

# ENSEÑANDO RADIOECOLOGÍA: MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA NATURAL EN AMBIENTES DE LA PROVINCIA DE SAN LUIS

## TEACHING RADIOECOLOGY: MEASUREMENT OF THE NATURAL GAMMA RADIATION IN ENVIRONMENTS OF SAN LUIS PROVINCE

M. G. Rizzotto<sup>(1)</sup>, R. M. Anjos<sup>(2)</sup>, L. Estellita<sup>(2)</sup>, C. Sosa Flores<sup>(3)</sup>, J. M. Debans<sup>(4)</sup>, G. A. Gutierrez<sup>(4)</sup>, M. A. Claros Figueroa<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup>Grupo de Estudios Ambientales (GEA). Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL), Departamento de Física, Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Ejército de los Andes 950, (5700) San Luis, Argentina.

<sup>(2)</sup>Laboratório de Radioecologia (LARA), Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense, Avenida Gal. Milton Tavares de Souza S/N, Niterói, 24210-346, RJ, Brazil.

<sup>(3)</sup>Departamento de Física, Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Ejército de los Andes 950, (5700) San Luis, Argentina.

<sup>(4)</sup>Departamento de Minería, Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Ejército de los Andes 950, (5700) San Luis, Argentina.

<sup>(5)</sup>Instituto Aleluya, Belgrano 747, (5700) San Luis, Argentina.  
*e-mail: rizzotto@unsl.edu.ar*

El estudio de la radiactividad ambiental es un tema que no suele incluirse en los cursos de física de nivel secundario o incluso universitario. En consecuencia, los estudiantes no son capaces de discutir correctamente los efectos de la exposición a la radiación gamma terrestre. Este trabajo propone acercarse al tema de la interacción de las radiaciones ionizantes con nuestro medio ambiente; en el cual se mide la tasa de exposición a la radiación gamma natural utilizando un monitor de tipo Geiger-Müller. La medición se realiza en distintos ambientes de trabajo, urbano y turístico, de la provincia de San Luis. En particular, en las Salinas del Bebedero y en la antigua mina de oro de La Carolina y sus zonas aledañas. Por lo tanto, nuestro objetivo es, además del desarrollo de nuevas técnicas para la enseñanza de la física, despertar el interés científico de los estudiantes en las aplicaciones de la física nuclear a las ciencias del medio ambiente.

The study of environmental radioactivity is a topic not usually included in physics courses at the secondary and even university levels. Consequently, students are not able to properly discuss the effects of exposure to terrestrial gamma radiation. This paper proposes to approach the issue of ionizing radiation interaction with our environment, in which measurements of gamma exposure rates using a Geiger-Müller type gauge are evaluated. The experimental activity is performed in different working environments, urban and touristic, of San Luis province in Argentina. Particularly, the Bebedero salt mine and the La Carolina old gold mine and surrounding areas. Therefore, our aim is also to develop new techniques for teaching physics, awakening the scientific interest of students in nuclear physics applications to environmental sciences.

### I. INTRODUCCION

La radiación está presente en todas partes en el mundo que vivimos. La luz y el calor de las reacciones nucleares en el Sol son esenciales para nuestra existencia. Gran cantidad de materiales constituyentes de la naturaleza y algunos elementos fabricados por el hombre emiten radiación, de modo que toda la vida en la Tierra se ha desarrollado en su presencia (1-4).

La radiación se clasifica de acuerdo a los efectos que produce al interactuar con la materia, en ionizante y no ionizante. Radiaciones ionizantes son aquellas con energía suficiente para ionizar la materia, extrayendo electrones de los átomos. La radiación ionizante incluye los rayos cósmicos, los rayos X y otras radiaciones provenientes de materiales radiactivos presentes en las rocas, suelo, agua y aire. También se incluyen los materiales radiactivos producidos artificialmente. La radiación no ionizante incluye la luz ultravioleta, las ondas de radio, las microondas y el calor radiante.

En general, los efectos ambientales y biológicos de las radiaciones ionizantes no se incluyen en los cursos de física. Esto provoca que la mayoría de los estudiantes sigan creyendo que los materiales radiactivos son sólo los producidos artificialmente. Sin embargo, fuentes radiactivas naturales en el suelo, el agua y el aire contribuyen a nuestra exposición a la radiación ionizante, así como las fuentes fabricadas por el hombre derivadas de la minería y del uso de materiales radiactivos naturales utilizados en la generación de energía, en la medicina nuclear, usos militares y aplicaciones industriales (1, 3). Así, la estimación de la exposición de las poblaciones humanas a las fuentes naturales de radiación es un tema importante de la investigación científica.

