



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE POTASIO EN
LECHE DESHIDRATADA POR MEDIO DE
LA DETECCIÓN DE LA RADIATIVIDAD DEBIDA
AL POTASIO-CUARENTA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA:

MARIANA JUDITH MACIAS MEDINA



MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Prof. JUAN MANUEL NAVARRETE TEJERO

VOCAL: Prof. BERNARDO LUCAS FLORENTINO

SECRETARIO: Prof. LUZ SANDRA SANCHEZ DEL ANGEL

1er SUPLENTE: Prof. MARIA TERESA PLATA JIMENEZ

2do SUPLENTE: Prof. ILIANA ELVIRA GONZALEZ HERNANDEZ

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

FACULTAD DE QUIMICA, UNAM. DEPARTAMENTO DE QUIMICA INORGANICA Y NUCLEAR,
EDIFICIO D, LABORATORIO 205. CIUDAD UNIVERSITARIA.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. JUAN MANUEL NAVARRETE TEJERO

SUSTENTANTE:

MARIANA JUDITH MACIAS MEDINA

DEDICATORIA.

Gracias...

A Dios, por el camino recorrido...

A mi Hija Luna, por ser mi fuerza e ilusión...

A mis Padres, por su amor, comprensión y apoyo...

A mis hermanos, por su cariño y compañía...

A la vida...Por lo aprendido

Con agradecimiento especial a mí asesor de tesis: Dr. Juan Manuel Navarrete Tejero

Gracias a mi Honorable Jurado

Detrás de cada línea de llegada, hay otra de partida.

Detrás de cada logro, hay otro desafío.

Si extrañas lo que hacías vuelve a hacerlo.

Sigue aunque todos esperen que abandones.

No dejes que se oxide el hierro que hay en ti.

CONTENIDO

	Página
I. OBJETIVOS.....	7
II. INTRODUCCIÓN.....	9
III. ASPECTOS GENERALES Y FUNDAMENTALES DE LA RADIOACTIVIDAD.....	12
III .1) RADIOACTIVIDAD. VISIÓN GENERAL.....	13
III .1.1) LEY DEL DECAIMIENTO RADIOACTIVO Y VELOCIDAD DE DESINTEGRACION	
III .2) TIEMPO DE VIDA MEDIA.....	16
III .3) INTERACCION DE LAS RADIACIONES NUCLEARES CON LA MATERIA.....	17
III .3.1) TRAYECTORIA DE LAS PARTICULAS ALFA	
III .3.2) ALCANCE O RANGO DE PARTICULAS ALFA	
III .3.3) ESPECTRO DE PARTICULAS ALFA	
III .3.4) TRAYECTORIA DE PARTICULAS BETA	
III .3.5) CURVA DE ABSORCIÓN DE PARTICULAS BETA	
III .3.6) RADIACION BETA DE ANIQUILACION	
III .3.7) ANALISIS FEATHER	
III .3.8) ESPECTRO DE LAS PARTICULAS BETA	
III .4) INTERACCION DE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS CON LA MATERIA.....	20
III .4.1) EFECTO FOTOELECTRICO	
III .4.2) EFECTO COMPTON	
III .4.3) PRODUCCION DE PARES	
III .4.4) ABSORCION DE RAYOS GAMMA	
III .4.5) ESPECTRO GAMMA	
IV. RIESGOS Y CONTAMINACION RADIOACTIVA.....	26
IV .1) EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES.....	27
IV .1.1) UNIDADES EN LAS QUE SE EXPRESA LA RADIOACTIVIDAD	
IV .1.2) DAÑO BIOLÓGICO POR RADIACIONES	
IV .1.3) EFECTOS DE LA RADIACIÓN EN LAS CÉLULAS	
IV .1.4) EFECTOS DE LA RADIACION EN ORGANOS VITALES	
IV .1.5) CLASIFICACION DE LOS ASPECTOS	

IV.2 ISÓTOPOS Y RADIATIVIDAD.....	34
IV .2.1) RADIOISOTOPOS DE ORIGEN NATURAL Y ARTIFICIAL	
IV .2.2) RADIATIVIDAD NATURAL	
IV .2.3) RADIATIVIDAD ARTIFICIAL	
IV.3. CONTAMINACION RADIATIVA EN ALIMENTOS.....	42
IV.3.1) IMPORTANCIA TOXICOLOGICA DE LOS RADIONUCLIDOS PRESENTES EN ALIMENTOS	
IV.3.2) RADIONUCLIDOS DE OCURRENCIA NATURAL EN ALIMENTOS	
VI .3.1) ^{40}K	
VI .3.2) ^{226}Ra	
VI .3.3) ^{238}U	
VI .3.4) ^{210}Pb y ^{210}Po	
VI .3.5) ^{14}C y TRITIO	
IV .3.3) RADIONUCLIDOS ARTIFICIALES EN ALIMENTOS	
VI .4.1) ^{137}Cs	
VI .4.2) ^{238}Pu , ^{239}Pu y ^{240}Pu	
VI .4.3) ^{131}I	
VI .4.4) ^{90}Sr	
IV .4) RADIONUCLIDOS PRESENTES EN LECHE	
V. DETECCION Y CUANTIFICACION DE LA RADIATIVIDAD.....	63
V .1) RADIACION DE FONDO.....	54
V .2) DETECTORES DE IONIZACION DE GASES.....	55
V .2.1) CONTADORES GEIGER-MULLER	
V .2.2) CONTADORES PROPORCIONALES	
V .3) CONTADOR DE CENTELLEO.....	56
VI. ACCIDENTES NUCLEARES.....	61
VI .1) ACCIDENTES NUCLEARES.....	62
VI .2) NORMALIZACION.....	64

VII. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	66
VII .1) EQUIPO DE DETECCION.....	67
VII.1.1) CONTENEDOR MARINELLI	
VII.1.2) ESTANDAR MULTINUCLIDO	
VII.1.3) ESPECTROMETRO GAMMA	
VII.2) METODO.....	68
VII.2.1) CALIBRACION DE LA ENERGIA	
VII.2.2) CALIBRACION DE LA EFICIENCIA	
VII.2.3) PREPARACION DE MUESTRAS	
VII.2.4) MEDICION	
VII.2.5) DETERMINACION DE LA CONCENTRACION DE LOS RADIONUCLIDOS	
VII.2.6) DETERMINACION DEL CONTENIDO DE POTASIO ELEMENTAL	
VIII. RESULTADOS.....	74
IX. ANALISIS DE RESULTADOS.....	81
X. CONCLUSIONES.....	85
XI. BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXOS.....	91

CAPITULO I.
OBJETIVOS

CAPITULO I.

OBJETIVOS

Los principales objetivos que se plantean en la realización de esta investigación sobre el **“Análisis cuantitativo de potasio en leche deshidratada por medio de la detección de la radiactividad debida al ⁴⁰k”** son los siguientes:

1. Objetivo general.

- Determinar la cantidad de potasio elemental, presente en muestras de leche en polvo, realizando un estudio comparativo entre la radioactividad natural y la contaminación radiactiva.

2. Objetivos específicos.

- Determinar y comparar la actividad del ⁴⁰K y del ¹³⁷Cs presentes en una leche en polvo contaminada por radiactividad, utilizando la técnica de espectrometría de rayos gamma.
- Comparar los niveles ⁴⁰K y del ¹³⁷Cs en muestras de leche en polvo contaminada por fuentes radiactivas artificiales, contra muestras no contaminadas por dichas fuentes.
- Conocer la cantidad de potasio total presente en las leches en polvo a analizar.

CAPITULO II
INTRODUCCIÓN.

CAPITULO II

INTRODUCCIÓN.

Desde el origen de la vida, hemos estado expuestos a radiaciones provenientes de fuentes naturales de radiación las cuales provienen, de los rayos cósmicos, del espacio exterior y están presentes en el aire, el suelo, las rocas, el agua etc. Mas sin embargo la radiactividad natural, no es la única fuente de radiactividad existente ya que a principios del siglo pasado el hombre mismo ha generado y utilizado energía nuclear a partir de centrales nucleares, aparatos para usos médicos, lluvia radiactiva de armas nucleares, y por consiguiente desechos radiactivos que no ha podido controlar. A esta radiactividad generada por el hombre se le denomina radiactividad artificial o contaminante.

De estas dos fuentes de radiación existentes, la radiactividad natural es la que más contribuye a las dosis colectivas que recibe la población mundial, teniendo que, cierta parte de esta actividad se halla presente en los alimentos.

Nosotros ingerimos pequeñas cantidades de radiación de forma natural a nuestro organismo, a través de los alimentos que consumimos ya que contienen algunos elementos radiactivos llamados radioisótopos o radionúclidos los más significativos en alimentos son el potasio-40, el radio 226, el uranio-228 y el carbono-14.

Por lo mencionado anteriormente es importante conocer los niveles de radiactividad natural monitoreando las cercanías de las plantas nucleares, los mares, la atmósfera, los suelos de cultivo, los alimentos etc. Por esto, se hace importante plantear técnicas de detección de radiactividad, estableciendo que el estudio de radioisótopos es de utilidad no solo para conocer o controlar las características radiactivas si no para utilizarlas en aplicaciones científicas, medicas e industriales.

El presente trabajo pretende plantear una técnica para la determinación de potasio elemental en muestras de leche en polvo, por medio de la detección radiactiva del potasio-cuarenta. La determinación se lleva a cabo a través del cálculo de la actividad de este radioisótopo, por medio de un detector de centelleo que nos proporciona el dato acerca del número de núcleos decayendo por unidad de tiempo de las muestras analizadas el cual nos permite realizar el análisis cuantitativo del potasio en la muestra, además de determinar si este producto industrial presenta alguna contaminación radiactiva por algún radioisótopo artificial.

A partir del accidente nuclear de Chernobyl (1986) en el que una serie de alimentos incluida la leche resultaron estar contaminados por radiactividad. La posibilidad de la liberación accidental de productos radiactivos debido al mal funcionamiento de las centrales nucleares o alguna otra contaminación proveniente de la producción de radioisótopos esta latente, por ello la importancia que se debe de ejercer en el control de la radioactividad en los alimentos.

CAPITULO III.
ASPECTOS GENERALES Y FUNDAMENTALES DE LA RADIOACTIVIDAD.

III .1) RADIOACTIVIDAD. VISIÓN GENERAL

III .1.1) LEY DEL DECAIMIENTO RADIOACTIVO Y VELOCIDAD DE DESINTEGRACION

III .2) TIEMPO DE VIDA MEDIA

III .3) INTERACCION DE LAS RADIACIONES NUCLEARES CON LA MATERIA

III .3.1) TRAYECTORIA DE LAS PARTICULAS ALFA

III .3.2) ALCANCE O RANGO DE PARTICULAS ALFA

III .3.3) ESPECTRO DE PARTICULAS ALFA

III .3.4) TRAYECTORIA DE PARTICULAS BETA

III .3.5) CURVA DE ABSORCIÓN DE PARTICULAS BETA

III .3.6) RADIACION BETA DE ANIQUILACION

III .3.7) ANALISIS FEATHER

III .3.8) ESPECTRO DE LAS PARTICULAS BETA

III .4) INTERACCION DE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS CON LA MATERIA

III .4.1) EFECTO FOTOELECTRICO

III .4.2) EFECTO COMPTON

III .4.3) PRODUCCION DE PARES

III .4.4) ABSORCION DE RAYOS GAMMA

III .4.5) ESPECTRO GAMMA

CAPITULO III.

ASPECTOS GENERALES Y FUNDAMENTALES DE LA RADIATIVIDAD.

III .1) RADIATIVIDAD. VISIÓN GENERAL.

La radiactividad fue descubierta en 1896, por Henri Becquerel, como una consecuencia directa del descubrimiento de los rayos X por Roëntgen, algunos meses antes. Becquerel estaba trabajando con una sal de uranio, cuándo encontró que emitía radiaciones similares a los rayos X, con un considerable poder de penetración. El término actual: radiactividad, no aparece sino un año después en una publicación por Pierre y Marie Curie sobre sus investigaciones químicas de la peblend, un mineral conteniendo radio y uranio¹⁸.

La materia es radiactiva cuando los núcleos atómicos emiten partículas subnucleares, o radiación electromagnética característica, sin masa ni carga, teniendo lugar un intercambio de energía al mismo tiempo.

III.1.1) LEY DEL DECAIMIENTO RADIOACTIVO Y VELOCIDAD DE DESINTEGRACIÓN.

Un núclido es un átomo con una constitución nuclear característica, es decir, un número atómico determinado y un número de masa específico. Por tanto, el número de neutrones (representado por N) es la diferencia entre el número de masa y el número atómico $N = A - Z$. Si son colocados los números masa y atómico a la izquierda del símbolo que corresponde a su elemento, tendremos un núclido completamente caracterizado.

Son llamados isótopos los núclidos que tienen el mismo valor de número atómico (Z), pero diferentes valores de número de masa (A) y de número de neutrones (N). Por ejemplo ³¹P y ³²P, que difieren en un neutrón, siendo el primero un isótopo inerte que forma el 100% del fósforo en la naturaleza y el segundo un isótopo radiactivo, es decir un radioisótopo.

Los radionúclidos radiactivos, son elementos con un núcleo inestable el cual decae o se degrada a intervalos de tiempo predecibles, emitiendo partículas o rayos, perdiendo masa o pura energía, y convirtiéndose en algún otro elemento si ocurre en el primer caso o el mismo elemento en otro estado de energía en el segundo. Este es un proceso espontáneo y al azar, independiente de factores externos.

Cuando un isótopo cambia a otra especie por la emisión de rayos alfa, beta o gama, la nueva forma puede resultar también inestable, y sufrir así mismo un decaimiento. Eventualmente se llegara a una forma estable, pero deben ocurrir muchas etapas antes de que eso se alcance. Un ejemplo es el potasio cuarenta que decae o declina muy lentamente a la forma argón cuarenta emitiendo radiación beta⁴.

Las radiaciones emitidas por el núcleo atómico son de 4 especies principales:

1) Partículas α , que consisten en 2 neutrones asociados con 2 protones. Pueden ser consideradas como núcleos de átomos de helio. Tienen una masa de 4 u.m.a. y 2 cargas positivas. Si un núcleo atómico es radiactivo y emite una partícula α . Pierde 2 unidades en carga y 4 unidades de masa. Este átomo se convierte en otro elemento, con número atómico menor (numero de protones ha disminuido 2 unidades) y número de masa menor (número de protones más neutrones que han disminuido 4 unidades). Esto significa que los elementos radiactivos que decaen por partículas α pasan a ocupar un sitio 2 lugares a la izquierda de su colocación a la tabla periódica.

2) Las partículas β son partículas de masa despreciable (su masa es la del electrón o sea aproximadamente $1/1832$ de aquella del protón y $1/1834$ de aquella del neutrón) y presentan carga positiva o negativa. Un negatrón (β^-) es un electrón emitido por el núcleo, el cual aumenta 1 unidad su carga positiva al transformar un neutrón en protón por lo tanto el número atómico aumenta 1 unidad a la derecha en la tabla periódica y número de masa positrón (β^+), es emitida cuando un protón se transforma en neutrón y una partícula de la misma masa que el electrón pero con carga positiva es emitida por el núcleo. El número atómico decrece 1 unidad y el elemento se corre a la izquierda de la tabla periódica.

3) Los neutrones son partículas sin carga teniendo una masa aproximadamente 1 u.m.a. Por tanto los núcleos perdiendo neutrones no cambian su número atómico pero su numero de masa disminuye una unidad por cada neutrón emitido. La emisión de neutrones se produce durante los eventos de fisión nuclear de metales pesados o por reacciones nucleares características.

4) Los rayos gama (γ) son radiaciones electromagnéticas, similares a los rayos X, la luz u ondas de radio, pero con mucho menor longitud de onda y en consecuencia mucho mayor energía. Los rayos γ , al igual que los rayos X, tienen energías bien definidas ya que son producidos por la transición de los niveles de energía del átomo, pero mientras los rayos gamma son emitidos por el núcleo, los rayos X, resultan de las

transiciones de energía de los electrones fuera del núcleo u orbitales. Los rayos gamma son a menudo llamados fotones, cuando se consideran como paquetes de energía con valor constante emitidos por un núcleo radiactivo al decaer¹⁸.

Cada núcleo radiactivo de un radioisótopo particular tiene la misma posibilidad de desintegración en la unidad de tiempo. Esta probabilidad se mide por la constante de decaimiento λ , característica para cada especie radiactiva. Si a un tiempo dado t_0 existen N átomos radiactivos, y dN de estos átomos decaen en un tiempo dt , tenemos que:

$$dN = -\lambda N dt \qquad dN/dt = -\lambda N$$

Siendo ésta la ecuación fundamental de decaimiento radiactivo. El signo negativo es necesario para indicar N disminuye con el tiempo. dN/dt es el número de núcleos radiactivos que decaen en la unidad de tiempo emitiendo radiaciones, es decir la rapidez o velocidad de desintegración o decaimiento, llamada también actividad o radiactividad, en términos la medición de este fenómeno.

La actividad es directamente proporcional a número de átomos radiactivos originalmente presentes, por lo que:

$$A = -dN/dt = \lambda N$$

Esta es la ecuación fundamental del decaimiento radiactivo, en donde la λ es la constante de decaimiento característica para cada especie reactiva y representa la probabilidad de desintegración del radionúclido en la unidad de tiempo¹⁸.

Integrando la ecuación anterior se tiene:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln N / N_0 = -\lambda t$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

En donde: N_0 = número inicial de átomos radiactivos y N = número de átomos al tiempo t .

Ahora definiendo la actividad como el número de núcleos decayendo por unidad de tiempo, tenemos:

$$A = dN / dt = -\lambda N$$

$$A_0 = dN_0 / dt = -\lambda N_0$$

Por lo tanto tenemos:

$$A / A_0 = N / N_0 = e^{-\lambda t}$$

Y así la expresión matemática de la ley del decaimiento radiactivo puede ser formulada:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

La unidad de radiactividad es el curie o curio (ci), que se define como cualquier material radiactivo que sufre 3.7×10^{10} desintegraciones por segundo (dps) ó 2.22×10^{12} desintegraciones por minuto (dpm), las cuales equivalen aproximadamente a la velocidad de decaimiento de 1g de radio. Existe otra unidad, menos utilizada, el Rutherford, que se abrevia rd y se define como la cantidad de cualquier material radiactivo que rinde 10^6 desintegraciones por segundo. O sea que $1 \text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{rd}$. Más sin embargo en los últimos años, ha sido creada otra unidad para medir la radiactividad, el Becquerel, que se abrevia Bq y se define como la cantidad de cualquier material radiactivo que sufre una desintegración por segundo¹⁸. En consecuencia, $1 \text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$ y $1 \text{Bq} = 2.7 \times 10^{11} \text{Ci}$.

III .2) TIEMPO DE VIDA MEDIA.

Un parámetro importante que rige la tasa de generación de energía es la llamada vida media de un isótopo radiactivo, que es el tiempo requerido para que la mitad de los átomos inestables originalmente presentes declinen hasta originar una nueva forma isotópica¹¹.

Cuando la actividad, no importa cual sea su nivel a un tiempo dado t_0 , alcanza un valor igual a la mitad del inicial después de transcurrido el tiempo $t_1/2$, tendremos:

$$A/A_0 = 1/2, e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$\ln 1 - \ln 2 = -\lambda t_{1/2}$$

$$0 - 0.693 = -\lambda t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = 0.693/\lambda$$

Tenemos que la vida media ($t_{1/2}$)

$$\ln 1/2 = -\lambda t_{1/2}$$

Así que:

$$t_{1/2} = \ln 2/\lambda = 0.693/\lambda$$

Este valor del tiempo $t_{1/2}$, es llamado la vida media del radioisótopo en cuestión, misma que se define como el tiempo tomado por cualquier actividad inicial de un radionúclido particular para ser reducida a la mitad. Es decir, el tiempo característico de cada especie radiactiva necesario para reducir a la mitad el número de núcleos presentes¹⁰.

