



**Universidad Nacional Autónoma de
México**

Facultad de Química

**“Estudio de contaminantes radiológicos en productos cárnicos y
quesos seleccionados, mediante espectrometría gamma”**

TESIS

Que presenta:

Isabel del Carmen Villarreal Noguera

Que para obtener el título de:

Química de Alimentos

Director de tesis:

Dr. Guillermo Cirano Espinosa García

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

Agradezco al proyecto PAPIIT IN-103316 intitulado: "Determinación de contenidos radiactivos en agua, aire, suelos y alimentos (parte IV)".

Índice

Introducción	1
Objetivos	2
Capítulo 1. Panorama actual	4
1.1. Oferta y demanda de productos pecuarios en México	4
1.1.1. Consumo de productos del sector pecuario en México	4
1.1.2. Comercio exterior de productos pecuarios	7
1.1.2.1. Carne de ganado bovino	7
1.1.2.2. Carne de ganado porcino	9
1.1.2.3. Carne y despojos comestibles de gallo o gallina	10
1.1.2.4. Quesos	12
1.2. Tecnología nuclear	14
1.3. Generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear	15
1.3.1. Generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear en el mundo	17
1.3.2. Generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear en México	18
1.4. Protección Radiológica	19
1.5. Escala INES	20
1.6. Laboratorios	21
1.7. Normatividad	22
1.7.1. Internacional	22
1.7.2. Nacional	23
Capítulo 2.- Aspectos fundamentales	25
2.1. Radioisótopos naturales y artificiales	25
2.1.1. Naturales	25
2.1.1.1. Radioisótopos de origen terrestre	25
2.1.1.2. Radioisótopos de origen cósmico	26
2.1.2. Artificiales	27
2.2. Cadenas de decaimiento	28
2.3. Contaminantes radiológicos en los alimentos	33
2.3.1. Contaminantes radiológicos de interés para el presente estudio	34

2.3.1.1. Yodo-131	35
2.3.1.2. Cesio-134 y Cesio-137	36
2.4. Efectos en la salud.....	37
2.5. Física atómica y nuclear	37
2.5.1. Estructura atómica	37
2.5.2. Isótopos	38
2.5.2.1. Isótopos radiactivos	38
2.5.3. Decaimiento o desintegración radiactiva	38
2.5.4. Clasificación de la radiación	39
2.5.4.1. Radiación corpuscular.....	40
2.5.4.1.1. Radiación alfa.....	40
2.5.4.1.2. Radiación beta.....	40
2.5.4.1.2.1. Radiación beta negativa (β^-)	40
2.5.4.1.2.2. Radiación beta positiva (β^+)	41
2.5.4.2. Radiación electromagnética	41
2.5.4.2.1. Radiación gamma	42
2.5.5. Detectores de radiación	42
2.5.5.1. Resolución de energía	44
2.5.5.2. Eficiencia del detector	44
2.5.6. Espectrometría o espectroscopia de rayos gamma	45
2.5.6.1. Interacción de los fotones con la materia.....	45
2.5.6.1.1. Dispersión Compton	46
2.5.6.1.2. Efecto fotoeléctrico.....	48
2.5.6.1.3. Producción de pares.....	49
2.5.6.2. Detectores de Centelleo	49
2.5.6.3. Detectores de Germanio Hiperpuro	50
2.5.7. Funcionamiento de los Detectores de Germanio Hiperpuro	50
2.5.7.1. Semiconductores	51
2.5.7.2. Impurezas	53
2.5.7.3. Unión P-N	54
2.5.7.4. Geometría de detección	56
Capítulo 3.- Instrumentación	57

3.1. Sistema de detección	57
3.1.1. Detector de Germanio Hiperpuro	57
3.2. Sistema electrónico	59
3.2.1. Fuente de poder de alto voltaje.....	59
3.2.2. Preamplificador (PAm)	59
3.2.3. Amplificador (Am).....	59
3.2.4. Analizador Multicanal (AMC)	60
3.3. Equipo de Cómputo	60
3.4. Recipiente Marinelli	60
Capítulo 4.- Metodología.....	61
4.1. Criterio de selección de muestras	61
4.1.1. Productos cárnicos	61
4.1.2. Quesos	62
4.2. Selección de muestras	62
4.3. Obtención de espectros de calibración.....	62
4.4. Obtención de espectros de fondo finales	63
4.5. Adquisición de muestras	64
4.5.1. Muestras de carne fresca.....	64
4.5.2. Muestras de queso.....	64
4.6. Tratamiento de muestras	66
4.7. Análisis de los espectros	66
4.8. Cálculo de resultados.....	69
4.9. Cálculo de actividad específica de un radioisótopo	70
5. Resultados	72
5.1. Espectros de fondo	72
5.2. Espectros obtenidos de las muestras analizadas	73
6. Análisis de resultados	84
6.1. Espectro de fondo final.....	84
6.2. Espectros de muestras de alimentos.....	84
6.3. Actividad específica de contaminantes radiológicos.....	85
7. Conclusiones.....	87
8. Alcance del proyecto.....	88

9. Bibliografía.....	89
ANEXOS	93
A) Protocolo de análisis	93
B) Estadísticas de comercio exterior de productos cárnicos y quesos	98

Índice de figuras

Capítulo 1. Panorama actual

Figura i. Reactores nucleares alrededor del mundo.....	18
Figura ii. Escala INES.	21

Capítulo 2. Aspectos fundamentales

Figura iii. Rendimiento de los productos de fisión nuclear.....	30
Figura iv. Cadenas radiactivas de radioisótopos de origen terrestre.	31
Figura v. Cadenas radiactivas de radioisótopos de origen terrestre.	32
Figura vi. Ciclo de la contaminación de alimentos con radioisótopos.	33
Figura vii. Espectro electromagnético.	42
Figura viii. Principales interacciones de los fotones con la materia al modificar E_γ y Z	46
Figura ix. Dispersión o efecto Compton.....	47
Figura x. Efecto fotoeléctrico.	48
Figura xi. Producción de pares.	49
Figura xii. Estados de energía (a), estados de energía de un sólido (b).	51
Figura xiii. Bandas de valencia y conducción para cada tipo de sólido.	52
Figura xiv. Átomo de Germanio con 4 electrones de valencia.....	53
Figura xv. Red cristalina del cristal del germanio; pura (a), con impurezas donadoras (b) y con impurezas aceptoras (c).	54
Figura xvi. Formación de V0 por: osmosis (a) y polarización inversa (b).....	55
Figura xvii. Detección de radiación gamma en unión P-N.....	56
Figura xviii. Geometrías utilizadas en los dGH: coaxial (a) y tipo pozo (b).....	56

Capítulo 3. Instrumentación

Figura xix. Diagrama del sistema experimental.	57
Figura xx. Detector utilizado de Germanio Hiperpuro.....	57
Figura xxi. Geometría coaxial del detector (a); criostato unido al dGH (b).....	58
Figura xxii. Blindaje de plomo.	58
Figura xxiii. Sistema electrónico: Fuente de poder de alto voltaje (a), amplificador (b) y analizador multicanal (c).	59
Figura xxiv. Acoplamiento del recipiente Marinelli con el dGH (a); recipiente Marinelli utilizado (b).	60

Capítulo 4. Metodología

Figura xxv. Esquema de bloques de la estrategia experimental.	61
Figura xxvi. Espectro de calibración.	63
Figura xxvii. Espectro obtenido mediante el dGH.	67
Figura xxviii. Acercamiento al fotopico perteneciente al radioisótopo K40.....	67
Figura xxix. Fotopico de K40 marcado e información obtenida.....	68
Figura xxx. Partes de un fotopico.....	68

Resultados

Figura xxxi. Espectro de fondo final.	72
Figura xxxii. Espectro obtenido de la muestra BOV.I.	73
Figura xxxiii. Espectro obtenido de la muestra BOV.II.	74
Figura xxxiv. Espectro obtenido de la muestra POL.I.	75
Figura xxxv. Espectro obtenido de la muestra POL.II.	76
Figura xxxvi. Espectro obtenido de la muestra POR.I.	77
Figura xxxvii. Espectro obtenido de la muestra PAN.I.	78
Figura xxxviii. Espectro obtenido de la muestra PAN.II.	79
Figura xxxix. Espectro obtenido de la muestra MAN.I.	80
Figura xl. Espectro obtenido de la muestra MAN.II.	81

Índice de abreviaturas

* Siglas en inglés

A	- Ausente
ALMERA (*)	- Laboratorios Analíticos para la Medición de la Radiactividad Medioambiental
Am	- Amplificador
AMC	- Analizador Multicanal
ANFF	- Área Neta Fondo Final
ANM	- Área Neta Muestra
ANR	- Área Neta Resultante
CAC (*)	- Comisión del Codex Alimentarius
CCFAC (*)	- Comité del Codex sobre Aditivos Alimentarios y Contaminantes de los Alimentos
CNLV	- Central Nucleoeléctrica Laguna Verde
CNSNS	- Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias
DDI	- Dentro de la Incertidumbre
dGH	- Detector de Germanio Hiperpuro
DOF	- Diario Oficial de la Federación
EB	- Escenario Base 2009-2018
FAO (*)	- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
IAEA (*)	- Organismo Internacional de Energía Atómica
ICRP (*)	- Comisión Internacional de Protección Radiológica
INEGI	- Instituto Nacional de Estadística y Geografía
INES (*)	- Escala Internacional de Accidentes Nucleares
ININ	- Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
P	- Presente
PAm	- Preamplificador
SAGARPA	- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SSP	- Secretaría de Seguridad Pública
SENER	- Secretaría de Energía
TIF	- Tipo Inspección Federal
U _{resultante}	- Incertidumbre resultante
U _{muestra}	- Incertidumbre asociada a la medición del muestra
U _{fondo}	- Incertidumbre asociada a la medición del fondo

Introducción

Existen tres tipos de agentes que pueden causar contaminación en alimentos: físicos, químicos y biológicos. La contaminación radiológica se ubica dentro de los agentes físicos, ya que estos comprenden a los objetos o partículas extrañas que normalmente no existen en los alimentos y pueden resultar peligrosos o provocar enfermedades a los consumidores.

En la actualidad, muchas actividades que sustentan el desarrollo de la sociedad moderna aprovechan las características de la radiación ionizante proveniente de los isótopos radiactivos, naturales o artificiales. Entre algunos de los campos en los que se ocupa están:

- La medicina: donde se utiliza en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades.
- La industria: donde se aplica para esterilizar materiales y alimentos o como marcador industrial en distintos procesos. En la industria generadora de energía eléctrica se aprovecha la energía generada por la reacción de fisión nuclear.
- La investigación: donde se aprovechan sus propiedades para conocer procesos complejos, ya sea metabólicos, biológicos o mecanismos de reacción.

Desafortunadamente, a la par del desarrollo de actividades benéficas para la sociedad, el uso de la radiación conlleva un riesgo. La exposición a niveles de radiación ionizante por encima de los recomendados en las normas, puede ocasionar daños a la salud, por lo que, es de suma importancia el establecimiento de medidas de seguridad que garanticen un nivel adecuado de protección al ser humano. Es por ello que organismos nacionales e internacionales unen esfuerzos para generar normas que constituyen a la disciplina denominada Protección Radiológica.

La introducción de material radiactivo a la cadena alimenticia humana puede exponer a los consumidores a niveles de radiación por encima de los recomendados, por lo que es necesario tener un control de estos contaminantes radiológicos presentes en ellos. Por otro lado, el comercio exterior de México en productos pecuarios ha crecido de manera importante, esto representa oportunidades de crecimiento, así como una fuente de ingresos para el país. Es por ello que es de suma importancia contar con una metodología eficiente y sencilla que permita la detección de estos contaminantes para controlar sus niveles en los alimentos que participan en el comercio exterior, así como los destinados a los consumidores nacionales.

Objetivos

Generales:

- La detección de radioisótopos presentes en matrices alimentarias, específicamente en productos cárnicos y quesos, mediante el análisis por espectrometría gamma y su posterior clasificación como radioisótopos naturales o contaminantes radiológicos.

Específicos:

- Lograr la generación de un protocolo que constituya una buena base para aplicar este análisis de manera óptima y sencilla en la detección de contaminantes radiológicos en alimentos que participen en los procesos de importación y exportación y que puedan ser utilizados en investigación sobre este mismo tema. Lo anterior de acuerdo con el programa de asociación entre la FAO/IAEA para considerar a los alimentos, en cuestión de radionúclidos, como seguros.

El presente trabajo tiene la siguiente estructura:

Capítulo 1: Panorama actual

Comprende la situación actual del sector pecuario en México y su participación en el comercio exterior, aplicaciones de la tecnología nuclear e introducción a la protección radiológica.

Capítulo 2: Aspectos Fundamentales

Se habla de los radioisótopos que existen y de su origen, los contaminantes radiológicos en alimentos y su introducción en la cadena alimentaria humana. Se incluye también la revisión de los aspectos fundamentales de física atómica y nuclear, los tipos de radiación que existen y los sistemas para su detección.

Capítulo 3: Instrumentación

Se describe la instrumentación empleada en el estudio.

Capítulo 4: Metodología

Se describe la estrategia experimental, el procedimiento de selección, adquisición y tratamiento de muestras; el procedimiento de análisis de espectros y los patrones certificados utilizados como referencia.

Resultados

Se presenta el espectro de fondo obtenido y la tabla de resultados para las muestras de alimentos analizadas.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Alcance del proyecto

Bibliografía

ANEXOS

Aquí se incluyen los protocolos de análisis elaborados para permitir la reproducibilidad del estudio realizado y las estadísticas de comercio exterior analizadas.

Capítulo 1. Panorama actual

1.1. Oferta y demanda de productos pecuarios en México

De acuerdo al documento “Escenario Base (EB) 2009-2018”^[20], de ahora en adelante “EB”, realizado por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), dicho documento está basado en un modelo que arroja las proyecciones a largo plazo del sector agropecuario de México; se estima que este subsector anualmente crece por encima del 1%.

El ganado bovino representa actualmente la cadena de producción pecuaria más grande de México y se espera que continúe de esta forma. Destaca que su cadena es compleja debido a que su ciclo de producción se extiende por más de un año e interactúa con el mercado nacional e internacional de carne, leche y granos.

Se estima que una cuarta parte de los becerros en el país tienen altas probabilidades de ser exportados a EE.UU.; el resto son engordados en tierras de pastoreo y en corrales de engorda nacionales, lo que refleja una amplia continuación en la preferencia y demanda sostenida por las carnes rojas en el mercado.

A diferencia del ganado bovino, los ciclos de producción para la carne de cerdo y de pollo son más pequeños (menores a un año), siendo el de aves el de menor duración. Además interactúan de manera distinta con otros sectores. Dichos ciclos determinan la susceptibilidad de cada tipo de carne frente a los cambios económicos. En general, la producción de carne de cerdo presenta mayores fluctuaciones que la de ave, esta última presenta mayor estabilidad ya que muestra mayor capacidad de adaptarse a los cambios. También se espera que el consumo de carne de pollo seguirá reflejando una tendencia positiva debido a una mayor preferencia de los consumidores mexicanos por esta fuente de proteína, en relación con la carne de cerdo y la de bovino.^[19]

Para la industria lechera se aprecia que, en promedio, la producción lechera crece a tasas más elevadas que el consumo.

1.1.1. Consumo de productos del sector pecuario en México

México es un consumidor importante de productos pecuarios. Entre los tipos de ganado que se consumen por su carne se encuentran: el ganado bovino, porcino, caprino, ovino y la carne de aves; este último comprende al guajolote y a al gallo o gallina. Según estadísticas obtenidas de SAGARPA, el consumo de productos cárnicos en general ha ido en aumento desde 1990 (referencia estadísticas de 1990-2005). De estos, la carne del gallo o gallina, o pollo como comúnmente se le conoce, es el producto cárnico más consumido en el país seguido de la carne de ganado bovino y la de porcino; estos 3 tipos de carne son los que en su mayoría se consumen por la población mexicana. Cabe recalcar que el Consumo

Nacional Aparente es una forma de medir la cantidad de producto para consumo humano directo o indirecto de la cual dispone un país. En esta estimación se considera la producción nacional, las importaciones de ganado para abasto (convertidas a carne en canal) y las de carnes en canal y cortes, así como las exportaciones de ganado para abasto y/o engorda (convertidas a carne en canal) y carne en canal y cortes. Este índice resulta de sumar las importaciones y la producción nacional, y restarle las exportaciones. De igual forma sucede con los derivados lácteos, donde se considera la leche destinada para dicha industria, la producción nacional y la exportación e importación del producto.

La tabla I.I. muestra los datos de consumo nacional aparente más recientes de los principales productos pecuarios en México.

Tabla I.I. Consumo nacional aparente de los principales productos pecuarios.
(Toneladas) *(miles de litros)

Producto	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Bovinos	1 913 603	1 949 834	1 980 663	1 947 809	1 947 965	1 948 431
Porcinos	1 677 826	1 709 804	1 786 342	1 924 755	1 909 283	1 845 132
Caprinos	42 738	42 866	ND	ND	ND	ND
Ovinos	80 260	82 649	ND	ND	ND	ND
**Aves	2 858 828	2 901 036	2 993 406	3 076 716	3 182 761	3 263 715
*Leche de bovino	11 571 171	12 004 817	12 210 044	12 258 333	12 063 666	12 683 358

ND: No disponible

**No incluye al guajolote.

Fuente: "El sector alimentario en México 2012" [21]

Se observa en la tabla I.I. que el consumo aparente de carne de bovinos en el periodo de 2006 a 2011 mostró cierta estabilidad, mientras que para la de porcinos y aves se registró un aumento gradual. Las tasas de crecimiento promedio del consumo de pollo, cerdo y res para esta serie son de 2.3, 2.1 y 1.2%, respectivamente. Para la carne proveniente del ganado caprino y ovino no se encuentran disponibles estadísticas debido a que su consumo es significativamente menor en comparación con los otros tipos de carne.

Según el documento "EB", el consumo total de carne se mantiene estable en alrededor de 58 kilos/habitante desde 2007 y se mantendrá estable hasta 2018. Se espera que el consumo per cápita de carne de pollo aumente de 2009 a 2018, al pasar de 27.1 kg a 28.7 kg, respectivamente.

En el caso de la leche de ganado bovino, se puede observarse en la misma tabla que en el periodo de 2006 a 2011 se observó un incremento en el consumo con una tasa de incremento de 3%. Actualmente, un poco más del 40% del consumo total es en forma de leche fluida, mientras que el resto se utiliza en productos manufacturados. Sin embargo, la demanda por este producto mantiene una tendencia a la alza de manera progresiva. No se

cuentan con cifras específicas para el consumo del queso en el país, sin embargo, según las estimaciones del documento EB, el consumo de este se incrementará a lo largo del periodo estudiado (2009-2018), al pasar de 253 mil toneladas en 2009 a 273 mil toneladas en 2018.

Por otro lado, sí se cuenta con cifras acerca del volumen producido de cada tipo de queso, en el periodo de 2007 a 2012, lo que puede estar relacionado con el consumo de estos. Dichos datos se presentan en la tabla I.II., donde se puede observar el promedio de la producción de cada tipo de queso en el periodo de 2007 a 2012. Donde, el promedio de la producción indica que el queso que se produce mayormente es el “fresco”, seguido del “amarillo” y el “panela”, mientras que la categoría para “otros” quesos presenta las cifras más bajas seguidas del queso tipo “crema”.

**Tabla I.II. Producción de diferentes tipos de queso a nivel nacional.
(Toneladas)**

Tipo	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Promedio
Panela	25,372	27,010	34,745	40,851	41,740	39,359	34,846
Oaxaca	24,687	26,473	28,634	23,142	24,788	19,786	24,585
Manchego	21,907	25,164	26,728	21,678	22,641	26,078	24,032
Fresco	42,138	40,831	52,120	46,820	41,292	41,146	44,058
Doble crema	21,663	22,217	23,244	24,015	34,853	39,621	27,602
Crema	16,784	15,856	17,276	20,352	19,581	17,384	17,872
Chihuahua	25,294	27,776	29,143	29,148	33,070	31,568	29,333
Amarillo	41,253	41,540	44,209	45,598	45,656	41,556	43,302
Otros	10,534	13,072	12,472	14,719	11,790	7,568	12,192
Total	229,632	239,939	268,571	266,323	275,411	264,066	

Fuente: INEGI. Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera [16]

Según la norma NOM-121-SSA1-1994, el término queso fresco se le da al producto que se caracteriza por contener alto contenido de humedad, sabor suave y no tener corteza, pudiendo o no adicionarle ingredientes opcionales y tener un periodo de vida de anaquel corto, requiriendo condiciones de refrigeración. Mientras que, los quesos madurados, se caracterizan por ser de pasta dura, semidura o blanda, con o sin corteza; sometidos a un proceso de maduración mediante la adición de microorganismos, bajo condiciones controladas de tiempo, temperatura y humedad, para provocar en ellos cambios bioquímicos y físicos característicos del producto de que se trate, lo que le permite prolongar su vida de anaquel, los cuales pueden o no requerir condiciones de refrigeración.

Por lo anterior, tipos de queso como el panela o el rancharo cumplen con las características de ser fresco, aunque en la tabla I.II. se clasifiquen de manera separada. Por otro lado, entre los tipos de queso que figuran en dicha tabla, el “Manchego” es el único dentro de los clasificados como madurados.

1.1.2. Comercio exterior de productos pecuarios

En México para la comercialización de carne de las especies bovina, equina, ovina, caprina, porcina y aves, la SAGARPA extiende una certificación Tipo Inspección Federal (TIF) a los establecimientos que cumplen con todas las normas y exigencias del Gobierno Mexicano en cuanto al tratamiento y manejo de la sanidad e inocuidad de la carne.^[30]

Existen aproximadamente 913 rastros municipales registrados, 141 privados y 97 rastros tipo TIF, dicha certificación abre la posibilidad al comercio internacional, ya que los establecimientos TIF cuentan con protocolos que minimizan el riesgo de que los productos y subproductos cárnicos puedan representar una fuente de zoonosis o diseminar enfermedades a otros animales, disminuyendo la afectación a la salud pública, la salud animal, la economía y el abasto nacional; para lograr lo anterior se apegan a normas oficiales nacionales e internacionales de sanidad e higiene; es por ello que son los únicos establecimientos elegibles para participar en la exportación.. Entre las normas nacionales a las cuales se deben apegar están la norma NOM-008-ZOO-1994 (Especificaciones zoosanitarias para la construcción y equipamiento de establecimientos para el sacrificio de animales y los dedicados a la industrialización de productos cárnicos), la NOM-009-ZOO-1994 (Proceso sanitario de la carne) y la NOM-033-SAG/ZOO-2014 (Métodos para dar muerte a los animales domésticos y silvestres), las cuales marcan la pauta para construir y equipar los establecimientos y procesar la carne así como asegurar el manejo humanitario en el sacrificio de los animales.

El Reglamento de control sanitario de productos y servicios publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) tiene por objeto la regulación, control y fomento sanitario del proceso, importación y exportación. Y dicta las características y condiciones sanitarias de los productos y sustancias que se mencionan en el reglamento. El título cuarto de dicho reglamento trata sobre la leche, subproductos y derivados; el cual incluye a los quesos, mientras que el título sexto trata sobre carne y sus subproductos

En las siguientes secciones se presenta la información para las importaciones y exportaciones de cada producto y en el anexo de este documento se pueden consultar las tablas complementarias analizadas.

1.1.2.1. Carne de ganado bovino

Según la norma NMX-FF-078-SCFI-2002 (Carne de Bovino en Canal. Clasificación.)^[33] se entiende por carne de canal de bovino al cuerpo del animal sacrificado, desangrado y sin piel, abierto a lo largo de la línea media del pecho y abdomen a la cola; separado de la cabeza al nivel de la articulación occipitoatloidea; de las extremidades anteriores al nivel de la articulación carpometacarpiana y de las posteriores al nivel de la tarsometatarsiana; con o sin la presencia de cola, amputada ésta a la altura de la segunda vértebra caudal. Sin

vísceras cavitarias (excepto los riñones), quedando el diafragma adherido, sin genitales ni ubre.

En las tablas I.III y I.IV. se presentan las importaciones y exportaciones de carne de la especie bovina, respectivamente, desde el año 2006 a 2012. Las cifras mostradas para 2012 son para el periodo de enero a noviembre y constantemente se actualizan. Como se observa en dichas tablas, el comercio exterior de este tipo de carne se divide en dos categorías: fresca o refrigerada y congelada.

El principal país del que se importa carne de bovino, tanto fresca o refrigerada como congelada, es Estados Unidos de América, con el 84.98% del volumen de las importaciones totales para 2012*, es decir, 118,777 toneladas de carne de bovino fueron importadas únicamente de Estados Unidos de América. De esa cantidad, para la fresca o refrigerada y para congelada tiene el 85.42% y 73.0%, respectivamente. Por otro lado, en cuanto a la carne fresca o refrigerada, Canadá es el segundo país más importante con el 14.26% de las importaciones de esta división. Otros países que participan en menor proporción en la serie del 2006 al 2012 son: Nicaragua, Australia, Chile, Uruguay, Honduras, entre otros.

Para el caso de la carne congelada, destacan en 2012*, Nueva Zelanda, Australia y Canadá con el 11.46%, 9.46% y 5.27%, respectivamente. Y con menor participación a lo largo de la serie de 2006 a 2012 se encuentran: Nicaragua, Uruguay, Chile, Costa Rica, Panamá, entre otros.

**Tabla I.III. Importaciones mexicanas de carne de la especie bovina.
volumen (toneladas)**

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
0201	Carne de animales de la especie bovina, fresca o refrigerada.	253,854	265,850	275,360	216,618	203,752	180,697	134,939
0202	Carne de animales de la especie bovina, congelada.	16,814	19,528	13,210	11,026	6,283	6,222	4,818
TOTAL		270,668	285,378	288,570	227,644	210,035	186,919	139,757

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4.[31]

* Información del periodo enero a noviembre

Para el caso de las exportaciones de carne fresca o refrigerada, Estados Unidos de América es el principal destino con 96.05%, es decir 75, 190 toneladas, de las exportaciones totales de esta categoría de carne de bovino. Japón, por su parte, es el segundo destino para la carne de bovino fresca o refrigerada con el 3.89% del total de las importaciones, lo que equivale a 3,047 toneladas de carne. Otros países que participan en menor proporción en esta categoría son: Corea del Sur, Hong Kong, Rusia, entre otros.

Las exportaciones mexicanas de carne de bovino congelada han aumentado en los últimos años. Rusia se ha ubicado desde 2011 como principal destino de este producto con el 50.12% en 2011 y 46.31% de las exportaciones totales de esta categoría en 2012*. Sin embargo, Japón también ha tenido una participación importante en todo el periodo de 2006 a 2012; en 2011 y 2012 tuvo el 32.22% y 33.5%, respectivamente, del total de las exportaciones de carne congelada. Estados Unidos de América, Corea del Sur, Angola y Panamá participan en menor proporción, mientras que otros países que participan de manera intermitentemente son: Kazajistán, Islas Vírgenes Británicas, Vietnam, Costa Rica, Puerto Rico, entre muchos otros.

**Tabla I.IV. Exportaciones mexicanas de carne de la especie bovina.
volumen (toneladas)**

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
0201	Carne de animales de la especie bovina, fresca o refrigerada.	14,129	15,025	13,839	21,372	38,363	56,551	78,282
0202	Carne de animales de la especie bovina, congelada.	10,717	13,194	13,945	13,600	33,721	47,912	54,209
TOTAL		24,846	28,219	27,784	34,972	72,084	104,463	132,491

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4.[31]

* Información del periodo enero a noviembre

1.1.2.2. Carne de ganado porcino

Según la norma NMX-FF-081-2003 (Carne de porcino en canal - calidad de la carne), se entiende por carne de canal de ganado porcino al tejido muscular, conjuntivo y elástico, grasa, vasos linfáticos y sanguíneos, nervios, etc., que constituyen las masas musculares que cubren el esqueleto del animal.

En las tablas I.V. y I.VI. se muestran las importaciones y exportaciones mexicanas de carne de ganado porcino, respectivamente, desde el año 2006 a 2012*. Las cifras mostradas para 2012* son para el periodo de enero a noviembre y constantemente se actualizan. Como se observa en la tabla I.V. el volumen total de carne de porcino importada en el 2012* fue de 463,033 toneladas; el país que participó mayormente con un volumen de 434,387 toneladas, lo que representó el 93.81% de las exportaciones registradas fue Estados Unidos de América. En este mismo año le siguen Canadá y la República de Chile con el 5.61% y 0.56% del volumen, respectivamente. En este periodo, 2006 a 2012, otros países participaron de manera intermitente en este tipo de comercio exterior como Dinamarca, España y Nueva Zelanda.

**Tabla I.V. Importaciones mexicanas de carne de la especie porcina.
volumen (toneladas)**

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
0203	Carne de animales de la especie porcina, fresca, refrigerada o congelada.	321,739	324,520	386,619	496,220	499,852	430,735	463,033

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4.[31]

* Información del periodo enero a noviembre

Para el caso de las exportaciones (tabla I.VI) Japón es el país al que se destina el mayor volumen de carne de ganado porcino. En el 2012* el total de volumen exportado fue de 65,144 toneladas y de este total, el 74.90% fueron destinados a Japón, seguido Corea del Sur con 12.95% y de Estados Unidos de América con el 11.98%. Estos tres países han sido los principales destinos de este tipo de carne desde que se cuenta con estadísticas arancelarias obtenidas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En menor proporción han participado a lo largo del mismo periodo otros países como La República Popular de China, Vietnam, Singapur, Hong Kong y Corea del Norte, entre otros.

**Tabla I.VI. Exportaciones mexicanas de carne de la especie porcina.
volumen (toneladas)**

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
0203	Carne de animales de la especie porcina, fresca, refrigerada o congelada.	48,285	59,962	67,774	53,100	58,483	64,464	65,144

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4.[31]

* Información del periodo enero a noviembre

1.1.2.3. Carne y despojos comestibles de gallo o gallina

Según la norma NMX-FF-080-SCFI-2006 (Productos Avícolas. Carne de Pollo de Engorda en Canal y en Piezas), se entiende por carne de pollo de engorda al ave de género y especie *Gallus gallus* sacrificado, desangrado y desplumado al cual se le ha quitado la cabeza, el pescuezo, el buche, las patas y las vísceras abdominales y torácicas, a excepción de los riñones.

En las tablas I.VII. y I.VIII.se muestran las importaciones y exportaciones mexicanas de carne de aves, respectivamente, desde el año 2006 a 2012*. Las cifras mostradas para 2012* son para el periodo de enero a noviembre y constantemente se actualizan.

Para las importaciones de este producto, en la serie de 2006 a 2012, sólo han participado dos países. Como se observa en la tabla I.VII., en 2012* las importaciones de este producto tuvieron un volumen de 551,535 toneladas, de las cuales el 97.67% del volumen fue

importado de Estados Unidos de América, mientras que el restante 2.33% de la República de Chile.

**Tabla I.VII. Importaciones mexicanas de carne de gallo o gallina.
volumen (toneladas)**

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
020711	Carnes y despojos comestibles de gallo o gallina sin trocear, frescos o refrigerados.	29,170	11,126	5,893	7,223	752	7,325	12,812
020712	Carne y despojos comestibles de gallo o gallina sin trocear, congelados.	3,644	1,802	3,807	3,328	1,245	1,589	2,085
020713	Trozos y despojos de gallo o gallina, frescos o refrigerados.	222,044	217,558	239,158	290,475	337,733	365,052	373,499
020714	Trozos y despojos de gallo o gallina, congelados.	155,496	139,695	171,013	179,508	196,001	190,347	163,139
TOTAL		410,354	370,181	419,871	480,534	535,731	564,313	551,535

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

* Información del periodo enero a noviembre

En el caso de las exportaciones se puede observar en la tabla I.VIII., que la carne y despojos comestibles frescos y refrigerados no tienen participación en este comercio exterior en ninguno de los años de la serie 2006 a 2012, mientras que los congelados, en 2012* participaron con 116 toneladas que fueron exportadas a Hong Kong y Togo, con el 56.90% y 43.10% respectivamente.

Sin embargo, en el periodo de 2008 a 2011, tienen una participación muy importante República del Congo y Angola, para el caso de carne y despojos comestibles congelados. Las exportaciones de trozos y despojos de gallo o gallina frescos o refrigerados no han sido constantes ni abundantes, sin embargo se observa la participación, a lo largo de todo el periodo, de Hong Kong y Estados Unidos de América. Finalmente, para el producto que se exportó en mayor cantidad en este periodo, los trozos y despojos comestibles de gallo o gallina congelados, participan de manera importante, en el 2012*, Hong Kong y Angola, con el 30.81% y 33.38%, respectivamente, mientras que Vietnam, Ghana, República del Congo, Japón, entre otros países, participan en menor proporción.

**Tabla I.VIII. Exportaciones mexicanas de carne de gallo o gallina.
volumen (toneladas)**

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
020711	Carnes y despojos comestibles de gallo o gallina sin trocear, frescos o refrigerados.	0	0	0	0	0	0	0
020712	Carne y despojos comestibles de gallo o gallina sin trocear, congelados.	17	0	417	2,258	2,989	420	116
020713	Trozos y despojos de gallo o gallina, frescos o refrigerados.	0	33	18	0	68	25	0
020714	Trozos y despojos de gallo o gallina, congelados.	29	310	1,238	3,388	7,569	13,023	4,156
TOTAL		46	343	1,673	5,646	10,626	13,468	4,272

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4.[31]

* Información del periodo enero a noviembre

1.1.2.4. Quesos

La industria lechera, en general, enfrenta una gran competencia internacional. Actualmente se importan grandes cantidades de leche y productos lácteos a nuestro país para satisfacer la gran demanda de estos.

Según la norma NOM-121-SSA1-1994 (Quesos: frescos, madurados y procesados)^[34] se entiende por quesos a los productos elaborados con la cuajada de leche estandarizada y pasteurizada de vaca o de otras especies animales, con o sin adición de crema, obtenida por la coagulación de la caseína con cuajo, gérmenes lácticos, enzimas apropiadas, ácidos orgánicos comestibles y con o sin tratamiento ulterior por calentamiento, drenada, prensada o no, con o sin adición de fermentos de maduración, mohos especiales, sales fundentes e ingredientes comestibles opcionales, dando lugar a las diferentes variedades de quesos pudiendo por su proceso ser: fresco, madurado o procesado.

En las tablas I.IX. y I.X. se muestran las importaciones y exportaciones mexicanas de quesos, respectivamente, desde el año 2006 a 2012*. Las cifras mostradas para 2012* son para el periodo de enero a noviembre y constantemente se actualizan.

Respecto a las importaciones (tabla I.IX.), el principal país del que este derivado lácteo se importa hacia nuestro país es Estados Unidos de América, este comportamiento se observa desde que se reportan estas estadísticas por el INEGI. Para 2012* el total de producto importado fue de 80,336,796 kg, de estos, 59,617,563 kg, es decir, el 74.12% fueron importados de Estados Unidos de América. Otros países que participan de manera importante son Dinamarca, Francia y Alemania principalmente con quesos de pasta azul, Holanda y Austria con queso fundido. En cuanto a la categoría que engloba a los demás quesos, Chile, Uruguay, Holanda y Nueva Zelanda son exportadores hacia nuestro país.

Tabla I.IX. Importaciones mexicanas de quesos
volumen (kg)

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
040610	Quesos frescos (incluido el de lactosuero) sin fermentar y requesón.	13,550,849	15,823,443	15,677,727	14,182,614	11,113,043	5,033,802	7,128,588
040620	Queso de cualquier tipo, rallado o en polvo.	5,633,865	6,544,594	6,706,428	7,266,814	13,302,199	19,960,167	19,059,043
040630	Queso fundido, excepto el rallado en polvo.	698,213	631,971	479,031	618,894	767,347	750,496	736,362
040640	Queso de pasta azul.	272,526	455,938	282,623	366,175	418,705	428,309	389,082
040690	Los demás quesos.	58,384,504	62,579,884	45,099,423	50,639,000	54,758,308	51,880,881	53,014,719
TOTAL		78,539,957	86,035,830	68,245,232	73,073,497	80,359,602	78,053,655	80,336,796

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4.[31]

* Información del periodo enero a noviembre

En la tabla I.X., se observa que las exportaciones totales para este producto en el 2012 fueron de 3,600,039 kg; el 67.6% de este total, 2,433,554 kg, se exportaron a Estados Unidos de América lo que hace a este país el principal destino de las exportaciones de los quesos mexicanos. Guatemala también participa de manera importante en las exportaciones de quesos; en 2012*, este país fue el segundo mayor importador de la fracción perteneciente a quesos frescos y a los quesos de cualquier tipo; mientras que para quesos fundidos fue el primer lugar de exportación, seguido de la República del Salvador y Estados Unidos de América. Para el caso de los quesos de pasta azul no existen datos de exportación, por lo que se puede suponer que el país no exporta quesos de este tipo. Otros países que participan en este tipo de comercio exterior son Venezuela, Chile y Belice.

