

## Estudio de la Radiación y Radiactividad en Fórmulas Lácteas

*F. Mireles-García, J.L. Pinedo-Vega, L.L. Quirino-Torres, J.I. Dávila-Rangel,  
C. Ríos-Martínez, B. Leal-Acevedo, H. López-del-Río*  
Unidad Académica de Estudios Nucleares  
Universidad Autónoma de Zacatecas  
Ciprés 10, Frac. La Peñuela, Zacatecas, Zac. 98068, México  
[fmireles@cantera.reduaz.mx](mailto:fmireles@cantera.reduaz.mx)

### Resumen

La radiación y radiactividad natural esta presente en la cadena alimenticia del hombre, como es el caso de la leche, y proviene de las series de decaimiento radiactivo naturales del  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , y del radioisótopo de  $^{40}\text{K}$ . Puesto que los radioisótopos se pueden encontrar en suelo de donde se transfieren a los pastos y en el agua, que sirven de alimento y de beber a las vacas, para luego ingresar a la leche y sus derivados de consumo humano. En este trabajo se presenta el estudio de la radiación y radiactividad gamma de 40 muestras de fórmulas lácteas de las marcas y presentaciones más vendidas en el mercado del sector privado y público. Las mediciones de los espectros de rayos gamma se realizaron con un sistema de espectrometría basado en un detector de Germanio Hiperpuro (Ge HP). El detector tiene una resolución (FWHM) de 1.9 keV para una energía del rayo gamma de 1,332 keV del  $^{60}\text{Co}$ . Este estudio presenta los resultados de la concentración en actividad de fórmulas lácteas de los radioisótopos de interés. Además, los resultados se relacionan con posibles daños a la salud.

### 1. INTRODUCCIÓN

Después de un accidente nuclear la contaminación del medio ambiente y su consecuente contaminación de alimentos para humanos, se considera a la ingestión como una importante vía de exposición a la radiación para la población [1]. Como resultado de la precipitación radiactiva a causa de las pruebas de bombas atómicas en los 1960s y del accidente de la planta nuclear de Chernobyl (26 abril 1986) el  $^{90}\text{Sr}$  y  $^{137}\text{Cs}$  han sido ampliamente depositados alrededor del mundo [2]. Los radionúclidos más importantes que deben ser tomados en cuenta en la mayoría de los casos son el radiocesio, radioyodo y radioestroncio que son de origen antropogénico [1]. La mayoría de la actividad del suelo se debe al  $^{137}\text{Cs}$  (75%) que aun se encuentra en los primeros 10 cm de la superficie terrestre [1]. Por otro lado, tenemos la radiación y radiactividad natural que esta presente en la cadena alimenticia del hombre, como en el caso de la leche, y que proviene de las series de decaimiento radiactivo naturales del  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , y del radioisótopo del  $^{40}\text{K}$  [3].

La transferencia de radioisótopos del forraje a los productos animal se expresa comúnmente por el coeficiente de transferencia, definido como la razón de la concentración de actividad en leche o producto animal y la ingestión de actividad diaria promedio de forraje [4]. Se puede observar que

bajo condiciones agrícolas normales con una intensidad alta de pastoreo las concentraciones de actividad en leche son menores (para este caso en un factor de 2 a 3) [1]. Una de las contribuciones mayores de exposición radiológica del hombre por uranio es la minería y los jales, donde la concentración se incrementa de las series de uranio y torio [5]. Así, la acumulación de uranio aumenta en forraje y agua de beber, y puede conducir al incremento del contenido de uranio en leche y carne [6]. Un estudio realizado de la precipitación radiactiva global del  $^{137}\text{Cs}$  en suelos de centro-sur de Chile demuestra que el depósito de  $^{137}\text{Cs}$  encontrado en diferentes localidades se correlaciona con la altitud ( $r = 0.714$ ) y la razón de precipitación pluvial ( $r = 0.791$ ) [7].