De la naturaleza exponencial de la ley de decaimiento radiactivo se sigue que transcurridas dos vidas medias la actividad es reducida a $A_0/4$ y después de n vidas medias a $A_0/2^n$.

Si la vida media de un radionúclido es conocida, es posible trazar su gráfica de decaimiento característico, tomando la actividad inicial como 100% y la mitad (50%) de esta sobre una escala logarítmica de ordenadas empleando como valor correspondiente a la abscisa el de su vida media. Si la vida media es desconocida, puede obtenerse de la línea recta de decaimiento característica, trazando una gráfica del tiempo transcurrido contra el logaritmo de actividad¹⁸.

III .3) INTERACCION DE LAS RADIACIONES NUCLEARES CON LA MATERIA.

Las radiaciones nucleares interactúan fuertemente con la materia, por causa de sus altas energías. La interacción puede describirse proporcionando la naturaleza del proceso y la distancia de trayectoria o penetración, antes de que la energía descienda al nivel térmico. Ambos aspectos sugieren métodos para la detección y uso de la radiactividad. Las interacciones varían con la masa, carga y la energía de la radiación, así como con las mismas propiedades del medio.

III .3.1) Trayectoria de las partículas α .

Las partículas alfa consisten en la asociación de 2 protones y 2 neutrones, resultan ser extremadamente pesadas y grandes en relación a los otros tipos de radiación nuclear. Cuando una partícula alfa incide sobre un electrón, lo despiende fuera del átomo sin que su trayectoria sea modificada. Como un ejemplo, si las partículas alfa de un emisor dado tienen una energía de 5MeV y pierden 30eV por cada par iónico producido, causando una ionización específica de 4×10^3 pares iónicos/mm, la distancia recorrida o longitud de su trayectoria (L) será de:

$$L = 5 \times 10^6 / 4 \times 10^3 \times 30 = 5 \times 10^6 / 1.2 \times 10^5 = 41.6 \text{ mm} = 4.16 \text{ cm}$$

De este modo, La trayectoria de las partículas alfa es muy corta, debido a que por su tamaño y peso su ionización específica es muy grande, o sea que entregan su energía en gran número de colisiones durante un corto trayecto¹⁸.

III .3.2) Alcance o rango de partículas alfa.

El espesor de materia que las partículas alfa pueden atravesar antes de perder toda su energía es llamado alcance o rango de las partículas. Así el alcance o rango es función de la energía de las partículas. Una partícula alfa de 3 MeV tiene un alcance de 1.6 cm en aire y será parada por una hoja de aluminio con un espesor de aproximadamente 0.015mm. Por tanto, la energía puede ser determinada al obtenerse el alcance por un procedimiento experimental que consiste en la absorción de las partículas en espesores conocidos de materia. En el caso de las partículas alfa, todas tienen la misma energía para un emisor dado y sólo pueden recorrer trayectorias muy cortas. Una ecuación que expresa el alcance como una función de la energía, para partículas alfa entre 4 y 7 MeV viajando en aire, es:

$$A = 0.309 E^{3/2}$$

Donde:

A= alcance en cm. para partículas alfa atravesando aire.

E= energía de las partículas alfa en MeV.

El alcance en otros materiales puede ser aproximado por la ecuación:

$$A_M = 0.519E^{3/2}$$

A_m = alcance de las partículas alfa en cualquier absorbedor, expresado en unidades de espesor másico (mg./cm²)

E = Energía de las partículas alfa en MeV.

La unidad de espesor másico (mg./cm²) es comúnmente empleada en medidas de alcance y de energía. Se obtiene multiplicando el espesor lineal por la densidad de un material absorbedor dado, de modo que el alcance de las partículas alfa y beta pueda ser expresado en unidades de espesor másico, con valores fijos para una energía determinada¹⁸.

III .3.3) Espectro de las partículas alfa.

Ya que todas las partículas alfa emitidas por un radioisótopo dado tienen la misma energía, serán paradas como un todo por un determinado espesor de materia y su espectro o distribución de energía mostrará un pico correspondiente a su energía característica. O sea que si es trazada una gráfica de energía contra actividad de partículas alfa emitidas por un radioisótopo determinado, será obtenido un pico en el valor determinado de su energía. En el caso del espectro de las partículas alfa, se obtienen pulsos de un solo tamaño correspondientes a la naturaleza monoenergética de la radiación¹⁸.

III .3.4) Trayectoria de las partículas β^- .

Las partículas β^- son mucho más pequeñas y ligeras que las partículas alfa y se mueven más rápidamente. En consecuencia, causan una ionización específica menor y su trayectoria resulta más larga. Si suponemos, que la energía de una partícula beta particular es de 1 MeV y la ionización específica causada por ella es de 4 pares iónicos/mm, perdiendo 30 eV en cada par iónico producido, la distancia recorrida o longitud de su trayectoria (L) será:

$$L = 1 \times 10^6 / 4 \times 30 = 1 \times 10^6 / 1.2 \times 10^2 = 0.83 \times 10^4 \text{ mm} = 8.3 \text{ m}$$

Una partícula beta puede tener una energía desde casi cero hasta un valor máximo determinado por la cantidad de energía disponible en la transformación nuclear. Por tanto las partículas beta emitidas por un específico núclido radiactivo, tienen su propia energía máxima característica, es decir, que sólo las más energéticas podrán atravesar los mayores espesores de materia mientras las más débiles son absorbidas por él. En esta forma, el espesor de materia, usualmente expresado en términos de espesor másico, que resulta

capaz de parar o absorber las partículas beta de máxima energía emitidas por un radioisótopo, es llamado su rango o alcance máximo¹⁸.

La energía promedio de las partículas beta emitidas por una fuente dada, es aproximadamente 1/3 de su energía máxima, y ésta es la cifra utilizada para cálculos de la velocidad de emisión y absorción de energía.

III .3.5) Curva de absorción de partículas beta.

Cuando absorbedores de un material ligero como el aluminio son interpuestos entre un emisor beta puro y un detector adecuado, la curva que relaciona los diferentes espesores de material (expresado en mg/cm²) con el logaritmo de las actividades detectadas es llamada la curva de absorción beta de ese emisor en particular¹⁸.

III 3.6) Radiación de aniquilación.

Las partículas β^+ o positrones interactúan con electrones, produciendo lo que se llama la radiación de aniquilación, que consiste en dos rayos gamma de 0.51 MeV cada uno, que se producen cuando el positrón desaparece al mismo tiempo que el electrón con el cual interactúa¹⁸.

III .3.7) Análisis de Feather.

Si las partículas beta son acompañadas de radiación gamma en un decaimiento radiactivo en dado, la curva de absorción será considerablemente alterada al detectarse los dos tipos de radiación simultáneamente, obteniéndose al principio de la curva la absorción de las partículas betas y al final la contribución de los rayos gamma, los cuales son poco afectados por los absorbedores y cuya detección permanece casi constante¹⁸.

III .3.8) Espectro de las partículas beta.

El hecho de que las partículas beta de un emisor dado tengan todas diferentes energías hasta un máximo determinado por el cambio de masa ocurrido en la transformación nuclear, ha sido explicado postulando la existencia del neutrino y el antineutrino, partículas sin carga de masa despreciable. De acuerdo a esta teoría, la energía es compartida entre la partícula beta y el antineutrino en proporciones variables, dando así lugar a

un espectro continuo cuando es trazada una gráfica de energía contra número de partículas detectadas o actividad¹⁸.

III .4) INTERACCIÓN DE LAS RADIACIONES ELECTROMAGNÉTICAS CON LA MATERIA.

Los rayos gama son emitidos por el núcleo, cuando éste se encuentra en un estado de excitación y decae a un nivel inferior de energía. La emisión de rayos X tiene lugar cuando ocurre una transición entre un estado de excitación del átomo a otro de inferior energía, por el cambio de un electrón a una órbita interior. Como estos procesos ocurren entre dos niveles definidos de energía, las radiaciones resultantes tienen una dimensión energética específica. La energía de los rayos gama abarca un intervalo de keV a MeV en tanto que aquella de los rayos X va de valores próximos a cero hasta 50 keV. El modo de interacción de los rayos X y gama con la materia es el mismo en esencia, difiriendo solamente en la cantidad de energía que disipan en la materia al ser absorbidos. La ionización específica promedio es 1/100 de aquélla causada por las partículas beta, de manera que la mayor parte de la ionización causada por los rayos X o gama resulta ionización secundaria. Los 3 mecanismos de interacción de la radiación electromagnética con la materia son:

III .4.1) Efecto fotoeléctrico.

El fotón interacciona con el absorbedor como un paquete de energía que es completamente absorbido. Este efecto tiene lugar cuando se trata de radiaciones electromagnéticas de baja energía. Como resultado de la energía absorbida, un electrón, llamado fotoelectrón, es lanzado fuera del átomo desde una órbita exterior al núcleo con una energía cuyo valor es dado por la relación:

$$E_{e^-} = E_{\gamma} - E_{e.a.}$$

Donde:

E_{e^-} = Energía del fotoelectrón

E_{γ} =Energía del rayo gamma absorbido

$E_{e.a.}$ = Energía de amarre del electrón lanzado.

El fotoelectrón, a su vez, pierde energía causando producción de pares iónicos. La vacante orbital es ocupada por otro electrón proveniente de órbitas exteriores, o sea de superiores niveles de energía, emitiéndose un rayo X con una energía específica, igual a la diferencia entre las energías de amarre de los electrones a ambos niveles. Pero en vez del rayo X, esta energía puede ser transferida a otro electrón en una órbita cercana al núcleo con un nivel bajo de energía, mismo que es lanzado del átomo y se conoce como electrón Auger¹⁸.

III .4.2) Efecto Comptón

Cuando un rayo gamma tiene una mayor energía que en el efecto fotoeléctrico, no es absorbido completamente en una colisión. Al causar el lanzamiento de un electrón, desvía su trayectoria para continuarla con menor energía, mayor longitud de onda y en consecuencia menor frecuencia, con mejor oportunidad de encontrar electrones en su camino a quienes comunicarles su energía. La energía del rayo dispersado se obtiene por la relación.

$$Eg_2 = Eg_1 - Ee.a$$

Donde:

Eg_2 = Energía del rayo dispersado.

Eg_1 = Energía del rayo incidente.

$Ee.a$ = Energía de amarre del electrón lanzado.

El rayo dispersado puede sufrir varias colisiones, antes de ser absorbido por efecto fotoeléctrico. Si el electrón lanzado pertenece a una órbita cercana al núcleo de bajo nivel energético, tendrá lugar la emisión de rayos X o el electrón Auger, igual que durante el efecto fotoeléctrico¹⁸.

III .4.3) Producción de pares.

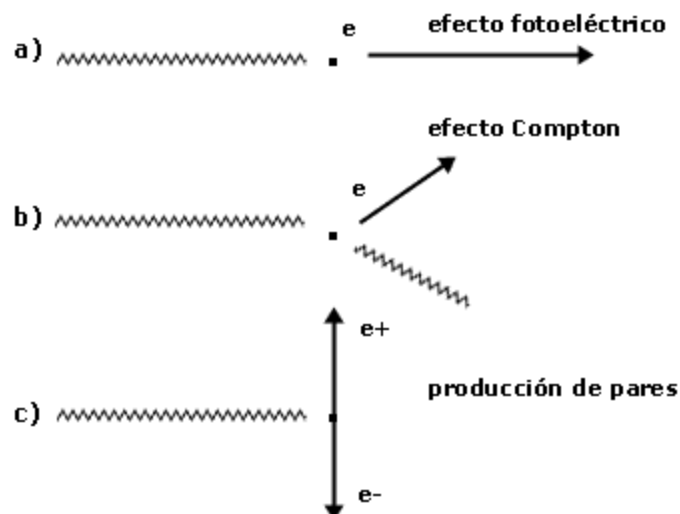
Cuando la energía del rayo gamma incidente es muy alta, al ser absorbido por la materia se transforma en masa y produce 2 partículas beta, una negativa y una positiva. Como 2 masas de electrón son producidas, es necesario al menos una equivalente a ellas ($2 \times 0.51 = 1.02$ MeV). Si la energía del rayo gamma inicial es mayor que este valor del umbral, el exceso aparecerá como energía cinética del par formado. El negatrón a

su vez causa ionización y el positrón existe hasta que interacciona con otro electrón para aniquilar el par, produciéndose ahora dos rayos gamma de 0.51 MeV cada uno, conocidos como radiación de aniquilación puede ser considerado hasta cierto punto como el inverso de la producción de pares.

De este modo, el efecto fotoeléctrico es el predominante de rayos gamma con energías menores de 60 keV cuando atraviesan aluminio y menores a 600 keV si plomo es el medio de absorción. El efecto Compton predomina para energías de rayos gamma entre 60 keV y 1.5 MeV en aluminio y entre 600 keV y 5 MeV en plomo. La producción de pares es el principal mecanismo de interacción para energías mayores al límite donde se produce el efecto Compton.

Debe tomarse en cuenta, que la emisión e interacción de las radiaciones con la materia están en relación muy estrecha. Así, frecuentemente en vez de emitir un rayo gamma, el núcleo interacciona con sus capas electrónicas externas y causa la emisión de un electrón con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía del rayo gamma y la energía de amarre del electrón. Este proceso se denomina conversión interna y estos electrones se conocen como electrones por conversión. Al mismo tiempo, puede tener lugar la emisión de rayos X cuando la vacante es ocupada por otro electrón de una capa exterior de mayor energía, o en su lugar producirse la emisión de electrones Auger por un mecanismo similar a la conversión interna¹⁸.

Figura. 1. Interacción de las radiaciones electromagnéticas con la Materia⁵.



III .4.4) Absorción de rayos gamma.

Cuando un flujo de rayos gama pasa a través de la materia, el número de radiaciones detectadas decrece exponencialmente con el espesor del material absorbente. Por tanto, existe una relación análoga a la ley fundamental del decaimiento radiactivo. Los rayos gamma son absorbidos según la ley exponencial caracterizada por un espesor medio y un coeficiente de absorción. El coeficiente de absorción lineal es una función de la energía de radiación y de la densidad del medio absorbente. Si llamamos I_0 a la intensidad inicial de un flujo de rayos gamma, medida en términos de cuentas por unidad de tiempo en un sistema de detección, X al espesor en centímetros de un determinado material colocado entre la fuente radiactiva y el detector, y μ al coeficiente de absorción lineal de ese determinado material, tendremos que la intensidad I de rayos gamma después de atravesar el material, estará dada por la expresión:

$$I = I_0 e^{-\mu X}$$

Se llama espesor medio o capa hemireductora al espesor de material absorbente requerido para obtener la mitad de los rayos gamma incidentes. Cuando $I = I_0/2$, la relación entre el espesor medio $X_{1/2}$ y el coeficiente de absorción μ será igual a aquella entre la vida media y el coeficiente de decaimiento¹⁸.

$$X_{1/2} = 0.693 / \mu$$

Si el espesor X del material absorbente es expresado en unidades de espesor másico (g/cm^2) en vez de unidades de longitud (usualmente cm), entonces el coeficiente de absorción μ tendrá también otro valor numérico al ser expresado en unidades diferentes. En este caso cambia su nombre por el coeficiente de absorción másico, el cual puede ser obtenido dividiendo el coeficiente de absorción lineal μ expresado en cm^{-1} por la densidad D del material absorbente expresado en g/cm^3 .

$$\mu \text{ (absorción másico, } cm^2/g) = \mu \text{ (absorción lineal, } cm^{-1}) / D \text{ (g/cm}^3)$$

III .4.5) Espectro γ .

Cuando los rayos γ son absorbidos por la materia, su energía es transferida al absorbedor, teniendo lugar los efectos fotoeléctrico, Compton y producción de pares. Si los rayos γ son absorbidos por el detector adecuado, esta energía es transformada en pulsos de corriente, cuya altura es proporcional a la energía del rayo absorbido. Los dos tipos de detectores más usados para producir estos pulsos son conocidos como detectores de centelleo y detectores semiconductores. Si los pulsos son aceptados o rechazados según su altura por un equipo electrónico adicional conectado al detector, son registrados solo aquellos de un determinado tamaño.

En esta forma, registrando sucesivamente pulsos producidos por rayos gamma de una energía dada, podremos trazar un diagrama de energía de las radiaciones contra actividad detectada, el cual mostrará picos en los lugares correspondientes a la energía característica de los rayos gamma absorbidos por el detector. Estos picos son producidos por los rayos cuya energía total es absorbida, pero algunos otros ceden sólo una fracción de la misma y escapan del sistema. Estas fracciones de energía absorbida son variables y producen pulsos más pequeños. Así una región ancha y baja aparecerá antes del pico correspondiente a una energía del rayo gamma totalmente absorbida. Un diagrama de este tipo es llamado un espectro gamma.

En el espectro del ^{137}Cs , aparece un pico en el lugar correspondiente a su energía característica y la zona previa llamada distribución Compton, que corresponde a radiaciones que han entregado parte de su energía.

La selección de altura de pulsos puede realizarse, por medio de un discriminador que permite que sean registrados por el escalador anexo sólo pulsos sobre un cierto tamaño mínimo. De esta manera puede ser obtenida la curva integral de un espectro gamma. Pero la distribución de altura de pulsos o señales electrónicas se obtiene directamente con un analizador monocanal, instrumento que cuenta con dos discriminadores para dejar pasar sólo señales de una cierta altura entre un máximo y un mínimo fijados por los discriminadores, esto es, deja llegar al escalador sólo pulsos que por su altura pueden pasar por una ventana de un ancho fijado por los discriminadores, misma que puede ser corrida a lo largo de varias alturas correspondientes a otras energías de los rayos gamma¹⁸.

CAPITULO IV.
RIESGOS Y CONTAMINACION RADIATIVA

IV .1) EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES

- IV .1.1) DAÑO BIOLÓGICO POR RADIACIONES
- IV .1.2) EFECTOS DE LA RADIACIÓN EN LAS CÉLULAS
- IV .1.3) EFECTOS DE LA RADIACION EN ORGANOS VITALES
- IV .1.4) CLASIFICACION DE LOS ASPECTOS BIOLÓGICOS

IV .2) ISOTOPOS Y RADIOACTIVIDAD

- IV .2.1) RADIOISOTOPOS DE ORIGEN NATURAL Y ARTIFICIAL
- IV .2.2) RADIOACTIVIDAD NATURAL
- IV .2.3) RADIOACTIVIDAD ARTIFICIAL

IV .3) CONTAMINACION RADIATIVA EN ALIMENTOS

- IV.3.1) IMPORTANCIA TOXICOLOGICA DE LOS RADIONUCLIDOS PRESENTES EN ALIMENTOS.
- IV.3.2) RADIONUCLIDOS PRESENTES EN ALIMENTOS
- IV.3.3) RADIONUCLIDOS DE OCURRENCIA NATURAL EN ALIMENTOS.
- IV .3.4) RADIONUCLIDOS ARTIFICIALES EN ALIMENTOS
- IV.3.5) RADIONUCLIDOS PRESENTES EN LECHE

CAPITULO IV.

RIESGOS Y CONTAMINACION RADIATIVA.

IV.1) EFECTOS BIOLÓGICOS DE LAS RADIACIONES.

Los efectos que la radiación tiene sobre los organismos vivos, resulta importante y por ende es fundamental tomar medidas necesarias para protegerse de ella.

Como muchos otros agentes físicos, químicos o biológicos, las radiaciones ionizantes son capaces de producir daños orgánicos. Esto es en virtud de que la radiación interacciona con los átomos de la materia viva, provocando en ellos principalmente el fenómeno de ionización. Luego esto da lugar a cambios importantes en células, tejidos, órganos, y en el individuo en su totalidad. El tipo y la magnitud del daño dependen del tipo de radiación, de su energía, de la dosis absorbida (energía depositada), de la zona afectada, y del tiempo de exposición⁴.

