



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Aplicaciones de las radiaciones ionizantes: usos y abusos

Ionizing radiation applications: uses and abuses

Castro-Campoy, A.I.^a, Cruz-Vázquez, C.^a, Bernal, R.^{b*}, Orante-Barrón, V.R.^a,

^a Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora 83000, México.

^b Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora 83000, México.
ivan.castro@inf.infn.it; catalina.cruz@unison.mx; rbernal@gimmunison.com*; victor.orante@unison.mx

Innovación tecnológica: Importancia del uso correcto, aplicaciones, detección y cuantificación de las radiaciones ionizantes.

Área de aplicación industrial: Salud, Ingeniería y Ciencia de los materiales.

Recibido: 12 octubre 2022

Aceptado: 31 marzo 2023

Abstract

Current technological development allows applications of ionizing radiation in such different areas as medicine, electricity generation, food industry (irradiation of food to increase its shelf life), and both basic and applied scientific research. Radiation generates great benefits to human beings when it is correctly used. With the use of radiation in different daily life scopes, there is the ambiguity that, while some people show distrust in the use of nuclear plants for the generation of electricity, others nonchalantly accept the excessive use of medical diagnostic techniques in which ionizing radiation is employed. Both positions are a consequence of the lack of knowledge of the common citizen about the nature of radiation, its benefits, as well as the potential risk to exposure in living beings. Due to the aforementioned risk, any use of (ionizing) radiation must be permanently monitored and controlled. In order to carry it out properly, it is necessary to know its nature, as well as to develop novel materials which, through some mechanism, allow its detection and measurement.

Key Words: Ionizing Radiation Applications; Radiation Dosimetry.

Resumen

El desarrollo tecnológico actual permite aplicaciones de las radiaciones ionizantes en áreas tan diversas como, por ejemplo, medicina, generación de energía eléctrica, industria alimentaria (irradiación de alimentos para aumentar su vida de anaquel), e investigación científica tanto básica como aplicada. Las radiaciones generan grandes beneficios al ser humano cuando se utilizan de manera adecuada. Con el uso de las radiaciones en diferentes ámbitos de la vida cotidiana se presenta la ambigüedad de que, mientras algunas personas muestran desconfianza ante el uso de plantas nucleares para la generación de energía eléctrica, otras aceptan despreocupadamente el uso excesivo de técnicas de diagnóstico médico en las que se emplean radiaciones ionizantes. Ambas posturas son consecuencia del desconocimiento del ciudadano promedio sobre la naturaleza de las radiaciones, de sus beneficios, así como del potencial riesgo de los seres vivos al exponerse a las mismas. Es este riesgo por lo que cualquier uso de las radiaciones (ionizantes) debe ser permanentemente monitoreado y controlado. Para hacerlo adecuadamente es necesario conocer su naturaleza, así como desarrollar materiales que mediante algún mecanismo permitan su detección y medición.

Palabras Clave: Aplicaciones de la radiación ionizante; Dosimetría de radiaciones.

1. Introducción

La radiación

La radiación se define como la energía emitida por alguna fuente ya sea en forma ondulatoria o de partículas, y que puede propagarse (dependiendo de su naturaleza) a través del espacio vacío o a través de medios materiales. La radiación se clasifica como *ionizante* cuando cuenta con la energía suficiente para producir ionización. Las radiaciones ionizantes se dividen en dos grupos: partículas (radiación alfa, beta y neutrones) y ondas electromagnéticas (radiación ultravioleta, rayos gamma, y rayos X) ^[1]. Habitar en nuestro planeta implica estar siendo permanentemente irradiado. No sólo el cosmos y nuestro medio ambiente contienen radiación, sino que también los elementos constituyentes de nuestros cuerpos se encuentran naturalmente en diferentes variantes (isótopos), algunas de las cuales son radiactivas y por lo tanto emiten radiación.

