



FACULTAD DE CIENCIAS
EXACTAS Y NATURALES



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS y NATURALES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

TESINA PRESENTADA PARA OBTENER
EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIADO EN QUÍMICA

Identificación de isótopos emisores de radiación gamma
en trigo producido en la Provincia de La Pampa

Patricia Lorena BIDEGAIN ANDRÉS

Director: Prof. Dra. Judith Desimoni
Co-Director: Dr. Guido Mastrantonio

SANTA ROSA (LA PAMPA)

ARGENTINA

2007

ÍNDICE

PREFACIO.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	3
RESUMEN.....	4
CAPITULO I.....	5
Introducción	5
CAPITULO II	8
• Física Nuclear.....	8
• Un poco de Historia.....	8
• El Núcleo.....	9
• Masas atómicas.....	9
• Estabilidad.....	10
• Energía de enlace.....	11
• Desintegraciones.....	12
• Decaimiento a.....	13
• Decaimiento b.....	13
• Emisión de fotones.....	14
• Ley de decaimiento radioactivo.....	15
• Vida media.....	15
• Fisión nuclear.....	17
• Fusión nuclear.....	18
• Reacciones nucleares.....	19
• Interacción de partículas cargadas con la materia.....	20
• Interacción de partículas α con la materia.....	20
• Interacción de partículas β con la materia.....	20
• Interacción de la radiación γ y X con la materia.....	20
• Absorción de la radiación por la materia.....	22
CAPITULO III	24
• Radiactividad en el medio ambiente y los alimentos.....	24
• Efectos de la radiación sobre el ser humano.....	30
• Incorporación de material radiactivo.....	33

CAPITULO IV.....	35
• Riesgos biológicos.....	35
• Efectos biológicos de la radiación.....	36
CAPITULO V.....	40
• Monitoreo de alimentos.....	40
• Muestras de Alimentos.....	42
• Muestreo.....	44
CAPITULO VI.....	46
• Materiales y métodos.....	46
• Preparación de las muestras.....	47
• Espectroscopía gamma.....	48
• Análisis de los espectros.....	51
CAPITULO VII.....	54
• Resultados y discusión.....	54
• Conclusiones.....	57
BIBLIOGRAFÍA.....	58

PREFACIO

Esta Tesina es presentada como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Licenciado en Química de la Universidad Nacional de La Pampa y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad ni en otra Institución Académica. Se llevó a cabo en dependencias del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa y del Grupo de Investigación y Servicios de Radioactividad y Medio Ambiente del Departamento de Física de la Facultad de Física de la Universidad de La Plata y del Instituto de Física La Plata-CONICET, durante el período comprendido entre Mayo de 2004 y el noviembre de 2006, bajo la dirección de la Dra. en Física Judith DESIMONI y la codirección del Dr. en Química Guido MASTRANTONIO.

AGRADECIMIENTOS

A mi directora la Dra. Judith Desimoni, Dr. Guido Mastrantonio, a quienes agradezco su invaluable colaboración y la constante cooperación y apoyo en las diferentes etapas del trabajo de Tesis.

Se agradece a la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la UNLPam por financiar el proyecto y facilitar el equipamiento necesario para el desarrollo del mismo.

A los Dres. Leonardo Errico y Marcela por las sugerencias aportadas.

También dar gracias al Pabellón de Química de la UNLPam, quienes de una u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo y en mi formación como profesional en esta Universidad, de cada uno de ellos he tratado de adquirir lo mejor.

A Favio Sives alumno de la Facultad de Física Universidad Nacional de La Plata que colaboró en las determinaciones de las muestras en la facultad.

Por último quiero agradecer y dedicar este trabajo de Tesis de Licenciatura a: mi familia, a mis amigos, quienes me han brindado un constante apoyo durante toda la carrera en ésta última etapa, a Dios y a la Virgen María.

9 de noviembre de 2007

Patricia Lorena Bidegain Andrés

RESUMEN

La presencia de radionucleídos en hábitat humanos es una fuente de exposiciones prolongadas y por ende es objeto de monitoreos continuos dado que las radiaciones ionizantes impactan en los organismos vivos produciendo daños de diferente magnitud. Estas radiaciones pueden tener origen por un lado en los rayos cósmicos, los nucleidos cosmogénicos y los nucleidos primordiales, y por otro en elementos originados por el uso tecnológico de nucleidos en la industria y en la medicina que han sido volcados al medio ambiente o acumulados como pasivos ambientales. Estos nucleidos se pueden detectar en el medioambiente y en los organismos vivos ya que son incorporados en sus tejidos. Por estos motivos, el monitoreo radiológico sistemático del medio ambiente y de alimentos, tanto de los radionucleídos naturales como de los artificiales, no sólo para tener una rutina de control de las instalaciones nucleares, sino también para poder disponer de una línea de base que permita evaluar el impacto causado por actividades humanas resulta de gran importancia. Finalmente, el monitoreo de alimentos constituye una herramienta útil para caracterizar los perfiles de cada región y para evaluar la posible contaminación debida a accidentes de liberación de material radiactivo.

En nuestro país existen pocas medidas de la radiactividad presente en muestras de alimentos, prácticamente no hay datos que provengan de la provincia de La Pampa. Esto es así, dado que la Agencia Regulatoria Nuclear y la Comisión de Energía Atómica realizan monitoreos ambientales y alimenticios fundamentalmente en regiones donde hay instalaciones nucleares o industrias relacionadas.

En este trabajo se analizaron, mediante espectroscopía γ , seis muestras de trigo provenientes de diferentes regiones de la provincia de La Pampa con el objetivo de identificar los isótopos emisores presentes. Las muestras fueron deshidratadas y analizadas con un espectrómetro γ con un detector de Germanio Hiperpuro, que posee una alta resolución y eficiencia en la medida.

Los resultados obtenidos indicaron que no hay presencia de nucleidos de origen antropogénico. La estimación de la dosis efectiva equivalente, señala que no existe riesgo significativo debido al consumo de harinas de trigo en la población.

CAPITULO I

INTRODUCCION

La radiación intervino en el *big-bang* que, hace 20000 millones de años, se cree, dio origen al Universo. Desde su formación, hace 4600 millones de años, la Tierra es radioactiva. Desde el comienzo de la vida en nuestro planeta, estuvo expuesta a cierto nivel de radiación natural, originada en la radiación cósmica, los nucleidos cosmogénicos y los nucleidos primordiales. Por esta razón, el ser humano está expuesto a radiación externa e interna. La primera debida a la radiación cósmica y a las radiaciones emitidas por los radionucleidos naturales existentes en la corteza terrestre, mientras que la segunda tiene origen en aquellos radionucleidos naturales incorporados en los alimentos, bebidas y en el aire. A ésta debe sumarse, a partir del siglo XX, el aporte de los nucleidos de origen antropogénico, ya sea por aplicaciones médicas o por el volcado al medio ambiente en los ensayos de armas nucleares o accidentes en reactores, entre otras prácticas [1].

Pocos asuntos científicos han provocado tanta controversia pública como los efectos de la radiación. Por esta razón, en 1955 la ONU creó el UNSCEAR (Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los efectos de las Radiaciones Atómicas), que recopila y evalúa sistemáticamente la información disponible sobre las fuentes, dosis, efectos y riesgos de la radiación a escala mundial. Esto ha permitido desarrollar nuevas metodologías de vigilancia y radioprotección [2].

En nuestro país, la Agencia Regulatoria Nuclear (ARN) y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) realizan monitoreos ambientales y alimenticios fundamentalmente en regiones donde hay instalaciones nucleares [3, 4]. Para ello, se analizan muestras representativas de los diferentes compartimentos de la matriz ambiental de transferencia de radionucleídos. Para evaluar el impacto ambiental de descarga líquidas se monitorean aguas de río, sedimentos y peces y en algunos casos agua de consumo humano. El impacto de las descargas atmosféricas en forma de gases se evalúa mediante alimentos producidos en la zona tales como leche, lechuga, acelga, repollo, brócoli, espinaca, hinojo, batata, cebolla de verdeo, remolacha, puerro, naranja, pomelo, mandarina, durazno, melón, chaucha, berenjena, zapallo, tomate, pasto, etc. [3]. En forma sistemática Se realizan determinaciones de ^{60}Co , ^{137}Cs , U y Tritio.

En el año 1991 el Ministerio de Salud y Acción Social de la Nación hizo una compra de leche en polvo, de marca Jorgiano, con el propósito de distribuirla dentro de su plan de atención

materno-infantil. Llevadas estas muestras de leche al laboratorio, se encontró que contenía ^{137}Cs y ^{134}Cs , similar a lo hallado por Patricia Massolo en el Departamento de Física de la Universidad Nacional de La Plata. La actividad medida de estos nucleidos fue de 20Bq/kg. y 1,2Bq/kg, respectivamente. Esta actividad es más de 15 veces inferior que la proveniente del ^{40}K (300-400 Bq/kg.), que la leche en polvo contiene naturalmente. Más que como un control sanitario la medición sirvió para identificar el origen del producto. La presencia de estos isótopos de Cs indicaba que la leche había sido importada, ya que no estaban presentes en muestras de leche en polvo de producción nacional. Es más, la presencia de ^{134}Cs , cuya vida media es de poco más de 2 años, permitió suponer que la contaminación estaba relacionada con el accidente de Chernobil [5, 6].

Otro caso de presencia de ^{137}Cs en alimentos fue detectado en el marco de una colaboración con la Universidad Nacional de Luján. Se realizaron mediciones similares en varios alimentos: conservas, leches, infusiones, especias, etc. [5].

También se detectó ^{137}Cs en muestras de té y de yerba mate provenientes de plantaciones de la zona de Apóstoles, provincia de Misiones, obtenidas de productos envasados y comercializados por medio de los canales habituales. El valor máximo de la contaminación de ^{137}Cs hallado fue de 6 Bq/kg. En yerba mate las actividades de ^{40}K varían entre 200 y 400 Bq/kg. Un estudio más amplio de productos similares provenientes de la provincia de Corrientes y Misiones, y de lugares cercanos a Apóstoles no mostró rastros de contaminación. El interrogante era debelar el origen de ^{137}Cs encontrado. Los dueños del establecimiento donde se cultiva el té y la yerba mate en cuestión colaboraron permitiendo recolectar muestras de suelos y hojas de las plantaciones, que luego fueron procesadas y medidas. Establecieron que la contaminación provenía de una parcela en particular, con una distribución inhomogénea y que existía una clara correspondencia entre las mediciones de las muestras de suelo y de las hojas de las plantas asociadas. Una posibilidad era que la fertilización del suelo hubiera sido realizada con algún producto contaminado. Cuando se midieron los fertilizantes en uso no encontraron rastros de ^{137}Cs . No descartaron que sí lo hubieran tenido productos usados en el pasado, antes que se hicieran cargo los actuales dueños hace aproximadamente 10 años, pero en la actualidad no pudimos identificar la fuente de la contaminación [5, 6].

Para realizar una comparación entre las distintas marcas de leches consumidas por la población, se han analizando muestras de leche de las marcas disponibles en los comercios de la ciudad de La Plata. Se encontró sólo la presencia de nucleidos naturales en las mismas [7-9].

Como parte de un programa de evaluación ambiental de radioactividad ambiental se han realizado determinaciones de ^{226}Ra y uranio natural en aguas potables de la República Argentina [10]. Se obtuvieron rangos de concentración para ^{226}Ra entre 0.4 y 22mBq/l y para uranio natural entre 0.1 y 50 $\mu\text{g/l}$.

En los últimos tiempos, información de causas judiciales, como la de la presunta contaminación de las aguas de la zona aledaña al Centro Atómico Ezeiza, ha sido difundida ampliamente por los medios de comunicación. En el marco de la causa judicial N° 5452 radicada en el Juzgado N°1 de Lomas de Zamora, se han realizado determinaciones de concentraciones de U, ^{60}Co y ^{137}Cs en agua potable de la zona. Los resultados de los monitoreos no son concluyentes aún [11-14].

Según nuestro conocimiento, no hay datos de monitoreos ambientales ni de alimentos realizados en la provincia de La Pampa, y en particular en trigo.

Capítulo II

FÍSICA NUCLEAR [1, 15]

Un poco de Historia

En 1896, H. Becquerel accidentalmente descubrió que cristales de una sal de uranio emitían una radiación que oscurecía placas de fotografías no expuestas a la luz. Concluyó que se trataba de una radiación desconocida que provenía del uranio y que no requería de estimulación externa. El fenómeno fue llamado radiactividad. Dos años después los esposos Curie, luego de intensos trabajos sobre el mismo mineral de uranio, descubrieron dos elementos radiactivos que llamaron polonio y radio.

En un intento de caracterizar la radiación emitida por esos elementos, Rutherford en 1911 mostró que se trataba de tres tipos y, de acuerdo a su carga eléctrica y capacidad de ionizar el aire, llamó α a las cargadas positivamente y poco penetrantes, β a las cargadas negativamente y más penetrantes; y γ a las radiaciones sin carga y muy penetrantes. Estos experimentos permitieron, además, establecer que el átomo puede ser considerado como formado por un núcleo que es esencialmente una masa puntual cargada positivamente (llamándose protón a cada una de las cargas individuales que la componen, de masa $\sim 10^{-27}$ kg) que, junto con los neutrones sin carga, contiene la mayor parte de la masa atómica. El núcleo tiene dimensiones de $\sim 10^{-12}$ cm, o sea es 10000 veces más pequeño que el átomo y se mantiene estable pese a las fuerzas electrostáticas de repulsión, gracias a enormes fuerzas de muy corto alcance llamadas fuerzas nucleares.

Otros hitos importantes en el desarrollo de la Física Nuclear incluyen:

- (1939) Observación de reacciones nucleares usando partículas aceleradas artificialmente.
- (1932) Descubrimiento del neutrón como otro componente nuclear, sin carga y de masa semejante a la del protón.
- (1933) Descubrimiento de la radiactividad artificial, por Irene Curie y Frédéric Joliot.
- (1942) Descubrimiento de la fisión controlada, por Fermi.
- (1945) Explosiones de Hiroshima y Nagasaki.
- (1956) Instalación de la primera Central Nucleoeléctrica, en el Reino Unido.

El Núcleo

Antes de 1932 se entendía que los átomos eran neutros y que estaban compuestos por Z (número atómico) protones cargados positivamente dentro del núcleo y por Z electrones extranucleares cargados negativamente.

Al descubrirse el neutrón, se vio que éstos eran las otras partículas que constituían el núcleo atómico, ya que le suministraban la masa faltante al átomo (los electrones tienen masa despreciable frente a los protones). Se admitió así que el núcleo estaba formado por Z protones y N neutrones, o sea por A (número másico) = $Z + N$ nucleones. Los núcleos de todos los átomos de un elemento particular contienen el mismo número de protones pero a menudo contienen diferente número de neutrones. Los núcleos que se relacionan de esta forma se denominan isótopos. Los isótopos de un elemento tienen el mismo valor Z pero diferentes valores de N y A . Por ejemplo ^{11}C , ^{12}C , ^{13}C , y ^{14}C son cuatro isótopos del carbono. La abundancia natural del isótopo ^{12}C es casi de 98,9%, en tanto que la del isótopo ^{13}C es de aproximadamente 1,1%. Todos los isótopos que se conocen están registrados en la Tabla de Isótopos, que resalta algunas propiedades nucleares de las diferentes especies existentes así como la tabla periódica resalta las propiedades químicas de los distintos elementos.

Masas atómicas

El protón porta una sola carga positiva, igual en magnitud a la carga e del electrón (donde $e = 1,6 \times 10^{-19}$ Coul). Como su nombre indica, el neutrón es eléctricamente neutro, es decir, no tiene carga, y debido a esa característica, es difícil detectarlo.

