

## Medición de radón-222 en lugares de trabajo ubicados en sótanos, utilizando detectores LR 115 - tipo 2

V. Y. Guevara Rojas

Universidad Privada del Norte, Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.

Received 1 November 2023; accepted 1 April 2024

El radón-222 es un gas de origen natural el cual se produce a partir de la desintegración radiactiva natural del Uranio, que está presente en suelos y rocas. El Radón emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y emite partículas alfa y produce a su vez una serie de partículas de vida corta (Polonio-218, Polonio-214, y Polonio-210) que también decaen emitiendo partículas alfa. Las personas inhalan las partículas de vida corta, y estas pueden causar significativo daño a las células interiores de los bronquiolos y además pueden terminar conduciendo a la aparición de cáncer de pulmón. Por el motivo antes expuesto es de suma importancia medir y evaluar los niveles de exposición debido al Radón. En este trabajo de investigación se determina la concentración de radón-222 en 26 lugares de trabajo ubicados en sótanos que pertenecen a 10 edificios en la ciudad de Lima-Perú. En las mediciones se emplean detectores LR-115 Tipo 2 los cuales se colocan sobre la pared de los sótanos en estudio en tres niveles, 40 cm, 100 cm 160 cm de altura medidos a partir del piso. Los detectores luego son grabados y leídos siguiendo el protocolo usado en el Laboratorio de del Grupo de Investigación de Técnica de Huellas Nucleares de la PUCP (GITHUNU-PUCP). Los resultados estadísticos demuestran que 12 lugares de trabajo presentaron niveles de concentración mayores a  $150 \text{ Bq/m}^3$ , en diferentes periodos de medición, y esto se debió a limitaciones en la ventilación en estos ambientes. Además, empleando el coeficiente de Pearson se logró evaluar la correlación de la concentración de radón-222 con la humedad relativa y temperatura, en 20 ambientes de trabajo. De estos, sólo un ambiente muestra una correlación lineal positiva significativa entre concentración y temperatura; y sólo un ambiente muestra una correlación lineal negativa significativa entre la concentración y la humedad relativa. De esto concluimos que probablemente las variables meteorológicas de humedad y temperatura no influyen significativamente en la concentración de radón-222 en este tipo de recintos.

*Descriptores:* Radón; uranio.

Radon-222 is a naturally occurring gas produced by the natural radioactive decay of Uranium, which is present in soil and rock. Radon readily emanates from the soil and passes into the air, where it decays and emits alpha particles and produces a series of short-lived particles (Polonium-218, Polonium-214, and Polonium-210) that also decay by emitting alpha particles. People inhale the short-lived particles, and these can cause significant damage to the inner cells of the bronchioles and may also lead to the development of lung cancer. For the reasons stated above, it is of utmost importance to measure and evaluate the levels of exposure due to Radon. In this research work, the concentration of Radon-222 is determined in 26 workplaces located in basements belonging to 10 buildings in the city of Lima, Peru. In the measurements, LR-115 Type 2 detectors are used, which are placed on the walls of the basements under study at three levels, 40 cm, 100 cm and 160 cm high, measured from the floor. The detectors are then recorded and read following the protocol used in the Laboratory of the Nuclear Fingerprint Technique Research Group of the PUCP (GITHUNU-PUCP). The statistical results show that 12 workplaces presented concentration levels greater than  $150 \text{ Bq/m}^3$ , in different measurement periods, and this was due to limitations in ventilation in these environments. In addition, using the Pearson coefficient, it was possible to evaluate the correlation of the concentration of radon-222 with relative humidity and temperature, in 20 work environments. Of these, only one environment shows a significant positive linear correlation between concentration and temperature; and only one environment shows a significant negative linear correlation between concentration and relative humidity. From this we conclude that meteorological variables of humidity and temperature probably do not significantly influence the concentration of radon-222 in this type of enclosure.