La radiación puede provenir de fuentes naturales o artificiales. Las fuentes de radiación naturales están presentes en todo el medio ambiente ya que pueden proceder del suelo (ejemplo, el radón) o del cosmos. De

manera natural, los alimentos incorporan elementos provenientes de la tierra, y eso incluye isótopos radioactivos, siendo el más común el potasio-40 (emite partículas beta) que se encuentra, por ejemplo, en leche, carne y plátanos. Después de la ingesta, se concentra principalmente en los músculos. Otros isótopos radioactivos encontrados frecuentemente en alimentos son el Radio-226 (emite partículas alfa) y el Uranio-238. Los efectos de este último son químicos ya que su actividad es muy baja y aunque se ingiera también al beber agua, se desecha en las heces y en la orina. La radiación interna por isótopos radioactivos como los anteriores representan una dosis muy por debajo de la radiación natural a la que los seres humanos estamos adaptados y no representa ningún peligro para la salud, salvo que se den casos de contaminación adicional por accidentes nucleares.

Además de la radiación natural, las frecuentes pruebas de nuevas armas nucleares y los accidentes nucleares como los ocurridos en Chernóbil en 1986 y Fukushima en 2011, generan radiación ambiental adicional. La exposición a radiación artificial resulta principalmente de su aplicación en medicina

para diagnosticar y/o tratar ciertas patologías (cáncer). A este respecto, la Organización Mundial de la Salud ha alertado sobre el uso excesivo de pruebas de diagnóstico que usan radiaciones en infantes. A las fuentes naturales se les atribuye el mayor porcentaje (80%) de la dosis de radiación anual promedio mundial a la que se exponen las personas, mientras que las fuentes artificiales aportan el resto [2].

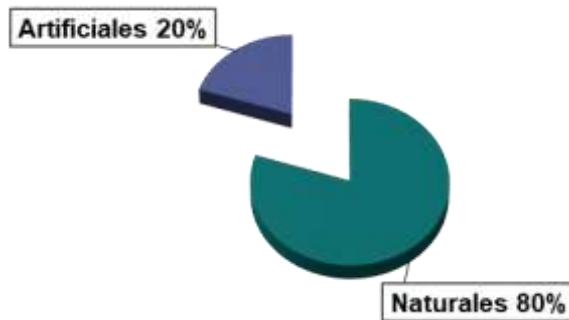


Figura 1. Contribución porcentual anual de las exposiciones a radiación provenientes de las fuentes de radiación naturales y artificiales.

Las radiaciones ionizantes, tanto corpusculares (partículas) como electromagnéticas, pueden penetrar la materia y así interactuar con los átomos constituyentes de la misma. Durante este proceso la radiación puede perder parte de, o la totalidad de su energía, la cual es absorbida por el medio que está atravesando. Esto da lugar a ciertos efectos en la materia los cuales condicionan el uso de las radiaciones ionizantes en los diversos campos de aplicaciones [3].

Aplicaciones de las radiaciones ionizantes

Cada vez son más las actividades en las que el uso de las radiaciones tiene oportunidad de incidir de forma determinante, contándose entre las de mayor interés la investigación científica tanto básica como aplicada, la medicina, la industria, y la generación de energía, debido a su efecto en la vida cotidiana de las personas, por los beneficios a la calidad de vida humana y la disminución a los daños al medio ambiente. Incluso los beneficios potenciales de su uso son considerablemente mayores al uso de las técnicas alternativas en industrias como la cementera, así como para

la esterilización de alimentos y material quirúrgico [4]. Por otra parte, se considera que en México existe un impacto cada vez mayor del uso de irradiadores en los campos de la generación de energía eléctrica, el diagnóstico y tratamiento del cáncer, la medición, automatización y control de calidad en el ámbito industrial, así como en la eliminación de parásitos y bacterias que dañan los cultivos [5].

Investigación. En biología, bioquímica, y virología, entre otras áreas, se utilizan radioisótopos (isótopos radioactivos) para identificar y cuantificar diversos mecanismos, como la absorción y distribución de nutrientes en plantas, o la distribución de medicamentos en seres humanos después de su ingesta [3].