En general, decimos que las fuentes de radiación a las que estamos expuestos pueden ser externas fuera de nuestro cuerpo o internas, material radiactivo que ingresa al organismo por inhalación, ingestión o heridas en la piel; los radionúclidos que ingresan al cuerpo se conocen como emisores internos.

En el presente estudio nos ocupan principalmente las fuentes de radiación internas por tratarse de radiactividad en los alimentos que son ingeridos.

IV.1.1.) Unidades en las que se expresa la radiactividad.

Para un entendimiento correcto del manejo de la radioactividad resulta necesario definir las unidades en que la radioactividad como tal puede medirse, aquellas en las que se expresa la cantidad de energía de radiación depositada en un material (dosis de radiación), así como términos descriptivos empleados en protección radiológica. Las unidades de actividad son las empleadas para describir el número de átomos de un material radioactivo que decaen en un periodo de tiempo.

Curie (Ci): cantidad de cualquier material radiactivo que sufre 3.7×10^{10} desintegraciones nucleares por segundo (dps) o 2.22×10^{12} desintegraciones por minuto (dpm).

Bequerel (Bq): Equivale a una desintegración por segundo (dps), es decir a 2.7×10^{-11} Ci.

Rutherford (Rd): Es una unidad mucho menos usada y equivale a 10^6 dps, o bien 2.7×10^{-5} Ci.

Así, $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 3.7 \times 10^4 \text{ Rd}$.

Para las unidades de dosis de exposición tenemos que es una medida de la ionización producida por la radiación conforme esta viaja por un medio y se expresa en:

Roentgen (R): Puede expresarse como la cantidad de radiación X o gamma recibida por un kg. de aire en condiciones estándar de presión y temperatura (CSPT) que produce un número de pares de iones equivalentes a 2.58×10^4

Coulombs. $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^4 \text{ Coulombs/Kg. de aire} = 1.61 \times 10^{15} \text{ pares de iones por Kg. de aire} = 1.61 \times 10^{15} \text{ pares de iones/Kg. de aire en CSPT}$. Sabiendo que la energía necesaria para cada ionización del aire es de 34 e V, equivalente a 5.4×10^{-18} Joules: $1 \text{ R} = 0.00869 \text{ J/Kg. de aire}$.

En el S.I. la unidad es el Gray, que se define como la cantidad de radiación absorbida que disipa a 1 Julio de energía por Kilogramo de material. Su equivalencia con el rad es la siguiente: $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$, de donde $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$

Sievert (Sv). Es una unidad del SI que mide la radiación absorbida por la materia viva. $1 \text{ Sv} = 1 \text{ Joule por Kg}$. Su diferencia con el Gray es que esta unidad esta corregida por el daño biológico que producen las radiaciones, mientras que el Gray mide la energía absorbida por un material.

Rem. Es la cantidad de radiación ionizante requerida para producir el mismo efecto biológico que un rad de rayos X de alta penetración. Esta unidad ya no se usa, ha sido remplazada por el Sievert. 100 rems equivalen a un sievert.

Las unidades de dosis equivalente mide la severidad del daño molecular causado, está relacionada con su poder de penetración, una cantidad empleada en seguridad radiológica para expresar esto es la Energía Lineal de transferencia (LET) que es la cantidad de energía perdida por la radiación por unidad de longitud de trayectoria y se expresa en kiloelectrón volts (KeV) por micrómetro. La LET representa la velocidad a la

cual la energía de las partículas cargadas se transfiere a los átomos y es función de la energía y de la carga de partícula: aumenta conforme la carga de la partícula radiactiva también lo hace²².

IV.1.2.) Daño biológico por radiaciones.

Para los agentes farmacológicos en general es válida la regla de que, para obtener un efecto biológico dado, se requiere dar una determinada dosis mayor que la dosis umbral. La dosis umbral es aquella que marca el límite arriba del cual se presenta un efecto, y debajo del cual no hay efecto. Algunos de los efectos de la radiación caen en este caso, los no estocásticos. Otras sustancias no tienen una respuesta de este tipo, es decir no tienen umbral, por lo tanto no hay una dosis mínima para producir un efecto. Consecuentemente, cualquier dosis dada produce un efecto; para obtener un efecto cero se requiere una dosis cero. Los efectos estocásticos de la radiación se comportan de esta manera.

La rapidez con la cual se absorbe la radiación es importante en la determinación de los efectos. Una dosis dada producirá menos efecto si se suministra fraccionada, en un lapso mayor, que si se aplica en una sola exposición. Esto

se debe al poder de restauración del organismo; sin embargo hay que tomar en cuenta que esta recuperación no es total y siempre queda un daño acumulativo.

El lapso entre el instante de radiación y la manifestación de los efectos se conoce como periodo latente. Con base en esto se pueden clasificar los daños biológicos como agudos (a corto plazo), que aparecen en unos minutos, días o semanas, y diferidos (largo plazo), que aparecen después de años, décadas y a veces en generaciones posteriores.

El daño biológico tendrá diferentes manifestaciones en función de la dosis. A bajas dosis (menos de 100 mSv o 10 rem) no se espera observar ninguna respuesta clínica. Al aumentar la dosis, el organismo va presentando diferentes manifestaciones hasta llegar a la muerte. La dosis letal media, es aquella a la cual 50% de los individuos irradiados mueren, es de 4 Sv (400 rem)⁴.

IV.1.3.) Efectos de la radiación en las células

Cuando la radiación ionizante incide sobre un organismo vivo, la interacción a nivel celular se puede llevar a cabo en las membranas, el citoplasma, y el núcleo.

Si la interacción sucede en alguna de las membranas se producen alteraciones de permeabilidad, lo que hace que puedan intercambiar fluidos en cantidades mayores que las normales. En ambos casos la célula no muere, pero sus funciones de multiplicación no se llevan a cabo. En el caso en que el daño es generalizado la célula puede morir.

En el caso en que la interacción sucede en el citoplasma, cuya principal sustancia es el agua, al ser ésta ionizada se forman radicales químicamente inestables. Algunos de estos radicales tenderán a unirse para formar moléculas de agua y moléculas de hidrógeno (H), las cuales no son nocivas para el citoplasma. Otros se combinan para formar peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el cual sí produce alteraciones en el funcionamiento de las células. La situación más crítica se presenta cuando se forma el hidronio (HO), el cual produce envenenamiento.

Cuando la radiación ionizante llega hasta el núcleo de la célula, los daños son generalmente mas serios, produciendo la muerte de las células, a alteraciones de los genes e inclusive rompimiento de los cromosomas, provocando que cuando la célula se divida lo haga con características diferentes a la célula original. Esto se conoce como daño genético (mutación) de la radiación ionizante, que si se lleva a cabo en una célula germinal (espermatozoide u óvulo) podrá manifestarse en individuos de futuras generaciones.

Por lo expuesto, vemos que la radiación ionizante puede producir en las células: aumento o disminución de volumen, muerte, un estado latente, y mutaciones genéticas.

Vale la pena mencionar que estas propiedades destructivas de la radiación se pueden transformar en un beneficio. La radioterapia busca eliminar tejidos malignos en el cuerpo aplicándoles altas dosis de radiación. Sin embargo, por la naturaleza de la radiación, es inevitable afectar otros órganos sanos cercanos. En un buen tratamiento de radioterapia se proporciona la dosis letal al tumor, tratando de que sea mínima la exposición de otras partes del cuerpo⁴.

IV.1.4.) Efectos de la radiación en órganos vitales

La *piel* fue el primer tejido que se estudió al analizar las alteraciones producidas por la radiación. Dosis cercanas a los 100 rads producen reacciones de eritema (enrojecimiento de la piel) transitorio, que desaparecen al cabo de una semana, y que pueden dejar pigmentación transitoria en la zona irradiada. Cuando la dosis es mayor, varios cientos de rads, las células de la epidermis se destruyen y se forma una zona de nudo, en la cual aparecen lesiones semejantes a una quemadura. Dosis de miles de rads producen necrosis (muerte del tejido) que puede curarse si el área afectada es pequeña, ya que es posible la migración de células vecinas a la zona dañada. Si el área irradiada es amplia, la herida necrótica no cicatrizará y solamente un injerto de piel repondrá la parte dañada.

La *médula ósea* es un tejido ubicado en el interior de los huesos y se encarga de producir las células sanguíneas. Estas son los glóbulos rojos y los glóbulos blancos. Los rojos están encargados de transportar al oxígeno desde los pulmones hasta cada una de las células del organismo. Los blancos protegen al individuo de las infecciones y participan en la defensa contra cualquier agresión, incluyendo los tumores malignos. En la sangre también existen corpúsculos denominados plaquetas, de gran importancia en los procesos de coagulación sanguínea.

Todos estos componentes sanguíneos tienen una vida limitada y son formados continuamente en la médula ósea por células progenitoras. Son estas células las más sensibles a la radiación. Cuando ocurre una exposición seria (superior a 100 rads), parte de las células circulantes resultan dañadas y el número de glóbulos blancos disminuye de inmediato. Éste es uno de los primeros síntomas que aparecen cuando hay una exposición muy por encima de los valores ambientales. Las células progenitoras pueden resultar dañadas por la exposición y, entonces, bajará la producción de nuevos glóbulos rojos y blancos, lo que será evidente algunas semanas después de la irradiación. Una baja en el número de plaquetas impide la coagulación sanguínea y en estas condiciones cualquier hemorragia podría resultar fatal. La escasez de células sanguíneas puede provocar la muerte del individuo. Se ha observado que después de 60 días, con dosis entre 300 y 600 rads, se puede producir la muerte de un ser humano. Cuando se observa el daño agudo causado por radiación en sangre periférica, manifestado por alteraciones en la cuenta sanguínea, se debe aislar a la persona irradiada para evitar infecciones, en caso necesario transfundir plaquetas y, para casos severos, el único tratamiento posible será el trasplante de médula ósea.

Posibles consecuencias tardías de la exposición a radiación son la destrucción del tejido medular y la leucemia (tipo de cáncer desarrollado en las células precursoras).

La pared interna del *intestino* está recubierta de células que se renuevan continuamente. Como respuesta inmediata a la irradiación se reduce el número de estas células y se deteriora el proceso de absorción que normalmente ocurre en él. Si el daño es limitado (menos de 100 rads) es posible que después de leves trastornos intestinales (náusea y diarrea) el organismo repare el daño y regrese a la normalidad. Esto no sucede si la dosis es superior a 700 rads. En este caso se producen ulceraciones en la pared interior, con riesgo de infección, pudiendo presentarse perforación intestinal y severas hemorragias. El tratamiento en estos casos consiste principalmente en el equilibrio hidroelectrolítico y de proteínas, tratando de controlar las posibles infecciones. En las situaciones de mayor gravedad es indispensable la cirugía para remover los tejidos dañados. Este procedimiento resulta muy peligroso por la limitada capacidad de coagulación causada por la destrucción de las plaquetas y la reducida capacidad de defensa debida a la falta de glóbulos blancos, así como por el estado anémico en que seguramente se encontrará el paciente. Estas complicaciones causan la muerte por irradiación a los pocos días, cuando la dosis sobrepasa los 700 rads.

Como efecto tardío de una irradiación se puede producir la fibrosis intestinal, que es la sustitución de las células precursoras por tejido fibroso, disminuyendo así la elasticidad y reduciendo la luz del intestino (esto es, el diámetro interno), lo que en ocasiones causa la oclusión intestinal.

El *pulmón* es el órgano intratorácico más sensible a la radiación. Después de una irradiación del pulmón con dosis cercanas a 2 000 rads, se produce el adelgazamiento y pérdida de la permeabilidad de la pared alveolar debido a la muerte de células alveolares, y aparece un edema pulmonar que favorece el desarrollo de infecciones pulmonares. En estos casos, el tratamiento consiste en ayudar a desalojar las secreciones, evitar el desarrollo de infecciones y propiciar la recuperación de los tejidos dañados. Todo esto se logra con el empleo de medicamentos adecuados y por medio del suministro de aire u oxígeno a presión al pulmón. Como efectos tardíos, 3 ó 4 meses después de la sobreexposición, se puede desarrollar una neumonitis caracterizada por alteraciones en los tejidos, colapso del equilibrio osmótico en los capilares, expansión irregular de las paredes del pulmón y paso de sangre al alveolo. Cuando se sobrevive la fase de la neumonitis, por lo general se presenta una fibrosis pulmonar que puede conducir a la falla respiratoria y ocasionalmente a la muerte.

La *médula espinal* es el conjunto de nervios ubicado en el interior de la columna vertebral que conecta al cerebro con el resto del cuerpo. El tejido nervioso de la médula espinal consta de células nerviosas y células de sostén. Un primer efecto de la irradiación de la médula con dosis mayores de 500 rads es la pérdida de la mielina que cubre las prolongaciones de las células nerviosas, lo que causa a las pocas semanas de la irradiación pérdida de insensibilidad y adormecimiento de las extremidades. Si la médula recibe dosis cercanas a 2 000 rads, se produce la parálisis, un daño irreversible⁴.

IV.1.5) Clasificación de los efectos biológicos

Se han venido mencionando ya algunas maneras de clasificar los efectos biológicos producidos por las radiaciones. Por su importancia conviene reiterar y resaltar los criterios en que se fundamentan las diferentes clasificaciones.

Recientemente la CIPR (International Commission on Radiological Protection) a introducido un nuevo concepto en

la clasificación de los efectos, basado en la probabilidad de ocurrencia: los efectos estocásticos y los no estocásticos.

Los efectos estocásticos son aquéllos cuya probabilidad de ocurrencia se incrementa con la dosis recibida, así como con el tiempo de exposición. No tienen una dosis umbral para manifestarse. Pueden ocurrir o no ocurrir; no hay un estado intermedio. La inducción de un cáncer en particular es un efecto estocástico. Su probabilidad de ocurrir depende de la dosis recibida; sin embargo, no se puede asegurar que el cáncer se presente, menos aún determinar una dosis. La protección radiológica trata de limitar en lo posible los efectos estocásticos, manteniendo las dosis lo más bajas posible.

En los efectos no estocásticos la severidad aumenta con la dosis, y se produce a partir de una dosis umbral. Para dosis pequeñas no habrá efectos clínicamente detectables. Al incrementar la dosis se llega a niveles en que empiezan a evidenciarse, hasta llegar a situaciones de gravedad. Para estos casos la protección consiste en prevenir los efectos, no excediendo los umbrales definidos en cada caso. Las quemaduras caen en esta categoría.

Síndrome de irradiación aguda es el conjunto de síntomas por la exposición de cuerpo total o una gran porción de él a la radiación. Consiste en náusea, vómito, anorexia, pérdida de peso, fiebre y hemorragia intestinal. Según su periodo de latencia, los efectos se han clasificado en agudos a corto plazo y diferidos a largo plazo.

Los efectos agudos pueden ser generales o locales. Los locales pueden ser eritema o necrosis de la piel, caída del cabello, necrosis de tejidos internos, la esterilidad temporal o permanente, la reproducción anormal de tejidos como el epitelio del tracto gastrointestinal, el funcionamiento anormal de los órganos hematopoyéticos (médula ósea roja y bazo), o alteraciones funcionales del sistema nervioso y de otros sistemas.

Los efectos diferidos pueden ser la consecuencia de una sola exposición intensa o de una exposición por largo tiempo. Entre éstos han de considerarse: las cicatrices atróficas locales o procesos distróficos de órganos y tejidos fuertemente irradiados, las cataratas del cristalino, el cáncer de los huesos debido a la irradiación del tejido óseo, el cáncer pulmonar, las anemias plásticas ocasionadas por radio lesiones de la médula ósea, y la leucemia⁴.

IV.2 ISÓTOPOS Y RADIATIVIDAD

Como ya se expuso, los núcleos atómicos están constituidos por protones y neutrones. Ambos poseen la misma masa pero los protones tienen carga positiva y los neutrones no tienen carga. El número de protones determina el número de electrones cargados negativamente que rodean al núcleo, por otra parte el número de electrones condiciona las propiedades químicas del elemento. Cada elemento tiene un número específico de protones; el hidrógeno tiene uno, el helio tiene dos y así sucesivamente. Éste es el número atómico que a menudo se denota con un subíndice situado a la izquierda del símbolo químico del elemento.

Los neutrones, con carga neutra, no alteran el número de electrones, y no tienen efecto sobre las propiedades químicas del elemento. En realidad, el núcleo de un elemento puede tener un número variable de neutrones, lo que explica por qué las masas atómicas no son necesariamente números enteros. Los núcleos que tienen diferente número de neutrones se les da el nombre de isótopos.

Los isótopos son especies diferentes del mismo elemento químico con igual número de electrones y protones, por consiguiente igual número atómico que difieren en el número de neutrones del núcleo por lo que tienen diferente masa atómica. Algunos de los isótopos son inestables recibiendo el nombre de radioisótopos y se desintegran en un proceso espontáneo con emisión de partículas atómicas o subatómicas u ondas electromagnéticas. Los núcleos inestables se convierten en estables mediante desintegración nuclear. A consecuencia de esta transformación y debido a que la energía almacenada en los

núcleos es muy grande, se libera una enorme cantidad de energía. La energía liberada durante la desintegración nuclear la conocemos como radiactividad²⁴.

IV .2.1.) Radioisótopos de origen natural y artificial.

La radiación existente en el planeta puede provenir de fuentes naturales por medio de la radiación cósmica al incidir sobre la atmósfera terrestre, por las emisiones de núcleos radiactivos que se crearon desde que se formó la tierra o por origen radio génico, pero también existen fuentes radiactivas llamadas artificiales o generadas por el hombre, y son el resultado de trabajar con reactores nucleares, con fuentes radiactivas o con aparatos de usos médicos e industriales de la radiación²².

IV .2.2.) Radiactividad natural.

El hombre, al igual que cualquier organismo, siempre ha estado expuesto a las radiaciones ionizantes provenientes de fuentes naturales de radiación, que hasta principios del siglo pasado eran las únicas fuentes de exposición. La radiación natural es la que más contribuye a las dosis colectivas de radiación que recibe, la mayor parte de la población mundial. La cantidad de radiación natural recibida por un ser humano es relativamente similar en todas partes del planeta y se estima que no ha variado demasiado en el transcurso del tiempo.

La radiactividad natural procede de fuentes extraterrestres y de elementos radiactivos presentes en la corteza terrestre. Se han encontrado aproximadamente 340 núclidos en la naturaleza, de los cuales un 70% son radiactivos y se encuentran principalmente en los elementos pesados.

Si revisamos los 90 elementos naturales que se encuentran clasificados en la tabla periódica de Mendeleiev, podemos observar que 10 están formados por isótopos radioactivos exclusivamente del elemento con número atómico 83, Bismuto, al 92, Uranio. Otra peculiaridad es que, del número atómico 1, Hidrógeno, al 82, Plomo, 18 de entre ellos presentan algún isótopo radiactivo que se encuentra ya sea formando parte de su mezcla isotópica, o bien aislado en algún otro medio natural, como el agua de lluvia por ejemplo.

Es posible clasificar en tres grupos a los isótopos radiactivos que encontramos en la naturaleza. Agrupándolos de acuerdo a su origen:

El primer grupo incluye a los radioisótopos que se producen de manera continua en las reacciones nucleares causadas por la radiación cósmica al incidir sobre la atmósfera terrestre. Ejemplos clásicos serían la producción de ^3H Y ^{14}C por la interacción de neutrones de la radiación cósmica con el nitrógeno del aire. Tanto el ^3H como el ^{14}C se precipitan a tierra con la lluvia y entran a formar parte del hidrógeno elemental y carbono orgánico respectivamente. Estos radioisótopos se llaman cosmogénicos debido a que son creados continuamente en el espacio que rodea a la tierra¹⁸.

Cuadro. 1 Ejemplos de radionúclidos Cosmogénicos.