*Keywords:* Radon; uranium.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.71.021202>

### 1. Introducción

El radón-222 es un carcinógeno pulmonar reconocido al que la exposición humana debe ser limitada. Los principales emisores de Radón en los edificios se encuentran en el suelo y en los materiales de construcción, por contener cantidades diminutas de Uranio y Radio, que se descomponen radiactivamente en gas Radón [5,16]. La UNSCEAR (Comité Científico de Naciones Unidas sobre el Efecto de la Radiación) presentó en su informe del año 2008, volumen I, titulado: “Fuen-

tes y efectos de la radiación ionizante”, que el valor promedio mundial de la actividad específica o concentración de U-238 y Th-232 en el suelo es  $37 \pm 4 \text{ Bq/Kg}$  y  $33 \pm 3 \text{ Bq/Kg}$  respectivamente [1]. Los lugares de trabajo ubicados en sótanos tienen una mayor cercanía con el suelo y algunos presentan escasa ventilación, por lo tanto, es probable que los sótanos tengan un mayor nivel de concentración de Radón en comparación con otros tipos de ambientes. La IAEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) informa en su “Serie de Informe de Seguridad N° 33” que desde hace algún tiem-

po se ha venido evaluando los niveles de Radón-222 en algunas viviendas, pero hace relativamente poco tiempo que se ha prestado atención a lugares de trabajo distintos de minas [17]. Hasta el momento la UNSCEAR, en su informe del 2008 titulado: Fuentes y Efectos de Radiaciones Ionizantes, ha presentado una estimación aproximada de la dosis efectiva anual mundial que recibe un trabajador, que no labora en minas, debido a radón-222, siendo este valor de 4.8 mSv [1]. La Agencia de Salud Pública de Inglaterra (PHE, Public Health England) y la Agencia Ejecutiva para la Salud y Seguridad del Reino Unido (HSE, Health and Safety Executive) aconsejan a los empleadores que evalúen rutinariamente las concentraciones de Radón en lugares de trabajo ubicados en sótano, independientemente de su ubicación geográfica, con la finalidad de evaluar los riesgos de salud y seguridad de sus

empleados [2]. En Perú, actualmente no contamos con una normativa que regule los niveles de concentración de radón-222 en diferentes locaciones; además existe precaria información sobre las concentraciones de radón-222 en centros de trabajo ubicados en sótanos.

## 2. Método experimental

### 2.1. Identificación de los lugares de estudio, ubicación y recolección de detectores

Se escogieron como recintos de estudio, lugares de trabajo u ocupacionales, localizados en sótanos de diferentes edificios en la ciudad de Lima-Perú. Finalmente pudimos acceder a

TABLA I. Identificación de los lugares de estudio.

Edificio	Lugares de Trabajo	Tipo de Lugar	Ubicación en el edificio	Ubicación geográfica
1	1B	Laboratorio	Sótano 1	Distrito de San Miguel
	1C	Auditorio	Sótano 1	
	1D	Salón de estudio	Sótano 1	
2	2A	Estacionamiento	Sótano 1	
	2B	Estacionamiento	Sótano 2	
	2C	Estacionamiento	Sótano 3	
3	3A	Biblioteca	Sótano 1	
	3B	Biblioteca	Sótano 2	
4	4A	Biblioteca	Sótano 2	
	5	5A	Oficina	
5B		Oficina	Sótano 1	
6	6A	Oficina	Sótano 1	
	6B	Sala de comer	Sótano 1	
7	7A	Oficina	Sótano 1	Distrito del Cercado de Lima
	7B	Oficina	Sótano 1	
	7C	Oficina	Sótano 1	
8	8A	Oficina	Sótano 1	Distrito de San Borja
	8B	Búnker de braquiterapia	Sótano 1	
	8C	Oficina	Sótano 1	
	8D	Oficina	Sótano 2	
	8E	Búnker de braquiterapia	Sótano 2	
9	9A	Búnker de braquiterapia	Sótano 1	Distrito de Miraflores
	9B	Consola del operador	Sótano 1	
	9C	Búnker de braquiterapia	Sótano 1	
	9D	Consola del operador	Sótano 1	
	9E	Oficina	Sótano 2	
	9F	Oficina	Sótano 2	
	9G	Taller	Sótano 2	
10	10A	Lactario	Sótano 1	Distrito de Santiago de Surco



FIGURE 1. Arreglo de detectores LR-115 colocados en la pared, a alturas desde el piso de 40, 100 y 160 cm.

26 lugares de trabajo ubicados en sótanos de 10 edificios (Tabla I). Se cortaron 3 películas de detectores LR-115 (en modo desnudo de  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  de área), y se procedió a colocarlos en la pared, a alturas de 160, 100 y 40 cm de distancia desde el piso (Fig. 1). Se recopiló información sobre el diseño, materiales de construcción y condiciones de ventilación de los lugares de trabajo a evaluar. Luego de tres meses en promedio, se recogieron los detectores y se procedió al cambio por unos nuevos.