Tomando en cuenta al  $^{40}\text{K}$  en muestras de leche y queso, el factor de descontaminación para cationes alcalinos es alrededor de 20, es decir, la mayoría de los cationes alcalinos en forma soluble son transferidos al suero durante el proceso de elaboración del queso. La elaboración de queso ha sido ampliamente usado como un proceso de descontaminación de leche para  $^{137}\text{Cs}$  en áreas contaminadas por el accidente de Chernobyl [8]. Se sabe que los pastos tienen preferencia por la absorción de ciertos radioisótopos presentes en el medio ambiente. Los radioisótopos presentes en suelo, agua, aire y flora se transfieren a la cadena alimenticia, como en el caso de la leche. Los rayos-gamma provienen del  $^{40}\text{K}$  y  $^{137}\text{Cs}$ ; y de las series de decaimiento radiactivo del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ . Por lo tanto, en este trabajo se llevó a cabo el estudio de la concentración en actividad de fórmulas lácteas por medio de espectrometría de rayos-gamma. La ingestión de radiación ionizante puede causar daños a la salud, por consecuencia se relaciona la concentración en actividad con posibles daños a la salud por ingestión de radiación ionizante.

## 2. MATERIAL Y METODOS

En este trabajo se llevó a cabo el estudio de la radiación y radiactividad gamma de 40 muestras de fórmulas lácteas de las marcas y presentaciones más populares que están disponibles en el mercado; tanto del sector privado como del sector público. La adquisición de fórmulas lácteas se efectuó en el mes de septiembre de 2003. Las muestras se prepararon de acuerdo al Manual de Environmental Measurements Laboratory, US-DOE, HASL-300. Para el examen gravimétrico de muestras se realizó el secado en una estufa a temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$  por un tiempo de 24 h, en el Laboratorio de Radioquímica de la Unidad Académica de Estudios Nucleares (UAEN) de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). Luego las muestras fueron colocadas en contenedores tipo Marinelli con un volumen de 500 ml, se sellaron y almacenaron por un periodo mínimo de cuatro semanas para alcanzar el equilibrio radiactivo secular del  $^{226}\text{Ra}$ , el  $^{222}\text{Rn}$  y sus descendientes. En la Tabla I se muestran los datos de las fórmulas lácteas.

En la UAEN se tiene un sistema de espectrometría de rayos gamma que se basa en un detector de Ge HP modelo GMX-25190-P-Plus, que se utiliza en la medición de los espectros de rayos gamma del estándar y las muestras. El detector tiene forma cilíndrica con dimensiones de 52.5 mm de diámetro por 62.5 mm de alto, con una eficiencia relativa del 25% para 1,332 keV del  $^{60}\text{Co}$ . El detector tiene una resolución (FWHM) de 1.9 keV para energía gamma de 1332 keV del  $^{60}\text{Co}$ , con una razón pico a Compton de 48:1.