Radionúclido	Vida Media
^3H	12.35 años
^7Be	53.4 días
^{10}Be	1.6×10^6 años
^{14}C	5736 años
^{22}Na	2.6 años
^{26}Al	7.16×10^6 años
^{35}S	87.5 días
^{36}Cl	3×10^5 años
^{39}Ar	269 años

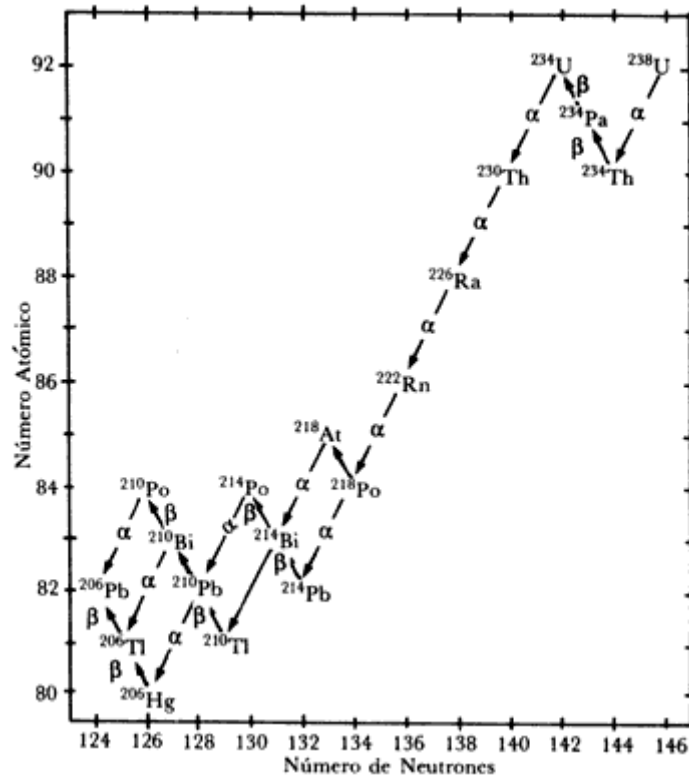
El segundo grupo comprende a los radioisótopos que forman parte de la mezcla isotópica que compone un elemento. Estos radioisótopos tienen que ser de vida media muy larga, de 10^9 a 10^{15} años, puesto que existen desde la formación de los elementos y la cristalización de los minerales en los que se encuentran cuando la tierra empezó su gradual enfriamiento. Por este motivo se les da el nombre de primordiales¹⁸.

Cuadro. 2 Ejemplos de radionúclidos primordiales.

Radionúclido	Vida Media. Años.
^{40}K	11.3×10^9
^{50}V	6×10^{15}
^{87}Rb	4.7×10^{10}
^{113}Cd	9×10^{10}
^{152}Gd	1.1×10^{14}
^{187}Re	5×10^{10}
^{186}Os	2×10^{15}
^{190}Pt	6×10^{11}
^{209}Bi	2×10^{18}

El tercer grupo de radioisótopos naturales comprende aquellos que se forman por el decaimiento de otro radioisótopo, es decir tienen origen radiogénico. En la naturaleza existen 3 cadenas radiactivas originadas por el decaimiento del ^{232}Th , ^{238}U y ^{235}U . Estos isótopos radiactivos son el principio de cadenas que se forman por el decaimiento sucesivo de padres e hijos radiactivos, cadenas que terminan respectivamente con los isótopos estables ^{208}Pb , ^{206}Pb y ^{207}Pb . Este tipo de radioisótopos reciben el nombre de cadenas de miembros o eslabones¹⁸.

Figura. 2 Serie radiactiva del Uranio-238



Existe también otra clasificación de las fuentes naturales de radiación y es la siguiente:

De 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.

Los rayos cósmicos que se dirigen hacia la Tierra, principalmente protones y partículas alfa, encuentran primero la atmósfera e interactúan con los núcleos de átomos presentes en ella. En este sentido, la capa de aire que está encima de nosotros actúa como un techo protector. La interacción de las partículas cósmicas con los núcleos en el aire produce reacciones nucleares en que se crean nuevas partículas que continúan el viaje hacia la superficie. Las partículas con carga eléctrica van ionizando y excitando las moléculas del aire ocasionando una pérdida gradual de la energía original. Una fracción mínima de los rayos cósmicos primarios logra llegar hasta la superficie terrestre y son principalmente, las partículas llamadas muones, producidas en la alta atmósfera por los rayos primarios que constituyen el espectro de radiación cósmica en la superficie.

La otra fuente importante de irradiación externa la constituyen los *rayos gamma* emitidos por núcleos radiactivos presentes en el suelo o el aire. Estos núcleos inestables pudieron ser formados por la interacción de rayos cósmicos con el aire o pueden existir en la corteza terrestre, desde sus orígenes.

Se estima que el equivalente de dosis promedio mundial para un individuo, producto de la irradiación externa por rayos gamma, es de unos 35 milirems cada año⁵.

De fuentes **internas**, que comprenden los radionúclidos presentes en la naturaleza que se incorporan al cuerpo humano a través de aire, agua y alimentos por inhalación o ingestión.

La irradiación interna se debe a la inhalación de polvo que contenga en suspensión partículas radiactivas, así como a la ingestión de agua y alimentos que hayan incorporado algún elemento inestable a su composición. Tal como se mencionó previamente, los núcleos radiactivos responsables de la radiación natural terrestre pueden provenir de reacciones de rayos cósmicos con el aire, o haber sido formados al comienzo de nuestro sistema planetario. Entre los primeros se pueden mencionar el tritio, el carbono-14, el berilio-7 y el sodio-22. El equivalente de dosis por irradiación interna de todos juntos apenas sobrepasa 1 milirem anual. Entre los radioisótopos del segundo grupo, el potasio-40 y aquéllos de las series de desintegración del uranio y del torio (radio, radón, polonio y plomo) son responsables de una fracción importante de la irradiación interna.

El potasio es un elemento esencial para la vida, se incorpora al organismo a través de la alimentación. Un 0.02% del potasio natural es potasio-40, emisor de radiación beta y gamma, con una vida media de mil millones de años. El equivalente de dosis anual debido a sus radiaciones se estima en 18 milirems. Otros núcleos radiactivos que son ingeridos en los alimentos son el radio-226, el plomo-210 y el polonio-210. La carne de reno o de caribú, en las regiones árticas del hemisferio norte, contiene una concentración anormalmente elevada de polonio-210, debido a que estos animales consumen líquenes que tienden a acumular este elemento. Para decenas de miles de personas esta carne es la base de su alimentación. Medidas realizadas en su sangre, huesos y placenta, revelan aumentos de los niveles de dosis en un factor aproximado de 10 en comparación con habitantes de zonas más templadas⁵.

Entre los elementos que ingresan al organismo por las vías respiratorias se encuentran el uranio, el torio y los isótopos polonio-210 y plomo-210. (Aprovechamos para señalar que en los pulmones de fumadores la concentración de estos dos núcleos radiactivos es 50% superior a aquella en los pulmones de los no

fumadores.) Todos estos elementos son sólidos y su inhalación ocurre al respirar partículas de polvo a las cuales se han adherido. Pero la fuente principal de irradiación interna la constituye la inhalación del gas radón. Este elemento se produce en los decaimientos radiactivos del uranio y del torio y es a su vez inestable, transformándose en una partícula alfa y un núcleo de polonio. Si el radón es respirado y no decae, puede volver a salir junto con el aire expirado. Pero si decae mientras se encuentra en los pulmones, el núcleo de polonio, que es un elemento sólido, se puede quedar adherido al tejido pulmonar y desde ahí continuar emitiendo radiación, pues él también es radiactivo.

Grandes cantidades de radón se encuentran en el interior de las minas de uranio y en regiones con suelos que contienen uranio y torio. Las construcciones que emplean materiales particularmente radiactivos muestran niveles altos de radón en el interior⁵.

IV.2.3.) Radiactividad artificial.

Se entiende como radiactividad artificial o inducida, a la que ha sido provocada por transformaciones nucleares artificiales, producidas por el hombre antropogénicas.

Los elementos radioactivos existentes en la naturaleza, eran los únicos disponibles para el estudio de la radiactividad hasta el año de 1934, mas sin embargo el número de especies radiactivas artificialmente producidas llego aproximadamente a 200 en 1937 y casi 1000 en 1954 y actualmente alcanza más de 1500. Al menos un isótopo radiactivo es conocido hoy para cada elemento de la tabla periódica y algunos de ellos presentan más de veinte, con vidas medias que van desde microsegundos hasta miles de años. El cuadro 3. Se dan unos ejemplos de radionúclidos producidos artificialmente por el ser humano¹⁸.

Cuadro3. Ejemplo de radionúclidos artificiales

Radionúclido	Tiempo de vida media
⁹⁰ Sr	90 años
⁸⁹ Sr	51 días
²³⁹ Pu	2.4x10 ⁴ años
²⁴⁰ Pu	90 años
¹³⁷ Cs	30 años

Hoy en día, la fuente más importante de exposición a radiación producida por el ser humano, son los exámenes médicos que utilizan *rayos X*. Al tomar una radiografía el paciente puede recibir equivalentes de dosis entre 1 y 5 000 milirems.

Después, el segundo lugar entre las fuentes actuales de radiación creadas por el hombre, lo ocupan los *ensayos de bombas nucleares* realizados en la atmósfera desde 1945. Más de 500 explosiones, en gran parte estadounidenses y soviéticas, inglesas, francesas, hindúes y chinas, han inyectado toneladas de material radiactivo a las capas altas de la atmósfera. Estos núcleos inestables pueden permanecer durante años en suspensión, distribuyéndose sobre todo el planeta. Al fin caen al suelo en la llamada "lluvia radiactiva" e irradian a los seres vivos, externamente desde el suelo e internamente, cuando son ingeridos o inhalados. Los núcleos más importantes entre los cientos que se producen durante la detonación de un artefacto nuclear resultan ser el carbono-14, el cesio-137, el circonio-95 y el estroncio-90.

La siguiente fuente de radiación que consideraremos es la producción de *energía nuclear*. En la actualidad existen más de 400 reactores de potencia en funcionamiento en 26 países, que producen aproximadamente 16% de la electricidad utilizada en el mundo. La producción de energía nuclear en un reactor presupone la elaboración previa y el tratamiento posterior del combustible nuclear. Son estos procesos los que producen la mayor parte de la dosis relacionada con la energía nuclear. Las fases principales del ciclo del combustible nuclear son la minería y elaboración de minerales de uranio, el enriquecimiento del contenido de uranio-235, la fabricación de los elementos combustibles, la operación del reactor, el reciclamiento de los núcleos combustibles recuperados y la eliminación de los desechos radiactivos. Durante todas estas etapas el material radiactivo se guarda en lugares controlados, por lo que la mayor irradiación ocurre en las cercanías de las minas, del reactor y de la planta de reciclamiento o almacenamiento de los desechos²¹.

Tomando en cuenta todas las fuentes de radiación mencionadas, el promedio mundial de equivalente de dosis se puede estimar en 240 milirems anuales, de los cuales 200 milirems (80%) se deben a fuentes naturales y los 40 milirems restantes (20%), al uso de la radiación por el ser humano²¹.

IV.3. CONTAMINACION RADIATIVA EN ALIMENTOS

IV.3.1. Importancia toxicológica de los radionúclidos en alimentos.

La presencia de radionúclidos en alimentos contribuye a la dosis interna total de radiactividad que esta en el interior del organismo, ya que la incorporación de estos puede efectuarse por inhalación, ingestión o a través de la piel, en este caso principalmente por heridas.

Podemos encontrar en los alimentos que ingerimos, pequeñas cantidades de radionúclidos, tanto de origen natural como de origen artificial, mas sin embargo su presencia no es tan significativa en términos de toxicidad química²².

Los caminos de exposición de los alimentos que se van a considerar, en el grupo de ingestión son: los alimentos de origen vegetal, los de origen animal y el agua potable.

Los alimentos vegetales pueden ser contaminados por dos vías: Deposición de los productos radiactivos directamente sobre la vegetación, con la siguiente absorción por hojas y tallos, o bien por absorción a través de las raíces, de los radionúclidos depositados sobre el suelo, por medio de efluentes radiactivos líquidos por el agua de riego ya sea agua de lluvia o agua residual contaminada.

La cantidad de radionúclido que se incorpora al vegetal depende del radioisótopo de que se trate, de su forma química, de su concentración, de las características de la planta y de las del suelo. Por otra parte, la concentración de productos radiactivos sobre las hojas dependerá no solo de lo que se deposita, sino también de lo que se elimina, fundamentalmente por la acción de los agentes atmosféricos.

Los alimentos de origen animal pueden ser terrestres y acuáticos. En el primer caso las sustancias radiactivas se pueden acumular en el organismo animal a causa de la ingestión de forrajes y agua contaminados los dos por radionúclidos. En consecuencia, la concentración de radionúclidos en un producto animal depende de la cantidad de alimento contaminado consumido por el animal y de la cantidad de agua que bebe, así como de las concentraciones de radionúclidos en ellos.

Las concentraciones en alimentos acuáticos se suponen directamente proporcionales a las concentraciones de radionúclidos en el agua, los radionúclidos presentes en los efluentes líquidos llagarán, a través de las

distintas cadenas tróficas acuáticas, hasta los tejidos de los animales, que tras su captura serán consumidos por el hombre.

Por último hay que considerar la ingestión del agua por el hombre, esta puede estar contaminada por la deposición directa de partículas que se encuentran en suspensión en el aire y por arrastre de los productos depositados por la lluvia.

Por lo expuesto anteriormente, entonces podemos decir que la entrada de radionúclidos a los alimentos se produce inicialmente por la adsorción desde el suelo o por la deposición en las plantas. Posteriormente incorporándose al hombre por consumo directo de estos vegetales o bien por animales que han sido alimentados con pastos o piensos contaminados. Los radionúclidos pueden estar presentes en alimentos a bajos niveles, sin embargo, sus niveles en alimentos son importantes si se tiene en cuenta que:

- 1) Pueden ser carcinógenos, mutagénicos y teratogénicos.
- 2) Tienen fuerte afinidad por algún órgano o tejido en específico.
- 3) Estas afinidades pueden hacer que se acumulen a dosis más altas con el tiempo a dosis aun mayores.
- 4) Excepto por el mecanismo de excreción el cuerpo no posee mecanismos de detoxificación para los radionúclidos.
- 5) Diversos radionúclidos tienen una vida media larga. Por lo que su actividad radiactiva puede persistir a lo largo de la vida de una persona.

Los isótopos radioactivos, pueden ser peligrosos si penetran al organismo, ya que algunos de estos elementos tienden a acumularse en un órgano o tejido en particular, la consideración principal en determinar el riesgo de un radioisótopo dado dentro del cuerpo es la dosis de radiación total depositada mientras se encuentra en el cuerpo¹⁰.

No todos los radionúclidos producen un daño biológico de igual intensidad, el daño depende del tipo de radiación emitida, de su energía, del órgano en que se localiza y de su permanencia dentro del organismo por esto, se deben, tener en cuenta los siguientes factores:

- 1) Las cantidades administradas.
- 2) El modo de introducción de los radionúclidos al cuerpo (ruta de administración)
- 3) Patrones de distribución y retención.
- 4) Intensidad de radiación absorbida. Depende de la actividad del radionúclido del que procede.
- 5) Tiempo de vida media física y tiempo de vida media biológica del radionúclido.
- 6) Tipo de energía y ionización específica de los rayos o partículas emitidas.

Como podemos observar los factores mas importantes para determinar el daño biológico son la cantidad del material radiactivo depositado, su vida media, la naturaleza, energía de las radiaciones que emite y el lapso de tiempo que es efectivo dentro del cuerpo. Este tiempo depende de dos factores, uno de los cuales es la vida media radioactiva, y el otro es la vida media biológica. A esta última se le define como el tiempo que toma una cantidad determinada de un elemento en particular dentro del cuerpo para disminuir a la mitad su valor original por medio de la eliminación biológica por procesos naturales. La combinación de estas vidas medias radiactiva y biológica da origen a la vida media efectiva, que es el tiempo requerido para una cantidad de radioisótopo específico dentro del cuerpo para disminuir a la mitad su valor original como resultado del decaimiento radioactivo y eliminación natural.

Los radionúclidos que representan el mayor riesgo potencial interno son aquellos de vida media radiactiva larga aunque también dependerá de otros factores como la zona afectada y el tipo de radiación que emite. Una vida media biológica larga significa que el material radiactivo no será fácilmente eliminado por el cuerpo en procesos naturales. Como ejemplo tenemos el caso del yoduro-131; tiene vida media radioactiva de sólo ocho días, pero la vida media biológica del elemento yoduro es de aproximadamente seis meses, ya que es rápidamente asimilado por la glándula tiroides de la que se elimina muy lentamente. En consecuencia, si una cantidad suficiente de yoduro-131 penetra al cuerpo, es capaz de causar serios daños a la glándula tiroides¹⁰.

Otro ejemplo sería, la forma normal del elemento uranio-238 y el plutonio-239 presentan peligros internos bastantes considerables ya que tienen vidas medias largas tanto biológica como radioactiva. Una vez que estos radionúclidos se depositan en el esqueleto, permanecen allí, sin cambios considerables en la cantidad,

durante toda la vida de la víctima. La acción continúa de las partículas alfa emitidas, las que depositan su energía en una región limitada, por un periodo de años, pueden causar daños. Estos elementos tienen una vida media radioactiva aproximadamente de 28 años y una vida media biológica de aproximadamente 10 años.

Los materiales ingeridos, pueden ser eliminados por heces o bien ser absorbidos, sobre todo en intestino delgado, pasando a los fluidos extracelulares. Los líquidos extracelulares son el principal vehículo de transporte de los materiales radiactivos entre las distintas zonas del organismo. Una parte de los radionúclidos contenidos en estos fluidos será excretada por las siguientes vías: por los riñones a través de la orina, por el hígado a través de la bilis que vierte en el tubo digestivo y consecuentemente a través de las heces, por la piel a través del sudor, y por los pulmones por el aire exhalado. El remanente se depositará en aquellos órganos o tejidos por los que tenga especial afinidad¹⁰.

IV.3.2.) Radionúclidos de ocurrencia natural en alimentos.

El organismo está constituido por elementos químicos, algunos de los cuales son naturalmente radiactivos por los radionúclidos que los componen y que se ingieren normalmente a través de los alimentos.

Es razonable suponer que todos los radionúclidos que se hallan en nuestro ambiente están en nuestro organismo en alguna pequeña cantidad.

Potasio-cuarenta. ⁴⁰k.

Prácticamente todos los alimentos contienen potasio; la leche, los cereales, las frutas, las verduras, la carne etc.; por lo que el potasio-cuarenta es la principal fuente natural de dosis de radiación interna, considerándose el radionúclido simple más importante, desde el punto de vista biológico.

El potasio es un elemento esencial que se encuentra bajo un estricto control homeostático en el cuerpo. Por ello, la dosis que el cuerpo recibe por este radionúclido es constante, no está influenciada por variaciones en el medio ambiente, o en la composición de la dieta, que es la principal vía de entrada de este radionúclido.

El potasio, miembro de la altamente reactiva familia de los metales alcalinos, tiene tres isótopos cuyos números de masa son 39,40 y 41. De éstos solo el ⁴⁰K es radiactivo y tiene una vida media de 1.3×10^9 años.

El ^{40}K decae a ^{39}Ca (estable) el 89% de los núcleos, emitiendo una partícula β de 1.314 MeV en el proceso. Con excepción de una pequeñísima fracción que decae por captura electrónica, el ^{40}K decae por emisión de positrones el 11% de los núcleos restante, emitiendo un fotón característico que tiene una energía de 1.460 MeV. Este fotón es utilizado en la identificación y cuantificación del ^{40}K por espectrometría gamma y constituye un excelente punto de calibración debido a la presencia de potasio en todas las muestras ambientales.