Tabla I.X. Exportaciones mexicanas de quesos.
volumen (kg)

Fracción	Denominación	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012*
040610	Quesos frescos (incluido el de lactosuero) sin fermentar y requesón.	294,711	217,664	277,832	221,362	256,507	331,910	243,525
040620	Queso de cualquier tipo, rallado o en polvo.	282	5,250	29,493	89	6,103	94,715	12,060
040630	Queso fundido, excepto el rallado en polvo.	803,188	810,789	837,893	856,557	947,500	292,628	234,329
040640	Queso de pasta azul.	0	0	0	0	0	0	0
040690	Los demás quesos.	2,843,932	2,924,911	3,418,118	3,143,457	4,892,228	3,361,276	2,892,549
TOTAL		3,942,113	3,958,614	4,563,336	4,221,465	6,102,338	4,080,529	3,600,039

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

* Información del periodo enero a noviembre

1.2. Tecnología nuclear

Cuando el estudio de las ciencias nucleares, es decir, de las ciencias que estudian las reacciones que tienen lugar en los núcleos atómicos de los elementos, generan usos y aplicaciones prácticas en las actividades de la sociedad, se habla de tecnología nuclear. Los radionúclidos se aprovechan principalmente por dos razones: por sus propiedades químicas y por ser fuentes emisoras de radiación, ya sea en forma de partículas o energía. En algunos casos, ambas son aprovechadas.

Paralelo a su aplicación, en muchas ocasiones es necesario el uso de aparatos capaces de detectar estas emisiones. El uso más conocido y uno de los más importantes de la industria nuclear es la generación de energía eléctrica mediante la utilización de reactores nucleares. A continuación, en la tabla I.XI. se mencionan y explican algunas aplicaciones de la tecnología nuclear.

Tabla I.XI. Algunas aplicaciones de la tecnología nuclear.

Aplicación	Descripción
Datación radiométrica	Para la datación o fechamiento de rocas, minerales y restos fósiles se aprovecha el conocimiento sobre el decaimiento de los isótopos radiactivos. El método se basa en las proporciones de un isótopo “padre” y de sus productos de decaimiento los cuales se encuentran presentes en la muestra que se va a analizar. Los isótopos utilizados para este método dependerán de la presunta antigüedad de la muestra o restos que se quieran datar. El método de datación más conocido es el que utiliza ^{14}C (carbono-14), sin embargo, existen otros isótopos utilizados para este fin como el decaimiento del K-Ar (potasio-argón) o del U-Pb (uranio-plomo).
Medicina nuclear	La medicina nuclear es una especialidad de la medicina moderna que utiliza trazadores nucleares o radiofármacos para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades. Estas sustancias una vez administradas se localizan en órganos específicos o en receptores celulares, lo que permite crear una imagen de la distribución del radiofármaco mediante un detector de radiación apropiado. Estas imágenes, a diferencia de la mayoría de las obtenidas en radiología, son imágenes funcionales y moleculares, es decir, muestran como están funcionando los órganos y tejidos explorados o revelan alteraciones de los mismos a un nivel molecular. Muchos de los radioisótopos generados para la aplicación médica deben cumplir con la característica de tener una vida media corta de días o incluso de horas, esto para evitar la exposición prolongada de los pacientes a la radiación ionizante.
Generación de energía eléctrica	Esta se genera a partir de combustible nuclear fisionable en una planta nuclear, en donde se lleva a cabo la reacción de fisión nuclear y se aprovecha la energía nuclear liberada y transformándola, por medio de turbinas, en energía eléctrica. En dicha reacción, el combustible nuclear generalmente utilizado es ^{235}U o ^{239}Pu , además de generarse una gran cantidad de energía, los átomos de estos elementos se fragmentan en otros más ligeros conocidos como productos de fisión nuclear.

<p>Irradiación de materiales</p>	<p>La radiación gamma es ampliamente utilizada en la esterilización de todo tipo de materiales. El proceso involucra la exposición de estos últimos a cantidades controladas de radiación ionizante. El isótopo radiactivo ^{60}Co (Cobalto-60) es la principal fuente de radiación gamma utilizada para este propósito y entre los principales materiales que se someten a este proceso están:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Material médico, generalmente desechable, como guantes, ropa e instrumentos de todo tipo que resultarían dañados en la esterilización por medio de calor. - Alimentos, con el fin de prevenir la reproducción de bacterias u hongos saprófitos que causen el deterioro de estos, de esta manera se puede extender su vida de anaquel. También se usa para eliminar bacterias que puedan causar enfermedades. - En agricultura la radiación se utiliza para detener el desarrollo de la raíz en algunos granos después de ser cosechados, también para controlar la maduración de frutas y vegetales y para eliminar plagas y parásitos. - Otros materiales que se irradian para propósitos similares a los anteriores son: maderas, documentos, sangre, etc.
<p>Propulsión nuclear</p>	<p>En esta aplicación, al igual que en la generación de energía eléctrica, se utilizan reactores donde, por medio de la reacción de fisión nuclear, se genera gran cantidad de energía. Sin embargo, para la propulsión no es necesaria la conversión de energía nuclear a energía eléctrica. En mayor medida, la propulsión nuclear se ha utilizado en submarinos y buques de guerra y en menor medida para embarcaciones civiles como el caso de buques mercantiles y rompehielos.</p>
<p>Trazadores o marcadores</p>	<p>La propiedad de emitir radiación y el desarrollo de técnicas lo suficientemente sensibles para detectar pequeñas cantidades de esta energía, permite que el uso de trazadores radiactivos sea ampliamente utilizado en la industria y en la investigación científica.</p> <p>En investigación se utilizan para conocer caminos complejos que tienen lugar en el metabolismo o en un mecanismo de reacción, generalmente esto se logra marcando las moléculas que participan en estos procesos con un isótopo radiactivo para posteriormente rastrear el camino que recorre. Por otro lado, en la industria, se utilizan compuestos químicos donde uno o más átomos han sido reemplazados por radioisótopos pero que conservan propiedades similares a las del material que participa normalmente en el proceso en estudio, así se rastrea el camino que recorre el material radiactivo y es posible encontrar fisuras en tuberías o estudiar la dispersión de fluidos y partículas.</p> <p>En todas estas investigaciones que utilizan rastreadores radiactivos, se utilizan radioisótopos con vidas medias lo suficiente largas para la realización del estudio, esto con el fin de evitar la contaminación del equipo de investigación con residuos radiactivos.</p>

1.3. Generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear

Las Centrales Nucleoeléctricas o Plantas Nucleares que participan en la generación de energía eléctrica, son instalaciones industriales donde se logra la transformación, mediante varios procesos, de la energía contenida en los núcleos de los átomos a energía eléctrica utilizable. Es similar a una central termoeléctrica convencional, la diferencia estriba en la forma de obtener el calor para la producción de vapor. Mientras que en una termoeléctrica

el calor se obtiene quemando combustibles fósiles o extrayendo vapor natural del subsuelo, en una nucleoelectrica el calor se obtiene a partir de la reacción de fisión nuclear en un reactor.

La reacción de fisión se produce a partir de los núcleos atómicos de un radioisótopo como el ^{235}U o el ^{239}Pu , estos se someten a un bombardeo con neutrones. El elemento uranio, U, cuyo número atómico es 92, tiene fundamentalmente dos radioisótopos ^{235}U y ^{238}U . El uranio puede ser manipulado, es posible bombardear el núcleo de un átomo con neutrones, lo cual altera su estructura y puede dividirlo en dos núcleos más pequeños. La división del núcleo emite radiación, genera energía térmica y libera dos o tres neutrones, es el proceso llamado fisión. Los neutrones producidos por la fisión, impactan otros núcleos del mismo isótopo generando una reacción en cadena, lo cual libera grandes cantidades de energía. El control de la reacción en cadena se realiza utilizando otros elementos como B y Cd para capturar los neutrones libres.

Para obtener el U a utilizar en las centrales nucleares se realizan algunas actividades conocidas como "ciclo de combustible", mismo que inicia con la explotación del mineral y termina con la gestión de desechos radiactivos. En la primera etapa, el U se extrae y en plantas especializadas se convierte en un concentrado de uranio llamado "pastel amarillo". El concentrado de U pasa a una planta de conversión y enriquecimiento, ahí se transforma en UF_6 (hexafluoruro de uranio), un gas que posteriormente es enviado a la planta de enriquecimiento para aumentar la proporción de 0.7% a 33% al separar el U^{235} del U^{238} .

La fabricación del combustible, consiste en la conversión del UF_6 en UO_2 (dióxido de uranio) en polvo que es prensado en forma de pastillas. Estas pastillas son encapsuladas en varillas de zircaloy, las cuales son ensambladas y transportadas a la central nuclear donde serán cargadas al núcleo del reactor. El poder energético de una pastilla de combustible cuyo peso es aproximado de 10 g equivale a 3.9 barriles de combustible fósil.

La siguiente etapa, conocida como irradiación del combustible se realiza dentro del núcleo del reactor, el cual opera en forma continua durante un lapso de 12 a 18 meses a toda potencia. Al término de los cuales la reactividad del núcleo disminuye y los ensambles de combustible deben ser reemplazados.

La última etapa del proceso es el tratamiento del combustible gastado extraído del reactor, el cual puede seguir dos procesos, dependiendo de las decisiones de cada país. En el primero, el combustible gastado es almacenado provisional o permanentemente, en un principio, para su enfriamiento, en albercas que generalmente se encuentran dentro de las mismas instalaciones de la planta y posteriormente son encapsulados en contenedores herméticamente sellados y depositados en almacenes bajo tierra donde no representan riesgo para el medio ambiente o para las personas. Por otro lado, el combustible gastado

puede ser reprocesado para la recuperación de materiales radiactivos de utilidad nuevamente como combustible nuclear.

La reacción en cadena de fisión nuclear ocurre dentro de un reactor, estos se encuentran dentro de las plantas nucleares con gruesas paredes de concreto que protegen al personal que lo opera y al público en general de la radiactividad que produce. Básicamente un reactor consta de tres elementos esenciales: combustible, moderador y refrigerante.

En las centrales nucleares el calor se obtiene a partir de la fisión del U, por lo que no se genera combustión *per se*, sin embargo, por analogía con las centrales convencionales, a los átomos que inician esta reacción se les denomina combustible nuclear. Como combustible nuclear generalmente se utiliza el ^{235}U y como moderador y refrigerante se utiliza agua.[18]

1.3.1. Generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear en el mundo

Para satisfacer la necesidad de energía eléctrica que tienen el mundo, los países recurren al uso de diferentes fuentes primarias, como los combustibles fósiles que comprenden el carbón, el gas natural o el petróleo, además también aprovechan otras fuentes de energía como la energía hidráulica, la energía nuclear, entre otras. A nivel mundial, el uso de fuentes primarias de energía ha cambiado durante las últimas cuatro décadas, esto ha sido dependiente principalmente por la disponibilidad y el precio de los combustibles fósiles, así como del riesgo asociado a su suministro y el perfil tecnológico de generación existente en cada región y país. Una de las mayores preocupaciones de la quema de combustibles fósiles es la emisión de gases de efecto invernadero, lo cual tiene un impacto en el calentamiento global.

Por todo lo anterior, para muchos países es importante establecer políticas de diversificación que fortalezcan sus sistemas eléctricos y les permitan responder a los cambios económicos y políticos, a las restricciones ambientales y a la volatilidad en los precios de los combustibles.

En el caso de la energía nuclear se observó un crecimiento importante a principios de la década de 1980. En años recientes, se ha iniciado la construcción de varios reactores, en particular, en el sudeste asiático. En 2010, la generación de electricidad a partir de energía nuclear creció 2% a nivel mundial. Europa y Eurasia contribuyeron con 43.6% del total, seguidas por Norteamérica, con 34.1% y los países pertenecientes a la región Asia Pacífico, con 21%. Francia es el principal país generador de electricidad mediante energía nuclear ya que genera alrededor del 77% de su energía eléctrica total utilizada y a nivel mundial en 2010 contribuye con el 15.5%.

Sin embargo, el dinamismo observado durante años recientes en la planificación de nuevos reactores nucleares en varios países, se ubica en un punto de quiebre. Los acontecimientos ocurridos en Fukushima, Japón a inicios de 2011, provocaron que los planes de expansión y

crecimiento fueran reevaluados y reconsiderados en varios países. Por ejemplo, Alemania ha anunciado modificaciones dentro de sus políticas de expansión nuclear y espera clausurar todos sus reactores para el 2022. Suiza contempla eliminar la generación a partir de energía nuclear para el 2034. No obstante, se espera que la energía nuclear crezca 1.1% anual de 2008 a 2035, impulsada principalmente por los países emergentes.[24]

El Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) reporta que, hasta 2013, existen en operación 436 reactores nucleares en 31 países, esto se ilustra en la figura i. Estados Unidos de América, con 104, es el país con el mayor número de reactores nucleares en su territorio. Por otro lado, Francia es el país con mayor dependencia de la energía nuclear y cuenta con 58 reactores nucleares.[24]

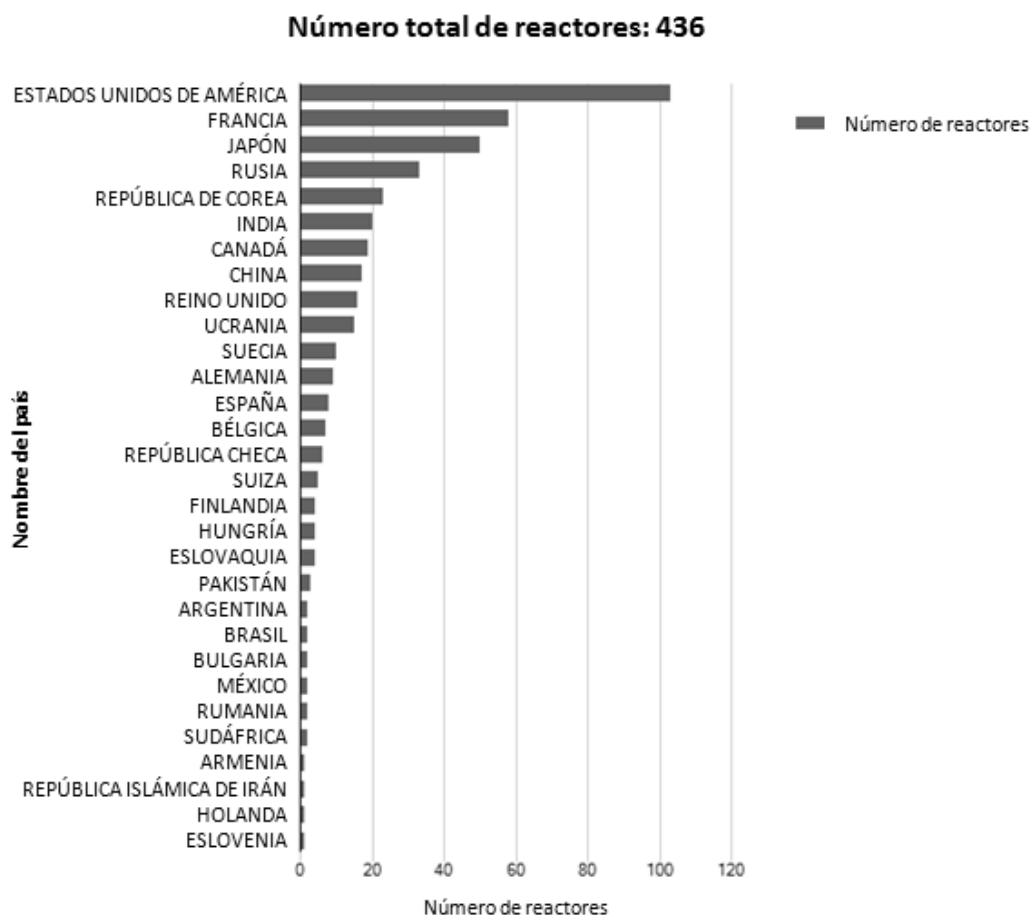


Figura i. Reactores nucleares alrededor del mundo.

(Fuente: Power Reactor Information System [24])

1.3.2. Generación de energía eléctrica a partir de energía nuclear en México

El desarrollo de la Industria Nuclear para la generación de energía eléctrica en México data de los años 70. En esa década, se percibía un interés internacional en dicha industria y a raíz de esto se construyó la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV). Dispone de 370 hectáreas localizadas sobre la costa del Golfo de México en el municipio de Alto

Lucero de Gutiérrez Barrios, en el estado de Veracruz. La CNLV es la única planta nuclear generadora de energía eléctrica en México y cuenta con dos reactores de tipo agua hirviente (boiling water reactor BWR-5) marca General Electric, contención tipo Mark II de ciclo directo. Estos reactores utilizan UO_2 como combustible; y aunque México es una de las naciones con mayores reservas de uranio en el mundo, no es posible utilizarlas ni explotarlas. Esta prohibición obedece al Tratado de Tlatelolco para la Prohibición de Armas Nucleares en América Latina y el Caribe, que entró en vigor en 1969. Por lo tanto, para el uso de la CNLV, México importa este mineral en su mayoría de Holanda y Estados Unidos.

El primer reactor de tipo agua hirviente fue conectado a la red eléctrica en 1989 y el segundo en 1995. Entre ambos reactores, en el 2009, se produjeron hasta 1,365 MW, lo que representa solo el 2.6% de la capacidad instalada de energía eléctrica de un total de 51,686 MW.

De igual forma existe un reactor en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) ubicado en el municipio de Ocoyoacac, Estado de México. Este es un reactor TRIGA Mark III del tipo alberca con núcleo móvil y no se utiliza para la generación de energía eléctrica. Entre sus principales usos se encuentran: la investigación, la producción de radioisótopos con aplicaciones médicas, capacitación de personal en ciencia y otras tecnologías nucleares.

1.4. Protección Radiológica

La protección a la salud pública comprende la prevención o reducción de la exposición a agentes medioambientales que contribuyan, directa o indirectamente, al incremento en la tasa de muertes prematuras, enfermedades o discapacidades en una población específica.

La protección radiológica, como parte de la protección a la salud pública, tiene como objetivo permitir el aprovechamiento de la radiación en todas sus formas conocidas, con un riesgo aceptable para los individuos que la manejan, la población en general y las futuras generaciones. Para esto se requieren normas de seguridad que garanticen que la exposición de los usuarios o trabajadores se encuentre dentro de un límite permitido en el cual los riesgos sean mínimos o inexistentes.

El principio que gobierna la protección radiológica en caso de exposición se conoce con el nombre de ALARA (as low as reasonably achievable), por sus siglas en inglés y que se traduce como: “Tan bajo como razonablemente sea posible“. El uso de la radiación debe verse como una actividad más de la vida moderna que conlleva un riesgo comparable con el riesgo asociado a otras actividades aceptadas por la sociedad. Entre los trabajadores expuestos a las radiaciones encontramos a los médicos radiólogos, así como a los investigadores, académicos y trabajadores de la industria nuclear.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés) es una organización internacional independiente con miembros en aproximadamente 30 países

y está dedicada a fomentar el progreso de la ciencia de la protección radiológica para beneficio público. Fue fundada en 1928 por la Sociedad Internacional de Radiología con el nombre de Comité Internacional de Protección ante los Rayos-X y el Radio y hasta 1950 se cambió a su nombre actual. Ha publicado más de 100 reportes acerca de la protección radiológica y su sede se encuentra en el Reino Unido.

Por otro lado, la IAEA es una organización internacional que busca promover el uso pacífico de la energía nuclear e inhibir el uso militar. Fue establecido como un organismo autónomo en 1957 y actualmente le reporta a la Asamblea General y al Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas.

Cada país cuenta con un organismo encargado de hacer cumplir la reglamentación existente en el área de seguridad radiológica y dicta leyes que generalmente se basan en las recomendaciones internacionales.

1.5. Escala INES

La Escala Internacional de Accidentes Nucleares (INES, por sus siglas en inglés) es utilizada como una herramienta a nivel mundial para comunicar la gravedad de los sucesos nucleares y radiológicos desde el punto de vista de la seguridad. Indica la importancia de los sucesos derivados de una amplia gama de actividades, que abarcan el uso industrial y médico de fuentes de radiación, la explotación de instalaciones nucleares y el transporte de materiales radiactivos.

La escala se ilustra en la figura ii. y consta de siete niveles en los que clasifica los sucesos nucleares. En el caso de los niveles del 1 al 3 se denominan “incidentes”, mientras que para los niveles del 4 al 7 se habla de “accidentes”. Si los sucesos desde el punto de vista de seguridad no presentan importancia se les denomina “desviaciones” y se clasifican como “Debajo de la escala INES” o “Nivel 0”.³⁵



Figura ii. Escala INES.

(Fuente: Escala internacional de sucesos nucleares y radiológicos [24])

1.6. Laboratorios

Posterior a un accidente nuclear, el monitoreo rutinario del medio ambiente y la cadena alimentaria, así como la restricción de la comercialización de los productos posiblemente contaminados, son factores importantes para la contención de los contaminantes radiológicos. Sin embargo, la implementación de esto puede ser compleja, costosa y requiere de entrenamiento y capacitación para asegurar la competencia del laboratorio que lleve a cabo los análisis.

La IAEA estableció desde 1995 una red de laboratorios a nivel mundial llamados “ALMERA” (Analytical Laboratories for the Measurement of Environmental Radioactivity), por sus siglas en inglés y se traduce como “Laboratorios Analíticos para la Medición de la Radiactividad Medioambiental”. Dichos laboratorios analizan muestras medioambientales y son capaces de proveer información rápida y confiable en el caso de un accidente nuclear donde se libere material radiactivo. Hasta septiembre del 2012, dicha red cuenta con 128 laboratorios en 81 países, dentro de los cuales se encuentra México con laboratorios aprobados por el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), la Comisión Federal de Electricidad y la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS).^[25]

1.7. Normatividad

1.7.1. Internacional

Actualmente, diversas agencias independientes de diferentes países realizan mediciones medioambientales para conocer el estado de los radioisótopos en su entorno. También organizaciones internacionales como la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) y la IAEA participan en el Programa de asociación entre la FAO/IAEA, donde la División de técnicas nucleares en alimentos y agricultura tiene como misión apoyar y promover el uso seguro y apropiado de la tecnología nuclear en alimentos y agricultura por los países miembros para contribuir a la paz, salud y prosperidad en todo el mundo.

Entre las áreas de trabajo que comprende dicho programa, la Protección de alimentos y medio ambiente es la que da seguimiento a la irradiación, autenticidad y trazabilidad de alimentos, además del control de los contaminantes químicos y nucleares y de la preparación, respuesta y manejo de emergencias. Dicha área determina si los alimentos son seguros para determinada población y, para eso, toma en cuenta la contaminación microbiológica, los pesticidas, los fármacos veterinarios, las micotoxinas y los radionúclidos. Así mismo, respecto a la protección radiológica, el programa comprende acciones para prevenir o reducir la contaminación en alimentos en caso de una emergencia nuclear y declara que el cumplimiento de los niveles de contaminantes aceptados internacionalmente debe ser demostrado con programas de monitoreo y muestreo, utilizando principios de medición y procedimientos aceptados internacionalmente.

Respecto a la normatividad internacional, se reconoce que el Comité del Codex sobre Aditivos Alimentarios y Contaminantes de los Alimentos (CCFAC), gracias al Programa Conjunto FAO/OMS Sobre Normas Alimentarias, ha desarrollado niveles de referencia para ciertos radionúclidos contenidos en los alimentos destinados al consumo humano que son objeto de comercio internacional y que se han visto contaminados como consecuencia de accidentes o emergencias nucleares. Esto se presenta en la Norma general del Codex para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos (CODEX STAN 193-1995).^[12] La Comisión del Codex Alimentarius publicó por primera vez los niveles de referencia en 1988 (CAC/GL 5-1989) y posteriormente fueron revisados en 2006 con lo que se incrementó el número de radionúclidos cubiertos, cabe mencionar que las revisiones a la norma completa se llevan a cabo anualmente. La tabla I.XII. muestra los niveles de referencia para los radionúclidos artificiales importantes por su captación en la cadena de alimentos.

Tabla I.XII. Niveles de referencia en alimentos para los radionúclidos según la Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos CODEX STAN 193-1995.

Alimento	Radionúclidos	Nivel de referencia (NR) (Bq/kg)
Alimento para lactantes	²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Am	1
	⁹⁰ Sr, ¹⁰⁶ Ru, ¹²⁹ I, ¹³¹ I, ²³⁵ U	100
	³⁵ S, ⁶⁰ Co, ⁸⁹ Sr, ¹⁰³ Ru, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ¹⁴⁴ Ce, ¹⁹² Ir	1000
	³ H, ¹⁴ C, ⁹⁹ Tc	1000
Otros alimentos distintos de los alimentos para lactantes	²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Am	10
	⁹⁰ Sr, ¹⁰⁶ Ru, ¹²⁹ I, ¹³¹ I, ²³⁵ U	100
	³⁵ S, ⁶⁰ Co, ⁸⁹ Sr, ¹⁰³ Ru, ¹³⁴ Cs, ¹³⁷ Cs, ¹⁴⁴ Ce, ¹⁹² Ir	1000
	³ H, ¹⁴ C, ⁹⁹ Tc	10000

Fuente: Norma general para los contaminantes y las toxinas presentes en los alimentos y piensos.[32]

Dicha norma establece un nivel de referencia (NR) del Codex para los radionúclidos y hace una distinción entre alimento para lactantes y otros alimentos distintos a los alimentos para lactantes. El NR es el nivel máximo de radionúclido presente que la Comisión del Codex Alimentarius (CAC) considera que es aceptable para los productos que circulan en el comercio internacional. Para la aplicación de la norma se señala que cuando los niveles de radionúclidos en los alimentos no exceden los correspondientes niveles de referencia, los alimentos deben ser considerados inocuos para el consumo humano, mientras que cuando se superan esos niveles, los gobiernos deben decidir si los alimentos pueden o no distribuirse en su territorio o jurisdicción.

1.7.2. Nacional

En México, la Secretaría de Salud Pública (SSP), en general, se encarga de la promoción de la salud en el país mediante la planeación, coordinación y evaluación del Sistema Nacional de Salud, entre otras funciones. La SSP dicta y verifica el cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas de la Secretaría de Salud Pública (NOM-SSA), las cuales hacen referencia a las materias de salubridad general, incluyendo las de asistencia social, por parte de los sectores público, social y privado, entre otras.

Por su parte, la Secretaría de Energía (SENER) es la responsable de la regulación energética, para lo cual genera las Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética (NOM-ENER). Esta normatividad es de carácter obligatorio y se publica en el Diario Oficial de la Federación para que el público tenga acceso a ella. El Comité de normatividad de la SENER divide a estas normas en seis materias: electricidad, eficiencia energética,

eficiencia térmica, hidrocarburos, gas natural y seguridad nuclear. Para el presente trabajo, son de interés las referentes a la seguridad nuclear.

La Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias (CNSNS), la cual forma parte de la SENER, es la encargada de asegurar que las actividades en donde se ve involucrado material nuclear, radiactivo y fuentes de radiación ionizante se lleven a cabo con la máxima seguridad, considerando los desarrollos tecnológicos actuales. Para cumplir con su misión, la CNSNS, vigila la aplicación de las Normas Oficiales Mexicanas de Seguridad Nuclear (NOM-NUCL), así como las normas que dicta la SSP referentes a la salud de las personas.

En junio de 1995, fue publicada en el Diario Oficial de la Federación la norma NOM-088-SSA1-1994 (Bienes y Servicios. Contaminación por Radionúclidos en Alimentos de Consumo Masivo Importados. Límites Máximos Permisibles)^[27], la cual establecía los límites máximos permisibles para alimentos importados como: leche y sus derivados, fórmulas para lactantes, agua purificada envasada, productos de la pesca congelados en conserva o seco-salados, grasas o aceites vegetales y animales, carnes congeladas y productos cárnicos. Sin embargo, en diciembre de 2004 se emitió un aviso de cancelación de dicha norma, ya que los límites establecidos en ella se consideraron más restrictivos que los establecidos en las normas internacionales sin que existiera justificación para ello. Así mismo, el aviso de cancelación establece que en caso de conocimiento o sospecha de alimentos importados con contaminación radiológica los valores reconocidos internacionalmente son adecuados para aplicarse; sin embargo, al dejar de ser una Norma Oficial Mexicana se pierde su carácter obligatorio.

Ahora, para obtener una licencia de operación de cualquier Central Nucleoeléctrica en el mundo, es necesario disponer de un programa de planificación para casos de emergencia, con el propósito de brindar seguridad a la instalación, a su personal y a la población aledaña. Para la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde (CNLV) existen dos planes de emergencia: El Plan de Emergencia Interno y el Plan de Emergencia Radiológica Externo. Donde el primero abarca las situaciones de emergencia que cuyas consecuencias se perciban en el interior de la Central; por su parte, el segundo, conocido como PERE, prevé las emergencias que pudieran salir de la Central Nucleoeléctrica.

Medidas como la vigilancia estratégica del contenido de contaminantes radiológicos en los alimentos destinados a la alimentación humana y animal, el establecimiento claro de los límites permisibles de estos contaminantes y el carácter obligatorio de normas aplicables en el comercio exterior de estos alimentos; permitirían mantener un control en los niveles de contaminantes radiológicos a los que están expuestos los consumidores tanto nacionales como internacionales y con ello disminuir el riesgo de que se presenten enfermedades relacionadas con la exposición crónica a niveles de radiación por encima de los recomendados.

Capítulo 2.- Aspectos fundamentales

2.1. Radioisótopos naturales y artificiales

2.1.1. Naturales

Los radioisótopos que naturalmente existen en el planeta pueden pertenecer principalmente a dos fuentes: de origen terrestre y de origen cósmico.

2.1.1.1. Radioisótopos de origen terrestre

A los radioisótopos que han existido desde antes de la formación de la Tierra y que, debido a que su vida media es muy larga, no han decaído completamente hasta nuestros días, se conocen como radioisótopos de origen terrestre y se muestran en la tabla II.I.

Estos radioisótopos están en constante decaimiento y forman otros radioisótopos que a su vez pueden decaen en otros o no. Existen de manera natural tres cadenas principales de decaimiento, estas comienzan con los radioisótopos primordiales ^{232}Th , ^{235}U y ^{238}U y finalizan hasta la formación de un isótopo estable. Dichas cadenas se muestran en las figuras iv y v, página 30 y 31, respectivamente.

Tabla II.I. Radioisótopos de origen terrestre

Radioisótopo	Vida media (años)	Abundancia Isotópica (%)
^{235}U	7.04×10^8	0.72
^{238}U	4.47×10^9	99.27
^{232}Th	1.40×10^{10}	100
^{40}K	1.30×10^9	0.0118
^{48}Ca	5.39×10^{19}	0.19
^{50}V	6.00×10^{15}	0.24
^{76}Ge	1.58×10^{21}	7.61
^{82}Se	9.83×10^{19}	8.73
^{87}Rb	4.70×10^{10}	27.85
^{96}Zr	2.41×10^{19}	2.8
^{100}Mo	8.56×10^{18}	9.63
^{113}Cd	9.00×10^{10}	12.30
^{116}Cd	3.01×10^{19}	7.49
^{115}In	6.00×10^{14}	95.72
^{123}Te	1.24×10^{13}	0.87
^{128}Te	2.19×10^{24}	31.74
^{130}Te	7.89×10^{20}	34.08
^{130}Ba	6.97×10^{13}	0.106
^{136}Xe	2.11×10^{21}	8.87
^{138}La	1.30×10^{11}	0.089
^{144}Nd	2.10×10^{15}	23.85
^{146}Sm	1.03×10^8	trazas

Radioisótopo	Vida media (años)	Abundancia Isotópica (%)
¹⁴⁷ Sm	1.10x10 ¹¹	15.00
¹⁴⁸ Sm	7.00x10 ¹⁵	11.20
¹⁵⁰ Nd	6.66x10 ¹⁸	5.6
¹⁵¹ Eu	5.00x10 ¹⁸	47.81
¹⁵² Gd	1.10x10 ¹⁴	0.20
¹⁵⁶ Dy	2.00x10 ¹⁴	0.06
¹⁷⁶ Lu	3.00x10 ¹⁰	2.60
¹⁷⁴ Hf	2.00x10 ¹⁵	0.18
¹⁸⁰ W	1.80x10 ¹⁸	0.12
¹⁸⁷ Re	5.00x10 ¹⁰	62.60
¹⁸⁶ Os	2.00x10 ¹⁵	1.60
¹⁹⁰ Pt	6.00x10 ¹¹	0.014
²⁰⁹ Bi	1.90x10 ¹⁹	100
²⁴⁴ Pu	8.00x10 ⁷	trazas

Fuente: KASE, K., et al., 1986.[6]

2.1.1.2. Radioisótopos de origen cósmico

Las reacciones nucleares ocurren constantemente en nuestro planeta, por ejemplo, en la atmósfera interactúan los elementos ligeros en forma de gas con partículas α , neutrones, protones y deuterones, es decir, con los rayos cósmicos provenientes del espacio exterior. De la interacción anterior resultan los radioisótopos de origen cósmico, los cuales son arrastrados hacia el planeta por el agua de lluvia y el viento. La mayoría de estos radioisótopos, comparados con los de origen terrestre, presentan vidas medias considerablemente más cortas, por ello en la atmósfera se alcanza un equilibrio entre su producción y decaimiento constante. Dichos radioisótopos se presentan en la tabla II.II.

Tabla II.II. Radioisótopos de origen cósmico.

Radioisótopo	Vida Media*
³ H	12.35 a
⁷ Be	53.4 d
¹⁰ Be	1.6x10 ⁶ a
¹¹ C	20.38 m
¹⁴ C	5,715 a
¹⁸ F	1.83 h
²² Na	2.6 a
²⁴ Na	14.96 h
²⁸ Mg	20.92 h
³¹ Si	2.62 h
³² Si	132.2a
³² P	14.3 d
³³ P	25.3 d
³⁵ S	87.5 d
³⁶ Cl	3x10 ⁵ a

Radioisótopo	Vida Media*
^{38}Cl	37.23 m
^{39}Cl	55.66 m
^{37}Ar	35.04 d
^{39}Ar	269.2a
^{41}Ar	1.83 h
^{81}Kr	$2.29 \times 10^5 \text{a}$

*a=años, d=días, m=minutos, h=horas

Fuente: KASE, K., et al., 1986. [6]

2.1.2. Artificiales

Los radioisótopos conocidos como artificiales, son resultado de las actividades que lleva a cabo el hombre. Fue en 1945 cuando se comenzó a liberar material radiactivo al medio ambiente debido a las pruebas nucleares seguidas de las bombas nucleares arrojadas en Hiroshima y Nagasaki. La radiactividad debida a estos eventos, en su mayoría hasta el día de hoy ha decaído hasta llegar a materiales estables. Los acontecimientos que principalmente en nuestros días han contribuido a la liberación al ambiente de radioisótopos producto de la reacción de fisión nuclear son accidentes como el de Chernobyl en 1986 y el de Fukushima Dai-Ichi en 2011 y en menor medida las fugas y descargas provenientes de las plantas nucleares, ya sean accidentales o permitidas. El material nuclear utilizado en las plantas nucleares, hospitales, etc. y que se encuentra almacenado debidamente, no representan riesgo alguno y no deben considerarse como contaminación radiológica.[10]

Estos radioisótopos son principalmente productos de la fisión nuclear del ^{235}U . Se ha observado que el rendimiento de los productos de fisión nuclear, en general, presenta una distribución asimétrica con doble pico como la que se observa en la figura iii en la página 29 y está sujeto a distintas variables. Entre ellas, la simetría de esta distribución variará dependiendo de factores como la energía de los neutrones con los que se induce la reacción y el isótopo de uranio u otros con los que comience la reacción. Sin embargo, la distribución mantiene relativamente constante el rendimiento de los productos de fisión formados. La vida media de los productos de fisión nuclear va desde fracciones de segundo hasta 1×10^9 años. En las tablas II.III. y II.IV. se presentan los productos de fisión nuclear ligeros y pesados, respectivamente, con mayores rendimientos con respecto a su número másico.

