uniformidad en el peso ya que las UNIDADES DE EXPOSICIÓN dependen del peso y de la energía (C/Kg.).

3. Una vez seleccionados los 40 dosímetros a utilizar el siguiente paso es proceder a realizar el "borrado" de los mismos. Esto se hace calentándolos en la mufla a una temperatura de 300 °C para que con ello puedan ser usados nuevamente en el monitoreo.

En esta etapa lo que se hace es lo siguiente:

- se colocan los dosímetros en una caja petri uno por uno y conservando siempre el orden para no perder la colocación y con ello la clasificación para siempre tener bien identificados cada uno de los dosímetros por su peso.
- se procede a encender la mufla (o antes para ganar tiempo ya que tarda entre 10 o 15 minutos para alcanzar la temperatura requerida) colocando la perilla de calentamiento en los 300 °C, checando que la mufla este caliente en el termómetro que tiene en la parte posterior de la misma (15 minutos aproximadamente).
- se introduce la caja con los dosímetros, se cierra la mufla y desde ese momento se comienza a contar el tiempo de "borrado" de los dosímetros que es de 30 minutos.
- Una vez transcurrido dicho tiempo, se apaga la mufla y se sacan los dosímetros con la ayuda de unas pinzas metálicas y se coloca la caja con los dosímetros en una placa de asbesto y se espera a que se enfrien un tiempo aproximado de 10 o 15 minutos.
- Una vez que los dosímetros están totalmente fríos se procede a colocarlos (por parejas) en los portadosímetros que se pondrán en las diez casas habitación a monitorear.

4. Los portadosímetros deberán de estar limpios, estar en buen estado (sin roturas ni rajaduras) y además deberán de tener un empaque de hule que les ayuda a tener un mejor sellado y con ello asegurar los dosímetros en su interior.

Cada portadosímetro se etiqueta con un número del 1 al 20 para su control, y se procede a colocar por parejas los dosímetros en los 20 portadosímetros. Posteriormente se sella cada portadosímetro con cinta adhesiva asegurándose de que queden bien cerrados, para evitar la pérdida de alguna de las 40 pastillas.

5. Con esto se concluye la fase de preparación de los dosímetros a usar para el monitoreo mensual y solo falta transportarlos al sitio a monitorear. Esto se hace envolviendo los dosímetros en papel aluminio para de alguna manera evitar que la radiactividad de fondo contribuya durante el traslado y la colocación de los mismos.

### ***V.2. Calibración de dosímetros (por lote).***

La calibración de dosímetros por lote se lleva a cabo irradiando los dosímetros seleccionados a una dosis determinada y conocida. Para la realización de dicho estudio, se irradió este lote de dosímetros primero en el INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES ININ (Salazar, Méx.) con una fuente de  $^{137}\text{Cs}$  (irradiador de rayos  $\gamma$ ) en un rango de 5 mR a 500 mR; después una segunda ocasión se irradiaron en la COMISIÓN DE SEGURIDAD NUCLEAR Y SALVAGUARDIAS (Méx. D.F.) con una fuente de  $^{137}\text{Cs}$  (irradiador de rayos gamma) en un rango de 1000 mR a 10000 mR.

### ***V.3. Técnica de lectura de los Dosímetros.***

Una vez que se han expuesto los dosímetros en cada uno de los puntos a muestrear, o bien durante la calibración se procede a recogerlos y llevarlos al laboratorio de Dosimetría TL del ININ, para ahí tomar la lectura de la dosis que cada dosímetro recibió durante el periodo en que estuvo expuesto, procediendo de la siguiente manera:

- Primero se toman 10 o 12 lecturas de fondo en el lector "Harshaw 4000 TLD", esto para lograr estabilizar el equipo.

- Después se abre el compartimiento que tiene el lector "Harshaw" y se coloca cada uno los dosímetros en la placa o plancheta tratando de que el dosímetro quede lo mas centrado posible para evitar posibles errores (despreciables) en la medición de la dosis que nos proporciona el equipo. Después se cierra el compartimiento y se procede al siguiente paso.
- A continuación se procede a tomar la lectura, para ello se oprime el botón del equipo que indica "Leer (READ)", habiendo previamente seleccionado los parámetros como el tiempo de precalentamiento del equipo que va desde 30 °C hasta 100 °C y el tiempo de calentamiento del equipo que va de los 100 °C a los 300 °C en un tiempo de 3 o 4 minutos aproximadamente.
- Después de esto, y una vez que el equipo ha comenzado a enfriarse, es cuando en la pantalla del "Harshaw" aparece la lectura de la dosis correspondiente a ese dosímetro en (nC) y es cuando se registra dicho valor en un cuaderno de notas.
- Finalmente se espera a que el equipo se enfríe gradualmente (de 3 a 4 minutos) hasta llegar nuevamente a los 30 °C, repitiendo los pasos anteriores para cada uno de los 40 dosímetros expuestos mes por mes.

#### ***V.4. Descripción general del aparato lector de Dosímetros "HARSHAW 4000 TLD SYSTEM".***

El Harshaw/Filtrol (TLD System 4000 ) es un sistema de Dosimetría Termoluminiscente de precisión, basado en un microprocesador de operación manual. Se usa para evaluar material TL (Termoluminiscente) en forma de polvo, pastilla o tarjeta.

El sistema 4000 posee un controlador de precisión de la temperatura que asegura un alto grado de exactitud y reproducibilidad. El tiempo de lectura se opera por medio del controlador y va de 10 a 300 segundos.

Rapidez, precisión, rampa de calentamiento en forma lineal a un máximo de 400 °C en el graficador, 300 °C en la tarjeta del graficador, todo esto es proporcionado por un elemento de calentamiento de platino, equipado con un termopar blindado. El Software del sistema, incorpora un procedimiento de calibración y retiene múltiples factores de conversión para asegurar consistencia y seguridad en la conversión de lo que se cargó, hasta lo que se muestra en la computadora. Se asegura una excelente exposición, baja a la sensibilidad y extensión del tiempo de vida de la plancheta de calentamiento cuando se suministra el gas nitrógeno a la plancheta.

Todas las selecciones del operador y la presentación de las gráficas de perfil TL son mostradas en el panel de cristal de la pantalla.

Los instrumentos de encendido, operación y funciones de mantenimiento son fáciles de operar, así como también las opciones del menú. La pantalla incluye una luz de soporte para diferentes condiciones de luz ambiental.

Una fuente luminosa de referencia estable, consistente de Carbono 14 activado con  $\text{CaF}_2$  (Eu), esta localizada en el dibujador de muestra. Esta puede ser usada para problemas de disparo y la verificación de instrumentos, su calibración y estabilidad.

El sistema 4000 posee dos modos de operación, uno para búsqueda y otro para reproducción. En el modo de búsqueda, la configuración y dibujo de las gráficas y los campos del ROI (Región de Interés) están disponibles para su evaluación. En el modo de reproducción, solo lo que se ha introducido en la computadora es mostrado.

Dos tipos de graficadores estan disponibles. El dibujador acepta material TL en cualquiera de las tres presentaciones, en forma de pastilla, polvo o vara. La tarjeta de dibujo acepta tarjetas del Harshaw 2200 Series TL con dos o cuatro elementos por tarjeta.

Otra opción que está disponible con el dibujador de tarjeta es una tarjeta de identificación automática de lectura de estación, disponible para Código Binario Decimal (BCD) o identificación de Código de Barras (CODABAR), o ambos.



La tarjeta de identificación es automáticamente registrada cuando el dibujador es movido de la posición de luz de referencia pasando la estación ID. Varias opciones más pueden ser adicionadas al Sistema 4000 básico para brindar mayor flexibilidad o satisfacer requerimientos únicos. Otra opción más es una impresora alfa numérica de 20 columnas la cual puede ser instalada para proveer una medición de los parámetros y resultados y de lo que se imprima.

Una señal de salida analógica esta provista para manejar listas externas de datos grabados, produciendo una permanente grabación de la curva de luminiscencia y Perfiles de Tiempo/Temperatura (TTP). Un puerto serial configurado por la EIA (Asociación de Industrias Electrónicas) con una interfase RS 232C que esta previsto para pasar datos a una computadora externa.

Varios paquetes de Software compatibles con la computadora personal IBM modelo PC/AT están disponibles para la Harshaw/Filtrol para poder manejar la base de datos, análisis de extensión, deconvolución computarizada de la curva de luminiscencia, y mantenimiento de instrumentos.

#### CARACTERISTICAS GENERALES DEL HARSHAWFILTR0L 4000 TLD SYSTEM.

Año de elaboración: 1988

Modelo: 4 000 TLD Reader

##### Perfil de Tiempo/temperatura (TTP):

Temperatura (°C).

Tiempo (segundos).

Pre calentamiento: 100

Pre calentamiento: 1

Velocidad: 10 °C/s

Adquisición: 30

Temperatura máxima: 300 °C

Anneal: 0

Temp. mínima (anneal): 0 °C

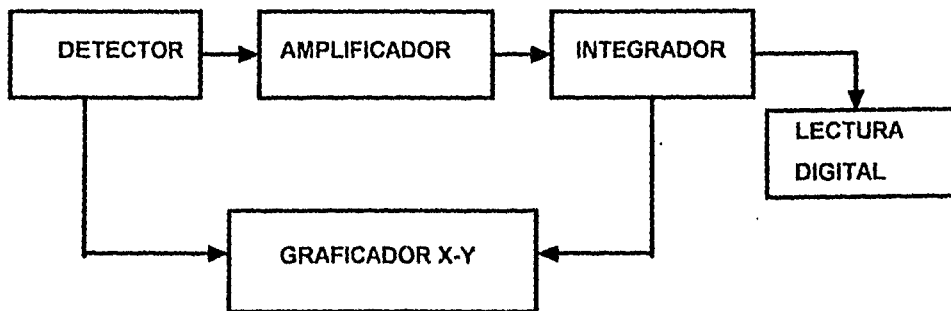
Voltaje máximo de trabajo: 617 volt.

Flujo de nitrógeno (gas): 4 (Ft<sup>2</sup>) / (hr) (std)

Trabaja bajo una atmósfera inerte de gas Nitrógeno.

En la figura 14 se muestra en un diagrama de bloques del aparato lector con la instrumentación necesaria para la lectura de los Dosímetros Termoluminiscentes, un sistema que mide la luz emitida y la transforma en una señal fácilmente integrable.

Figura 14. Diagrama de bloques del aparato lector.



## CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### ***VI.1. Presentación de Resultados (Tablas y Gráficas).***

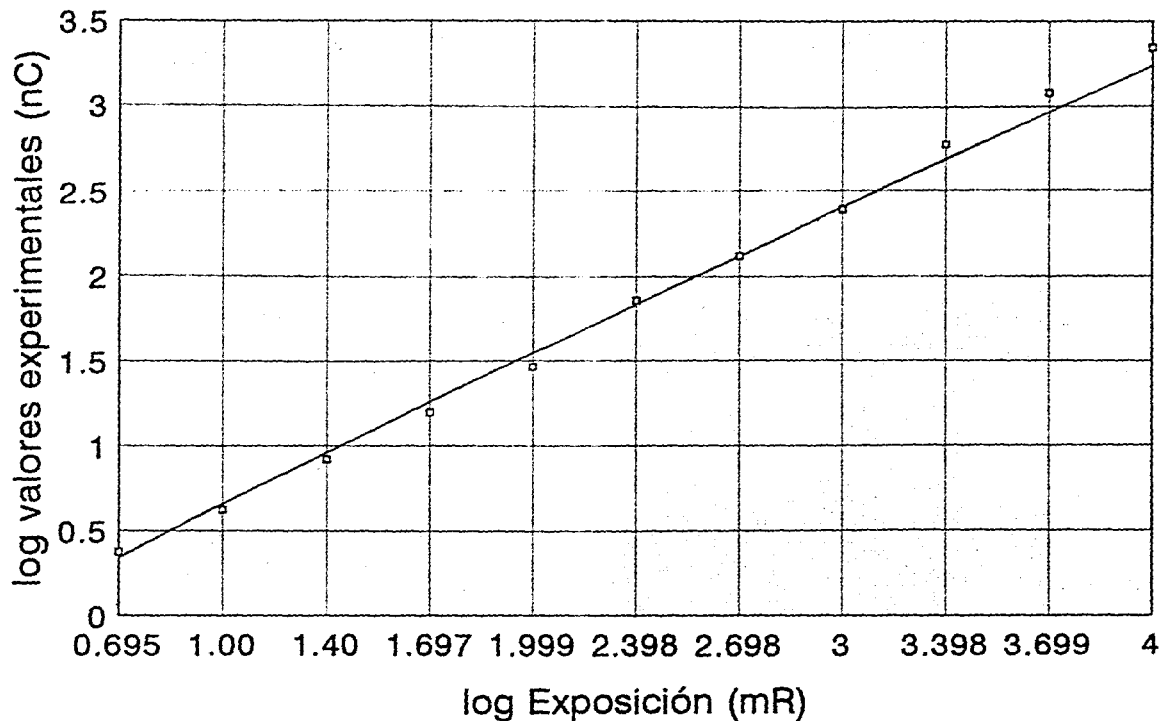
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos incluyendo tablas y gráficas, así como también se explicará como se obtuvieron. En primer lugar en la gráfica No. 6.1 se presenta la curva de calibración para el lote usado que se obtiene graficando las lecturas experimentales obtenidas en nC contra la exposición calculada en mR. Dicha curva de calibración se llevo a cabo irradiando el lote de dosímetros con los que se trabajó en una fuente de  $^{137}\text{Cs}$  (irradiador de rayos  $\gamma$ ) propiedad del ININ; se irradiaron en un intervalo de dosis de 5 mR a 500 mR. Cabe señalar que el intervalo que es de interés para este trabajo se encuentra a dosis bajas que van desde los 5 a los 20 mR aproximadamente. Cabe señalar que a dosis más bajas el intervalo de incertidumbre aumenta y para dosis altas el intervalo de incertidumbre disminuye ya que el ajuste de la curva es mejor en las zonas de dosis altas.

En esta primera parte se presentan los resultados de las mediciones en Unidades de Exposición (mR) en forma de tablas. Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, las mediciones fueron en total 120, de las cuales corresponden 12 lecturas a cada casa ya que fueron seis meses de monitoreo, que corresponden a 6 en interiores y 6 a exteriores, y todo esto realizado en 10 casas habitación.