La abundancia isotópica del ^{40}K es sólo de 0.0118%, lo cual imparte una actividad específica aproximada de 855 pCi/g o 31.7 Bq/g de potasio natural.

La concentración másica promedio del ^{40}K para un adulto varón es de 2g/Kg de peso corporal. Y de acuerdo a la actividad específica de este radionúclido (855pCi/g) corresponde a 0.12 μCi de ^{40}K en el cuerpo. La distribución del potasio en varios órganos y tejidos se ha utilizado para determinar las concentraciones de ^{40}K en ellos, así como los índices de dosis absorbidas correspondientes. La dosis absorbida anual más alta (270 mGy) la recibe la médula ósea roja y la dosis más baja (100 μGy), la tiroides. La dosis equivalente efectiva anual se estima en 0.18 mSv.

Un estudio realizado con 3000 personas de entre 1 y 79 años de edad mostró que las concentraciones de potasio en el organismo aumentan desde el nacimiento hasta aproximadamente los diez años de edad (en las niñas) y hasta los 18 años (en los varones) hasta alcanzar valores estimados en 2.1 y 2.3 g/Kg de peso, respectivamente. Las concentraciones disminuyen bastante bruscamente hasta los 20 años y de manera más gradual después. La concentración másica de potasio es máxima en los adolescentes varones y mínima en las mujeres ancianas. La concentración de ^{40}K en los hombres es entre 25 y 30% mayor que en las mujeres de la misma edad, debido en gran parte a la mayor masa muscular y al menor contenido de grasa en los hombres.

En el cuerpo, las concentraciones más bajas de potasio se encuentran en huesos y dientes, y en la grasa. Las concentraciones más altas se encuentran en los músculos, que contienen aproximadamente 0.36% de potasio en peso húmedo, lo cual corresponde aproximadamente 3 pCi/litro. Comúnmente los tejidos blandos- los que tienen las concentraciones más altas de potasio, como músculo y gónadas- reciben una dosis aproximada de 19 mrad/año del ^{40}K , de la cual el 89% se debe a las partículas β y el restante 11 % a los fotones. Debido a que se encuentra en todo lugar en el medio ambiente y al fotón de 1.460 MeV

asociado a su decaimiento, el ^{40}K es fuente de una pequeña dosis fuente de radiación externa. El potasio-40 se encuentra distribuido por todo el cuerpo. Tiene un tiempo de vida media de 1.3×10^9 años, y emite partículas beta, positrones y rayos gamma.

El potasio se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, en concentraciones que varían de 0.1 % en las piedras calizas, a 3.5% para algunos granitos. Ajustando estas cifras a la abundancia natural del ^{40}K , se traduce en unas cuantas decenas de pCi por gramo en la mayor parte de las rocas y suelos. En las tierras de cultivo, el contenido de potasio esta determinado en gran parte por el uso de fertilizantes. Se estima que en Estados Unidos anualmente se añaden 3 000Ci de ^{40}K a los suelos en forma de fertilizantes²².

Radio-226

El radionúclido radio-226 consigue entrar al cuerpo en su mayoría por la vía de los alimentos y en cierta medida por el agua que se bebe. El ^{226}R tiene un tiempo de vida media de 1.6×10^3 años, y emite partículas alfa, rayos gamma y electrones. Se dice que el radio es un elemento osedasotrope, puesto que se encuentra depositado en los huesos, por lo que puede ser muy peligroso si penetra en el cuerpo ya que su radiación de corto alcance, puede dañar la medula ósea lugar el cual se producen las células sanguíneas, además de originar necrosis y formación de tumores²⁵.

Uranio-238

La cantidad de ^{238}U en el organismo, depende de la dieta y del agua que se bebe. Este elemento tiene un tiempo de vida media de 4.51×10^9 años y emite partículas alfa. También es un elemento osedasotrope y se deposita en las células del endostelio y medula ósea. Solo cantidades muy pequeñas se absorben del tracto intestinal o través de la piel. Un hombre típico contiene entre 100 y 125 μg , la ingesta y la excreción diarias son de aproximadamente de 1 μg . El riñón es el principal sitio de daño tisular después de dosis pequeñas o moderadas de uranio. Este radionúclido resulta ser más importante por su toxicidad química que por su radioactividad, sus efectos químicos son agudos y actúan sobre el epitelio tubular de las vías urinarias²².

Plomo 210 y Polonio-210

Estos radionúclidos ^{210}Pb y ^{210}Po , los podemos encontrar en la dieta, principalmente en la carne y pescado. Ambos radionúclidos son productos del decaimiento de las series del radón-222 y el uranio-238.

El ^{210}Pb tiene un tiempo de vida media de 19.4 años y emite partículas alfa y beta y se dirige dentro del organismo a los huesos.

El ^{210}Po tiene una vida media de 138.4 días y emite partículas alfa y rayos gamma; es de alto riesgo radiológico ya que posee una elevada radiactividad con relación a cantidad de sustancia química. Se excreta principalmente a través de los riñones y es retenido por el tejido blando, especialmente en tejido linfático, riñón, hígado, médula ósea y gónadas. Cuando es ingerido también se encuentran altas concentraciones en los eritrocitos²².

Carbono-14 y tritio

El ^{14}C tiene un tiempo de vida media de 5760 años, el tritio de 12.3 años. Ambos emiten partículas beta²².

IV.3.3.) Radionúclidos artificiales en alimentos.

Cesio-137

El cesio-137 emite partículas beta y gamma y su persistencia en el ambiente se debe a que su tiempo de vida media física es de treinta años. Este radionúclido no se acumula en los huesos o algún otro tejido, por lo que su vida media biológica es de solo 105 a 140 días. Este radionúclido es similar a su comportamiento metabólico respecto al potasio, ambos se distribuyen en el músculo, aunque son independientes y no competitivo; por ello se emplea la relación $\text{pCi } ^{137}\text{Cs/gK}$ para estimaciones del contenido de este radionúclido en el cuerpo, aunque el cesio no está necesariamente relacionado con el potasio, excepto por su distribución en los tejidos.

El cesio está estrechamente unido al suelo por lo que no entra fácilmente a la cadena alimenticia, no obstante, una pequeña cantidad de este radionúclido es liberado al forraje y entonces es ingerido por las vacas lecheras, de esta manera el ^{137}Cs lo encontramos en la leche.

El cesio-137 ingerido con los alimentos se absorbe del tracto gastrointestinal y pasa a la sangre de donde se distribuye por todos los tejidos del cuerpo. La ingesta de este radionúclido puede aumentar el riesgo de contraer cáncer de pecho, de pulmón, tiroides o de huesos y leucemia²².

Plutonio-238, Plutonio-239 y Plutonio-240.

El ²³⁸Pu es un emisor de tipo alfa con un tiempo de vida media de 50 años y tanto el ²³⁹Pu como el ²⁴⁰Pu son emisores alfa y gamma con vida media de 24000 años. Estos radionúclidos se pueden distribuir fácilmente en los alimentos ya que pueden estar presentes en almejas, carne de res y cerdo, huevos, pescado, leche, productos de cereales, vegetales, fruta y agua.

El ²³⁹Pu es un radionúclido osedasotropo, ya que tiene una gran afinidad por depositarse en los huesos, también lo podemos encontrar en hígado y tracto intestinal²².

Yodo-131.

Emite partículas beta y rayos gamma. Su tiempo de vida media es muy corto de 8 días, por lo que su presencia después de una detonación nuclear, es significativa sólo pocos días o semanas después.

La leche y otros productos lácteos son la fuente principal de este radionúclido pues el ¹³¹I se deposita en las hierbas del forraje, excretándose después a la leche el 6% del yodo consumido por las vacas.

El yodo se absorbe rápidamente del tracto gastrointestinal y tiene una alta afinidad por la glándula tiroides.

Estroncio-90

Es un emisor beta con vida media física de 28 años. Es también un osedasotropo que ingresa el cuerpo principalmente a través de la dieta y del agua, se ha visto que puede contaminar todos los alimentos, aunque en la superficie de los vegetales se depositan los niveles más altos a diferencia de los tubérculos y raíces comestibles.

La carga corporal de estroncio 90 y su concentración en los alimentos generalmente se relaciona con el contenido de calcio en forma de cociente (^{90}Sr en pCi/g Ca) ya que estos elementos están química y biológicamente relacionados. Este cociente normalmente se usa para expresar el nivel de ^{90}Sr en alimentos y huesos y es llamado unidad de estroncio.

Entre los productos de fisión liberados por explosiones nucleares y accidentes de reactores, el estroncio-90 es de gran importancia ya que se considera como un riesgo potencial a largo plazo por la peligrosa combinación de tener un alto rendimiento entre los productos de fisión, vidas medias físicas y biológicas largas, alto índice de absorción y elevado tiempo de residencia en los huesos.

IV.4.) RADIONUCLIDOS PRESENTES EN LECHE.

En los alimentos de origen animal como la carne y la leche se pueden encontrar algunos radionúclidos. Estos alimentos pueden resultar contaminados principalmente por, la ingestión directa de forrajes contaminados por los mismos animales productores de dichos alimentos, por el consumo de vegetales contaminados por riego o por consumir agua contaminada. En consecuencia, la concentración de radionúclidos en un producto animal depende de la cantidad de alimento contaminado consumido por el y de la cantidad de agua que bebe. Considerándose la leche como un “integrador” de la contaminación radiactiva, siendo la leche un vector esencial de radionúclidos que transfiere la polución del medio ambiente al hombre⁷.

Podemos encontrar radionúclidos, ya sea de ocurrencia natural o bien artificial como radionúclidos contaminantes en dicho alimento. Un radionúclido de ocurrencia natural presente en la leche sería el potasio-40, y en cuanto a los radionúclidos contaminantes presentes en la leche podemos encontrar al Estroncio-89, Yodo-131, Cesio-137, Estroncio-90 entre otros.

A continuación se presenta una lista de los radionúclidos principalmente peligrosos de la leche y algunas características propias de ellos.

Cuadro. 4 Radionúclidos peligrosos encontrados en leche¹⁵.

Radionúclido	Vida media física	Vida media biológica	Localización en la leche
⁸⁹ Sr	52 días	1-50 años	>80% en las micelas de caseína
⁹⁰ Sr	28 años	1-50 años	>80% en las micelas de caseína
¹³¹ I	8 días	6 meses	Sueros
¹³³ I	21 horas	100 días	Sueros
¹³⁷ Cs	33 años	30 días	Sueros
¹⁴⁰ Ba	13 días	<3 años	Plasma

Como ya se ha mencionado la vida media física se refiere al periodo de tiempo necesario para que la emisión radiactiva de un isótopo se reduzca a la mitad de su nivel original. La vida media biológica es el tiempo requerido para que se elimine la mitad de la cantidad de un elemento ingerida por una persona; La localización del elemento en la leche indica que fracción física de la leche es comparativamente segura cuando ha tenido lugar a una contaminación seria. Se observa de la tabla anterior que los elementos radiactivos se localizan principalmente en la fracción no grasa de la leche²⁶.

Como se menciono anteriormente la vaca actúa como filtro para los radionúclidos; aproximadamente un 1% de las cantidades diarias de I y Cs ingeridas por la vaca se agregan diariamente con cada kilogramo de leche; para el Ba y el Sr la proporción es menor.

El estroncio se acumula en los huesos y permanece en ellos mucho tiempo; en consecuencia, las autoridades sanitarias se muestran especialmente sensibles frente al ⁹⁰Sr (que tiene una vida media física larga) ya que su incorporación determina una larga exposición a la radiación. El estroncio se encuentra en la leche desnatada, tiene un comportamiento similar al calcio, concentrándose en un 90% en la cuajada obtenida con renina y solo de un 5 a un 10% en una cuajada ácida⁸. El Ba también se comporta de forma parecida al Ca.

El yodo se acumula en la glándula tiroides donde alcanza grandes concentraciones, por lo que los isótopos causan así una intensa radiación. En consecuencia después de una grave lluvia radiactiva el ¹³¹I se considera especialmente peligroso durante periodos de tiempo comparativamente cortos. La mayoría del yodo se

encuentra en el suero lácteo, estando una pequeña porción del mismo íntimamente ligado a las proteínas; un 2% aproximadamente se encuentra en los glóbulos grasos²⁶.

El cesio está estrechamente unido al suelo por lo que no entra fácilmente a la cadena alimenticia, no obstante, algo de cesio es liberado al forraje y entonces es ingerido e incorporado por las vacas lecheras, de esta manera el Cs-137 se refleja en la leche; su presencia en este alimento es muy importante especialmente para los infantes, considerando que se alimentan principalmente de leche. Del Cesio-137 ingerido por los animales domésticos en el forraje, el 70% se deposita en sus músculos de donde lo ingerimos.

El cesio-137 ingerido con los alimentos se absorbe del tracto gastrointestinal y pasa a la sangre de donde se distribuye por todos los tejidos del cuerpo. La ingesta de este radionúclido aumenta el riesgo de contraer cáncer de pecho, de pulmón, de tiroides, de huesos y también leucemia²².

CAPITULO V.
DETECCION Y CUANTIFICACION DE LA RADIATIVIDAD

V .1) RADIACION DE FONDO

V .2) DETECTORES DE IONIZACION DE GASES

V.2.1) CONTADORES GEIGER-MULLER

V .2.2) CONTADORES PROPORCIONALES

V.3) CONTADOR DE CENTELLEO

V.4) ESPECTROMETRO DE RAYOS GAMMA

CAPITULO V

DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LA RADIOACTIVIDAD

Se conocen más de mil isótopos inestables (radiactivos). Estos tienen un núcleo con un exceso de energía y se degradan a través del proceso de radiactividad, en un nivel energético inferior a una velocidad característica. El exceso de energía nuclear se descarga generalmente, por la expulsión de una partícula sumamente energética como alfa, beta o gamma. El interés de detección de la energía nuclear se centra en el comportamiento químico que se relaciona con los electrones orbitales y la inestabilidad nuclear. En lo que concierne a las propiedades químicas, la inestabilidad nuclear generalmente marca muy poca diferencia; sin embargo, en el momento de la desintegración de cada átomo radiactivo, tanto su presencia como ubicación puede determinarse instrumentalmente.

Para detectar la presencia de radiactividad son necesarios instrumentos que respondan al paso de ella con alguna señal observable; para lograr esto, la radiación debe interactuar con la materia. Los instrumentos para detectar la radiación nos proporcionan con variada eficiencia datos acerca del número de núcleos decayendo por unidad de tiempo en una muestra radiactiva y de la energía de las radiaciones absorbidas por el detector. Por esto es necesario que el tipo de detector sea escogido de acuerdo a las características de la radiación y su uso se realice en forma apropiada¹³.

Los diferentes detectores de radiactividad están basados en los tres principios siguientes:

- a) La transformación en pulsos de electricidad de la fosforescencia producida cuando las radiaciones recolectan de iones producidos cuando las radiaciones atraviesan un gas.
- b) Absorbidas por materiales especiales.
- c) El comportamiento de materiales semiconductores de corriente al ser atravesados por radiaciones.

V.1.) RADIACION DE FONDO.

Cuando un detector es conectado y se aplica un voltaje de operación, comienza a registrar un número de cuentas por unidad de tiempo, aunque no tenga muestra radiactiva en posición de ser detectada; esto se debe a la radiación de fondo, y en menor medida al ruido electrónico del detector mismo. La radiación de

fondo tiene diversos orígenes; La tierra recibe una corriente más o menos constante de alta energía, cuando estas partículas interactúan con la atmósfera superior, son producidas neutrones, mesones y rayos gamma. En la superficie terrestre se detecta la radiación gamma casi en forma exclusiva, constituyendo el componente principal de lo que se llama radiación de fondo.

Además de la radiación cósmica, otras contribuciones son realizadas a la radiación de fondo por los isótopos radiactivos existentes en la tierra, el agua y los organismos vivos.

Por ello, para cada medida de radiactividad, la radiación de fondo debe ser medida en las condiciones de operación escogidas y sustraída de las lecturas representando la actividad de la muestra más la radiación de fondo.

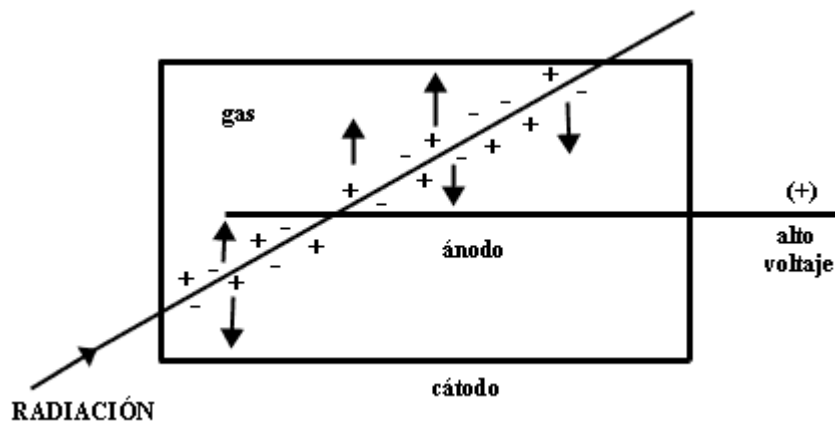
Dependiendo del tipo de radiación que se trate, deberá emplearse un detector diferente pues cada radiación interactúa de manera distinta con la materia; además los niveles de radiación varían drásticamente. La detección mediante sistemas de centelleo se utiliza ampliamente en estudios biológicos, médicos, bioquímicos y orgánicos pues este método es muy adecuado para la detección para emisores de partículas beta de baja energía como las emitidas por ^3H y ^{14}C , trazadores muy empleados para moléculas orgánicas²².

V.2.) DETECTORES DE IONIZACION DE GASES.

El contador Geiger-Muller, el contador proporcional y la cámara de ionización, son detectores cuya respuesta está basada en la ionización producida por radiaciones nucleares. En cada caso, el gas se ioniza a lo largo de la trayectoria del rayo o partícula nuclear. El total de pares de iones producidos varía en general, de 100 a 100,000. Aplicando un campo eléctrico entre los electrodos del detector, los electrones y iones positivos que forman los pares pueden separarse y colectarse en los electrodos.

Circuito contador fundamental. El detector común del tipo de ionización de gases, tiene un cátodo cilíndrico y un ánodo axial de alambre. En lo ideal, todas las partículas radiactivas que penetran en el volumen activo, es decir el espacio que está entre los electrodos deberán contarse. La geometría del electrodo aprovecha el hecho de que la fuerza del campo es inversamente proporcional a radio de un electrodo cuyo corte sea circular. En la figura 3 podemos observar el Funcionamiento de un detector de ionización de gases. Los iones y electrones producidos en el gas por la radiación son conectados en el ánodo y el cátodo¹⁶.

Figura 3. Funcionamiento de un detector de ionización de gases²¹.



V.2.1) Contadores geiger-muller

El tubo Geiger-Muller, ha tenido una gran aplicación. Los tubos geiger están llenos de una mezcla de gases que consiste en aproximadamente de 90% de un gas inerte, como el argón o el helio, y hasta 10% de una sustancia poliatómica que actúa como agente enfriador. Los gases tales como el metano, éter etílico, etanol y cloro, se usan ampliamente. La presión total se fija desde 0.1 a 1.0 atm, de acuerdo con el diseño del tubo y su aplicación. Los contadores responden con una gran sensibilidad a la radiación alfa, beta y con menor sensibilidad a la gamma. A pesar de su sensibilidad y de su simplicidad del equipo, los tubos geiger son inherentemente menos reproducibles, tienen un tiempo de recuperación demasiado largo para lograr recuentos eficientes y son muy poco versátiles. Se usan hoy en día, principalmente para el control en laboratorios y para estudios semicuantitativos²¹.