### 2.2. Grabado químico y lectura de detectores

Para poder observar y contar las trazas dejadas por las partículas alfa en el detector LR 115, este se deberá someter a un baño químico, que permite que el rastro del daño dejado por las partículas alfas se vuelva fijo como trazas, que luego pueden ser observadas con la ayuda de un microscopio óptico. El procedimiento de grabado se explica a continuación: primero, se prepara la solución de hidróxido de sodio NaOH a una normalidad de 2.5 N. Luego, se vierte 110 ml de NaOH en un vaso de vidrio de Pyrex (de 150 ml de capacidad), aquí se introducen 05 detectores LR-115. Se vertió 200 ml de agua en un vaso de vidrio Pyrex (de 500 ml de capacidad). Luego se incorpora el vaso de Pyrex de 150 ml de capacidad en el Pyrex de 500 ml de capacidad [ver Fig. 2a)]. De este tipo de arreglo se preparan 6 [ver Fig. 2b)]. Se prende el baño térmico a una temperatura de  $60 \pm 0.5^\circ\text{C}$ . Luego se procede a colocar los 6 arreglos en el baño térmico [ver Fig. 2b)]. El grabado químico dura 90 minutos. Se extraen los detectores para enjuagarlos con agua destilada. Después se les deja secar por periodo de 24 horas y finalmente los de-



FIGURE 2. a) Vaso de Pyrex (de 150 ml de capacidad) que contiene 5 detectores LR-115 y 110 ml de NaOH; dentro de un vaso de Pyrex (de 500 ml de capacidad) con 200 ml de agua. b) Como se muestra en la Fig. 2a), se preparan 6 arreglos, que son luego colocados en el baño térmico. c) Lectura de los detectores LR-115 con el microscopio óptico marca LEICA, modelo DM LM.

etectores están listos para ser leídos con el microscopio óptico marca LEICA, modelo DM LM que proporciona aumentos de 5X, 10X y 20X [ver Fig. 2c)]. Este sistema tiene incorporado una cámara CCD.

### 2.3. Determinación de la concentración de Rn-222

Se construyó una cámara de calibración, con la cual pudimos determinar el factor de calibración  $k = 0.0112 \pm 0.0005$  trazas·mm<sup>-2</sup>/kBq·m<sup>-3</sup>·h, que se empleó para determinar la concentración de Rn-222. La densidad de trazas, por cada detector, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{N - N_f}{nA}, \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad de trazas nucleares [trazas·mm<sup>-2</sup>].  $N$  es el número total de trazas analizadas en todos los campos ópticos de visión del microscopio.  $N_f$  es el número total de trazas de fondo.  $n$  el número total de campos de visión y  $A$  es el área del campo óptico mm<sup>2</sup>.

La expresión empleada para calcular la concentración de radón es:

$$C = \frac{\rho}{kt}, \quad (2)$$

donde,  $C$  es la concentración de radón [kBq/m<sup>3</sup>],  $\rho$  es la densidad de trazas nucleares [trazas·mm<sup>-2</sup>],  $t$  es el tiempo que el detector estuvo expuesto h, y  $k$  es el factor de calibración [trazas·mm<sup>-2</sup>/kBq·m<sup>-3</sup>·h].

### 2.4. Coeficiente de correlación de Pearson (r)

Se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson para examinar la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables. Para datos no agrupados “r” se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, \quad -1 \leq r \leq 1 \quad (3)$$

donde  $r$  es el coeficiente de correlación de Pearson,

$$\sigma_{xy} = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{N},$$

es la covarianza o variancia conjunta de  $x$  y  $y$ .

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{N}},$$

es la desviación típica de la variable marginal  $x$ .

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(y - \bar{y})^2}{N}}$$

es la desviación típica de la variable marginal  $y$ .  $x$ ,  $y$  son las variables cuya relación se evalúa,  $\bar{x}$  es la media aritmética de la variable  $x$ ,  $\bar{y}$  es la media aritmética de la variable  $y$  y  $N$  es el número de datos.