En la tabla 6.1 se presentan los resultados de las mediciones realizadas en los interiores de las 10 casas habitación. Cabe señalar que se monitoreo un total de 180 días, pero para tener un estándar de acuerdo a monitoreos realizados en otros trabajos similares se obtuvo un promedio a 31 días. En la tabla se muestran los resultados obtenidos mes por mes y casa por casa.

# Fig. 6.1 CURVA DE CALIBRACION CaSO<sub>4</sub>:Dy+PTFE

PARA DOSIS BAJAS (5 a 1000 mR)



79

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Dosimetría en casas habitación (en San Rafael, Méx.).

Irradiada el 19/marzo/93, en el ININ

TABLA 6.1. RESULTADOS DE LOS SEIS PERÍODOS DE EXPOSICIÓN (en mR) EN CASAS HABITACIÓN (INTERIORES).

CASA N°	MESES						DOSIS TOTAL 180d	PROM 1 diario	PROM2 a 31 d
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR			
1	6.749	7.104	6.722	6.886	9.433	5.964	42.858	0.238	7.378
2	6.559	11.956	7.653	5.294	8.153	6.831	47.446	0.263	8.170
3	6.957	7.186	6.886	6.858	8.095	7.241	43.223	0.240	7.440
4	5.749	5.937	5.937	6.072	8.344	7.104	39.143	0.217	6.740
5	6.537	5.642	6.695	6.234	8.594	6.045	39.743	0.221	6.845
6	6.559	6.668	6.261	6.749	9.264	6.045	41.546	0.228	7.150
7	7.460	6.749	7.323	6.153	10.221	5.991	43.897	0.244	7.560
8	5.749	5.991	7.516	6.261	9.826	5.722	41.065	0.225	6.980
9	7.104	5.049	6.559	6.858	8.539	5.856	39.965	0.222	6.880
10	6.831	6.288	6.180	6.396	8.761	5.214	39.670	0.220	6.830
PROM 3	6.625	6.857	6.773	6.376	9.023	6.201	41.856	0.232	7.197

NOTAS:

1. DOSIS TOTAL; corresponde a la dosis total de exposición en (mR) durante los seis periodos de exposición.
2. MESES; durante cada mes de exposición se tomaron dos lecturas interiores, por lo tanto c/u de las dosis que aquí se enlistan es el promedio de dos lecturas / mes.
3. PROM 1; corresponde a la división de la dosis total de cada casa entre 180, tomando en cuenta que fueron 180 días de exposición.
4. PROM 2; corresponde a que se tomo como base como si cada mes tuviera 31 días; entonces dicho promedio corresponde a la multiplicación del PROM 1 por 31.
5. PROM.3; corresponde al promedio mensual para las diez casas.
6. DESVIACIÓN STANDARD; corresponde a la desviación del PROM 2 con respecto al valor de 7.197  

$$\text{Desv. Std.} = \sigma S = \sqrt{\frac{\sum(X-7.197)^2}{n-1}} = \sqrt{(0.003)^2 \div n-1} = \sqrt{9 \cdot 10^{-6} \div 59} = 3.90 \cdot 10^{-4}$$

$$S = \sigma \div \sqrt{n-1} = 3.90 \cdot 10^{-4} / 59 = 6.619 \cdot 10^{-6}$$

TABLA 6.2. RESULTADOS DE LOS SEIS PERÍODOS DE EXPOSICIÓN EN CASAS HABITACIÓN (EXTERIORES).

CASA N°	MESES						DOSIS TOTAL	PROM1 diaria	PROM2 a 31 d
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR			
1	6.018	5.321	8.511	7.378	8.150	6.559	41.937	0.233	7.223
2	6.099	11.242	8.040	7.159	8.706	6.369	47.615	0.264	8.184
3	8.039	6.831	7.791	6.450	8.706	6.369	44.186	0.245	7.595
4	6.804	6.234	7.050	6.153	8.539	6.559	41.339	0.229	7.099
5	5.991	6.396	7.763	7.186	8.985	7.461	43.782	0.243	7.533
6	6.695	6.886	7.159	6.995	8.483	5.991	42.209	0.234	7.254
7	7.461	7.104	7.708	10.702	8.344	5.937	47.256	0.262	8.122
8	10.783	6.968	7.957	6.859	9.517	5.803	47.977	0.266	8.246
9	6.695	6.858	8.789	8.067	9.433	6.045	45.887	0.255	7.905
10	10.958	6.668	7.681	6.505	10.080	5.347	47.239	0.262	8.122
<b>PROM 3</b>	<b>7.563</b>	<b>7.050</b>	<b>7.845</b>	<b>7.345</b>	<b>8.894</b>	<b>6.243</b>	<b>44.934</b>	<b>0.249</b>	<b>7.728</b>

NOTAS:

1. DOSIS TOTAL; corresponde a la dosis total absorbida en (mR) durante los seis períodos de exposición..
2. MESES; durante cada mes de exposición se tomaron dos lecturas tanto en interiores como en exteriores, por lo tanto c/u de las dosis que aquí se enlistan es el promedio de dos lecturas / mes.
3. PROM1; corresponde a la división de la dosis total de cada casa entre 180, tomando en cuenta que fueron 180 días de exposición.
4. PROM 2; corresponde a que se tomo como base como si cada mes tuviera 31 días; entonces dicho promedio corresponde a la multiplicación del PROM 1 por 31.
5. PROM 3; corresponde a la división de la dosis total dividida entre seis (meses de exposición).
6. DESVIACIÓN STANDARD; corresponde a la desviación del PROM 2 con respecto al valor de 7.728

$$\text{Desv. Std.} = S = \frac{\sum(X-7.197)^2}{n-1} = \frac{(0.003)^2}{n-1} = 9 \cdot 10^{-6} / 59 = 3.90 \cdot 10^{-4}, \sigma = s / \sqrt{n-1} = 9 \cdot 10^{-6} / 59 = 5.035 \cdot 10^{-5}$$

De forma similar se elaboró la tabla 6.2 en la que se observan los resultados correspondientes a las mediciones realizadas en los exteriores de las 10 casas habitación.

Se calculó también la media aritmética y la media geométrica (para un promedio de 31 días) en cada una de las tablas de acuerdo a las siguientes fórmulas:

$$\text{Media aritmética: } X = (1/n) (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n)$$

$$\text{Media geométrica: } a = \sqrt[n]{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot \dots \cdot a_n}$$

donde n es el número de muestras en este caso n= 10 (que son los meses de muestreo).

De esta forma los cálculos son:

#### INTERIORES.

$$X = (1/10) (7.378 + 8.17 + 7.44 + 6.074 + 6.845 + 7.15 + 7.56 + 6.98 + 6.83) =$$

$$X = 7.197$$

$$a = 10\sqrt{(7.378 + 8.17 + 7.44 + 6.074 + 6.845 + 7.15 + 7.56 + 6.98 + 6.83)} =$$

$$a = 7.189$$

#### EXTERIORES.

$$X = (1/10)(7.223+8.184+7.595 +7.099 +7.533 +7.254 +8.122 +8.246+7.90+8.122)$$

$$X = 7.728$$

$$a = 10\sqrt{(7.378 + 8.17 + 7.44 + 6.074 + 6.845 + 7.15 + 7.56 + 6.98 + 6.83)} =$$

$$a = 7.715$$

En las siguientes dos tablas la 6.3 y la 6.4 se muestran los resultados de una encuesta realizada en cada casa para saber las costumbres y hábitos de sus moradores, para poder observar de esta manera como pueden influir aspectos como los materiales de construcción, si sus habitaciones son ventiladas o no, etc.

Por ejemplo, la tabla 6.3 se enfoca a destacar el aspecto de la generación de humos dentro de las casas, así como el número de habitantes en la misma y si son niños o adultos.

De esta forma se encontró que un promedio representativo de estas casas es aquella en la que habitan 4 adultos y menos de 1 niño (el promedio es 0.5), en la cual casi no hay fumadores.

Hay poca generación de humos en la cocina, lo cual indica que todos poseen estufas de gas para cocinar y no tienen que hacerlo con leña o petróleo ( unos 20 años antes una mayor cantidad de gente lo hacía de esta forma).

El aceite que es mas usado para cocinar es el de cártamo y en menor cantidad el de maíz; el 40 % de las casas poseen chimenea que se encuentra ubicada generalmente en la sala o estancia. Estos son algunos en general de los hábitos de los moradores.

Por su parte en la tabla 6.4 se destacan las características físicas de las casas habitación, dentro de las cuales destaca que la mayoría de esta gente tiene una vivienda propia de una sola planta (una de ellas es una oficina), cuentan con mínimo tres ventanas (ventilación natural) y fueron construidas las primeras, entre la década de los 50s y la de los años 70s, es decir son casas de alrededor de 20 años promedio, así como el 60% son de una sola planta.

Todas en su mayor parte están construidas de ladrillo rojo (de arcilla). Las ventanas se encuentran abiertas durante el día y por la tarde son cerradas al bajar la temperatura debido a que es una zona húmeda y montañosa; en invierno son un poco menos abiertas debido al frío que impera en la zona aunque en verano permanecen abiertas un poco más de tiempo.



En las siguientes gráficas de la 6.5.1 a la 6.5.4 se presentan todos los resultados obtenidos, arreglados de la siguiente forma: se dividió en gráficas para INTERIORES y para EXTERIORES, así como también se dividió en una exposición GLOBAL-MENSUAL y en una INDIVIDUAL. Esto es, para la gráfica de exposición INDIVIDUAL (tanto para INTERIORES como para EXTERIORES) se tomaron los valores de acuerdo al RENGLÓN al cual correspondían y después se calcularon los promedios para cada RENGLÓN (se manejaron un total de 10 renglones correspondientes a 10 casas por 6 meses).

Por otra parte para la exposición GLOBAL-MENSUAL, o sea los promedios por COLUMNA (también tanto para INTERIORES como en EXTERIORES) se tomaron los valores de las columnas a las cuales correspondían y se calcularon los promedios para cada columna, teniéndose 6 columnas (una correspondiente a cada mes de monitores). Aunque en ambos casos RENGLONES o COLUMNAS se tenían un total de 60 datos ya que fueron 10 casas por 6 meses y el único dato en el que se notó diferencia fue en los rangos.

En la gráfica 6.5.1 se muestran los resultados de los de dosímetros dosímetros en INTERIORES (de la exposición INDIVIDUAL) y en la gráfica 6.5.2 se muestran los resultados también en INTERIORES pero en forma GLOBAL-MENSUAL. De forma similar ocurre con las gráficas 6.5.3 y 6.5.4 (respectivamente) valores en EXTERIORES de exposición INDIVIDUAL y GLOBAL-MENSUAL, respectivamente.

En cada gráfica se incluye en el eje de las abcisas c/u de las casas monitoreadas por No. y en el eje de las ordenadas la exposición a la cual estuvo sometida dicha casa mes por mes; los meses corresponden a c/u de las correspondientes series que aparecen en el recuadro a la derecha, de esta forma la serie 1 corresponde al promedio calculado y estandarizado a 31 días de exposición; de la serie 2 a la serie 7 corresponden a los promedios para cada mes de exposición.

De la misma forma se incluyen en cada gráfica los límites superiores de control (de acuerdo al **CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD APLICADO**), el cálculo de estos límites se realizó de acuerdo a los siguientes cálculos y fórmulas:

TABLA 6.3. COSTUMBRES Y HÁBITOS DE LOS MORADORES.

CASA Nº	Nº. DE HABITANTES		FUMADORES		HUMOS (GENERACIÓN)	CALEFACCIÓN	ACEITE PARA COCINAR		
	ADULTOS	NINOS	ANTES	HOY	EN COCINA	SALA	CTMO.	AJLI	OTRO
1	3		SI	SI 1 C/D	POCO	CHIMENEA	SI		-----0
2	3	2	NO	---	POCO	CHIMENEA	SI		SOYA
3	4	--	SI	5 C/D	NUNCA	NO	---		-----
4	6	--	NO	---	POCO	NO	SI		MAÍZ
5	4	--	NO	---	POCO	NO	SI		MAÍZ
6	4	--	NO	---	POCO	NO	SI		-----
7	5	--	NO	---	POCO	CHIMENEA	---		MAÍZ
8	2	3	NO	---	POCO	CHIMENEA	---		MAÍZ
9	4	--	NO	---	POCO	NO	SI		-----
10	4	--	NO	---	POCO	NO	SI		-----

C/D: CADA DÍA; CTMO: CARTAMO; AJLI: AJONJOLI;

NOTAS:

1. SOLO EN DOS CASAS (20 %) HABITAN FUMADORES Y ES SOLO UNA PERSONA DE CUATRO EN PROMEDIO (25%).
2. EL PROMEDIO DE PERSONAS POR CASA ES DE 4 ADULTOS Y MENOS DE 1 NIÑO, APROX.
3. LA GENERACIÓN DE HUMOS SE DA PRINCIPALMENTE EN LA COCINA, YA QUE NO CUENTAN ESTAS CASAS CON CHIMENEA.
4. LA MAYORÍA DE LA GENTE PREFERE EL ACEITE DE CARTAMO O EL DE MAÍZ.

TABLA 6.4. CASAS HABITACIÓN: TIPOS Y CARACTERÍSTICAS.