V.2.2.) Contadores proporcionales

El contador proporcional se emplea tanto como un tipo de tubo cerrado o como un contador de flujo. A fin de lograr una mayor sensibilidad, este último tipo se diseña con una geometría de 2π , es decir, 50% de la radiación que emana de una muestra delgada que penetra en el volumen activo. Este resultado se logra utilizando un cátodo hueco hemisférico y un ánodo con la forma de un pequeño aro de alambre delgado, que se inserta en la cavidad del cátodo por medio de un aislador.

El contador proporcional tiene un potencial de funcionamiento lo suficientemente alto, para que los electrones provoquen una gran ionización adicional por medio de choques. Además pueden determinarse

actividades muy pequeñas, gracias aun fondo reducido y también se pueden determinar altos niveles de actividad con un mínimo de datos de corrección; una ventaja especial es la correlación lineal entre la amplitud y la energía de la radiación. Por esto, los contadores proporcionales pueden prestarse fácilmente para analizar el espectro de energía de una fuente de radiación²¹.

V.3.) CONTADORES DE CENTELLEO.

Junto con el contador proporcional, el detector de centelleo es una de las unidades más satisfactorias en lo general para detectar la radiación nuclear. Además de dar una salida proporcional en magnitud a la energía de radiación que penetra, el detector de centelleo responde con una rapidez extrema (tiempos de resolución de 10^{-10} a 10^{-6} seg.). El contador consiste en un fototubo de centelleo y uno multiplicador. El de centelleo es un material ya sea cristalino o líquido que interactúa con las partículas de ionización que penetran, a fin de producir una radiación fluorescente. Puesto que el número de fotones liberado por partícula es moderado, la salida debe amplificarse. De la misma manera, el centellador esta fijo directamente sobre la cara del fotocátodo multiplicador, o bien conectado a un acoplador óptico Lucite, a fin de lograr una buena transmisión óptica. Por supuesto, la cara del centellador y del fototubo deben ser transparentes en la región óptica de la fluorescencia, que generalmente esta en la azul o cercana a la ultravioleta. Evidentemente, es también esencial que el volumen del centellador sea lo suficientemente grande para absorber toda la energía de la radiación de ionización, si su salida debe ser proporcional a la energía.

Fósforos para contadores de centelleo. Puede lograrse la detección de partículas alfa, utilizando una capa muy delgada (1mm máximo) de fósforo transparente. Se ha encontrado que es satisfactorio utilizar una pantalla transparente de ZnS con plata como activador.

Para la absorción de rayos beta se utilizan costales únicos de antraceno, transestilbeno y otros centelladores orgánicos o bien, NaI (activado con Tl). Tanto el antraceno como el estilbeno proporcionan buena luz y tienen índices de refracción moderados. Los tiempos de resolución son del orden de 0.01 microsegundos, haciendo que sean útiles en la medición de actividades de duración muy corta.

En la detección de rayos gamma, se usan comúnmente como centelladores, cristales activados de NaI con aproximadamente 1% de Tl. Este fósforo es muy eficiente en la absorción de rayos gamma, como resultado del número atómico elevado del I y proporciona una gran salida de luz. Las desventajas son su

carácter giroscópico, el alto índice de refracción ($n_D-1.6$) y el tiempo de resolución relativamente largo (0.3 microsegundos).

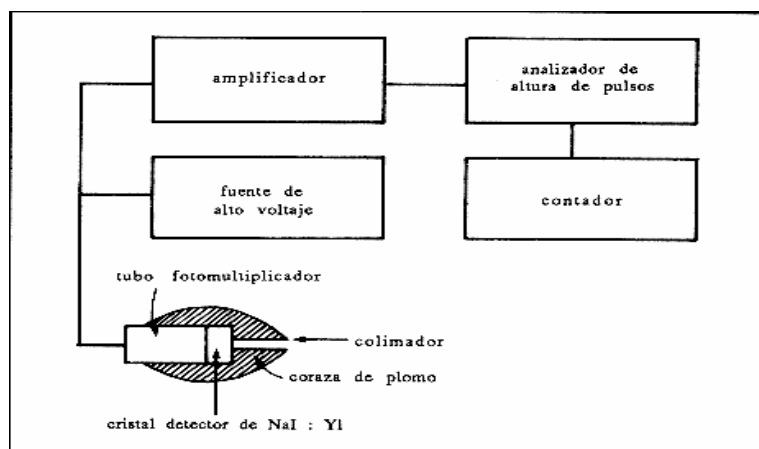
En cada fósforo de centelleo dado, el número de fotones liberados es casi proporcional a la energía absorbida. Puesto que todos los fotones de fluorescencia, pero no los dispersos, deben llegar al fototubo, el cristal se coloca generalmente en una cavidad cerrada a la luz, de papel de aluminio, que también sirve como reflector. Debe tenerse cuidado para asegurarse de que los fotones de diferentes regiones del cristal sean atenuados lo más uniformemente posible. Para este fin, el lado del cristal centellador debe ser opaco a menudo y se le coloca frente a un reflector difuso como el MgO.

Amplificación. El fototubo multiplicador produce una amplificación del orden de 10^6 a 10^8 . Para beneficiarse de la velocidad y tamaño de los cristales de centelleo, pueden encontrarse tubos con superficies grandes en el fotocátodo y un lapso corto de tiempo en el paso de los electrones en un impulso, generalmente se requiere una amplificación adicional, antes de que la salida de un contador de centelleo pueda conducirse a un medidor de velocidad.

Características de operación. La sensibilidad de los contadores de centelleo es elevada; pero deben tomarse grandes precauciones para reducir el recuento de fondo. La protección normal se complementa por medio de circuitos especiales de discriminación y por arreglos de recuento de anticoincidencia.

La base de la detección por centelleo es la emisión de luz provocada por la radiación al incidir sobre el material detector, con el que interactúa produciendo ionización y excitación atómica o molecular. Los átomos o moléculas excitadas, emiten una fracción de la energía total absorbida en forma de un fotón de luz azul. Esta luz pasa a través del material centelleante y después por un conducto de luz hasta un tubo fotomultiplicador que convierte los destellos de luz en señales eléctricas. Entonces la señal es procesada electrónicamente para amplificarla y almacenarla. El número de fotones producidos es proporcional al número de radiaciones cuya energía es disipada en el interior del detector. El tamaño de los pulsos producidos por el fotomultiplicador es proporcional a la energía de la radiación. Las sustancias capaces de absorber energía se llaman fósforos, los más empleados son los fósforos inorgánicos, están hechos de yoduro de sodio con trazas de talio. NaI(Tl), también llamado activador, se añade al cristal de yoduro de sodio como impurezas por dos razones: para facilitar la excitación atómica del fósforo y para reducir la energía del fotón emitido a niveles dentro del espectro visible o ultravioleta donde pueden ser fácilmente amplificados. Estos fósforos resultan muy adecuados para la detección de rayos gamma y rayos X, ya que proporcionan buena eficiencia y rendimiento¹⁸.

Figura 4. Sistema detector de centelleo ¹⁸.



V.4.) ESPECTROMETRO DE RAYOS GAMMA

Cada isótopo radioactivo emite radiación de energía característica gracias a que esta radiación es siempre la misma, se pueden identificar los átomos que las emiten. En la actualidad se utiliza un detector apropiado acoplado a un equipo que se conoce con el nombre de analizador multicanal, el cual además de detectar la radiación emitida por cada isótopo radioactivo, puede determinar la energía de esta cuando la radiación incide en el detector se produce una señal o pulso eléctrico y el tamaño de este pulso eléctrico depende de la energía absorbida por el detector. El analizador multicanal tiene una serie de pequeñas ventanas, denominadas canales, cada una de ellas acepta solo los pulsos que poseen una altura determinada y los acumula. La información que se obtiene después de un cierto tiempo se traduce en un espectro de energías, que se construye haciendo una gráfica del número de cuentas acumulado en cada canal en función del número de este, es decir de la energía.

Tenemos, por ejemplo al ⁴⁰K al decaer a ⁴⁰Ar es un centellador por lo que el rayo X emitido se convierte en luz. Los impulsos luminosos generados en el centellador tienen que ser convertidos por una señal eléctrica y para ello se utiliza un tubo foto multiplicador (PMT) dispositivo fundamental para la detección por centelleo. Es una válvula electrónica que consta de un foto cátodo en donde se produce una conversión de luz en electrón, a continuación mediante un proceso de multiplicación de electrones por medio de unos electrodos llamados dinodos, se obtiene un impulso eléctrico cuya altura es proporcional a la intensidad de la luz producida en el detector y como esta a su vez proporcional a la energía absorbida al cristal de centelleo.

El detector de centelleo se aprovecha del hecho de que la radiación produce pequeños destellos luminosos en ciertos sólidos. Esta luz recoge y transforma en pulso eléctrico el proceso de luminiscencia, o sea la absorción de la radiación y la posterior emisión de luz, es muy rápido y disminuye el tiempo muerto.

El material que produce el destello se llama cristal de centelleo. Se selecciona para que tenga una alta eficiencia en absorber radiación ionizante y emitir luz luminiscencia. Debe ser transparente para poder transmitir la luz producida y debe estar a oscuras para que la luz ambiental no le afecte. El material más empleado como cristal de centelleo es el yoduro de sodio activado con talio, NaI (Tl). Es de costo bajo y muy estable como vimos anteriormente.

CAPITULO VI.
ACCIDENTES NUCLEARES

VI .1) ACCIDENTES NUCLEARES

VI .2) NORMALIZACION

CAPITULO VI.

ACCIDENTES NUCLEARES

Actualmente existe un temor a la radioactividad, quizás no bien documentado pero si mantenido por la mayoría de los medios de comunicación y con origen de episodios tan letales a la humanidad como las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki y alimentando asimismo por episodios accidentales como el de la central nuclear de Chernobyl, esto ha originado que muchos de los esfuerzos en investigación sobre los contaminantes radioactivos se hayan centrado en el estudio de la radiactividad sobre el hombre.

VI.1.) ACCIDENTES NUCLEARES.

Bajo condiciones normales de operación, la radiación que escapa de los reactores nucleares es muy pequeña, pero un escape accidental es un riesgo de gran preocupación ya que, un reactor medio contiene, una cantidad similar de material radiactivo como la bomba atómica lanzada en Hiroshima. El peligro no es que se produzca una explosión nuclear, ya que el material fisionable está muy diluido como para provocar una explosión nuclear. El riesgo real es el enorme calor generado en las barras de combustible, incluso aunque se haya parado la cadena de reacciones mediante las barras de control lo que ocurre automáticamente en caso de accidente. Este calor se transmite mediante el agua circulante hacia el reactor. Sin embargo si se producen fugas de agua y ésta no se repone, la temperatura se incrementa hasta niveles desastrosos lo que posibilita el escape de materiales altamente radiactivos. Existen sistemas que de forma automática reponen agua, pero estos sistemas pueden fallar bien por un mal funcionamiento del sistema o por errores humanos.

Un mal funcionamiento de los sistemas y fallos humanos han sido las causas responsables de los dos mayores accidentes que han marcado la era de la energía nuclear. En marzo de 1979 en la planta nuclear de Three Mile Island, próxima a Harrisburg, Pennsylvania, se fundieron las barras de combustible debido a una fuga de agua de refrigeración. Una bomba del sistema de refrigeración primario dejó de funcionar y las bombas auxiliares no estaban operando, debido a un error del operador, el sistema de refrigeración de emergencia se apagó momentáneamente. Unos minutos después del fallo de las bombas se había producido una enorme burbuja de gas hidrógeno como resultado del efecto de las altas temperaturas sobre el circonio de las barras de combustible. Esta burbuja evitó que el agua de refrigeración alcanzara las barras de combustible, las cuales se fundieron de forma parcial. El gran temor era que el hidrogeno se mezclara

con el aire y originara una gran explosión. Esto no sucedió, y el reactor enfrió gradualmente después de lanzar al exterior pequeñas cantidades de gases radiactivos.

Mucho más serio fue el accidente que tuvo lugar el 26 de abril de 1986 en la ciudad Ucrania de Chernobyl, un nombre hoy sinónimo de accidente nuclear. El reactor se incendió y voló en pedazos, lanzando una gran nube de productos radiactivos que regó de radioisótopos la inmensa mayoría de Europa y parte de Asia. El reactor continuó quemándose durante más de 10 días, emitiendo al medio ambiente una radioactividad de 10 millones de curies. Los reactores del tipo de Chernobyl, los cuales están aún en uso en zonas de la antigua Unión Soviética, presentan en su diseño diferencias con respecto a los descritos anteriormente en agua ligera a presión. Emplean como moderador grafito en lugar de agua. El grafito solo contiene átomos de carbono y desacelera los neutrones de forma muy efectivo; esto permite mantener la secuencia de reacciones empleando combustibles enriquecidos solamente con un 1.8% de ^{235}U . El calor se transporta mediante una corriente de agua que circula alrededor de cada barra, La refrigeración individual de cada barra permita remplazar las mismas, una a una, sin necesidad de apagar el reactor. En consecuencia, este tipo de reactor es uno de los que proporciona unos niveles mas elevados de productividad dentro de la industria nuclear.

Desafortunadamente, los reactores de grafito son inherentemente peligrosos. El plomeado de los mismos es muy complicado, y el grafito, al ser carbono, es muy inflamable. Esta es la razón por la cual el reactor de Chernobyl ardió de forma tan vigorosa después del accidente. Mucho más importante, los reactores de grafito tienen una propiedad peligrosa denominada coeficiente de radiactividad positivo. Cuando los niveles de potencia bajan lentamente, el reactor se desestabiliza y funciona fuera de control. Esto es lo que sucedió el día del accidente durante una comprobación de la respuesta del reactor a una simulación de caída de potencia, en combinación con un mal funcionamiento de las barras de control y decisiones erróneas del operador, provocaron que el reactor se descontrolara, vaporizara el agua, volara el techo del reactor y quemara el grafito. Dos personas murieron en la explosión y miles resultaron heridas. En los meses siguientes 29 individuos murieron a causa de la radiación. Se esperan efectos de la radiación a largo plazo, pero son difíciles de evaluar debido a la variabilidad a la exposición. Sin embargo se ha constatado una mayor incidencia en la región de cáncer de la tiroides en los niños. Los niños son particularmente sensibles al producto de fisión ^{131}I , ya que su tiroides crece rápidamente y concentra yodo.

Algunas áreas de Europa, debido a los vientos y al paso de la nube radiactiva, experimentaron lluvias abundantes. La pluviosidad fue de 100 a 1000 veces más elevada que la registrada en los últimos tiempos de

mayor actividad de pruebas de bombas nucleares. Se prohibió el consumo de leche de vacas alimentadas con pastos contaminados. Incluso varios años después del accidente, la radiactividad encontrada en renos de Escandinavia y ovejas de algunas áreas de Inglaterra supera los niveles permitidos en carne.

Globalmente, las normas de seguridad de la industria nuclear son muy estrictas. Hasta la fecha, solamente ha ocurrido un gran desastre entre los cientos de reactores nucleares que operan actualmente. Pero la posibilidad de otro Chernobyl aumenta por ello la industria nuclear planea la instalación de sistemas que eliminen el riesgo de accidentes no importando el incremento al costo de construcción y mantenimiento de las centrales nucleares²⁴.

VI.2.) NORMALIZACION DE LA RADIOACTIVIDAD.

En los últimos años la descarga hacia la atmósfera de material radioactivo ha aumentado considerablemente, constituyendo un peligro de salud pública, por lo que ha sido necesario implementar una serie de normas las cuales ayuden a prevenir algún tipo de accidente nuclear o en su caso regular la cantidad de radiactividad que haya sido liberada.

A consecuencia del accidente nuclear en Chernobyl antes expuesto, sabemos que los animales y sus subproductos como carne y leche, fueron contaminados. A nuestro país ingreso por medio de la paraestatal CONASUPO leche contaminada radiactivamente proveniente de Irlanda. A raíz de la polémica social, económica, política y de salud pública, generada por este caso en México se puso especial atención a los productos para consumo humano y animal, estableciéndose una norma la cual incluía límites máximos permisibles de contaminantes radiactivos en agua y alimentos. La NOM-088-SSA1-1994 de Bienes y servicios en contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo, que incluía alimentos de consumo masivo importados como leche y sus derivados, fórmulas para lactantes, agua purificada envasada, productos de la pesca congelados, en conserva ó seco-salados, grasas o aceites vegetales y animales carnes congeladas y productos cárnicos. Esta norma establece que el límite máximo permisible para ¹³⁷Cs es de 100Bq/Kg. Mas sin embargo, esta norma se cancelo en diciembre del año 2004 por la Comisión general para la Protección Contra Riesgos Sanitarios, por ser considerada una regulación excesiva para la industria imponiendo costos innecesarios en su determinación.

También se puede mencionar la Norma Oficial Mexicana NOM-033-SSA1-1993, Bienes y servicios. Irradiación de alimentos. Dosis permitidas en alimentos, materias primas y aditivos alimentarios; establece los parámetros y lineamientos para la irradiación de alimentos¹⁹.

La FDA (Food and Drug Administration) es el órgano gubernamental norteamericano encargado en regular el uso de energía ionizante sobre los alimentos tanto los de uso interno en USA, como los de importación. La FDA ha estudiado desde 1986 el 100% de sus productos de importación, y se cuantifica ^{134}Cs , ^{137}Cs , siendo su límite máximo de 110 Bq/Kg.

En México el análisis de ausencia de contaminación radiactiva es obligatorio en alimentos de exportación a USA y a otros países.

**CAPITULO VII.
DESARROLLO EXPERIMENTAL**

VII.1.) EQUIPO DE DETECCION

VII.1.1) CONTENEDOR MARINELLI

VII.1.2) ESTANDAR MULTINUCLIDO

VII.1.3) ESPECTROMETRO GAMMA

VII.2.) METODO

VII.2.1) CALIBRACION DE LA ENERGIA

VII.2.2) CALIBRACION DE LA EFICIENCIA

VII.2.3) PREPARACION DE MUESTRAS

VII.2.4) MEDICION

**VII.2.5) DETERMINACION DE LA CONCENTRACION
DE LOS RADIONUCLIDOS.**

**VII.2.6) DETERMINACION DEL CONTENIDO DE
POTASIO ELEMENTAL**

CAPITULO VII.

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Se presenta a continuación el desarrollo experimental que se llevo a cabo, relacionado con lo anteriormente expuesto en el presente trabajo, utilizando la técnica de espectrometría por rayos gamma, justificándose así la importancia de la detección y cuantificación de los radionúclidos en alimentos y la relación existente en la determinación del ^{40}K y el calculo de K elemental .

Se analizaron dos radionúclidos que pueden encontrarse en la leche, uno de ocurrencia natural que es el ^{40}K y otro contaminante el ^{137}Cs por medio de un detector de centelleo, que nos proporcionó datos acerca del número de núcleos decayendo por unidad de tiempo, calculando así la concentración de estos considerando la eficiencia de detección correspondiente, el rendimiento radiactivo de cada radionúclido, el peso de la muestra analizada, la actividad de los radionúclidos y la cantidad total de K elemental presente en la muestra de leche analizada.

VII.1.) EQUIPO DE DETECCION.

VII.1.1.) Contenedor Marinelli.

Cuando se trata de determinar emisores de rayos gamma de actividad baja, es de utilidad recipientes de plástico llamados vasos o contenedores Marinelli en los cuales se deposita al analito y es un recipiente con un espacio anular fabricado de polipropileno grado alimenticio y tiene forma de un cilindro en cuyo interior se deposita la muestra sólida o líquida. El vaso Marinelli consta de 12 cm. de diámetro con una altura de 11.5 cm. y un volumen de 500 ml. modelo gamma beaker 533-N proveedor gama and associates incorporated USA.

VII.1.2.) Estándar Multinúclido.

El estándar multinúclido, Es una mezcla de diferentes radionúclidos en estado sólido contenidos en un vaso Marinelli de 500 ml, los cuales presentaron una cierta actividad al momento de su adquisición, emitiéndose así un certificado de estos y de sus actividades correspondientes por parte de los laboratorios Isótopo Products en Burbank, California. Se anexa el certificado de calibración del estándar multinúclido al final del presente trabajo. Anexo I.