Las masas nucleares pueden medirse con gran precisión con la ayuda del espectrómetro de masa y mediante el análisis de reacciones nucleares. De esta manera se puede establecer que el protón tiene aproximadamente 1836 veces la masa del electrón; las masas del protón y el neutrón son casi iguales.

Se define la *unidad de masa atómica*, u , donde la masa del isótopo ^{12}C es exactamente $12 u$ ($u = 1,660559 \times 10^{-27}$ kg). Tanto el protón como el neutrón, tienen una masa de aproximadamente $1 u$, en tanto que el electrón tiene una masa que es sólo una pequeña fracción de una unidad de masa atómica:

$$\begin{aligned} \text{Masa del protón} &= 1,007276 \text{ u} \\ \text{Masa del neutrón} &= 1,008665 \text{ u} \\ \text{Masa del electrón} &= 0,0005486 \text{ u} \end{aligned}$$

Como la energía en reposo de una partícula está dada por $E = m c^2$, es conveniente expresar la unidad de masa atómica en función de su energía en reposo equivalente. Para una unidad de masa atómica tenemos:

$$E = m c^2 = (1,660559 \times 10^{-27} \text{ kg.}) (2,99792 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 931,494 \text{ MeV}$$

En física nuclear, a menudo se expresa la masa en función de la unidad MeV/c^2 , donde:

$$1 \text{ u} = 931,494 \text{ MeV} / c^2$$

Estabilidad

El núcleo se considera como un grupo de protones y neutrones empaquetados apretadamente. En virtud de que cargas de los protones que están muy próximas, se ejercen entre sí fuerzas electrostáticas repulsivas muy grandes, estas fuerzas tienden a separar a los protones.

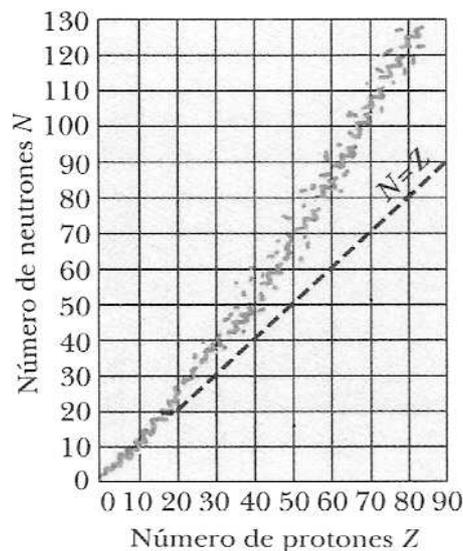


Figura 2.1: *Número de neutrones, N, versus el número atómico, Z.* La línea punteada, correspondiente a la condición $N = Z$, es la llamada línea de estabilidad.

Sin embargo, la fuerza nuclear hace que esto no ocurra. Ésta tiene un alcance muy corto y es una fuerza atractiva que actúa entre todas las partículas nucleares. Los protones se atraen entre sí por medio de la fuerza nuclear, y al mismo tiempo se repelen entre ellos mediante una fuerza de Coulomb. La fuerza nuclear actúa también entre pares de neutrones y protones.

Hay aproximadamente 400 núcleos estables; (ver *Figura 2.1*) y se han descubierto otros cientos de inestables. La *Figura 2.1* muestra que los núcleos livianos estables son los que tienen aproximadamente $Z = N$, mientras que los inestables verifican $N > Z$. Los elementos con $Z > 83$ no presentan núcleos estables.

Energía de enlace

La masa total de un núcleo siempre es menor que la suma de las masas de sus nucleones. Debido a que la masa es una medida de la energía, *la energía total de un sistema ligado (el núcleo) es menor que la energía combinada de los nucleones separados*. Esta diferencia de energía recibe el nombre de **energía de enlace (B)** y puede considerarse como la energía que debe sumarse al núcleo para dividirlo en sus componentes. Por lo tanto, con el fin de separar un núcleo en protones y neutrones, debe entregarse energía al sistema.

Se define a **B** del núcleo como el producto del cuadrado de la velocidad de la luz por la diferencia de masas entre las de sus constituyentes y la del núcleo:

$$\mathbf{B} = c^2 (Z m_p + N m_n - M_{\text{nucleo}})$$

B es la energía que debe entregársele a un núcleo para romperlo en sus constituyentes o bien la que sobraría si se pretendiera formar un núcleo estable a partir de los Z protones y los N neutrones que lo componen. La *Figura 2.2* muestra la variación de la energía de enlace por nucleón (\mathbf{B}/\mathbf{A} , energía de enlace por partícula) con A . Se observa que aunque para gran parte de los núcleos de energía es cercana a 8 MeV/nucleón, para núcleos muy livianos y muy pesados esta magnitud es menor, y que la zona de mayor estabilidad ocurre para $A \sim 60$. Del gráfico se observa que si se rompe un núcleo pesado ($A \geq 200$) para formarse dos núcleos más livianos habrá liberación de energía. Este proceso se llama fisión nuclear. Lo mismo ocurre si dos núcleos livianos se combinan para dar lugar a otro más pesado, lo cual se denomina fusión nuclear. En ambos casos los productos resultantes tienen una masa total menor que la de los

reactantes y la diferencia de energía aparece como energía liberada por el sistema.

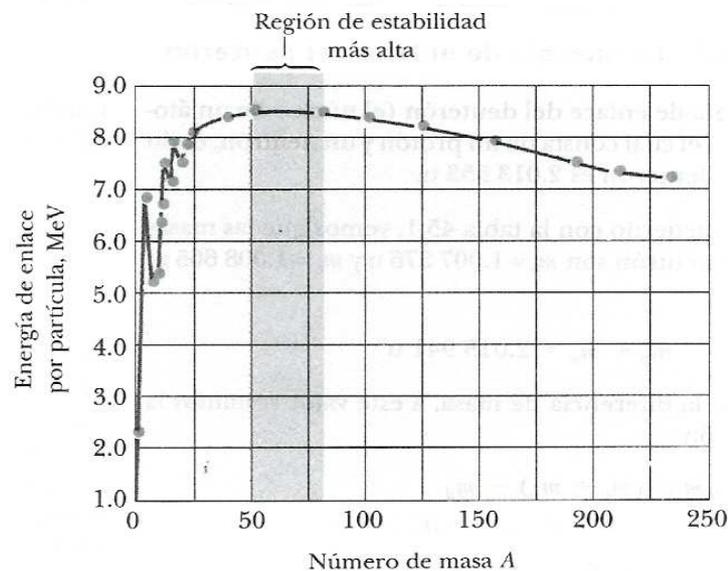


Figura 2.2: Energía de enlace por nucleón versus el número de masa para núcleos que se encuentran a lo largo de la línea de estabilidad de la Figura 2.1.

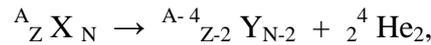
Desintegraciones

Las investigaciones de Becquerel, los esposos Curie, Rutherford y otros que les siguieron, sugirieron que la radiactividad era el resultado de la desintegración (transformación de un núcleo en otro núcleo) o desexcitación espontáneas de ciertos núcleos inestables.

Existen tres tipos de radiación que pueden ser emitidas por los núcleos: las **partículas α** , constituidas por núcleos de ${}^4\text{He}$; las **partículas β** , constituidas por electrones y positrones; y los **fotones o rayos γ** , radiación electromagnética de alta energía. Un **positrón** es una partícula igual al electrón en todos los aspectos excepto en que tiene una carga $+e$. El símbolo β^- se emplea para designar un electrón, y β^+ designa a un positrón. Los tres tipos de radiación tienen alcances diferentes dentro de los materiales. Las partículas α apenas penetran una hoja de papel, las partículas β pueden penetrar unos cuantos milímetros de aluminio y los rayos γ pueden penetrar varios centímetros de plomo.

Decaimiento alfa (α)

Si un núcleo emite una partícula alfa (${}^4_2\text{He}$) pierde dos protones y dos neutrones. El número atómico Z y el número de neutrones disminuyen en 2 y por lo tanto el número de masa A disminuye en 4. El decaimiento puede escribirse como:

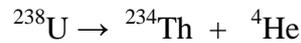


donde X es el **núcleo Padre** e Y el **núcleo Hijo** producto de la desintegración. Esta transformación es espontánea toda vez que la *energía de la desintegración* resulte mayor que cero, es decir:

$$Q = (M_x - M_y - M_\alpha) c^2 > 0,$$

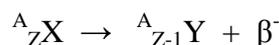
donde M_x es la masa del núcleo padre, M_y es la masa del núcleo hijo y M_α masa de la partícula α .

Ejemplos de esta forma de transmutación son las transformaciones de los núcleos de ${}^{238}\text{U}$ y ${}^{226}\text{Ra}$:

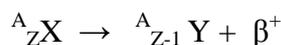


Decaimiento β

Cuando un núcleo radiactivo se transforma mediante un decaimiento β , el núcleo hijo tiene el mismo número de nucleones que el núcleo padre pero el número atómico cambia en 1:

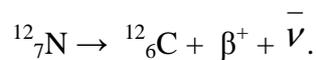
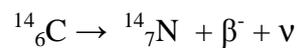


y



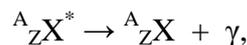
En ambos casos los núcleos hijos tienen el mismo número A que los padres, o sea son isóbaros. Es de hacer notar que ambas partículas emitidas, electrón o positrón, no existen como constituyentes nucleares sino que se generan en el momento de su emisión. A diferencia de lo que ocurre con la desintegración α , estas partículas no tienen una única energía, presentan un espectro continuo de energías pues la energía de desintegración, única, se reparte entre ellas y una nueva partícula llamada neutrino (ν y $\bar{\nu}$), no detectable por métodos directos.

Ejemplos de este tipo de decaimiento son los que experimentan el $^{14}_6\text{C}$ y el $^{12}_7\text{N}$:



Emisión de fotones

A menudo un núcleo después de la emisión de partículas en un decaimiento radiactivo el núcleo queda en un estado de energía excitado. Entonces puede ocurrir después un segundo decaimiento hasta un estado de energía inferior, emitiendo un fotón de alta energía:

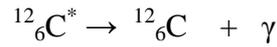


donde X^* indica un núcleo en estado excitado. La vida media típica de un estado nuclear excitado es de 10^{-10} segundos. Los fotones emitidos en un proceso de desexcitación de este tipo reciben el nombre de rayo gamma. Estos fotones tienen energía más alta (en el intervalo de unos pocos keV a algunos MeV) que de la luz visible (alrededor de 1 eV).

Un rayo γ transporta una energía $h\nu$ igual a la diferencia de energía ΔE entre dos niveles de energía nuclear. Cuando un núcleo decae emitiendo un rayo γ , el núcleo no cambia, salvo por el hecho de que termina en un estado de energía inferior.

Un núcleo puede alcanzar un estado excitado como consecuencia de una violenta colisión con otra partícula. Es común que un núcleo esté en un estado excitado después de que ha sufrido un decaimiento alfa o beta previo. La siguiente secuencia de eventos representa una situación en la cual ocurre el decaimiento γ





Ley de decaimiento radioactivo

Los procesos de decaimiento son aleatorios, de modo que la tasa a la cual un proceso de decaimiento ocurre en una muestra radiactiva es proporcional al número de núcleos radiactivos presentes en la misma (es decir, aquellos núcleos que aún no han decaído). Si N es el número de núcleos radiactivos presentes en la muestra en algún instante t , la tasa de cambio de N (dN/dt) es:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

donde λ recibe el nombre de **constante de desintegración nuclear** y es la probabilidad de desintegración por núcleo por unidad de tiempo. El signo negativo significa que N decrece a medida que el tiempo transcurre. Podemos reescribir la ecuación anterior como:

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

e integrando la expresión anterior y considerando las condiciones iniciales se obtiene:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t),$$

donde la constante N_0 representa el número de núcleos radiactivos en $t=0$. Esta ecuación muestra que el número de núcleos radiactivos disminuye exponencialmente con el tiempo.

La **tasa de decaimiento** A , o el número de decaimientos por unidad de tiempo se conoce como **actividad**:

$$A = |dN/dt| = N_0 \lambda \exp(-\lambda t) = N\lambda = A_0 \exp(-\lambda t)$$

La unidad de actividad que se usa internacionalmente es el Becquerel (Bq) y equivale a una desintegración por segundo. Antiguamente se utilizaba el Curie (Ci), equivalente a $3,7 \times 10^{10}$ Bq.

Vida Media

La desintegración de un núcleo ocurre a un tiempo característico de cada tipo de decaimiento que se llama la **vida media** $T_{1/2}$. Éste es el tiempo que tarda en reducirse la mitad

el número de núcleos presentes en un determinado instante en la muestra. De modo que la evolución de N con el tiempo en unidades de vidas medias tendrá la forma presentada en la *Figura 2.3*.

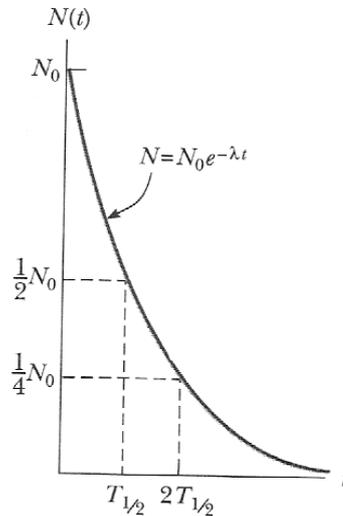


Figura 2.3: Decaimiento exponencial de núcleos radiactivos. El eje vertical representa el número de núcleos radiactivos presentes en cualquier tiempo t , y el eje horizontal es el tiempo medido en vidas medias $T_{1/2}$.

Al considerar $N=N_0/2$ y $t= T_{1/2}$ para la ecuación $N=N_0 \exp(-\lambda t)$ reemplazando por lo anterior se obtiene:

$$N_0/2 = N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}),$$

o sea,:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda.$$

Una aplicación de la ley de la desintegración radiactiva es la datación con ^{14}C para determinar la edad de muestras orgánicas. Por interacción de los rayos cósmicos (partículas de alta energía del espacio lejano) con la atmósfera se crean átomos de ^{14}C , que por emisión β^- se transforman en ^{14}N con $T_{1/2} = 5730$ años. La relación de abundancias de ^{14}C a ^{12}C en el CO_2 ambiental es de $1,3 \times 10^{-12}$ y todos los organismos vivos presentan esta misma relación ya que continuamente intercambian CO_2 con el medio. Pero cuando mueren, la cantidad de ^{14}C se reduce respecto de la de ^{12}C pues el primero sigue transformándose en ^{14}N . Es así posible determinar la edad de un material midiendo la actividad de ^{14}C por unidad de masa.

Fisión Nuclear

La **fisión nuclear** ocurre cuando un núcleo pesado, como el ^{235}U , se divide o fisiona en dos núcleos más livianos. En una reacción de este tipo, la masa en reposo de los núcleos hijos es menor que la masa en reposo del núcleo padre. La fisión se inicia por la captura de un neutrón térmico, por un núcleo pesado e implica la liberación de energía de alrededor de 200 MeV por fisión. Esta liberación de energía ocurre debido a que los núcleos productos de la fisión más pequeños están enlazados más estrechamente en cerca de 1 MeV por nucleón que el original núcleo pesado.

Luego de bombardear uranio con neutrones, Hahn y Strassman descubrieron entre los productos de reacción dos elementos de masa media, bario y lantano. El núcleo de uranio se había dividido en dos fragmentos casi iguales después de absorber un neutrón. Las mediciones demostraron que alrededor de 200 MeV de energía se liberaban en cada evento de fisión, y este hecho afectó el curso de la historia.