Tabla II.III. Rendimiento absoluto para los fragmentos ligeros de la fisión nuclear del ^{235}U .

Número másico	Elemento	Rendimiento (%)	Número másico	Elemento	Rendimiento (%)
81	Se	0.13	94	Zr	6.28
83	Kr	0.54	95	Mo	6.35
84	Kr	1.00	96	Mo	6.26
85	Kr	1.30	97	Mo	6.03
86	Kr	2.02	98	Mo	6.00
87	Rb	2.49	99	Mo	6.00
88	Sr	3.53	100	Mo	6.56
89	Sr	4.78	101	Mo	5.60
90	Sr	5.74	102	Mo	4.10
91	Zr	5.60	103	Mo	3.10
92	Zr	5.73	104	Mo	2.00
93	Zr	6.12	105	Mo	1.35
130	Sb	2.10	142	Ce	6.03
131	I, Xe	2.92	143	Nd	5.80
132	Xe	4.37	144	Nd	5.39
133	Xe	6.59	145	Nd	3.86
134	Cs, Xe	8.03	146	Nd	2.93
135	Cs	6.41	147	Sm	2.38
136	Xe	6.44	148	Nd	1.63
137	Cs	6.15	149	Sm	1.13
139	Ba	6.40	150	Nd	0.64
140	Ce	6.33	151	Sm	0.45
141	Ce	5.9	152	Sm	0.28

Fuente: POPOVA, M., et al., 1957. [9]

2.2. Cadenas de decaimiento

Se conocen cuatro series o cadenas radiactivas, tres de las cuales existen en la naturaleza, ya que proceden de los radionúclidos primigenios. La cadena radiactiva del ^{232}Th es llamada $4n$ debido a que el número másico de cada radioisótopo en esta cadena es un múltiplo de 4. Los números másicos de los componentes de las cadenas de ^{238}U y ^{235}U se pueden expresar como $4n+2$ y $4n+3$, respectivamente. La cuarta cadena radiactiva, la del ^{241}Pu , alguna vez existió de manera natural en el planeta, sin embargo, al tener sus radioisótopos vidas medias muchas veces menores que el tiempo de vida de la Tierra estos han decaído hasta formar isótopos estables. No obstante, es posible producir estos radioisótopos de manera artificial con el uso de reactores nucleares modernos; esta cadena se puede expresar como $4n+1$. Lo anterior se resume en la tabla II.IV.

Tabla II.IV. Cadenas radiactivas de radioisótopos radiogénicos.

Cadena de decaimiento	Expresión
Torio-232	$4n$
Neptunio-237	$4n+1$
Uranio-238	$4n+2$
Uranio-235	$4n+3$

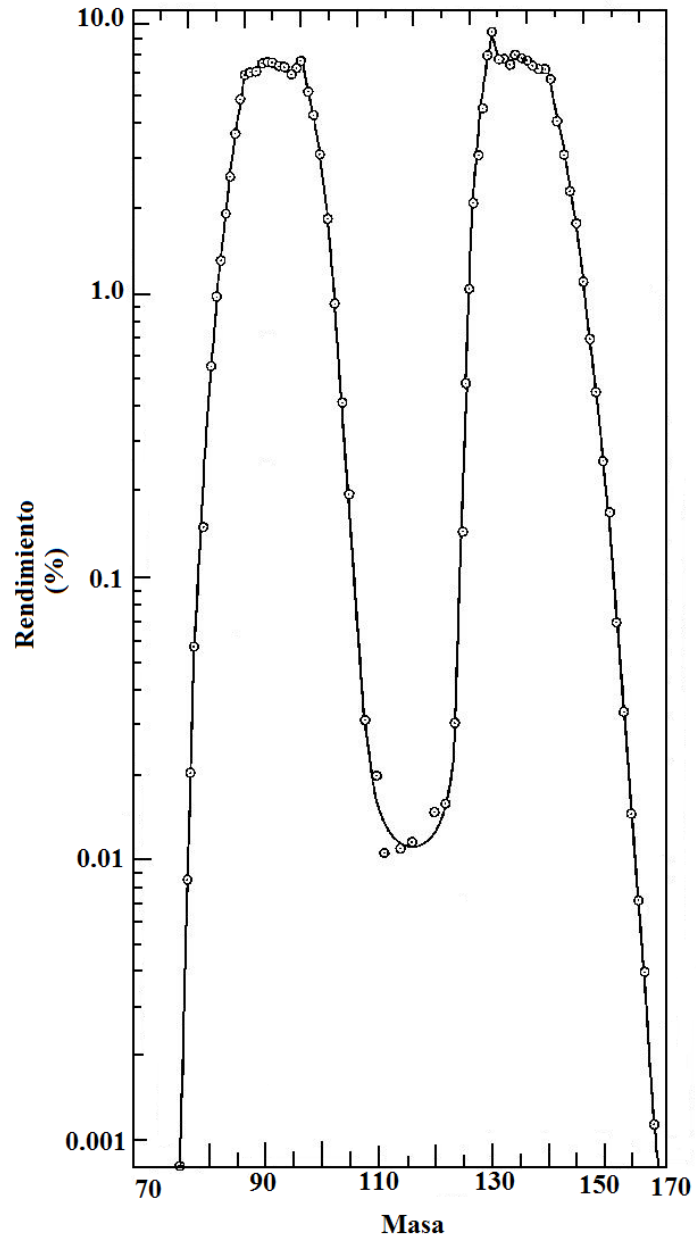


Figura iii. Rendimiento de los productos de fisión nuclear.
 (Fuente: POPOVA, M., et al., 1957. [9])

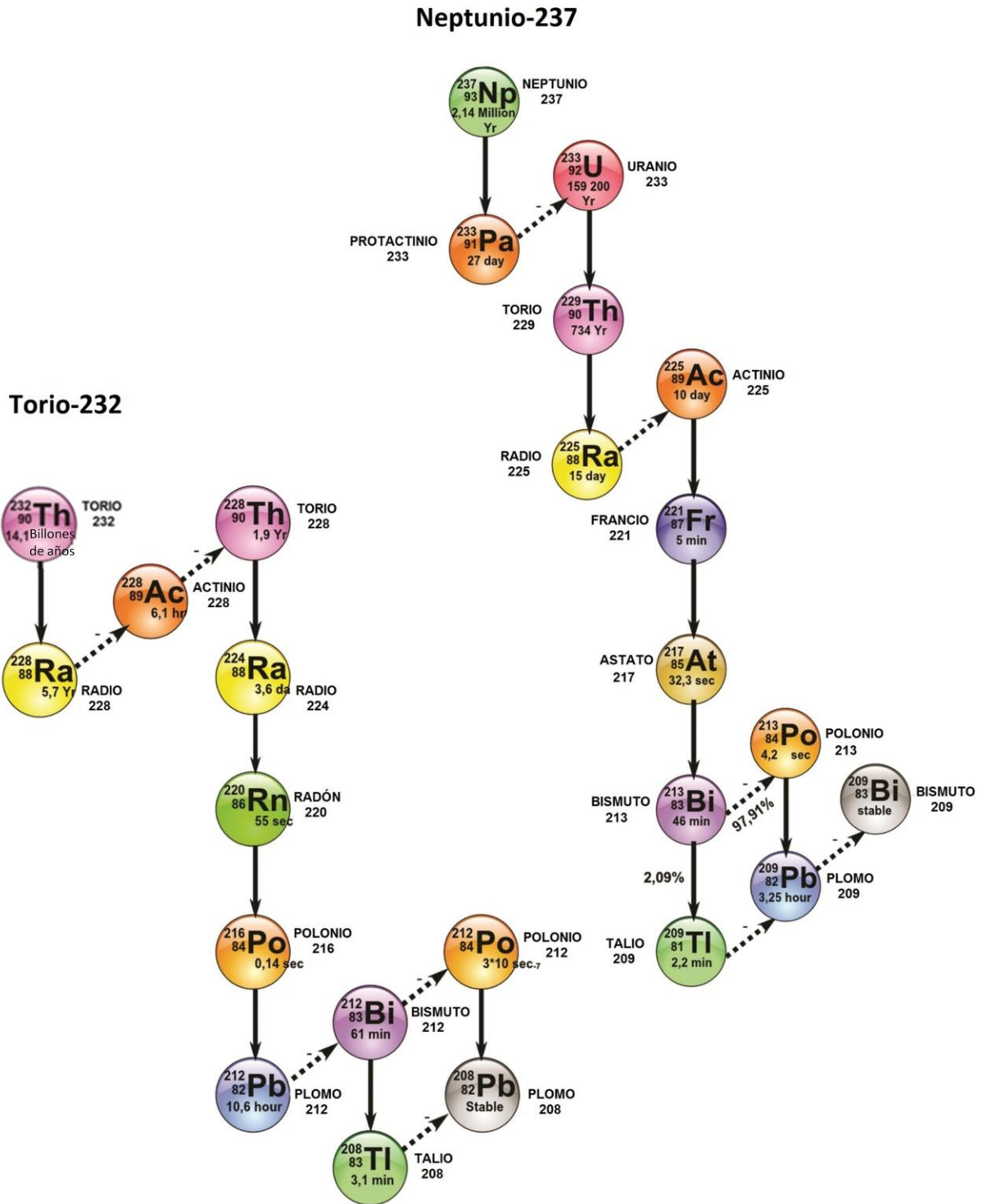


Figura iv. Cadenas radiactivas de radioisótopos de origen terrestre.

2.3. Contaminantes radiológicos en los alimentos

El término contaminación o contaminante radiológico se refiere a la presencia no deseada de material radiactivo en un entorno específico. Los niveles de radiación naturalmente contenidos en los alimentos varían dependiendo de distintos factores como el tipo de alimento y la región geográfica en donde son producidos. Los radionúclidos naturales más comúnmente encontrados en alimentos son el ^{40}K , ^{226}Ra y el ^{238}U ; además de sus correspondientes productos de desintegración. En general, el ^{40}K es el que se encuentra en mayor cantidad.^[15]

Cuando grandes cantidades de radioisótopos, provenientes de la actividad humana, son liberados al medio ambiente existe la posibilidad de que entren a la cadena de alimentos para consumo humano. Esto puede ocurrir por deposición del material radiactivo desde la atmósfera a la superficie de alimentos como frutas y hortalizas o en pastos dedicados al pastoreo que posteriormente ingieren los animales de consumo humano. Existe también la posibilidad de que llegue a depósitos de agua y de ahí se introduzca en animales de pastoreo, peces, moluscos, etc. o sea absorbida por plantas e ingerida por otros animales.^[23] Lo anterior se muestra en la figura vi.

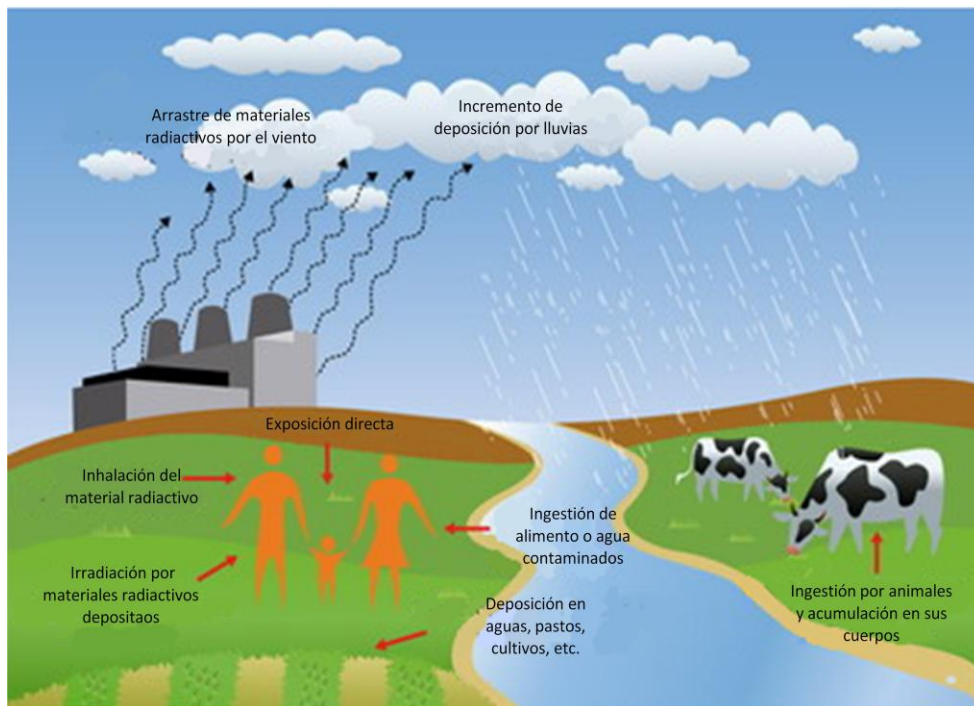


Figura vi. Ciclo de la contaminación de alimentos con radioisótopos.

Posterior a un desastre nuclear existe una gran variedad de productos de fisión nuclear que pueden ser liberados al ambiente, sin embargo, muchos tienen una vida media muy corta y otros no se transfieren a los alimentos fácilmente. Los radionúclidos más importantes que pueden entrar en la cadena de alimentos de consumo humano y los que se encuentran normalmente en las instalaciones nucleares o se utilizan como fuente de radiación en cantidades suficientemente grandes para que contribuyan notablemente al aumento de los niveles en los alimentos, se presentan en la siguiente tabla II.V. junto con su decaimiento radiactivo.

Tabla II.V. Radioisótopos artificiales relevantes para la cadena de alimentos en el caso de un accidente nuclear.

Radionúclido	Emisiones			Vida media *
	α	β	γ	
¹²⁹ I		✓	✓	1.57 x 10 ⁷ a
²⁴¹ Am	✓		✓	432.2 a
¹³⁴ Cs		✓	✓	2.06 a
^{99m} Tc			✓	2.11 x 10 ⁵ a
²³⁵ U	✓		✓	7.04 x 10 ⁸ a
¹³¹ I		✓	✓	8.02 d
¹⁹² Ir		✓	✓	73.83 d
¹⁰³ Ru		✓	✓	39.26 a
¹³⁷ Cs		✓	✓	30.17 a
⁶⁰ Co		✓	✓	5.27 a
³ H		✓		12.35 a
¹⁴ C		✓		5,715 a
³⁵ S		✓		87.32 d
⁸⁹ Sr		✓		50.52 a
⁹⁰ Sr		✓		28.90 a
¹⁰⁶ Ru		✓		373.59 d
¹⁴⁴ Ce		✓		284.89 d
²³⁸ U	✓			4.47 x 10 ⁹ a
²³⁸ Pu	✓			87.74 a
²³⁹ Pu		✓		2.41 x 10 ⁴ a
²⁴⁰ Pu	✓			6.5 x 10 ³ a

* d=días, a=años

Fuente: CODEX General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed.[32]

2.3.1. Contaminantes radiológicos de interés para el presente estudio

El Comité del Codex sobre Aditivos Alimentarios y Contaminantes de los Alimentos (CCFAC), gracias al Programa Conjunto FAO/OMS Sobre Normas Alimentarias, ha desarrollado niveles de referencia para ciertos radionúclidos contenidos en los alimentos destinados al consumo humano y que son objeto de comercio internacional, los cuales se han visto contaminados como consecuencia de accidentes nucleares. Estos se encuentran en la Norma General del Codex para los Contaminantes y las Toxinas Presentes en los Alimentos y Piensos (CODEX STAN 193-1995)_[12]. Dicha norma se publicó por primera vez en 1988 (CAC/GL 5-1989), sin embargo, se realizan revisiones anualmente y se publican las modificaciones pertinentes.

La información referente a los radionúclidos contenida en la Norma General del Codex se encuentra en el Anexo B al final del presente documento. Los radionúclidos incluidos en dicha norma son los que se presentaron en la tabla anterior II.V. En dicha tabla se observa el tipo de decaimiento que presenta cada uno de ellos, α , β o γ . Puesto que el presente estudio utiliza espectrometría gamma para

la detección de contaminantes radiológicos, únicamente es posible detectar a aquellos capaces de emitir radiación de este tipo. Por lo anterior, los radionúclidos de interés para el estudio se presentan en la siguiente tabla II.VI.

Tabla II.VI. Radionúclidos de interés y su energía de radiación gamma.

Radionúclido	Energía gamma (MeV)	Vida media *
¹²⁹ I	0.040	1.57 x 10 ⁷ a
²⁴¹ Am	0.060	432.2 a
¹³⁴ Cs	0.143, 0.184	2.06 a
^{99m} Tc	0.284, 0.364, 0.637	2.11 x 10 ⁵ a
²³⁵ U	0.317, 0.468	7.04 x 10 ⁸ a
¹³¹ I	0.497	8.02 d
¹⁹² Ir	0.662	73.83 d
¹⁰³ Ru	1.173, 1.332	39.26 a
¹³⁷ Cs	0.143, 0.184	30.17 a
⁶⁰ Co	0.284, 0.364, 0.637	5.27 a

* Donde: d=días, a=años.

De acuerdo con el rendimiento de los fragmentos de fisión presentado en las tablas II.III. y tomando en cuenta los radioisótopos de la tabla II.VI, se puede observar que los productos de fisión nuclear que contaminan mayormente a los alimentos son radioisótopos “pesados” y tienen un rendimiento alto en la reacción de fisión nuclear.

Por lo anterior, dentro de los radionúclidos de interés se hace énfasis en tres de ellos: ¹³¹I, ¹³⁴Cs y ¹³⁷Cs. De igual manera, se ha comprobado que dichos radioisótopos pasan fácilmente a la cadena alimentaria principalmente a través de la carne y la leche.

2.3.1.1. Yodo-131

El yodo (I) es un elemento volátil muy dinámico en el medio ambiente y no está distribuido de manera uniforme en la naturaleza. Existen al menos veinticinco isótopos del yodo y de estos, quince son productos de la fisión nuclear, siendo el ¹²⁷I el único isótopo estable. Omitiendo al ¹⁴⁰I y ¹⁴¹I, debido a que tienen una vida media muy corta, los provenientes de la reacción de fisión nuclear son:

¹²⁷I (estable), ¹²⁸I (25 min), ¹²⁹I (1.57x 10⁷a), ¹³⁰I (12.4 h), ¹³¹I (8.06 d), ¹³²I (2.3 h), ¹³³I (21 h), ¹³⁴I (52.8 min), ¹³⁵I (6.7 h), ¹³⁶I (83 s), ¹³⁷I (23 s), ¹³⁸I (5.9 s) y ¹³⁹I (2 s).

De estos radioisótopos los más importantes como contaminantes medioambientales son el ¹³¹I y ¹²⁹I ya que son los únicos productos de la fisión nuclear con una vida media mayor a un día. El ¹³¹I es más importante como contaminante de alimentos, ya que se transfiere rápidamente a la leche por la contaminación del alimento para el ganado y se acumula en la glándula tiroidea. Este produce emisiones beta con una vida media de 8.06 días y una energía beta máxima de 0.81 MeV, también emite rayos gamma de 0.36 y 0.64 MeV entre otras energías. El ¹²⁹I tiene una vida media muy larga

de 1.57×10^7 años, emite partículas beta con una energía máxima de 0.15 MeV acompañado de rayos gamma de 0.09 MeV. Ambos radioisótopos son hallados en el medio ambiente como resultado de la industria nuclear, sin embargo, el ^{131}I ha sido encontrado en mayor proporción como contaminante de alimentos.

Como cualquier otro producto de la fisión nuclear, ambos radioisótopos están presentes en el ambiente como resultado de la fisión espontánea del uranio presente naturalmente en el medio ambiente, sin embargo, debido a su larga vida media el ^{129}I se ha acumulado en la corteza terrestre y en las aguas de los océanos desde donde se dispersa a toda la biosfera.

El yodo es un elemento fundamental en el organismo humano, su absorción a la sangre desde el aparato gastrointestinal es completa y muy rápida. Este elemento es concentrado selectivamente en la glándula tiroides ya que juega un papel importante en la síntesis de hormonas tiroideas y es secretado en la leche. La acumulación del ^{131}I en la tiroides incrementa el riesgo de padecer cáncer en esta glándula.[25]

2.3.1.2. Cesio-134 y Cesio-137

El cesio (Cs) es un metal alcalino y tiene propiedades químicas y físicas similares al rubidio (Ru) y al potasio (K), probablemente por ello, metabólicamente se comporta de manera similar a este último. Sin embargo, a diferencia del potasio, no hay evidencia que indique que el cesio es un elemento esencial en la dieta humana. En contraste con el yodo radiactivo que se vio anteriormente, los isótopos radiactivos ^{137}Cs y ^{134}Cs tienen una vida media más larga, el primero de aproximadamente 30 años y el segundo 2 años.

El radioisótopo Cs-137 es uno de los productos de la reacción de fisión nuclear que se producen en mayor cantidad, cerca de 6 átomos por cada cien fisiones, independientemente de la fisión en uranio o plutonio. El comportamiento del cesio radiactivo en el medio ambiente depende mucho del tipo de suelo en el que se deposite; ya que existen áreas en donde la fijación del Cs-137 al suelo es menor, lo que permite que sea absorbido por las plantas. Algunos estudios indican que este radioisótopo es retenido más fuertemente en suelos que contienen predominantemente minerales de mica, por lo que la migración del suelo a la vegetación se ve reducida. Sin embargo, los suelos que no contienen grandes cantidades de estos minerales, como los tropicales, muestran menor retención y permiten una mayor absorción del radioisótopo a las plantas. Por otro lado, además de la absorción del radioisótopo desde la raíz, también puede ser transferido por deposición directamente sobre la superficie de la planta.

La transferencia de este radioisótopo a los animales de consumo humano ocurre cuando estos ingieren vegetación o agua contaminada, y posteriormente estos contaminantes se alojan en los tejidos o secreciones del animal, como la leche.

Como ya se mencionó, el comportamiento biológico del cesio al ser ingerido es similar al del potasio, por lo que al ser ingeridos los radioisótopos de este elemento se distribuyen uniformemente en todo el cuerpo, con mayor concentración en el tejido muscular, mientras que en el tejido óseo se concentra en la médula y en mínima cantidad en el hueso.[25]

2.4. Efectos en la salud

El principal problema de salud que se puede presentar a largo plazo en la población debido a la exposición de altas dosis de radiación es el desarrollo de cáncer de distintos tipos, esto dependerá del órgano blanco al que afecte cada radionúclido.

La IAEA estima que, en promedio, nuestra exposición a la radiación debido a fuentes naturales llega a ser de alrededor de 2.4 mSv por año, aunque esta cifra puede variar debido a distintas localizaciones geográficas e incluso altitudes. Por otro lado, la exposición debida a la ingestión de radioisótopos naturales es de alrededor de 0.25-0.4 mSv por año.^[2]

El consumo de alimentos contaminados con isótopos radiactivos incrementará su exposición a la radiación y por ellos aumentará el riesgo de padecer problemas de salud asociados a la excesiva exposición a la radiación. Los efectos que tenga en la salud de cada individuo dependerán de los radionúclidos ingeridos, así como de la cantidad.^[7]

2.5. Física atómica y nuclear

2.5.1. Estructura atómica

El átomo consta de un núcleo con carga positiva, rodeado de cierto número de partículas cargadas negativamente, llamadas electrones; de tal modo que, en conjunto, el átomo resulta eléctricamente neutro. Los núcleos atómicos están constituidos a base de dos partículas fundamentales, llamadas protones (Z) y neutrones (N), y al conjunto de ellas se le designa frecuentemente con el nombre genérico de nucleón o nucleido (A). La notación para resumir un nucleón es:

$$A = N + Z$$

El protón transporta una unidad de carga positiva, igual en magnitud a la carga electrónica. El neutrón es ligeramente más pesado que el protón y, como su nombre lo indica, se trata de una partícula neutra que no transporta carga eléctrica. Con excepción del átomo de hidrógeno más abundante, conocido como protio, todos los núcleos contienen además de protones, uno o más neutrones.

Para un elemento determinado, el número de los protones existentes en el núcleo atómico recibe el nombre de número atómico del elemento, y se representa generalmente con la letra Z ; este es idéntico al número de orden del elemento en la tabla periódica de los elementos químicos. Por lo anterior, el número atómico del H es 1, el del He es 2, el del Li es 3, y así sucesivamente, hasta llegar al número 92 correspondiente al U, que es el elemento de masa atómica más elevada, entre todos los existentes en la naturaleza en cantidad apreciable. Cierta número de elementos más pesados que el uranio han sido preparados artificialmente; de estos, el Pu (número atómico 94) tiene gran importancia en la producción de energía nuclear.^[5]

El número total de nucleones (protones y neutrones) existentes en el núcleo atómico recibe el nombre de número másico del elemento y se representa por la letra A . Como Z es el número de protones, el

número de neutrones contenidos en el núcleo atómico vendrá representando A-Z. Resumiendo lo anterior, la notación para resumir un átomo X es:



2.5.2. Isótopos

Lo que determina la naturaleza química de un elemento es su número atómico, es decir, el número de protones existentes en el núcleo (A). Esto se debe a que las propiedades químicas dependen de los electrones presentes en los orbitales en torno del núcleo, y el número de estos es necesariamente igual al número de protones, ya que el átomo es una entidad eléctricamente neutra. En consecuencia, átomos cuyos núcleos contienen el mismo número de protones (A), pero que difieren en número másico o de neutrones (N), químicamente, son esencialmente idénticos. Tales especies reciben el nombre de isótopos, estas, en general, químicamente son indistinguibles pero poseen masa atómica diferente, sin embargo, Las propiedades nucleares cambian drásticamente de un isótopo a otro.

Para diferenciar cada uno de los isótopos de un elemento determinado, se escribe el nombre o símbolo del elemento y a continuación el número másico o el número másico como superíndice anterior al símbolo del elemento. Así, por ejemplo, el isótopo más abundante del oxígeno, de número másico 16 (núcleo con 8 neutrones y 8 protones), se representa de cualquiera de estas formas: oxígeno-16, O-16 u ${}^{16}\text{O}$.^[5]

2.5.2.1. Isótopos radiactivos

La gran mayoría de los elementos químicos se presentan en la naturaleza en forma estable, pero algunos elementos de masa atómica elevada, del polonio (número atómico 84) en adelante, entre ellos, radio (88), torio (90) y uranio (92), están constituidos exclusivamente por isótopos inestables radiactivos. Otros elemento, entre ellos el talio (81), plomo (82) y bismuto (83) están constituidos principalmente por isótopos estables, pero contienen también cierta proporción de especies radiactivas.^[5]

Las especies isotópicas inestables experimentan una transformación espontánea, que se conoce con el nombre de desintegración radiactiva, proceso que tiene lugar con energías y tiempos bien definidos.

2.5.3. Decaimiento o desintegración radiactiva

Un núcleo se considera estable cuando su energía de enlace es mayor que la energía total de enlace de cualquier fragmento en el que se pueda desintegrar. Por el contrario, un núcleo inestable se desintegrará espontáneamente liberando energía cinética en los fragmentos de desintegración.

El decaimiento o desintegración radiactiva, consiste en un proceso estadístico, en el cual un núcleo atómico inestable pierde o emite energía para alcanzar un estado de estabilidad. Lo anterior sucede de dos maneras: al emitir partículas pesadas y radiación electromagnética.

Las partículas pesadas que un núcleo es más propenso a emitir son aquellas que son estables, como neutrones, protones y partículas α . Esto resulta, en muchos casos, en la transmutación nuclear, ya que cuando el núcleo pierde protones se forman diferentes elementos químicos. Cuando un núcleo emite electrones, el número de masa del núcleo permanece igual y el número de carga se incrementa o disminuye en uno.

En la emisión de fotones, un núcleo puede cambiar de un estado de energía a otro con la emisión de un fotón, conocido como rayo γ . Este decaimiento no resulta en la transmutación del núcleo y frecuentemente acompaña a la emisión de partículas α o β .

Muy frecuentemente, los productos de desintegración son también radiactivos, emitiendo a su vez partículas α o β , acompañadas, algunas veces de radiación γ . Al fin, tras un cierto número de etapas de desintegración, se forma una especie atómica de núcleo estable.^[1]

2.5.4. Clasificación de la radiación

Debido a los productos de desintegración que principalmente comprenden el decaimiento radiactivo, se sabe que la radiación se puede propagar de dos maneras, como radiación corpuscular y como radiación electromagnética. Además, esta también se puede agrupar en radiación ionizante o no ionizante.

La radiación corpuscular, como su nombre lo indica, comprende a la radiación transmitida por medio de partículas como la α , β , los neutrones, protones, etc. Por otro lado, la radiación electromagnética comprende a las ondas que se propagan por todo el espectro electromagnético, incluidos los rayos gamma.

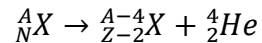
El carácter ionizante o no ionizante de la radiación es independiente de su naturaleza corpuscular u ondulatoria. Si la radiación transporta energía suficiente como para provocar ionización en el medio que atraviesa, se dice que es una radiación ionizante, en caso contrario, se habla de radiación no ionizante. En general, se considera a la radiación electromagnética con longitudes de onda de 10 nm o mayores como radiación no ionizante. Esto comprende a las ondas de radio, las microondas, la luz visible y la luz ultravioleta. Por otro lado, la radiación ionizante comprende el resto del espectro electromagnético, es decir, a los rayos X, a los rayos gamma y a los rayos cósmicos. Además, también incluye a todas las partículas atómicas y subatómicas que se generan en el decaimiento radiactivo como los electrones, positrones, protones, partículas alfa, neutrones, entre otros.

Para comprender la naturaleza de las radiaciones, es importante mencionar que en física moderna, existe el concepto de la dualidad onda-partícula, en donde se postula que las partículas como electrones, protones, neutrones, etc., bajo ciertas condiciones presentan un comportamiento como onda. Por otro lado, igualmente bajo ciertas condiciones, las ondas como la luz o los rayos gamma exhiben propiedades de partículas. Por lo anterior, tanto a las ondas como a las partículas vistas anteriormente se les consideran radiaciones y presentan este comportamiento.^[5]

2.5.4.1. Radiación corpuscular

2.5.4.1.1. Radiación alfa

Las partículas alfa (α), son las partículas que se emiten más comúnmente de los núcleos atómicos inestables. Son un agregado de dos protones y dos neutrones, por lo que presentan una carga positiva de 2+ y son exactamente iguales a los núcleos del elemento helio (${}^4_2\text{He}$). Cuando un isótopo radiactivo emite una partícula alfa disminuye su número atómico en 2 unidades y su número másico en 4 unidades. El decaimiento α está representado por la siguiente ecuación:



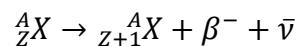
La capacidad de penetración de las partículas alfa es muy limitada ya que los núcleos de helio interaccionan fuertemente con otras moléculas debido a su gran masa y carga eléctrica por lo que pierden rápidamente su energía cinética. Sin embargo, generan una gran cantidad iones por centímetro de longitud recorrida y son muy energéticas y en el proceso se desprende mucha energía, misma que se convierte en la energía cinética de la partícula alfa, por lo que estas partículas salen con velocidades muy altas.^[4]

2.5.4.1.2. Radiación beta

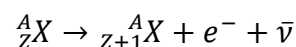
En el decaimiento β , un núcleo emite un electrón o un positrón, este último tiene masa igual al electrón pero carga positiva. Además del electrón y el positrón, una partícula neutra ($\bar{\nu}$), llamada neutrino, con masa tan pequeña que es considerada como cero, es también emitida. Existen dos tipos de decaimiento beta: partícula beta negativa (β^-) y partícula beta positiva (β^+).

2.5.4.1.2.1. Radiación beta negativa (β^-)

En este caso la partícula que se emite es un electrón, o β^- , con su correspondiente carga y masa. Como los núcleos no tienen electrones, la explicación de este proceso es que un neutrón del núcleo se convierte en un protón y un electrón. El protón resultante permanece en el núcleo y el electrón escapa como partícula β^- junto con un antineutrino. El número másico del núcleo resultante se mantiene, pero el número atómico aumenta en una unidad por lo que existe transmutación. Este tipo de decaimiento es representado como:



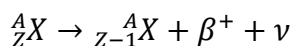
ó



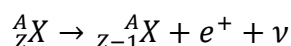
donde, $\bar{\nu}$ = antineutrino

2.5.4.1.2.2. Radiación beta positiva (β^+)

Las partículas beta positivas, denominadas positrones (\bar{e}), tienen la misma masa que los electrones y carga electrónica positiva. Los positrones se crean cuando en el núcleo un protón se convierte en un neutrón y un positrón. Mientras que el neutrón permanece en el núcleo, el positrón (β^+) es emitido junto con un neutrino. El número atómico del núcleo disminuye en una unidad, manteniéndose el mismo número másico, por lo que no hay transmutación. La expresión para representar este decaimiento es:



ó



donde, ν = neutrino

En ambos procesos anteriores (decaimiento β^- y β^+) se emiten también unas partículas que no tienen ni carga ni masa, antineutrino y neutrino, respectivamente. Esta se lleva parte de la energía total disponible en el proceso, quedando la partícula β^- o β^+ con sólo una parte de esta. Las partículas β son un poco más penetrantes que las partículas α , sin embargo, tienen un poder de ionización menor.

2.5.4.2. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes en direcciones mutuamente perpendiculares y se propagan por el vacío a la velocidad de la luz. La propiedad diferencial entre ellas es su frecuencia, ν , o la longitud de onda, λ .

El fotón es el cuanto del fenómeno electromagnético, es decir, es la partícula elemental que constituye todas las formas de la radiación electromagnética. Este cuanto presenta diferentes energías a lo largo de todo el espectro electromagnético; tiene una masa invariante de cero, viaja en el vacío con una velocidad constante y presenta tanto propiedades corpusculares como ondulatorias ("dualidad onda-corpúsculo"). Se comporta como una onda en fenómenos como la refracción que tiene lugar en una lente o cuando viajan a través del espacio; sin embargo, se comporta como una partícula cuando interacciona con la materia para transferir una cantidad fija de energía.

La unidad de medida de la frecuencia de una radiación es el s^{-1} que se denomina también, Hertz (Hz). Las radiaciones de menor frecuencia, o mayor longitud de onda, son las radiofrecuencias utilizadas en telecomunicaciones; mientras que las de mayor frecuencia, o menor longitud de onda, son las correspondientes a los rayos X, rayos γ y rayos cósmicos. Al conjunto de radiaciones electromagnéticas se le denomina espectro electromagnético (Figura vii) y su naturaleza es idéntica para todas ellas.

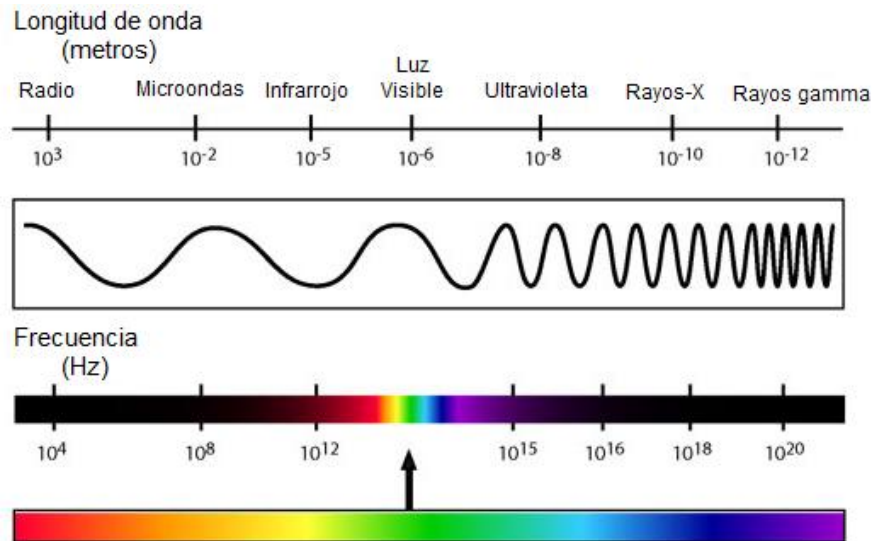
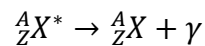


Figura vii. Espectro electromagnético.