**Tabla I. Datos de las muestras de fórmulas lácteas**

Muestra	Marca	Presentación (kg)	Lugar de Procedencia	Peso (kg)	Densidad (kg L <sup>-1</sup> )
FL01	Advance 1	0.400	Wal-Mart	0.2510	0.502
FL02	Advance 2	0.400	Wal-Mart	0.2339	0.468
FL03	Advance LF	0.375	Farmacia Guadalajara	0.2435	0.487
FL04	Alpura	0.500	Wal-Mart	0.2338	0.468
FL05	Alpura Kid	0.500	Wal-Mart	0.2477	0.495
FL06	Bio-NAN	0.450	Wal-Mart	0.2682	0.536
FL07	Carnation	0.500	Wal-Mart	0.2675	0.535
FL08	Enfagrow	0.360	ISSSTE	0.2655	0.531
FL09	Enfamil / Hierro 2	0.400	ISSSTE	0.2468	0.494
FL10	Enfamil /Hierro 1	0.400	ISSSTE	0.2871	0.574
FL11	Enfamil 1 /hierro	0.400	Donación IMSS	0.2967	0.593
FL12	Enfamil AR	0.400	Wal-Mart	0.2343	0.469
FL13	Enfamil Nutramigen	0.454	Farmacia Guadalajara	0.2649	0.530
FL14	Enfamil Pregestimil	0.454	Farmacia Guadalajara	0.2778	0.556
FL15	Enfamil Premium 1/hierro	0.400	ISSSTE	0.2910	0.582
FL16	Enfamil sin Lactosa	0.400	Donación IMSS	0.2518	0.504
FL17	Enfamil sin Lactosa	0.400	ISSSTE	0.2570	0.514
FL18	Enfapro/Hierro 2 Premium	0.400	ISSSTE	0.2556	0.511
FL19	Fortileche	0.500	Wal-Mart	0.2821	0.564
FL20	Gain 1-2-3	0.450	Wal-Mart	0.2913	0.583
FL21	Infasoy	0.400	Donación IMSS	0.3029	0.606
FL22	Isomil (soya) sin lactosa	0.400	Farmacia Guadalajara	0.3017	0.603
FL23	NAN (sin lactosa)	0.400	Wal-Mart	0.2813	0.563
FL24	NAN 1	0.450	ISSSTE	0.2965	0.593
FL25	NAN 2	0.450	Donación IMSS	0.3188	0.638
FL26	NAN 2	0.450	ISSSTE	0.2927	0.585
FL27	NAN AR	0.400	Wal-Mart	0.2508	0.502
FL28	NAN HA	0.400	Wal- Mart	0.2762	0.552
FL29	Nido	0.400	Wal-Mart	0.2720	0.544
FL30	Nido Kinder +1	0.400	ISSSTE	0.2533	0.507
FL31	Nursoy (SMA)	0.400	Wal-Mart	0.2823	0.565
FL32	Pre-NAN	0.450	Wal-Mart	0.2983	0.597
FL33	Progress Gold 3	0.400	Farmacia Guadalajara	0.2872	0.574
FL34	Promil gold 2	0.400	Wal-Mart	0.2637	0.527
FL35	Promise 4	0.400	Wal-Mart	0.3230	0.646
FL36	S26	0.400	Farmacia Guadalajara	0.2857	0.571
FL37	SMA AR	0.900	Wal-Mart	0.2640	0.528
FL38	SMA gold 1	0.400	Wal-Mart	0.3067	0.613
FL39	SMA Prematura	0.454	Wal-Mart	0.3067	0.613
FL40	Svelty / calico Plus	0.400	ISSSTE	0.2943	0.589

El sistema cuenta con una tarjeta MCA, TRUMP de 2k, y se utilizaron 1024 canales. El análisis de espectros se hizo con el programa Gamma Vision-32. El tiempo utilizado por el amplificador espectroscópico fue de 6 ms por tratarse de muestras con baja actividad. Todas las mediciones se llevaron a cabo considerando una geometría constante del porta muestras Marinelli y el detector de Ge HP. El detector utiliza un blindaje de bajo fondo graduado en Z. El tiempo de conteo fue de 80,000 s para mejorar la estadística de conteo por tratarse de muestras de baja intensidad.

La adquisición de espectros de rayos gamma de alta calidad por un Ge HP es un arte así como una ciencia [9]. La forma simétrica del pico usualmente es más importante que la FWHM mas baja [9]. La relación pico a Compton es dependiente de la resolución en energía y la eficiencia del detector [10]. En el laboratorio donde se encuentre instalado el sistema de espectrometría de rayos gamma para mediciones de baja actividad se deben tener presentes las siguientes precauciones: (1) Cuando no sea posible localizar las unidades para almacenar las fuentes en un lugar remoto, deberán aislarse del blindaje del detector a una distancia al menos de 5 m [9]; (2) En todos los casos, las fuentes de neutrones no deberán ser almacenadas en laboratorios de mediciones o laboratorios adyacentes puesto que los neutrones rápidos pueden viajar varios metros antes de su captura final [9].