La fisión de ^{235}U por neutrones lentos puede representarse por:



Donde $^{236}\text{U}^*$ es un estado excitado intermedio que dura alrededor de 10^{-12} s antes de fisionarse. Los núcleos resultante X e Y reciben el nombre de **fragmentos de fisión**. En todo proceso de fisión hay muchas combinaciones de X e Y que satisfacen los requerimientos de conservación de masa-energía y carga. El número promedio de neutrones emitidos es entre 2 y 3 por cada fisión. Los sucesos más probables corresponden a fragmentos con números másicos $A \approx 140$ y $A \approx 95$. Estos nucleidos caen ambos a la izquierda de la línea de estabilidad de la *Figura 2.1*, es decir que tienen un gran exceso de neutrones que los vuelven inestables. Como resultado de ello, se liberan 2 o tres neutrones instantáneamente. Los fragmentos que quedan son aún ricos en neutrones y decaen a núcleos más estables mediante emisión β^- y luego radiación γ desde los niveles excitados. La energía de desintegración Q liberada en cada fisión es:

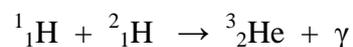
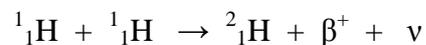
$$Q = 240 \text{ nucleones } (8,5 \text{ MeV por nucleón} - 7,6 \text{ MeV por nucleón}) = 220 \text{ MeV}$$

Ya que 7,5 MeV es la energía por cada nucleón que necesita el núcleo de uranio para romperse y 8,5 MeV es la energía por nucleón que les “sobra” a los núcleos producto al formarse. La energía liberada por una molécula de octano de los combustibles es apenas un millonésima parte de la energía liberada en una fisión.

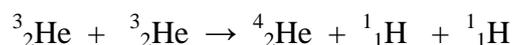
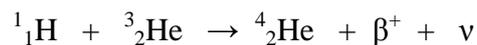
Fusión Nuclear

Encontramos que la energía de enlace de núcleos ligeros (los que tienen un número de masa menor que 20) es mucho más pequeña que la energía de enlace para núcleos pesados.

Cuando dos núcleos ligeros se combinan para formar un núcleo más pesado, el proceso se conoce como fusión nuclear. Debido a que la masa del núcleo final es menor que las masas en reposo combinadas de los núcleos originales, hay una pérdida de masa acompañada de una liberación de energía. Las siguientes son ejemplos dichas reacciones de fusión liberadoras de energía:



La última reacción puede ser seguida de cualquiera de estas otras:

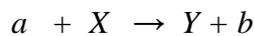


Todas estas reacciones son exotérmicas o sea que liberan energía. El balance indica que cuatro protones se combinan para formar una partícula α , dos positrones y dos neutrinos (ν), liberándose un total de 25 MeV por cada fusión.

Estas son las reacciones de lo que se denomina **ciclo protón-protón**, el cual es uno de los ciclos básicos por medio de los cuales se genera la energía en el Sol y en otras estrellas, que tienen una abundancia de hidrógeno. La mayor parte de la producción de energía ocurre en el interior del sol, donde la temperatura es aproximadamente de $1,5 \times 10^7$ K. La bomba de fusión de hidrógeno, que explotó por primera vez en 1952, es un ejemplo de una reacción de fusión termonuclear descontrolada.

Reacciones Nucleares

La **radiactividad artificial** consiste en cambiar la estructura interna de los núcleos por bombardeo con partículas energéticas. Estos choques, los cuales cambian la identidad del núcleo blanco, se conocen como **reacciones nucleares**. Estas partículas de alta energía se usan para crear nuevas partículas cuyas propiedades ayudan a determinar propiedades de los núcleos. En una reacción un núcleo blanco X es bombardeado por una partícula a , dando como resultado un núcleo Y y una partícula b :



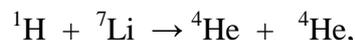
Algunas veces esta reacción se escribe de forma más compacta como $X(a, b)Y$, siendo b una partícula que eventualmente puede emerger de la reacción.

Definimos la **energía de reacción** Q asociada a una reacción nuclear como la *energía total liberada como resultado de la reacción*. De manera más específica, Q se define como:

$$Q = (M_a + M_X - M_Y - M_b) c^2$$

Si la reacción es endotérmica ($Q < 0$) no se produce a menos que se entregue a la partícula proyectil a de una energía cinética superior a $|Q|$. La mínima energía para que se produzca la reacción es llamada energía umbral. En una reacción nuclear, la carga y el número total de los nucleones a ambos lados del signo igual deben ser los mismos.

Un ejemplo es:



la cual tiene un valor de Q de 17,3 MeV. Esta reacción es exotérmica cuando $Q > 0$.

Interacción de partículas cargadas con la materia

Las partículas cargadas pierden su energía en un material interactuando esencialmente de la misma forma independientemente del tipo de partícula que sea. Esta interacción se produce principalmente entre la partícula y los electrones atómicos. Las fuerzas atractivas o repulsivas son suficientemente intensas como para excitar un electrón dentro del átomo (excitación) o para removerlo del mismo (ionización). Si el electrón es removido, el electrón y el ión cargado positivamente son llamados par iónico. Cada partícula pierde su energía dando lugar a una sucesión de pares iónicos.

Interacción de partículas α con la materia

Estas partículas, a pesar de la alta energía que suelen llevar, se detienen después de recorrer unos centímetros en el aire y pueden ser frenadas totalmente en una hoja de papel. Tienen un elevado poder de ionización debido a su gran masa.

Interacción de partículas β con la materia

Una partícula β pierde su energía en un gran número de procesos de ionización y excitación, en forma similar a la partícula α . Por el menor tamaño y la carga, existe una pequeña probabilidad de que la radiación β interactúe con el medio. Entonces, el alcance de esta partícula es mucho mayor que el de una partícula α de la misma energía.

Además de interactuar con los electrones atómicos, las partículas β pueden interactuar con el núcleo. A causa de esta fuerza electrostática producida entre el núcleo y la partícula, ésta variará su velocidad dando lugar a la emisión de rayos X (radiación de frenado).

Interacción de la radiación γ y X con la materia

Los rayos γ y X tiene una energía dada por la siguiente ecuación:

$$E = h\nu = hc/\lambda,$$

donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz, ν y λ son la frecuencia y la

longitud de onda del fotón, respectivamente.

Existen tres mecanismos de interacción de los fotones con la materia, llamados **efecto fotoeléctrico, dispersión Compton y formación de pares**.

I. El efecto fotoeléctrico

En el efecto fotoeléctrico un fotón de energía $h\nu$ interactúa con el átomo como un todo. La energía de dicho fotón es transferida a un electrón del átomo, uno de las capas internas (*Figura 2.4*). Este electrón es expulsado con una energía cinética E_c dada por:

$$E_c = h\nu - E_I,$$

donde E_I es la energía de ligadura del electrón al átomo. Cuando la capa electrónica es ocupada nuevamente, se emiten uno o más rayos X característicos con una energía igual a la diferencia energética entre los niveles atómicos.

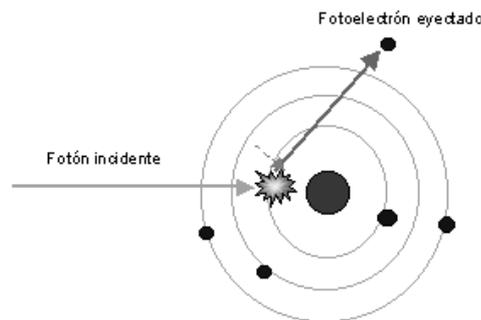


Figura 2.4: Esquema del efecto fotoeléctrico

II. La dispersión Compton

En la dispersión Compton el fotón incidente interactúa con uno de los electrones orbitales (*Figura 2.5*). Los electrones son considerados como libres bajo la condición de que la energía del fotón incidente sea grande comparada con la energía de ligadura del mismo. Esta colisión puede ser analizada en el marco de un choque elástico entre el fotón y el electrón, produciéndose en el encuentro un fotón secundario. Se conserva la energía total y la cantidad de movimiento del sistema.

La energía es compartida entre los movimientos del electrón y un fotón secundario, de menor energía que el primario. Este fotón secundario se dispersa, en una dirección diferente que el fotón incidente y se lo llama fotón dispersado.

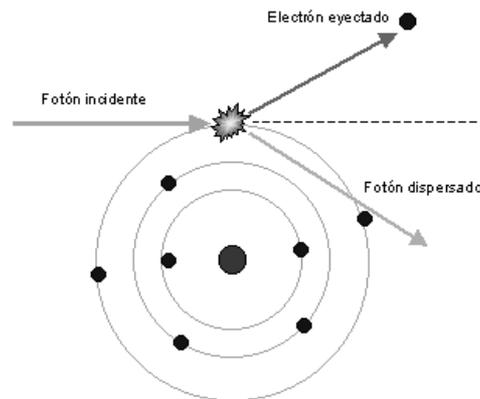


Figura 2.5: Esquema de la dispersión Compton

III. Producción de pares

En este caso, el fotón incidente desaparece creando un par de electrón-positrón. La energía del fotón se transforma en masa en reposo y energía cinética de dicho par. Este proceso sólo es posible cuando la energía del fotón es mayor que la masa en reposo del par electrón-positrón.

Absorción de la radiación por la materia

Por ejemplo, la absorción de rayos X y γ puede ser estudiada mediante la medida de su transmisión a través de absorbentes, para medir intensidad (número de fotones detectados) del haz de radiación que llega al detector.

En el proceso por el cual los fotones son removidos del haz inicial, cada fotón absorbido es eliminado individualmente en un único evento. Se obtiene en este caso la relación:

$$N = N_0 e^{-\mu d},$$

donde N_0 es el número de fotones que son emitidos por la fuente radiactiva y detectados por el sistema, y N es el número de fotones remanentes en el haz después de su pasaje por el absorbente de espesor d . La variación de N/N_0 con el espesor del absorbente se presenta en la siguiente *Figura 2. 6* para aire y plomo.

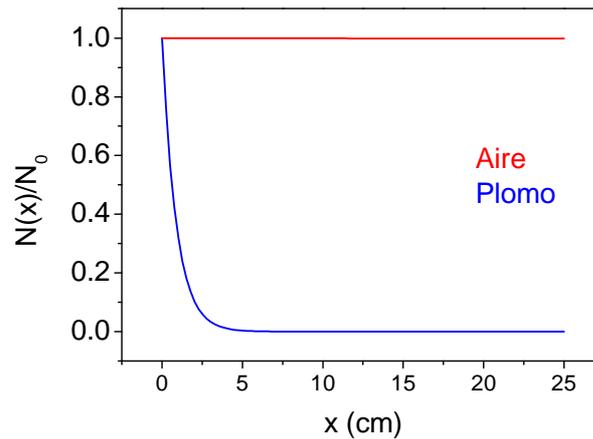


Figura 2.6: Absorción de fotones por diferentes materiales.

El coeficiente μ es conocido como **coeficiente de absorción lineal total**, el cual puede expresarse como:

$$\mu = \tau + \sigma + k,$$

donde τ , σ y k representan los coeficientes de absorción debido a efecto fotoeléctrico, dispersión Compton y producción de pares, respectivamente. Este coeficiente es diferente para los distintos elementos de la Tabla Periódica y depende de la energía de los fotones incidentes, ver la Tabla 2.I.

Tabla 2.I: Coeficientes de absorción de fotones en función de la energía para diferentes materiales.

<i>Material</i>	<i>m/ρ en cm²/g</i>		<i>ρ en g/cm³</i>
	E = 0,66 MeV	E = 1,33 MeV	
Aire	0,078	0,055	0,001293 (STP)
Agua (tejido)	0,087	0,060	1
Aluminio	0,077	0,055	2,7
Plomo	0,100	0,056	11,3
Hierro	0,073	0,053	7,0-7,9
Cemento	0,078	0,055	2,7-3,0

Capítulo III

RADIATIVIDAD EN EL MEDIO AMBIENTE Y LOS ALIMENTOS

Desde la formación de la tierra, hace 4600 millones de años, ha sido radiactiva. La vida en nuestro planeta, desde sus orígenes, siempre estuvo expuesta a cierto nivel de radiación natural, proveniente de **los rayos cósmicos, los nucleidos cosmogénicos y los nucleidos primordiales** y del decaimiento de núcleos radiactivos.

El efecto producido por la radiación cósmica es doble, debido a la existencia de dos categorías de rayos cósmicos: rayos cósmicos primarios y secundarios. Los rayos cósmicos originales (o primarios) pueden definirse como todas las partículas que llegan a la Tierra del espacio exterior. Estos rayos primarios generalmente no atraviesan la atmósfera terrestre. La radiación que surge como resultado de interacciones de rayos cósmicos primarios con la atmósfera superior, y que la mayoritariamente alcanza la superficie terrestre, se denominan rayos cósmicos secundarios. Dado que nuestra atmósfera tiene un poder de frenamiento equivalente a un metro de plomo, esencialmente todos los rayos cósmicos interactúan en la atmósfera, por lo tanto sólo los rayos cósmicos de las más altas energías pueden provocar una apreciable avalancha de partículas en la superficie terrestre.

Los nucleidos cosmogénicos se originan en la interacción de los rayos cósmicos con los átomos y moléculas de la atmósfera. Aproximadamente las dos terceras partes de la producción de isótopos cosmogénicos, se realiza en la estratosfera y el resto en la troposfera. (Tabla 3.I [2]). La atmósfera terrestre es constantemente bombardeada por radiación cósmica. Esta masa gaseosa, estratificada, compuesta por 75,5% de N; 23,2% de O; 1,3% de Ar, y pequeñas cantidades de CO₂, Kr, Xe, He, presenta varias capas distinguidas por la variación de la temperatura en las mismas: en la troposfera y en la mesosfera la temperatura disminuye con la altura, mientras que en la estratosfera la temperatura aumenta con la altura. Esta es la fuente natural de radioisótopos de vida media corta (comparada con la edad de la tierra) presentes en el ambiente. En el cuerpo de un adulto se encuentran unos 10 ng del radioisótopo ¹⁴C lo cual induce una actividad de unos 3 kBq en el cuerpo humano [16].

Hay tres series de núcleos radiactivos naturales, si bien originalmente se supone que existía una cuarta serie, no hay indicios de ella dado que la vida media del nucleido inicial es menor que la edad de la Tierra. Cada serie empieza con un nucleido radiactivo de larga vida

específico cuya vida media es mayor que cualquiera de las de sus descendientes (*Figura 3.1*). Las tres series naturales radiactivas, que son las del ^{238}U ($4,4 \times 10^9$ años), del ^{235}U ($7,04 \times 10^8$ años) y del ^{232}Th ($1,41 \times 10^{10}$ años), se desintegran por decaimientos α y β hasta llegar a nucleidos estables de plomo (^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb). La existencia de series radiactivas en la naturaleza hace que nuestro ambiente se surta constantemente con elementos radiactivos que de otro modo habrían desaparecido hace años. Por ejemplo, debido a que el sistema solar tiene aproximadamente 5×10^9 años de edad, el suministro de ^{226}Ra (cuya vida media es de sólo 1600 años) se habría agotado por decaimiento radiactivo hace mucho, si no fuera por que pertenece la serie de decaimiento que empieza con el ^{238}U .

Tabla 3.I: Actividades de isótopos cosmogénicos[2].