CASA Nº	TIPO		VENTILACIÓN		CONSTRUCCIÓN		COLOCACIÓN DOSÍMETROS		VENTANAS INDIVIDUALES	
	UNIFAM.	MULFAM	NAT	ARTIF.	AÑO	MATERIAL	INT	EXT	ABTA	EPOCA DEL AÑO
1	SI, 1 PLTA	---	SI	---	70-79	LADRILLO ROJO	SALA	PATIO	SI	POCO EN
2	---	SI, 2 PLTAS	SI	---	70-79	LADRILLO ROJO	SALA	PATIO	SI	TODO
3	NO, 1 PLTA	OFICINA	SI	---	60-79	LADRILLO ROJO	ESTANCIA	PATIO	SI	TODO
4	SI, 1 PLTA	---	SI	---	50-69	LADRILLO ROJO	ESTANCIA	PATIO	SI	POCO EN
5	SI, 2 PLTAS	---	SI	---	70-79	LADRILLO ROJO	ESTANCIA	PATIO	SI	POCO EN
6	SI, 1 PLTA	---	SI	---	50-69	LADRILLO ROJO	SALA	PATIO	SI	TODO
7	NO, 1 PLTA	---	SI	---	50-69	LADRILLO ROJO	SALA	PATIO	SI	POCO EN
8	NO, 1 PLTA	---	SI	---	50-69	LADRILLO ROJO	SALA	PATIO	SI	POCO EN
9	SI, 1 PLTA	---	SI	---	70-79	LADRILLO ROJO	SALA	PATIO	SI	POCO EN
10	SI, 2 PLTAS	---	SI	---	70-79	LADRILLO ROJO	SALA	PATIO	SI	TODO

NOTAS:

1. EN SAN RAFAEL LA ÉPOCA DE VERANO ES CUANDO HAY MAYOR LLUVIA Y CON ELLO MAYOR HUMEDAD, ES POR ELLO QUE DISMINUYE LA VENTILACIÓN DE LAS CASAS.
2. EN INVIERNO LOS DIAS SON SOLEADOS Y SE PUEDE MANTENER LA VENTILACIÓN POR LAS MAÑANAS, AUN Y CUANDO POR LAS TARDES Y NOCHES LA TEMPERATURA ES MENOR A 15°C.
3. EN SAN RAFAEL HASTA HOY EN DÍA NO EXISTEN UNIDADES HABITACIONALES. LAS 2 CASAS EN LAS QUE SE MUESTREO Y QUE NO SON PROPIAS DE SUS MORADORES SON DE LA CIA. PAPELERA SAN RAFAEL.
4. LA MAYORÍA DE LAS CASAS POSEEN TECHOS DE DOS AGUAS Y TEJAS DE ARCILLA.
5. TODAS POSEEN ENTRE TRES O MAS VENTANAS. LA VENTILACIÓN ELÉCTRICA NO ES MUY NECESARIA, ESTO DEBIDO A QUE LA ZONA ES MONTAÑOSA Y NO ES MUY CÁLIDA EN ÉPOCAS DE INTENSO CALOR.
6. LA MAYORÍA DE LAS CASAS POSEEN APROXIMADAMENTE 90 m<sup>2</sup> DE CONSTRUCCIÓN, AUNQUE EXISTEN DOS, UNA CON APROX. 120 m<sup>2</sup> Y OTRA CON APROX. 180 m<sup>2</sup> DE CONSTRUCCIÓN.

ABREVIACIONES:

MULTIFAM: VIVIENDA MULTIFAMILIAR; UNIFAM: VIVIENDA UNIFAMILIAR; PLTA (S): PLANTA(S); NAT: NATURAL; ARTIF: ARTIFICIAL; INT: INTERIORES; EXT: EXTERIORES; ABTA: ABIERTA.

Fórmulas:

$Lsc = \bar{X} + (A_{xr} * R) =$  Límite Superior de Control.

$Lic = \bar{x} - (a_{xr} * r) =$  Límite Inferior de Control.

Donde:

$A_{xr}$  y  $a_{xr}$  se obtienen de tablas (apéndice tabla 8,1 Constantes para cartas de control, Ostle, Estadística aplicada, pp 582-83, 1983).

$X$ : es el promedio INDIVIDUAL (por renglón)

$x$ : es el promedio GLOBAL-MENSUAL (por columna).

NOTA: una forma de checar bien los promedios tanto de  $X$  como en  $x$  es que ambos deben coincidir en su valor, así estará correcto el cálculo (esto no debe variar ya que son 60 lecturas en uno y en otro caso y el promedio siempre debe ser el mismo para ambos casos).

$R$ : Es el rango INDIVIDUAL (por renglón).

$r$ : es el rango GLOBAL-MENSUAL (por columna).

Así el cálculo de los límites para dosímetros expuestos en INTERIORES son:

**GLOBAL-MENSUAL :**

$$Lsc = 7.197 + (1.88 * 0.806) = 8.712$$

$$Lic = 7.197 - (1.88 * 0.806) = 5.681$$

**INDIVIDUAL:**

$$Lsc = 7.197 + (0.308 * 3.55) = 8.290$$

$$Lic = 7.197 - (0.308 * 3.55) = 6.103$$

El calculo de los limites para dosímetros expuestos en **EXTERIORES** son:

**GLOBAL-MENSUAL:**

$$L_{sc} = 7.728 + (1.88 * 1.025) = 9.655$$

$$L_{ic} = 7.728 - (1.88 * 1.025) = 5.801$$

**INDIVIDUAL:**

$$L_{sc} = 7.728 + (0.308 * 3.634) = 8.847$$

$$L_{ic} = 7.728 - (0.308 * 3.634) = 6.608$$

En las Gráficas siguientes 6.6.1 a la 6.6.10, se presentan los datos obtenidos en cada casa habitación. Se obtuvieron graficando el período mensual en que estuvieron expuestos los dosímetros (eje de las abscisas). En el eje de las ordenadas se encuentra la exposición (en mR) que cada dosímetro recibió en cada mes de exposición; aquí se muestran tanto los dosímetros exteriores (serie 1), como los interiores (serie 2).

Las gráficas 6.7 y 6.8 muestran los histogramas de frecuencia de todas las lecturas para exteriores y para interiores respectivamente.

En estos es fácil observar la tendencia que cada serie presentó; aquí se puede observar por ejemplo que a pesar de que las dosis en **interiores** llegó a presentar un valor máximo de 11.956 mR en un período, también presentó el mínimo 5.049 mR para

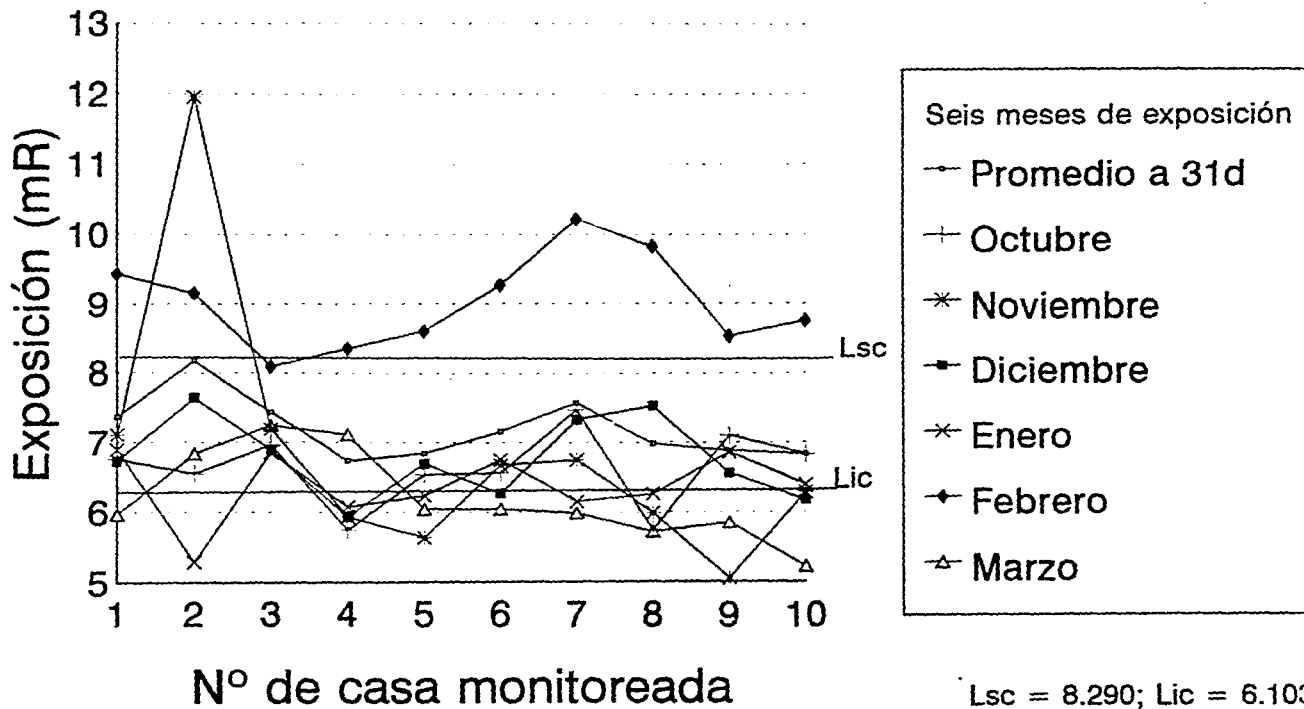
De la misma forma en **exteriores** el valor máximo fue de 11.242 mR para un período (menor que el valor similar en interiores) y el mínimo de 5.321 mR para otro.

En el histograma de exteriores se observa que el mayor porcentaje de valores se encuentran en el intervalo entre 6.0 mR en un período y 8.99 mR en otro se encuentran 47 puntos mientras que en el histograma de interiores la mayoría de los valores (40), se encuentran en el intervalo de 5.0 mR a 6.99 mR en un período.

# Gráfica 6.5.1. Datos de los dosímetros de CaSO<sub>4</sub>:Dy + PTFE

Exposición en casas habitación (INTERIORES).  
Seis períodos de muestreo en 10 casas habitación (oct 93/mar 94)

68

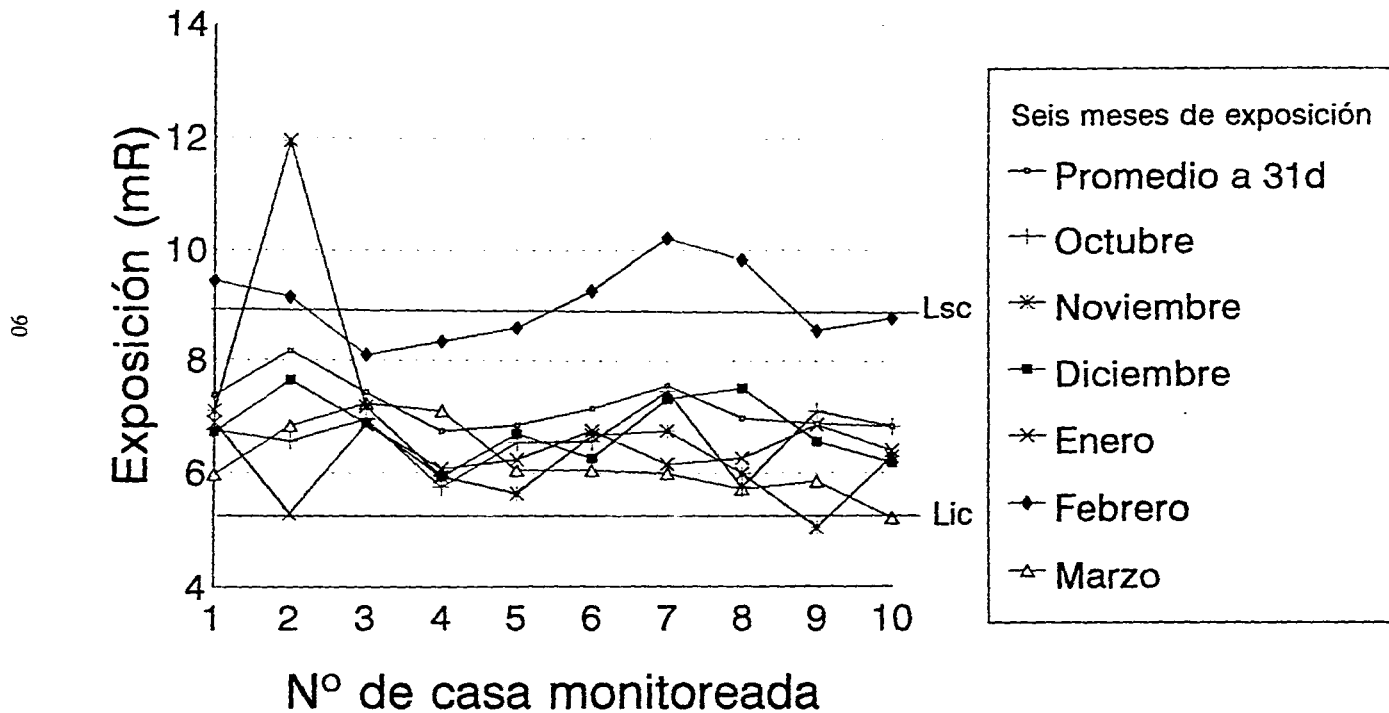


EXPOSICIÓN INDIVIDUAL (INTERIORES)

Dosis promedio a 31 días: 7.197 mR (+/-) 3.9\*10<sup>-4</sup> mR

# Gráfica 6.5.2 Datos de los dosímetros de CaSO<sub>4</sub>:Dy + PTFE

Exposición en casas habitación (INTERIORES).  
Seis períodos de muestreo en 10 casas habitación (oct 93/mar 94)