Medicina. En esta área, las radiaciones tienen diversas e importantes aplicaciones entre las que se incluyen la esterilización de material quirúrgico, así como el diagnóstico y el tratamiento de diversas patologías. Algunas de las técnicas que nos ayudan para el diagnóstico de enfermedades son las radiografías, tomografía computarizada, fluoroscopia, y tomografía por emisión de positrones. Se aplica una o una combinación de éstas dependiendo de la enfermedad del paciente. Gracias a estas técnicas es posible obtener un diagnóstico temprano y certero, y así dar un mejor tratamiento al paciente [6]. En radioterapia se emplean radiaciones ionizantes que atraviesan el cuerpo para atacar y destruir los tumores. En 1998, con apoyo del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) de México creó el Banco de Tejidos Radioesterilizados, en donde se esterilizan tejidos humanos irradiándolos de forma controlada con radiación gamma de ^{60}Co . Este banco proporciona tejidos para pacientes que presentan lesiones en la piel como quemaduras u otras alteraciones, acelerando el proceso de curación y, ya que su aplicación es gratuita, reduce considerablemente el costo con respecto a otras alternativas, como el uso de materiales sintéticos [7].

Industria. El uso de radiaciones ionizantes en la industria se ha incrementado considerablemente en las décadas más recientes, de manera que su uso en los procesos industriales sigue en aumento. En la industria metalúrgica debido al poder de penetración de la radiación gamma se utiliza para producir imágenes de los materiales producidos (radiografías) con el fin de detectar imperfecciones [3]. En la industria del cemento se utilizan rayos X para determinar la composición química y pureza del producto, y así evaluar si cumple con los estándares de calidad [8].

Generación de energía. Aunque controversial, la energía nuclear contribuye significativamente en la generación de energía (10 % a nivel mundial) [9]. En esta área se utiliza un proceso denominado fisión nuclear,

en que un átomo pesado captura un neutrón y posteriormente se divide en dos o más átomos más ligeros, produciendo grandes cantidades de energía en el proceso. Típicamente, para este proceso se emplean ^{235}U y ^{239}Pu , radioisótopos emisores de partículas alfa [10].

Otras aplicaciones. La datación fósil es otra área de aplicación para la radiación. Esto es posible debido a que un pequeño porcentaje del carbono presente en todos los seres vivos es ^{14}C , por lo que es posible determinar la edad de restos de animales, plantas u objetos. A su vez, utilizando ^{14}C , en conjunto con ^{210}Pb , es posible estudiar el cambio climático a través del tiempo realizando un registro periódico de la medida de radiaciones en sedimentos. En cuestión del medio ambiente es posible determinar sustancias tóxicas en el agua, el aire y la atmósfera a través de la detección de diversos radioisótopos [3].



Figura 2. Uso de la radiación ionizante para procesos de esterilización.

Riesgos

Debido a su inherente capacidad de romper enlaces moleculares presentes en los componentes básicos de la vida como el ADN (ácido desoxirribonucleico), las radiaciones ionizantes también presentan riesgos para el ser humano cuando se abusa de su uso. Existe evidencia de alteraciones al ADN producidas por radiación ionizante que pueden generar células con mutaciones causales de cáncer [11]. Los daños causados a las células son consecuencia de la interacción de la radiación ionizante con la materia. Entre los efectos sobre el organismo por exposición a radiación ionizante están la muerte o modificación celular, afectando el normal funcionamiento de órganos o tejidos. Para organismos como el cuerpo humano hay dos tipos de efectos biológicos por irradiación: el efecto somático

el cual está ligado a daño en los tejidos irradiados ya sea por altas (efectos determinísticos) o bajas (efectos estocásticos) dosis, y el efecto genético que está ligado al daño que afecta a las células reproductoras, alterando su descendencia [12].