<i>Nucleido</i>	<i>Producción (átomos $m^{-2} s^{-1}$)</i>	<i>Inventario Global (PBq)</i>	<i>Concentración en la troposfera (mBq m^{-3})</i>
^3H	2 500	1 275	1,4
^7Be	810	413	12,5
^{10}Be	450	230	0,15
^{14}C	25 000	12 750	56,3
^{22}Na	0,86	0,44	0,0021
^{26}Al	1,4	0,71	$1,5 \times 10^{-8}$
^{32}Si	1,6	0,82	0,000025
^{32}P	8,1	4,1	0,27
^{33}P	6,8	3,5	0,15
^{32}S	14	7,1	0,16
^{36}Cl	11	5,6	$9,3 \times 10^{-8}$
^{37}Ar	8,3	4,2	0,43
^{39}Ar	56	28,6	6,5
^{81}Kr	0,01	0,005	0,0012

Además de estas cadenas naturales, existen otros nucleidos primordiales tales como ^{40}K , ^{50}V , ^{87}Rb , ^{113}Cd , ^{115}In , $^{123, 128, 130}\text{Te}$, ^{138}La , ^{142}Ce , ^{144}Nd , ^{147}Sm , ^{152}Gd , ^{174}Hf , ^{176}Lu , ^{187}Re , $^{190, 192}\text{Pt}$, ^{209}Bi , entre otros[2].

La contaminación radiactiva en nuestro planeta, provocada principalmente por ensayos de armas nucleares, determinó que grandes cantidades de material radiactivo fueran diseminadas en la atmósfera y aguas superficiales. Sin embargo, las concentraciones de las actividades presentes a la fecha están muy por debajo de los niveles de riesgo actualmente

establecidos [16]. Así, la dosis anual media a la que estamos expuestos tiene distintos orígenes como se muestra en la *Figura 3.2*.

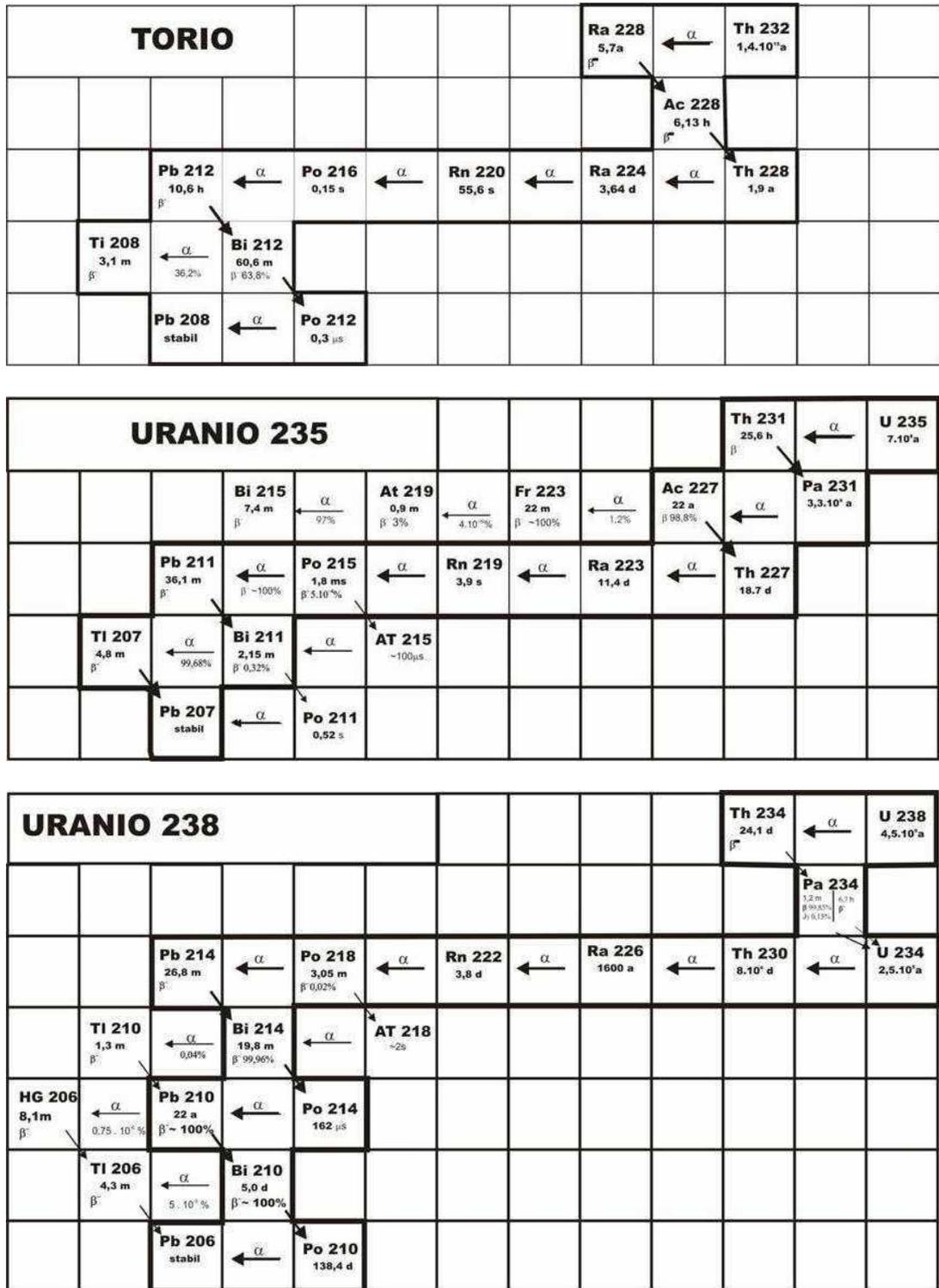


Figura 3.1: Series naturales [16]..

La mayor contribución se origina en las fuentes naturales y en las prácticas médicas, como se ve en la *Figura 3.3*, mientras que la contribución de la industria nuclear es sólo de 1%.



Figura 3.2: Origen de las radiaciones recibidas por los humanos.

En cualquier caso, la concentración de los nucleidos naturales depende de la hidrogeología del lugar. La UNSCEAR ha realizado una recopilación de los datos para suelos, los cuales se presentan en la Tabla 3.II [2]. Es de destacar que para Argentina sólo se reportan datos de actividad de ^{40}K , la cual varía entre 540 y 750 Bq/kg[2].

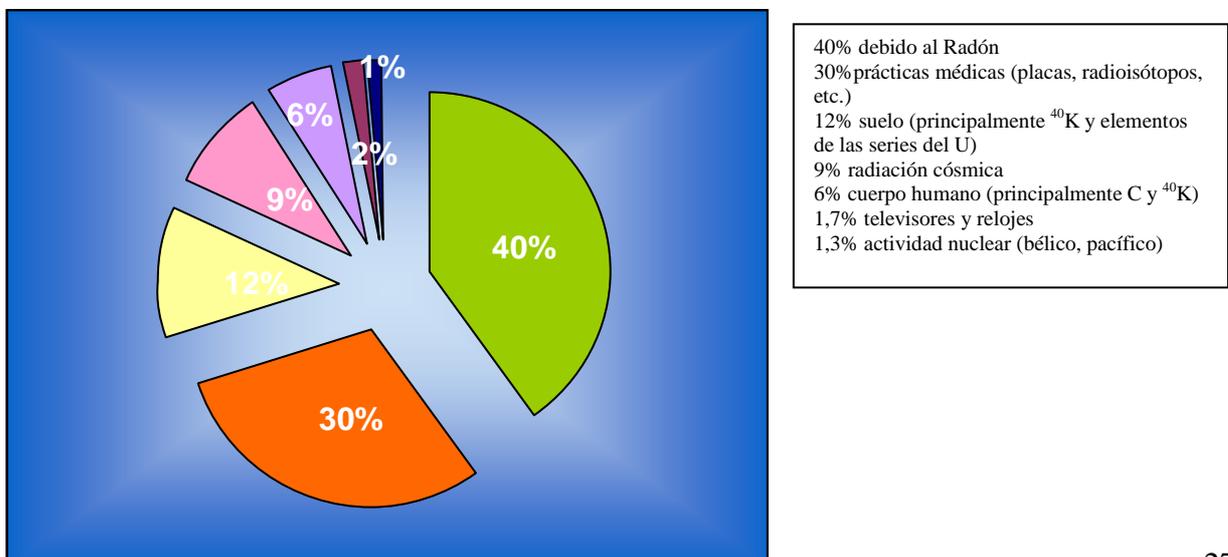


Figura 3.3: Contribución de las distintas fuentes a la exposición humana.

El advenimiento de la era nuclear trajo aparejada la producción de nuevos radionucleídos creados por el hombre como, por ejemplo, el ^{137}Cs y el ^{90}Sr . Éstos son llamados **antropogénicos** por su origen y agregaron globalmente cantidades pequeñas al inventario de la radiactividad natural.

Tabla 3.II: Contenido de nucleidos naturales en suelos.

País	Concentración en suelos (Bq kg^{-1})			
	^{40}K	^{238}U	^{226}Ra	^{232}Th
	Rango	Rango	Rango	Rango
África	29 – 1150	2 – 120	5 – 180	2 – 140
América del Norte	6 – 700	4 – 140	8 – 160	1 – 130
América del Sur (Argentina)	540 – 750	—	—	—
Asia Oriental	7 – 1500	2 – 690	2 – 440	1 – 220
Asia Occidental	87 – 980	10 – 78	8 – 77	5 – 60
Europa del Norte	140 – 1150	3 – 30	6 – 310	5 – 59
Europa Oriental	0 – 3200	2 – 330	5 – 900	1 – 180
Europa Occidental	40 – 1400	0 – 190	1 – 210	2 – 160
Europa del Sur	0 – 1650	1 – 240	0 – 250	2 – 210
Medias	94,3 – 1386,6	3 – 227,3	4,4 – 315,9	2,4 – 144,9

Por ejemplo, el ^{137}Cs se encuentra diseminado sobre la superficie terrestre por acción del hombre ya sea por las detonaciones nucleares o por accidentes en plantas de producción de energía nuclear o en equipamientos de uso médico o industriales. La radiación proveniente del decaimiento del ^{137}Cs es detectable en toda la superficie del planeta con distintos niveles de intensidad dependiendo de su cercanía a lugares donde haya ocurrido algún hecho catastrófico de origen nuclear. Su dispersión depende de las características geográficas y atmosféricas reinantes en el lugar del suceso.

Tabla 3.III: Radionucleídos producidos y dispersados en la atmósfera por pruebas nucleares[2].

Radionucleido	Liberación Global (PBq)
^3H	186000
^{14}C	213
^{34}Mn	3980
^{55}Fe	1530
^{89}Sr	117000
^{90}Sr	622
^{91}Y	120000
^{95}Zr	148000
^{103}Ru	247000
^{106}Ru	12200

¹²⁵ Sb	741
¹³¹ I	675000
¹⁴⁰ Ba	759000
¹⁴¹ Ce	263000
¹⁴⁴ Ce	30700
¹³⁷ Cs	948
²³⁹ Pu	6,52
²⁴⁰ Pu	4,35
²⁴¹ Pu	142

La Tabla 3.III muestra las concentraciones de nucleidos dispersos en el ambiente debido a los ensayos nucleares, mientras que la Tabla 3.IV reporta datos de las actividades globales originados por las descargas controladas de los reactores nucleares y la industria nuclear[2].

Tabla 3.IV: Actividad liberada globalmente y dispersión de radionucleídos provenientes de reactores y plantas de reprocesamiento[2].

Años	Liberación (TBq)				
	³ H	³ H	¹⁴ C	⁸⁵ Kr	¹²⁹ I
Pre –1970	2 146	919	38	32 060	0,11
1970–1974	6 543	2 809	116	97 970	0,32
1975 –1979	24 200	8 858	364	308 900	1,01
1980 –1984	44 330	13 640	523	424 400	1,53
1985 –1989	77 960	23 660	672	45 400	1,79
1990 –1994	98 900	35 390	650	823 700	3,87
1995 –1997	42 830	40 770	442	1 102 000	6,14
Total	296 900	126 000	2 805	3 243 000	14,8

Cuando ocurren accidentes o ensayos de bombas nucleares, enormes cantidades de partículas radiactivas son liberadas en la atmósfera, recorren largas distancias arrastradas por los vientos, y luego precipitan y se diseminan sobre grandes extensiones de la tierra. Este fenómeno, denominado **lluvia radiactiva** o **fallout**, produce el depósito de elementos radiactivos antropogénicos sobre los pastos, las hojas de las plantas, los suelos y las aguas.

Algunos de los principales eventos nucleares que provocaron contaminación ambiental con metales radiactivos fueron las bombas arrojadas sobre Hiroshima y Nagasaki en 1945 y de las detonaciones que continuaron a partir de 1954 con numerosos ensayos de bombas termonucleares de hidrógeno, la contaminación radiactiva alcanzó su máximo nivel en 1963.

La contaminación de origen antropogénico debido a la lluvia radiactiva, devino en una variedad de mediciones de los niveles de radiactividad depositados sobre la superficie de la tierra. Estos niveles son más bajos en el hemisferio sur que en el hemisferio norte, existen dos razones para ello: primero es poco el intercambio atmosférico entre ambos hemisferios, y segundo, el hemisferio sur está relativamente lejos de los lugares donde se han producido las

mayores emisiones de contaminantes radiactivos. Los altos niveles de contaminación radiactiva documentados entre 1957 y 1964 no se volvieron a alcanzar hasta el accidente de Chernobil ocurrido en abril de 1986. A consecuencia de este accidente en Alemania y países escandinavos se depositó niveles de ^{137}Cs diez veces más altos que los depositados por detonaciones nucleares entre 1945 y 1980.

Tanto en la época de las detonaciones nucleares atmosféricas como después del accidente de Chernobil, resultó importante realizar controles para detectar la posible existencia de contaminantes radiactivos en el medio ambiente y los alimentos. Particular atención se puso en el contenido en los alimentos de ^{137}Cs y ^{90}Sr , cuyas vidas medias sobreviven muchos años. La leche y sus derivados, vegetales y frutas, la carne y el pescado, y en particular el té y las especias por sus volúmenes exportables en el comercio mundial, han sido algunos de los alimentos sujetos a controles. El nivel máximo de contaminación de alimentos producidos en las zonas cercanas al accidente ocurrió entre febrero y octubre de 1987 y desde entonces comenzó a declinar. A pesar de esto se encontraron niveles importantes de radiactividad, por ejemplo en 1991 se midió una actividad muy alta de 3000 Bq/kg[5].

Los radionucleótidos, al igual que algunos plaguicidas pueden bioacumularse; por ejemplo el U se acumula por un factor de 1000 veces. El Zn presenta un factor de acumulación de 65 veces en ostiones, mientras que algunos peces pueden concentrar en sus tejidos hasta 20 veces el Cs. Los efectos causados por los radionucleidos se pueden asociar a diferentes tipos de cáncer: cáncer de hueso (Sr y Pu); leucemia (Sr); tejido gonadal (Cs y tritio) y tiroides (I).

Los elementos radiactivos que se hallan en el aire, el agua y el suelo, esto hace que los seres vivos se hallen expuestos continuamente a radiaciones ionizantes y que se incorporen radionucleídos a los alimentos y al cuerpo humano. Estos nucleidos son incorporados a diferentes especies y tipos de vegetación a través de la absorción por sus raíces. La transferencia de radionucleidos de la atmósfera a la cadena alimentaria depende de factores geográficos y climáticos y también de las características de los suelos. La Tabla 3.V muestra las concentraciones de los nucleidos de las cadenas naturales en agua de bebida y alimentos [2].