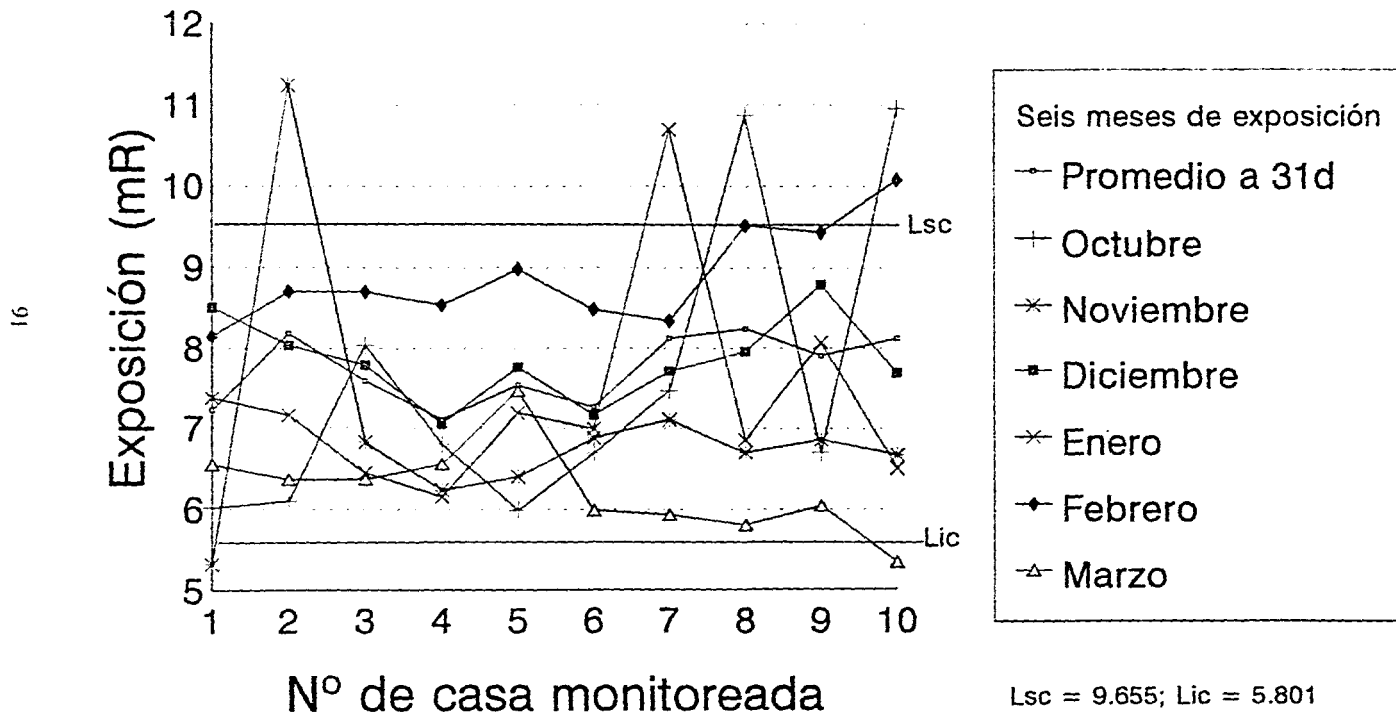
Lsc = 8.712  
Lic = 5.681

EXPOSICION GLOBAL MENSUAL (INTERIORES)

Dosis promedio a 31 días: 7.197 mR (+/-) 3.9\*10<sup>-4</sup> mR

# Gráfica 6.5.3. Datos de los dosímetros de CaSO<sub>4</sub>:Dy + PTFE

Exposición en casas habitación (EXTERIORES).  
Seis períodos de muestreo en 10 casas habitación (oct 93/mar 94)



EXPOSICION INDIVIDUAL (EXTERIORES)

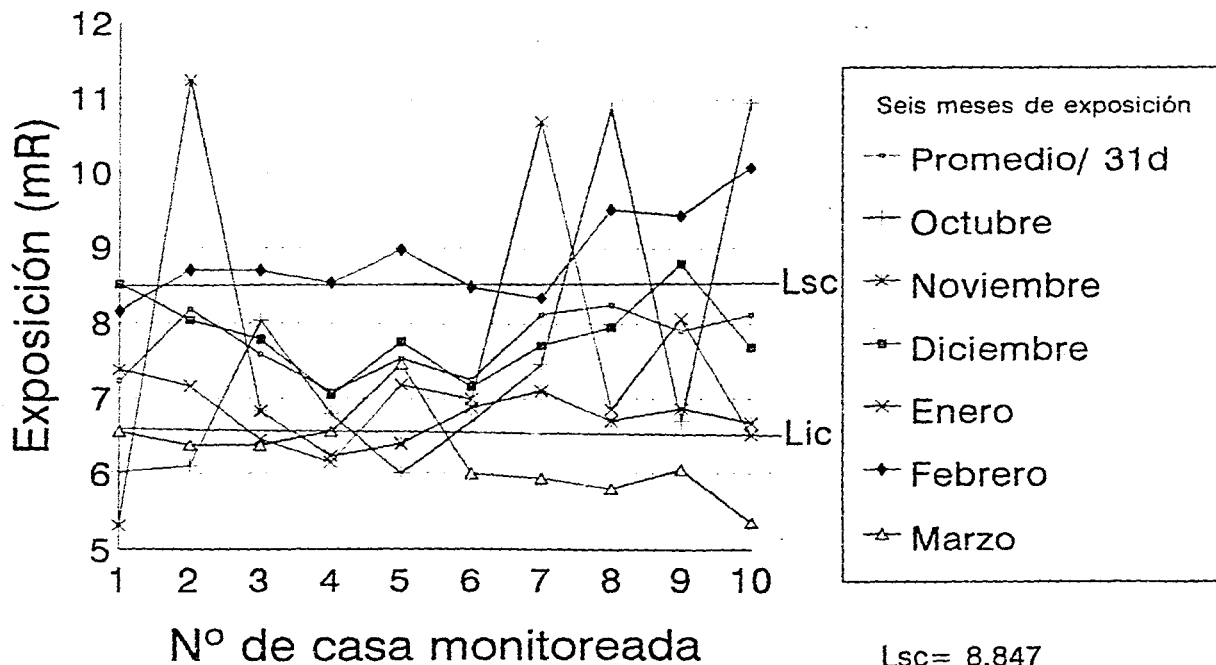
Dosis promedio a 31 días: 7.728 mR (+/-) 3.9\*10<sup>-4</sup> mR



# Gráfica 6.5.4 Datos de los dosímetros de CaSO<sub>4</sub>:Dy + PTFE

Exposición en casas habitación (EXTERIORES).

Seis períodos de muestreo en 10 casas habitación (oct 93/mar 94)



Lsc= 8.847  
Lic= 6.608

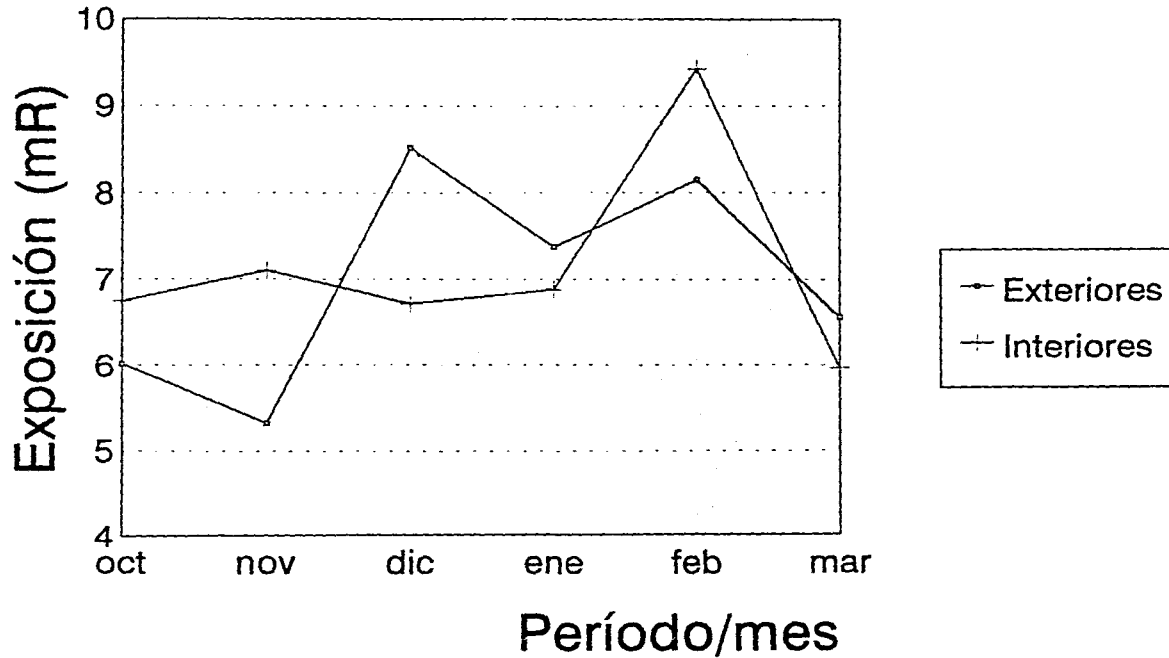
EXPOSICIÓN GLOBAL MENSUAL (EXTERIORES)