Por lo tanto, nuestro objetivo es, además del desarrollo de nuevas técnicas para la enseñanza de la física, despertar el interés científico de los estudiantes en las aplicaciones de la física nuclear en las ciencias del medio ambiente. Así, este trabajo propone acercarse a los

estudiantes de nivel medio, universitario del ciclo básico y universitario de nivel medio, el tema de la interacción de las radiaciones ionizantes con nuestro medio ambiente, en el cual se mide la tasa de exposición a la radiación gamma utilizando un monitor de tipo Geiger-Müller. La medición se realiza en distintos ambientes de trabajo, urbano y turístico, de la provincia de San Luis. En particular, en las Salinas del Bebedero y en la antigua mina de oro de La Carolina y sus zonas aledañas.

## II. MAGNITUDES FÍSICAS PARA CARACTERIZAR LA RADIACIÓN

No podemos detectar la radiación ionizante directamente mediante nuestros sentidos, pero podemos caracterizarla de acuerdo a su “dureza” o la posibilidad de penetrar el espesor de un material dado. Las partículas alfa penetran solo pequeños espesores de materiales, mientras que las partículas beta y los rayos gamma son más penetrantes. Por otro lado, dos materiales diferentes expuestos a la misma cantidad de radiación gamma absorberán, en general, diferentes cantidades de energía.

Así, en primer lugar, es importante para estimar el nivel de radiación en el medio ambiente o en los seres vivos. Para su cálculo, necesitamos la tasa de ocurrencia durante un intervalo de tiempo. Un monitor de tipo Geiger-Müller, por ejemplo, proporciona el número de eventos detectados por minuto, conocido como conteos por minuto o cpm. Esta magnitud nos permite determinar la tasa de exposición a la radiación gamma natural en un entorno determinado.

Una de las magnitudes básicas que se utilizan para cuantificar la interacción de la radiación con un material es la dosis absorbida. Ésta se define como la cantidad de energía que la radiación ionizante deposita en la unidad de masa de materia, tal como el tejido humano; se expresa en una unidad llamada Gray (Gy), el cual es igual a un joule por kilogramo. Cuando la radiación es aplicada en organismos vivos, la absorción de la misma cantidad de energía por unidad de masa bajo condiciones de irradiación diferentes produce en general distintos efectos biológicos. Estos efectos pueden diferir hasta en un orden de magnitud, dependiendo de si la energía es depositada en forma de partículas alfa o beta. Es conveniente combinar la dosis absorbida a partir de diferentes tipos de radiación para obtener otra magnitud llamada dosis equivalente. La dosis equivalente en un tejido humano u órgano es la dosis absorbida multiplicada por un factor que toma en cuenta la forma en la cual un tipo particular de radiación distribuye energía en un tejido, de manera de tomar en cuenta su efectividad para causar un daño biológico. Este factor varía desde uno para baja radiación ionizante hasta 20 para partículas alfa (1,2). La unidad en la cual se mide la dosis equivalente se llama sievert (Sv), que también es igual a un joule por kilogramo, al igual que el Gy. El Gy se refiere a la dosis absorbida, en cambio el Sv se refiere a la dosis equivalente.

## III. RADIACIÓN EN EL AMBIENTE

La radiación ionizante entra en contacto con nosotros de varios modos. Ella se produce en procesos naturales, tales como el decaimiento del uranio o el torio presentes

en la Tierra, o en procesos artificiales, como el uso de rayos-X o fuentes de  $^{60}\text{Co}$  en medicina. Así, la radiación puede ser clasificada como natural o artificial, de acuerdo a su origen. Las fuentes naturales incluyen los rayos cósmicos, rayos- $\gamma$  provenientes de la Tierra (suelo, rocas y, consecuentemente, materiales de construcción), productos de decaimiento del radón en el aire y varios radioisótopos encontrados naturalmente en los alimentos y bebidas. Las fuentes artificiales incluyen los Rayos-X en medicina, *lluvia radiactiva* proveniente de pruebas con armas nucleares, desechos radiactivos provenientes de industrias nucleares (1-3).