Efectos de la radiación sobre el ser humano

Todos los organismos vivos están expuestos a radiación, ya sea natural o antropogénica. Como resultado de la misma pueden, resultar afectados a través de un daño o

alteración de las células que lo constituyen. Los efectos de la radiación sobre una célula son aleatorios: el mismo tipo y cantidad de radiación puede incidir sobre la misma célula y tener diferentes efectos. Una vez sufrido un detrimento, la mayoría de las células tiene la capacidad de reparar el daño, según sea el nivel de radiación recibida. Cuanto mayor sea la radiación que incide sobre la célula, mayor será la probabilidad que ocurra un daño irreparable. Si un número significativo de células es afectado, el daño puede resultar muy severo o mortal.

Tabla 3.V: Concentración (mBq/kg) de las series de radionucleidos de Uranio y Torio en alimentos y agua de bebida[2].

Región	²³⁸ U	²³⁰ Th	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²³² Th	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²³⁵ U
Productos Lácteos									
América del Norte	0,7	0,4	5,7	11		0,27			0,05
Asia	0,55 - 17		6 - 12	16	13 - 15	0,29 - 1,2	21		0,6
Europa	0,1- 4,9	1.2	0,4 - 200	5 - 280	2 - 220	1.2		56	
Carnes									
América del Norte	0,8 - 2,3	0,5 - 3	20	18		0,3 - 2			0,02
Asia	10 - 13		36 - 41	140	120 - 440	2,3 - 4,3	120		0,5
Europa	1 -20	0.3 - 3	2 - 220	15 - 3700	37 - 67000	0,5 - 3,6		22 - 93	
Granos									
América del Norte	3- 23	0.9 - 10	7 - 100	33- 81		0,1 - 2,8			0,1 - 1,3
Asia	1,2 - 9,8		14 - 17	34	15 - 120	1.2 - 13	38		0,5
Europa	4,7 - 400	1,4 - 17	0,7 - 5200	40 - 4000	20 - 1900	1.6 - 33		180 - 2300	
Vegetales de hoja									
América del Norte	24	20	56	41		18			1,2
Asia	16 - 72		75	360	320 - 430	23	220		0,7
Europa	6- 2200	6 - 380	2,2 - 1150	4 - 4100	4 - 7400	4 - 7			
Vegetales de raíz y frutas									
América del Norte	0,9 - 7,7	0,2 - 1,1	7 - 47	8 - 150		0,08 - 1,4			0,1
Asia	0,4 -77		11 - 63	27	16 - 140	2,3 - 4,7	110		0,6
Europa	0,9 - 2900	0,7 - 7,5	5 - 9400	18 - 4900	12 - 5200	0,4 - 7,1		22	
Pescados									
América del Norte	13- 1900	1.2 - 29	30 - 59	14 - 1800	150 - 55000	1,2 - 30			0,4 - 90
Asia	12		39	3500	4900	1,3	320		0,5
Europa	2,5		8,5 - 7400	20 - 4800	50 - 120000			56 - 700	
Agua de bebida									
América del Norte	0,3 - 77	0,1	0,4 - 1,8	0,1 - 1,5		0,05	0 - 0,5		0,04
Asia	0,1 - 700		0,2 - 120			0,04 - 12			
Europa	0 -150000	1,4	0 - 49000	0,2 - 21000	0,1 - 7600	0 -9,3	0 - 570		0 -50

Los rayos γ , X, partículas cargadas y neutrones afectan las células generalmente mediante mecanismos de ionización, determinados por la expulsión de un electrón perteneciente de un determinado sistema molecular, generando especies altamente reactivas. La energía de ionización es portada por electrones de muy alta velocidad que atraviesan de los tejidos y es transferida a lo largo de trazas extremadamente localizadas o concentradas. Esta localización es la característica biológica más importante de la radiación. La distancia recorrida depende de la energía del electrón.

La velocidad del electrón primario decrece con las sucesivas transferencias de energía. Por ello, cuando el electrón se frena, la distancia media recorrida entre transferencias consecutivas de energía decrece y, la cantidad de energía trasferida por unidad de trayectoria aumenta. También el electrón primario en su trayectoria pone en movimiento electrones secundarios. Alrededor del 15% de los electrones secundarios adquieren energía suficiente como para separar un electrón de una nueva molécula.

Incorporación de material radiactivo

La exposición interna ha sido asociada a casos de contaminación por material radiactivo en forma de aerosol. Ésta no está limitada a la incorporación de grandes cantidades de material en un instante dado (exposición aguda), sino que puede aparecer en casos crónicos, en donde la contaminación provoca la acumulación de pequeñas cantidades de material radiactivo durante un período largo de tiempo. Los materiales radiactivos pueden ser incorporados y depositados en el organismo a través de algunas de las siguientes rutas de ingreso:

- Las vías respiratorias (inhalación),
- El tubo digestivo (ingestión),
- La piel intacta (absorción percutánea)
- Heridas o cavidades del cuerpo logradas de modos naturales o artificiales,
- Punción (inyección, instilación)

Una vez que ingresa el material radioactivo al organismo, puede devenir un daño. La actividad de algunos de los nucleidos naturales normalmente incorporados, se muestra en la Tabla 3.VI.

Tabla 3.VI: *Actividad en tejidos humanos*

Nucleido	Actividad (Bq)
U	1,1
Th	0,11
⁴⁰ K	8800
Ra	3,0
¹⁴ C	3000
³ H	23
Po	37

Capítulo IV

RIESGOS BIOLÓGICOS

Más allá de los fenómenos generales de contaminación del aire y del agua superficial, en la actualidad existen numerosos sitios en los que se descargan o derraman con autorización nucleidos antropogénicos que provocan la contaminación del suelo y en muchos casos de las aguas subterráneas.

La situación actual muestra un escenario complejo desde el punto de vista político-social, debido a las interpretaciones emocionales que se realizan, a veces intencionadas, y que sólo contribuyen a crear teorías pseudocientíficas que generan confusión y desinformación en la población. Por este motivo, la temática de estudio es multidisciplinaria.

Se define al **riesgo** como la probabilidad de que se produzca un efecto adverso por parte de una sustancia, tecnología o actividad. Por lo tanto, para que exista un riesgo es necesario que exista la posibilidad de ser expuesto a un **peligro potencial**, es decir, al conjunto de las características intrínsecas por las que se produce un efecto adverso. Mientras que el peligro potencial se puede determinar por procedimientos experimentales, el riesgo ha de ser estimado por estudios epidemiológicos de una población expuesta, o por inferencia matemática a partir de datos experimentales:

$$\text{RIESGO} = \text{PELIGRO} \times \text{EXPOSICION}$$

La **evaluación del riesgo** establece la probabilidad de que se produzcan efectos adversos sobre el hombre, los animales, las plantas o el medio ambiente como resultado de la exposición a uno o más agentes estresantes. Entre estos agentes se incluyen compuestos químicos naturales o sintéticos (en alimentos, medicamentos, contaminantes ambientales), y agentes físicos (radiaciones, campos electromagnéticos). Una vez cuantificados los riesgos, es necesario gestionarlos tomando las medidas preventivas pertinentes, comunicarlos al público, y hacer el seguimiento de la utilidad de las medidas de control adoptadas.

La evaluación del riesgo es por tanto una herramienta para organizar y evaluar la información necesaria para la toma de decisiones. Se fundamenta en diversas disciplinas, entre las que se encuentran la toxicología, epidemiología, estadística, patología, biología molecular, bioquímica, química analítica, modelado de exposición, dosimetría, etc. La evaluación del riesgo facilita la toma de decisiones reguladoras. Se emplea para caracterizar y gestionar circunstancias potenciales no deseadas en una gran variedad de áreas tales como explosiones industriales, fallos mecánicos o de máquinas, lesiones ocupacionales, lesiones y muerte por enfermedades, causas naturales, estilo de vida y actividades voluntarias, impacto del desarrollo económico en ecosistemas y transacciones comerciales.

El riesgo se expresa generalmente en términos cuantitativos, como el número de cánceres adicionales durante la vida en 1 millón de personas expuestas. Históricamente se considera que un riesgo de 10^{-6} no es relevante [17].

Efectos biológicos de la radiación [18]

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes derivan del daño que éstas producen en la estructura química de las células, fundamentalmente en el ADN (ácido desoxirribonucleico) y modificaciones del agua celular. La expresión de los efectos de la radiación depende de un gran número de variables físicas y biológicas. Entre las variables físicas se incluyen la dosis recibida, el tipo de exposición (crónica o aguda) y la calidad de la radiación (transferencia lineal de energía: LET). Dentro de las múltiples variables biológicas que intervienen en la respuesta a la radiación cabe destacar el sexo del individuo expuesto, la edad a la que se produce la exposición y a susceptibilidad genética de los individuos.

La radiación ionizante, en pequeñas dosis, puede dar inicio a cadenas de sucesos sólo parcialmente conocidos, que conducen a la ocurrencia de cáncer o lesiones genéticas. En grandes dosis es capaz de matar un número suficiente de células como para dañar órganos y causar la muerte del individuo en forma rápida. Las lesiones causadas por dosis altas de radiación se hacen evidentes por lo general en pocas horas o días. Los efectos causados por dosis bajas pueden tardar años o incluso décadas en manifestarse. Las enfermedades y malformaciones hereditarias causadas por daños genéticos tardan

generaciones en manifestarse: serán lo hijos, nietos o descendientes más remotos de las personas irradiadas los que resultarán afectados.

Mientras es relativamente fácil identificar los efectos inmediatos (determinísticos) originados en altas dosis de irradiación, es casi siempre muy difícil individualizar los efectos tardíos de las bajas dosis (estocásticos). Esto obedece en parte al hecho que tardan mucho tiempo en manifestarse y aún entonces es difícil establecer una relación causa-efecto, ya que tanto el cáncer como las lesiones genéticas no son causados específicamente por las radiaciones ionizantes, sino que también tienen muchas otras causas.

Las dosis deben alcanzar un cierto nivel (“umbral”) para provocar lesiones agudas pero no para ser causa de cáncer o lesiones genéticas. Al menos en teoría, la dosis más pequeña incrementa la probabilidad de ocurrencia de dichos efectos tardíos. Por ello, ningún nivel de exposición a la radiación puede considerarse seguro. Al mismo tiempo, ningún nivel es uniformemente peligroso. Incluso a dosis bastante elevadas no todas las personas resultan afectadas o igualmente afectadas. Análogamente, una persona expuesta a una persona expuesta a una cierta dosis de radiación no está destinada a sufrir cáncer o daño genético: incurre en un riesgo mayor que una no irradiada. Este riesgo aumenta a medida que aumenta la dosis.

Se puede concluir que los efectos perjudiciales de la radiación ionizante sobre la salud humana son de una gran diversidad, y abarcan desde lesiones con resultado fatal rápido a cánceres, defectos de nacimiento y trastornos hereditarios que aparecen meses, años o decenios después. La naturaleza, frecuencia y gravedad de los efectos dependen de la radiación en cuestión, así como de la dosis y las condiciones de exposición. La mayoría de esos efectos exigen niveles relativamente altos de exposición y sólo se encuentran, por lo tanto, en víctimas de accidentes, pacientes sometidos a radioterapia u otras personas que recibieron irradiaciones intensas. En cambio, se supone que los efectos genotóxicos y cancerígenos de la radiación ionizante aumentan en frecuencia, sin umbral, de la dosis. Por consiguiente, si bien no puede excluirse la existencia de umbrales para estos efectos, se supone que su frecuencia aumenta con cualquier nivel de exposición. Para la mayoría de los efectos de la radiación, la sensibilidad de las células expuestas varía según su tasa de proliferación y en relación inversa con su grado de diferenciación, por lo que el embrión y el niño en crecimiento son los más vulnerables.

A diferencia de otras formas de radiación, la radiación ionizante es capaz de depositar suficiente energía localizada para arrancar electrones de los átomos con los que

interactúa. Así, cuando la radiación colisiona al azar con átomos y moléculas al atravesar células vivas, da lugar a iones y radicales libres que rompen los enlaces químicos y provoca otros cambios moleculares que dañan las células afectadas. Es por esta razón que la radiación ionizante es dañina para los seres vivos.

Para evaluar la energía depositada por una cierta radiación ionizante se define la *dosis absorbida* (energía depositada por unidad de masa J/kg, Gray). Esta magnitud no tiene en cuenta los posibles efectos biológicos. La importancia del efecto biológico causado por los distintos tipos de radiación se tiene en cuenta al multiplicar la dosis absorbida por un factor que pondera el tipo y energía de la radiación incidente. Esta magnitud se conoce como *dosis equivalente* y su unidad es el Sievert (Sv). Para tener en cuenta la respuesta de los diferentes tejidos, se define la *dosis equivalente efectiva* (Ver Tabla 4.1).

Los efectos biológicos de la radiación a **dosis altas** se conocen muy bien, la respuesta de un organismo adulto a una exposición aguda a radiación de baja LET que afecte a todo el organismo produce signos, síntomas y un cuadro clínico variable que se conoce con el nombre de **síndrome de irradiación**:

- Síndrome de la médula ósea (3-5 Gy)
- Síndrome del sistema gastrointestinal (5-15 Gy)
- Síndrome del sistema nervioso central (>15 Gy)

La $DL_{50/60}$ (dosis necesaria para producir la muerte al 50% de la población expuesta al cabo de 60 días) es del orden de 3-5 Gy para el hombre.

Los efectos biológicos de la radiación a **dosis bajas** (desarrollo de cáncer y anomalías hereditarias) son de naturaleza probabilística y la gravedad del efecto no depende de la dosis de radiación recibida.

Tabla 4.I: Resumen de magnitudes radiológicas y sus unidades

Magnitud	Unidad/SI	Símbolo	Definición	Conversión
Actividad	Curie	Ci	$3,7 \times 10^{10}$ dps	$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
	Bequerel	Bq	1 dps	$1 \text{ Bq} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$
Exposición	Roentgen	R	$2,58 \times 10^{-4}$ C/kg	$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
	Carga/masa aire	C/kg	1 C/kg aire	$1 \text{ C/kg} = 3,876 \text{ R}$
Dosis Absorbida $D = f_{\alpha} X(R)$	Energía/masa	rad	100 erg/g	$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$
	Gray	Gy	1 J/kg	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Dosis equivalente $H_t = w_r \cdot D$	rad equivalente hombre	rem	Dosis absorbida (w_r) = 0,01 J(w_r)/kg	$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$
	Sievert	Sv	1 J(w_r)/kg	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
Dosis efectiva equivalente $E = \sum_i w_t \cdot H_t$	rad equivalente hombre	rem	Dosis absorbida (w_r)(w_t) = 0,01	$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv}$
	Sievert	Sv	J(w_r)(w_t)/kg 1 J(w_r)(w_t)/kg	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$

f_{α} = factor de calidad de las radiaciones, w_r = factor de calidad, w_t = factor de peso por órgano

Según la UNSCEAR, las dosis máximas por año para la irradiación del cuerpo de la población recomendadas son las siguientes [17]:

Tabla 4.II: Dosis máximas recomendadas

Parte del cuerpo	$D_{\text{máx}} (10^{-2} \text{ Sv/año})$
Cuerpo entero	5
Médula ósea	5
Piel, tiroides y huesos	30
Extremidades	75
Otros órganos	15
Mujeres en condiciones de procrear	1,3/trimestre

Capítulo V

MONITOREO DE ALIMENTOS [19]

Dado que los nucleidos radioactivos naturales y antropogénicos están presentes en el medio ambiente y pueden afectar a la salud de la población es importante realizar monitoreos tanto de vigilancia ambiental como para determinar las líneas de base.

En las detonaciones nucleares o accidentes de reactores, como ya se ha mencionado, se producen por fisión varios centenares de radionucleidos, pero sólo unos pocos tienen períodos suficientemente largos como para presentar una actividad importante después de su producción. Algunos de ellos se transmiten fácilmente por cadena alimentaria y son eventualmente incorporados por el hombre.