El valor del coeficiente de correlación puede variar de  $-1$  a  $+1$ , tal como se muestra en la Fig. 3. Mientras mayor sea el valor absoluto del coeficiente, más fuerte será la relación entre las variables. Para la correlación de Pearson, un valor absoluto de 1 indica una relación lineal perfecta. Una correlación cercana a 0 indica que no existe relación lineal entre las variables. El signo del coeficiente indica la dirección de la relación. Si ambas variables tienden a aumentar o disminuir a la vez, el coeficiente es positivo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia arriba. Si una variable tiende a incrementarse mientras la otra disminuye, el coeficiente es negativo y la línea que representa la correlación forma una pendiente hacia abajo. Para interpretar el coeficiente de correlación utilizamos la siguiente escala:

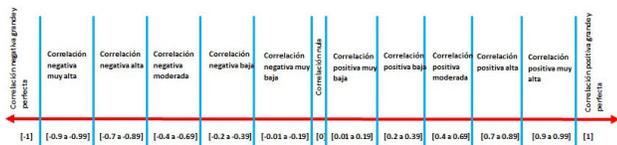


FIGURE 3. Escala para interpretar el coeficiente de correlación de Pearson

**Coefficiente de determinación ( $r^2$ )**

El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson e indica el porcentaje de la variación de una variable debido a la variación de la otra y viceversa. Puede adoptar cualquier valor entre 0 y 1.

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}, 0 \leq r^2 \leq 1, \tag{4}$$

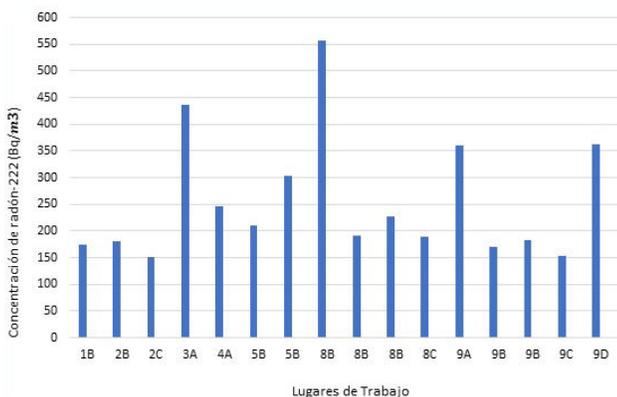


FIGURE 4. Concentración de radón-222 vs Lugares de Trabajo.

TABLA II. Cuadro resumen de los niveles de concentración de radón-222 mayores a 150 Bq/m<sup>3</sup>

Lugares de Trabajo	Puntos de Medición	Periodos de Medición	Concentración de radón-222 Bq/m <sup>3</sup>
1B	P1	5	174.95 ± 25.41
2B	P1	1	180.13 ± 23.74
2C	P1	3	152.09 ± 24.20
3A	P1	3	437.27 ± 54.50
4A	P1	3	245.42 ± 34.80
5B	P1	1	210.11 ± 24.28
5B	P1	2	304.09 ± 38.64
8B	P1	1	556.05 ± 70.30
8B	P1	3	190.55 ± 23.99
8B	P1	4	227.01 ± 31.34
8C	P1	1	188.83 ± 26.48
9A	P1	4	359.45 ± 42.90
9B	P1	3	169.65 ± 21.33
9B	P1	4	182.82 ± 28.07
9C	P1	4	152.71 ± 22.33
9D	P1	4	363.22 ± 44.58

TABLA III. Coeficiente de correlación de Pearson entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto de medición 1 del ambiente de trabajo 1B.

Temperatura (°)	Humedad Relativa (%)	Concentración radón-222 Bq/m <sup>3</sup>
17.80 ± 1.27	85.10 ± 0.44	21.89 ± 4.77
17.00 ± 1.76	85.70 ± 2.35	46.16 ± 6.67
16.60 ± 2.55	87.00 ± 2.81	21.60 ± 4.97
17.20 ± 0.33	84.95 ± 0.67	18.64 ± 3.53
19.55 ± 2.61	82.60 ± 1.57	174.95 ± 25.41

Coeficiente de correlación Pearson entre variables (r)		
	Temperatura	Humedad Relativa
Temperatura	1	
Humedad Relativa	$r = -0.95$	1
Concentración radón-222	$r = 0.99$ $r^2 = 98\%$	$r = -0.85$ $r^2 = 72\%$
	P-valor = 0.002	P-valor = 0.071

TABLE IV. Coeficiente de correlación de Pearson entre la concentración, temperatura y humedad relativa en el punto de medición 1 del ambiente de trabajo 9A.