Dosis promedio a 31 días: 7.728 mR(+/-) 3.9\*10<sup>-4</sup> mR

# Gráfica 6.6.1. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 1

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores \ Interiores

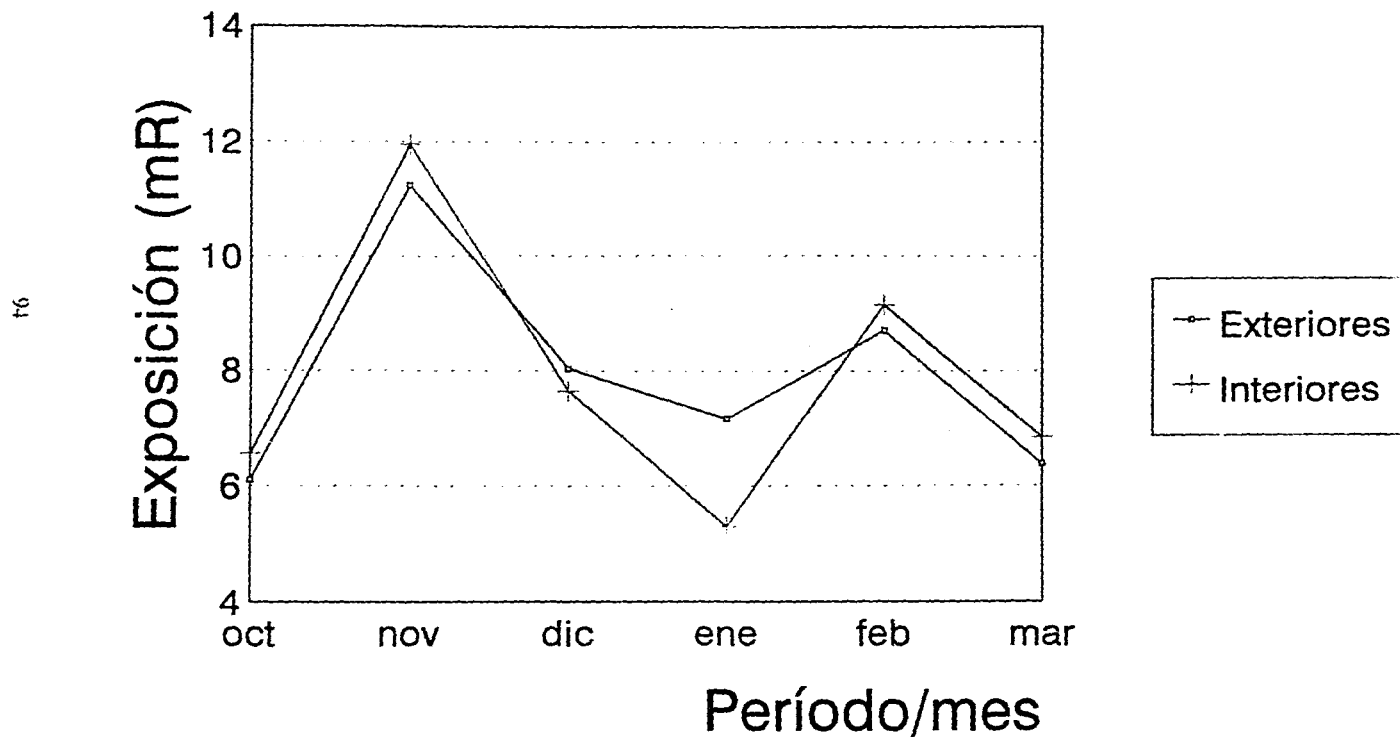


Promedio/31 días: Exteriores= 7.223 ; Interiores= 7.378

## Gráfica 6.6.2 Resultados de las evaluaciones en casa/hab. N° 2

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores / Interiores

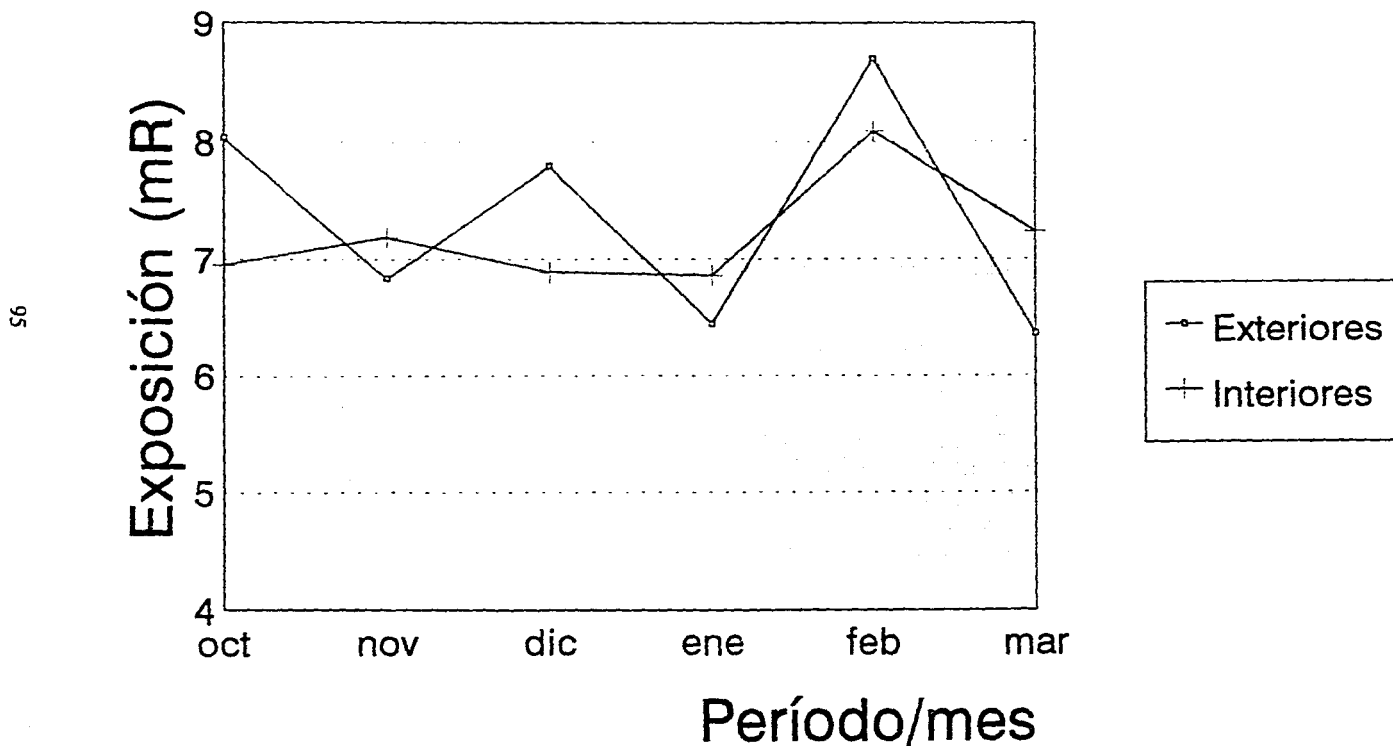


Promedio/31 días: Exteriores= 8.184 ; Interiores= 8.170

# Gráfica 6.6.3. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 3

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores \ Interiores

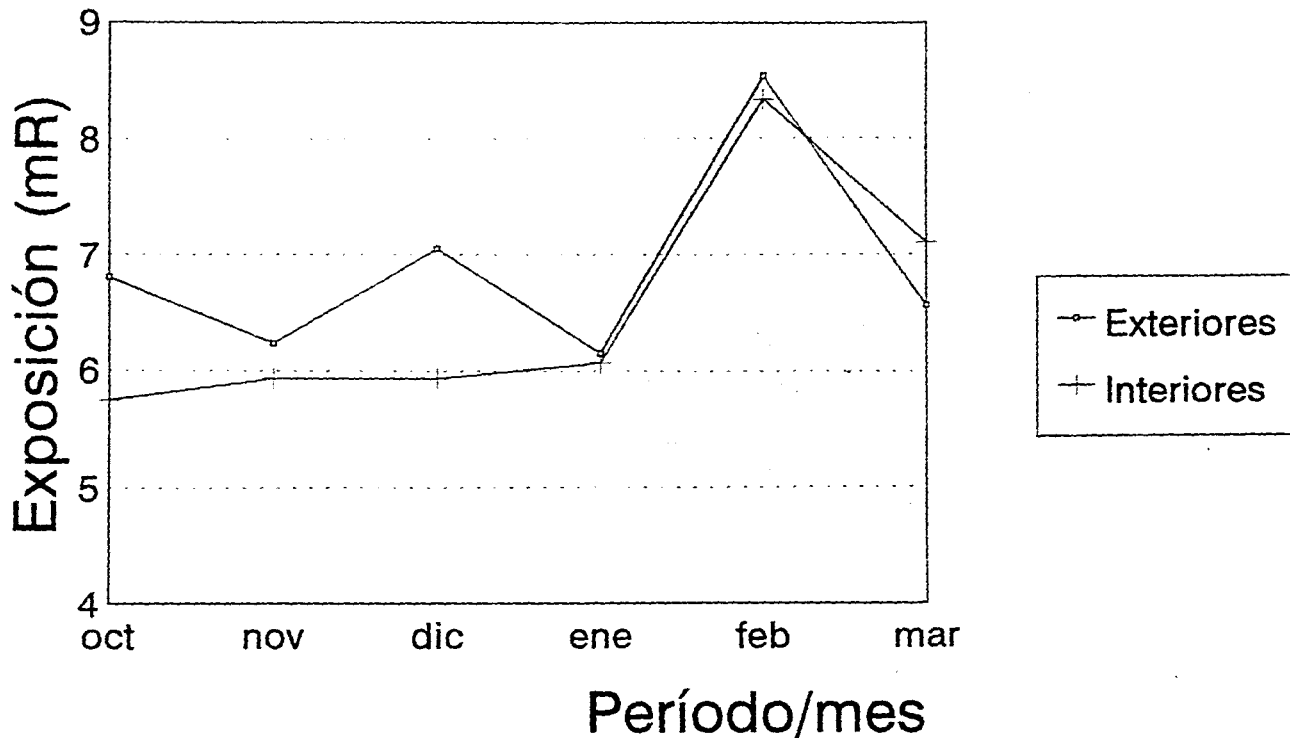


Promedio/31 dias: Exteriores= 7.595 ; Interiores= 7.440

# Gráfica 6.6.4. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 4

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores / Interiores



96

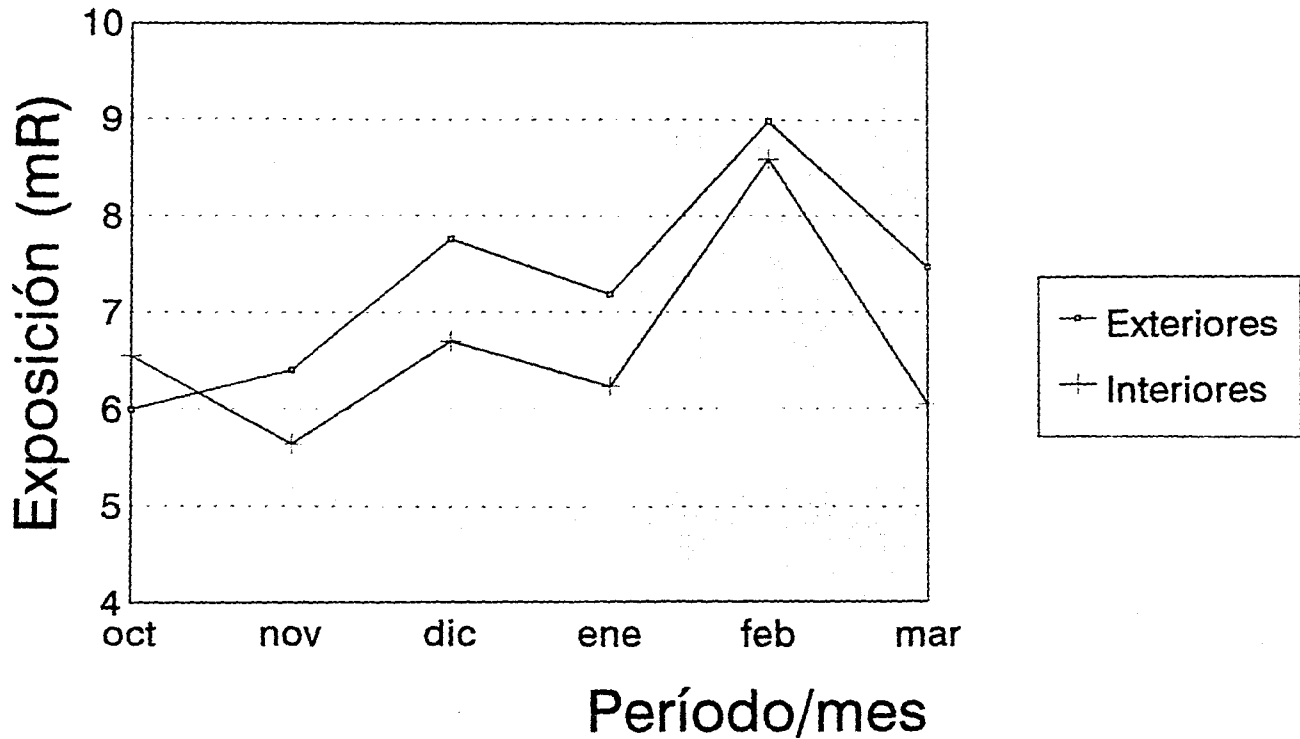
Promedio/31 días: Exteriores= 7.099 ; Interiores= 6.740

# Gráfica 6.6.5. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 5

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores / Interiores

97

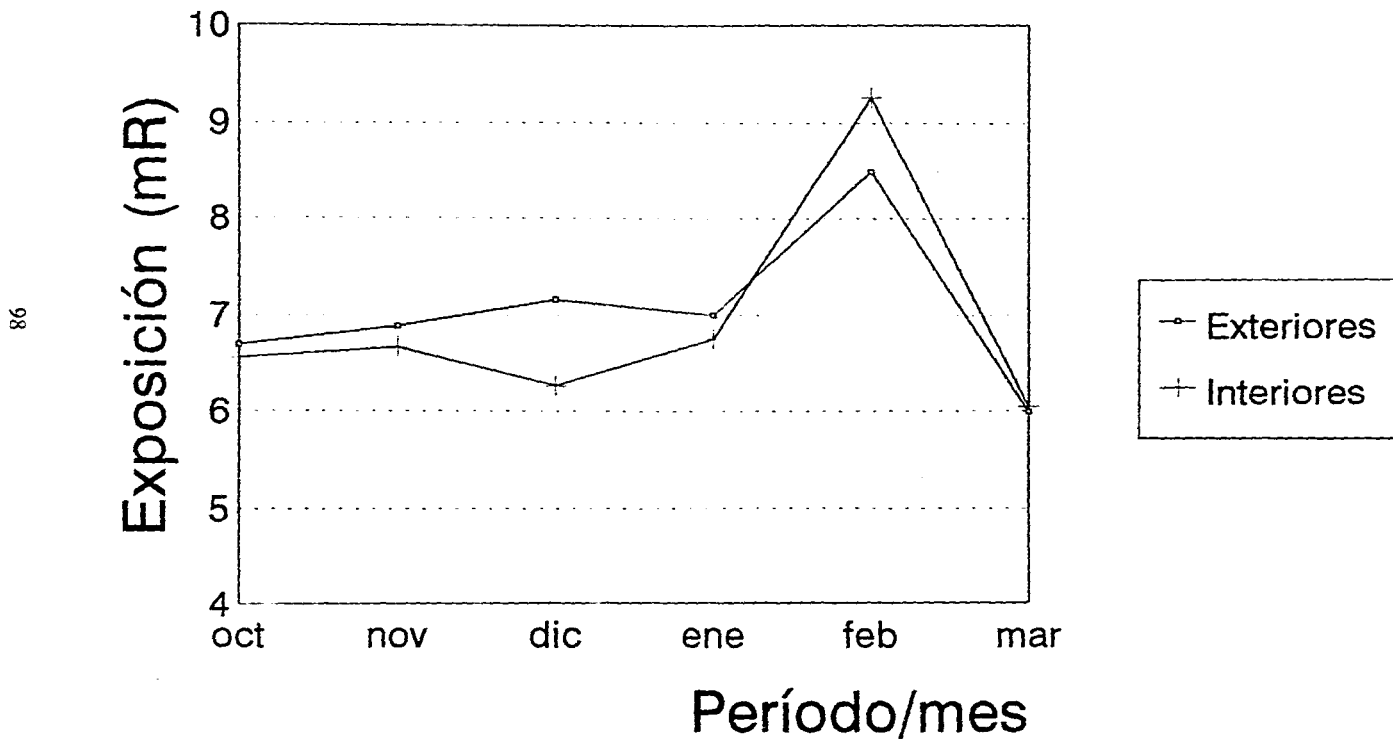


Promedio/31 días: Exteriores= 7.533 ; Interiores= 6.845

# Gráfica 6.6.6. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 6

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores / Interiores



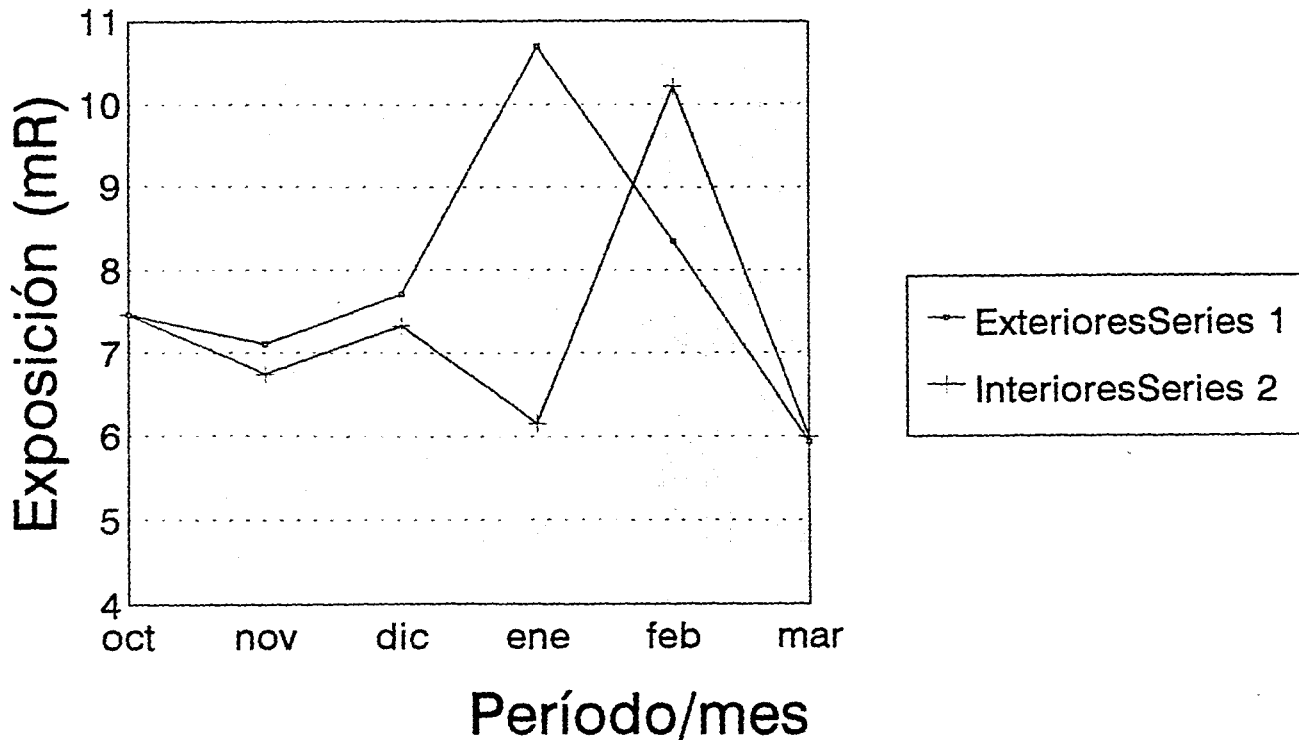
Promedio/31 días: Exteriores= 7.254 ; Interiores= 7.150