2.5.4.2.1. Radiación gamma

Este es el tipo más penetrante de radiación. En el decaimiento γ , un núcleo pasa de un estado excitado a uno de baja energía y la diferencia de energía entre los dos estados es liberada en la forma de un fotón, por lo que no existe transmutación. Este decaimiento es representado de la siguiente forma:



donde ${}^A_ZX^*$ representa un núcleo excitado.

Como se vio en la sección anterior, los rayos gamma presentan longitudes de onda de 10^{-12} nm y son muy energéticos, además, al tratarse de ondas electromagnéticas, son muy penetrantes. Este tipo de emisión acompaña a las radiaciones alfa y beta.^[4]

2.5.5. Detectores de radiación

Para estudiar las emisiones en forma de partículas u ondas que emiten los núcleos inestables, primero es necesario detectarlas. El tamaño de dichas emanaciones, es muy pequeño y el ser humano no cuenta con un sentido que le permita percibir las, por lo que debemos hacer uso de aparatos llamados detectores de radiación.

El principio de funcionamiento de todos los detectores se basa en la interacción de la radiación con los átomos, moléculas o núcleos del material que conforma al detector. Lo anterior tendrá como resultado la formación de una señal. Teniendo en mente esto, los detectores se pueden clasificar de la siguiente manera:

Se considera como detector “pasivo” a aquel que puede ser utilizado sin necesidad de registro electrónico durante el proceso de irradiación. En estos, la señal obtenida de la interacción de la

radiación con el material que conforma al detector, será un cambio de color (emulsiones) o algún rastro que deje la radiación ionizante y que pueda ser fotografiado (cámara de chispas o de burbujas).

Por otro lado, se llama detector “activo” a aquel que necesita un sistema electrónico de lectura mientras es irradiado para obtener la señal, esta última consiste en pulsos de voltaje.

A continuación, en las tablas II.VII. y II.VIII. se muestran ejemplos de los detectores pasivos y activos, respectivamente:

Tabla II.VII. Clasificación de diferentes detectores pasivos.

Detector	Efecto	Medio
Emulsión fotográfica	Ionización	Sólido
Cámara de niebla	Ionización	Gas
Cámara de chispas	Ionización	Gas
Sólidos dieléctricos	Ionización	Sólido
Cámara de burbujas	Ionización	Líquido

Tabla II.VIII. Clasificación de los detectores activos

Detector	Efecto	Medio
Cámara de Ionización	Ionización	Gas
Detector Proporcional	Ionización	Gas
Detector Geiger	Ionización	Gas
Detector de Centelleo	Excitación con emisión de luz	Gas, líquido o sólido
Detector Cerenkov	Producción de luz por efecto Cerenkov	Gas, líquido o sólido
Detector semiconductor	Producción de electrones y huecos. Similar a ionización.	Sólido

El principio de funcionamiento de todos los detectores se basa en la interacción de la radiación con los átomos, moléculas o núcleos del material que conforma al detector. Esto tiene como resultado, directa o indirectamente, la generación de pares de iones, es decir, ionización. Estos pares de iones formados son recolectados al aplicar un campo eléctrico adecuado, donde, los iones cargados negativamente se colectan por un ánodo y los cargados positivamente por un cátodo. Lo anterior lleva a la formación de una señal eléctrica, la cual, gracias a un programa de cómputo, es posible observar y medir. De esta forma, se pueden detectar las radiaciones emitidas por los radionúclidos. La interacción que se lleva a cabo en el detector dependerá, principalmente, del tipo de radiación, de su energía y del material de detección, este último puede ser un gas, sólido o líquido. Estos aspectos se deben tomar en cuenta al seleccionar un detector.

Como se dijo anteriormente, los diferentes tipos de radiación interactúan de distintas maneras con la materia, es decir, los rayos gamma interactúan de manera totalmente distinta en comparación con las partículas cargadas como las α , β , los protones, etc. De igual forma, los neutrones, que no tienen

carga, interactúan de manera diferente que los dos anteriores. Por ello, cada tipo de detector es sensible a cierto tipo de radiación y a cierto intervalo de energía.

Además, dependiendo del modo en que operan, los detectores también se pueden dividir en dos tipos:

Si la señal obtenida es un valor promedio resultado de la detección de varias partículas, hablamos de un sistema de corriente; en cambio, si la señal consiste en pulsos de voltaje, un pulso por cada partícula detectada, hablamos de un sistema de pulsos. Generalmente, los sistemas de corriente son más sencillos que los de pulsos.

Por otro lado, independientemente del tipo de detector utilizado, dos de las características más importantes en ellos son: la resolución de energía y la eficiencia de detección.

2.5.5.1. Resolución de energía

Como se mencionó anteriormente, el detector debe convertir la radiación que incide en él en una señal eléctrica medible. Esta conversión se logra mediante una serie de procesos intermediarios; los cuales, están gobernados por leyes estadísticas. Como resultado, la amplitud de la señal resultante está sujeta a fluctuaciones. Además, el ruido ambiental igualmente contribuye a las fluctuaciones que presenta el detector.

Los rayos gamma detectados en un sistema espectroscópico producen picos en el espectro. Estos picos también pueden ser llamados líneas por analogía con los espectrómetros ópticos. El ancho de los picos está determinado por la resolución del detector. Una alta resolución permite observar dos líneas gamma, muy cercanas una de otra, de forma separada. Los sistemas de espectrometría gamma están diseñados para producir picos simétricos de la mejor resolución posible. La forma de los picos presenta generalmente una distribución Gaussiana. En la mayoría de los espectros la posición de los picos está determinada por la energía de los rayos gamma y el área del pico está determinada por la intensidad de los rayos gamma y la eficiencia del detector.

La forma más común de expresar la resolución del detector es por la llamada anchura a media altura o FWHM (full width at half maximum) por sus siglas en inglés. Este es el ancho del pico del rayo gamma a la mitad de la altura del punto más alto en la distribución del pico.^[11]

2.5.5.2. Eficiencia del detector

No todos los rayos gamma emitidos de la fuente radiactiva y que pasen a través del detector producirán una señal en este. La probabilidad de que la radiación interactúe con cierto espesor del material, dependerá del tipo de radiación, su energía, el mismo material y la forma que este tenga. Esto significa que de toda la radiación que llega al detector, sólo cierta cantidad interactuará con el volumen activo de este. A la fracción de la radiación incidente que sí interactúa con el detector y consecuentemente genera una señal en él se le llama, eficiencia del detector.

La eficiencia del detector, así como la resolución, puede ser expresada en términos absolutos o relativos. Los valores de eficiencia absoluta representan la probabilidad de que un rayo gamma de una energía específica pasando a través del detector interactuará y será detectada. Mientras que los

valores de eficiencia relativa se usan frecuentemente para los detectores de germanio y se compara la eficiencia del detector a 1332 keV con la de un detector de NaI de 3 pulgadas x 3. Así, valores de energía relativa mayores que 100% pueden alcanzarse al trabajar con detectores de germanio muy grandes.

La detección de la energía de los rayos gamma es un factor importante en la eficiencia del detector. Una curva de eficiencia puede obtenerse al graficar la eficiencia de varias energías. Esta puede ser utilizada para determinar la eficiencia de un detector a energías diferentes de las usadas para obtener la curva. Los detectores de germanio Hiperpuro, generalmente, tienen mayor sensibilidad.^[11]

2.5.6. Espectrometría o espectroscopia de rayos gamma

El presente trabajo se enfoca en los rayos gamma, los cuales, como se mencionó anteriormente, forman parte de la radiación electromagnética y presentan una longitud de onda de alrededor de 10^{-12} m, por lo que son considerados radiación ionizante.

2.5.6.1. Interacción de los fotones con la materia

Como se vio anteriormente, los rayos X y los rayos gamma son formas de la radiación electromagnética y el fotón es el cuanto o partícula elemental en ambos fenómenos. Para su detección, debe existir una adecuada interacción con los átomos, moléculas o núcleos del material que conforma al detector. Esta interacción de los fotones con la materia siempre se aborda bajo su aspecto corpuscular.

Las principales interacciones son la dispersión y la absorción de fotones. Las dispersiones pueden ser de dos tipos: elástica e inelástica. La dispersión elástica no es importante desde el punto de vista del proceso de detección ya que el medio activo del material del detector no adquiere una cantidad de energía suficiente para producir un par de iones. La dispersión inelástica es frecuentemente llamada Dispersión o Efecto Compton. Por otro lado, las interacciones en donde ocurre la absorción de los fotones son el Efecto Fotoeléctrico y la Producción de Pares. Las tres interacciones anteriores son las más importantes para la detección de fotones.

En la figura viii. pueden observarse estas interacciones mientras van cambiando las variables E_γ y Z.

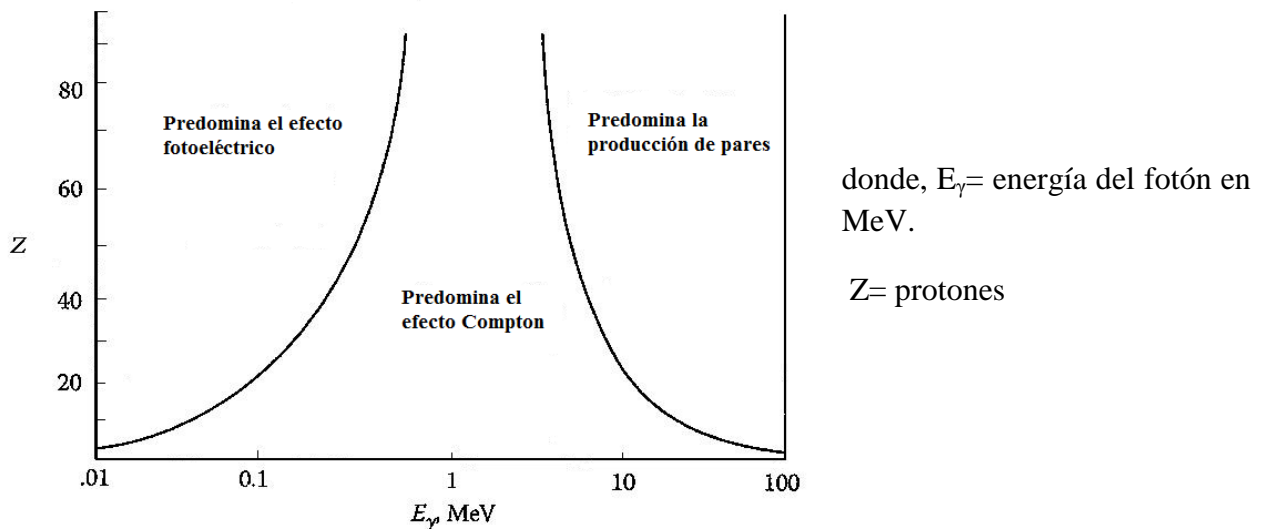


Figura viii. Principales interacciones de los fotones con la materia al modificar E_γ y Z .
 (Fuente: TSOULFANIDIS, N., et al., 2011^[11])

Así, observamos que si consideramos un fotón con $E_\gamma=0.1$ MeV que pasa a través de un material de carbono ($Z=6$), la dispersión Compton será el mecanismo predominante mediante el cual interactuarán los fotones con este material. Mientras que si un fotón con 10 MeV de energía viaja a través de Yodo ($Z=53$) interactuará principalmente por producción de pares. Por lo anterior, el tipo de interacción que tenga lugar entre los fotones y la materia dependerá, entre otras cosas, del número atómico de los átomos del material, así como de la energía que tengan las partículas.^[11]

2.5.6.1.1. Dispersión Compton

Esta se refiere a una colisión entre un fotón incidente con energía E_γ y un electrón de las capas externas del átomo. En esta colisión se transfiere parte de la energía del fotón al electrón y, si el electrón sobrepasa la energía de unión que existe entre este y el átomo, será dispersado. A este electrón se le llama “electrón Compton”. Sin embargo, el fotón no desaparece después de la colisión, únicamente disminuye su energía, debido a que le transfirió parte de ella al electrón, y es dispersado del átomo al igual que el electrón. Lo anterior se ilustra en la figura ix.

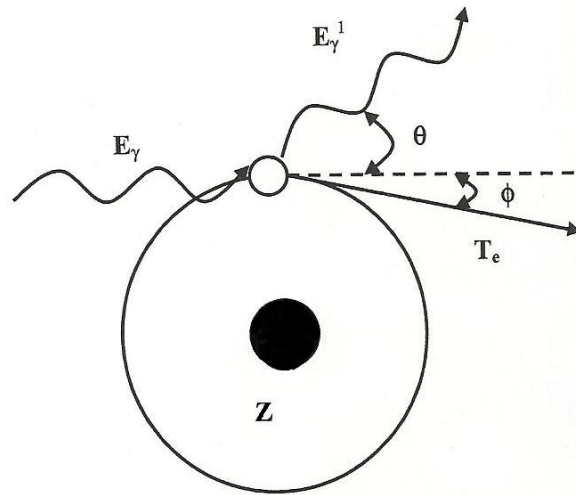


Figura ix. Dispersión o efecto Compton.

(Fuente: MURALEEDHARA, K., 2009^[8])

El fotón es desviado de su dirección original en un ángulo θ y con una energía reducida E'_γ . Por otro lado, ϕ es el ángulo de emisión del electrón con respecto a la dirección del fotón incidente. Lo anterior se representa como:

$$E_\gamma = E'_\gamma + \frac{1}{2}m_0v^2$$

$$\frac{E_\gamma}{c} = \frac{E'_\gamma}{c} \cos\theta + m_0v \cos\phi$$

$$0 = \frac{E_\gamma}{c} \sin\theta + m_0v \sin\phi$$

donde, m_0 = masa restante del electrón

v = velocidad

Resolviendo obtenemos:

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

donde, $\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0c^2}$ es la energía gamma expresada en unidades de la energía restante del electrón.

La ecuación anterior puede ser reescrita en términos de la longitud de onda del fotón incidente y del fotón dispersado:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0c} (1 - \cos\theta)$$

donde, h = constante de Planck

Así, la energía del fotón dispersado dependerá del ángulo de dispersión. La energía que toma el electrón es:

$$T = E_{\gamma} - E'_{\gamma} = \frac{\alpha E_{\gamma}(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

El ángulo de emisión ϕ del electrón está relacionado con el ángulo de emisión θ del fotón dispersado a través de

$$\cot\phi = (1 + \alpha)\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

La cantidad T, dada en la ecuación, es la energía que finalmente será utilizada en la formación del pulso resultante del detector.[8]

2.5.6.1.2. Efecto fotoeléctrico

Este resulta de la interacción entre un fotón incidente con energía E_{γ} y un electrón de un átomo como se observa en la figura x. El fotón incidente debe contar con energía superior a la energía de enlace del electrón orbital. Como resultado de esta interacción, toda la energía del fotón es absorbida por el electrón y, si la energía del fotón es mayor que la energía de unión electrón-átomo E_u , este último es expulsado de átomo con una energía cinética de T_e . A este electrón libre se le llama “fotoelectrón” y el fotón incidente desaparece. Lo anterior se expresa de la siguiente forma:

$$E_{\gamma} = T_e + E_u$$

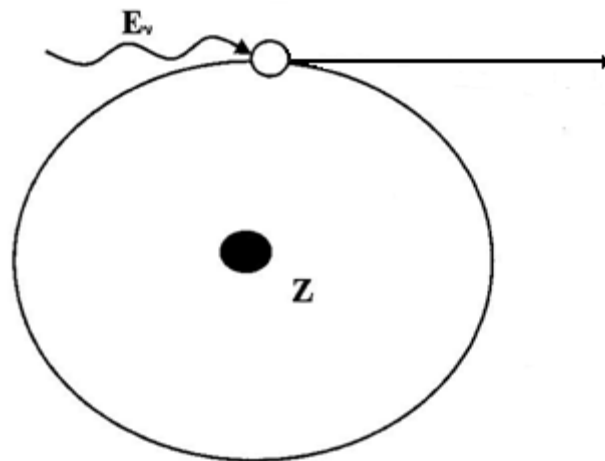


Figura x. Efecto fotoeléctrico.

(Fuente: MURALEEDHARA, K., 2009.[8])

El átomo que ha perdido un electrón quedará en un estado excitado y tendrá una vacante en el orbital del que salió el fotoelectrón. Durante la transición de este estado excitado a uno de menor energía, se emitirán rayos X, que pueden ser detectados también por el detector si este es lo suficientemente

espeso. Así, este efecto resulta en la absorción completa de la energía total del fotón incidente E_γ , por lo que el pulso resultante corresponderá a la energía total del fotón incidente.^[8]

2.5.6.1.3. Producción de pares

Este proceso resulta de la interacción de entre un fotón y un núcleo atómico. Al igual que en el efecto fotoeléctrico, el átomo absorbe la energía total del fotón incidente y este desaparece, no sin antes producirse un par electrón-positrón. El proceso puede representarse como se observa en la figura xi:

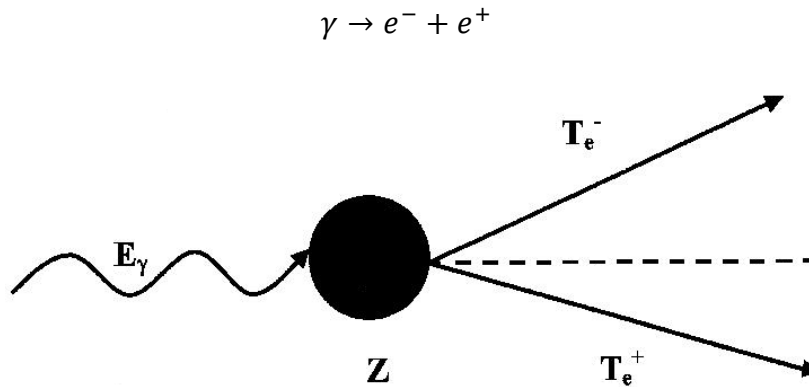


Figura xi. Producción de pares.
(Fuente: MURALEEDHARA, K., 2009^[8])

El balance de energía de la ecuación se puede escribir como:

$$E_\gamma = 2m_0c^2 + T_{e^-} + T_{e^+}$$

donde, $2m_0c^2$ = masa del electrón en reposo

T_{e^-} y T_{e^+} = energías cinéticas del electrón y positrón, respectivamente.

Por tanto, se puede observar que el proceso cuenta con una energía umbral dada por $2m_0c^2 = 1.022 \text{ MeV}$. Así, el proceso sólo es posible para fotones con energía arriba de 1.022 MeV . Esta es la cantidad de energía necesaria para crear la cantidad de materia contenida en un electrón y un positrón. Como se observa en la ecuación, si el fotón incidente tiene más de esta energía necesaria, la energía restante irá a la energía cinética del electrón y el positrón.^[8]

2.5.6.2. Detectores de Centelleo

De la variedad de detectores de centelleo existentes en el mercado, el de cristal de NaI activado con talio, NaI(Tl), es el más utilizado para la detección de rayos gamma, ver tabla II.IX. Los detectores de Centelleo con NaI(Tl) se utilizan cuando la resolución de energía no es el factor de medición más importante. Presentan las siguientes ventajas sobre los detectores de Ge y Si(Li):

1. Tienen alta eficiencia
2. Son menos costosos que los detectores semiconductores.

Como desventajas de estos detectores están, como ya se mencionó, su baja resolución de energía y el hecho de que necesariamente deben estar acoplados a un tubo fotomultiplicador para su uso.

2.5.6.3. Detectores de Germanio Hiperpuro

Estos son detectores semiconductores, ver tabla II.IX. La producción de germanio de alta pureza, es decir, con una concentración de impurezas de $\leq 10^{16}$ átomos/cm³, ha hecho posible la construcción de detectores con mayor espesor. Los detectores con estas características son llamados, detectores de Germanio Hiperpuro, en adelante dGH, y sustituyeron a los detectores Ge(Li). La ventaja de los dGH sobre los dGe(Li) es que los primeros únicamente se deben mantener a bajas temperaturas mientras están en uso, mientras que los segundos deben mantenerse a bajas temperaturas todo el tiempo.

Como ya se mencionó, su ventaja más importante es que tienen una excelente resolución de energía para la espectrometría gamma, además pueden ser almacenados a temperatura ambiente cuando no están en uso. En general, la eficiencia de detección de estos detectores es baja, sin embargo, estos detectores son fabricados con diferentes geometrías por lo que existe la posibilidad de utilizar configuraciones geométricas especiales que permiten incrementar o disminuir la eficiencia de detección. Su baja eficiencia de detección es compensada por una excelente energía de resolución.

Tabla II.IX. Detectores utilizados en espectrometría gamma.

Detector	Ventajas	Desventajas
Detector de Centelleo NaI(Tl)	<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia de detección. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja resolución de energía.
Detector de Germanio	<ul style="list-style-type: none"> • Ofrece una excelente resolución de energía. • Alta eficiencia de detección si se utiliza una geometría adecuada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuando se efectúa un análisis, es necesario el uso de un criostato. • Eficiencia de detección baja para algunas geometrías.

2.5.7. Funcionamiento de los Detectores de Germanio Hiperpuro

Estos detectores son de estado sólido debido a que su volumen de detección activo se presenta en forma de cristales. Opera de manera similar a los detectores de estado gaseoso, sin embargo, debido al estado sólido, el detector es aproximadamente 2,000-5,000 veces más denso y por lo tanto mucho más eficiente en la detección de fotones. Además, a diferencia con otros, en los detectores

semiconductores como el dGH los acarreadores de carga no son pares electrones-iones sino electrones y “huecos”. Para comprender el funcionamiento de los dGH es necesario explicar las propiedades de los semiconductores.

2.5.7.1. Semiconductores

Los sólidos pueden dividirse en tres grupos de acuerdo con su propiedad de conductividad eléctrica: conductores, aislantes y semiconductores. En la tabla II.X.se muestra la clasificación y las características de los sólidos según sus propiedades de conducción.

Tabla II.X. Clasificación de los sólidos.

Clasificación	Características bajo un campo eléctrico
Conductor	Los electrones se mueven libremente a cualquier voltaje mayor de cero.
Semiconductor	Los electrones no pueden moverse a bajas temperaturas (cercas al cero absoluto) bajo ningún voltaje. Conforme aumenta la temperatura del semiconductor, los electrones pueden moverse y la corriente eléctrica fluirá a voltajes moderados.
Aislante	Los electrones no pueden moverse bajo cualquier voltaje

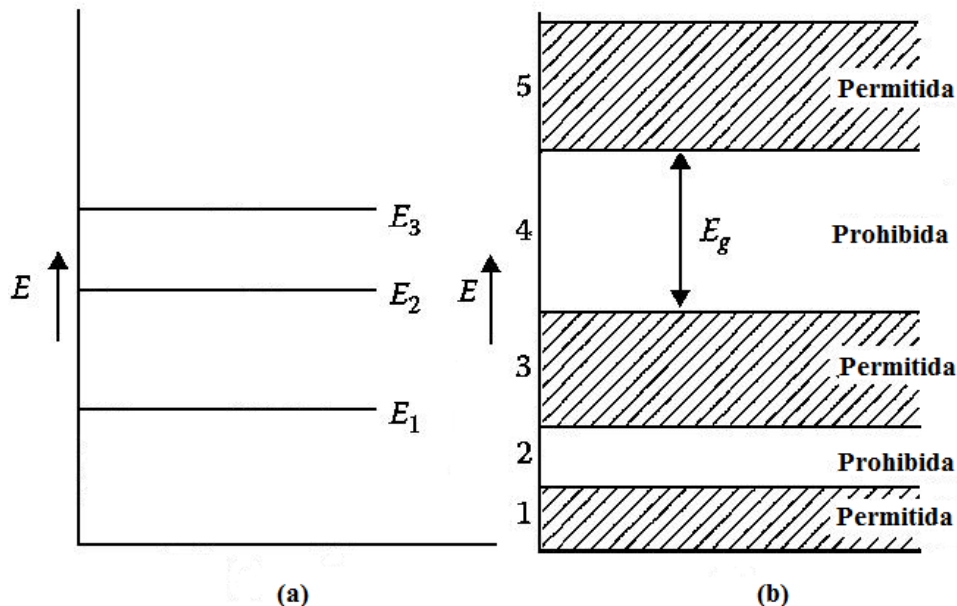


Figura xii. Estados de energía (a), estados de energía de un sólido (b).

(Fuente: TSOULFANIDIS, N., et al., 2011.[11])

En un átomo libre, los electrones existen únicamente en ciertos estados de energía (Figura xii (a)). En un sólido, los valores de energía de los electrones se encuentran agrupados en bandas (Figura xii (b)) y los electrones únicamente se están en tres estados permitidos, 1, 3 y 5, pero no en las bandas 2 y 4.

Como se observa en la figura xii (b), un electrón puede moverse de la banda 3 a la 5 si el electrón tiene una energía E_g y si existe un lugar disponible en la banda 3 que pueda ocupar el electrón. La última banda en donde están permitidos los electrones se le llama banda de valencia y una banda después de esta se encuentra la banda de conducción. La estructura de estas bandas de energía determinan las propiedades macroscópicas del sólido.

Ubicándonos en la figura xiii., lo que se observa para los aislantes (a), es que aunque la banda de valencia está llena de electrones, estos no pueden pasar a la banda de conducción ya que la energía necesaria para atravesar a la llamada banda prohibida es muy grande. Por otro lado, en los materiales conductores (b), la banda de conducción se encuentra parcialmente ocupada y bajo un campo eléctrico los electrones se mueven libremente; esto debido a que no existe una banda prohibida por lo tanto la conductividad es posible siempre.[11]

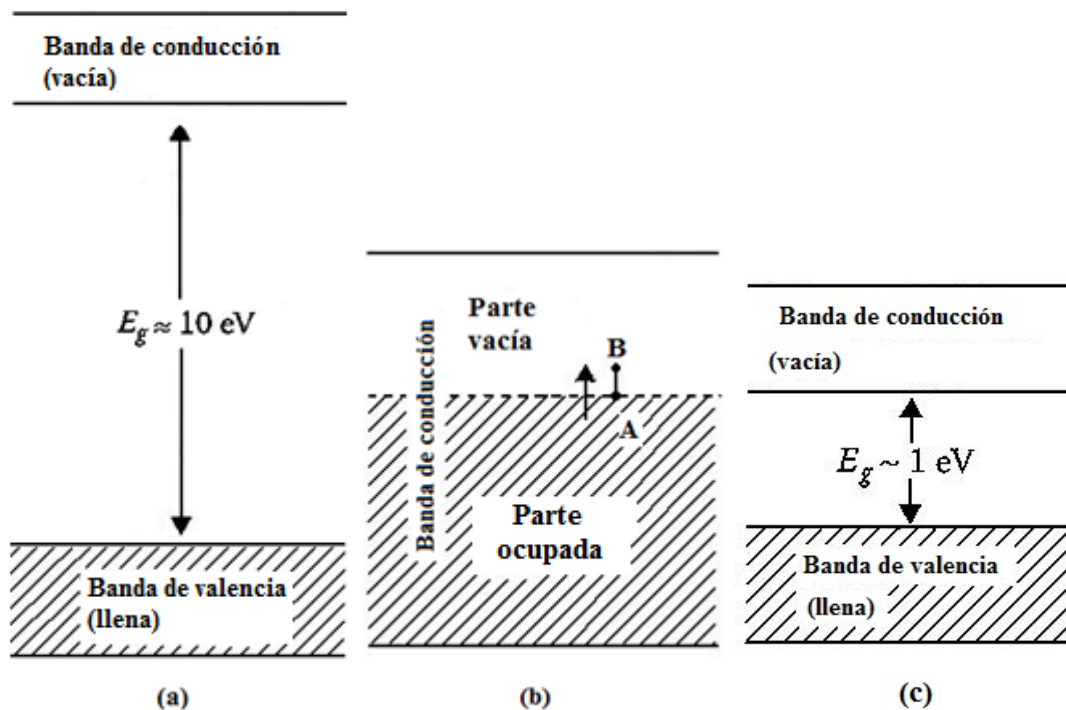


Figura xiii. Bandas de valencia y conducción para cada tipo de sólido.

(Fuente: TSOULFANIDIS, N., et al., 2011.[11])

En el caso de los semiconductores (c), al igual que los aislantes, la banda de valencia está llena y la de conductividad vacía, sin embargo, la banda prohibida es pequeña, es decir, requiere de poca energía. Por lo anterior, a temperaturas muy bajas, cercanas al cero absoluto, la conductividad de un semiconductor es cero al igual que un aislante. Sin embargo, al aumentar la temperatura algunos electrones obtienen suficiente energía para cruzar la banda prohibida y llegar a la banda de

conducción. Una vez ahí, los electrones se moverán, al igual que un conductor, bajo un campo eléctrico.

Cuando un electrón pasa a la banda de conducción deja un espacio vacío en la banda de valencia, a esto se le llama “hueco” y se refiere a la ausencia de un electrón. Dichos huecos son tratados como partículas con carga positiva $-(-e) = +e$ y contribuyen a la conductividad al igual que los electrones. En un semiconductor puro y eléctricamente neutro, el número de electrones es igual al número de huecos.^[11]

2.5.7.2. Impurezas

Las propiedades de un detector semiconductor puro cambian al introducir impurezas. Así se puede aumentar la conductividad del material al crearse nuevos estados y obtener electrones o huecos extra. Como se puede observar en la figura xiv., el Germanio tiene 4 electrones de valencia.

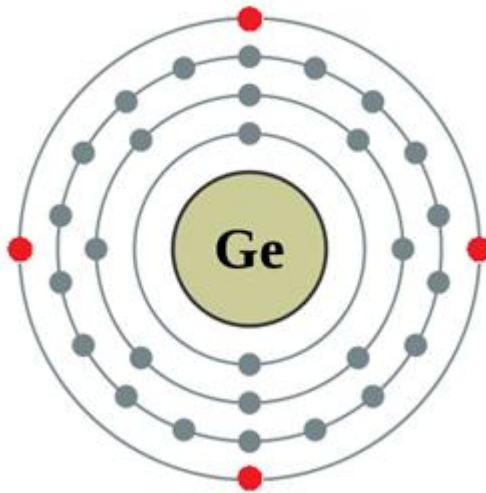


Figura xiv. Átomo de Germanio con 4 electrones de valencia.

En un cristal puro de Ge, cada electrón de valencia forma un enlace covalente con los átomos vecinos, esto se ilustra en la figura xv.(a). Si se introduce en esta red cristalina un átomo de As (arsénico) como impureza, el cual cuenta con cinco electrones de valencia, cuatro de estos electrones formarán enlaces covalentes con los átomos de Ge a su alrededor, pero el quinto electrón quedará desapareado, figura xv (b). Este quinto electrón se ubica en un estado muy cercano a la banda de conducción, estos estados son llamados donadores y los átomos de impurezas que crean estos estados son llamados átomos donadores. Por lo anterior, el quinto electrón necesitará de una cantidad pequeña de energía para llegar a la banda de conducción. El semiconductor con átomos donadores crea una gran cantidad de electrones y una menor cantidad de huecos. Su conductividad estará dada principalmente por electrones y se le llama semiconductor tipo N.

En el caso contrario, figura xv. (c), si las impurezas son átomos de Ga (galio), el cual cuenta con tres electrones de valencia, únicamente existirán tres enlaces covalentes con los átomos de Ge, dejando un hueco. El átomo de Ga se comportará como un ion negativo después de aceptar el electrón extra.

La presencia de los átomos de Ga crea nuevos estados de energía muy cercanos a la banda de valencia, estos son llamados estados aceptores y las impurezas son llamadas átomos aceptores. Por cada electrón que se mueve al estado aceptor se forma un hueco, por lo que esta impureza (átomos) aceptores crea huecos, los cuales tienen carga positiva y el semiconductor es llamado de tipo P.

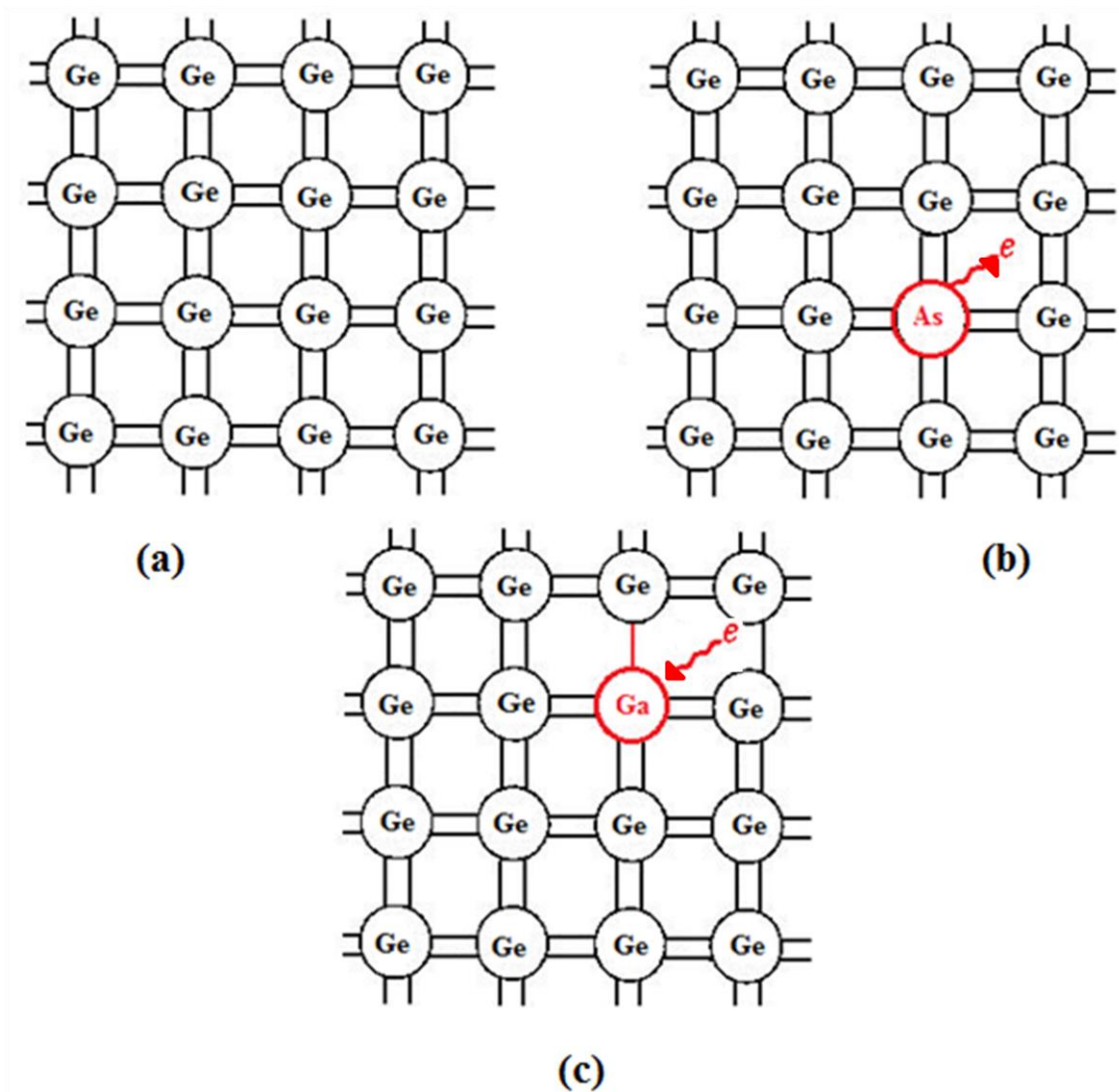


Figura xv. Red cristalina del cristal del germanio; pura (a), con impurezas donadoras (b) y con impurezas aceptoras (c).