Temperatura (°)	Humedad Relativa (%)	Concentración radón-222 Bq/m <sup>3</sup>
22.60 ± 0.44	64.00 ± 2.33	34.02 ± 7.01
21.40 ± 1.20	62.00 ± 1.20	19.69 ± 4.11
20.50 ± 0.35	56.33 ± 0.99	129.60 ± 19.65
22.60 ± 1.22	51.00 ± 0.97	359.45 ± 42.90
22.80 ± 0.90	57.33 ± 1.23	25.88 ± 4.51

Coeficiente de correlación Pearson entre variables (r)

	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración radón-222
Temperatura	1		
Humedad Relativa	-0.05	1	
Concentración radón-222	$r = 0.11$ $r^2 = 1\%$	$r = -0.86$ $r^2 = 74\%$	1
	P-valor = 0.863	P-valor = 0.04	

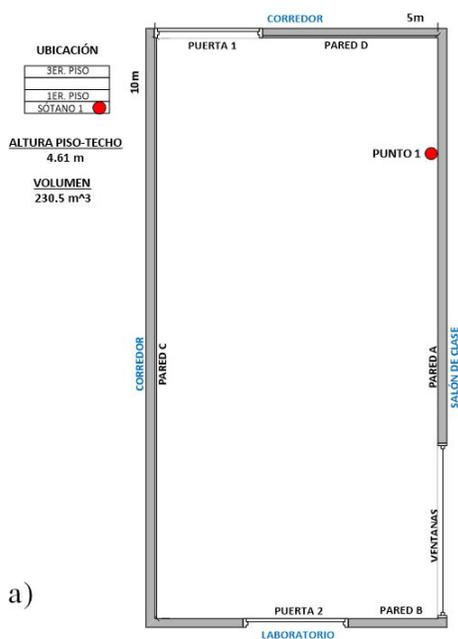


FIGURE 5. a) Diseño y punto de medición 1 del lugar de trabajo 1B. b) Ventanas del recinto.

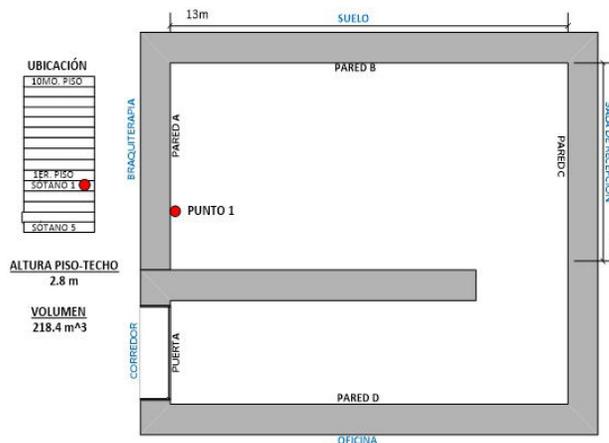


FIGURE 6. Diseño y punto de medición 1 del lugar de trabajo 9A.



FIGURE 7. Imagen real del lugar de trabajo 9A.

Por ejemplo, si  $r^2 = 0.85$  significa que el 85 % de la variación de Y puede ser debido a la variación de X si se usa la regresión lineal. El 15 % restante de la variación de Y puede deberse al azar o a la influencia sobre Y de otras variables distintas de X.

### 3. Resultados

El Organismo Internacional de Energía Atómica, mostró en su libro IAEA Basic Safety Standards (1994) [5] los niveles de tolerancia de concentración de radón-222 en diversos países. Estados Unidos ha establecido el nivel más estricto de 150 Bq/m<sup>3</sup>, por encima del cual acciones de protección radiológica o remediación deberían llevarse a cabo. En este trabajo se tomó como referencia este nivel, y como podemos observar en la Tabla II, en la Fig. 4 hubo 12 ambientes: 1B, 2B, 2C, 3A, 4A, 5B, 8B, 8C, 9A, 9B, 9C, 9D, cuyos valores de concentración estuvieron por encima de 150 Bq/m<sup>3</sup> en un determinado periodo de medición. Esto se debió probablemente a limitaciones en la ventilación en estos ambientes.

En la Tabla III podemos observar que el ambiente 1B, calculando el coeficiente de correlación de Pearson ( $r = 0.99$ ,  $r^2 = 98\%$ , P-valor=0.002 <  $\alpha(0.05)$ ), notamos que entre la temperatura y la concentración de radón existe una correlación lineal positiva muy alta y significativa.