VII.1.3.) Espectrómetro gamma.

Para poderse llevar a cabo la determinación de la actividad de los radionúclidos en estudio se utilizó un detector de centelleo de NaI (Tl), tipo pozo Bicron 3x3" marca Labtech. Con un blindaje de bajo fondo de plomo marca Mymsa fabricado por Medidores Industriales y Médicos S.A de C.V. México. Conectado a su vez a una PC cargada con el programa maestro de Detección Radiactiva cuyo fabricante de dicho programa es EG GORTEC en Tenesse USA versión 1997.

VII.2.) METODO

VII.2.1.) Calibración de la energía.

Esta calibración proporciona datos útiles únicamente para un análisis cualitativo de la muestra. Se utilizó un estándar multinúclido que se colocó en el detector de la misma manera en la que se detecta la muestra. Se fijó el tiempo de detección en segundos, y se dio la orden al programa maestro de comenzar la detección y clasificación de los pulsos producidos por los rayos gamma que van incidiendo sobre el detector. Al finalizar el tiempo de detección se observaron en la pantalla de la computadora, las energías detectadas por el equipo, del multinúclido teniendo así en cuenta los respectivos umbrales de detección de nuestros radionúclidos de interés ^{40}K y ^{137}Cs .

VII.2.2.) Calibración de la eficiencia.

El sistema presenta diferentes eficiencias en la detección de radiaciones electromagnéticas dependiendo estas de su energía. Las radiaciones de menor energía tienen mayor probabilidad de disipar esta energía en el material

Esta calibración es necesaria para realizar un análisis cuantitativo de radiactividad. Se colocó el estándar (patrón radiactivo certificado) en el detector de igual forma que se detectó la muestra con un tiempo de conteo en segundos, se fijó el umbral de detección en aquel que previamente se determinó que era el correcto para la energía del radionúclido, registrando sus cuentas durante un minuto, antes de cada determinación se obtuvieron las cuentas debidas a la radiactividad de fondo (encendiendo el sistema sin muestra durante un minuto) que posteriormente se descontaron de aquellas obtenidas con el radioisótopo.

Con el o los espectros obtenidos para la calibración de eficiencia, en esta determinación se tomaron en cuenta a el ^{137}Cs y al ^{60}Co .

La eficiencia absoluta es la relación del conteo neto obtenido (C-F) y de las desintegraciones reales sufridas por el radionúclido. (actividad al momento de la determinación):

$$E(\text{abs}) = \frac{C-F \text{ (cpm)}}{\text{Act.15-XI-2000 (dpm)}}$$

C= conteo con el estándar

F= conteo de fondo

La eficiencia absoluta en la detección de cada energía es la razón del número de radiaciones detectadas entre el número de radiaciones emitidas. El número de radiaciones detectadas es el área bajo la curva, y para saber cuantas radiaciones emitió cada radionúclido en el tiempo de la detección (segundos) debemos conocer su actividad al momento de detección y considerar el porcentaje de cada núclido que decae emitiendo rayos gamma.

De acuerdo a la ecuación del decaimiento radioactivo, la actividad al tiempo t es: $A = A_0 e^{-\lambda t}$, siendo A_0 la actividad inicial o al tiempo cero. En este caso el tiempo cero es el referido a la producción del estándar multinúclido y transcurrieron 2.5 años, desde ese momento hasta la fecha de determinación por lo que $t = 2.5$ años. Para calcular la λ característica de cada radionúclido usamos la formula: $\lambda = \ln 2 / t_{1/2}$.

Para obtener el factor de decaimiento radioactivo se considera la siguiente formula:

$$FD = e^{(-\lambda) * 2.5 \text{ años}}$$

% de eficiencia para, ^{137}Cs .

$$\% \text{ de eficiencia} = \frac{\text{Actividad determinación}}{\text{actividad del estándar}} \cdot FD = \text{Eficiencia} * 100 = \% \text{ de Eficiencia.}$$

% de eficiencia para, ^{40}K .

Para el potasio cuarenta se obtuvo el valor de su eficiencia por medio de la interpolación este en la gráfica de % de eficiencia vs. Energía de radiación, ya que el multinúcleo utilizado no contenía a este radioisótopo.

VII.2.3) Preparación de muestras.

La muestra de leche en polvo, contaminada por radiactividad proveniente de Irlanda que se proporcionó por la Comisión Nacional de seguridad nuclear y salvaguardias, se almaceno con la clasificación IAEA, con un peso de 285g contenida en un vaso Marinelli de 500ml.

Las muestras de leche en polvo no contaminadas, por radiactividad analizadas se proporcionaron por los laboratorios Wyeth, los cuales son los únicos laboratorios de leche en polvo que exportan a Estados Unidos, Centro y Sudamérica, pero por cuestiones de seguridad de la empresa no se proporcionan datos referentes al nombre de la leche, ni del número de lote. Estas muestras se almacenaron con la clasificación LNC y un numero de identificación, LNC1, LNC2, LNC3, LNC4, el peso de cada muestra vario entre las muestras, para LNC1 232.9g , para LNC2 290.6g , para LNC3 290.6g y para LNC4 284.8g de muestra contenidas cada una en un vaso Marinelli de 500ml.

VII.2.4) Medición.

Se procedió a trabajar primeramente con la muestra de leche contaminada por radiactividad IAEA, colocando la muestra contenida en el vaso Marinelli en el detector, se tapo con el blindaje especial del sistema y dispuso a programar el sistema por medio del programa maestro de la computadora conectada al detector, por un tiempo de 3600 segundos, el cual nos permitió acumular un número de cuentas netas con un error estadístico menor del 20%, estos últimos datos nos los proporciono el programa maestro. En la pantalla de la computadora (registrador) se observaron dos líneas verticales que corresponden una a la energía de 661.6 KeV, característica de los rayos gamma emitidos por el cesio-137; y la otra correspondiente a la energía de 1460.8 KeV característica de los rayos X emitidos por el potasio-40. Terminado el tiempo de detección conocimos el numero de cuentas por segundo y su error estándar.

También se detecto la radiación de fondo para la cual se coloco en el detector solamente el vaso Marinelli por el mismo tiempo de detección que la muestra, por un tiempo de 3600 seg. Restándole así el número de cuentas obtenidas en esta determinación al número de cuentas obtenidas en la determinación anterior.

Se realizaron seis determinaciones de la misma muestra para obtener datos más confiables y de igual forma se trabajo con las muestras de leche no contaminada.

VII.2.5) Determinación de la concentración de los radionúclidos.

Se realizo un análisis estadístico de las muestras, obteniendo los promedios entre las mediciones obtenidas de cada muestra, su desviación estándar y su error estadístico.

Posteriormente se prosiguió con él cálculo de la concentración de los radionúclidos, considerando el tiempo de conteo, la eficiencia de detección correspondiente, el rendimiento radiactivo de cada radionúclido.

La actividad se calcula con la formula:

$$\text{Actividad} = \frac{\# \text{ de cuentas}}{\text{Eficiencia} * t \text{ (seg.)}} = \text{dps}$$

La actividad se calcula con la formula:

$$\text{Actividad} = \frac{\text{Area (cuentas)}}{\text{Eficiencia (cts,/rad } \gamma) * Y(\text{rad. } \gamma / \text{des.)} * t \text{ (seg.)}}$$

El número de cuentas, lo obtenemos directamente de la determinación después de transcurrido el tiempo de detección, en la pantalla del sistema teniendo datos en cph (cuentas por hora). La eficiencia será la correspondiente a el núclido el cual deseamos conocer su actividad. t se refiere al tiempo de detección en segundos. Por ultimo la Y se refiere a el porcentaje % de la abundancia isotópica del radionúclido en cuestión.

La actividad específica se obtiene dividiendo la actividad entre los kilogramos de la muestra.

Actividad específica Actividad (dps) / Kg. de muestra = dps./kg. = Bq/ Kg.

Quedando la formula para la actividad específica:

$$\text{Actividad} = \frac{\text{(cts)}}{\text{Eficiencia (cts/rad } \gamma) * 3600 \text{ seg.} * \text{Kg mstra.} * \text{Y(rad. } \gamma \text{ /des.)}} = \text{dps/Kg. leche } \acute{o} \text{ Bq/Kg.}$$

VII.2.6.) Determinación del contenido de potasio elemental.

Para obtener la cantidad de potasio total contenida en las leches tomamos en cuenta los siguientes datos:

Peso molecular K= 39.09g K

No de avogadro= 6.02×10^{23}

Abundancia isotópica del ^{40}K = 0.0118%

N= No. de núcleos de ^{40}K .

$N = \frac{\text{Actividad de } ^{40}\text{K Bq/Kg.} * \text{ tiempo de vida media del } ^{40}\text{K años}^{-1} * 365 \text{ días} * 24 \text{ horas} * 3600 \text{seg.}}{\text{Ln 2}}$

Ln 2

Átomos de Potasio.

$$1\text{g. K} * \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos de K}}{39.09 \text{ g. K}} = 1.54 \times 10^{22} \text{ átomos de K}$$

Átomos de Potasio-cuarenta

$$0.0118\% * \frac{1.54 \times 10^{22} \text{ átomos de K}}{100\%} = 1.8174 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K}$$

Gramos de potasio en 285g. de muestra.

1 g. K * $\frac{N \text{ (núcleos atómicos de } ^{40}\text{K en 0.285Kg. de leche)}}{1.8174 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K}}$ = g. K en 0.285 Kg. = g. K en 285g de muestra

$$1.8174 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K}$$

Gramos de potasio total contenidos en 100g de leche.

$\frac{\text{g. de K}}{285\text{g. de muestra}} * 100\text{g. leche} = \text{g. de K en 100 g. de leche.}$

Miligramos de potasio contenidos en 100g de leche.

$\text{g. de K en 100 g. de leche.} * \frac{1000\text{mg.}}{1\text{g.}} = \text{mg. de K en 100 g. de leche.}$

CAPITULO VIII. RESULTADOS.

CAPITULO VIII.

RESULTADOS.

CALIBRACIÓN DE LA EFICIENCIA

Radioisótopo	⁶⁰ Co	⁶⁰ Co	¹³⁷ Cs
Actividad original 15-Nov-00 (Mci)	0.28933	0.2933	0.2536
Actividad original 15-Nov-00	10840	10850	7985
t ^{1/2} (años)	50253	5253	30
Actividad al momento de la determinación 14-Mayo-03(dpm)	10640	11137	24546
Factor de decaimiento	0.9438	0.7190	0.7190
Energía (MeV)	1.17	1.33	0.662
% Eficiencia	2.66	2.42	5.42

Ejemplo de cálculos:

$$\text{Factor de decaimiento FD} = e^{-(\ln 2 / t^{1/2}) * t}$$

Para ¹³⁷Cs:

$$\text{FD} = e^{-(0.693 / 30 \text{ años}) * 2.5 \text{ años}}$$

% de eficiencia

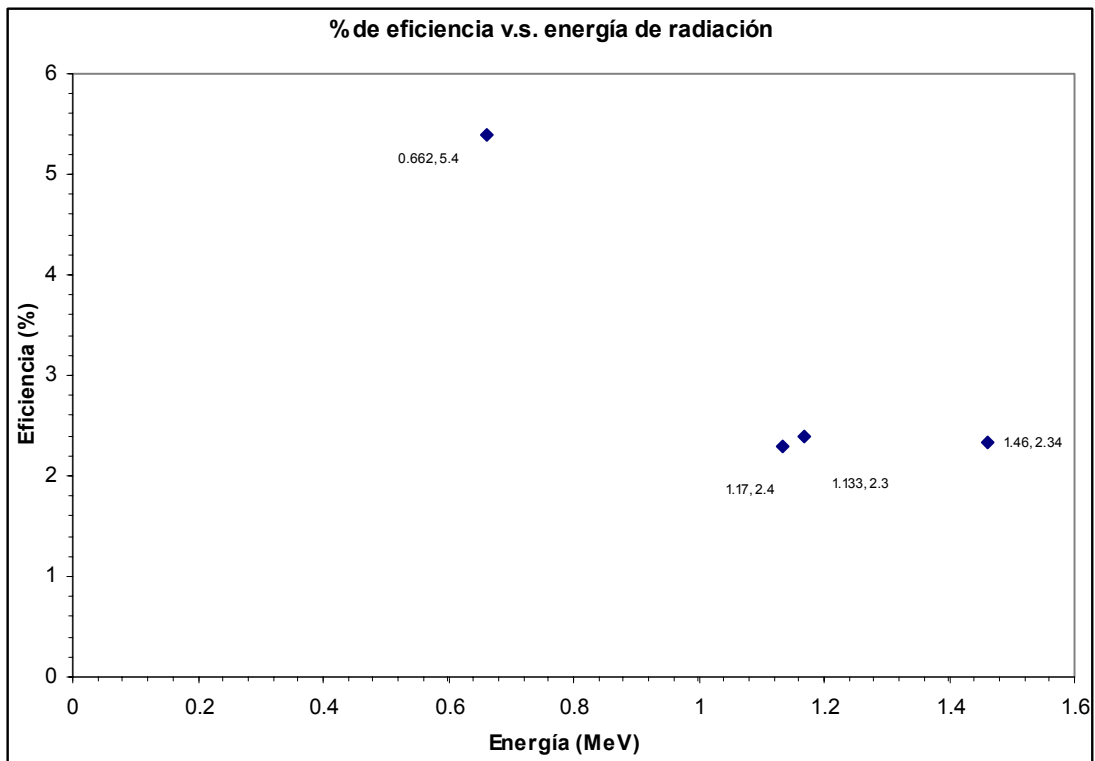
$$\% \text{ de eficiencia } ^{137}\text{Cs} = 409.1\text{cps} / 7985\text{cps} \cdot e^{-(0.693 / 30 \text{ años}) * 2.5 \text{ años}} = 0.054 * 100 = 5.42\%$$

Se consideraron los mismos cálculos para la eficiencia de ⁶⁰Co.

Para ⁴⁰K

Se realizó interpolación en la gráfica 1. % de eficiencia vs. energía de radiación, utilizando los datos anteriores del estándar en la calibración de la eficiencia. para conocer el % de eficiencia del ⁴⁰K realizando una interpolación, obteniendo la siguiente gráfica.

Gráfica 1. % de eficiencia vs. energía de radiación



Resultados de el % de eficiencia vs. energía de radiación

Radionúclido	% de Eficiencia	Energía MeV.
¹³⁷ Cs	5.4%	0.662
⁶⁰ Co	2.3%	1.133
⁶⁰ Co	2.4%	1.170
⁴⁰ K	<u>2.34%</u>	1.46

% de eficiencia ⁴⁰K= 2.34%

RESULTADOS PARA LA LECHE CONTAMINADA

Análisis estadístico

Tabla de Resultados referente a la determinación de Leche IAEA.

Determinación	No. De cuentas fondo		No. De cuentas fondo + muestra (cph)		No. De cuentas de la muestra	
	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
1	-237±160	899±148	2073±183	2131±142	2073	1232
2	-357±236	752±150	2340±243	2276±142	2340	1524
3	-282±235	707±159	2183±240	1970±170	2183	1263
4	-234±225	1077±130	2169±243	2326±152	2169	1249
5	-412±240	894±145	1972±255	2271±162	1972	1377
6		563±169	2088±261	2486±158	2088	1923
Sumatoria					12825	8568
Promedio					2137.5	1428
S n-1					125	266
%Error estadístico					6	18
%Error estadístico					6	9.2

En el caso de ¹³⁷Cs no se restan el número de cuentas del fondo, por que resultado negativo para el rango del espectro de energía el cual tiene este radionúclido y se toma como cero por esta razón las cuentas de fondo no se consideran.

Para disminuir el error estadístico de potasio cuarenta, se acomodo de mayor a menor No. De cuentas obtenidas.

Determinación	No. De cuentas
6	1923
5	1524
4	1377
3	1263
2	1249
1	1232

Cuando n= 2 a 7 datos la formula empleada será:

$$X_{inf}. r_6 = \frac{x_6 - x_5}{x_6 - x_1}$$

Entonces al sustituir los valores queda:

$$r_6 = \frac{1923 - 1524}{1923 - 1232} = 0.577$$

Si 0.577 es menor de 0.698(valor de tablas distribución normal) es aceptado.

Se utilizó una distribución normal a un nivel de significancia del 1%, el dato esta casi al limite de ser rechazado y poder eliminarlo, por lo que se tomo el criterio de eliminar a 1923 de los valores obtenidos.

Por lo que los datos quedan de la forma siguiente:

Radionúclido	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
Promedio No. De cuentas	1329	2137
Desviación estándar	123	125
% Error estadístico	9.2	6

Calculo de la actividad.

$$\text{Actividad } ^{40}\text{K} = \frac{1329 \text{ cts}}{0.234 \text{ (cts./rad } \gamma) * 3600 \text{ seg.} * 0.285\text{Kg.} * 0.11 \text{ (rad. } \gamma \text{ /des.)}} = 50.3233 \text{ dps/Kg. leche} = 50.3233 \text{ Bq/Kg.}$$

$$\text{Actividad } ^{137}\text{Cs} = \frac{2137 \text{ cts}}{0.0548 \text{ (cts./rad } \gamma) * 3600 \text{ seg.} * 0.285\text{Kg.} * 0.851 \text{ (rad. } \gamma \text{ /des.)}} = 44.6629 \text{ dps/g. leche} = 44.6629 \text{ Bq/Kg.}$$

*Tenemos que 1 Bq= 1 dps. (desintegración/segundo)

$$50.3233/44.6629 = 1.2673 \text{ veces mayor la actividad del } ^{40}\text{K} \text{ que la actividad del } ^{137}\text{Cs.}$$

Calculo del potasio total presente en leche contaminada.

$$N = \frac{50.3233 \text{ Bq/Kg.} * 1.26 \times 10^9 \text{ años}^{-1} * 365 \text{ días} * 24 \text{ horas} * 3600 \text{ seg.}}{0.693}$$

$$N = 2.8850 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K} / 0.285 \text{ Kg. de leche}$$

Átomos de Potasio.

$$1 \text{ g. K} * \frac{6.02 \times 10^{23} \text{ átomos de K}}{39.09 \text{ g. K}} = 1.54 \times 10^{22} \text{ átomos de K}$$

Átomos de Potasio-cuarenta

$$0.0118\% * \frac{1.54 \times 10^{22} \text{ átomos de K}}{100\%} = 1.8174 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K}$$

Gramos de potasio en 285g. de muestra.

$$1 \text{ g. K} * \frac{2.8850 \times 10^{18} \text{ núcleos atómicos de } ^{40}\text{K} / 285 \text{ g. de leche}}{1.8174 \times 10^{18} \text{ átomos de } ^{40}\text{K}}$$

$$= 1.5874 \text{ g de K en } 0.285 \text{ Kg. de leche} = 1.5874 \text{ g de K en } 285 \text{ g. de leche}$$

Gramos de potasio total contenidos en 100g de leche.

$$\frac{1.5876 \text{ g. de K}}{285 \text{ g. de muestra}} * 100 \text{ g. de leche} = 0.55698 \text{ g. de K en } 100 \text{ g. de leche.}$$

Miligramos de potasio contenidos en 100g de leche.

$$0.55698 \text{ g. de K} / 100 \text{ g.} * \frac{1000 \text{ mg.}}{1 \text{ g.}} = 556.9824 \text{ mg. de K} / 100 \text{ g. de leche}$$

Tabla de resultados para leche contaminada IAEA.

Muestra	Actividad ^{137}Cs (Bq/Kg.)	Actividad ^{40}K (Bq/Kg.)	g. K/100g. de muestra	mg. K /100g. de muestra
Leche IAEA	44.6629	50.32	0.55698	556.9824

RESULTADOS PARA LA LECHE NO CONTAMINADA

Los cálculos se realizaron con el mismo procedimiento que en el caso anterior para la leche IAEA.