(Fuente: TSOULFANIDIS, N., et al., 2011.[11])

2.5.7.3. Unión P-N

Un semiconductor tipo N tiene un exceso de electrones mientras que uno tipo P tiene un exceso de huecos. Si un semiconductor tipo P y uno N se juntan, los electrones y los huecos se moverán principalmente por dos razones:

- 1.- Pasarán de un área con alta concentración a una con menor concentración, es decir, por difusión.

2.- Bajo la influencia de un campo eléctrico, tanto electrones como huecos se moverán en direcciones opuestas debido a su carga negativa y positiva, respectivamente.

Sin una corriente externa, al tener en contacto un semiconductor P con uno N los electrones, por difusión, pasarán del tipo N al tipo P mientras que los huecos harán lo contrario. Por lo anterior, la región N del semiconductor estará cargada positivamente y la región P negativamente. Esta difusión producirá un equilibrio en la concentración de electrones, por lo que existirá una diferencia de potencial entre las dos regiones. Esta combinación de semiconductores P y N con una diferencia de potencial entre estos dos constituye la unión P-N. Esto se puede observar en la figura xvi (a).

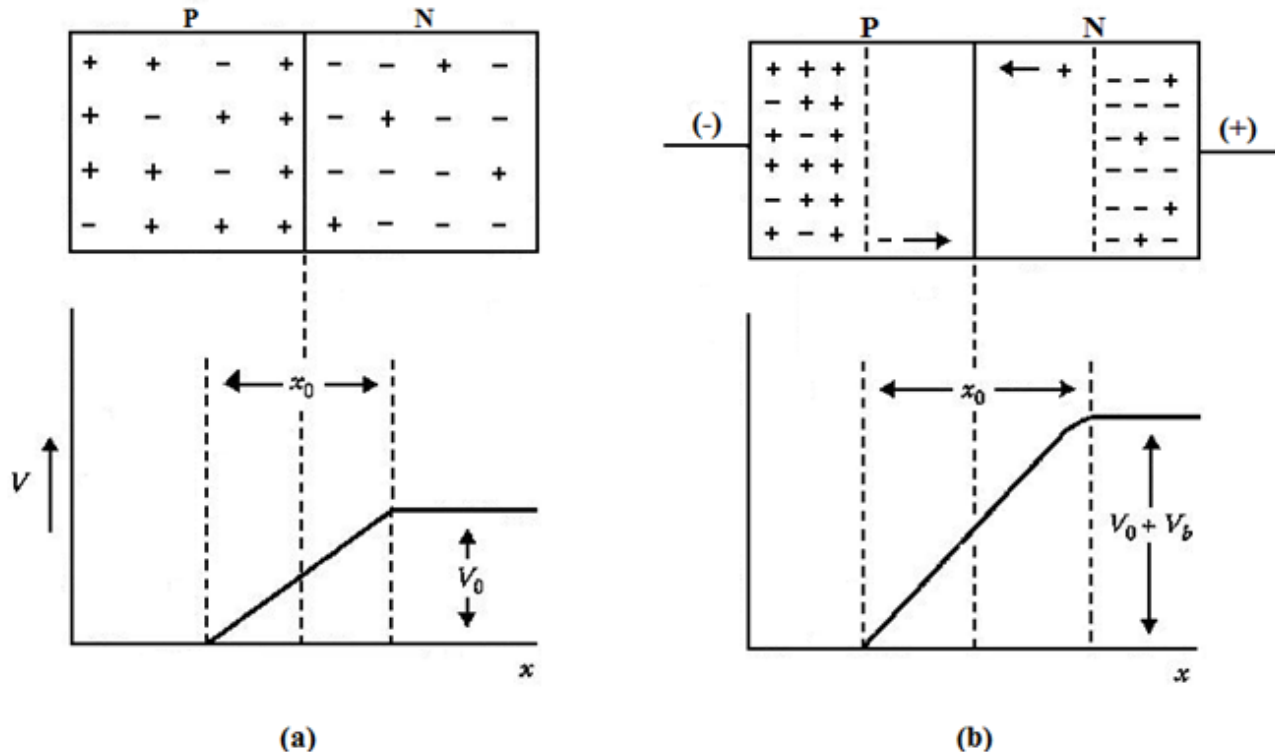


Figura xvi. Formación de V_0 por: osmosis (a) y polarización inversa (b).

(Fuente: TSOULFANIDIS, N., et al., 2011.[11])

El potencial V_0 dependerá de la concentración electrones-huecos y es del orden de 0.5 V. Si se aplica un voltaje externo V_b con el polo positivo conectado al lado N, el potencial total a través de la unión se convierte en $V_0 + V_b$. A esto se le llama polarización inversa. Este voltaje externo dificulta el movimiento de los electrones y los huecos y provoca que la región donde coexisten el potencial y el campo eléctrico se incrementen. Por lo anterior, para un funcionamiento óptimo de los detectores de rayos gamma, frecuentemente se utiliza la unión P-N aplicando una polarización inversa. Lo anterior se observa en la figura xvi (b).

El calor – aumento de temperatura – no es la única forma en la que los electrones pueden adquirir energía. La absorción de radiación o la colisión con una partícula puede producir el mismo efecto. Como se observa en la figura xvii., para el funcionamiento de los detectores la radiación incidente debe atravesar la unión P-N del detector para provocar la producción de pares de electrones y huecos.

Los cuales, bajo la influencia de un campo eléctrico son recolectados y posteriormente producen un pulso que puede ser almacenado.^[11]

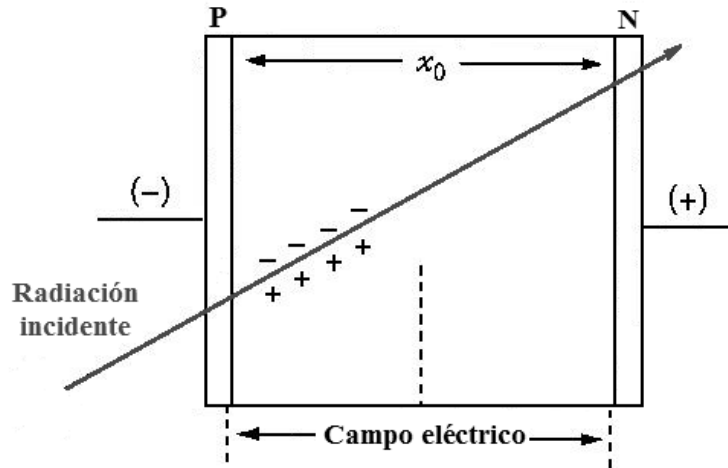


Figura xvii. Detección de radiación gamma en unión P-N.

(Fuente: TSOULFANIDIS, N., et al., 2011.^[11])

No obstante el alto grado de pureza alcanzado en el dGH, siempre se encuentra presente una pequeña cantidad de impurezas. Por lo que aún tiende a ser del tipo P debido a residuos de impurezas aceptoras y a la existencia de centros aceptores por defectos de la red cristalina.

2.5.7.4. Geometría de detección

Como ya se mencionó, estos detectores son fabricados con diferentes geometrías por lo que existe la posibilidad de utilizar configuraciones geométricas especiales para alcanzar necesidades específicas de la medición. Como ejemplos se muestran en la figura xviii. la geometría coaxial (a) y la tipo pozo (b).

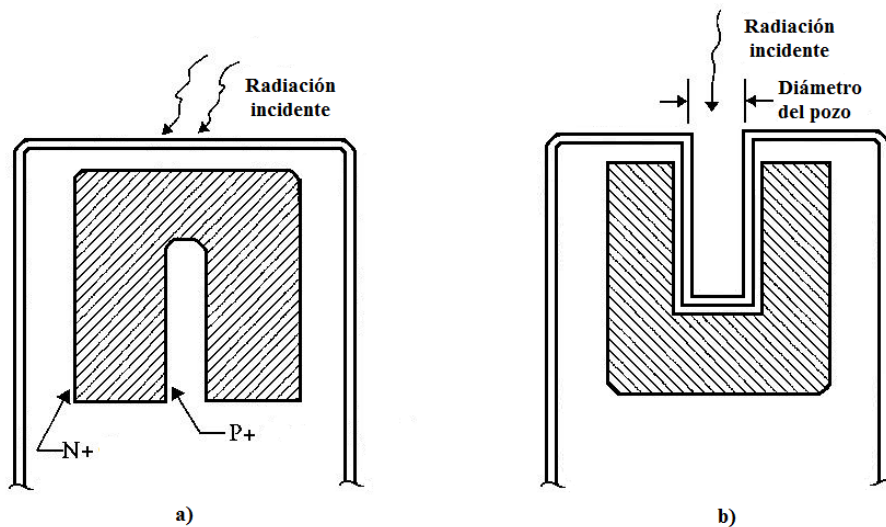


Figura xviii. Geometrías utilizadas en los dGH: coaxial (a) y tipo pozo (b).

(Fuente: TSOULFANIDIS, N., et al., 2011.^[11])

Capítulo 3.- Instrumentación

En este capítulo se describe la instrumentación utilizada en el presente estudio. A continuación, en la figura xix., se muestra el diagrama del sistema experimental. Este consta en un sistema de detección, el cual detecta los fotones gamma y requiere de un blindaje para minimizar el ruido proveniente del ambiente; le sigue un sistema electrónico cuya función principal es amplificar los pulsos obtenidos en el sistema anterior y formar el histograma de energías gamma. Finalmente se utiliza un equipo de cómputo que permite analizar los espectros generados y obtener los resultados del análisis.

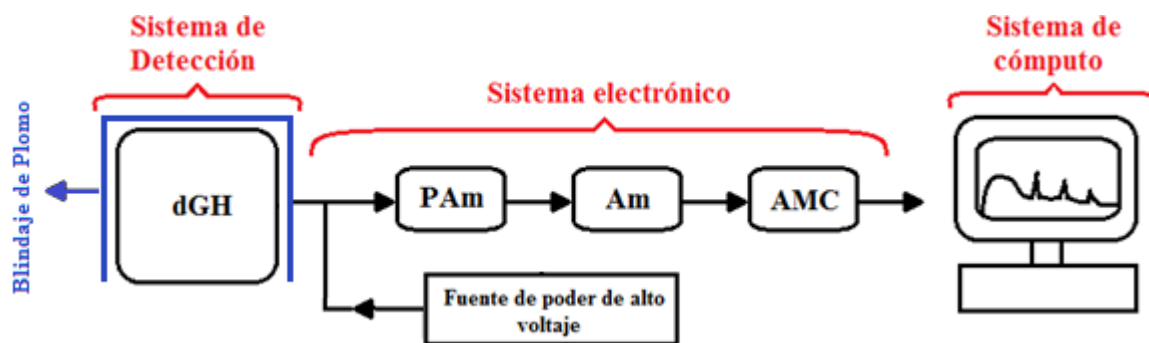


Figura xix. Diagrama del sistema experimental.

3.1. Sistema de detección

3.1.1. Detector de Germanio Hiperpuro

Como sistema de detección de radiación gamma se utilizó un detector de Germanio Hiperpuro (High-Purity Germanium) marca Ortec®, en adelante "dGH". Dicho detector se encuentra en el Laboratorio de Dosimetría ubicado en el edificio Van den Graaff del Instituto de Física, UNAM (Figura xx).



Figura xx. Detector utilizado de Germanio Hiperpuro.

El dGH utilizado cuenta con una geometría coaxial tipo P. En la figura xxi (a) se puede apreciar el cristal de germanio de alta pureza en el interior del detector; dicho cristal en el medio presenta una capa de boro, el cual representa una impureza aceptora (tipo P) y por lo tanto generadora de huecos. Por otro lado, la parte externa del cristal está cubierta una capa de litio, el cual es una impureza donadora (tipo N) y generadora de electrones. Las características anteriores forman la unión P-N que se describió en el capítulo 2. Por último, este sistema está rodeado de dos capas de aluminio, lo que

representa el volumen no activo del detector. En la figura xxi (b) se muestra el criostato necesario para enfriar el detector, el cual consta de un recipiente llamado Dewar que contiene nitrógeno líquido lo que enfría todo el sistema a través de un dispositivo llamado dedo frío. En la misma figura también se puede apreciar el dGH y el preamplificador, sin embargo, este último pertenece al sistema electrónico que se mencionará más adelante.

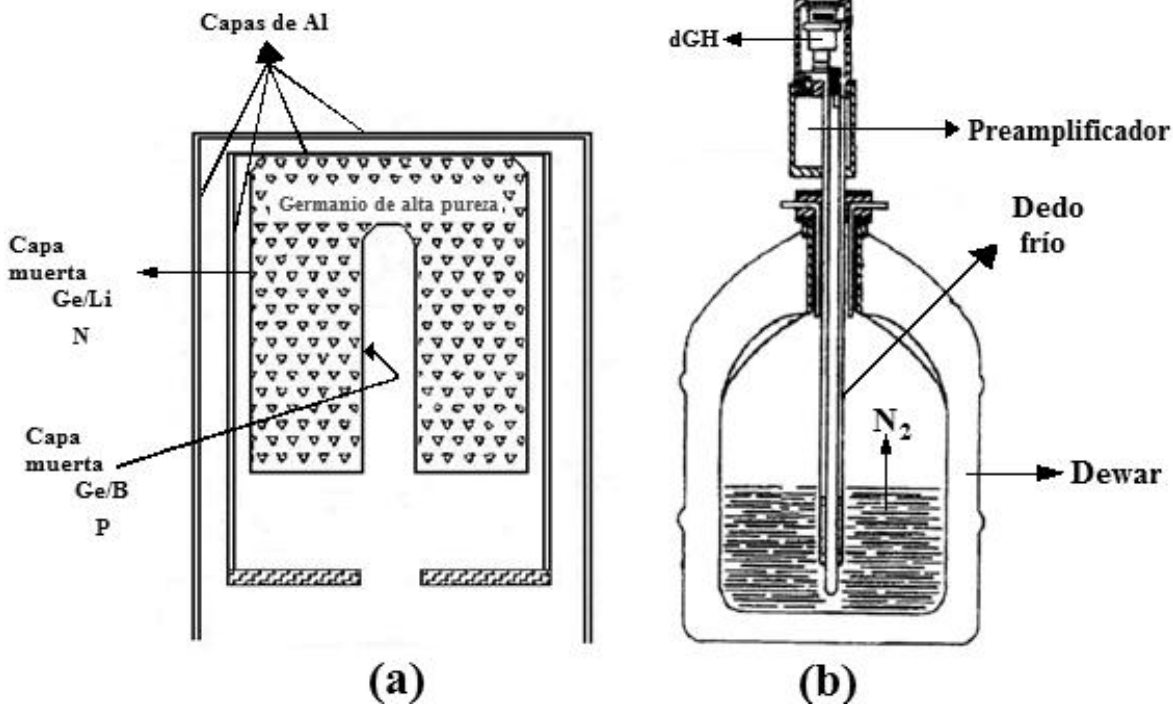


Figura xxi. Geometría coaxial del detector (a); criostato unido al dGH (b).

Para realizar el análisis en el dGH, es necesario utilizar un escudo o blindaje que cubra al detector; esto para disminuir el paso de la radiación de fondo al dGH y evitar así ruido electrónico excesivo en el espectro resultante. Para este estudio se utilizó como blindaje una caja de plomo con dimensiones de 36.4 x 33.6 x 35 cm y cuyas paredes tenían un grosor de 7.5 cm de ancho, este se puede observar en la figura xxii.



Figura xxii. Blindaje de plomo.

3.2. Sistema electrónico



Figura xxiii. Sistema electrónico: Fuente de poder de alto voltaje (a), amplificador (b) y analizador multicanal (c).

3.2.1. Fuente de poder de alto voltaje

La fuente de poder de alto voltaje utilizada fue marca Ortec® modelo 45 y se puede apreciar en la figura xxiii (a). Esta fuente provee el alto voltaje necesario para las operaciones del detector, ya sea positivo o negativo. Para los estudios realizados se utilizó una corriente positiva de 3500 V.

3.2.2. Preamplificador (PAm)

Una vez que se detectan fotones gamma, los pulsos eléctricos producidos en el dispositivo detector son recibidos en un preamplificador cuyo objetivo es entregar una señal de tensión de crecimiento y decremento exponencial.^[23] El preamplificador está ubicado entre el Dewar y el dGH como se observó en la sección referente al sistema de detección (figura xxi (b)). También es necesario para minimizar las fuentes de ruido electrónico que pueda alterar la señal.

3.2.3. Amplificador (Am)

Se utilizó un amplificador marca Ortec® modelo 570, el cual se puede observar en la figura xxiii (b). La señal proveniente del preamplificador es muy débil, dada en unidades de milivolt (mV). Antes de que pueda ser procesada, debe ser amplificada en un factor de 1000 veces o más para que pueda ser analizada en los dispositivos siguientes.

3.2.4. Analizador Multicanal (AMC)

Un analizador multicanal marca Ortec® ASPEC-927 fue utilizado para el estudio y se puede observar en la figura xxiii (c). El sistema analizador de pulsos es de tipo multicanal y registra o guarda los pulsos de acuerdo con su altura y cada unidad de almacenamiento es llamada “canal”. La altura del pulso tiene relación con la energía de la partícula que tiene contacto con el detector.^[10] Cada pulso es guardado en un canal en particular correspondiente a cierta energía. El objetivo de este dispositivo es obtener el espectro de energía procesando los pulsos de tensión del amplificador, para lo cual cuenta con un conversor Análogo-Digital. La distribución de amplitudes de los pulsos permite la discriminación energética de las radiaciones incidentes y al contar el número de veces que los pulsos de determinada altura son producidos es posible elaborar un histograma.

3.3. Equipo de Cómputo

El histograma o espectro generado en el dispositivo anterior se analizó por medio del programa MAESTRO ® -32 v6 ORTEC® en la computadora. Al procesar los datos en una hoja de cálculo obtenemos un gráfico de las cuentas por unidad de tiempo contra la energía expresada en keV (kilo electrón volt).

3.4. Recipiente Marinelli

Para llevar a cabo el análisis se debe colocar la muestra sobre el dGH, para esto se utilizó un recipiente llamado “Marinelli”. Dicho recipiente está hecho de polipropileno, es capaz de contener muestras sólidas y líquidas y se adecua perfectamente a la geometría del detector. Algunas ventajas adicionales de este recipiente son que evita el derrame de muestras líquidas, provee una geometría más simétrica y permite que la muestra esté más cerca del detector. Además, incrementa la eficiencia de conteo ya que, como se puede observar en la figura xxiv (a), la muestra se encuentra rodeando al detector. En la figura xxiv (b) se observa el recipiente Marinelli utilizado.

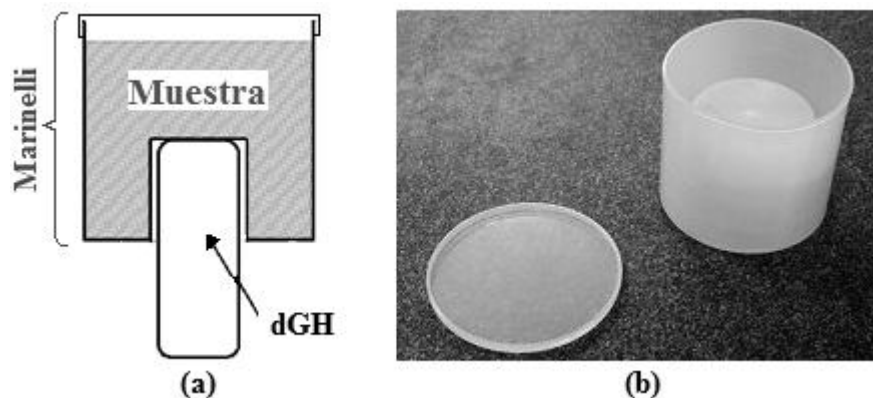


Figura xxiv. Acoplamiento del recipiente Marinelli con el dGH (a); recipiente Marinelli utilizado (b).

Capítulo 4.- Metodología

En este capítulo se explica la metodología experimental llevada a cabo para la realización del estudio, la cual se ilustra en la figura xxv.

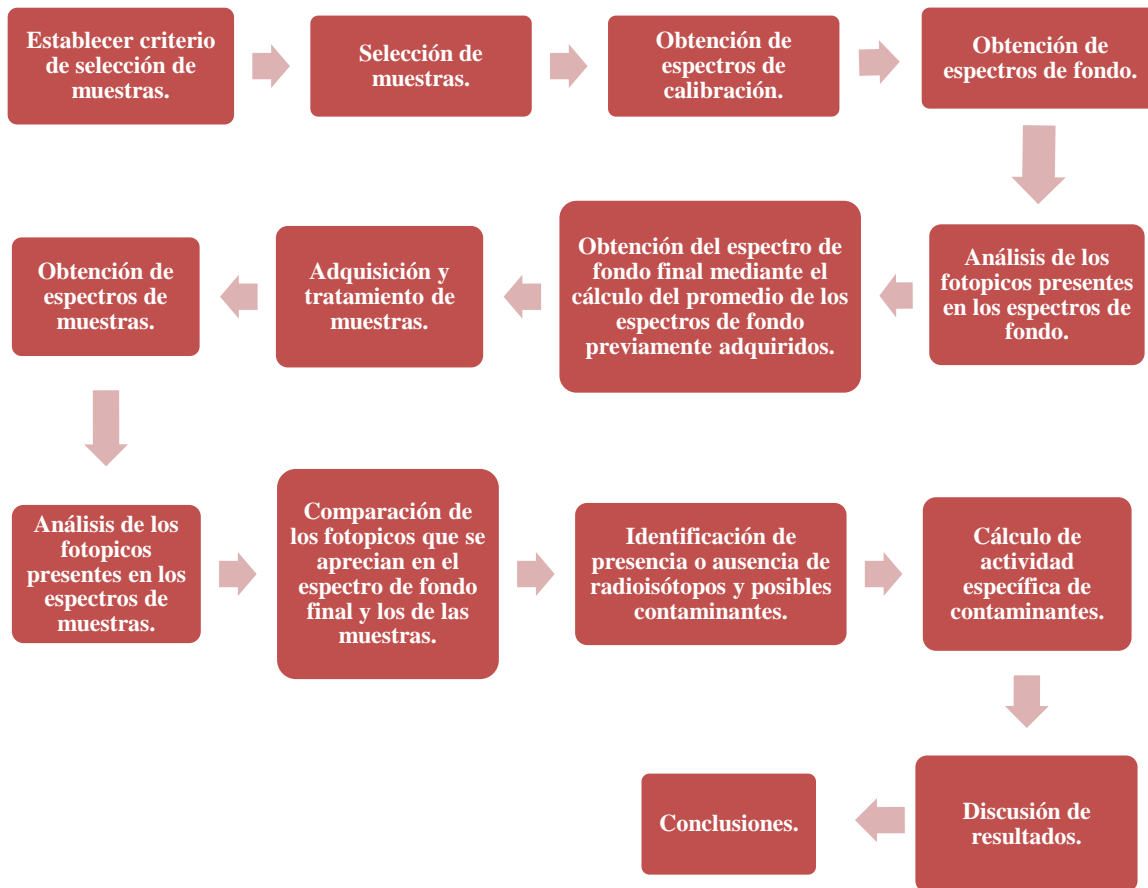


Figura xxv. Esquema de bloques de la estrategia experimental.

4.1. Criterio de selección de muestras

4.1.1. Productos cárnicos

Para las muestras de productos cárnicos, como criterios de selección de las muestras se tomaron en cuenta el consumo nacional aparente y el comercio exterior, es decir, las importaciones y exportaciones del producto. En la tabla I.I. presentada en la sección 1.1.1. (Consumo de productos del sector pecuario en México, ver pág. 5) de la presente tesis, se observa que el tipo de carne que se consume mayormente en México es la de gallo o gallina, comúnmente conocida como pollo, seguida de la proveniente del ganado bovino y después la de ganado porcino. En cuanto al comercio exterior, podemos observar en la sección 1.1.2. (Comercio exterior de productos pecuarios, ver pág. 7) los datos de comercio exterior para cada tipo de carne. Respecto a las importaciones, al comparar las tablas I.III., I.V. y I.VII. (págs. 8, 10 y 11, respectivamente), se observa que la carne de pollo es la que participa de manera más importante, seguida de la carne de ganado porcino y por último la de

bovino. Mientras que para las exportaciones esto se invierte, ya que la carne de ganado bovino participa con mayor volumen, seguida de la carne de ganado porcino y por último la proveniente del pollo.

4.1.2. Quesos

Para el caso del derivado lácteo llamado queso, se tomaron como criterios de selección el volumen de producción de cada tipo de queso, presentado en la tabla I.II. (ver pág. 6), así como a la importación y exportación del producto presentados en las tablas I.IX. y I.X. (pág. 13). Los quesos presentan una clasificación muy extensa debido a que en su elaboración participan muchas variables, lo que le confiere características distintas a cada tipo de queso. Se eligió una clasificación sencilla de quesos madurados y frescos. La tabla I.II. aporta datos sobre el volumen nacional de producción de algunos tipos de quesos, se puede observar que el queso denominado “fresco” es el que se produce en mayor cantidad, seguido del “amarillo” y el “panela”. Por otro lado, el queso tipo manchego es el único queso madurado que se presenta en dicha tabla. Sin embargo, según la NOM-121-SSA1-1994, el término queso fresco se le da al producto que se caracteriza por contener alto contenido de humedad, sabor suave y no tener corteza, pudiendo o no adicionarle ingredientes opcionales y tener un periodo de vida de anaquel corto, requiriendo condiciones de refrigeración. Por lo anterior, el término “fresco” se puede dar a otros tipos de queso como el panela o el ranchero.

Las tablas I.IX. y I.X. presentan los datos de comercio exterior para quesos. Con excepción de los quesos frescos y de pasta azul, en dichas tablas no se presentan los datos para cada tipo de queso, sino una clasificación general. En el caso de las exportaciones, en la tabla I.X., se observa que los quesos frescos en 2012* participan con el 6.7% del volumen de las exportaciones totales, mientras que en la tabla I.IX., referente a las importaciones participaron con el 8.9% del volumen de las importaciones totales.

4.2. Selección de muestras

Como resultado del análisis anterior, se seleccionaron como muestras de productos cárnicos a la carne fresca de ganado bovino, porcino y de gallo o gallina, es decir, pollo.

Para el caso de los quesos, siguiendo la clasificación de madurados y frescos que se eligió, se seleccionaron al queso tipo manchego y al panela. Lo anterior debido a que, el queso manchego es el queso madurado que se produce en mayor volumen en el país, de acuerdo con la tabla I.II. Mientras que el queso panela, aunque no figura como el más producido en la misma tabla, en concordancia con la NOM-121-SSA1-1994, entra en la clasificación de queso fresco y es producido de manera importante en el país.

4.3. Obtención de espectros de calibración

Para la calibración del sistema multicanal del dGH fue necesario utilizar patrones radiactivos que cubrieran el intervalo de interés para la medición. Toda calibración debe realizarse al menos con tres fuentes de radiación gamma conocidas y es preferente que se abarque un rango de energía amplio, es

decir, que exista una separación energética considerable entre cada radionúclido. Para la obtención del espectro de calibración de energías gamma se utilizaron fuentes radiactivas con energías bien definidas: ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co y ^{40}K .

El ^{60}Co decae por emisión γ a ^{60}Ni y después emite dos energías de radiación gamma, de manera que es muy útil en la calibración del equipo, ya que con una sola fuente radioactiva se obtienen dos puntos que se asignaron a la escala de energías del espectro.

El análisis se llevó a cabo bajo las mismas condiciones que el análisis de muestras y como fuente de ^{40}K se uso el contenido ambiental. A continuación, en la tabla IV.I.se muestran los datos de los patrones energéticos utilizados. El espectro de calibración de dicho patrón de calibración se presenta en la figura xxvi.

Tabla IV.I. Datos de radioisótopos utilizados como patrones.

Radioisótopo	Energía asociada a los fotones (keV)	No. de canal (centroide)
^{241}Am	60	462
^{137}Cs	662	5198
^{60}Co	a) 1173 b) 1332	a) 9216 b) 10469
^{40}K	1460	11479

A continuación, se muestran el espectro de calibración de energías.

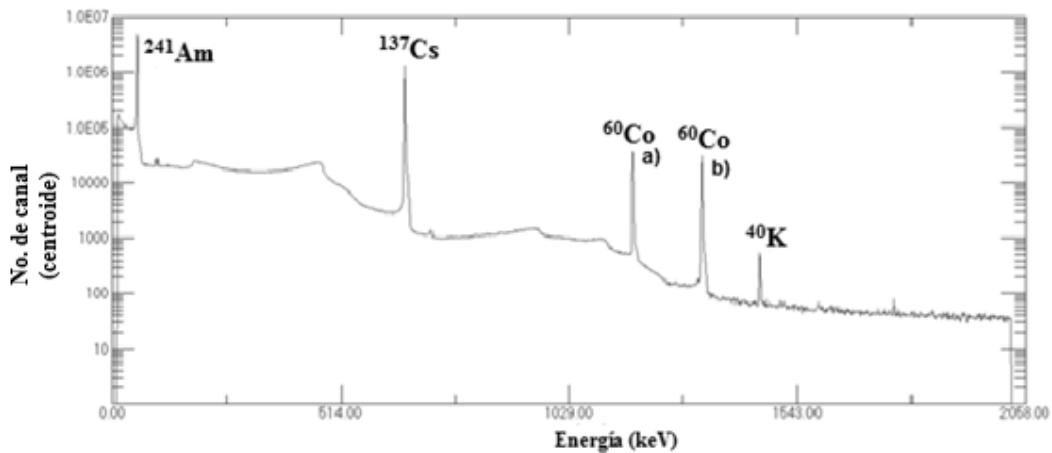


Figura xxvi. Espectro de calibración.

La adecuada calibración del equipo nos permitió encontrar y situar al fotopico del ^{40}K en los histogramas y de esta manera, si así se quisiera, a cualquier otro fotopico de interés.

4.4. Obtención de espectros de fondo finales

Previo a la obtención de los espectros de muestras, fue necesario obtener dos espectros de fondo mediante el detector de Germanio Hiperpuro. Estos deben tomarse bajo las mismas condiciones de análisis que las muestras y fungen como blanco del análisis debido a que se realiza todo el procedimiento sin la presencia de la muestra. En ellos se registra la radiación gamma proveniente de la radiación cósmica y los radioisótopos presentes en los alrededores del detector como el material presente en el laboratorio, el radón, entre otros. De esta manera, al comparar los espectros de cada muestra con estos blancos se puede conocer la radiación proveniente únicamente de la matriz alimentaria analizada.

Posteriormente, se calcula el promedio de las energías registradas en dichos espectros y el espectro resultante representa el espectro de fondo final; el cual será utilizado en el análisis de los contaminantes radiológicos.

4.5. Adquisición de muestras

Todas las muestras se seleccionaron de manera aleatoria, en su mayoría se adquirieron en la Ciudad de México con excepción de una muestra de carne de bovino que se obtuvo en el estado de Veracruz, esto debido a que, en un principio, el presente estudio contemplaba su participación en la creación de un atlas del estado actual de las concentraciones de elementos radiactivos en alimentos en el territorio mexicano. Sin embargo, posteriormente se decidió que la contribución principal del estudio recaería en la elaboración de protocolos de análisis, por lo que el muestreo se limitó a la capital del país. En la tabla IV.II, se presentan los datos de todas las muestras seleccionadas y analizadas.

4.5.1. Muestras de carne fresca

Todas las muestras se etiquetaron en el momento de su compra y se mantuvieron en refrigeración en un lugar limpio evitando su contaminación con otras sustancias hasta el momento de su análisis.

Las muestras adquiridas en supermercado contenían la siguiente información: Nombre del supermercado, tipo de corte, precio por kg, los kg de producto en el empaque, la fecha en la que se empaquetó y la fecha en que debe consumirse preferentemente el producto. El número de lote no se proporciona en el etiquetado de productos frescos. De la información proporcionada en el etiquetado, únicamente se registró el supermercado donde se adquirió, el tipo de corte y la fecha de compra. Para el producto obtenido del estado de Veracruz, únicamente se registró el mercado donde se adquirió, el nombre de la carnicería y la fecha de compra.

4.5.2. Muestras de queso

Para las muestras de quesos se adquirieron productos a granel provenientes de supermercados. El etiquetado de estos productos incluía: la marca comercial, el precio por kg, los kg de producto en el empaque y no se incluía el número de lote del producto. De este etiquetado se registró el supermercado donde se adquirió, la marca comercial, tipo de queso y la fecha de compra.

Tabla IV.II. Datos de muestras seleccionadas y analizadas.

Producto cárnico					Queso				
Muestra	Identificación	Corte	Lugar de compra	Fecha de compra	Muestra	Identificación	Lugar de compra	Marca comercial	Fecha de compra
Carne de bovino	BOV.I	Aguayón	Mercado “Poza Rica”, ubicado en Poza Rica, Veracruz	28/febrero/2012	Queso panela	PAN.I	Walmart Copilco, México, D.F.	Los Volcanes	12/marzo/2012
	BOV.II	Molida de pulpa	Chedraui Calzada del Hueso, México D.F.	16/septiembre/2012		PAN.II	Chedraui Calzada del Hueso, México D.F.	La esmeralda	19/septiembre/2012
Carne de pollo	POL.I	Muslo	Walmart Miramontes, México, D.F.	05/marzo/2012	Queso tipo manchego	MAN.I	Walmart Miramontes, México, D.F.	La esmeralda (Venta a granel)	05/marzo/2012
	POL.II	Molida	Chedraui Calzada del Hueso, México D.F.	17/septiembre/2012		MAN.II	Chedraui Calzada del Hueso, México, D.F.	La esmeralda (Venta a granel)	20/septiembre/2012
Carne de porcino	POR.I	Espaldilla	Walmart Miramontes, México, D.F.	05/marzo/2012					

4.6. Tratamiento de muestras

Como primer paso para llevar a cabo cada análisis se registró el peso del recipiente “Marinelli” vacío; este se encontraba limpio y libre de sustancias que pudieran contaminar a la muestra. Para introducir la muestra al recipiente, esta debió ser cortada en trozos pequeños (aprox. 5 cm³) o bien ser triturada con ayuda de un procesador de alimentos, esto para que al introducirla en el recipiente quedaran la menor cantidad de huecos posibles. Posteriormente, se colocó la tapa al “Marinelli” y se midió y registró su peso. Por último, el recipiente se depositó sobre el detector, ubicado dentro del blindaje de plomo, este último se cerró y se procedió a iniciar el análisis en el programa MAESTRO® -32 v6 ORTEC ®.

Cada análisis tomó 24 horas (86,400 segundos) y al término de este tiempo de análisis se obtuvieron los espectros de las muestras, se guardó la información y la muestra se retiró del equipo. La masa de las muestras analizadas se calculó por diferencia de peso y se presenta en la tabla IV.III.

Tabla IV.III. Masa de las muestras analizadas.

Muestra	Identificación	Cantidad muestra analizada (g)
Carne de res	BOV.I	215.9
	BOV.II	299.4
Carne de pollo	POL.I	230.0
	POL.II	305.8
Carne de cerdo	POR.I	182.9
Queso panela	PAN.I	193.9
	PAN.II	208.6
Queso manchego	MAN.I	197.5
	MAN.II	274.9

Todos los análisis se realizaron en el laboratorio de aplicaciones de la dosimetría ubicado en el Instituto de Física de la UNAM mediante un detector de Germanio Hiperpuro. Se realizaron dos series de análisis para las muestras, la primera en el mes de marzo de 2012 y la segunda en septiembre de 2012.

4.7. Análisis de los espectros

Para el análisis de los espectros, tanto los de fondo como de las muestras, se utilizó el programa MAESTRO® -32 v6 ORTEC ®, el cual permite visualizar el espectro obtenido mediante el dGH. Los espectros consisten en un histograma donde se presentan las cuentas o desintegraciones registradas en el tiempo de análisis contra la energía en keV (kilo electrón volts) proveniente de los radioisótopos presentes en la muestra. Las herramientas del programa nos permiten hacer un acercamiento a los fotopicos graficados en el espectro y observar cada uno de los canales que los conforman. En la figura xxvii se puede observar un espectro previo a su análisis y en la figura xxviii se ha hecho un acercamiento al fotopico perteneciente al radioisótopo ⁴⁰K.