# Gráfica 6.6.7. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 7

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores \ Interiores

66



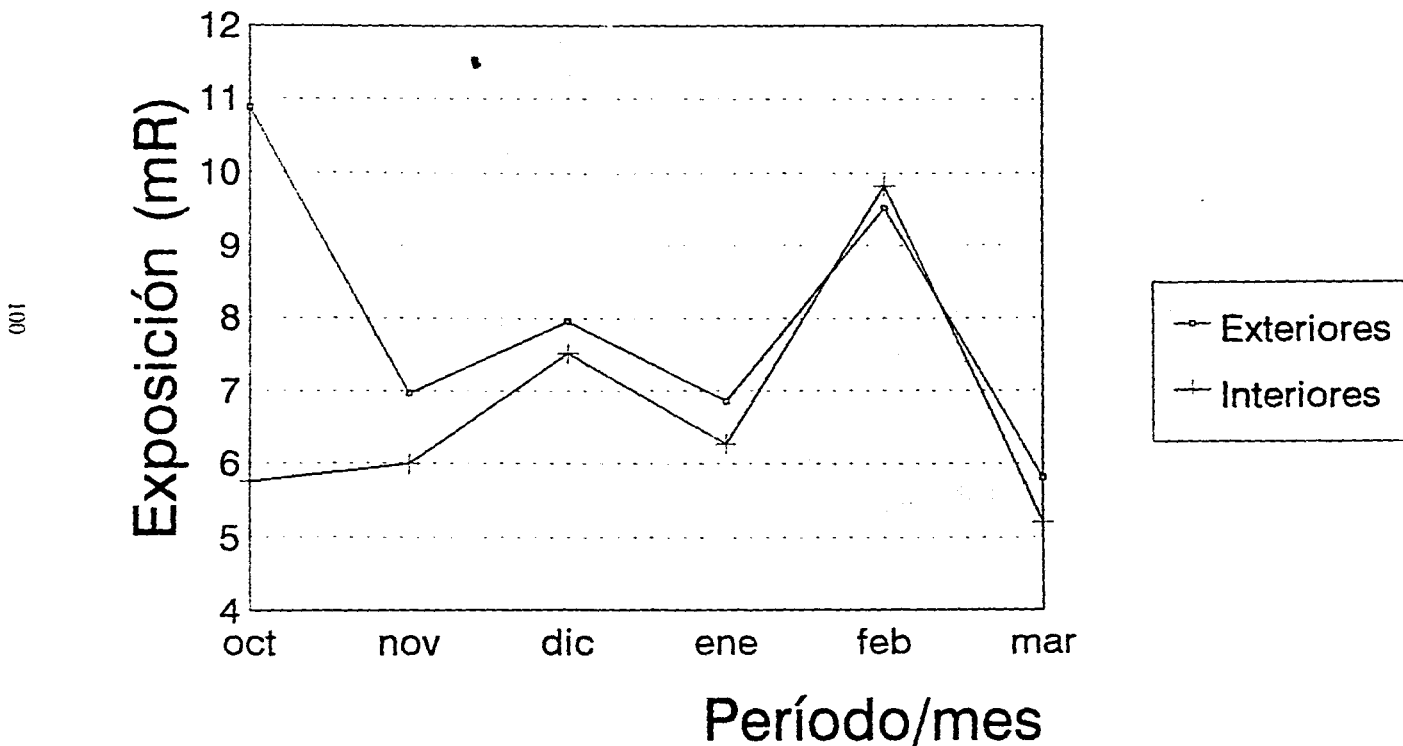
Promedio/31 dias: Exteriores= 8.122 ; Interiores= 7.560



# Gráfica 6.6.8. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 8

Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores / Interiores

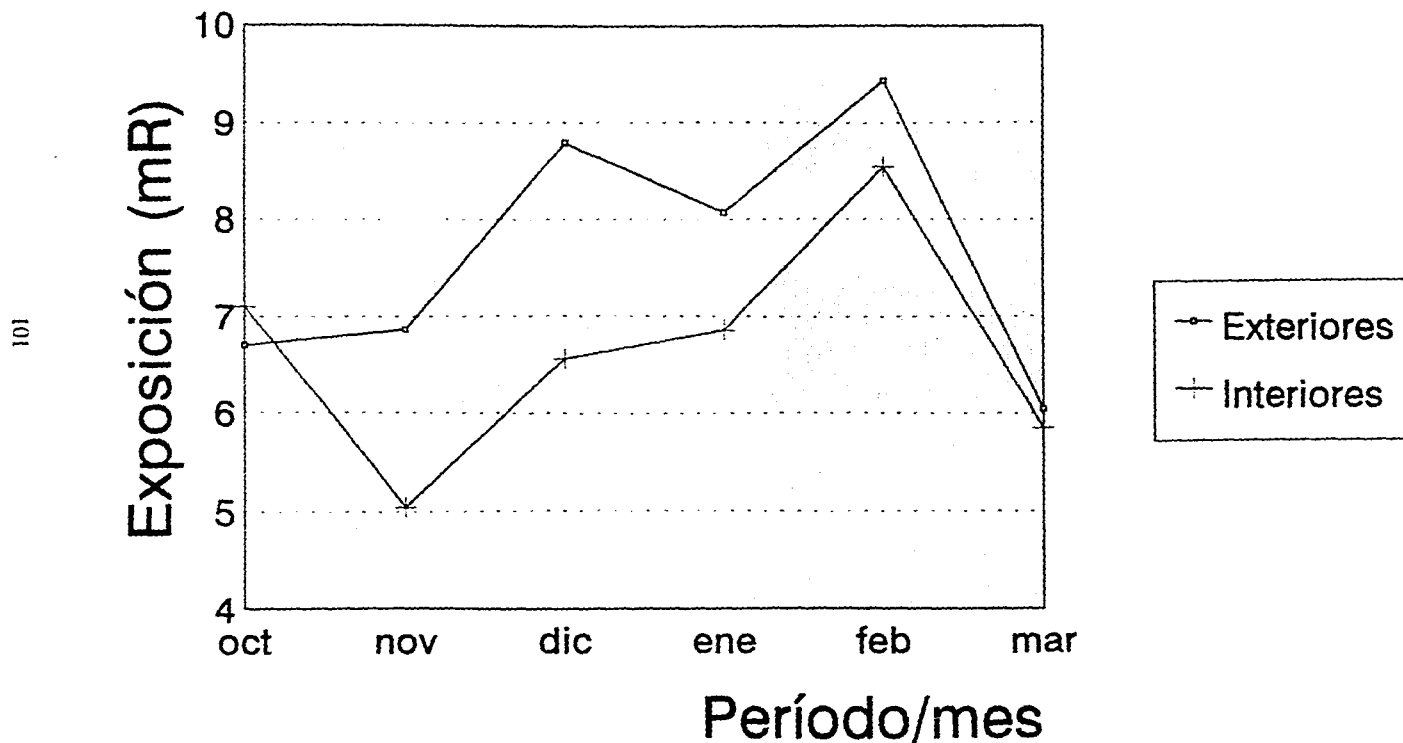


Promedio/31 días: Exteriores= 8.246 ; Interiores= 6.980

# Gráfica 6.6.9. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 9

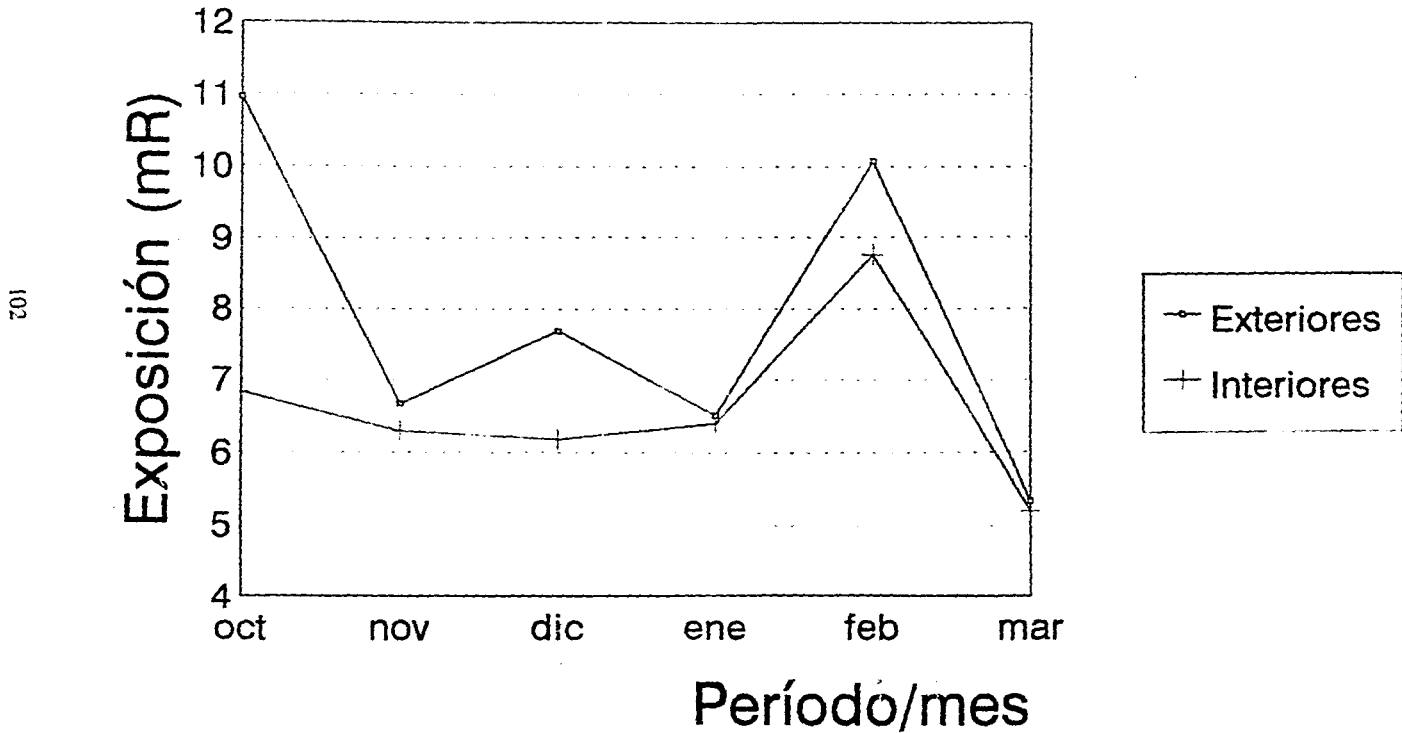
Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).

Exteriores / Interiores



Promedio/31 días: Exteriores= 7.905 ; Interiores= 6.880

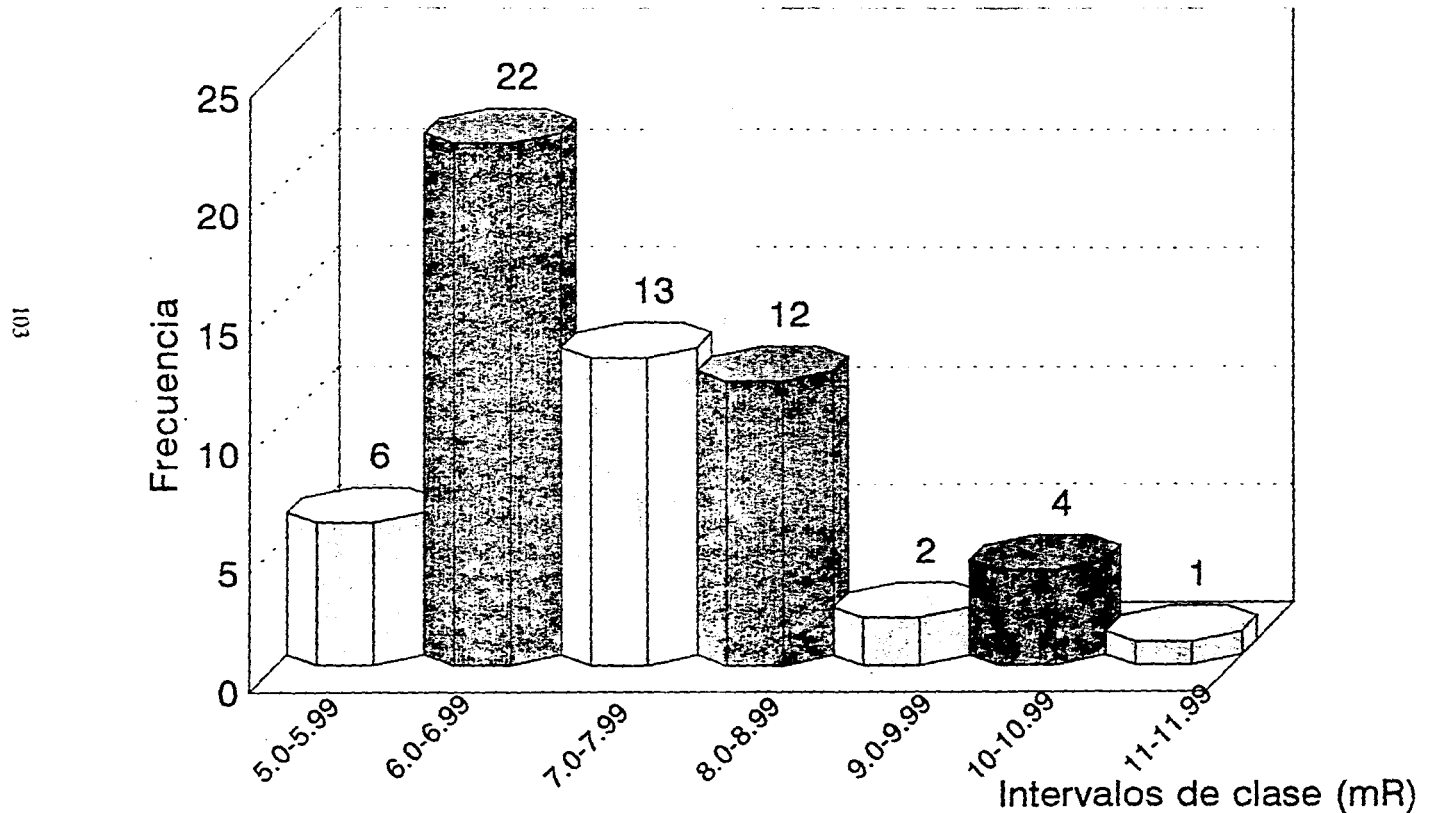
Gráfica 6.6.10. Resultados de las evaluaciones en casa hab. N° 10  
Seis meses de exposición ( oct 93 / mar 94).  
Exteriores / Interiores