La calibración en energía y eficiencia del detector de GeHP es necesaria que se realice al inicio de las mediciones y en forma regular durante todo el proceso para asegurar la estabilidad del equipo. La calibración en energía se hizo con un juego de fuentes puntuales estándar de energías conocidas en el rango de interés. Para la calibración en eficiencia se utilizó un estándar multinucleido, certificado en actividad, con 12 líneas en el rango de energía de 59.50 a 1,836.06 keV, en matriz de agua dentro de un contenedor tipo Marilleli de 500 ml.

Por lo general, en los laboratorios de espectrometría de rayos gamma se tiene la limitante en cuanto al número disponible de estándares certificados en actividad de diferentes densidades que iguale a las densidades de las muestras. Esto lleva a la situación de que la autoabsorción de los fotones dentro de las muestras puede ser muy diferente al estándar de calibración. Teniendo que la autoabsorción es altamente dependiente de la densidad de la muestra [11], por lo que es necesario considerar la diferencia de densidades entre las muestras y el estándar para evitar errores en la determinación de la concentración en actividad para energías menores a 400 keV. Por lo tanto, se tienen estudios que evalúan los factores de corrección por autoabsorción en la espectrometría de rayos gamma.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

Las mediciones de los espectros de rayos gamma de las muestras de fórmulas lácteas presentan 13 posibles líneas en el rango de energía de 185.99 a 1460.65 keV que corresponden a rayos gamma de las series de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , así como del  $^{40}\text{K}$ . Los fotopicos presentes tienen una baja intensidad y su origen se debe primordialmente a la radiación de fondo. En la Tabla II se presentan los rayos gamma identificados en los espectros, su origen y la actividad mínima de detección (AMD) de acuerdo a la sensibilidad del sistema de medición.

El cálculo de la concentración en actividad de los radioisótopos presentes en los espectros de rayos gamma de las muestras se lleva a cabo restando la contribución de radiación de fondo para

cada uno de los fotopicos de interés para la obtención de las cuentas netas. También interviene en el calculo la actividad del estándar actualizada al momento de las mediciones, la eficiencia del detector en función de la energía, el rendimiento del rayo gamma del radioisótopo y el tiempo de conteo.

**Tabla II. Identificación de radioisótopos en espectros de rayos gamma**

Energía (keV)	Radioisótopo	Origen	AMD (Bq kg <sup>-1</sup> )
185.99	<sup>235</sup> U, <sup>226</sup> Ra	<sup>235</sup> U, <sup>238</sup> U	6.76
238.63	<sup>212</sup> Pb	<sup>232</sup> Th	0.48
295.22	<sup>214</sup> Pb	<sup>238</sup> U	1.06
583.14	<sup>208</sup> Tl	<sup>232</sup> Th	0.37
609.32	<sup>214</sup> Bi	<sup>226</sup> Ra	0.73
661.66	<sup>137</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	0.66
727.17	<sup>212</sup> Bi	<sup>232</sup> Th	2.74
911.07	<sup>228</sup> Ac	<sup>232</sup> Th	1.35
968.90	<sup>228</sup> Ac	<sup>232</sup> Th	2.27
1120.28	<sup>214</sup> Bi	<sup>238</sup> U	2.82
1238.11	<sup>214</sup> Bi	<sup>238</sup> U	7.6
1377.65	<sup>214</sup> Bi	<sup>238</sup> U	8.43
1460.75	<sup>40</sup> K	<sup>40</sup> K	9.94

En el estudio de los radioisótopos del <sup>226</sup>Ra, <sup>137</sup>Cs, <sup>232</sup>Th y <sup>40</sup>K, se consideraron las energías de 609.32 keV del <sup>214</sup>Bi; de 661.66 keV del <sup>137</sup>Cs, de 911.07 keV del <sup>228</sup>Ac; y de 1,460.75 keV del <sup>40</sup>K, respectivamente. La corrección por autoabsorción de rayos gamma de las mediciones de las muestras y del estándar fue mínima debido a que las energías consideradas están por encima de 400 keV. Los resultados de la concentración en actividad se muestran en la Tabla III, y los valores NM, no medidos están por abajo de la AMD.