Cada fuente de radiación posee dos características importantes: la dosis recibida por los seres vivos y sus consecuencias o efectos biológicos (3). Hasta hace poco, la radiación proveniente de fuentes naturales parecía ser despreciable e inalterable: apenas un fenómeno de radiación de fondo, en el cual las personas son expuestas todos los días, sin ofrecer peligro. Sin embargo, ahora se sabe que existen ambientes considerados anómalos, donde su suelo y/o rocas poseen concentraciones elevadas de elementos radiactivos naturales, tales como  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  y  $^{40}\text{K}$ , que pueden ser perjudiciales para la salud. Además, también están los hijos de la serie de decaimiento del  $^{238}\text{U}$  y del  $^{232}\text{Th}$ . En particular, los gases nobles radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y torón ( $^{220}\text{Rn}$ ), respectivamente, que cuando son inhalados irradian los tejidos del pulmón, aumentando la probabilidad de ocurrencia de cáncer pulmonar. Estos gases radiactivos, por ser pesados, tienden a acumularse en ambientes con poca ventilación. Así, es importante conocer las tasas de exposición a los elementos radiactivos en ambientes, ya que en este último caso los sedimentos y las rocas pueden ser utilizados como material de construcción, pudiendo aumentar, por lo tanto, la radiación de fondo (1,2).

## IV. MEDICIONES Y RESULTADOS

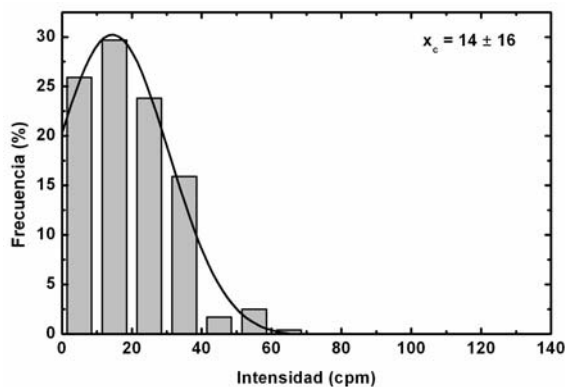
Las actividades experimentales fueron realizadas en el 2008, siguiendo un programa de enseñanza propuesto por profesores de la Universidad Nacional de San Luis (San Luis, Argentina) y de la Universidade Federal Fluminense (Niterói, Brasil). En esta ocasión participaron estudiantes de nivel medio, universitario del ciclo básico y universitario de nivel medio de la provincia de San Luis.

En las evaluaciones ambientales es usual estimar la tasa de exposición a la radiación gamma proveniente de radioisótopos presentes en el suelo realizando medidas a 1 m de la superficie (1). En este experimento se utilizó un monitor portátil de tipo Geiger-Müller. Éste es un instrumento de bajo costo, fácil de usar, permitiendo obtener medidas en la escala cpm (conteos por minuto). Puesto que este instrumento detecta simultáneamente las emisiones gamma provenientes de la radiación cósmica y la contribución de elementos radiactivos presentes en el suelo y en materiales de construcción, las medidas fueron realizadas en varias situaciones, teniendo en cuenta la realización de medidas en ambientes externos e internos. Así, el experimento fue realizado en distintos ambientes de trabajo, urbano y turístico, de la provincia de San Luis: en las Salinas del Bebedero y en la antigua mina de oro de La Carolina y sus zonas aledañas.

Las medidas en ambientes externos fueron realizadas sobre las salinas, en un monte cercano a las salinas y en el cerro próximo a la antigua mina de oro situada en La Carolina. Las medidas internas fueron realizadas a lo largo de los túneles de la mina de oro.

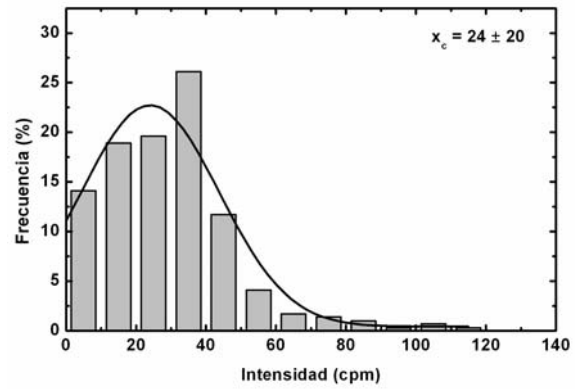
Cerca de 200 medidas fueron realizadas en cada ambiente. Puesto que el decaimiento radiactivo es un proceso aleatorio, toda medida basada en la observación de la radiación emitida en un decaimiento nuclear está sujeta a fluctuaciones estadísticas. Este hecho permitió a los alumnos realizar comparaciones de los datos con modelos estadísticos, tales como la distribución Gaussiana. Así, los alumnos también tuvieron la oportunidad de aprender conceptos de análisis de distribuciones de los datos, estimación de valores más probables de tasa de radiación y sus respectivas desviaciones estándar.