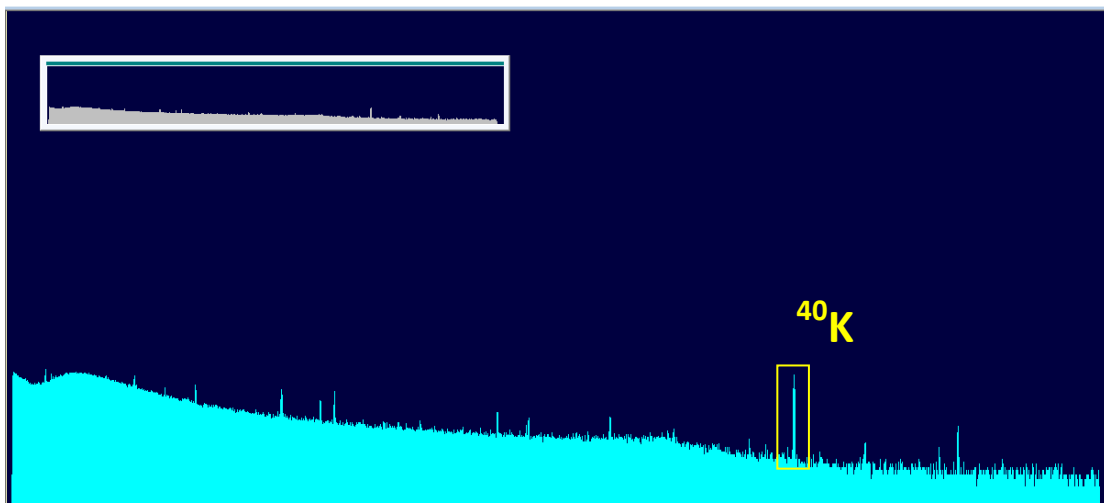


Figura xxvii. Espectro obtenido mediante el dGH.

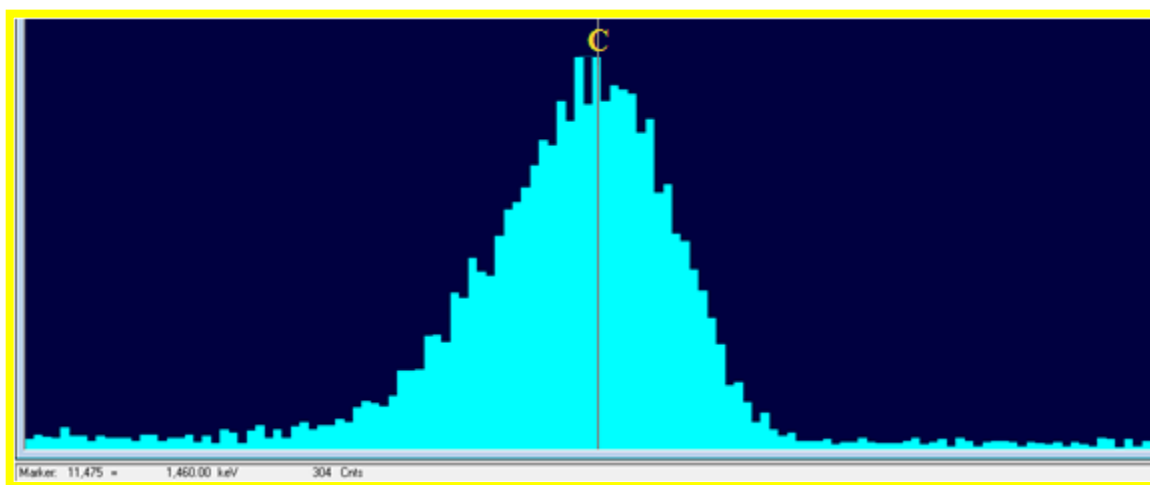


Figura xxviii. Acercamiento al fotopico perteneciente al radioisótopo K40.

Como primer paso para realizar el análisis se debe marcar la región de interés en el fotopico que se desea estudiar (“ROI”, por sus siglas en inglés), para esto se localizó el canal con el mayor registro de desintegraciones o cuentas y se le consideró el centro del fotopico, a este le llamaremos “C” y se puede observar en la figura xxviii. Posteriormente se seleccionó de la barra de herramientas el comando para “marcar” y se procedió a seleccionar el mismo número de canales a la derecha y a la izquierda del canal “C”, tratando de cubrir únicamente el fotopico, esto se observa en la figura xxix.

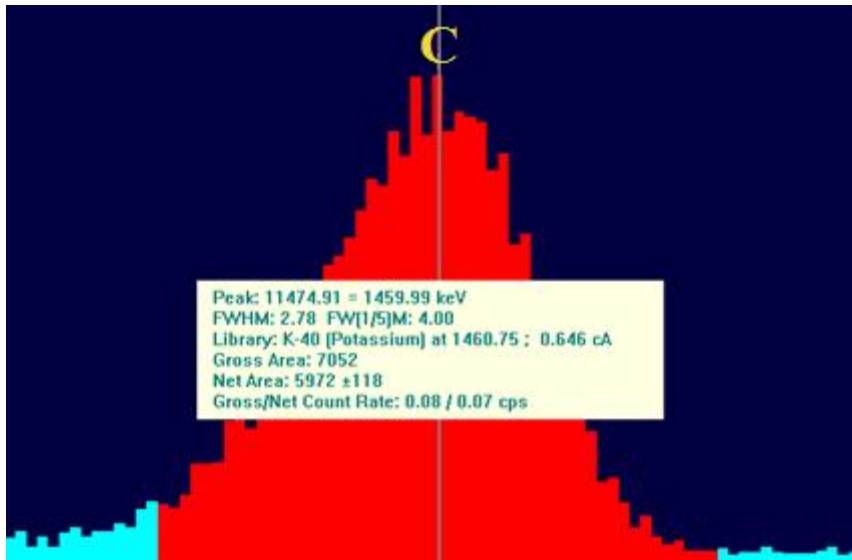


Figura xxix. Fotopico de K40 marcado e información obtenida.

Una vez marcado el fotopico, el programa proporciona la información sobre este, como se observa en la figura xxix. El dato más importante para los cálculos llevados a cabo en este estudio es el valor de las cuentas de área neta (AN, en inglés *Net Area*).

El programa realiza los cálculos necesarios para generar la información de los fotopicos marcados. Para estos cálculos toma en cuenta todas las partes que conforman al fotopico, dichas partes se representan en la figura xxx.

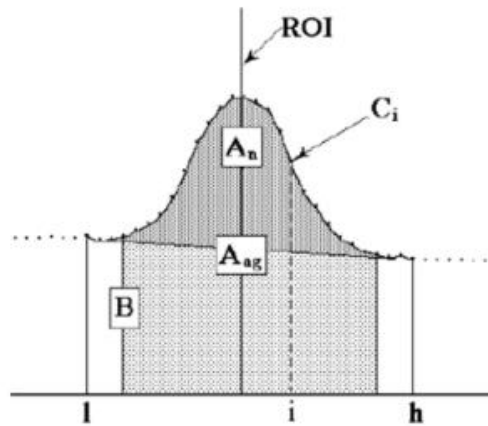


Figura xxx. Partes de un fotopico

A_n = Área neta

B = Área de la base

A_{ag} = Área gruesa ajustada

l = Limite inferior “ROI”

h = Limite superior “ROI”

El área gruesa (A_g) es la suma de todos los canales marcados por “ROI” desde el límite inferior (l) hasta el límite superior (h).

El área gruesa ajustada (A_{ag}) es la suma de todos los canales marcados por “ROI” pero no usados en la base (B).

El área neta (A_n) es el área gruesa ajustada menos la base calculada y está dada por la siguiente ecuación:

$$A_n = A_{ag} - \frac{B(h-l-5)}{(h-l+1)}$$

Mientras que incertidumbre en el área neta (A_n) está dada por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la incertidumbre en el área gruesa ajustada y el error que existe en el ajuste de la base y está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{A_n} = \sqrt{A_{ag} + B \left(\frac{h-l-5}{6} \right) \left(\frac{h-l-5}{h-l+1} \right)}$$

Además de lo anterior, se registró también de cada fotopico el número de canales que conformaron al fotopico y la energía registrada en keV. Por último, se comparó esta energía con tablas de energía de fotones gamma, lo que permitió identificar los radioisótopos a los que pertenece cada fotopico. De esta manera se analizaron tanto los espectros de fondo como los de cada una de las muestras.

4.8. Cálculo de resultados

Teniendo registrado el valor del área neta del fotopico que se quiere estudiar como siguiente paso debe hacerse una comparación entre los valores obtenidos en el espectro de fondo y el espectro de la muestra. De esta forma podemos conocer que fotopicos se encuentran realmente en la muestra y, si es de interés para el estudio, en qué cantidad.

Para dicha comparación se realiza la resta del área neta registrada de la muestra (ANM) menos el área neta registrada en el fondo final (ANFF), esto para cada fotopico correspondiente a la misma energía registrada. De esta forma se obtiene el área neta resultante (ANR), cuya fórmula es la siguiente:

$$ANR = ANM - ANFF$$

Para el cálculo de la incertidumbre resultante ($U_{resultante}$) utilizamos la ecuación de la suma expandida de incertidumbres como sigue:

$$U_{resultante} = \sqrt{U_{muestra}^2 + U_{fondo}^2}$$

Mediante los cálculos anteriores obtendremos un valor formado de la siguiente manera:

$$ANR \pm U_{resultante}$$

Donde:

Si se obtiene una incertidumbre resultante ($U_{\text{resultante}}$) mayor al valor de ANR se considera que este último se encuentra dentro de la incertidumbre (DDI).

Por otro lado, si el valor de ANR es negativo, quiere decir que la cantidad del radionúclido correspondiente se encuentra por debajo del fondo, es decir, está ausente (A) en la muestra.

En este trabajo de tesis se quiere conocer si están presentes (P) o ausentes (A) algunos radioisótopos artificiales de interés y, en el caso de que estén presentes en la muestra, cuantificar su concentración. Si en los resultados del análisis de fotopicos se obtiene un ANR con valor positivo y con una incertidumbre resultante ($U_{\text{resultante}}$) menor a dicho valor, esto nos indicaría que el radioisótopo está presente (P) en la muestra y se procedería a hacer el cálculo de su actividad específica para conocer la concentración en unidades de Bq/kg o L que existe en la muestra.

4.9. Cálculo de actividad específica de un radioisótopo

La actividad específica se define como el número de desintegraciones por unidad de masa o volumen. La unidad definida por el Sistema Internacional para la cantidad de radiación emitida por material radiactivo es el Becquerel (Bq), por lo tanto, las unidades para designar a la actividad específica de un radionúclido son los Bq por kg o L de muestra (Bq/kg ó L). Para dicho cálculo es necesario el uso de patrones certificados que contengan el radioisótopo del cual se quiere calcular la actividad específica.

Para la presente tesis la información sobre dicho patrón fue proporcionada por el Laboratorio de Patrones Radiactivos del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Dicho patrón consistió en una solución multinúclida con actividad total de $37.03 \text{ KBq} \pm 3.16\%$, la cual se encontraba repartida entre distintos radioisótopos. En la tabla IV.IV. se muestra la información del patrón utilizado.

Tabla IV.IV. Información obtenida del patrón ININ.

Radioisótopo	Energía (keV)	Factor de emisión de gammas (%)	Radiación γ por unidad de tiempo (γ/s)	Área Neta (cuentas/7,557seg)	Incertidumbre (cuentas/7,557seg)	Eficiencia (cuentas/gammas)
²⁴¹ Am	59.5	0.36	539.7344	17822	287	0.004
¹⁰⁹ Cd	88.03	0.0363	600.0488	52107	374	0.011
⁵⁷ Co	122	0.856	443.9151	134318	496	0.040
⁵⁷ Co	136	0.105	54.4522	17965	350	0.044
¹³⁹ Ce	166	0.799	350.0550	111793	515	0.042
²⁰³ Hg	279	0.815	224.9072	52083	365	0.031
¹¹³ Sn	392	0.649	882.8164	154497	506	0.023
⁸⁵ Sr	514	0.98	873.4959	113724	592	0.017
¹³⁷ Cs	661.66	0.85	2928.7842	328223	704	0.015
⁸⁸ Y	898	0.94	2619.2721	217337	601	0.011
⁶⁰ Co	1173.24	0.9986	3989.8902	264273	628	0.009
⁶⁰ Co	1332.5	0.9998	3994.6847	243619	590	0.008
⁸⁸ Y	1836	0.994	2769.7409	126374	389	0.006

*El tiempo de conteo del análisis fue de 7,557 segundos.

En la última columna de la tabla se muestra la eficiencia para cada radioisótopo dada en cuentas/gammas. Dichos valores se obtienen mediante la ecuación 1:

$$Ef_{Cs} = \frac{(A_n)}{\gamma \cdot t_c} \quad (1)$$

donde:

A_n = Área neta (cuentas)

γ = Radiación gamma por unidad de tiempo (γ/s)

t_c = Tiempo de conteo (s)

Para el cálculo de la actividad de ^{137}Cs contenido en la muestra, es necesario calcular otros parámetros como la razón de conteo (Rz_c) en cuentas/s, la cual está dada por el área neta del fotopico o el promedio de áreas netas si se utiliza un fondo dividida entre el tiempo de conteo; esto se muestra en la ecuación 2:

$$Rz_c = \frac{\Delta A_n}{t_c} \quad (2)$$

donde:

ΔA_n = Promedio de área neta de muestra – área neta de fondo (cuentas)

t_c = tiempo de conteo (segundos)

Mediante la ecuación 3 es posible conocer la actividad del ^{137}Cs en Bq, contenida en la muestra:

$$Act = \frac{Rz_c}{\% \gamma \cdot Ef} \quad (3)$$

donde:

Rz_c = Razón de conteo (cuentas/s)

$\% \gamma$ = Factor de emisión de gammas (%)

Ef = Eficiencia (cuentas/gammas)

Finalmente, para conocer la actividad específica o concentración del ^{137}Cs en la muestra, la actividad obtenida mediante la ecuación 3 se divide entre la masa de la muestra. La actividad específica se reporta en Bq por cada kilogramo de alimento (Bq/kg).

5. Resultados

5.1. Espectros de fondo

En la figura xxxi. se muestra el espectro de fondo final utilizado para el análisis, dicho espectro muestra los fotopicos encontrados identificados con un número. En la tabla V.I. se presentan los resultados del análisis del espectro anterior; dicha tabla relaciona el número de cada fotopico con el radioisótopo que representa, así como el área neta calculada de cada uno. El tiempo de análisis para los espectros de fondo fue de 24 horas.

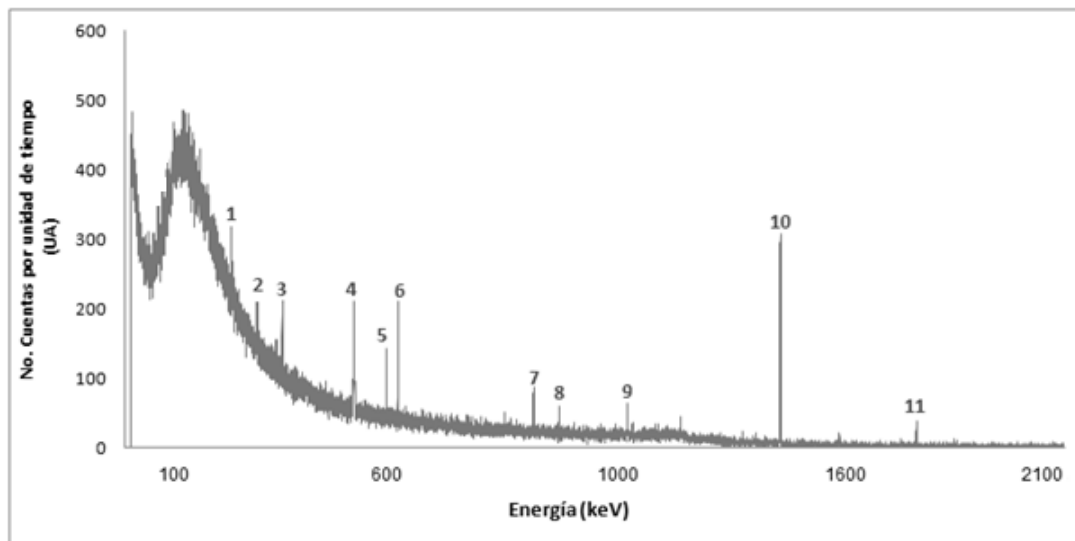


Figura xxxi. Espectro de fondo final.

Tabla V.I. Información obtenida del espectro de fondo final.

No. de fotopico	Radioisótopo probable	Energía (MeV)*	Área Neta Fondo Final. ANFF (No. de cuentas/24 horas)
1	^{212}Pb	0.238	338 ± 45
2	^{214}Pb	0.295	335 ± 23
3	^{211}Bi	0.351	846 ± 85
4	^{208}Tl	0.510	1047 ± 25
5	^{208}Tl	0.582	449 ± 119
6	^{214}Bi	0.609	1410 ± 56
7	^{228}Ac	0.911	212 ± 40
8	^{228}Ac	0.968	154 ± 38
9	^{214}Bi	1.120	209 ± 52
10	^{40}K	1.460	4804 ± 339
11	^{214}Bi	1.764	254 ± 57

* La energía obtenida en keV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

5.2. Espectros obtenidos de las muestras analizadas

A continuación se presentan los espectros de cada muestra analizada así como las tablas de resultados de su análisis de los fotopicos encontrados. El tiempo de análisis para todas las muestras fue de 24 horas.

Inmediatamente después de cada espectro se presenta una tabla con la información correspondiente al análisis de cada fotopico.

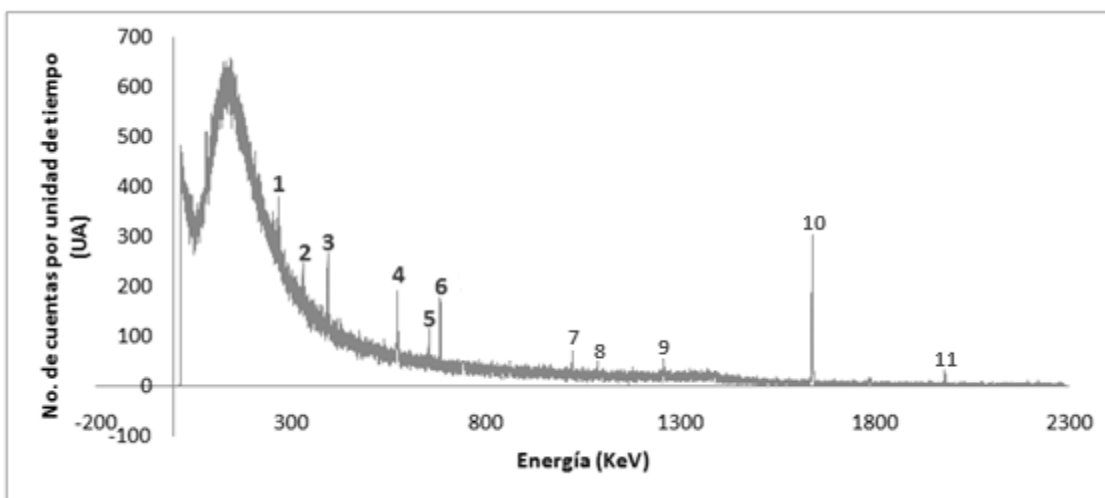


Figura xxxii. Espectro obtenido de la muestra BOV.I.

Tabla V.II. Información obtenida del análisis del espectro de la muestra BOV.I.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	²¹² Pb	0.238	342 ± 124	338 ± 45	4 ± 132	DDI
2	²¹⁴ Pb	0.295	404 ± 150	335 ± 23	69 ± 152	DDI
3	²¹¹ Bi	0.351	765 ± 138	846 ± 85	-81 ± 162	A
4	²⁰⁸ Tl	0.510	1469 ± 140	1713 ± 25	-244 ± 142	A
5	²⁰⁸ Tl	0.582	427 ± 84	449 ± 119	-22 ± 146	A
6	²¹⁴ Bi	0.609	1159 ± 110	1410 ± 56	-251 ± 123	A
7	²²⁸ Ac	0.911	173 ± 69	212 ± 40	-39 ± 80	A
8	²²⁸ Ac	0.968	133 ± 57	154 ± 38	-21 ± 69	A
9	²¹⁴ Bi	1.120	192 ± 59	209 ± 52	-17 ± 79	A
10	⁴⁰ K	1.460	6407 ± 117	4804 ± 339	1603 ± 359	P
11	²¹⁴ Bi	1.764	186 ± 50	254 ± 57	-68 ± 76	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

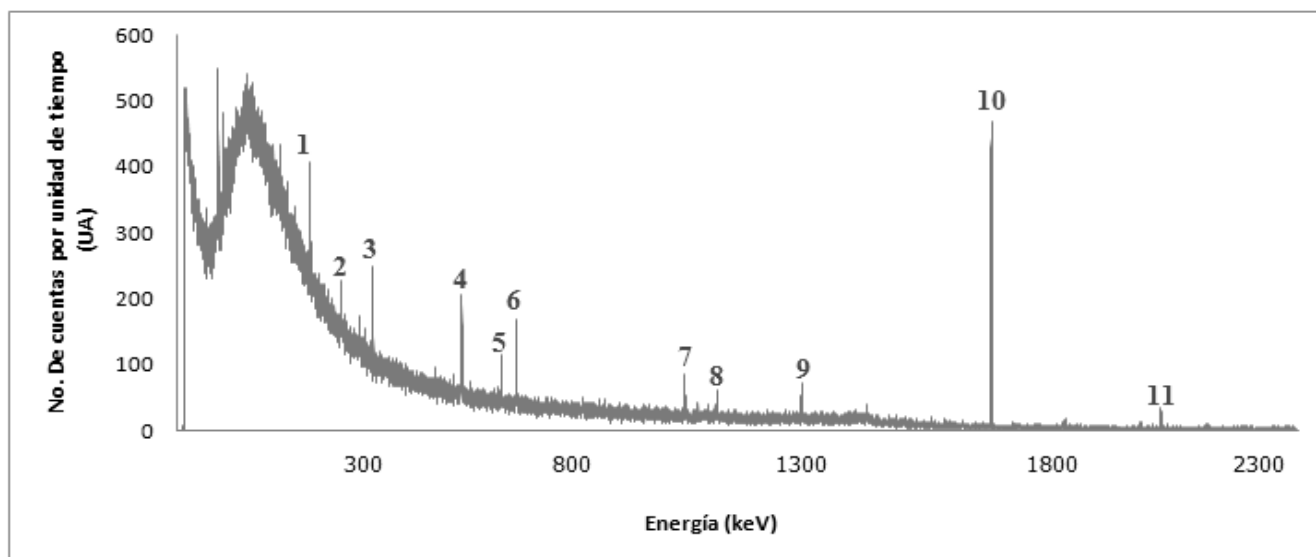


Figura xxxiii. Espectro obtenido de la muestra BOV.II.

Tabla V.III. Información obtenida del análisis del espectro de la muestra BOV.II.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	²¹² Pb	0.238	309 ± 94	338 ± 45	-29 ± 104	A
2	²¹⁴ Pb	0.294	453 ± 131	335 ± 23	118 ± 133	DDI
3	²¹¹ Bi	0.351	732 ± 62	846 ± 85	-114 ± 105	A
4	²⁰⁸ Tl	0.510	1423 ± 116	1713 ± 25	-290 ± 119	A
5	²⁰⁸ Tl	0.582	409 ± 53	449 ± 119	-40 ± 130	A
6	²¹⁴ Bi	0.609	993 ± 60	1410 ± 56	-417 ± 82	A
7	²²⁸ Ac	0.911	246 ± 39	212 ± 40	34 ± 56	DDI
8	²²⁸ Ac	0.968	171 ± 48	154 ± 38	17 ± 61	DDI
9	²¹⁴ Bi	1.120	175 ± 37	209 ± 52	-34 ± 64	A
10	⁴⁰ K	1.460	5793 ± 116	4804 ± 339	989 ± 358	P
11	²¹⁴ Bi	1.764	136 ± 33	254 ± 57	-118 ± 66	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

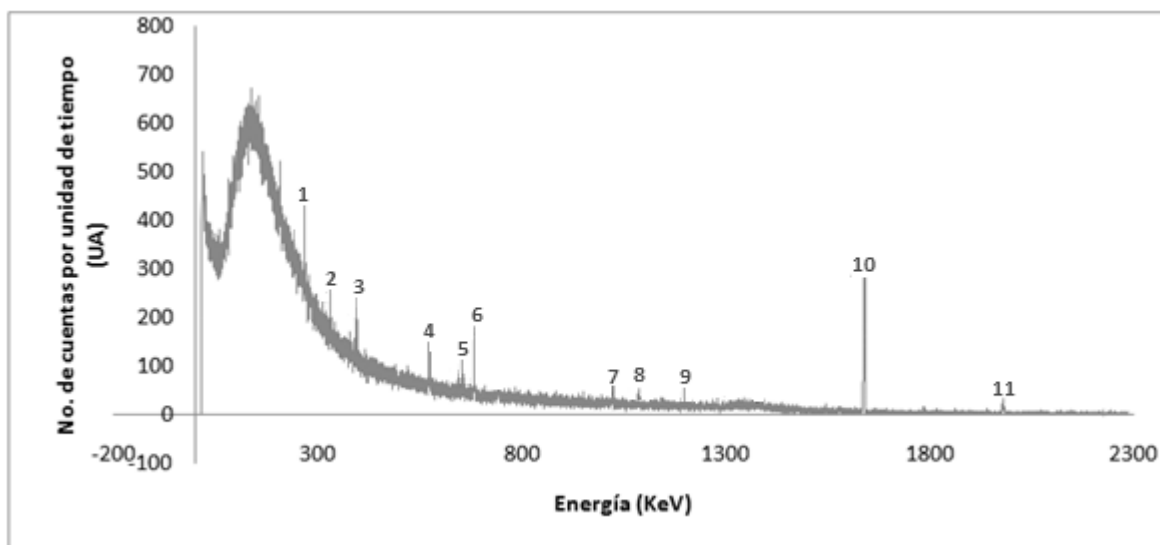


Figura xxxiv. Espectro obtenido de la muestra POL.I.

Tabla V.IV. Información obtenida del análisis del espectro de la muestra POL.I.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	^{212}Pb	0.238	355 ± 125	338 ± 45	17 ± 133	DDI
2	^{214}Pb	0.295	318 ± 145	335 ± 23	-17 ± 147	A
3	^{211}Bi	0.351	826 ± 138	846 ± 85	-20 ± 162	A
4	^{208}Tl	0.510	1445 ± 146	1713 ± 25	-286 ± 148	A
5	^{208}Tl	0.582	374 ± 86	449 ± 119	-75 ± 147	A
6	^{214}Bi	0.609	1237 ± 109	1410 ± 56	-173 ± 123	A
7	^{228}Ac	0.911	129 ± 61	212 ± 40	-83 ± 73	A
8	^{228}Ac	0.968	127 ± 71	154 ± 38	-27 ± 81	A
9	^{214}Bi	1.120	202 ± 61	209 ± 52	-7 ± 80	A
10	^{40}K	1.460	6487 ± 160	4804 ± 339	1683 ± 375	P
11	^{214}Bi	1.764	175 ± 51	254 ± 57	-79 ± 76	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

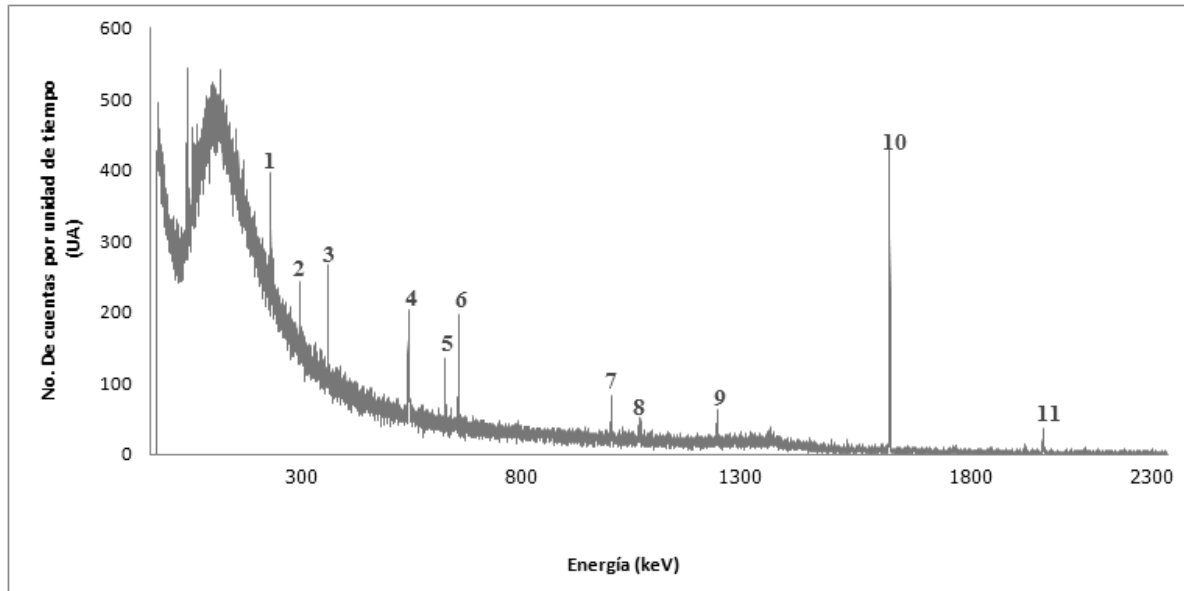


Figura xxxv. Espectro obtenido de la muestra POL.II.

Tabla V.V. Datos Información obtenida del análisis del espectro de la muestra POL.II.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	²¹² Pb	0.238	337 ± 55	338 ± 45	-1 ± 71	A
2	²¹⁴ Pb	0.294	331 ± 63	335 ± 23	-4 ± 67	A
3	²¹¹ Bi	0.351	560 ± 61	846 ± 85	-286 ± 105	A
4	²⁰⁸ Tl	0.510	1486 ± 112	1713 ± 25	-227 ± 115	A
5	²⁰⁸ Tl	0.582	411 ± 52	449 ± 119	-38 ± 130	A
6	²¹⁴ Bi	0.609	997 ± 58	1410 ± 56	-413 ± 81	A
7	²²⁸ Ac	0.911	226 ± 38	212 ± 40	14 ± 55	DDI
8	²²⁸ Ac	0.968	218 ± 87	154 ± 38	64 ± 95	DDI
9	²¹⁴ Bi	1.120	154 ± 55	209 ± 52	-55 ± 76	A
10	⁴⁰ K	1.460	6968 ± 112	4804 ± 339	2164 ± 357	P
11	²¹⁴ Bi	1.764	230 ± 32	254 ± 57	-24 ± 65	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

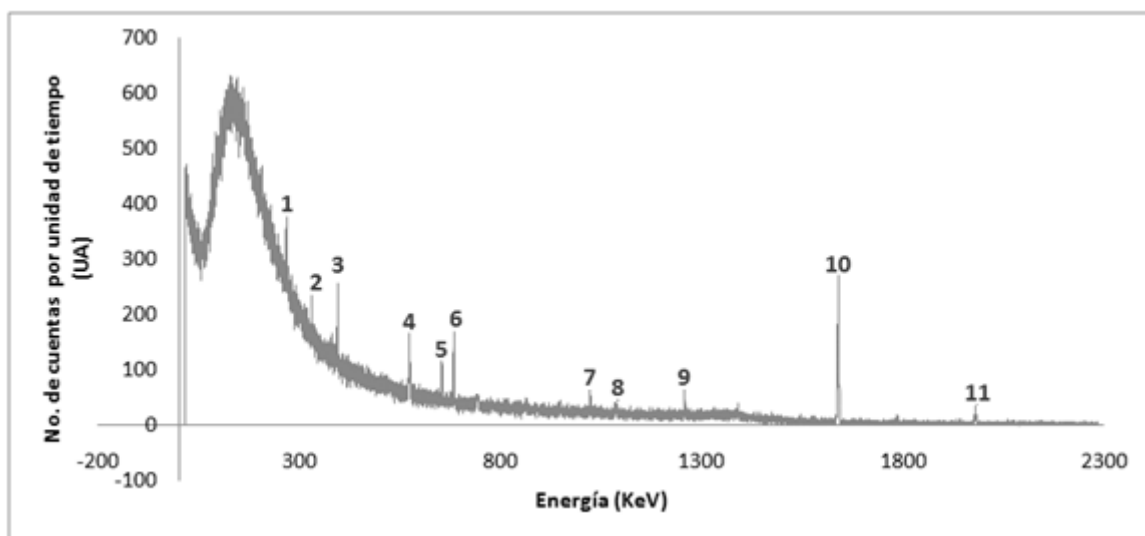


Figura xxxvi. Espectro obtenido de la muestra POR.I.

Tabla V.VI. Información obtenida del análisis del espectro de la muestra POR.I.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	²¹² Pb	0.238	284 ± 122	338 ± 45	-54 ± 130	A
2	²¹⁴ Pb	0.295	329 ± 147	335 ± 23	-6 ± 149	A
3	²¹¹ Bi	0.351	701 ± 140	846 ± 85	-145 ± 164	A
4	²⁰⁸ Tl	0.510	1649 ± 136	1713 ± 25	-64 ± 138	A
5	²⁰⁸ Tl	0.582	449 ± 85	449 ± 119	0 ± 146	A
6	²¹⁴ Bi	0.609	1037 ± 109	1410 ± 56	-373 ± 123	A
7	²²⁸ Ac	0.911	255 ± 64	212 ± 40	43 ± 75	DDI
8	²²⁸ Ac	0.968	178 ± 61	154 ± 38	24 ± 72	DDI
9	²¹⁴ Bi	1.120	192 ± 61	209 ± 52	-17 ± 80	A
10	⁴⁰ K	1.460	5907 ± 117	4804 ± 339	1103 ± 359	P
11	²¹⁴ Bi	1.764	183 ± 55	254 ± 57	-71 ± 79	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

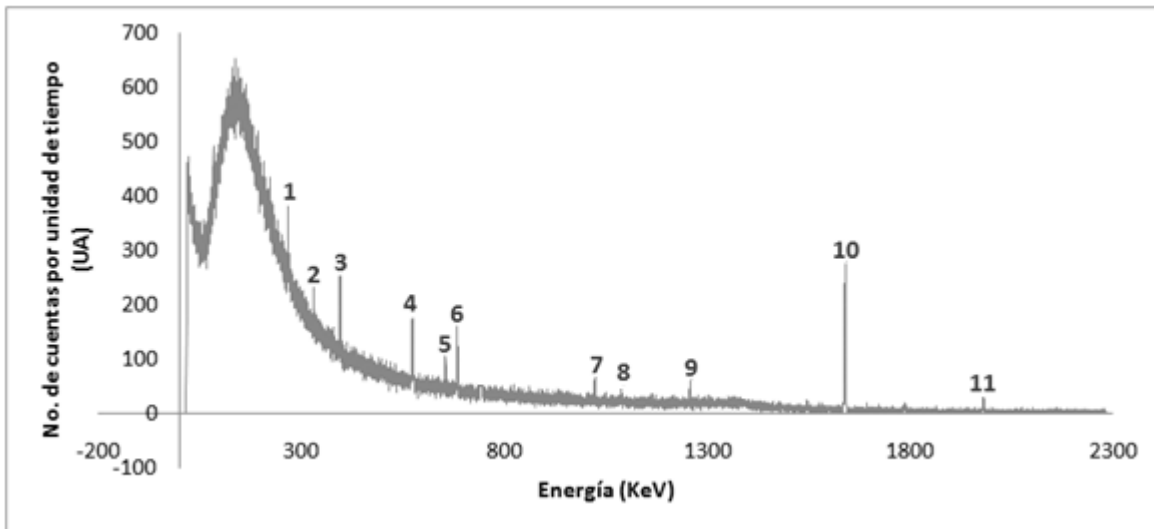


Figura xxxvii. Espectro obtenido de la muestra PAN.I.