En el análisis de los resultados de la concentración en actividad tenemos que para el <sup>232</sup>Th se encuentra en el rango de 9.14 a 11.09 Bq kg<sup>-1</sup> con un promedio de 10.03 Bq kg<sup>-1</sup>, en el caso del <sup>40</sup>K se encuentra en el rango de 42.58 a 281.68 Bq kg<sup>-1</sup> con un promedio de 116.74 Bq kg<sup>-1</sup>. La concentración en actividad para el <sup>226</sup>Ra y el <sup>137</sup>Cs no se reportan en los resultados por estar debajo de la AMD. La actividad del <sup>238</sup>U en queso tipo Emmental es de 27 mBq kg<sup>-1</sup>; para el <sup>40</sup>K es de 15-21 Bq kg<sup>-1</sup> [2]. La variación de los valores en las fórmulas lácteas y queso se deben tanto al proceso de elaboración como a las diferentes características en el origen de las muestras.

**Tabla III. Actividad específica de fórmulas lácteas**

Muestra	$^{226}\text{Ra}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{137}\text{Cs}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{232}\text{Th}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{40}\text{K}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )
FL01	NM	NM	NM	NM
FL02	NM	NM	NM	NM
FL03	NM	NM	NM	NM
FL04	NM	NM	NM	109.88±11.56
FL05	NM	NM	NM	44.37±10.71
FL06	NM	NM	NM	NM
FL07	NM	NM	NM	116.18±8.32
FL08	NM	NM	NM	42.58±8.13
FL09	NM	NM	NM	NM
FL10	NM	NM	NM	NM
FL11	NM	NM	NM	NM
FL12	NM	NM	NM	NM
FL13	NM	NM	NM	NM
FL14	NM	NM	NM	NM
FL15	NM	NM	NM	NM
FL16	NM	NM	NM	NM
FL17	NM	NM	NM	NM
FL18	NM	NM	NM	154.4±16.5
FL19	NM	NM	NM	281.68±15.51
FL20	NM	NM	NM	111.32±15.05
FL21	NM	NM	10.35±3.26	153.35±14.63
FL22	NM	NM	NM	NM
FL23	NM	NM	NM	NM
FL24	NM	NM	NM	NM
FL25	NM	NM	9.14±3.05	NM
FL26	NM	NM	NM	NM
FL27	NM	NM	10.21±3.85	NM
FL28	NM	NM	NM	NM
FL29	NM	NM	NM	147.39±16.17
FL30	NM	NM	9.38±3.84	NM
FL31	NM	NM	NM	NM
FL32	NM	NM	NM	NM
FL33	NM	NM	NM	45.55±9.24
FL34	NM	NM	NM	NM
FL35	NM	NM	NM	77.39±8.37
FL36	NM	NM	NM	NM
FL37	NM	NM	NM	NM
FL38	NM	NM	NM	NM
FL39	NM	NM	11.09±3.78	NM
FL40	NM	NM	NM	NM

NM, No Medido

#### 4. CONCLUSIONES

De acuerdo a la identificación de las líneas de energía que se tienen en los espectros de rayos gamma se pueden encontrar radioisótopos que provienen de las series de decaimiento radiactivo del  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , y del  $^{137}\text{Cs}$  y  $^{40}\text{K}$ . Aunque la mayoría de los valores de concentración en actividad no se reportan por estar abajo de la AMD. Para la medición del  $^{226}\text{Ra}$  se utiliza la energía de 609.32 keV del  $^{214}\text{Bi}$  por tener mejor rendimiento y definición, pero los resultados están abajo de la AMD. Para la medición del  $^{232}\text{Th}$  se considero la energía de 911.07 keV del  $^{228}\text{Ac}$ , y se reportan los resultados para cinco muestras. La medición del  $^{137}\text{Cs}$  no se reporta en los resultados por estar abajo de la AMD, lo cual indica que las vacas fueron alimentadas con forraje libre de contaminación de radiocesio. Se obtuvo una concentración en actividad por arriba de la AMD del  $^{40}\text{K}$  para 11 muestras, siendo el K uno de los minerales que contiene la leche.