Promedio/31 días: Exteriores= 8.122 ; Interiores= 6.830

# Gráfica 6.7. Histograma de frecuencias EXTERIORES.

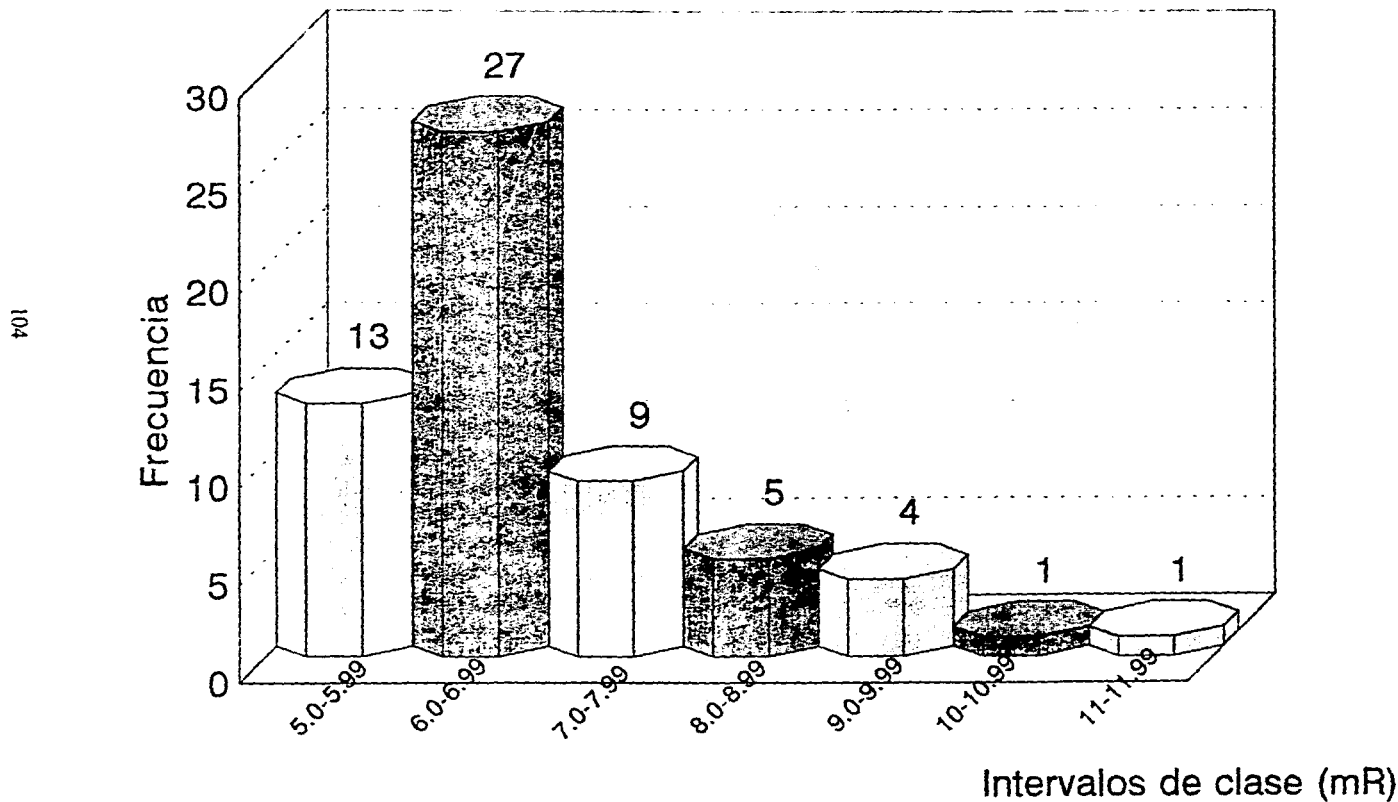
60 (Muestras de 6 meses \* 10 casas habitación).



Valor máximo: 11.242 ; Valor mínimo: 5.321 ; Rango: 3.634 ; Dosis prom: 7.73 mR

# Figura 6.8. Histograma de frecuencias INTERIORES.

60 (Muestras de 6 meses \* 10 casas habitación).



Valor máximo: 11.956 ; Valor mínimo: 5.049 ; Rango: 3.550 ; Dosis prom: 7.386 mR

## VI.2 Discusión de Resultados.

Para checar los datos obtenidos y corroborar, de esta manera su confiabilidad se recurrió a dos métodos estadísticos de análisis. Uno es el método de "análisis de varianza" y otro es el método del intervalo de confianza".

- Por el método del "Intervalo de Confianza" se obtuvieron los siguientes resultados:

Fórmulas:

$$\bar{X} = (\sum x) / n \text{ (media de la muestra)}$$

$$S = \sqrt{[(\sum (x-x)^2) \div (n-1)]} \text{ (varianza)}$$

$$\sigma_x = S \div (\sqrt{n}) \text{ (desviación estándar)}$$

Una vez obtenidos estos valores se procede a obtener el intervalo de confianza  $\mu$  con la fórmula:

$$Z = (X - \mu) \div \sigma_x$$

donde  $Z = \pm 1.96$  (Mendenhall, 1990, tablas de distribución normal); de aquí se despeja  $\mu$  y se tiene el intervalo en el cual se espera se encuentre la media de la población.

Así los resultados obtenidos son:

-En Interiores (al aire libre)

$$n = 60$$

$$\bar{X} = 7.197 \text{ (31d)}$$

$$\sigma_x = 3.90 \cdot 10^{-4}$$

$$S = 6.619 \cdot 10^{-6}$$

$$\mu = 7.091$$

$$\text{con } Z = 1.96$$

-En Exteriores -(en edificios)

$$n = 60$$

$$\bar{x} = 7.728 \text{ (31d)}$$

$$\sigma_x = 3.90 \cdot 10^{-4}$$

$$S = 6.619 \cdot 10^{-6}$$

$$\mu = 7.44$$

$$\text{con } Z = 1.85$$

- Por el método de "Análisis de Varianza" se obtuvieron los siguientes resultados (distribuciones F):

Fórmulas:

$$F = \frac{S_x^2}{S_y^2}$$

$$D_x = n_x - 1 = 59$$

$$D_y = n_y - 1 = 59$$

x= exteriores

y= interiores

$$S_x^2 = 3.90 \cdot 10^{-4} \quad n_x = 60$$

$$S_y^2 = 3.90 \cdot 10^{-4} \quad n_y = 60$$

$$\text{Hipótesis: } H_0: S_x^2 = S_y^2$$

$$H_1: S_x^2 > S_y^2$$

$$F = \frac{(3.90 \cdot 10^{-4})}{(3.90 \cdot 10^{-4})} = (1.000)^2$$

$$F = 1.000$$

De Tablas de análisis de varianza (Mendenhall, 1990; cuadro 7a Distribuciones F para  $\alpha = 0.05$ ), con:

$D_x = 59$  y  $D_y = 59$ :

$$\alpha = 0.05, F = 1.53 \text{ (es decir una variación de un 5\% o una certidumbre del 95\%)}$$

Valor crítico inferior:  $1 - 1.53 = 0.649$

Valor crítico superior:  $1.53 + 0.05 = 1.58$

Entonces dado que 1.000 es menor que 1.58, se acepta  $H_0$  por lo tanto se deduce que las dos series tienen la misma variabilidad en la exposición a la que estuvieron sometidos.

## CONCLUSIONES:

De acuerdo a los objetivos planteados inicialmente se puede concluir lo siguiente:

1). En base al muestreo realizado en las 10 casas habitación tanto en interiores (casas) como en exteriores (al aire libre), utilizando para ello la Dosimetría Termoluminiscente, Comparando los promedios de los resultados reportados por la literatura disponible y los resultados obtenidos se puede decir lo siguiente:

- En edificios (exteriores)= 70 nGy/h por radiación y terrestre
- En edificios (interiores)= 26 nGy/h por radiación cósmica a nivel del mar
  
- Al aire libre (exteriores)= 55 nGy/hr nGy/h por radiación y terrestre
- Al aire libre (Interiores )= 30 nGy/h por radiación cósmica a nivel del mar

Si estos valores de referencia los comparamos con los obtenidos que fueron de 84.83 nGy/h (interiores) y de 91.09 nGy/h (exteriores), vemos que la dosis medida es comparable con la dosis reportada por la UNSCEAR (1988).

2). Al observar la variación de la dosis en los resultados tanto en interiores como en exteriores se puede ver que los resultados en exteriores fueron mayores que en interiores.

Comparando tenemos que:

en interiores  $\bar{X}_{\text{arit.}} = 84.83 \text{ nGy / h}$

en exteriores  $\bar{X}_{\text{arit.}} = 91.09 \text{ nGy / h}$

**por lo tanto  $91.09 > 84.83 \text{ nGy / h}$**

Esto nos muestra que la construcción actúa como aislante de la radiación cósmica y como una fuente normal de radiación y terrestre



Si al valor encontrado de 91.09 nGy/h para exteriores le restamos el promedio encontrado a nivel mundial de 55 nGy/h para radiación  $\gamma$  terrestre nos queda:

$91.09 \text{ nGy/h} - 55 \text{ nGy/h} = 36.09 \text{ nGy/h}$  para el componente ionizante de rayos c3smicos, ligeramente mayor al reportado por la UNSCEAR de 30 nGy/h a nivel del mar.

Si el valor encontrado para interiores de 84.83 nGy/h le restamos el valor promedio de dosis absorbida por radiaci3n  $\gamma$  terrestre de 70 nGy/h nos queda:

**$84.83 \text{ nGy/h} - 70 \text{ nGy/h} = 14.83$  para el componente ionizante de rayos c3smicos en interiores.**

Si calculamos la dosis obtenida en  $\mu\text{Sv/a}\tilde{n}o$  tendremos que:

$$(24\text{h}/1\text{d}) * (365\text{d}/\text{a}\tilde{n}o) = 8\ 760 \text{ h/a}\tilde{n}o$$

Ahora tomando en cuenta que el factor de calidad (Q) para radiaciones  $\gamma$  es = 1 y que el factor de ocupaci3n para interiores es de 0.8 y para exteriores es = 0.2

$$8\ 760 \text{ h/a}\tilde{n}o * 0.8 = 7\ 008 \text{ h/a}\tilde{n}o$$

$$8\ 760 \text{ h/a}\tilde{n}o * 0.2 = 1\ 752 \text{ h/a}\tilde{n}o$$

$$\text{ahora } 7\ 008 \text{ h/a}\tilde{n}o * 84.83 \mu\text{Sv/h (dosis interiores)} = 594.5 \mu\text{Sv/a}\tilde{n}o$$

$$1\ 752 \text{ h/a}\tilde{n}o * 91.09 \mu\text{Sv/h (dosis exteriores)} = 159.5 \mu\text{Sv/a}\tilde{n}o$$

$$= 754 \mu\text{Sv/a}\tilde{n}o = 0.754 \text{ mSv / A}\tilde{n}o$$

Similar al valor de 0.77 mSv/año que es el promedio mundial, a nivel del mar.

Por lo tanto se puede concluir que los h3bitos de sus moradores no influyen de forma significativa en la contribuci3n a la dosis de exposici3n.

Se puede concluir tambi3n que la altura de la localidad es uno de los factores que pudieran tener mayor significaci3n.

3). Los factores que influyen son:

- La situación geográfica de la localidad: en este caso zona montañosa de altitud media considerable(2 500 msnm)
- los materiales de construcción de cada casa muestreada (ladrillo rojo) en la localidad, y que tienen una contribución normal y que mas bien actúan como blindaje.

-el tipo de suelo de la localidad tipo aluvión, con roca sedimentaria, en este caso influyó.

- en general como se puede observar en los resultados la mayor parte de dosis absorbida se debe a las radiaciones cósmicas y con una contribución normal de la terrestre. Es decir no se encontraron resultados fuera de lo que podría esperarse.

Dichos resultados son similares pero un poco mas altos que otros que se han encontrado en el área metropolitana de 10.44 nGy / h en interiores.

El trabajo complementario que podría realizarse mas adelante sería la medición de radón en cada casa para detectar posibles anomalías debidas al mismo ya que este es un posible causante de cáncer en la población y además es uno de los mayores contribuyentes a la dosis.

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS.**

**Absorción:** es la retención en un material cualquiera de la energía extraída de la radiación al pasar a través de él. La eliminación de radiación o la reducción de su energía al pasar a través de la materia. Es también, el proceso por el cual el neutrón (u otra partícula) es capturada por un núcleo.

**Abundancia isotópica:** El número de átomos de un isótopo particular en una mezcla de isótopos de un elemento, expresado como fracción de todos los átomos del elemento.

**Activador:** El término activador se usa para designar a un átomo de impureza presente en un sólido que hace posible el fenómeno de Luminiscencia o provoca un marcado aumento en su eficiencia.

**Actividad:** De una cantidad de material radiactivo, el número de transformaciones nucleares que ocurren en esta cantidad en la unidad de tiempo.

**Actividad equivalente:** De una fuente de radiación, la actividad de una fuente puntiforme del mismo radionúclido, que da la misma intensidad de exposición a la misma distancia del centro de la misma.

**Actividad específica:** La actividad por unidad de masa de un elemento o compuesto que contiene un núclido radiactivo.

**Agujero:** Un agujero es la ausencia de carga electrónica que queda al ser expulsado un electrón de un ión en la red cristalina.

**Átomo:** Una unidad de materia consistente en un núcleo único rodeado de uno o más electrones orbitales. El número de electrones es suficiente de ordinario para hacer el átomo eléctricamente neutro. La adición o sustracción de uno o más electrones convierte al átomo en un ión positivo o negativo, pero éste se considera como un estado del mismo átomo.

El átomo está caracterizado por su núcleo; para cambiar éste se necesita mayor cantidad de energía que para el cambio de estado del átomo.

**Bandas:** Se denomina bandas a grupos de niveles de energía perturbados debido a que en un cristal existen tantos átomos que la separación entre los niveles es tan fina que se puede considerar como un espacio continuo de energía.

**Banda de valencia:** Es la banda que está constituida por el grupo de estados que contiene e los electrones de valencia, es decir, los electrones de la capa externa del átomo.

**Banda prohibida:** Es la banda que se encuentra inmediatamente arriba de la banda de valencia y contiene los niveles de energía que no pueden ser ocupados por los electrones en el cristal.

**Banda de conducción:** Es la banda de energías permitidas que se encuentra sobre la banda prohibida y corresponde a los estados excitados y normalmente se encuentra vacía.