La falta de control de diversos instrumentos que usan isótopos radioactivos, así como la ausencia de monitoreo de los niveles de radiación ionizante en lugares de acceso no controlado de personas, ha derivado en lamentables accidentes en los que incluso se han perdido vidas humanas. Uno de los más conocidos es el ocurrido en la década de 1980, que empezó cuando un equipo para tratar pacientes con cáncer que incluía una fuente de radiación gamma, fue adquirido sin seguir los procedimientos legales correspondientes por

un hospital privado de Ciudad Juárez, ciudad mexicana fronteriza con Estados Unidos, y posteriormente abandonado en un almacén (del mismo hospital) del cual fue extraído por dos trabajadores de mantenimiento para venderlo como chatarra. En el camino al depósito de chatarra, residuos de material radioactivo se dispersaron por las calles. Con el tiempo, el material contaminado con material radioactivo llegó a formar parte de varillas para construcción, y el caso se dio a conocer cuando la radioactividad de parte de estas varillas contaminadas fue detectada en el Laboratorio Nacional de Los Álamos, en Nuevo México, Estados Unidos. En el curso de las investigaciones, se encontró que la camioneta que se utilizó para transportar el equipo al depósito de chatarra estaba contaminada y expuso a los vecinos de un barrio de Ciudad Juárez (muchos de ellos niños) a altas dosis de radiación. La varilla contaminada se distribuyó en Estados Unidos y en los estados mexicanos de Chihuahua, Sonora, Sinaloa, Baja California Norte, Baja California Sur, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Durango y el Estado de México. Tan solo de las varillas, se estima que al menos 1,000 toneladas no fueron localizadas. Cientos de personas fueron afectadas y, aunque el gobierno mexicano de la época no respondió de la manera más adecuada, en una muestra de diez personas a las que se les dio seguimiento, todas mostraron daño a nivel de cromosomas en el corto plazo. Un video muy interesante con información detallada sobre este accidente se encuentra disponible en el URL: <https://youtu.be/su2OMu9jCNw>.

El objetivo cuando se usan radiaciones ionizantes en medicina no es administrar las dosis más bajas al paciente, sino dosis que sean acordes con el propósito médico previsto. Administrar una dosis muy baja no permitiría alcanzar el objetivo médico, y una sobreexposición puede producir daño colateral, así que administrar dosis demasiado bajas o muy altas resulta problemático. Por esta razón es importante minimizar las exposiciones médicas injustificadas a la

radiación ionizante, lo cual se logra optimizando los protocolos de justificación y de exposiciones. La justificación debe estar condicionada a que, para exponer al paciente a la radiación, haya un beneficio neto claro para éste. Por otra parte, los procesos de optimización deben garantizar que la dosis de radiación sea al nivel más bajo posible y razonable para garantizar el resultado diagnóstico o terapéutico deseado ^[13].

Aunque los principios de protección radiológica nos ayudan a establecer límites sobre la cantidad de radiación que reciben el paciente y el personal ocupacionalmente expuesto (POE), es necesario crear conciencia durante las exposiciones. Una práctica común es realizar varias pruebas de radiodiagnóstico en un tiempo corto (días) entre ellas. Si bien, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, las exposiciones en este tipo de pruebas son bajas con relación al límite anual máximo permitido (de cien a mil veces menor), es importante mencionar que se ha comprobado que estas bajas dosis contribuyen al desarrollo de ciertos cánceres ^[14]. Otra práctica común entre el personal de la salud es que se repita la prueba (lo que implica repetir la exposición a radiación) al obtener una imagen de baja calidad. Esto ya que no permite un diagnóstico adecuado. También se realizan múltiples pruebas para el monitoreo de la evolución de una enfermedad o el efecto de un tratamiento ^[15].

Una forma de evitar estas problemáticas es tomar en cuenta que existen otras técnicas de imagenología médica que nos pueden brindar información suficiente para emitir un diagnóstico correcto como lo son la resonancia magnética nuclear y ultrasonido ^[16]. Es importante que las instituciones provean condiciones y equipos de protección adecuado para el POE, así como crear una cultura de autorresponsabilidad y no emplear equipos obsoletos, defectuosos o no calibrados que puedan emitir más radiación de la necesaria o generar imágenes de mala calidad ^[17].

Por estas razones es imprescindible contar con herramientas para detectar y medir correctamente la radiación a la que estamos expuestos. A continuación, se presentará la metodología para la detección y cuantificación de la radiación ionizante.