Para mejorar los resultados obtenidos de concentración en actividad de fórmulas lácteas es conveniente repetir el estudio incrementando el tiempo de conteo, ya que principios estadísticos simples muestran que la AMD es directamente proporcional a la raíz cuadrada del numero de cuentas de fondo bajo el pico de interés, e inversamente proporcional a la eficiencia de detección. Los resultados de concentración en actividad de fórmulas lácteas están por abajo o muy cercanos a la AMD, y se deben principalmente a la radiación de fondo: Por lo que no representan riesgos a la salud, y será necesario que se comparen con resultados presentados por otros autores. Además, la espectrometría de rayos gamma de alimentos y muestras ambientales es necesaria en la protección radiológica para evitar que la población sea expuesta a niveles de radiación ionizante que sean dañinos a la salud.

#### REFERENCIAS

1. Voigt, G.; Schotola, C.; Crout, N.M.J.; Absalom, J. *Investigations on the effect of grazing intensity on the transfer of radionuclides to cow's milk*. GSF-Institut fur Strahleschutz, Grmany, GSF-Bericht 15/1997.
2. Froidevaux, P; Geering, J.-J.; Pillonel, L.; Bosset, J. -O.; Valley, J. -F.  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{239/240}\text{Pu}$  in Emmental type cheese produced in different regions of Western Europe. *J. Environ. Radioactivity* **72**, p. 287-298 (2004).
3. Mireles, F.; Dávila, J.I.; Quirino, L.L.; Lugo, J.F.; Pinedo, J.L.; Ríos, C. *Natural soil gamma radioactivity levels and resultant population dose in the cities of Zacatecas and Guadalupe, Zacatecas, Mexico*. *Health Physics* **84(3)**, p. 368-372 (2003).
4. Ward, G.M.; Johnson, J.E. *Assessment of milk transfer coefficients for use in prediction models of radioactivity transport*. *Sci Tot Environ* **85**, p. 287-294 (1989).
5. Rayno, D.R. *Estimated dose to man from uranium milling via the beef/milk food chain pathway*. *Science of the Total Environment* **31**, p. 219-241 (1983).
6. Lapham, S.C.; Millard, J.B.; Samet, J.M. *Health implications of radionuclide levels in cattle raised near U mining and milling facilities in Ambrosia Lake, New Mexico*. *Health Physics* **56**, p. 327-340 (1989).
7. Schuller, P.; Voigt, G.; Handl, J.; Ellies, A.; Olivia, L. *Global weapon's fallout  $^{137}\text{Cs}$  in soils and transfer to vegetation in south-central Chile*. *Journal of Environmental Radioactivity* **62**, p. 181-193 (2002).

8. Patel, A.A.; Prasad, S.R. *Decontamination of radioactive milk: a review*. International Journal of Radiation Biology **63**, p. 405-412 (1993).
9. Gehrke, R.J.; Davidson, J.R. *Acquisition of quality gamma-ray spectra with HPGe spectrometers*. Applied Radiation and Isotopes **62**, p. 479-499 (2005).
10. ANSI/IEEE Std. 325-1996. *IEEE Standard test procedures for germanium gamma-ray detectors*. (1996)
11. Jurado Vargas, M.; Fernández Timón, A.; Cornejo Díaz, N.; Pérez Sánchez, D. *Monte Carlo simulation of the self-absorption corrections for natural samples in gamma-ray spectrometry*. Applied Radiation and Isotopes **57(6)**, p. 893-898 (2002).