El peligro de los radionucleidos de fisión como contaminantes internos puede estimarse mediante la relación, entre su abundancia relativa y la concentración máxima permisible. Un listado de los más importantes se muestra en la Tabla 5.I. Usando el criterio mencionado anteriormente, el ^{90}Sr es varios órdenes de magnitud más significativo que los otros nucleidos de una mezcla de más de un año de edad. El ^{137}Cs le sigue en importancia como contaminante interno, en virtud de su contribución a la dosis genéticamente significativa recibida por una población.

El ^{90}Sr tiene importancia biológica, llega acompañando al Ca en las cadenas alimentarias. El Ca de la dieta es aportado en 70-80% por la leche y sus derivados. Realizar mediciones sobre de ^{90}Sr sobre huesos humanos proporcionan datos sobre una evaluación directa del riesgo. La detección de este nucleido en los alimentos permite una predicción a corto plazo, de la variación futura de los niveles de Sr en los huesos.

La exposición humana a los nucleidos proveniente de los alimentos es más importante en cantidad que la que puede provenir del aire o agua. Los elementos radioactivos (naturales o antropogénicos) pueden llegar a la cadena alimentaria por dos vías (ver *Figura 5.1*):

- a- Absorción a partir del suelo por las raíces de las plantas.
- b- Depósito directo sobre la vegetación.

Por ejemplo, el Cs se introduce por depósito directo sobre la vegetación. De todo esto se concluye que el monitoreo de ^{90}Sr y ^{137}Cs provenientes de la precipitación radiactiva sobre la cadena alimentaria humana es muy adecuado.

El tipo de accidente y las condiciones del lugar en el cual ocurre determinan las vías de contaminación y las formas en que ésta puede llegar al hombre, algunas de ellas están sintetizadas en la *Figura 5.1*. La estación del año en que ocurre el accidente determina la magnitud de la contaminación de los diferentes alimentos.

Tabla 5.I: *Productos de fisión y de activación los cuales podrían afectar al ser humano*[19].

	Nucleido	Vida media	%de fisión producida	Decaimiento más importante
Productos de Fisión	^{89}Sr	50,5 d	4,77	β^-
	^{90}Sr , ^{90}Y	28,7a, 64,1h	5,76	β^- , β^-
	^{95}Zr , ^{95}Nb	64m09d, 35,0 d	6,51	β^- , γ , β^- , γ
	^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$	2,747d, 6,006 h	6,09	β^- , γ , β^- , γ
	^{103}Ru , $^{103\text{m}}\text{Rh}$	39,272d, 56,116 min	3,03	β^- , γ , β^- , γ
	^{102}Ru , ^{106}Rh	372,6 d, 29,92 s	0,4	β^- , β^- , γ
	$^{129\text{m}}\text{Te}$	33,6 d	0,661	β^- , γ
	^{131}I	8,021d	2,875	β^- , γ
	^{132}Te , ^{132}I	76,856 h, 2,3 h	4,282	β^- , γ , β^- , γ
	^{137}Cs , $^{137\text{m}}\text{Ba}$	30,0 a, 2,55min	6,136	β^- , γ
	^{140}Ba , ^{140}La	12,751d, 1,6779 d	6,134	β^- , γ , β^- , γ
^{144}Ce , ^{144}Pr	248,45d, 17,28 d	5,443	β^- , γ , β^- , γ	
Productos de Activación	^3H	12,35 a		β^-
	^{14}C	5730 a		β^-
	^{55}Fe	2,75 a		CE
	^{59}Fe	44,53 d		β^- , γ
	^{54}Mn	312,5 d		CE, γ
	^{60}Co	5,27 a		β^- , γ
	^{65}Zn	243,9 d		CE, γ
	^{134}Cs	754,2 d		β^- , γ
	^{239}Np	2,355 d		β^- , γ
	^{241}Pu , ^{241}Am	14,35 a, 432 a		β^- , $\alpha\gamma$
	^{242}Cm	162,94 d		A
	^{238}Pu	87,7 a		A
	^{239}Pu	$2,411 \times 10^4$ a		A
^{240}Pu	$6,563 \times 10^3$ a		A	
^{242}Pu	$3,735 \times 10^5$ a		A	

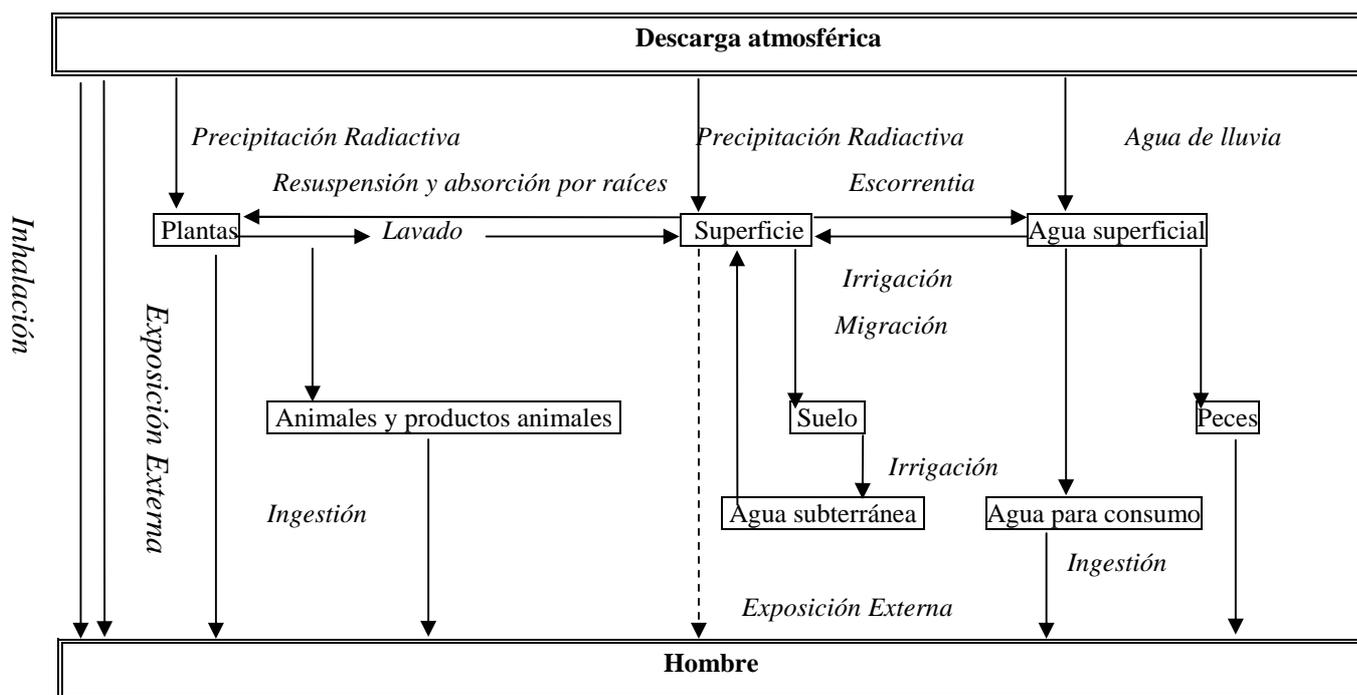


Figura 5.1: Vías de llegada al hombre

El propósito principal del análisis radiológico debe ser la rápida identificación de las muestras ambientales más críticas y de los radionucleidos, de forma tal de tener información para poder actuar. Generalmente, en caso de accidente, se monitorean los alimentos y los nucleidos listados en la Tabla 5.II.

Tabla 5.II: Radionucleidos de interés específico en alimentos y medio ambiente

Material	Nucleido
Aire	^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs
Agua	^3H , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs
Leche	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs
Carne	^{134}Cs , ^{137}Cs
Otros alimentos	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs
Vegetación	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce
Suelo	^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{242}Am

Muestras de Alimentos

En este tipo de estudios, debe analizarse aquellos alimentos que contribuyen significativamente a la exposición de la población. El muestreo de los alimentos debe estar basado en el conocimiento de las prácticas de la agricultura y el consumo en el área de interés. Se recomienda el análisis de los componentes de los alimentos primarios en sí

más que de la mezcla alimenticia resultante. Por ejemplo, las medidas de actividad de ^{131}I en las pasturas son importantes pues proveen de la concentración que se puede esperar en la leche.

La leche y sus derivados son los componentes más importantes de la dieta. La leche es uno de los pocos alimentos que se producen en grandes áreas y se recoge diariamente. Su composición es casi idéntica en todos los países. Es fácil de obtener muestras representativas y puede ser analizada en forma líquida o seca.

En caso de liberación de nucleidos al medio ambiente, la leche puede contaminarse con I y Cs durante los primeros días de la caída de los radionucleidos. La contaminación de la leche será mayor si las vacas se encuentran pastando durante el período de precipitación radiactiva que sigue a un accidente nuclear. Aún cuando las vacas estén en los establos, la contaminación puede ocurrir por inhalación de los radionucleidos o ingestión de agua o alimentos contaminados. La leche que proviene de cabras y ovejas debe chequearse por períodos largos debido a sus hábitos de pastoreo.

Los granos y el arroz después de la cosecha están expuestos a la contaminación sólo durante el almacenaje y únicamente las primeras capas pueden contaminarse. Si la precipitación radiactiva ocurre durante el período de crecimiento, los nucleidos serán transportados al grano y al arroz debido al crecimiento mismo de las plantas. Una muestra representativa es fácil de obtener durante la cosecha. Si la precipitación radiactiva ocurre durante el invierno, los efectos sobre los granos se verán en el siguiente período de crecimiento.

La carne es una de las principales fuentes de contaminación por Cs en la cadena alimentaria luego de un accidente. La contaminación de la carne ocurre como resultado de las pasturas que pudieron ingerir los animales o el agua que pudieran beber. La inhalación de Cs no produce una contaminación significativa de la carne. Las muestras de carne, para que sean representativas, deben tomarse de un gran número de animales.

Luego de un accidente, los peces se contaminan con Cs al ingerir las plantas y microorganismos de los lagos y ríos, llevando así el Cs que luego puede consumir el hombre. En estos casos es difícil conseguir una muestra representativa, sobre todo en regiones donde abundan los lagos y existen muchas especies. Los peces de mar no contiene tanto Cs como los de agua dulce, debido al efecto de dilución a través de las profundidades del océano.

Los vegetales de hoja verde son muy propensos a la contaminación externa durante la etapa de crecimiento. También pueden contaminarse los vegetales de raíz.

Para que la muestra sea significativa, el muestreo debe planearse cuidadosamente. En los primeros días de la precipitación radiactiva, la presencia de nucleidos en vegetales de hoja puede ser significativa, afectando así la cadena alimentaria.

Los animales de caza, hongos y frutas pueden contaminarse marcadamente, pero sólo en casos excepcionales contribuirán a la dosis de ingestión. Sin embargo, siempre que se vayan a importar, deben ser monitoreados.

Muestreo

Los problemas reales en el análisis de contaminantes radiactivos comienzan con la obtención de una muestra adecuada para realizar la medida. Claro está que el resultado final dependerá de la forma en que se elijan las muestras del material y cómo se trate la misma una vez recolectada. Por lo tanto, se requiere una reducción de tamaño, secado y homogenización antes de tomar las alícuotas para el análisis. Todo esto debe realizarse de acuerdo a estándares internacionales previamente establecidos.

La muestra puede provenir de un mineral, del agua de un lago o río, etc., de fragmentos de plástico o de alimentos. Para que los resultados sean confiables y representativos de aquello que se quiere medir, se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

- a) Seleccionar la muestra que debe ser representativa del total del material a analizar
- b) Eliminar las especies que pueden enmascarar o interferir en el análisis
- c) Adecuar la forma de la alícuota para ser colocada delante del detector
- d) Realizar el análisis
- e) Interpretar los resultados.

Independientemente del tipo de muestra a analizar se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones generales;

1.- TOMA DE MUESTRA

- a) Se llama **lote** al material completo del cual se toman las muestras.
- b) La **muestra bruta** es la porción que se toma del lote para análisis o almacenamiento. La misma debe seleccionarse de modo que sea representativa del lote.
- c) La **muestra de laboratorio** es más reducida que la anterior pero con la misma composición. De esta muestra se toman las **alícuotas** para el análisis.

Toda muestra que llega al laboratorio para su análisis debe estar acompañada de

una planilla donde conste:

- lugar de muestreo
- período de muestreo
- cantidad de muestra recolectada
- la fecha de recolección
- fecha de envío al laboratorio.
- análisis que deben efectuarse
- operador a cargo del muestreo
- el clima (en caso de ser necesario)
- observaciones

2.- ALMACENAMIENTO

Las muestras deben almacenarse adecuadamente para evitar su degradación, pérdida por descomposición e impedir contaminaciones posteriores. Especial cuidado se debe tomar para impedir la pérdida de radionucleidos volátiles. El almacenamiento de las muestras por períodos cortos debe realizarse en lugares refrigerados, agregándose conservantes según corresponda.

Capítulo VI

MATERIALES Y MÉTODOS

El trigo se cultiva extensamente en nuestro país (5.7 millones de hectáreas, con un rendimiento promedio de 2539 kilos/hectárea) [20], los cultivos de la provincia de La Pampa constituyen aproximadamente el 6% del total. Por otra parte, la dieta típica argentina involucra un 10% de productos derivados de la harina de trigo [20]. La producción nacional de grano de trigo para la Campaña 2003/04 fue de 14.5 millones de toneladas. Durante 2004 fueron a molienda 5,02 millones de toneladas de trigo pan (4.9 millones en el 2003). Estimando un rendimiento industrial del 75 %, se habrían obtenido unas 3.5 millones de toneladas de harina. Esto significa que la molienda de trigo aportaría aproximadamente algo más del 2,7 % del valor bruto de producción de la Industria de Alimentos y Bebidas y según las estadísticas de la Superintendencia de Riesgos del Trabajo[21], existirían algo más de 5200 trabajadores asalariados ocupados en esta rama industrial. La harina de trigo es el insumo básico de varios productos. Durante 2003, la harina destinada al mercado interno se utilizó en un 71 % para elaborar pan común (ó tipo francés), 10% para pastas secas, 6% para harina fraccionada (consumo familiar en paquetes de 1 a 5 kilos), 8% para galletitas (dulces y saladas) y 5% para panificados industriales (pan de molde, pan de Viena y pan dulce).

En estos productos, la harina de trigo constituye entre el 55% y el 90 % de su composición. El agua puede llegar a representar el 30% del producto final y la materia grasa (de origen animal y/o vegetal) entre el 0% y el 4,5 %. En nuestro país, los productos farináceos derivados del trigo son considerados bienes inferiores, lo que significa que su consumo es inversamente proporcional al ingreso de las familias (a menor ingreso hay mayor consumo). Durante la década de 1990, el consumo interno de harina de trigo disminuyó sensiblemente, para aumentar en forma leve a partir de 1999. En los últimos años, el consumo interno de harina de trigo fue de aproximadamente 77 kg. *per capita*. Durante 2002, el consumo se incrementó en forma notable, hasta alcanzar los 86 kilos por habitante año [22].

En un principio, en este trabajo se había previsto realizar la identificación en harinas de trigo producidas en la provincia de la Pampa, pero sólo existen dos grandes molinos harineros, Cragill en Realicó y Fideos Don Antonio en Gral. Pico, que recolectan trigo de campos de la zona donde se hallan. Por este motivo, este trabajo se realizó sobre muestras de

trigo tomadas en regiones específicas de la provincia. Se tomaron muestras de granos de trigo proveniente de las seis regiones de la provincia de La Pampa indicadas en la Tabla 6.1 y localizadas en el mapa de la *Figura 6.1*.