2. Metodología para la detección y cuantificación de radiación ionizante

Dosimetría de Radiaciones Ionizantes

La dosis absorbida es la razón de la energía absorbida por unidad de masa por exposición a radiación de un material. En el Sistema Internacional la unidad de medición para la dosis de radiación es el Gray, y su símbolo es Gy, ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$). Otro tipo de medición relacionada es la dosis equivalente la cual no depende solamente de la dosis absorbida si no de la intensidad del efecto de la radiación sobre los tejidos vivos. La unidad de dosis equivalente es el Sievert (Sv) (Azorín, 2014). Para radiación beta, gamma o rayos X, la equivalencia es $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Sv}$ [18].

Entre las técnicas dosimétricas disponibles, destaca la dosimetría termoluminiscente, que ha demostrado ser una técnica confiable y en la actualidad es la de mayor uso. Esta técnica se basa en el fenómeno de termoluminiscencia (TL), que consiste en la emisión de luz de un material que ha sido previamente irradiado, al ser calentado. Si un material presenta TL se llama termoluminiscente. Si la cantidad de luz que emite un material termoluminiscente es proporcional a la dosis a la que se irradió, una calibración adecuada permite relacionar la TL correspondiente a cada dosis y entonces el material se puede utilizar para medir la dosis, es decir puede usarse como dosímetro termoluminiscente (DTL). Varios DTLs han sido patentados y se encuentran comercialmente disponibles, siendo los más utilizados para dosimetría personal los basados en LiF, entre los que se encuentran el TLD-100 (LiF:Mg,Ti), y el GR-200A (LiF:Mg,Cu,P). También tiene amplio uso en dosimetría ambiental el TLD-900 (CaSO₄:Dy). En años recientes, el fenómeno de luminiscencia ópticamente estimulada (LOE), que consiste en la emisión de luz de un

material previamente irradiado al ser expuesto a una fuente de luz, ha servido de base para desarrollar la técnica dosimétrica del mismo nombre. Una ventaja de la LOE respecto a la TL es que en la primera no se necesita calentar el dosímetro, ampliando la posibilidad de aplicaciones que requieran la medición de dosis en tiempo real e *in situ*. Actualmente el dosímetro más utilizado usando LOE es el TLD-500 (Al₂O₃:C).

La selección de un DTL adecuado debe ajustarse a las necesidades y exigencias derivadas de la actividad en concreto a la que se vaya a destinar; por ejemplo, debe de tomar en cuenta el tipo de radiación y los niveles de dosis que se requiere medir [19]. Esta es la base para algunas de las aplicaciones en la cual la termoluminiscencia juega un papel importante, algunos ejemplos se describen a continuación.

Dosimetría personal

Tiene como objetivo el monitoreo de la dosis de radiación a la que han sido expuestas las personas durante actividades ocupacionales rutinarias. Para llevar a cabo la evaluación de dosis del personal ocupacionalmente expuesto (POE) es deseable que el material a utilizar presente cierta equivalencia con el tejido humano, de manera que pueda absorber la misma dosis de radiación ionizante en las mismas condiciones que las del tejido humano [20].

Dosimetría ambiental

Los ambientes naturales y los organismos vivos son naturalmente radiactivos, debido a la presencia de radioisótopos como el ⁴⁰K entre los elementos que los componen. Por tanto, la flora y la fauna están naturalmente expuestas a radiaciones ionizantes, y caracterizar esta exposición es necesaria para evaluar el riesgo radioecológico [21]. El ambiente también se ve afectado por las tecnologías desarrolladas por el ser humano que involucran radiaciones, por lo que la dosimetría ambiental desempeña un papel crucial en las cercanías de instalaciones

nucleares y sitios donde haya una fuente de emisión de radiación en el ambiente.

Dosimetría clínica

Dado el pequeño tamaño y la alta sensibilidad de algunos dosímetros termoluminiscentes, se puede cuantificar la dosis absorbida en distintas partes del cuerpo de un paciente expuesto por radiología o radioterapias. Los principales requerimientos para que un material sea aplicado en usos médicos son inocuidad, alta sensibilidad y compatibilidad con el tejido humano [22]. Un ejemplo específico de dosímetro es la película radiocrómica, implementado en radioterapia, el cual ha reemplazado a la película radiográfica en medidas de alta resolución espacial [23]. Una línea de investigación emergente, es el uso de dosímetros tipo *nanoDot*, los cuales proporcionan lecturas no destructivas y periodos de lectura muy cortos [24].