Tabla de resultados para las muestras de leche no contaminadas por radiactividad.

Muestra	No. De Cuentas ^{137}Cs (cph)	No de Cuentas ^{40}K (cph)	Actividad ^{137}Cs (Bq/Kg.)	Actividad ^{40}K (Bq/Kg.)	g. K/100g muestra	mg. K /100g muestra
LNC1	*****	804	*****	37.25	0.4123	412.340
LNC2	*****	616	*****	22.94	0.2539	253.909
LNC3	*****	626	*****	23.22	0.2570	257.008
LNC4	*****	949	*****	36.06	0.3991	399.127

LNC= Leche no contaminada por radiactividad.

*****= No presenta actividad radiactiva.

Tabla de resultados, comparativos entre la leche contaminada por radioactividad y la no contaminada y cantidad de K elemental presente.

Leche analizada	Radionúclido	Actividad Especifica Bq/Kg	Potasio elemental mg./100g. de leche
IAEA	^{40}K	50.32	556.982
	^{137}Cs	44.66	
LNC1	^{40}K	37.25	412.340
	^{137}Cs	***	
LNC2	^{40}K	22.94	253.909
	^{137}Cs	***	
LNC3	^{40}K	23.22	257.008
	^{137}Cs	***	
LNC4	^{40}K	36.06	399.127
	^{137}Cs	***	

IAE= Leche contaminada por radioactividad.

LNC= Leche no contaminada por radioactividad.

***= No presenta actividad radiactiva.

En los anexos II y III se muestran los espectros obtenidos, por el equipo de detecc

CAPITULO IX.
ANALISIS DE RESULTADOS

CAPITULO IX.

ANALISIS DE RESULTADOS

De los resultados obtenidos mediante la técnica planteada en este trabajo se encontró que el ^{40}K , estuvo presente en todas las leches en polvo analizadas presentando una actividad de 50.32 Bq/Kg. en la leche IAEA y una actividad promedio de en las leches LNC de 28.34 Bq/Kg. Esto ya se esperaba por ser un radionúclido de origen natural que debe estar presente en los alimentos ricos en potasio.

La razón por la cual encontramos presente al ^{40}K en todas las muestras de leche analizadas es por que prácticamente todos los alimentos contienen potasio; la leche, los cereales, las frutas, las verduras, la carne etc.; por lo que la principal vía de entrada al organismo de este radionúclido, son los alimentos ricos en este nutrimento. El potasio es un elemento esencial que se encuentra bajo un estricto control homeostático en el cuerpo. Por esto la dosis que el cuerpo recibe de este radionúclido es constante, influyendo de alguna manera, la composición de este en la dieta, siendo la principal vía de entrada al organismo de este radionúclido.

De este estudio, observamos también que el nivel de actividad específica que presentó el ^{137}Cs en la leche contaminada IAEA fue de 44.66 Bq/Kg., presentando efectivamente contaminación radiactiva.

Actualmente la NOM-008-SSA1-1994 Bienes y servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados. No está vigente en el país más sin embargo se toma en cuenta como referencia para establecer si el valor obtenido del radionúclido ^{137}Cs en la leche IAE se encuentra por debajo del límite máximo permisible y así poder o no considerarla un riesgo para la salud. El nivel de actividad específica que presentó el ^{137}Cs en la leche IEA contaminada proveniente de Irlanda fue de 44.66 Bq/Kg. Este valor se encuentra por debajo del límite máximo permisible estipulado en dicha norma que es de 100 Bq/Kg. por lo que se puede decir que esta leche no causa un riesgo a la salud al ser consumida; sin embargo, esta leche no es un alimento de óptima calidad pues presenta contaminación radiactiva.

La FDA (Food and Drug Administration) que es el órgano gubernamental norteamericano encargado de regular el uso de energía ionizante sobre los alimentos de uso interno y de importación en USA. Nos indica que el límite máximo permitido para radionúclidos como ^{40}K y

^{137}Cs es de 110 Bq/Kg. Por lo que también se puede decir que los valores obtenidos en el presente estudio están por debajo de los límites máximos permisibles en esta norma. Y comparando la norma mexicana con la de USA se observa que la norma de USA es un poco más estricta que la norma que se tenía en México.

El ^{137}Cs , es un radionúclido que no debería estar presente en ningún alimento más sin embargo se trabajó, como se expuso anteriormente con una muestra de leche contaminada proveniente de Irlanda proporcionada por la Comisión Nacional de Seguridad y Salvaguardias con precedente de que esta leche resultó ser contaminada por la lluvia radioactiva que se emitió a campos irlandeses después del accidente nuclear ocurrido en Chernobyl, en donde las vacas consumieron forraje y agua contaminados por radiactividad siendo esta, un integrador de radioactividad, produciendo leche contaminada por radioactividad.

También se pudo observar que la relación, entre la actividad natural debida al potasio-cuarenta es 1.2673 veces mayor que la contaminación radioactiva debida al cesio-137 en la leche IAEA, esto nos dice que recibimos una dosis mayor de radiación por medio de fuentes naturales de radioactividad en comparación con las fuentes contaminantes.

De los radionúclidos antes mencionados el ^{137}Cs y ^{40}K , se puede decir que ambos emiten radiación electromagnética, aunque de distinta naturaleza y energía, pues mientras el ^{40}K emite rayos X de 1460.8 KeV, el ^{137}Cs emite rayos γ de 662 KeV. Estas emisiones son energía ionizante por lo que pueden causar daño a los seres vivos, especialmente el ^{137}Cs por emitir rayos γ con una energía menor a la de los rayos X del K^{40} ; Las emisiones radioactivas de menor energía son más peligrosas por poseer una energía lineal de transferencia mayor, lo cual hace que entreguen su energía más rápidamente y en espacios menores causando una ionización más localizada que puede provocar mayor daño.

Por otra parte al analizar las muestras de leches comerciales, observamos que estas no presentaban ningún indicio de contaminación radioactiva ya que no encontramos presente al ^{137}Cs . Al no encontrar la presencia de ^{137}Cs en las leches LNC podemos decir que hay un buen manejo de la radioactividad en la zona de producción de esta leche analizada.

En la detección del ^{40}K que se empleo en este estudio para determinar la cantidad de K elemental presente en las muestras de leches analizadas, se utilizaron datos y constantes que nos llevaron a conocer su concentración, tomando en cuenta que en todos los alimentos que contienen K elemental, existe un 0.0118% de este potasio como ^{40}K radiactivo cuya dosis siempre va a ser constante. Resultando esta técnica de utilidad para conocer la cantidad total de potasio presente en los alimentos que lo contienen. Siendo esta una técnica alternativa para su determinación ya que como se dijo anteriormente el ^{40}K siempre va a estar presente en alimentos que contengan potasio.

En México se estableció la NOM-0088-SSA1-1994. Después de que se importo una gran cantidad de leche contaminada de Irlanda, causo una gran controversia en el país, no conociendo los riesgos y acciones a seguir con ella. Esta experiencia dejo un precedente para no minimizar la importancia de la detección y cuantificación de radionúclidos que puedan estar presentes en los alimentos. Más sin embargo actualmente esta norma se cancelo, el 17-12-2004 por la Comisión general para la Protección Contra Riesgos Sanitarios, por ser considerada una regulación excesiva para la industria imponiendo costos innecesarios en su determinación, además de que esta norma se encontraba solamente dirigida exclusivamente a los productos de importación, atentando los acuerdos internacionales los cuales señalan que las especificaciones de los productos que se deben establecer sin importar si su origen era nacional o importado.

Se propone entonces, que se realice una norma que contemple este tipo de análisis radioactivo en los alimentos que puedan resultar sujetos a una contaminación de este tipo, considerando tanto a productos nacionales que pudieran estar sujetos a contaminación radioactiva y a internacionales, ya que es necesario no aumentar las dosis colectivas de radioactividad, para evitar, riesgos de daños a la salud causados por ingerir radionúclidos.

CAPITULO X.
CONCLUSIONES

CAPITULO X. CONCLUSIONES.

Para este trabajo de tesis profesional, se demostró la importancia de la determinación de radionúclidos en alimentos llegando a las siguientes conclusiones:

Los alimentos son una vía de entrada de radionúclidos al organismo, por eso es importante su detección y cuantificación.

El ^{137}Cs es un radionúclido, que no debe estar presente en los alimentos porque es un indicativo de contaminación radiactiva.

El ^{40}K , siempre va estar presente en los alimentos que contienen potasio por ser un radionúclido de origen natural al constituir el 0.011% del K total contenido en los alimentos.

La detección de radioactividad debida al ^{40}K , resulta de utilidad para calcular la cantidad de K elemental presente en cualquier alimento.

La espectrofotometría de rayos gamma, utilizando un detector de centelleo de NaI es una técnica útil para la detección y cuantificación del ^{40}K y ^{137}Cs en alimentos.

En la actualidad los usos de radiación son cada vez más frecuentes en el mundo por esto, la probabilidad de un manejo inadecuado de radiación o de un accidente nuclear esta latente por esto, es necesario ejercer un control de radionúclidos en alimentos.

Se propone realizar este tipo de análisis, regularmente en alimentos que presenten indicios de una exposición radioactiva, por medio de una Norma que establezca los niveles de radioactividad permitidos de radionúclidos presentes en alimentos, para disminuir las dosis de radiación ingeridas.

CAPITULO XI.
BIBLIOGRAFÍA

CAPITULO XI.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1) Amiot J., Ciencia y tecnología de la leche. Acribia, S.A., Zaragoza. 1991. pág. 223-226.
- 2) Bermejo F., Química analítica general cualitativa e instrumental, Vol. 2. Paraninfo, 6ª edic., Madrid, pág. 1253-1337, 1991.
- 3) Bosh P., Pioneros de las ciencias nucleares. Fondo de cultura económica S.A., 3ª edic., México D.F. 1999.
- 4) Brandan M., Díaz R., La radiación al servicio de la vida. Fondo de cultura económica S.A., 3ª edic., México D.F. 1998.
- 5) Bulbulian S., La radiactividad. Fondo de cultura económica S.A., 1ª reimpresión., México D.F. 2003. pág. 80-101.
- 6) Casado C., Guía para el análisis químico de la leche y los derivados lácteos. Ediciones Ayala, Madrid, pág. 547-552, 1991.
- 7) Collier J., Introducción a la ingeniería nuclear. Harla México D.F., Pág., 1-21, 1992.
- 8) Charles A., Ciencia de la leche. Reverte, S.A., Barcelona ., Pág. 220-226, 1985.
- 9) Figueruelo J., Martín M. Sobre energía nuclear y sus aplicaciones. Reverte, S.A.; Barcelona., Pág. 327-332, 2001.
- 10) Glasstone S., La energía atómica sus principios y fundamentos básicos. Compañía editorial continental S.A., México D.F., pág. 285-339, 843-883, 1963.
- 11) Goded E.; Teoría de elementos y reactores de ing. Nuclear. Secc. De publicaciones de la J.E.N. Madrid, pág. 27 y 277, 1975.

- 12) Harvey E.; Introducción a la física atómica y nuclear. Alambra S.A., Madrid, pág. 333-408, 562-564, 1984.
- 13) Haward A., Instrumentación Química. Lamusa, México D.F., 623-661, 1980.
- 14) Huges., Sobre energía nuclear y su aplicación a fines y principios. Reverte S.A., México D.F., pág. 75-170, 1960.
- 15) Jennes R., Química física lactológica. Acribia S.A., Zaragoza., pág 37-49, 1987.
- 16) Kerschner V., Nutrición terapéutica y dietética. El manual moderno. S.A. de C.V., México D.F., 1983.pág. 15-18..
- 17) Luquet F., Leche y productos lácteos. Acribia S.A., Zaragoza, pág.. 57 y 224, 1991.
- 18) Navarrete M., Cabrera L. Introducción al estudio de los radioisótopos, 2ª. Edición UNAM Facultad de Química, Sección Nuclear, Departamento de química nuclear, México D.F., 1993. pág. 1-120.
- 19) Norma Oficial Mexicana, NOM-088-SSA-1994. Bienes y servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados. Límites Máximos Permisibles.
- 20) Ricards J., Las radiaciones I reto y realidades. Fondo de cultura económica S.A., México D.F. 2001. pág. 20-85.
- 21) Ricards J., El manejo de las radiaciones. Fondo de cultura económica S.A., México D.F., pág. 77-91, 1990.
- 22) Riveroll S., Estudio comparativo entre la radiactividad y la contaminación radiactiva en alimentos. Tesis licenciatura, UNAM, México D.F., 1998.
- 23) Rodenas J., Energía atómica. Universidad Politécnica de Valencia. Servicio de publicaciones Ibendrola, Valencia España, 1994. pág. 50-56.

- 24) Spiro T., Stigliani W. Química medioambiental. Pearson Educación. S.A., Madrid, 2ª. Edición., pág. 44-67, 2004.
- 25) Suárez F., Prospección de minerales radioactivos. S. de ingeniería de minas Dpto. de publicaciones. Madrid. Pág. 75-77,1972.
- 26) Walstra P., Robert J., Química y física lactológica. Acribia S.A., Zaragoza, pag. 125-130, 1987.
- 27) Wiley j., Chemical Análisis By Nuclear Methods., Estados Unidos de Norte América, pág., 23-56, 417-430, 1994.

ANEXOS.

ANEXO I.

CERTIFICATE OF CALIBRATION MULTINUCLIDE STANDARD SOURCE

Customer: MEDIDORES INDUSTRIALES Y MEDICOS S.A. P.O. No.: E-3827
 Catalog No.: EG-ML Reference Date: 15-Nov-00 12:00 PST
 Source No.: 733-99 Total Radioactivity: 5.215 μ Ci
 Total Radioactivity: 193.0 kBq

Description of Source

- a. Capsule type: 500 mL Marinelli beaker (533N)
 b. Nature of active deposit: Multinuclide distributed in 1.0 g/cc epoxy matrix
 c. Active diameter/volume: Approximately 500 mL (499.9 grams)
 d. Backing: Plastic
 e. Cover: Plastic

Gamma-Ray Energy (keV)	Nuclide	Half-life	Branching Ratio (%)	Activity (μ Ci)	Gammas per second	Total Uncert.
88	Co-109	462.6 \pm 0.7 days	3.63	1.629	2188	3.1%
122	Co-57	271.79 \pm 0.09 days	85.6	0.05626	1782	3.1%
159	Tc-123m	119.7 \pm 0.1 days	84.0	0.08354	2596	3.0%
320	Cr-51	27.706 \pm 0.007 days	9.86	1.782	6501	3.0%
392	Sn-113	115.09 \pm 0.04 days	64.89	0.2787	6691	3.0%
514	Sr-85	84.849 \pm 0.004 days	98.4	0.3539	12880	3.0%
662	Cs-137	30.17 \pm 0.16 years	85.1	0.2536	7985	3.0%
898	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	94.0	0.4848	16890	3.0%
1173	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.86	0.2933	10840	3.0%
1333	Co-60	5.272 \pm 0.001 years	99.98	0.2933	10850	3.0%
1836	Y-88	106.630 \pm 0.025 days	99.36	0.4848	17820	3.0%

Method of Calibration

This source was prepared from a weighed aliquot of solution whose concentrations in μ Ci/g were determined by gamma spectrometry.

NIST Traceability

This calibration is traceable to the National Institute of Standards and Technology.

Leak Test(s)

See reverse side for Leak Test(s) applied to this source.

Notes

- Nuclear data was taken from IAEA-TECDOC-619, 1991.
- IPL participates in an NIST measurement assurance program to establish and maintain implicit traceability for a number of nuclides, based on the blind assay (and later NIST certification) of Standard Reference Materials (As in NRC Regulatory Guide 4.15).
- Overall uncertainty is calculated at the 99% confidence level.
- This source has a working life of 1 year.



ISOTOPE PRODUCTS LABORATORIES
 1800 N. KEYSTONE ST.
 BURBANK, CALIFORNIA 91504
 818-843-7000 FAX 818-843-6168

ISO 9001 CERTIFIED

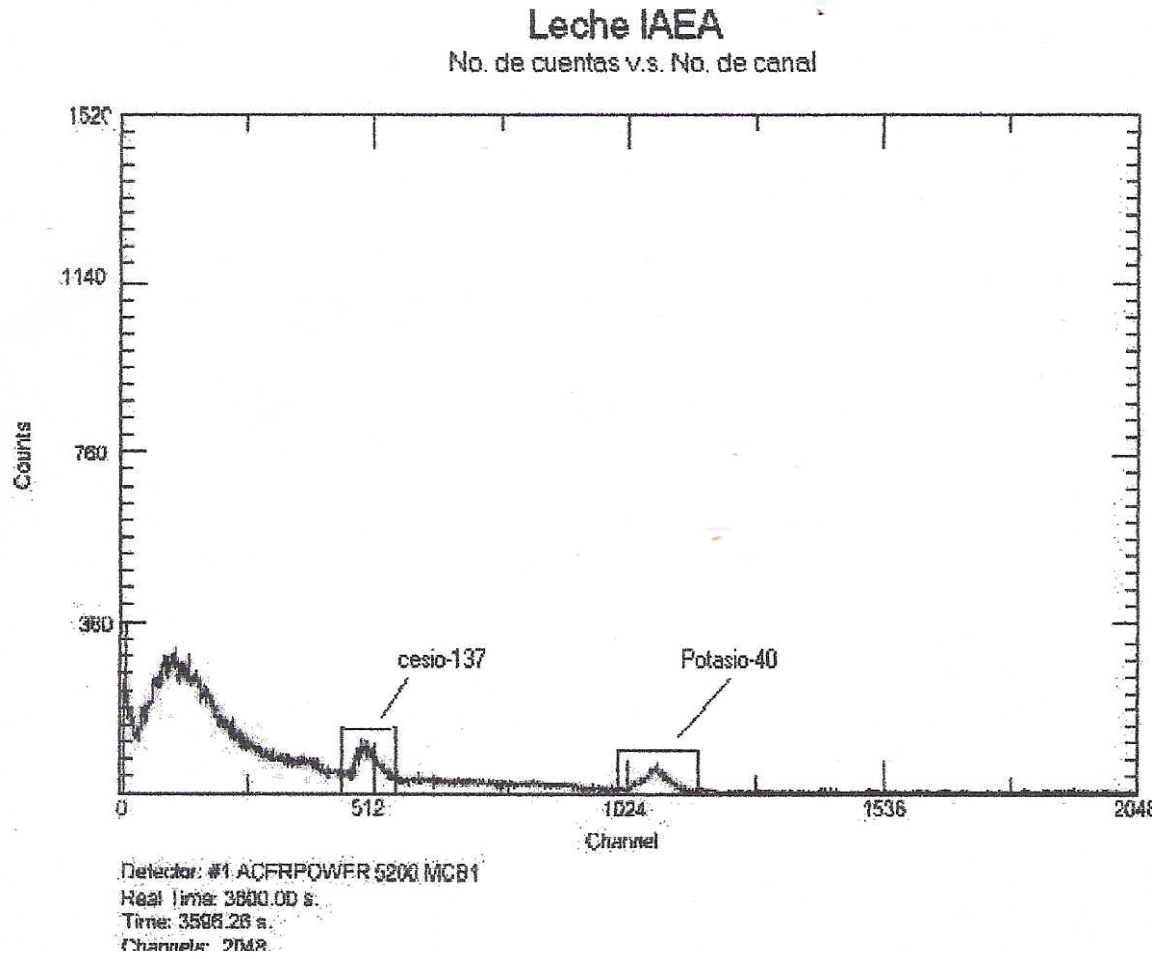
Daniel James Van Tolson
 Quality Control

28-NOV-00
 Date Signed

IPL Ref No. 733-99

ANEXO II

Espectro obtenido por el equipo de detección para la leche contaminada.



ANEXO III.

Espectro obtenido por el equipo de detección para la leche no contaminada LNC.

LECHE LNC

No. De cuentas v.s. No. De canal