Tabla 6.1. *Regiones donde fueron tomadas las muestras de Trigo y la masa usada para el análisis.*

Muestra de Trigo	Procedencia	Masa (kg)
T1	Toay (Zona Suroeste)	0,085
T2	Anguil (Zona Este)	0,0862
T3	Eduardo Castex (Zona Norte)	0,0832
T4	La Araña (Toay, Zona Oeste)	0,087
T5	Santa Rosa (Zona Centro)	0,0955
T6	Santa Rosa (Zona Este)	0,0819

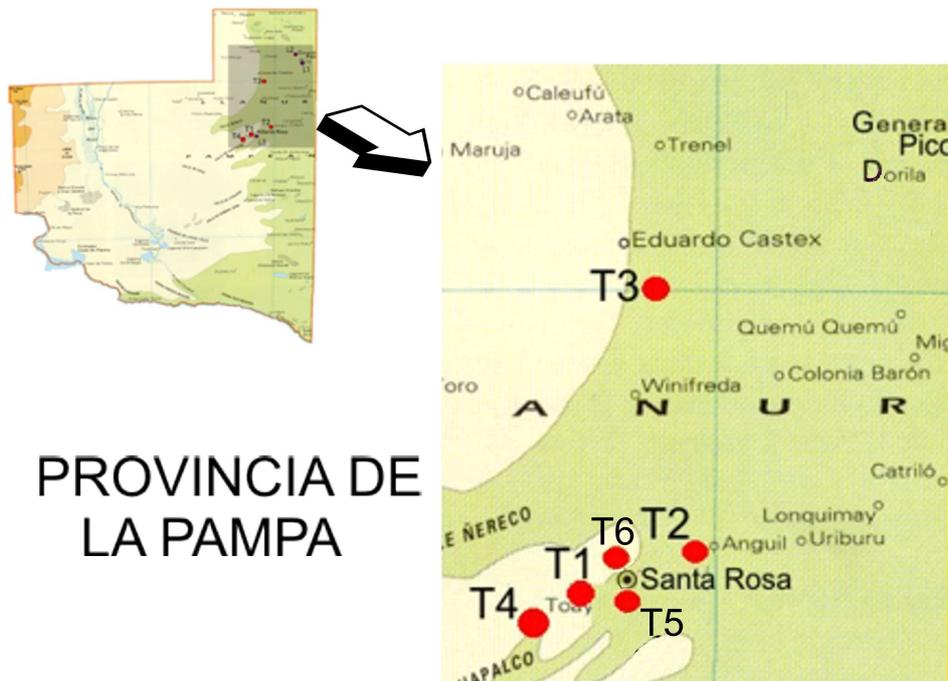


Figura 6.1: *Ubicación de los sitios de recolección de los granos de trigo.*

Preparación de las muestras

La preparación de las muestras para su disposición en el equipo de detección de radiación γ , tiene como fin obtener una cantidad de material sólido, deshidratado, en

cantidades suficientes y con una geometría reproducible. En general es la deshidratación total o casi total de la muestra el paso determinante de todo el procedimiento. Es necesario que se tienda a utilizar protocolos normalizados, de manera de obtener resultados que sean adecuados para su comparación con otras medidas.

En este trabajo, muestras de trigo de 500 g fueron deshidratadas en estufa a 105 °C durante tres horas, verificando que no se produzca calcinación de las mismas. Las muestras se dispusieron sobre bandejas para permitir una amplia superficie de contacto con el calor que circula en el interior de la estufa. Luego de transcurridas las tres horas se procedió a una pesada en balanza electrónica para obtener una sucesión de dos medidas equivalentes (p.e. diferencia menor a dos veces el error de la balanza usada), es decir, hasta obtener peso constante. De este modo quedó eliminada la humedad que pudiere estar presente en las muestras. Posteriormente se las dejó enfriar y se dispuso una cantidad adecuada de cada una de las muestras en una placa de Petri de plástico (hasta completarla), después se pesaron nuevamente las placas con la muestra dentro para obtener el peso exacto de la muestra; quedando así preparadas para realizar la determinación en el detector. Para evitar que pudieran absorber humedad se las colocó en un desecador hasta que se les realizó la medida de radioactividad.

Espectroscopía gamma[23]

Toda detección de radiación nuclear está basada en su interacción con la materia. El término detección de la radiación no sólo incluye la indicación de su presencia sino también la medida de su energía, cantidad y propiedades relacionadas.

Se puede considerar que el sistema de detección consiste en dos partes, un detector donde se produce la interacción de la radiación con la materia y un aparato de medida que toma la salida del detector y realiza las funciones necesarias para completar la determinación.

Diferentes factores son importantes en la elección de un sistema de detección:

1. *La resolución en energía:* se da en términos del ancho total a media altura de un pico.
2. *La eficacia del detector:* dos tipos diferentes pueden definirse. La *absoluta o total* que es el cociente entre los números de eventos registrados por el detector y los emitidos por la fuente. La *intrínseca* se consideran sólo aquellos que inciden sobre el detector.

3. La simplicidad del arreglo experimental y la facilidad de acumulación de datos.
4. Factores secundarios como la linealidad en la respuesta, estabilidad, etc.

Los detectores suelen clasificarse por la naturaleza de la interacción de la radiación con el detector. Varios tipos operan en virtud de la ionización que es producida en ellos por el pasaje de la radiación. Estos detectores incluyen las cámaras de ionización, los contadores proporcionales, los Geiger-Müller y cámaras de niebla.

En ciertos detectores, la excitación y algunas veces la disociación de las moléculas del detector juegan roles importantes. Ejemplo de este tipo son los detectores de centelleo y las emulsiones fotográficas.

Los detectores semiconductores, están basados en materiales semiconductores monocristalinos, principalmente en Ge y Si, se los conoce también como detectores de estado sólido. Estos dispositivos fueron los primeros con una alta resolución en energía para medidas de partículas cargadas, rayos X y γ . Al igual que las cámaras de ionización, el principio básico de funcionamiento se basa en que el pasaje de la radiación ionizante crea pares electrón-hueco, en lugar de pares electrón-ión. La ventaja de su uso radica en que la energía promedio requerida para crear un par electrón-hueco es ≈ 10 veces menor que la requerida para la ionización de un gas. La cantidad de pares producidos por una dada energía es así un orden de magnitud mayor que el número de ionizaciones producidas en un gas, resultando esto en un aumento de la resolución en la energía. Excepto los de Si, los demás deben operarse a bajas temperaturas (80K). Esto implica la necesidad de un sistema criogénico adicional el cual se suma al detector. Dado que son materiales monocristalinos, son muy sensibles al daño por radiación, hecho que limita su vida útil.

El detector está alimentado por una fuente de alta tensión, la cual debe ser estable frente a variaciones de tensión en la red de alimentación e insensible a las variaciones de carga y temperatura. Para los detectores de Ge una estabilidad adecuada de la fuente de alta tensión, normalmente no acusa cambios en la posición de los picos, sin embargo, un pequeño pero sustancial aumento de la eficiencia de detección puede aparecer con un aumento de la tensión de polarización.

Las señales de salida del detector son procesadas primero por un pre-amplificador. Se emplean dos tipos de pre-amplificadores según sea el detector. Para detectores de INa se utilizan preamplificadores sensibles a la tensión, pero debido a la capacidad efectiva de los

detectores de semiconductor que varía notablemente con la tensión de polarización aplicada, se usan para estos pre-amplificadores sensibles a la carga.

A continuación se coloca un amplificador lineal. Los amplificadores lineales en el caso de detectores semiconductores deben reunir una característica muy especiales: el nivel de ruido debe ser extraordinariamente bajo, de ganancia relativamente amplia, alta estabilidad con las variaciones de temperatura.

Los pulsos de salida son almacenados en un multicanal. El analizador de multicanal es un dispositivo capaz de seleccionar los pulsos según su altura que es proporcional a la energía transferida por la radiación electromagnética al detector. Su funcionamiento está basado en la conversión mediante un convertidor analógico–digital de cada impulso del detector en un tren de pequeños impulsos proporcionado por un oscilador de cuarzo de alta precisión, cuyo número es proporcional a la amplitud del impulso original [24, 25].

En este trabajo se utilizó el espectrómetro de la *Figura 6.2*, el cual está constituido por un detector de Germanio Hiperpuro Marca Ortec, con resolución en energía (1.8 keV para el rayo de 1332 keV del ^{60}Co), un amplificador Ortec 575 A, una fuente de alta tensión Ortec 659 y un módulo NIM Ortec 4201 C. El espectrómetro cuenta además de una cámara limpia de plomo marca ORTEC para asilar el detector del Laboratorio. La adquisición y almacenaje de los datos se realizó con una plaqueta Multicanal AccuSpec de 8096 canales, instalada en una computadora.

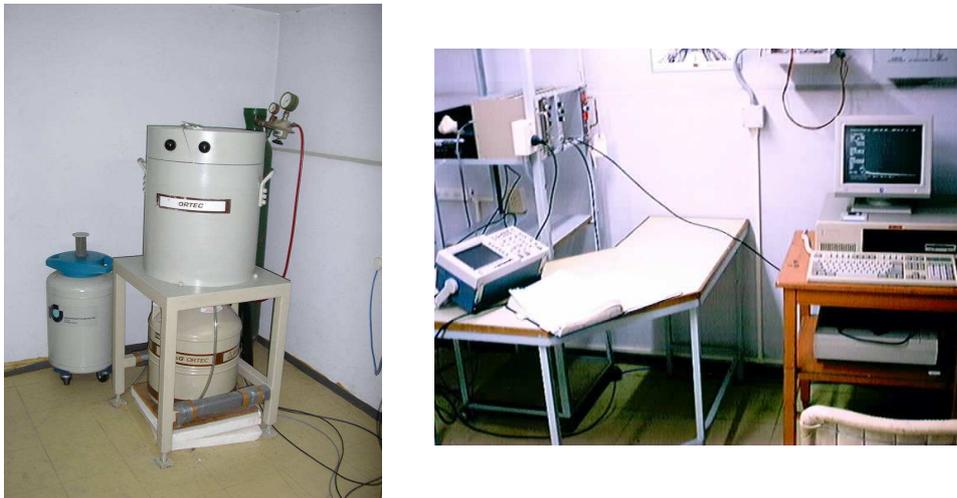


Figura 6.2: Espectrómetro gamma.

La calibración en energía, mostrada en la *Figura 6.3*, se realizó con muestras puntuales de ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{60}Co y ^{133}Ba . La adquisición de datos se realizó en todos los

casos durante una semana. Entre cada par de medidas se tomó un espectro del fondo del laboratorio, durante el mismo período de tiempo.

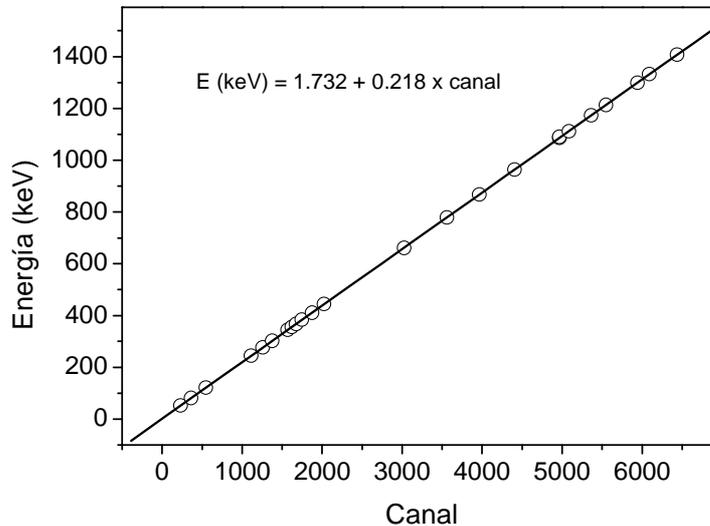


Figura 6.3: Recta de calibración en energía. Los puntos corresponden a los datos experimentales, la línea llena a un ajuste lineal.

Análisis de los espectros

Los espectros fueron analizados con el programa comercial Gamma Vision 5.10 de ORTEC, el cual permite identificar los nucleidos presentes en las muestras mediante la posición en energía de los picos que es comparada con una base de datos. Se buscó la presencia de los radionucleídos de las cadenas naturales del ^{238}U y ^{232}Th y ^{40}K y los artificiales (^{137}Cs , ^{60}Co , ^7Be , ^{125}Sb). En una primera etapa, los datos fueron analizados cualitativamente pues no se dispone aún de una muestra de calibración en eficiencias con la geometría y las características físicas adecuadas a las muestras de trigo.

A las áreas de los picos asociados a los diferentes nucleidos, determinadas en los espectros correspondientes a las muestras de trigo (C), se les restó sistemáticamente las correspondientes al fondo del Laboratorio (F) normalizadas por el tiempo de medida correspondiente (T_C y T_F , para muestra y fondo, respectivamente) utilizando el criterio para muestras de baja actividad descrito a continuación. [26].

Para obtener la actividad (a) asociada a cada nucleido presente en el trigo viene dada por:

$$a = (C/T_C) - (F/T_F)$$

Si el fondo presenta una distribución de Poisson el error $\varepsilon(a)$ de las detecciones de la muestra para un intervalo de confianza es:

$$\varepsilon(a) = k_\beta ((C/T_C)^2 + (F/T_F)^2)^{1/2} = k_\beta \sigma(a),$$

siendo el valor de k_β para un intervalo de confianza de 95% igual a 1.960. Dos parámetros adicionales son necesarios definir:

- El **límite crítico** (L_C) o nivel mínimo detectable, se determina por la siguiente ecuación:

$$L_C = 1.645 \sigma(a)$$

- El **límite de detección** (L_D) que está dado por la siguiente ecuación:

$$L_D = 2 \cdot 1.645 \sigma(a) \quad \text{ó} \quad L_D = 2 L_C$$

Entonces, de acuerdo los valores de a y $\varepsilon(a)$, los resultados (R) se expresan de la siguiente forma:

- si $a > \varepsilon(a)$

$$R = a \pm \varepsilon(a).$$

- si $0 < a < \varepsilon(a)$

$$R < L_D$$

- si $a < 0$

$$R < L_C$$

A fin de terminar la actividad de cada nucleido es necesario conocer la eficiencia del equipo detector. Para esto es necesario preparar una muestra patrón. Esta consiste en una muestra con la misma geometría y densidad que las muestras en estudio. A esta muestra patrón se le incluyen nucleidos en cantidades bien determinadas. Conociendo entonces las masas de estos nucleidos y sus vidas medias es posible conocer la actividad de los mismos. De esta manera es posible correlacionar la altura de un dado pico con la actividad del elemento correspondiente. Una vez obtenida la curva de calibración en eficiencia, la actividad A expresada en Bequerel se obtiene a partir de las actividades a expresadas en cuentas/s mediante la siguiente expresión:

$$A = a/E_{eff}$$

Capítulo VII

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 7.1 muestra la serie de espectros obtenidos de las muestras de trigo. Los mismos están caracterizados por un conjunto de líneas correspondientes al ^{40}K y a los nucleidos de las tres series naturales. No se observa la presencia de los nucleidos antropogénicos ^{137}Cs , ^{60}Co , ^7Be , ^{125}Sb . El resultado del análisis de los espectros de acuerdo a lo mencionado en el Capítulo 6 se muestra en la Tabla 7.I. Allí se reporta la actividad en unidades arbitrarias de los nucleidos ^{235}U , ^{212}Pb , ^{223}Ra , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{212}Bi , ^{228}Ac y ^{40}K . Es de destacar que la contribución más importante está originada en el ^{40}K , la cual presenta un valor similar para todas las muestras, entre 0,55 y 0,69 cuentas/s kg, las actividades de los restantes nucleidos son muy pequeñas o están por debajo del límite de detección instrumental.