Dosimetría retrospectiva

Existe un gran interés a nivel mundial con respecto al desarrollo de nuevos y mejores métodos para el análisis de las dosis de radiación en las áreas donde han ocurrido accidentes nucleares. La técnica de TL ha sido ampliamente utilizada en este tipo de aplicaciones. El control de los niveles de radiación en estas áreas se lleva a cabo usando materiales disponibles en estas regiones, los cuales son utilizados como dosímetros. Algunos materiales utilizados son la alfarería, tejas, porcelana y otros objetos cerámicos [25].

Dosimetría Industrial

Una de las aplicaciones más importantes de la dosimetría es en el ámbito industrial, la cual varía desde irradiación de alimentos hasta control de calidad de materiales de construcción e incluso electrónicos. En el caso de los alimentos, estos son irradiados con el fin de aumentar su vida de anaquel, es decir, aumentar el tiempo en que estos conservan sus propiedades como nutrientes y sabor, entre otros. Eso se logra administrando una cantidad de radiación suficiente que permita la eliminación de patógenos en los alimentos [26].

Por otra parte, la dosimetría es usada en industrias como la cementera y fábricas de electrónicos, con el fin de evaluar si los materiales cumplen con los estándares de calidad adecuados [27, 28].

Dosimetría aeroespacial

Recientemente, ha aumentado el interés de la dosimetría en el espacio, donde los niveles de radiación son muy elevados, por lo que es de vital importancia el desarrollo de materiales que puedan satisfacer estas necesidades ya que los dosímetros que se usan en aplicaciones terrestres corrientes sufren daños al exponerse a dosis altas [29].

Otras aplicaciones

El estudio de algunos materiales, la esterilización de alimentos, tejidos, material quirúrgico, y otras aplicaciones similares requieren de dosis elevadas de irradiación (10^2 a 10^6 Gy). Ya que la exposición a esos niveles de dosis puede dañar los dosímetros comercialmente disponibles, en la actualidad es un reto el desarrollo de dosímetros que puedan utilizarse para dosimetría de dosis altas [30].

Ciencia de materiales

Si bien hoy en día se dispone de dosímetros comerciales, no existe un dosímetro que satisfaga todas las necesidades que se tienen en las diversas áreas de la dosimetría. El Grupo de Ingeniería Molecular en Materiales de la Universidad de Sonora (GIMM-UNISON) ha reportado que el método de fabricación de estos materiales juega un papel crucial en sus características y desempeño. A lo largo de su trayectoria, GIMM-UNISON ha reportado que es posible obtener fósforos con propiedades mejoradas por los métodos de reacción química controlada [31], reacción en estado sólido [32], sol-gel [33], coprecipitación [34] y síntesis por combustión en solución [35], los cuales suelen ser más sencillos, económicos y amigables con el medio ambiente que los utilizados para obtener los dosímetros comerciales. Existe una creciente demanda dispositivos capaces de medir la radiación, lo cual genera una gran área de

oportunidad para la investigación de nuevos materiales para aplicación en dosimetría de radiaciones ionizantes.

3. Conclusiones

Las radiaciones ionizantes tienen un gran número de aplicaciones beneficiosas en medicina, en el sector industrial, en alimentos, y en la investigación científica, y su uso se mantiene en franco aumento. Esto incide en la mejora de la calidad de vida de cada vez más personas, y hace necesario el monitoreo permanente y confiable de los niveles de radiación utilizados en las distintas áreas, debido a lo cual es muy importante el desarrollo de dispositivos capaces de detectar y medir radiaciones ionizantes (dosímetros), con el fin de evitar efectos colaterales perjudiciales. La dosimetría termoluminiscente es una herramienta confiable para la detección y cuantificación de radiaciones ionizantes a la que estamos expuestos. No existe un dosímetro ideal, por lo que hay una gran área de oportunidad para la investigación de nuevos materiales para la detección y dosimetría de radiaciones ionizantes.