Los datos y los ajustes teóricos obtenidos se muestran en las figuras 1 a 5. Cada histograma, correspondiente a un dado ambiente analizado, se ajustó con una distribución Gaussiana. De esta forma, se obtuvieron los valores más probables ( $X_c$ ) para cada tasa de exposición a la radiación natural y sus respectivas desviaciones estándar ( $\sigma$ ) sobre las Salinas del Bebedero, en el monte cercano a las Salinas del Bebedero, el cerro de la mina de oro de La Carolina, en el exterior de la mina de oro de La Carolina y en el interior de la mina de oro de La Carolina, respectivamente. Los valores de  $X_c$  fueron obtenidos a partir de los centroides de cada distribución, y sus respectivas desviaciones estándar ( $\sigma$ ) fueron obtenidas a partir del ancho total del pico a la altura media.



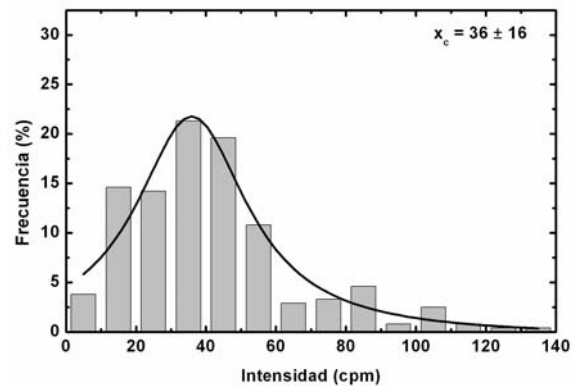
**Figura 1.** Mediciones de la tasa de exposición a la radiación gamma natural realizadas sobre las Salinas del Bebedero. La línea continua representa el ajuste realizado con una función Gaussiana.

Según los histogramas obtenidos en las figuras 1 a 5, se puede ver que las distribuciones de las tasa de exposición a la radiación gamma natural tienen valores elevados de  $\sigma$ . Esto significa que estamos en presencia de diversas fuentes naturales de radiación de diferentes intensidades (cósmica, rayos- $\gamma$  provenientes del suelo, rocas etc.). Debido a esto, determinamos los valores más probables ( $X_c$ ) de las tasa de exposición.



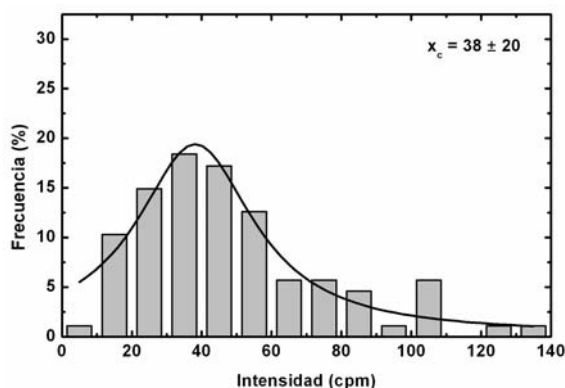
**Figura 2.** Mediciones de la tasa de exposición a la radiación gamma natural realizadas en el monte cercano a las Salinas del Bebedero. La línea continua representa el ajuste realizado con una función Gaussiana.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las mediciones en ambientes externos, nótese que la tasa de radiación natural sobre las Salinas del Bebedero (figura 1) es aproximadamente un 40 % menor que a nivel del suelo (figura 2), puesto que sus valores más probables son 14 y 24 cpm, respectivamente. Este resultado está reflejando que la composición mineral que compone los cristales de sal es más pobre en elementos radioactivos en comparación con la composición radioactiva del suelo del Bebedero.

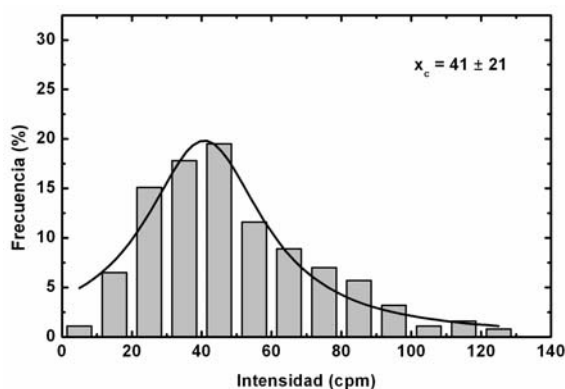


**Figura 3.** Mediciones de la tasa de exposición a la radiación gamma natural realizadas en el cerro de la mina de oro de La Carolina. La línea continua representa el ajuste realizado con una función Gaussiana.

Este primer resultado ya nos permite obtener una conclusión interesante: como la salina posee cerca de 10 m de altura y es más pobre en elementos radioactivos, la contribución debida a los radioisótopos presentes en el suelo es atenuada cuando estimamos la tasa de exposición a la radiación natural en la cima de la salina. Esto nos permite presuponer que la contribución debida a la incidencia de la radiación cósmica no debe superar los 14 cpm.