**Bremsstrahlung:** Literalmente, "radiación de frenado". La radiación electromagnética que resulta del retardo de partículas cargadas.

**Captura electrónica (CE):** Es una transformación nuclear en la que un núcleo captura uno de sus electrones orbitales.

**Cavidad:** Se denomina cavidad a una discontinuidad en el medio irradiado, que difiere de este en un número atómico y densidad.

**Centro de color:** Se da el nombre de centro de color a determinadas configuraciones electrónicas originadas por defectos de la red cristalina cuyos niveles de energía producen bandas de absorción óptica en longitudes de onda a las que el cristal es normalmente transparente.

**Centro F:** El centro F es un centro de color que consiste de un electrón atrapado en una vacancia producida por la ausencia de un ión negativo en la red cristalina. Su nombre proviene de la palabra alemana FARBZANTRUM que significa centro de color.

**Centro luminiscente:** Son estados metaestables de energía que existen en la banda prohibida en los que los electrones se recombinan con cargas positivas.

**Compuesto marcado:** Ordinariamente, es un compuesto en el que uno o más átomos de la fracción de las moléculas están reemplazados por un isótopo radiactivo.

**Concentración radiactiva:** La actividad por unidad de cantidad de cualquier material en el que está presente un radionúclido.

**Constante específica de rayos  $\gamma$  (o emisión):** De un núclido radiactivo, la intensidad de dosis de exposición producida por los rayos  $\gamma$  de una fuente puntual de dicho núclido a la distancia unidad  
(unidad: roentgen por Ci/h a 1 m. de distancia).

**Curie:** La unidad de actividad. Un curie (1 Ci) corresponde a  $3,7 \times 10^{10}$  transformaciones nucleares por segundo.

**Decaimiento:** De una sustancia radiactiva, la disminución gradual de su actividad de acuerdo a su  $T_{1/2}$

**Desintegración:** De una sustancia radiactiva, la disminución gradual de su actividad; su transformación en su producto hijo. Es cualquier proceso en el que el núcleo emite un o más partículas, bien espontáneamente o bien como resultado de un colisión.

**Dosis equivalente:** Una unidad de dosis biológicamente efectiva, definida como la dosis absorbida en Gy (Grays) multiplicada por el factor de calidad (Q). Para todos los rayos x, rayos  $\gamma$ , partículas  $\beta$  y positrones que es probable encontrar; en el uso de radioisótopos  $Q = 1$ . Para las partículas  $\alpha$  se puede tomar como 10.

**Dosis absorbida:** Se define como el cociente  $dE/dm$  en donde  $dE$  es la energía promedio depositada por la radiación ionizante en un elemento de materia que posee una masa  $dm$ . La unidad de dosis absorbida es el gray (Gy) el cual es equivalente a la absorción de 1 Joule por kilogramo La rapidez de dosis es la dosis por unidad de tiempo.

**Dosímetro:** Un dosímetro es un dispositivo para medir la dosis de radiación. Los dosímetros pueden ser absolutos si se pueden construir y usar en forma subsecuente para medir la energía absorbida sin necesidad de calibrarlos en un campo de radiación conocido. Un dosímetro es secundario si necesita ser calibrado para medir la energía absorbida.

**Dosímetro puntual:** Es un dosímetro cuyo volumen se puede considerar como un punto

**Electrón:** La partícula cargada negativamente (carga,  $e = -1.60 \times 10^{-19}$  coulombios; masa,  $m = 9.11 \times 10^{-28}$  gramos) que es un constituyente de todos los átomos; su contraparte cargada positivamente, de igual masa y carga, es llamada positrón. Sin embargo, la palabra electrón se usa frecuentemente incluyendo tanto a los electrones negativos (negatrones) como los electrones positivos (positrones).

**Electrón voltio (eV):** Una unidad de energía igual a la energía cinética adquirida por un electrón cuando se le acelera a lo largo de una diferencia de potencial de 1 voltio ( $1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-12}$  ergios).

**Electrones Auger:** Los electrones emitidos desde un átomo por el llenado de una vacante en un capa electrónica interna.

**Elemento:** Materia que consta de átomos que tienen el mismo número atómico.

**Espectro luminiscente:** Se conoce como espectro luminiscente al registro de la intensidad de luz emitida a una temperatura determinada en función de la longitud de onda.

**Estado fundamental:** El estado de menor energía de un sistema.

**Estados isómeros:** Estados de un núcleo que tienen diferentes energías y diferentes periodos de semidesintegración observables.

**Estados metaestables:** En un núcleo, estados isómeros con energías superiores a las del estado fundamental.

**Excitación:** La adición de energías a un sistema, pasándolo de un estado fundamental a un estado excitado.

**Factor de calidad (Q):** ver dosis equivalente.

**Fisión:** Una reacción nuclear en la que un núcleo pesado se divide en dos (o en muy rara ocasión en tres o cuatro) partes aproximadamente iguales.

**Flujo:** El producto del número de partículas o fotones por unidad de volumen y su velocidad media.

**Flujo de neutrones:** El producto de la velocidad media y de la densidad de neutrones. El número de neutrones que entran en una esfera imaginaria con un área superficial total de  $4\pi$  cm<sup>2</sup> en un segundo.

**Fotón:** Un cuanto de radiación electromagnética que posee la energía  $h\nu$  (siendo  $h$  la constante de Planck y  $\nu$  la frecuencia).

**Fuente de radiación:** Una cantidad de material radiactivo utilizado como manantial de radiación ionizante.

**Hijo:** de un núclido determinado, cualquier núclido que se origina de él por medio de desintegración radiactiva.

**Ionización:** Cualquier proceso por el cual se forman iones; en particular, ionización de un gas por el paso de partículas rápidas cargadas.

**Isótopo estable:** Un isótopo que no es radiactivo.

**Isótopos:** Núclidos que tienen el mismo número atómico pero distintos números másicos.

**keV:** kiloelectrón voltio = 1 000 electrón voltios =  $10^3$  eV.

**Material enriquecido:** Material que contiene un elemento en el que se ha aumentado la abundancia de uno de los isótopos por encima de lo que posee normalmente.

**Material equivalente al aire (tejido):** Es un material cuyo número atómico efectivo tiene un valor muy cercano al número atómico efectivo del aire (tejido).

**MeV:** megaelectrón voltio = 1 000 000 electrón voltios =  $10^6$  eV.

**Neutrón:** Una de las partículas constituyentes de los núcleos; tiene carga cero y es ligeramente más pesada que un protón.

**Núcleo:** La porción central de un átomo cargada positivamente, con la que está asociada la masa casi total, pero solamente una parte minúscula de su volumen.

**Núclido:** Una especie atómica caracterizada por su número másico, número atómico y estado energético nuclear, siempre que la vida media en dicho estado sea lo suficientemente larga para ser observable.

**Número atómico:** De un elemento, el número entero Z, siendo Ze la carga nuclear y e la carga de un protón.

**Número másico:** De un núclido, el entero A más próximo a su masa atómica; es el número de protones más el número de neutrones en el núcleo.

**Padre:** De un núclido, el núclido radiactivo a partir del cual se forma por desintegración.



**Partícula alfa ( $\alpha$ ):** un núcleo de helio ( ${}^4\text{He}$ ) que se mueve muy rápido.

**Partícula beta ( $\beta$ ):** Un electrón, de carga positiva o negativa, emitido en la transformación  $\beta$  (ver electrón).

**Período de desintegración:** El tiempo en el que la cantidad de un núclido radiactivo disminuye a la mitad de su valor inicial.

**Peso atómico:** Para una especie dada de un elemento, el peso medio de sus átomos, expresado en unidades de masa atómica (escala física) o unidades de peso atómico (escala química).

**Positrón:** ver electrón.

**Productos de fisión:** Los núclidos estables e inestables que resultan en la fisión.

**Protón:** Una partícula nuclear de número másico 1 que tiene una carga igual y opuesta a la de un electrón y una masa de 1.0076 uma.

**Pureza radioquímica:** De un material radiactivo, la proporción de la actividad total que está presente en la forma química expresada.

**Química de la radiación:** El estudio de los efectos químicos de la radiación sobre la materia.

**Radiación de aniquilamiento:** La radiación electromagnética que resulta de la aniquilación mutua de dos partículas de carga opuesta. En el caso de un electrón positivo y otro negativo, la radiación de aniquilamiento consta de dos fotones, cada uno de una energía de aproximadamente 0.51 MeV, emitidos en direcciones opuestas entre ambos.

**Radiación gamma ( $\gamma$ ):** Radiación electromagnética emitida por núcleos atómicos. También se le conoce con el nombre de rayos gamma ( $\gamma$ ).

**Radiación ionizante:** El término radiación ionizante designa una radiación electromagnética o corpuscular capaz de producir iones, de forma directa o indirecta, a su paso a través de la materia.

**Radiactividad:** La propiedad de ciertos núclidos de emitir radiación causada por la transformación espontánea de sus núcleos.

**Radioisótopo:** Un isótopo que es radiactivo.

**Radionúclido:** Un núclido que es radiactivo.

**Radioquímica:** La producción de núclidos radiactivos y sus compuestos por medio de tratamiento químico de materiales irradiados o de materiales radiactivos naturales; su uso en la dilucidación de problemas químicos ordinarios y el estudio de la técnica especial implicada.

**Rayos x:** Radiación electromagnética resultante de la pérdida de energía extranuclear de partículas cargadas (p. ej. electrones) y que posee una longitud de onda más corta que la radiación ultravioleta.

**rem (equivalente humano del roentgen):** La unidad de dosis equivalente. La dosis absorbida en rads multiplicada por el factor de calidad del tipo de radiación.

**Retroceso:** El movimiento adquirido por una partícula al emitir otra partícula o fotón.

**Roentgen.** La unidad de dosis de exposición de radiación  $x$  o  $\gamma$ . Un roentgen es una dosis de exposición  $x$  o  $\gamma$  tal que la emisión corpuscular asociada por 0.001293 gramos de aire produce, en el aire, iones que portan una unidad electrostática de cantidad de electricidad que puede ser de ambos signos.

**Trampa:** Se le llama trampa a los niveles metaestables de energía que existen en la banda prohibida en los cuales los electrones son capturados hasta que reciben la energía suficiente para escapar.

**Transformación:** El cambio de un núcleo en otro.

**Transición isomérica (TI):** Una transición entre dos estados isoméricos de un núcleo.

**Unidad de masa atómica (uma):** Un doceavo de la masa de un átomo neutro de carbono-12.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Anaya, Ana L.; Hernández, R.; Madrigal, X., "La Vegetación y los Suelos de un Transecto Altitudinal del Declive Occidental del Iztaccihuatl (México)". Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, (INIF / SARH). Boletín técnico N° 65. México (1980).
- Azorín, J. "Luminiscence Dosimetry. Theory & Applications". Ediciones Técnico Científicas., México (1990).
- Azorín, J. "Dosimetría Termoluminiscente". Cuadernos del ININ, serie: divulgación técnico-científica, 2ª Edición. México (1987)
- Azorín, J. "Protección Radiológica II. Dosimetría". Cuadernos del ININ, serie: divulgación técnico-científica. 1ª Edición, México (1988).
- Azorín, J. "El Sistema Internacional de Unidades (SI) y las Ciencias Nucleares". Cuadernos del ININ, serie: divulgación técnico-científica. 2ª Edición, México(1988).
- Carrillo F. Marisol, "Radiactividad Natural y Procesos de Decaimiento Radiactivo". Trabajo escrito-Tesis. F.Q., UNAM, México 1992).
- Harvey, "Nuclear Chemistry". Mc Graw Hill. N.Y. (1975).
- Eisenbud, M. "Environmental Radioactivity". Academic Press. 3ª edición. N.Y: (1987)
- Hall, Eric, J. "Radiation & Life". Pergamon Press.2ª edición. N.Y. (1984).
- Mendenhall., W. "Estadística Aplicada para Administradores". Grupo Editorial Iberoamérica. 2a. edición, México (1990)
- Kathren, Ronald, L. "Radioactivity in the Environment. Sources, Distribution and Surveillance". Harwood Academic Publishers. N.Y. (1984).

- Ostle, B. "Estadística Aplicada. Técnica de la Estadística Moderna, cuando y donde aplicarlos". Limusa Wiley. 8ª reimpresión. México (1983).

Grant, Eugene, L. "Control estadístico de calidad", Mc. Graw Hill. México (1987).

- Turner, James E. "Atoms, Radiation & Radiation Protection". Pergamonn Press. N.Y. (1986).
- Spinks, J.W.T. & Wood, R.J. "An Introduction to Radiation Chemistry". John Wiley & sons. N.Y. (1984).
- Vertes, A. & Kiss, I. "Nuclear Chemistry". Elsevier Publishing. Amsterdam. (1987).
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). "Principles for limiting exposure of the public to the natural sources of radiation". Report N° 39. Pergamon Press. N.Y. (1984).
- International Commission on Radiological Protection (ICRP). "Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. A report of a task group of the ICRP". Report N° 50. Pergamon Press. N.Y. (1987).
- National Council on Radiation Protection. "Radionuclides in the Earth". NCRP Reporte N° 45. Whashington (1987).
- National Council on Radiation Protection "Ionizing Radiation Exposure of the Population of the U.S.". NCRP Report N° 93. Bethesda (1987).
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. "Sources & effects of Ionizing Radiation". UNSCEAR, Anexo A. N.Y. (1977).
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. "Sources & Biological effects". UNSCEAR, Anexo B. Exposure from natural sources of radiation. N.Y. (1982).

- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. "Sources & effects of ionizing radiation". UNSCEAR. Anexo A: "Exposures from natural sources of radiation". N.Y. (1988).
- SPP, DETENAL. "Carta Edafológica: Amecameca (E14B41)". Escala 1: 50 000. 1ª Edición. México (1979).
- SPP, DETENAL. "Carta Geológica: Amecameca (E14B41)". Escala 1: 50 000. 1ª Edición. México (1979).
- SPP-DETENAL. "Guía para la interpretación de cartografía: Geología". 1ª Edición. México (1980).
- SPP-DETENAL. "Guía para la interpretación de cartografía: Edafología". 1ª Edición, México (1980).
- Atlas del Estado de México. Gobierno del estado. UAEM México. (1992).