4. Referencias

1. Knoll G. F. 2010. Radiation Detection and Measurement. 4Th Ed. John Wiley & Sons ISBN: 978-0-470-13148-0.
2. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). 2008. Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations (Publicado en 2010). p. 4. ISBN 978-92-1-142274-0. Recuperado el 1 de octubre de 2021.
3. González S. G., Robin L. C. 2011. Para entender las radiaciones. Ed. DIRAC: Facultad de ciencias. Instituto de Física de la Facultad de Ciencias. Universidad de la República. Uruguay. Pág. 30, 31.
4. Mukherjee, R. N. IAEA standards applicable for sterilisation. In: Sterilisation of Medical Products, R.F. Morrissey, and Y.I. Prokopenco, eds, Johnson & Johnson, Polyscience Publication Inc., Morin Heights, Canadá, 117-124. 1991.
5. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Publicaciones [Internet]. Gobierno de México; 2023. Disponible en: <https://www.cenapred.unam.mx/es/Publicaciones/archivos/385-RADIACINFINALMI28III2018.PDF>.
6. La radiación en medicina: procedimientos médicos por imágenes. Centro Nacional de Salud Ambiental, Centros para el Control y Prevención de Enfermedades (en inglés, Centers for Disease Control and Prevention, CDC). Disponible en: <https://www.cdc.gov/spanish/nceh/especiales/radiacionionizante/index.html>.
7. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ). Banco de Tejidos Radioesterilizados (BTR) [Internet]. Gobierno de México; 2020. Disponible en: <https://www.gob.mx/inin/es/articulos/banco-de-tejidos-radioesterilizados-btr-246529>.
8. Castañón A. M., García-granda S., Guerrero A. M., Gómez-fernández F. (2012). Estudio de las fases mineralógicas del clínker en una cementera española, utilizando el método de Rietveld. Dyna, año 79, Nro. 173, pp. 41-47. Medellín, julio, 2012. ISSN 0012-7353.
9. International Atomic Energy Agency (IAEA). 2019. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Reference Data Series No. 1, 2019 edition. Viena.

10. Institute for Energy and Environmental Research (IEER). 2012. Physical, Nuclear, and Chemical Properties of Plutonium [Internet]. Disponible en: <https://ieer.org/resource/nuclear-power/plutonium-factsheet/>.
11. Mavragani I. V., Nikitaki Z., Kalospyros S. A., Georgakilas A. G. (2019). Ionizing Radiation and Complex DNA Damage: From Prediction to Detection Challenges and Biological Significance. *Cancers*. 11, 1789; doi:10.3390/cancers11111789
12. Choudhary S. 2018. Deterministic and Stochastic Effects of Radiation. *Cancer Therapy & Oncology International Journal* 12(2): 555834. DOI: 10.19080/CTOIJ.2018.12.555834.
13. International Commission on Radiological Protection (ICRP). 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP* 37 (2-4).
14. Organización Mundial de la Salud. 2016. Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>.
15. Alcaraz-Baños, M. 2001. Bases físicas y biológicas del radiodiagnóstico médico. Servicio de Publicaciones. Universidad de Murcia. Disponible en: <https://webs.um.es/mab/miwiki/doku.php?id=temas>.
16. Sociedad Americana del Cáncer. 2016. Riesgos de la radiación relacionados con los estudios por imágenes. Disponible en: <https://www.cancer.org/es/tratamiento/como-comprender-su-diagnostico/pruebas/riesgos-de-la-radiacion-asociados-con-los-estudios-por-imagenes.html>.
17. Ávila-Carrillo, V. P. 2022. Alteraciones clínicas en la salud del personal expuesto a radiaciones ionizantes en los hospitales. *Revista San Gregorio* vol.1 no.50 Portoviejo jun./ago. 2022. DOI: 10.36097/rsan.v0i50.2028.
18. The International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU). 2011. Report 85: fundamental quantities and units for ionizing radiation. *Journal of the ICRU* 11, No. 1, Oxford University Press, Great Clarendon Street, Oxford OX2 6DP, UK. ISSN: 1473-6691.
19. McKeever S. W. S., Mascovitch M., Townsend P. D. 1997. Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses. Ed. Nuclear Technology Publishing. Pág. 74.
20. Strahlenschutzkommission (German Commission on Radiological Protection). 2003. Personal Dosimeter Requirements. *Bundesanzeiger* No. 112, 21.
21. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN). 2011. Radionuclide fact sheet environmental dosimetry.
22. Rivera T. 2011. Termoluminiscencia en dosimetría médica. XII International Symposium on Solid State Dosimetry.
23. Devic S., Tomic N., Lewis D. 2016. Reference radiochromic film dosimetry: Review of technical aspects. *Physica Medica* (32) 4, pp.