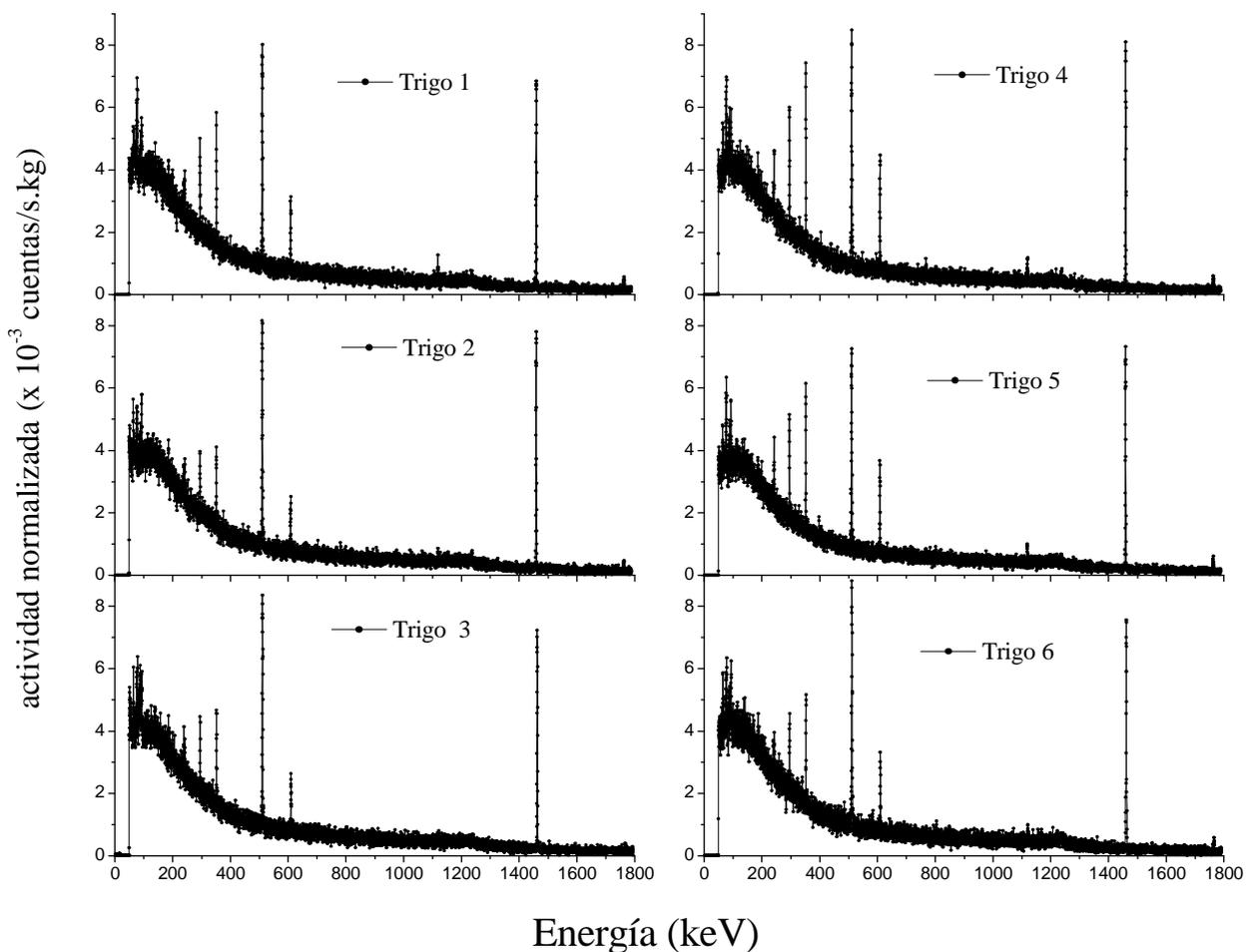


Figura 7.1: Espectros gamma de las muestras de trigo.

Tabla 7.I: Actividad (cuentas/s.kg) de los diferentes nucleidos encontrados en las muestras de trigo. También se ha indicado la energía (keV) de los picos utilizados en el análisis.

Nucleido	Energía	T1	T2	T3	T4	T5	T6
²³⁵ U	186	< 0,001	< 0,002	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
²¹² Pb	239	0,008 ± 0,002	0,0032 ± 0,002	< 0,001	< 0,003	< 0,001	0,004 ± 0,002
²²³ Ra	270	< 0,003	< 0,003	< 0,002	< 0,003	< 0,006	< 0,003
²¹⁴ Pb	351	0,04 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,09 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,05 ± 0,01
²⁰⁸ Tl	583	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0007	< 0,0006	< 0,0006	< 0,0008
²¹⁴ Bi	609	0,043 ± 0,003	0,030 ± 0,002	0,041 ± 0,003	0,058 ± 0,003	0,045 ± 0,003	0,040 ± 0,003
²¹² Bi	727	< 0,005	< 0,006	< 0,007	< 0,007	< 0,006	< 0,007
²²⁸ Ac	909	< 0,001	< 0,002	< 0,002	0,006 ± 0,002	< 0,003	< 0,004
⁴⁰ K	1460	0,58 ± 0,02	0,66 ± 0,02	0,61 ± 0,02	0,69 ± 0,02	0,62 ± 0,02	0,55 ± 0,03

Una manera simple y económica de obtener la curva de eficiencia para poder determinar las actividades en Bequerels es emplear los isótopos radiactivos naturales ¹³⁸La y ¹⁷⁶Lu [27]. Con estos elementos se puede obtener la eficiencia del detector en un rango amplio de energías (desde unos pocos keV hasta 2 MeV aproximadamente). Esta solución es un muy buen compromiso entre confiabilidad de los resultados y factores económicos, ya que, dentro del error experimental, el residuo sólido de la leche presenta características similares de autoabsorción que el trigo. Para continuar con el análisis y la discusión de los resultados y dado que no se dispone de una muestra de calibración para el trigo, se utilizó la calibración en eficiencias para muestras de leche, suponiendo que ésta es válida dentro de un 10%. La mayor contribución al error está dada por la diferente autoabsorción y densidad del trigo y la leche. En el marco de esta aproximación, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.II.

Tabla 7.II: Actividad aproximada de los diferentes nucleidos encontrados en (Bq/kg) de las muestras de trigo. También se ha indicado la energía (keV) de los picos utilizados en el análisis.

Nucleido	Energía	T1	T2	T3	T4	T5	T6
²³⁵ U	186	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,03	< 0,03
²¹² Pb	239	0,25 ± 0,06	0,11 ± 0,06	< 0,04	< 0,09	< 0,04	0,14 ± 0,07
²²³ Ra	270	< 0,1	< 0,1	< 0,08	< 0,1	< 0,22	< 0,1
²¹⁴ Pb	351	1,4 ± 0,4	0,9 ± 0,4	1,1 ± 0,4	3,0 ± 0,5	2,5 ± 0,4	1,8 ± 0,5
²⁰⁸ Tl	583	< 0,06	< 0,06	< 0,06	< 0,05	< 0,05	< 0,07
²¹⁴ Bi	609	3,8 ± 0,2	2,7 ± 0,2	3,6 ± 0,2	5,1 ± 0,3	4,0 ± 0,2	3,5 ± 0,3
²¹² Bi	727	< 0,6	< 0,6	< 0,8	< 0,8	< 0,6	< 0,8
²²⁸ Ac	909	< 0,2	< 0,2	< 0,3	0,8 ± 0,3	< 0,5	< 0,6
⁴⁰ K	1460	138 ± 5	159 ± 6	146 ± 6	165 ± 6	149 ± 5	132 ± 6

Las actividades de ⁴⁰K aquí determinadas son comparables con los datos reportados para muestras de trigo originarias de Francia (146 Bq/kg) y Kazakhstan (99Bq/kg)[28]. A

partir de los resultados presentes, se estimó el contenido de K total en un kilogramo de granos de trigo, utilizando la definición de actividad del Capítulo II y la abundancia isotópica del ^{40}K . El cálculo indica que un kilogramo de estos granos de trigo contienen entre 4,09 y 5,12 g de potasio. De acuerdo a estudios realizados de absorción de K en trigo, aún cuando existen diferencias significativas debido al contenido de K en los suelos y a la adición de fertilizantes tales como cloruros, sulfatos y óxidos de potasio, muestran pocas variaciones en la concentración de éste en granos. De acuerdo a datos encontrados, éste valor oscila entre el 0,4 y el 3,2 % en masa, esto implica entre 4 y 32 g de potasio por kilogramo de granos de trigo [29, 30] los presentes datos son comparables con las concentraciones mencionadas anteriormente (dentro de las aproximaciones realizadas).

Otra información importante que se puede obtener a partir de los resultados es la dosis efectiva equivalente (E) debida a la ingesta de ^{40}K en los derivados del trigo [17]. Para esto se utilizaron los coeficientes de dosis publicados por la UNSCEAR ($42 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$, $13 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ y $6.2 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ para bebés, niños y adultos, respectivamente), el consumo anual de harina de trigo de la población argentina (86 kg/habitante) [22] y la pirámide poblacional de la República Argentina [20]; se tuvo en cuenta además que el rendimiento de producción de harina es del 82%. Dado que los datos poblacionales del censo del año 2001 [20] están separados por edad en tres rangos (0-15, 15-65 y mayores de 65 años) se realizó una ponderación de los coeficientes de dosis para bebés y niños la cual resulta $27,5 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$ para la franja entre 0-15 años. Para estimar la dosis efectiva equivalente media, se realizó un promedio pesado teniendo en cuenta el número de individuos por franja de edad, siendo el coeficiente igual a $12 \times 10^{-9} \text{ Sv/Bq}$. Entonces la dosis efectiva equivalente anual debida a la ingesta de harinas de trigo es 0,152 mSv.

Dado que el ^{40}K es radiotóxico, resulta además importante estimar el riesgo de la población de contraer cáncer. Para hacer esto, una relación lineal sin umbral (Capítulo III) es considerada por la ICRP [31]. Para las dosis estimadas, el riesgo de cáncer fatal es igual a $0,05 \text{ Sv}^{-1}$ de acuerdo a la IAEA [18]. Usando la dosis anual y como tiempo de exposición la esperanza de vida en Argentina es 74.9 años [32], el riesgo resulta 0,0006, indicando que la probabilidad del riesgo total de contraer cáncer por exposición a radiación ionizante, significa sólo un 0.000006 %. Dicho de otra manera, este valor representa una fracción despreciable del riesgo total originado por todas las fuentes naturales de exposición (externas e internas) basadas en un promedio global anual. Además, resultan notablemente menores que el riesgo anual de cáncer calculado por la ICRP de 0,003, basado en el límite de dosis equivalente efectiva sugerido por la ICRP (Capítulo III) de 1

mSv para el público [31]. Teniendo en cuenta los factores de absorción metabólica, las actividades medidas, los coeficientes de conversión de dosis de exposición a dosis equivalente, el riesgo originado por los nucleidos de las cadenas naturales es despreciable.

CONCLUSIONES

Según los datos disponibles en el marco de este trabajo, éste constituye el primer reporte de nucleidos presentes en alimentos de origen vegetal, provenientes de la provincia de La Pampa.

Ninguno de los nucleidos detectados en las muestras es de origen antropogénico. Esto constituye una línea de base adecuada para la eventual evaluación de contaminación.

Las estimaciones de la dosis efectiva equivalente y el riesgo al que puede estar expuesta la población debido a la presencia de nucleidos emisores gamma en la ingesta de harinas de trigo no constituyen una fracción significativa del riesgo total de contraer cáncer debido a las radiaciones ionizantes.

BIBLIOGRAFIA

1. P. A. Tipler, "Física Moderna", Ed. Reverte.
2. Exposure from natural sources, www.unscear.gov.
3. Informes anuales de actividades, www.arn.gov.ar.
4. Publicaciones de Grupo de radiobiología de la Comisión Nacional de Energía atómica, www.cnea.gov.ar.
5. D. E. Di Gregorio y H. Huck, *Revista Ciencia Hoy*. Volumen 14 N° 79 (2004) 60.
6. D. E. Di Gregorio, H. Huck, R. Aristegui, G. De Lazzari and J. Jech, *J. Env. Radioactivity* 76 (2004) 273.
7. J. Desimoni, A. G. Bibiloni y S. Sinkec, Reunión Nacional de Física, Córdoba 2002.
8. M. F. Torres, P. Bidegain, L. Bartel, F. Sives, G. Mastrantonio, J. Desimoni, XXIV Jornadas interdisciplinarias de Toxicología, Buenos Aires, 2004.
9. J. Desimoni, M. A. Taylor, G. Mastrantonio, L. Bartel, M. F. Torres, First South American TIAFT Regional Meeting, La Plata, October 2005.
10. M. Bomben y M. A. Palacios, IV Congreso Regional de Seguridad Radiológica y Nuclear, La Habana- Cuba, 1998.
11. Informe pericial N°6, causa Judicial N° 5452, radicada en el Juzgado N° 1 de Lomas de Zamora.
12. Informe Environmental Protection Agency, causa Judicial N° 5452, radicada en el Juzgado N°1 de Lomas de Zamora
13. Informe Greenpeace, causa Judicial N° 5452, radicada en el Juzgado N° 1 de Lomas de Zamora.
14. Informe IAEA, causa Judicial N° 5452, radicada en el Juzgado N° 1 de Lomas de Zamora.
15. A. Beiser, "Conceptos de Física Moderna", Ed. McGraw-Hill.
16. J. Fernández Niello, "Radioactividad en el medio ambiente", Eudeba 2005.
17. Dose assessments methodologies, www.unscear.gov
18. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of the Atomic Radiation to General Assembly, 2000, www.iaea.org.
19. Technical Reports Series 295, Measurement of radionuclides in food and environment, International Atomic Energy Agency, Viena, 1989.
20. www.indec.mecom.ar
21. Secretaría de riesgos de Trabajo, www.srt.gov.ar.
22. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Subsecretaría de Política Agropecuaria y Alimentos Dirección Nacional de Alimentos. Subsecretaría de Política Agropecuaria y alimentos. Dirección Nacional de Alimentos.
23. W. R. Leo, "Techniques for nuclear and particle physics experiments", Springer-Verlag, Berlin, 1993.
24. W. J. Price, "Nuclear Radiation Detection". McGraw-Hill, New York, 1964.
25. W. F. Mann y S. B. Garfinkel. "Radioactivity and its Measurements" Van Nostrand, Princeton, N. Y., 1966.
26. A. Travesí, medidas de Espectroscopía Gamma, Instituto de estudios de la energía, Valencia, España.
27. M. C. Perillo Isaac, D. Hurley, R. J. McDonald, E. B. Norman, A. R. Smith, *Nuc. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* **397** (1997) 310.
28. T. Hosseini, A. A. Fathivand, H. Barati and M. Karini, *Iran. J. Res.* 4 (2006) 149
29. P. H. Raven, R. F. Evert y H. Curtis, *Biology of plants*, Worth publishers, New Cork, 1976.

30. R. A. Leigh, 21st Colloquium of IPI, Bern, Switzerland
31. Recommendations of International Commission of Radiological Protection, International Commission on radiological Protection (ICRP), Pergamon Press, Oxford, UK, ICRP publication 60, 1991. www.icrp.org.
32. Organización Mundial de la Salud, www.who.int.