**Figura 4.** Mediciones de la tasa de exposición a la radiación gamma natural realizadas en el exterior de la mina de oro de La Carolina. La línea continua representa el ajuste realizado con una función Gaussiana.



**Figura 5.** Mediciones de la tasa de exposición a la radiación gamma natural realizadas en el interior de la mina de oro de La Carolina. La línea continua representa el ajuste realizado con una función Gaussiana.

Al analizar las figuras 3 y 4, nótese que el suelo y las montañas en la región del distrito de La Carolina presentan mayores concentraciones de elementos radiactivos naturales, ya que los valores de los centroides de las distribuciones de la tasa de exposición a la radiación gamma natural aumentaron a 36 y 38 cpm respectivamente. Este hecho es debido a la radiactividad natural presente en las rocas y sedimentos que componen el suelo de esta región. Las montañas de La Carolina están formadas por rocas ígneas, tales como gneis, granito, pórfido, traquita entre otras rocas volcánicas (4). Estas rocas son conocidas por presentar concentraciones considerables de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{238}\text{U}$  (2-4). Por otro lado, la figura 5 revela que en el interior de la antigua mina de oro de La Carolina se encuentra un valor semejante: 41 cpm. Los túneles de esta mina poseen cerca de 300 m de extensión y penetran en la base de la montaña de La Carolina. Esto hace que la radiación cósmica en el interior de la mina sea atenuada sensiblemente. Sin embargo, la tasa de exposición a la radiación gamma natural pasa a recibir contribuciones de radioisótopos

presentes en las paredes de los túneles. Así, la figura 5 sugiere que la cantidad de radiación cósmica que está siendo atenuada en el interior de la mina sea compensada por la radiación proveniente de las paredes de los túneles.

Estos resultados permitirán a los alumnos involucrados en el experimento responder varias preguntas sobre los efectos de las radiaciones en ambientes naturales y urbanos, ya que ellos permiten una fácil correlación con los tipos de suelo, arenas y rocas deben evitarse en la construcción de viviendas, lugares de trabajo y de ocio. Además, ellos han aprendido que los minerales ricos en  $^{238}\text{U}$  y  $^{232}\text{Th}$ , favorecen la presencia de fuentes de gases nobles radón ( $^{222}\text{Rn}$ ) y torón ( $^{220}\text{Rn}$ ), respectivamente, que aumentan la tasa de exposición a la radiación en ambientes internos y con poca circulación de aire.

## V. CONCLUSIONES

Creemos que este experimento de enseñanza de la radioecología puede ser utilizado para responder varias preguntas sobre los efectos de la radiación sobre el ambiente.

Los estudiantes pudieron identificar la existencia de áreas con mayor radiactividad que otras, y que estas diferencias son debidas exclusivamente a la presencia de elementos radiactivos naturales en el suelo y en las rocas de estas regiones.

Los estudiantes pudieron desarrollar habilidades experimentales como toma y representación de datos y su ajuste.

Finalmente, creemos que experiencias de este tipo pueden motivar a los estudiantes a interesarse por la física, a través de temas como la radiactividad, que tiene efectos sobre los sistemas biológicos.

## REFERENCIAS

1. R. M. Anjos, R. Veiga, C. Carvalho, N. Sanches, L. Estellita, P. Zanutto, E. Queiroz and K. Macario. Natural sources of radiation exposure and the teaching of radioecology. *Physics Education* **43** (4) 423-428 (2008).
2. R. M. Anjos, E. Okuno, P. R. S. Gomes, R. Veiga, L. Estellita, L. Mangia, D. Uzeda, T. Soares, A. Facure, J. A. P. Brage, B. Mosquera, C. Carvalho and A. M. A. Santos. Radioecology teaching: evaluation of the background radiation levels from areas with high concentrations of radionuclides in soil. *European Journal of Physics* **25**, 133-144 (2004).
3. IAEA 2004 *Radiation, People and the Environment* (Vienna: International Atomic Energy Agency) [http://www.iaea.org/Publications/Booklets/RadPeopleEnv/pdf/radiation\\_low.pdf](http://www.iaea.org/Publications/Booklets/RadPeopleEnv/pdf/radiation_low.pdf)
4. R. M. Anjos, N. Umisedo, A. A. R. da Silva, L. Estellita, M. Rizzotto, E. M. Yoshimura, H. Velasco, A. M. A. Santos. Occupational exposure to radon and natural gamma radiation in the La Carolina, a former gold mine in San Luis Province, Argentina. *Journal of Environmental Radioactivity* **101**, 153-158 (2010).