Tabla V.VII. Información obtenida del espectro de la muestra PAN.I.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	²¹² Pb	0.238	259 ± 124	338 ± 45	-79 ± 132	A
2	²¹⁴ Pb	0.295	415 ± 147	335 ± 23	80 ± 149	DDI
3	²¹¹ Bi	0.351	794 ± 134	846 ± 85	-52 ± 159	A
4	²⁰⁸ Tl	0.510	1510 ± 140	1713 ± 25	-203 ± 142	A
5	²⁰⁸ Tl	0.582	418 ± 84	449 ± 119	-31 ± 146	A
6	²¹⁴ Bi	0.609	1279 ± 112	1410 ± 56	-131 ± 125	A
7	²²⁸ Ac	0.911	176 ± 74	212 ± 40	-36 ± 84	A
8	²²⁸ Ac	0.968	150 ± 59	154 ± 38	-4 ± 70	A
9	²¹⁴ Bi	1.120	113 ± 61	209 ± 52	-96 ± 80	A
10	⁴⁰ K	1.460	5206 ± 94	4804 ± 339	402 ± 352	P
11	²¹⁴ Bi	1.764	213 ± 47	254 ± 57	-41 ± 74	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

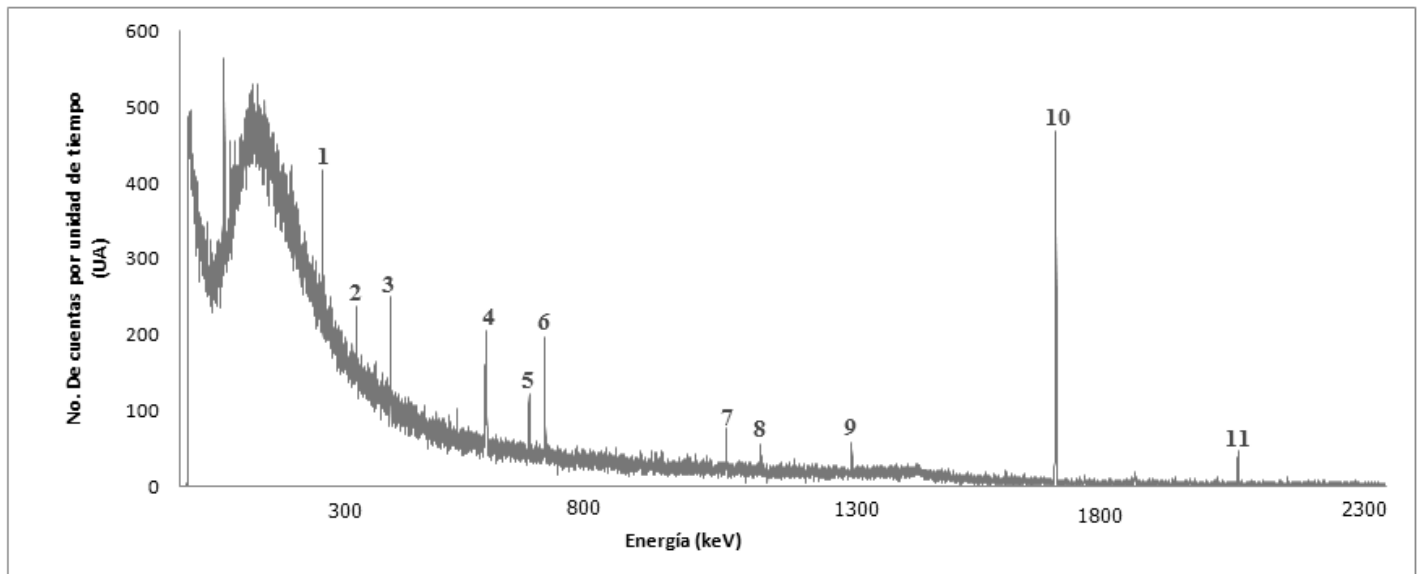


Figura xxxviii. Espectro obtenido de la muestra PAN.II.

Tabla V.VIII. Información obtenida del espectro de la muestra PAN.II.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	^{212}Pb	0.238	321 ± 55	338 ± 45	-17 ± 71	A
2	^{214}Pb	0.294	331 ± 64	335 ± 23	-4 ± 68	A
3	^{211}Bi	0.351	790 ± 60	846 ± 85	-56 ± 104	A
4	^{208}Tl	0.510	1513 ± 116	1713 ± 25	-200 ± 119	A
5	^{208}Tl	0.582	127 ± 52	449 ± 119	-322 ± 130	A
6	^{214}Bi	0.609	988 ± 60	1410 ± 56	-422 ± 82	A
7	^{228}Ac	0.911	215 ± 38	212 ± 40	39 ± 55	DDI
8	^{228}Ac	0.968	191 ± 38	154 ± 38	37 ± 54	DDI
9	^{214}Bi	1.120	205 ± 37	209 ± 52	-4 ± 64	A
10	^{40}K	1.460	5367 ± 108	4804 ± 339	563 ± 356	P
11	^{214}Bi	1.764	157 ± 31	254 ± 57	-97 ± 65	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

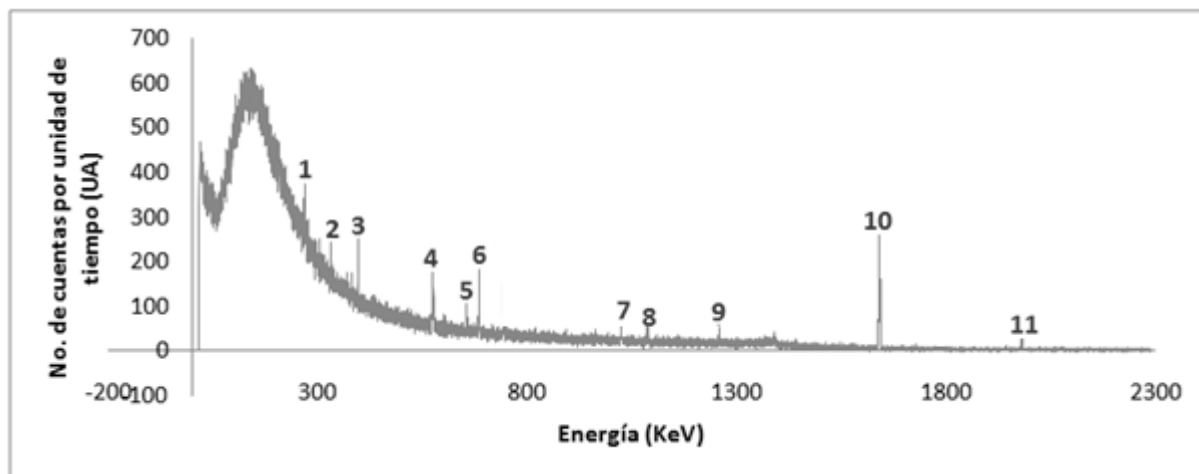


Figura xxxix. Espectro obtenido de la muestra MAN.I.

Tabla V.IX. Información obtenida del espectro de la muestra MAN.I.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	²¹² Pb	0.238	322 ± 124	338 ± 45	-16 ± 132	A
2	²¹⁴ Pb	0.295	454 ± 147	335 ± 23	119 ± 149	DDI
3	²¹¹ Bi	0.351	789 ± 134	846 ± 85	-57 ± 159	A
4	²⁰⁸ Tl	0.510	1800 ± 135	1713 ± 25	87 ± 137	DDI
5	²⁰⁸ Tl	0.582	518 ± 80	449 ± 119	69 ± 143	DDI
6	²¹⁴ Bi	0.609	1026 ± 108	1410 ± 56	-384 ± 122	A
7	²²⁸ Ac	0.911	276 ± 64	212 ± 40	64 ± 75	DDI
8	²²⁸ Ac	0.968	165 ± 61	154 ± 38	11 ± 72	DDI
9	²¹⁴ Bi	1.120	193 ± 50	209 ± 52	-16 ± 72	A
10	⁴⁰ K	1.460	5777 ± 107	4804 ± 339	973 ± 355	P
11	²¹⁴ Bi	1.764	197 ± 47	254 ± 57	-57 ± 74	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

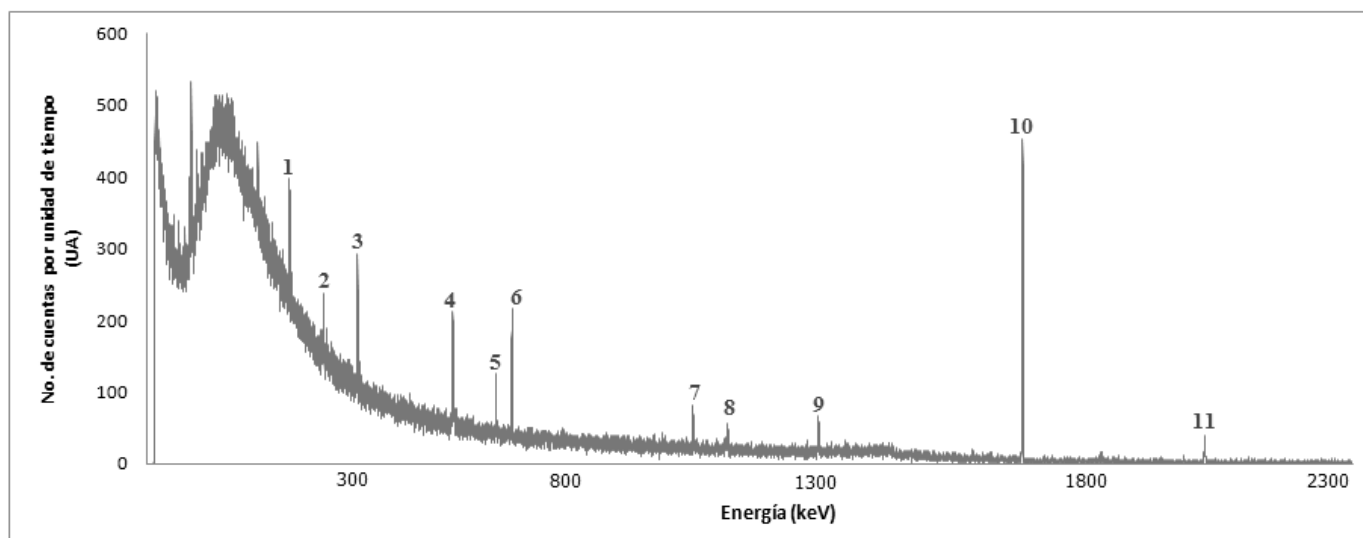


Figura xl. Espectro obtenido de la muestra MAN.II.

Tabla V.X. Datos Información obtenida del espectro de la muestra MAN.II.

i) No. de fotopico	ii) Radioisótopo probable	iii) Energía registrada (MeV)	iv) Área Neta Muestra. ANM (No. cuentas/ 24 horas)	v) Área Neta Fondo Final. ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vi) Área Neta Resultante. ANR=ANM-ANFF (No. cuentas/ 24 horas)	vii) Presencia, Ausencia o Dentro De Incertidumbre (P, A o DDI)
1	²¹² Pb	0.238	219 ± 55	338 ± 45	-119 ± 71	A
2	²¹⁴ Pb	0.294	402 ± 93	335 ± 23	67 ± 96	DDI
3	²¹¹ Bi	0.351	765 ± 62	846 ± 85	-81 ± 105	A
4	²⁰⁸ Tl	0.510	1751 ± 112	1713 ± 25	38 ± 115	DDI
5	²⁰⁸ Tl	0.582	537 ± 50	449 ± 119	88 ± 129	DDI
6	²¹⁴ Bi	0.609	1160 ± 60	1410 ± 56	-250 ± 82	A
7	²²⁸ Ac	0.911	238 ± 39	212 ± 40	26 ± 56	DDI
8	²²⁸ Ac	0.968	173 ± 36	154 ± 38	19 ± 52	DDI
9	²¹⁴ Bi	1.120	147 ± 101	209 ± 52	-62 ± 114	A
10	⁴⁰ K	1.460	5421 ± 107	4804 ± 339	617 ± 355	P
11	²¹⁴ Bi	1.764	163 ± 32	254 ± 57	-91 ± 65	A

La energía obtenida en KeV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

Tabla V.XI. Resultados para las muestras de alimentos analizadas.

Identificación	Muestra	Lugar de compra	Presencia de radioisótopos por muestra										
			²¹² Pb	²¹⁴ Pb	²¹¹ Bi	²⁰⁸ Tl	²²⁸ Ac	²¹⁴ Bi	⁴⁰ K	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	¹³¹ I	
BOV.I	Carne de bovino	Mercado "Poza Rica", Poza Rica, Ver.	DDI	DDI	A	A	A	A	A	P	A	A	A
BOV.II	Carne de bovino	Chedraui Calzada del Hueso, México D.F.	A	DDI	A	A	DDI	A	A	P	A	A	A
POL.I	Carne de pollo	Walmart Miramontes, México, D.F.	DDI	A	A	A	A	A	A	P	A	A	A
POL.II	Carne de pollo	Chedraui Calzada del Hueso, México D.F.	A	A	A	A	DDI	A	A	P	A	A	A
POR.I	Carne de porcino	Walmart Miramontes, México, D.F.	A	A	A	A	DDI	A	A	P	A	A	A
PAN.I	Queso Panela	Walmart Copilco, México, D.F.	A	DDI	A	A	A	A	A	P	A	A	A
PAN.II	Queso Panela	Chedraui Calzada del Hueso, México D.F.	A	A	A	A	DDI	A	A	P	A	A	A
MAN.I	Queso tipo manchego	Walmart Miramontes, México, D.F.	A	DDI	A	DDI	DDI	A	A	P	A	A	A
MAN.II	Queso tipo manchego	Chedraui Calzada del Hueso, México, D.F.	A	DDI	A	DDI	DDI	A	A	P	A	A	A

P= Presente, A=Ausente, DDI=Dentro de incertidumbre

Tabla V.XII. Radioisótopos estudiados y contaminantes radiológicos de interés para el estudio.

Radioisótopos estudiados				Contaminantes radiológicos de interés para el estudio		
Radioisótopo	Energía gamma (MeV)*	Origen	Cadena de decaimiento radiactivo a la que pertenece	Contaminante Radiológico	Energía gamma (MeV)*	Origen
²¹² Pb	238	Natural	Torio-232	¹³⁴ Cs	0.128, 0.605, 0.796	Artificial
²¹⁴ Pb	295.2	Natural	Uranio-238	¹³¹ I	0.284, 0.364, 0.637	Artificial
²¹¹ Bi	351.1	Natural	Uranio-235	¹³⁷ Cs	0.662	Artificial
²¹⁴ Bi	1120.3	Natural	Uranio-238			
²⁰⁸ Tl	277.4	Natural	Torio-232			
²²⁸ Ac	209.3	Natural	Torio-232			
⁴⁰ K	1460.8	Natural	Origen terrestre			

* La energía obtenida en keV se convirtió a MeV para realizar las comparaciones con las tablas.

6. Análisis de resultados

6.1. Espectro de fondo final

Previo al estudio de las muestras, se tomaron cuatro espectros de fondo y se analizaron los fotopicos encontrados en ellos. Esto se realizó para identificar los radioisótopos presentes en los alrededores del dGH provenientes de la radiación cósmica, la radiación ambiental o de posibles contaminantes en los componentes del sistema de análisis.

Al analizar los espectros de fondo obtenidos, se encontraron 11 fotopicos en cada uno. Al analizar la energía gamma de estos fotopicos se encontró que los radioisótopos presentes en dichos espectros coincidieron entre todos los espectros de fondo. Por lo anterior fue posible calcular el promedio de cada fotopico y así se obtuvo un espectro de fondo final. Este último se utilizó para comparar los espectros de cada muestra con la radiación ambiental.

En la tabla V.I. se muestran los resultados obtenidos para el espectro de fondo final. De acuerdo con la información revisada en el capítulo 2 de la presente tesis, se puede observar que los fotopicos marcados como 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 11 corresponden, respectivamente, a los siguientes radioisótopos: ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{211}Bi , ^{208}Tl , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac , ^{228}Ac , ^{214}Bi , y ^{214}Bi . Dichos radioisótopos tienen su origen en las cadenas naturales de decaimiento radiactivo (Torio-232, Neptunio-237, Uranio-238 y Uranio-235) (Figura iv y v), mientras que el fotopico con el marcador 10 pertenece al ^{40}K , el cual es un radioisótopo abundante en la corteza terrestre.

6.2. Espectros de muestras de alimentos

Se analizaron en el dGH dos muestras de cada una de las matrices alimentarias de interés con excepción de la carne de porcino, de la cual únicamente se analizó una muestra, esto debido a limitaciones de tiempo con el uso del equipo.

En la tabla V.XI. se muestran los resultados de dichas muestras analizadas, así como el lugar en donde se adquirió cada una de ellas. La letra “A” se refiere a la ausencia del radioisótopo en una muestra dada, la letra “P” nos indica su presencia y por último las siglas “DDI” indican que los valores registrados se encuentran dentro de la incertidumbre del equipo.

Como se observa en la tabla de resultados V. XI., en todas las muestras, tanto en las de productos cárnicos como en las de quesos se encontró la presencia (P) del radioisótopo natural ^{40}K . Como puede observarse en la tabla V.XII. el origen del ^{40}K es natural, es decir, no es resultado de la actividad humana. También se observa en la tabla de resultados que para algunos radioisótopos el resultado se reporta como dentro de la incertidumbre (DDI),

esto quiere decir que el valor del área neta resultante (ANR) del radioisótopo es menor o está dentro del valor de la incertidumbre resultante ($U_{\text{resultante}}$). Cabe destacar que todos los radioisótopos con resultado “DDI” son de origen natural ya que provienen de la cadena de decaimiento del ^{235}U , ^{238}U o ^{232}Th y también estuvieron presentes en los espectros de fondo obtenidos. Finalmente, los radioisótopos artificiales de interés para el estudio (^{134}Cs , ^{137}Cs y ^{131}I) resultaron ausentes (A) en las muestras. Por lo tanto, de acuerdo con la norma CODEX STAN 193-1995 podemos considerar a los alimentos como inocuos para el consumo humano. Y de acuerdo con el Programa de asociación FAO/IAEA los alimentos se consideran, en cuestión de radionúclidos, como alimentos seguros.

El resultado obtenido concuerda con lo encontrado en la literatura, ya que generalmente existe presencia de contaminantes radiológicos artificiales en los alimentos, específicamente para los radioisótopos estudiados en la presente tesis, sólo posterior a un accidente nuclear y no de forma típica o recurrente. Cabe mencionar que con el presente estudio no se pretende concluir que en general las matrices alimentarias estudiadas presentan o no contaminación radiactiva en el país, esto debido a que el muestreo no fue exhaustivo y se tuvo como limitante el tiempo de estudio. Este estudio pretende proporcionar una metodología detallada sobre la manera de llevar a cabo un estudio de este tipo en una matriz alimentaria específica, lo anterior para permitir su reproducibilidad en laboratorios de investigación, validar el método en el laboratorio de dosimetría del I.F. y dar a conocer la importancia de realizar estos estudios de manera regular en matrices alimentarias con el fin de conocer los niveles de radioisótopos artificiales en alimentos que participan en el comercio exterior. Así mismo, este tipo de estudios ayuda a dar a conocer un campo de interés para los químicos de alimentos utilizando métodos nucleares para la detección de contaminantes en alimentos.

6.3. Actividad específica de contaminantes radiológicos

Como se observa en la tabla de resultados V.XI. no se encontraron en las muestras de alimentos analizadas los contaminantes ^{134}Cs , ^{137}Cs y ^{131}I , por lo tanto no fue necesario calcular la actividad específica o concentración de los contaminantes para las muestras.

Sin embargo, en el caso de que se encontrara la presencia de un contaminante radiactivo emisor de partículas gamma en una muestra analizada, es necesario calcular la actividad específica o concentración del radioisótopo en unidades de Bq/kg de alimento. A manera de ejemplo, el procedimiento para hacer estos cálculos se detalla en el protocolo de análisis del presente trabajo en el ANEXO B, el cual sigue las especificaciones del IAEA (1989) “Measurement of radionuclides in food and the environment”, TR serie No.95. Para calcular la actividad específica contenida en cierta cantidad de muestra, es decir, obtener la concentración en Bq/kg o g. Para hacer dicho cálculo es necesario contar con un patrón certificado de energías gamma que contenga al o a los isótopos radiactivos de interés. Para la ejemplificación del cálculo en el protocolo de análisis el patrón certificado utilizado

únicamente incluye al radioisótopo ^{137}Cs . Finalmente, calculada la concentración del radioisótopo o actividad específica, es posible compararla con los niveles de referencia indicados en la reglamentación internacional como la norma CODEX STAN 193-1995, de esta forma se puede tomar una decisión sobre si el alimento se considera inocuo o es necesario tomar otra medida al respecto.

Por otro lado, es posible tomar el trabajo propuesto como una buena base para la creación de protocolos estandarizados que puedan ser aplicables incluso para la certificación de los laboratorios de la UNAM en la Facultad de Química, como un laboratorio “ALMERA”. Esto ayudaría a cubrir la necesidad de la industria para certificar la no contaminación radiológica de alimentos y a su vez generaría conocimiento para continuar con estudios en este campo.

Los resultados obtenidos, representan sólo una muestra del universo de productos posibles a analizarse, esto es por el gran número de productores de productos cárnicos y quesos en el país. En este trabajo se hace énfasis en el proceso de análisis y protocolo para la identificación de contenidos radioactivos en alimentos por métodos nucleares.

7. Conclusiones

- Se analizaron mediante espectrometría gamma las muestras colectadas de las matrices alimentarias de interés: productos cárnicos y quesos. Siguiendo las recomendaciones del Programa de asociación entre la FAO/IAEA.
- Se detectó la presencia de radioisótopos emisores de fotones gamma en las muestras analizadas. La energía de dichos fotones detectados en las muestras fue correspondiente al radioisótopo ^{40}K presente de manera natural en el ambiente, mientras que los isótopos radiactivos artificiales de interés, el ^{131}I , ^{137}Cs y ^{134}Cs , estuvieron ausentes en las muestras analizadas.
- El uso de la espectrometría gamma mediante un detector de Germanio Hiperpuro es un método nuclear importante para el análisis de contaminantes radiológicos ya que permite analizar en una sola medición los isótopos radiactivos emisores de fotones gamma que emitan energías entre 0 y 2.5 MeV.
- Para la cuantificación puntual de la concentración o actividad específica de contaminantes radiológicos en una muestra es necesario contar con patrones certificados para cada uno de los elementos radiactivos de interés.
- El detector semiconductor de Germanio Hiperpuro es el recomendado por las instituciones internacionales para este tipo de análisis por su resolución y eficiencia. El cual asociado a un analizador de 16 000 canales y al programa de última generación Maestro -32 v6 ORTEC, hacen que el análisis sea virtualmente automatizado evitando cualquier error de manejo.
- La presente tesis aporta un protocolo que detalla la metodología necesaria para la detección, mediante espectrometría gamma, y la posterior cuantificación de contaminantes radiológicos contenidos en matrices alimentarias; específicamente productos cárnicos y quesos. Dicho protocolo puede ser de gran utilidad en el caso de una emergencia nuclear, o bien, para llevar a cabo mediciones rutinarias en productos que participen en el comercio exterior y así asegurar que se cumpla la reglamentación pertinente.

8. Alcance del proyecto

- Certificación de alimentos seguros, en cuestión de radionúclidos, con el método utilizado por los organismos internacionales.
- Certificación de productos alimenticios de exportación e importación para empresas mexicanas interesadas, esto con el fin de conocer los niveles de radioisótopos naturales y artificiales y asegurar que se cumpla la reglamentación pertinente.
- Habilitar a los estudiantes de la carrera de Química de alimentos en el análisis de contaminantes radiológicos en cualquier tipo de alimento utilizando métodos nucleares.
- Creación de un laboratorio de certificación radiológica de alimentos en la Facultad de Química, UNAM.
- Creación de un atlas del estado actual de las concentraciones de elementos radioactivos en alimentos en México, que nos pueda servir como comparativo en caso de emergencias nucleares.
- Contar con protocolos de análisis para conocer el contenido de isótopos radiactivos y que dichos protocolos se diversifiquen y adecuen para que sea posible realizar el mismo análisis en otras matrices alimentarias.
- Cumplir con las recomendaciones y filosofía de la FAO, la OIEA y la OMS de “Alimentos seguros” en cuestión de radionúclidos.
- Formación de recursos humanos calificados en el análisis de contaminantes radiológicos en alimentos, por medio de métodos nucleares.

9. Bibliografía

Fuentes impresas:

1. BRYAN. J. (2009), Introduction to Nuclear Science, New York, CRC Press, pp. 88-91, 99-115.
2. CASARETT, A. (1968), Radiation Biology, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, pp. 7-21.
3. ESPINOSA, G., HERNÁNDEZ-IBINARRIAGA, H., GOLZARRI, J. (2009), An analysis of the potassium concentrations of soft drinks by HPGe gamma spectrometry, Radioanal Nuclear Chemistry 282, 401-404.
4. FERRER. A. (2003), Física nuclear y de partículas, Valencia, PUV, p.p. 153, 169, 297-299.
5. GLASSTONE, S., SESONKE, A. (1975), Ingeniería de reactores nucleares, Edición en español, Editorial Reverté, Barcelona, p.p. 32-55.
6. KASE, K., BJÄRNGARD, B., ATTIX, F. (1986), The Dosimetry of Ionizing Radiation. Volume I, Academic Press, San Diego, California, p.p. 291-320.
7. LORIA, G., MORA, P., BADILLA, M. (1999), K^{40} y Cs^{137} en banano exportado por Costa Rica, Agronomía Costarricense 23(2), 157-163.
8. MURALEEDHARA, K. (2009), Nuclear Radiation Detection, Measurements and Analysis, Alpha Science, Calicut, Kerala, p.p. 1-4, 7-8, 15-27, 115-118.
9. POPOVA, M., SEDOROVA, V. (1957), Physics of Fission (English Translation), Supplement No. 1 to the Soviet Journal of Atomic Energy, U.S.A., 307-315.
10. ESPINOSA, G., NAVARRETE, M., GOLZARRI, J. (2011), Radioactivity in Marine Salts and Sediments, InTech, Ciudad de México, 225-244.
11. TSOULFANIDIS, N., LANDSBERGER, S. (2011), Measurement and Detection of Radiation, tercera edición, CRC Press, New York, p.p. 4-14, 63-78, 119-129, 204-211.
12. Environment Agency, Food Standards Agency, Northern Ireland Environment Agency, Scottish Environment Protection Agency (2011), Radioactivity in Food and the Environment 2010, Ireland, Cefas, 35-45.
13. International Atomic Energy Agency (IAEA) (1991), The International Chernobyl Project: Technical Report, Viena, 26-35.
14. Victoria P. (2009), Tesis de licenciatura: Análisis de contaminantes radiológicos en suelos, mediante espectrometría gamma, Facultad de Ciencias, UNAM, pp. 12-17, 32-40.

15. W.H.O. (1989), Derived Intervention Levels for Radionuclides in Food, Switzerland, pp. 5-25.

Fuentes electrónicas:

16. Banco de Información Económica (BIE). Encuesta mensual. Volumen y valor de producción de industria manufacturera de quesos de leche de vaca, INEGI, última consulta: Febrero 2013, página de internet: www.inegi.org.mx/sistemas/bie/default.aspx?idserPadre=1050019000080006#D1050019000080006

17. Boletín de información oportuna del sector alimentario julio 2012, INEGI, consultado: Febrero 2013, página de internet: www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sectorial/biosa/sep/biosa.pdf

18. Comisión Federal de Electricidad (CFE) > CFE y la electricidad en México > Generación de energía, última consulta: Febrero 2013, página de internet: www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/CFE_y_la_electricidad_en_Mexico/Paginas/Generacion.aspx

19. EB Escenario Base 09-18. Proyecciones para el sector agropecuario en México, SAGARPA, última consulta: Febrero 2013, página de internet: sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/EBespa%C3%B1ol300909.pdf

20. El sector alimentario en México 2010. Serie estadísticas sectoriales, INEGI, última consulta: Enero 2013, página de internet: www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/SAM/2010/sam2010.pdf

21. El sector alimentario en México 2012 (Serie estadísticas sectoriales), INEGI, última consulta: Septiembre 2013, página de internet: www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/sociodemografico/SAM/2012/sam2012.pdf

22. Detector de Germanio Hiperpuro, Espectroscopia Gamma ORTEC®, última consulta: Abril 2013, dirección de internet: www.ortec-online.com/products/radiation-detectors/germanium-hpge-radiation-detectors

23. F.A.O., Radioactive Contamination and Animal Production and Health, última consulta: Abril 2013, página de internet: www-naweb.iaea.org/nafa/news/radioactive-contamination.html

24. International Atomic Energy Agency (IAEA). Power Reactor Information System (PRIS), última consulta: Noviembre 2012, página de internet: www.iaea.org/pris/
25. International Atomic Energy Agency (IAEA). The ALMERA Network, última consulta: Noviembre 2013, página de internet: nucleus.iaea.org/rpst/ReferenceProducts/ALMERA/index.htm
26. IPCS INCHEM International Programme of Chemical Safety, Selected Radionuclides, última consulta: Marzo 2013, página de internet: www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc25.htm
27. Norma Oficial Mexicana, NOM-088-SSA1-1994, bienes y servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados, Límites máximos permisibles, última consulta: Abril 2013, página de internet: www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/088ssa14.html
28. Prospectiva del sector eléctrico 2012-2026, SENER, última consulta: Enero 2013, página de internet: www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/Prospectiva_electricidad%20_2009-2024.pdf
29. Reglamento de control sanitario de productos y servicios, Secretaría de Salud, última consulta: Marzo 2013, página de internet: www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/compi/rcsps.html
30. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Establecimientos Tipo Inspección General (TIF), última consulta: Noviembre 2012, página de internet: www.senasica.gob.mx/?id=743
31. Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4(SIAVI 4), última consulta: Febrero 2013, página de internet: www.siavi.economia.gob.mx/
32. Codex General Standard for Contaminants & Toxins in Food & Feed, (CODEX Standard 193-1995), última consulta: Abril 2013, página de internet: www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/CXS_193e.pdf
33. Norma Mexicana, NMX-FF-078-SCFI-2002, Productos Pecuarios – Carne de bovino en canal – Clasificación, última consulta: Marzo 2013, página de internet: www2.sag.gob.cl/Pecuaria/establecimientos_habilitados_exportar/normativa/mexico/NMX-FF-078-SCFI-2002_clasific_prod_pecuarios.pdf
34. Norma Oficial Mexicana, NOM-121-SSA1-1994, bienes y servicios. Quesos: Frescos, madurados y procesados. Especificaciones sanitarias, última consulta: Marzo 2013, página de internet: www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/121ssa14.html

35. ESCALA INTERNACIONAL DE SUCESOS NUCLEARES Y RADIOLÓGICOS, última consulta: Octubre 2015, página de internet: www.iaea.org/sites/default/files/ines_sp.pdf

36. Aviso de cancelación de la Norma Oficial Mexicana NOM-088-SSA1-1994, Bienes y servicios. Contaminación por radionúclidos en alimentos de consumo masivo importados. Límites máximos permisibles, publicada el 28 de junio de 1995, última consulta: Abril 2013, página de internet: www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/compi/avican171204.html

37. Bienestar animal para operarios en rastros de bovinos, SAGARPA-INIFAP, última consulta: Marzo 2017, página de internet: www.anetif.org/files/pages/0000000034/10-bienestar-animal-para-operarios-en-rastros-de-bovinos.pdf

38. Measurement of radionuclides in food and the environment A guidebook, Technical reports series No. 295, IAEA (1989), última consulta: Octubre 2015, página de internet: www-pub.iaea.org/books/iaeabooks/1398/Measurement-of-Radionuclides-in-Food-and-the-Environment

ANEXOS

A) Protocolo de análisis

PROTOCOLO: DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE CONTAMINANTES RADIOLÓGICOS EMISORES DE RADIACIÓN GAMMA, MEDIANTE ESPECTROMETRÍA DE GERMANIO HIPERPURO EN MATRICES ALIMENTARIAS.

MATRIZ ALIMENTARIA: PRODUCTOS CÁRNICOS Y QUESOS.

Objetivo

Establecer el procedimiento a seguir para la determinación de concentraciones de contaminantes radiológicos emisores de radiación gamma en matrices alimentarias como productos cárnicos y quesos utilizando la espectrometría de germanio hiperpuro.

Resumen

En este documento se detalla el método a seguir para la detección y posterior cuantificación de actividad específica de los radionúclidos emisores de radiación gamma que se encuentren contaminando alimentos. Como método de detección se utiliza un método de espectrometría mediante un detector de Germanio Hiperpuro; este método es capaz de detectar las emisiones gamma provenientes de algunos radioisótopos con energías de entre 50 y 2,000 keV en un analizador multicanal de 16000 canales. El espectro obtenido en el análisis permite encontrar la totalidad de los radioisótopos emisores de energía gamma en la muestra analizada. Sin embargo, es necesario mencionar que para la cuantificación del contaminante radiológico, es decir, su concentración en la muestra, es necesario el uso de patrones radiactivos certificados, dicho patrón debe contener los radioisótopos de interés.

Los niveles de referencia que se manejan internacionalmente para los contaminantes radiológicos presentes en alimentos, se encuentran reportados en la norma CODEX-STAN 193-1995.

Material

- Detector de Germanio Hiperpuro (equipo completo)
- Nitrógeno líquido
- Recipientes Marinelli
- Balanza granataria
- Muestras de productos cárnicos y/o quesos

- Patrón radiactivo certificado

Equipo de detección de Germanio Hiperpuro

El sistema de detección debe cumplir con los siguientes requerimientos mínimos:

- Contar con una resolución de 2 keV para una energía de 1.33 MeV, correspondiente al ^{60}Co y una eficiencia relativa de 10%.
- Electrónica analógica de alta estabilidad y bajo ruido.
- Analizador multicanal de 4000 canales.
- Manuales de los equipos.
- Blindaje para minimizar el fondo de radiación ambiental.
- Instalaciones y condiciones adecuadas del laboratorio.

Calibración del equipo

- Utiliza patrones radiactivos que cubran el intervalo de interés para la medición. Frecuentemente son utilizados fuentes de Am-241, Cs-137, Co-60 y K-40.
- Graficar el número del canal central de cada fotopico proveniente de las fuentes anteriores contra la energía en keV de cada uno.
- Obtener el coeficiente de correlación para la pendiente formada en la gráfica anterior, debe existir una correlación positiva lo más cercano al valor de 1.

Patrón radiactivo

- Utilizar un patrón radiactivo certificado. Generalmente se compone de una solución con fuente multinúclida.

Dicho patrón debe proporcionar, para cada radionúclido que lo compone, la siguiente información: factor de emisión de gammas (%), Área Neta (cuentas/tiempo de análisis), Radiación γ por unidad de tiempo (γ/s). Se presenta un ejemplo en la tabla 1.

Tabla 1. Información obtenida del patrón certificado

Radioisótopo	Energía (keV)	Factor de emisión de gammas (%)	Radiación γ por unidad de tiempo (γ/s)	Área Neta (cuentas/7,557 seg)	Error (cuentas/7,557 seg)	Eficiencia (cuentas/gammas)
²⁴¹ Am	59.5	0.36	539.7344	17822	287	0.004
¹⁰⁹ Cd	88.03	0.0363	600.0488	52107	374	0.011
⁵⁷ Co	122	0.856	443.9151	134318	496	0.040
⁵⁷ Co	136	0.105	54.4522	17965	350	0.044
¹³⁹ Ce	166	0.799	350.0550	111793	515	0.042
²⁰³ Hg	279	0.815	224.9072	52083	365	0.031
¹¹³ Sn	392	0.649	882.8164	154497	506	0.023
⁸⁵ Sr	514	0.98	873.4959	113724	592	0.017
¹³⁷ Cs	661.66	0.85	2928.7842	328223	704	0.015
⁸⁸ Y	898	0.94	2619.2721	217337	601	0.011
⁶⁰ Co	1173.24	0.9986	3989.8902	264273	628	0.009
⁶⁰ Co	1332.5	0.9998	3994.6847	243619	590	0.008
⁸⁸ Y	1836	0.994	2769.7409	126374	389	0.006

*El tiempo de conteo del análisis fue de 7,557 seg.