- 541-556. DOI: 10.1016/j.ejmp.2016.02.008.
24. International Atomic Energy Agency. 2013. Development of Procedures for *in vivo* dosimetry in radiotherapy. IAEA Human Health Report (8), p. 195.
25. Mesterházy D., Osvay M., Kovács A., Kelemen A. 2012. Accidental and retrospective dosimetry using TL method. *Radiation Physics and Chemistry* (81) 9, pp. 1525-1527. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2011.11.051.
26. Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, por sus siglas en inglés Food and Drug Administration). 2022. La Irradiación de alimentos: Lo que usted debe saber. Disponible en: <https://www.fda.gov/food/buy-store-serve-safe-food/la-irradiacion-de-alimentos-lo-que-usted-debe-saber>.
27. McLaughlin, W. L. 1977. Radiation Measurements and Quality Control. *Radiat. Phys. Chem.* 1977, Vol. 9, pp. 147-181. DOI: 10.1016/0146-5724(77)90077-2.
28. Asadizanjani N., Tehranipoor M., Forte D. 2017. PCB Reverse Engineering Using Nondestructive X-ray Tomography and Advanced Image Processing. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 7, No. 2. DOI: 10.1109/TCPMT.2016.2642824.
29. Schimmerling W. 2009. Space Radiation Dosimetry. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC.
30. Massillon-JL G., Gamboa-deBuen I., Brandan M. E. 2006. Onset of supralinear response in TLD-100 exposed to ^{60}Co gamma-rays. *Journal of Physics D: Applied Physics* (39) 2 pp. 262. DOI: 10.1088/0022-3727/39/2/005.
31. Avilés-Monreal R., Cruz-Vázquez C., Bernal R., Brown F. 2018. Thermoluminescence of ZnO:Na phosphors exposed to beta particle irradiation. *Optical Materials* (83) 78-81. DOI: 10.1016/j.optmat.2018.05.068.
32. Huerta-Rivera C. A., Bernal R., Cruz-Vázquez C., Castillo-García L. J., Cortez-Galaz C., Mendoza-Córdova A. 2021. Beta particle excited thermoluminescence of CaZrO₃ phosphors synthesized by solid state reaction. *Applied Radiation and Isotopes* (168) pp. 109519. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109519.
33. Hernández-Ortiz M., Acosta-Torres L. S., Bernal R., Cruz-Vázquez C., Castaño V. M. 2013. Study of Afterglow and Thermoluminescence Properties of Synthetic Opal-C Nanoparticles for In Vivo Dosimetry Applications. *MRS Online Proceedings Library* 1530, 740. DOI: 10.1557/opl.2013.205.
34. García-Haro A. R., Bernal R., Cruz-Vázquez C., Kitis G., Castaño V. M. 2016. Thermoluminescence Properties of Novel Self-Agglomerating CaSO₄:Eu Phosphors Obtained by an Environmentally Friendly Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2016 Article ID 1712383. DOI: 10.1155/2016/1712383.
35. Orante-Barrón V. R., Escobar-Ochoa F. M., Cruz-Vázquez C., Bernal R. 2015. Thermoluminescence of Novel Zinc Oxide Nanophosphors Obtained by Glycine-Based Solution Combustion Synthesis. *Journal of Nanomaterials*, vol. 2015, Article ID 273571. DOI: 10.1155/2015/273571.