En la Tabla IV podemos observar que el ambiente 9A, calculando el coeficiente de correlación de Pearson ( $r = -0.86$ ,  $r^2 = 74\%$ ,  $P\text{-valor} = 0.04 < \alpha(0.05)$ ), observamos que entre la concentración y la humedad relativa existe una correlación lineal negativa alta y significativa. Esto se debe probablemente que a medida que aumenta el contenido de agua en un ambiente la capacidad de difusión del Radón disminuye.

Empleando el coeficiente de Pearson se logró evaluar la correlación de la concentración de radón-222 con la humedad relativa y temperatura, en 20 ambientes de trabajo (Tabla IV). De los cuales dieciocho de estos ambientes no mostraron una correlación significativa con la humedad relativa y la temperatura. De esto concluimos que probablemente las variables meteorológicas de humedad y temperatura no influyen significativamente en la concentración de radón-222 en este tipo de recintos.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

Se evaluaron las concentraciones de radón-222 en 26 lugares de trabajo ubicados en sótanos, de los cuales 12 mostraron niveles de concentración  $> 150 \text{ Bq/m}^3$  en diferentes periodos de medición, debido probablemente a limitaciones en la

ventilación. Por lo cual, es recomendable generar una ventilación adecuada en lugares de trabajo ubicados en sótanos. Probablemente las variables meteorológicas no influyen significativamente en la concentración de radón-222, en este tipo de recintos. Los resultados de concentraciones de radón-222 obtenida en este trabajo, pueden servir para definir los niveles de referencia de concentración de radón-222, aceptables para recintos de trabajos similares en la ciudad de Lima-Perú, tomando en cuenta que se ha estudiado sitios ubicados en nuestra región. Es importante dar a conocer los resultados de este estudio a los representantes de cada institución participante, para que ellos tomen conciencia sobre la importancia de poner en práctica acciones de mitigación del gas radón-222, como ventilación u otras medidas.

#### Agradecimientos

A la Universidad Privada del Norte (UPN), al Grupo de Investigación de Técnica de Huellas Nucleares (GITHUNU) de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Programa de Becas CIENCIACTIVA del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), que gracias a su apoyo y conocimiento hicieron de esta experiencia una de las más especiales en mi vida.

- 
1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). (2010). Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report 2008, Volume I, pp. 288-289.
  2. Public Health England (PHE), Radon in Workplace Basements, (2016). pp. 1-19.
  3. V. Acosta Limane, Curso Física Moderna. México: HARLA (1999).
  4. P. Protein, Descubrimiento del pentaquark (2015), <https://prionicprotein.blogspot.pe/2015/07/descubrimiento-del-pentaquark.html>
  5. S. A. Durrani and Radomir, Radon Measurements by Etched Track Detectors. Singapore: World Scientific Publishing Company (1997).
  6. R. Martin Eisberg, Fundamentos de Física Moderna, México: Limusa (1992).
  7. cbrn.es. Fisionable y fértil (2017).. <https://cbrn.es/?tag=decaimiento-radiactivo>
  8. Física interesante, Núcleo, Radiactividad, Fisión Nuclear y Fusión Nuclear (2013). <https://vquirozcardoso.blogspot.pe/2013/06/nucleo-radioactividad-fision-nuclear-y.html>
  9. Escritos científicos, Elementos básicos de física nuclear, (2000) <https://www.esritoscientificos.es/trabla20/carpetas/nuclear/nu03.htm>.
  10. Wikimedia, Coulomb Barriere, (2017). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coulomb-Barriere\\_\(es\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coulomb-Barriere_(es).png).
  11. Physics World, Radioactivity and radiation (2000). <https://www.hk-phy.org/energy/power/nuclear.phy02.e.html>.
  12. R. González Farfán, Interacción de las partículas con la materia, (2001). <https://casanchi.com/casanchi-2001/materia01.htm>.
  13. National Institute of Standards and Technology (NIST). Stopping power and range tables for helium ions, <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ASTAR.html>.
  14. Universidad de Oviedo, Interacción radiación-materia, <https://www.hep.uniovi.es/jfernan/Radiofisica/ChargedParticles.pdf>
  15. J. Rickards Campbell y R. Cameras, El manejo de las radiaciones nucleares.
  16. L. Garzón Ruipérez, El Radón y sus riesgos. España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo, (1992).
  17. International Atomic Energy Agency (IAEA), Radiation Protection against Radon in Workplaces other than Mines. Safety Reports Series N° 33, (2003), pp. 8.