- Calcular la eficiencia* (cuentas/gammas) para cada radionúclido de interés a partir de la información obtenida del patrón (tabla) y por medio de la siguiente ecuación:

Eficiencia (cuentas/gammas):
$$Ef = \frac{(A_N)}{\gamma \cdot t_c}$$

donde:

A_N = Área Neta (cuentas)

γ = Radiación gamma por unidad de tiempo (γ/s)

t_c = Tiempo de conteo (s)

Método

Obtención de espectros de fondo

- Previo al análisis de muestras y para conocer la aportación de la radiación de fondo. Correr un análisis depositando el recipiente Marinelli vacío en el detector, cerrar el blindaje e iniciar el análisis por 86,400 segundos.

Preparación de muestras

- Triturar las muestras de cárnicos y/o quesos en un procesador de alimentos para obtener trozos pequeños.

- Registrar la masa del Marinelli vacío.
- Depositar la muestra triturada en el recipiente Marinelli.
- Registrar la masa de del Marinelli con la muestra.

Obtención de espectros de muestra

- Depositar el Marinelli con la muestra dentro del blindaje de plomo sobre el detector de Germanio Hiperpuro. Cerrar el blindaje de plomo.
- Iniciar el análisis para obtener el espectro de la muestra en el programa MAESTRO ® -32 v6 ORTEC®. El tiempo de conteo o análisis tiene una duración de 24 horas.
- Buscar en el espectro obtenido si existen posibles contaminantes radiológicos. Lo anterior de acuerdo a la tabla 2.

Tabla 2. Contaminantes radiológicos de interés.

Radionúclido de interés	Símbolo	Energía de los fotones (MeV)
Yodo-129	¹²⁹ I	0.040
Yodo-131	¹³¹ I	0.284, 0.364, 0.637
Cesio-134	¹³⁴ Cs	0.128, 0.605, 0.796
Cesio-137	¹³⁷ Cs	0.662
Tecnecio-m99	^{99m} -Tc	0.140
Iridio-192	¹⁹² Ir	0.317, 0.468
Uranio-235	²³⁵ U	0.184
Cobalto-60	⁶⁰ Co	1.173, 1.332
Rutenio-103	¹⁰³ Ru	0.497
Americio-241	²⁴¹ Am	0.060

- En caso de que el espectro presente fotopicos con energía correspondiente a las mencionadas en la tabla 2, se sospecha de una contaminación radiológica. En caso contrario, no existe contaminación en el alimento o los niveles de contaminación no son medibles.
- Realizar el análisis completo a los fotopicos sospechosos de ser contaminantes radiológicos. Registrar: Área neta (cuentas/tiempo de análisis) y energía (MeV).

Determinación de la concentración del contaminante en la matriz alimentaria

- Realizar el cálculo de la concentración del radionúclido tomando en cuenta el tiempo de conteo, la eficiencia de detección correspondiente, el rendimiento radiactivo de cada radionúclido y la masa de muestra analizada.
- Cálculo:

Mediante los datos proporcionados por el apatcón multinúclido, calcular para cada fotopico/contaminante radiológico:

Razón de conteo ó Rz_c (cuentas/s):
$$Rz_c = \frac{\Delta A_N}{t_c}$$

donde:

ΔA_N = Promedio de área neta de muestra – área neta de fondo (cuentas)

t_c = tiempo de conteo (segundos)

Concentración o actividad (Bq):
$$Act = \frac{Rz_c}{\% \gamma \cdot Ef}$$

donde:

Rz_c = Razón de conteo (cuentas/s)

$\% \gamma$ = Factor de emisión de gammas (%)

Ef = Eficiencia (cuentas/gammas)

Finalmente, para conocer la concentración o actividad específica del radioisótopo/contaminante radiológico en la muestra, la actividad se divide entre la masa analizada de la muestra. La concentración o actividad específica se reporta en Bq por cada kilogramo de alimento (Bq/kg).

Reportar los niveles de contaminantes radiológicos en productos cárnicos y quesos

- Cuando el resultado del análisis sea inferior a la concentración permitida por la norma CODEX-STAN 193-1995 (ver tabla 3) el alimento se debe considerar como “seguro para consumo humano”.
- Cuando el resultado excede dicha concentración los gobiernos de cada país deberán decidir si el alimento debe ser distribuido a la población o no y bajo qué circunstancias.

Tabla 3. Niveles de referencia en alimentos para los radionúclidos emisores de energía gamma. CODEX-STAN 193-1995.

Alimento	Radionúclidos	Nivel de referencia (NR) (Bq/kg)
Alimento para lactante	^{241}Am	1
	$^{131}\text{I}, ^{129}\text{I}, ^{235}\text{U}$	100
	$^{60}\text{Co}, ^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}, ^{103}\text{Ru}, ^{192}\text{Ir}, ^{99}\text{Tc}$	1000
Otros alimentos distintos de los alimentos para lactante	^{241}Am	10
	$^{131}\text{I}, ^{129}\text{I}, ^{235}\text{U}$	100
	$^{60}\text{Co}, ^{134}\text{Cs}, ^{137}\text{Cs}, ^{103}\text{Ru}, ^{192}\text{Ir}, ^{99}\text{Tc}$	1000

B) Estadísticas de comercio exterior de productos cárnicos y quesos

Carnes y despojos comestibles.

■ Carne de animales de la especie bovina, fresca o refrigerada.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	406,373,755	70,819,612	319,815,627	56,551,611	214,450,151	38,363,354	119,099,927	21,372,777	87,696,214	13,838,884	95,740,480	15,024,713	87,902,994	14,129,247
Estados Unidos de América	392,919,476	67,878,747	309,111,832	55,169,108	205,616,287	37,083,418	112,442,420	20,430,441	75,837,666	12,380,475	86,906,634	13,852,640	81,331,359	12,972,271
Japón	13,337,245	2,896,702	10,424,010	1,323,805	8,635,000	1,207,475	6,655,681	941,982	11,790,420	1,442,480	8,651,527	1,136,532	6,466,273	1,128,863
Corea del Sur	94,374	24,059	279,093	58,525	198,849	72,431	1,826	353	66,809	15,705	182,319	35,540	105,353	28,102
Hong Kong (Territorio de)	22,074	19,980	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rusia antes U.R.S.S.	586	123	692	172	0	0	0	0	80	80	0	0	0	0
República Dominicana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
España (Reino de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9
Guatemala (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	1,239	142	0	0	0	0
Panamá (República de)	0	0	0	0	15	29	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	676,051,547	123,233,337	904,056,989	180,697,738	850,713,691	203,752,378	808,133,263	216,618,246	1,121,615,408	275,360,196	1,026,484,946	265,850,175	930,989,018	253,854,541
Estados Unidos de América	579,534,751	104,462,727	755,361,251	150,507,233	699,236,682	165,945,212	679,967,673	179,507,947	980,097,605	238,548,980	886,055,586	228,275,777	810,609,538	219,995,738
Canadá	94,539,651	18,376,407	141,966,561	28,516,790	151,072,241	37,666,078	126,388,408	36,588,118	140,326,744	36,484,774	134,810,538	35,926,172	118,144,380	33,227,603
Nicaragua (República de)	1,069,079	261,906	6,164,133	1,546,422	0	0	0	0	0	0	360,065	89,350	147,673	38,235
Australia (Comunidad Australiana)	808,960	124,529	206,197	36,001	0	0	0	0	218	110	56,298	19,197	68,669	17,418
Uruguay (República Oriental del)	99,106	7,767	118,848	10,422	0	0	908,610	278,857	507,021	137,037	3,403,953	1,013,781	0	0
Costa Rica (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	72,075	18,132	0	0	78,042	19,207
Chile (República de)	0	0	0	0	0	0	868,572	243,322	556,270	152,583	1,798,496	525,886	1,913,207	539,863
Honduras (República de)	0	0	239,900	80,667	404,768	141,086	0	0	0	0	0	0	0	0
Nueva Zelandia	0	0	99	200	0	0	0	0	55,475	18,578	10	10	27,509	16,473

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

■ Carne de animales de la especie bovina, congelada.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	235,236,496	52,102,212	212,191,615	47,911,624	73,696,404	33,721,024	53,952,900	13,600,029	56,970,034	13,945,689	52,726,861	13,194,341	44,155,651	10,717,736
Rusia antes U.R.S.S.	111,383,521	24,946,544	111,672,784	24,014,546	14,824,824	3,741,399	133	133	0	0	187	187	0	0
Japón	81,759,495	17,383,351	61,210,184	15,438,038	47,864,690	26,633,255	38,081,959	9,433,204	34,078,709	8,521,171	25,379,483	6,157,783	18,621,805	3,960,322
Estados Unidos de América	30,992,477	7,174,109	11,107,250	2,515,139	2,236,972	608,516	8,145,451	1,677,713	4,336,437	603,174	2,974,283	516,494	1,770,983	259,200
Corea del Sur	4,243,215	1,013,552	16,711,057	3,746,177	6,342,024	2,037,490	2,049,216	702,595	13,549,172	3,206,235	14,972,384	3,163,725	16,257,023	3,881,536
Angola (República Popular de)	4,234,831	918,609	10,576,227	1,975,905	540,795	99,798	0	0	50	33	0	0	0	0
Panamá (República de)	1,450,911	385,582	55,543	21,332	46,912	14,160	227,726	30,808	80,212	21,051	105,476	37,958	0	0
Kazakhstan	746,793	149,997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Islas Vírgenes Británicas	327,043	75,022	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Congo, República de	62,915	47,440	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Vietnam (República Socialista de)	35,295	8,003	402,033	97,994	0	0	118,756	50,818	0	0	0	0	0	0
Colombia (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	439	87	0	0
Costa Rica (República de)	0	0	0	0	0	0	561,774	185,681	2,437,227	754,002	2,035,765	687,486	1,979,359	672,557
Cuba (República de)	0	0	58	59	0	0	0	0	490	82	0	0	0	0
Chile (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	3
China (República Popular de)	0	0	202,207	45,406	0	0	0	0	0	0	73,459	22,363	0	0
República Dominicana	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130,116	54,386	218,008	89,431
España (Reino de)	0	0	0	0	14	13	0	0	0	0	0	0	57	13
Hong Kong (Territorio de)	0	0	221,761	47,006	107,880	41,053	0	0	0	0	0	0	0	0
Honduras (República de)	0	0	0	0	0	0	119,564	38,088	0	0	48,064	19,300	0	0
Kenya (República de)	0	0	0	0	22	44	0	0	0	0	0	0	0	0
Nicaragua (República de)	0	0	204	184	0	0	99	89	0	0	0	0	0	0
Puerto Rico	0	0	288	228	1,732,271	545,292	4,648,222	1,480,895	2,487,727	839,934	7,007,205	2,534,568	5,308,386	1,854,671
Corea del Norte (República Popular Democrática de)	0	0	32,019	9,604	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Portugal	0	0	0	0	0	0	0	0	10	4	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	25,782,083	4,412,225	28,686,187	6,222,196	24,024,857	6,283,123	31,293,992	11,026,020	44,527,482	13,209,497	50,595,215	19,528,432	42,298,291	16,813,682
Estados Unidos de América	19,298,608	3,256,129	19,237,684	3,735,324	14,236,179	2,849,640	15,930,092	4,386,714	24,728,413	6,593,626	11,768,334	4,071,284	12,316,904	4,010,156
Nueva Zelandia	2,675,954	528,968	1,893,273	600,001	2,069,981	904,945	2,101,146	1,405,759	2,771,066	1,042,824	5,660,270	2,778,015	9,827,957	4,887,088
Australia (Comunidad Australiana)	2,211,027	360,661	3,555,951	824,929	4,514,361	1,588,539	3,281,724	1,699,814	3,020,149	1,048,362	6,554,257	2,910,954	5,840,804	2,624,282
Canadá	1,433,803	229,904	771,979	212,252	1,960,040	481,599	3,044,944	951,655	5,542,485	1,716,515	4,724,351	1,627,244	1,957,623	578,408
Nicaragua (República de)	102,865	28,094	2,859,226	759,940	73,482	36,308	355,385	156,215	361,916	85,703	865,425	329,415	770,410	265,121
Uruguay (República Oriental del)	29,521	2,080	75,660	11,991	164,344	35,696	2,198,104	650,543	2,966,399	909,707	12,459,249	4,443,960	1,423,994	415,024
Chile (República de)	26,879	5,622	187,962	47,150	51,376	20,969	565,469	231,850	1,508,769	536,766	4,741,126	1,755,776	7,497,433	2,969,088
Costa Rica (República de)	3,426	764	30,425	7,001	763,139	294,635	3,817,128	1,543,467	3,596,044	1,266,735	3,138,531	1,172,948	2,007,912	734,166
Honduras (República de)	0	0	73,789	23,514	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Panamá (República de)	0	0	238	90	191,955	70,788	0	0	32,241	9,254	683,672	438,833	655,254	330,345

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

■ Carne de animales de la especie porcina, fresca, refrigerada o congelada.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	307,864,860	58,264,144	323,076,731	64,463,859	271,262,727	58,482,872	232,294,753	53,100,202	325,216,754	67,773,853	236,845,198	59,962,158	193,975,639	48,284,842
Japón	252,241,806	43,151,174	256,168,866	46,822,204	230,055,053	45,481,821	195,881,240	41,732,640	296,453,176	60,447,166	206,170,674	50,392,887	159,289,436	38,942,790
Estados Unidos de América	31,837,187	7,141,185	31,207,583	7,117,229	23,860,698	5,936,874	22,708,918	5,618,597	23,170,970	5,682,870	24,750,363	7,748,145	30,781,437	7,864,880
Corea del Sur	23,387,067	7,862,229	35,645,607	10,494,185	17,320,854	7,047,944	13,547,922	5,691,822	4,219,918	1,260,110	5,850,981	1,801,439	3,904,766	1,477,171
China (República Popular de)	224,700	42,001	0	0	148	264	0	0	0	0	0	0	0	0
Vietnam (República Socialista de)	106,999	45,099	9,986	5,963	14,506	8,556	0	0	0	0	0	0	0	0
Singapur (República de)	67,084	22,441	0	0	30	60	0	0	0	0	0	0	0	0
Corea del Norte (República Popular Democrática)	9	5	0	0	0	0	156,650	57,096	1,365,256	382,171	0	0	0	0
Países Bajos (Reino de Los)	8	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aruba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73,104	19,639	0	0
Canadá	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	10	0	0
Costa Rica (República de)	0	0	0	0	0	0	23	45	0	0	0	0	0	0
Cuba (República de)	0	0	0	0	1,758	761	0	0	7,434	1,534	0	0	0	0
Hong Kong (Territorio de)	0	0	44,689	24,277	9,614	6,261	0	0	0	0	0	0	0	0
Kenya (República de)	0	0	0	0	66	328	0	0	0	0	0	0	0	0
Rusia antes U.R.S.S.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	36	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	798,545,052	413,314,863	905,463,334	430,735,343	980,881,432	499,852,681	710,783,796	496,220,487	658,193,683	386,619,452	509,358,646	324,520,651	533,541,426	321,739,633
Estados Unidos de América	750,212,349	389,256,132	846,643,031	402,281,270	876,231,086	447,924,713	659,444,118	462,015,047	611,343,023	360,150,520	456,268,966	292,784,059	480,507,902	292,723,095
Canadá	44,471,405	21,850,802	56,912,171	26,989,145	102,926,272	50,672,484	49,572,053	33,051,379	42,361,154	24,248,232	48,173,900	29,051,339	44,395,677	24,688,760
Chile(República de)	3,861,298	2,207,928	1,908,132	1,464,927	1,724,074	1,255,482	1,767,625	1,154,060	4,426,089	2,203,609	4,915,780	2,685,252	8,637,847	4,327,776
España (Reino de)	0	0	0	0	0	0	0	0	36,781	1,986	0	0	0	0
Nueva Zelandia	0	0	0	0	0	0	0	0	26,636	15,102	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

Carne y despojos comestibles, de aves de la partida 01.05, frescos, refrigerados o congelados.

■ Carnes y despojos comestibles de gallo o gallina sin trocear, frescos o refrigerados.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estados Unidos de América	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	19,223,673	12,501,754	11,238,976	7,324,836	1,205,772	752,219	10,173,683	7,223,839	8,703,064	5,892,998	16,121,994	11,126,425	34,018,778	29,170,382
Estados Unidos de América	19,223,673	12,501,754	11,238,976	7,324,836	1,205,772	752,219	10,173,683	7,223,839	8,703,064	5,892,998	16,121,994	11,126,425	34,018,778	29,170,382

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [32]

■ Carne y despojos comestibles de gallo o gallina sin trocear, congelados.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	130,119	116,280	447,155	420,015	2,555,686	2,989,380	2,258,410	2,258,412	498,084	417,100	0	0	29,224	17,442
Hong Kong (Territorio de)	80,119	66,280	17,504	25,005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Togo	50,000	50,000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Angola (República Popular de)	0	0	87,150	74,700	285,105	273,900	690,900	690,900	254,980	209,000	0	0	0	0
Benín (República Popular de)	0	0	164,466	146,010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Congo, República de	0	0	178,035	174,300	2,264,610	2,712,810	1,567,500	1,567,500	243,104	208,100	0	0	0	0
Japón	0	0	0	0	5,971	2,670	10	12	0	0	0	0	0	0
Estados Unidos de América	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29,224	17,442

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	2,700,458	1,675,535	2,204,330	1,588,977	1,885,154	1,244,643	4,212,313	3,328,004	4,957,344	3,807,413	2,576,067	1,801,945	4,315,529	3,644,735
Estados Unidos de América	2,700,458	1,675,535	2,204,330	1,588,977	1,885,154	1,244,643	4,116,063	3,261,626	4,916,533	3,773,404	2,576,067	1,801,945	3,598,510	3,093,183
Chile (República de)	0	0	0	0	0	0	96,250	66,378	40,811	34,008	0	0	717,019	551,552

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

■ Trozos y despojos de gallo o gallina, frescos o refrigerados.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	0	0	28,849	25,031	38,000	68,144	86	72	23,600	18,144	39,638	33,612	0	0
Hong Kong (Territorio de)	0	0	28,750	25,000	23,000	50,000	0	0	0	0	0	0	0	0
Japón	0	0	0	0	0	0	86	72	0	0	0	0	0	0
Estados Unidos de América	0	0	0	0	15,000	18,144	0	0	23,600	18,144	39,638	33,612	0	0
Vietnam (República Socialista de)	0	0	99	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	374,929,971	336,640,839	331,069,953	365,052,762	263,041,240	337,733,178	220,026,284	290,474,965	169,573,333	239,157,927	149,672,074	217,557,850	127,627,776	222,043,846
Estados Unidos de América	374,929,971	336,640,839	331,069,953	365,052,762	262,954,840	337,709,178	220,026,284	290,474,965	169,573,333	239,157,927	149,378,514	217,303,871	126,633,353	220,846,295
Canadá	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	293,560	253,979	994,423	1,197,550
Chile (República de)	0	0	0	0	86,400	24,000	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

■ Trozos y despojos de gallo o gallina, congelados

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene- dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	4,487,308	4,156,519	14,968,405	13,023,628	7,437,337	7,568,962	2,551,825	3,388,449	848,688	1,238,472	292,041	310,231	41,120	29,320
Angola (República Popular de)	1,579,147	1,294,800	750,730	647,400	0	0	0	0	0	0	16,380	25,200	0	0
Hong Kong (Territorio de)	1,023,083	1,402,540	8,628,601	8,674,614	4,044,825	3,962,609	603,377	851,035	414,674	511,566	84,780	153,939	0	0
Japón	616,457	159,881	2,185,836	633,372	506,440	187,699	48	40	0	0	0	0	0	0
Vietnam (República Socialista de)	419,515	670,960	1,095,346	1,185,530	2,137,912	2,535,809	1,509,452	2,114,122	433,994	726,896	24,451	54,995	0	0
Ghana (República de)	403,779	312,200	138,239	123,000	0	0	10,008	22,240	0	0	0	0	0	0
Congo, República de	209,158	174,300	922,038	771,900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Estados Unidos de América	167,320	68,638	662,728	278,073	22,296	42,644	119,216	73,812	0	0	166,430	76,097	41,120	29,320
Benín (República Popular de)	43,470	48,300	491,172	610,300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Togo	25,379	24,900	59,758	49,800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
China (República Popular de)	0	0	22,099	26,000	725,864	840,200	309,724	327,200	0	0	0	0	0	0
Alemania (República Federal de)	0	0	59	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Francia	0	0	11,799	23,600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hungría (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	20	10	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	206,045,380	148,593,438	238,339,750	190,347,009	208,501,639	196,001,641	209,869,254	179,507,702	224,006,423	171,013,012	165,526,680	139,695,075	160,749,878	155,495,929
Estados Unidos de América	172,234,140	136,977,752	198,717,471	176,466,185	161,487,064	180,017,622	153,308,918	154,991,372	159,529,926	148,143,738	129,901,274	128,397,337	95,309,876	128,966,408
Chile (República de)	33,811,240	11,615,686	39,622,279	13,880,824	47,014,575	15,984,019	56,560,336	24,516,330	64,476,497	22,869,273	35,625,406	11,297,738	65,440,002	26,529,521

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

Leche y productos lácteos, huevos de ave y miel natural.

■ **Queso y requesón.**

● **Quesos frescos (incluido el de lactosuero) sin fermentar y requesón.**

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	1,002,762	243,525	1,350,142	331,910	959,451	256,507	920,396	221,362	1,066,290	277,832	754,327	217,664	1,029,238	294,711
Estados Unidos de América	590,869	148,029	771,338	191,758	561,051	160,507	549,888	131,286	694,925	185,825	382,992	125,664	835,359	246,679
Guatemala (República de)	411,822	95,433	505,991	121,945	398,400	96,000	370,400	90,015	371,335	92,000	371,335	92,000	193,879	48,032
Alemania (República Federal de)	55	37	10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taiwan (Taípe chino)	9	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Belice	7	5	483	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costa Rica (República de)	0	0	0	0	0	0	15	15	0	0	0	0	0	0
Cuba (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	16	4	0	0	0	0
Honduras (República de)	0	0	0	0	0	0	63	15	0	0	0	0	0	0
Países no identificados	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
Corea del Sur	0	0	72,296	18,115	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0
Malasia (Federación de)	0	0	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nicaragua (República de)	0	0	0	0	0	0	15	15	0	0	0	0	0	0
Panamá (República de)	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perú (República del)	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
El Salvador (República de)	0	0	0	0	0	0	15	15	0	0	0	0	0	0
Tailandia (Reino de)	0	0	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	24,519,389	6,393,746	20,000,414	5,033,802	39,332,647	11,113,043	46,044,948	14,182,614	61,228,782	15,677,727	55,835,520	15,823,443	42,987,593	13,550,849
Estados Unidos de América	24,452,470	6,389,206	19,941,718	5,029,918	39,268,635	11,107,654	46,009,220	14,180,208	61,190,236	15,675,665	55,630,108	15,799,277	42,873,848	13,537,117
Italia	37,209	2,188	37,668	2,143	21,134	1,238	27,745	1,575	30,173	1,557	13,153	849	542	52
Francia	20,262	1,481	16,241	1,225	25,731	2,251	4,166	309	8,373	504	168,211	15,927	109,200	12,103
España (Reino de)	9,448	869	4,775	502	14,920	1,741	3,817	522	0	0	7,124	1,505	1,789	600
Australia (Comunidad Australiana)	0	0	12	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Alemania (República Federal de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,924	5,884	2,214	976
Grecia	0	0	0	0	2,227	157	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

• Queso de cualquier tipo, rallado o en polvo.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene- dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene- dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	66,926	12,060	332,837	94,715	20,872	6,103	137	89	46,847	29,493	20,472	5,250	785	282
Estados Unidos de América	47,495	9,500	332,642	94,449	20,770	6,078	17	5	44,950	29,038	15,197	4,099	8	2
Guatemala (República de)	19,245	2,545	0	0	0	0	0	0	10	6	0	0	0	0
Cuba (República de)	186	13	43	5	81	15	31	2	10	2	5	1	0	0
Belice	0	0	142	250	21	10	89	82	1,861	434	2,089	700	776	278
Brasil (República Federativa del)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,181	450	0	0
Japón	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Corea del Sur	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	0	0	0	0
Malasia (Federación de)	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Panamá (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	10	6	0	0	0	0
Tailandia (Reino de)	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	77,909,782	17,509,530	88,653,535	19,960,167	58,866,919	13,302,199	34,983,675	7,266,814	37,547,225	6,706,428	32,926,973	6,544,594	24,253,694	5,633,865
Estados Unidos de América	77,909,084	17,509,478	88,652,803	19,960,033	58,856,666	13,301,095	34,983,675	7,266,814	37,546,978	6,706,403	32,328,107	6,408,539	24,105,247	5,585,686
España (Reino de)	695	50	0	0	1,166	80	0	0	0	0	8,833	1,775	8,613	1,664
Países Bajos (Reino de Los)	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Francia	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,558	2,472	4,786	1,150
Aruba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Argentina, República	0	0	556	90	0	0	0	0	0	0	553,695	125,458	131,411	44,947
Bélgica, (Reino de)	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Chile(República de)	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	23,280	6,000	12	10
Italia	0	0	0	0	8,263	1,000	0	0	245	20	2,500	350	3,625	408
Nueva Zelandia	0	0	172	43	805	21	0	0	0	0	0	0	0	0
Uruguay (República Oriental del)	0	0	0	0	1	2	0	0	2	4	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

• Queso fundido, excepto el rallado en polvo.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	721,210	234,329	876,174	292,628	2,364,217	947,500	2,197,344	856,557	2,668,933	837,893	2,217,773	810,789	1,967,419	803,188
Guatemala (República de)	295,543	86,282	442,961	134,869	1,156,068	401,957	799,743	280,934	1,062,903	297,545	769,648	258,995	624,574	233,355
El Salvador (República de)	202,597	65,260	259,942	74,923	244,752	73,223	203,741	68,352	250,190	65,946	192,431	61,472	141,357	46,614
Estados Unidos de América	177,642	61,103	1,617	1,291	85,671	25,271	120,231	37,573	14,459	5,692	267,520	111,848	216,643	92,480
Chile (República de)	31,478	17,280	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Belice	13,906	4,359	23,957	6,868	22,259	8,848	17,611	3,643	15,157	4,232	10,762	4,579	1,486	702
Zona del Canal de Panamá	44	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Canadá	0	0	0	0	0	0	21	4	0	0	0	0	0	0
Costa Rica (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11,645	3,286	4,996	2,499
Cuba (República de)	0	0	5	5	0	0	9,715	1,095	9	2	0	0	0	0
Honduras (República de)	0	0	74,504	37,696	566,140	290,412	650,546	296,247	871,514	317,266	628,003	259,205	564,020	268,949
Japón	0	0	0	0	68	13	0	0	26	7	0	0	0	0
Nicaragua (República de)	0	0	73,176	36,960	289,252	147,772	395,732	168,705	454,675	147,201	327,837	106,445	414,343	158,588
Panamá (República de)	0	0	4	5	0	0	4	1	0	0	4,935	3,093	0	0
Perú (República del)	0	0	8	8	7	1	0	0	0	0	4,992	1,863	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	2,821,429	611,317	3,231,578	750,496	3,515,450	767,347	2,825,008	618,894	2,851,105	479,031	3,049,339	631,971	3,236,832	698,213
Estados Unidos de America	1,677,957	392,386	1,310,858	421,505	1,756,127	448,377	1,359,782	338,986	1,182,836	182,096	1,238,708	255,239	1,346,824	272,145
Paises Bajos (Reino de Los)	920,803	182,439	1,446,551	248,824	1,179,505	225,223	912,083	189,096	1,047,539	191,175	1,145,121	245,962	1,149,789	278,209
Austria (República de)	186,554	30,634	419,552	72,876	516,935	87,941	500,225	85,259	369,479	62,022	490,651	98,358	312,657	63,709
España (Reino de)	25,502	4,189	36,286	5,394	20,865	2,540	27,264	3,111	4,531	430	20,398	6,319	15,666	3,862
Francia	10,555	1,642	18,331	1,895	40,317	3,003	25,591	2,425	16,667	1,708	129,908	20,152	245,879	42,951
Australia (Comunidad Australiana)	39	15	0	0	0	0	0	0	229,471	41,530	0	0	136,080	30,816
Italia	13	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	288	15
Filipinas (República de)	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
República Checa	0	0	0	0	1,694	255	0	0	0	0	0	0	0	0
Suiza	0	0	0	0	0	0	0	0	510	61	2,736	318	3,437	487
Chile(República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,114	920
Alemania (República Federal de)	0	0	0	0	0	0	61	6	72	6	21,817	5,623	23,098	5,096
Panamá (República de)	0	0	0	0	0	0	2	8	0	0	0	0	0	0
Venezuela (República de)	0	0	0	0	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

• Queso de pasta azul.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic	Valor 2005 ene-dic	Volumen 2005 ene-dic	Valor 2004 ene-dic	Volumen 2004 ene-dic	Valor 2003 ene-dic	Volumen 2003 ene-dic
---------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------	--------------------	----------------------

La consulta no arrojo ningún resultado

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	3,037,727	356,230	3,915,029	428,309	3,568,110	418,705	2,752,467	366,175	2,507,318	282,623	3,104,682	455,938	1,670,357	272,526
Estados Unidos de América	1,333,785	182,007	1,599,297	212,444	1,423,090	206,666	1,188,164	181,929	1,082,217	142,190	634,854	87,301	442,831	63,053
Dinamarca (Reino de)	1,193,629	143,841	1,609,479	186,555	1,532,477	179,327	1,294,586	163,378	1,157,275	121,951	1,611,752	241,395	629,244	96,008
Francia	289,043	12,990	326,703	11,975	284,854	13,029	140,416	6,008	101,625	4,075	363,187	16,865	166,819	8,788
Alemania (República Federal de)	145,580	12,295	245,511	10,219	197,091	11,348	77,921	8,804	95,556	7,805	85,127	9,403	81,375	9,791
España (Reino de)	60,825	3,903	110,996	5,318	110,140	6,618	30,918	3,663	47,858	4,627	27,283	4,852	33,547	5,187
Italia	12,413	1,001	23,043	1,796	20,458	1,714	20,462	2,391	22,787	1,973	10,334	991	11,456	1,215
Países Bajos (Reino de Los)	2,452	190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Argentina, República	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	372,145	95,128	305,085	88,480

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

• Los demás quesos.

EXPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	11,346,320	2,892,549	15,359,937	3,361,276	14,096,839	4,892,228	14,407,237	3,143,457	15,965,866	3,418,118	11,133,108	2,924,911	9,801,980	2,843,932
Estados Unidos de América	10,060,061	2,067,798	12,828,891	2,527,010	13,111,741	4,376,534	13,465,521	2,708,122	14,950,689	2,937,716	10,222,737	2,400,758	8,492,903	2,170,420
Guatemala (República de)	1,155,179	797,567	999,511	506,244	937,447	505,364	909,719	427,032	865,211	443,179	828,708	480,193	955,201	572,272
Venezuela (República de)	102,552	21,074	0	0	0	0	0	0	4	16	0	0	0	0
El Salvador (República de)	20,225	4,495	55,783	11,149	46,723	9,705	30,941	7,637	0	0	34,560	24,883	305,626	80,251
Belice	7,876	1,497	5,828	1,209	11	4	143	58	956	360	289	87	418	84
Colombia (República de)	233	96	0	0	359	80	0	0	0	0	0	0	0	0
Japón	145	18	7	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuba (República de)	49	2	169	14	18	0	206	27	1,418	217	0	0	1,500	0
Australia (Comunidad Australiana)	0	0	1,046	576	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brasil (República Federativa del)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	6	0	0
Canadá	0	0	0	0	0	0	707	580	2,680	872	814	608	1,069	859
Chile (República de)	0	0	1,464,185	314,020	0	0	0	0	144,863	35,711	0	0	0	0
Alemania (República Federal de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	17
República Dominicana	0	0	485	500	505	500	0	0	0	0	6	2	0	0
España (Reino de)	0	0	0	0	1	10	0	0	0	0	0	0	0	0
Honduras (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	16	0	0
Corea del Sur	0	0	36	39	14	13	0	0	45	44	0	0	0	0
Malasia (Federación de)	0	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nicaragua (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45,864	18,345	45,236	20,018
Panamá (República de)	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Puerto Rico	0	0	3,964	471	0	0	0	0	0	0	100	10	0	0
Tailandia (Reino de)	0	0	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Taiwan (Taipe chino)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	9
Países Bajos (Reino de Los)	0	0	0	0	20	15	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

IMPORTACIONES	Valor 2012 ene-oct	Volumen 2012 ene-oct	Valor 2011 ene-dic	Volumen 2011 ene-dic	Valor 2010 ene-dic	Volumen 2010 ene-dic	Valor 2009 ene-dic	Volumen 2009 ene-dic	Valor 2008 ene-dic	Volumen 2008 ene-dic	Valor 2007 ene-dic	Volumen 2007 ene-dic	Valor 2006 ene-dic	Volumen 2006 ene-dic
Total	213,492,473	46,876,707	246,661,588	51,880,881	224,438,710	54,758,308	175,244,407	50,639,000	229,115,343	45,099,423	249,743,334	62,579,884	185,182,443	58,384,504
Estados Unidos de América	125,019,434	29,236,872	111,818,044	25,381,404	106,888,775	27,156,602	78,926,949	20,976,983	90,879,267	18,282,766	75,187,049	17,265,515	54,466,487	15,539,231
Chile (República de)	23,724,634	4,987,225	42,054,639	9,012,300	42,918,127	10,089,866	27,227,084	8,614,399	52,797,891	11,055,513	62,672,750	16,027,241	39,353,228	12,745,194
Países Bajos (Reino de Los)	21,500,568	4,246,980	21,226,345	3,567,415	26,550,789	5,860,778	17,923,248	4,983,841	30,479,173	5,875,304	33,459,393	7,951,788	13,017,702	3,220,051
Uruguay (República Oriental del)	19,283,613	3,594,855	43,882,057	8,321,790	25,368,855	6,172,184	21,134,468	6,516,967	36,409,244	7,024,764	36,280,793	9,494,449	23,246,362	7,396,425
Nueva Zelandia	15,636,225	3,821,097	14,532,802	4,016,451	10,314,323	3,528,119	17,101,883	6,192,071	7,110,805	1,487,553	32,437,060	10,256,753	35,402,834	13,976,611
Italia	2,178,115	168,375	3,220,841	220,022	2,305,989	188,066	1,635,888	148,220	1,764,021	144,108	1,396,798	128,650	1,033,265	107,089
España (Reino de)	1,764,413	160,962	2,597,488	211,786	2,116,702	176,730	1,569,014	138,133	2,157,866	177,891	1,791,982	171,029	1,341,138	142,803
Argentina, República	1,375,983	253,641	1,218,194	226,908	3,243,599	797,020	5,805,246	2,433,011	886,597	161,963	1,408,283	380,961	9,334,169	3,324,465
Francia	848,336	80,640	1,150,391	101,176	953,096	85,962	926,866	84,009	1,330,330	122,232	1,287,773	154,475	1,492,505	216,088
Alemania (República Federal de)	726,191	146,668	2,902,541	583,364	2,424,442	545,555	1,804,351	410,377	3,535,523	586,437	1,539,755	399,391	3,891,784	1,189,964
Suiza	518,095	38,823	643,751	43,095	530,436	45,675	377,184	29,563	770,676	69,977	445,309	45,647	583,418	73,636
Dinamarca (Reino de)	475,964	44,577	594,678	58,000	527,677	52,691	524,572	55,976	637,335	58,295	1,050,896	122,035	680,664	83,123
Austria (República de)	273,523	45,264	625,958	95,817	242,784	44,699	287,654	55,444	356,218	52,559	300,854	62,812	627,761	151,768
Canadá	167,379	50,721	0	0	0	0	0	0	379	53	0	0	665,980	202,482
Aruba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Australia (Comunidad Australiana)	0	0	174,237	39,780	53,102	14,347	0	0	18	0	469,390	116,380	155	56
Colombia (República de)	0	0	0	0	14	9	0	0	0	0	0	0	0	0
Reino Unido de la Gran Bretaña e Irlanda d	0	0	19,622	1,568	0	0	0	0	0	0	7,255	489	0	0
Nicaragua (República de)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44,991	15,511
Portugal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,994	2,261	0	0

Fuente: SIAVI 4, Sistema de Información Arancelaria Vía Internet 4. [31]

