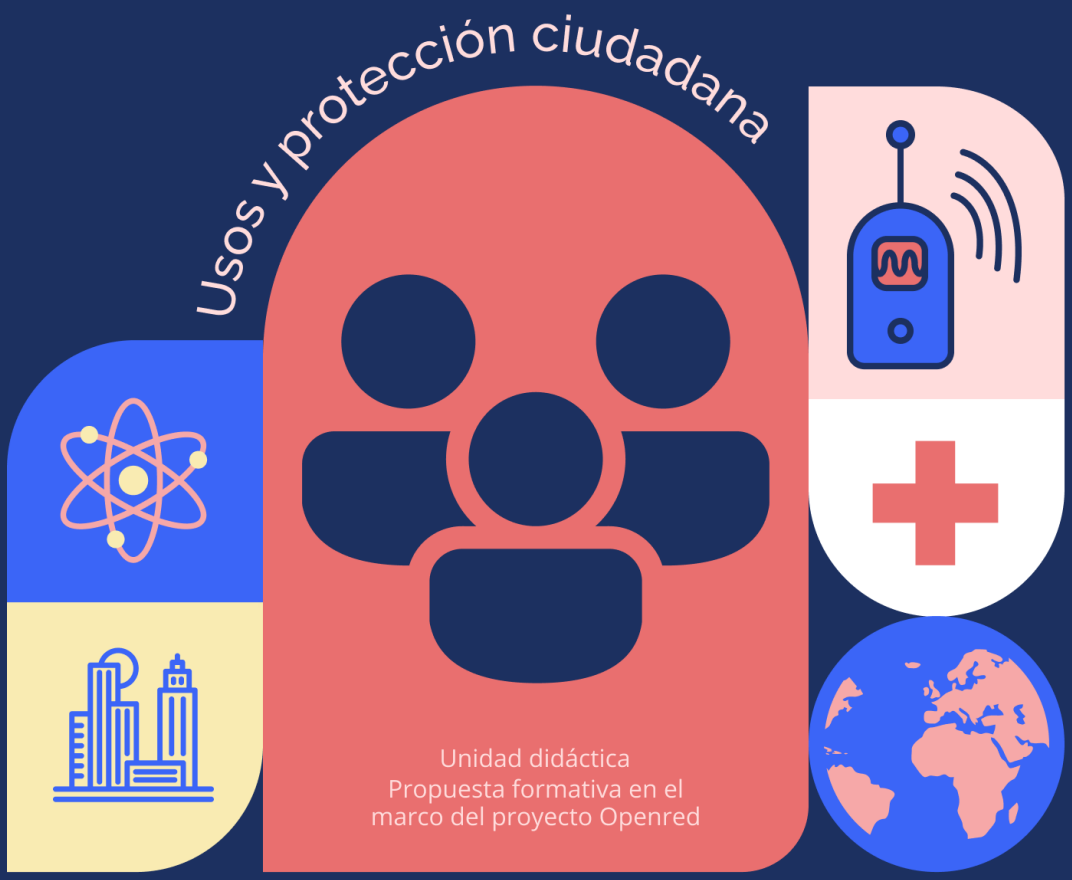
— GUÍA PARA ESTUDIANTES Y CIUDADANÍA —

Radiación Gamma



CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR
ibercivis gente haciendo ciencia
Open red

Coautoría

Contenidos

Maite Pelacho López
Nacho Sáez Martínez
Olga Varela Machado
Miguel Ángel Queiruga Dios
Francisco Sanz García

Maquetación

Germán Gil Barta

Nota

Los contenidos y afirmaciones en este recurso son responsabilidad exclusiva de sus autores y no reflejan necesariamente la postura de las instituciones responsables del proyecto Openred.

Licencia abierta

Este material se encuentra bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0), que permite su uso, distribución y adaptación con fines no comerciales, siempre que se reconozca la autoría correspondiente.

Cómo citar

Pelacho, M., Sáez, N., Varela-Machado, O., Queiruga-Dios, M. Á., y Sanz-García, F. (2025). *Radiación gamma: usos y protección ciudadana. Propuesta formativa en el marco del proyecto de ciencia ciudadana Openred. Unidad didáctica: Guía para estudiantes y ciudadanía*. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.17573898

Presentación de Openred como marco de la Unidad Didáctica

En nuestra vida cotidiana recibimos una cierta dosis de radiaciones ionizantes. En el mundo actual, las principales contribuciones a esta dosis proceden de la radiactividad natural, sea del medio geológico o de la radiación cósmica, y de las terapias y diagnósticos médicos. Hay, sin embargo, otras fuentes de radiaciones ionizantes cuya contribución debe ser marginal, a no ser que se produzca un accidente. Se trata de las instalaciones industriales que usan esta tecnología con fines diversos y de las centrales nucleares. Las radiaciones ionizantes tienen la característica de que no pueden ser detectadas por nuestros órganos en las dosis habituales en nuestro planeta. Sin embargo, pueden tener efectos negativos para la salud en esas dosis.

El conocimiento de las propiedades de las radiaciones por la sociedad es muy positivo para que esta tenga una visión ajustada del riesgo que suponen: ni se debe exagerar este riesgo, lo que puede generar una angustia injustificada, ni menospreciarlo, lo que lleva a recibir dosis innecesarias, contraviniendo el llamado Criterio ALARA (*As Low As Reasonably Achivable, es decir, tan baja como se pueda conseguir razonablemente*).

Este proyecto de ciencia ciudadana que presentamos tiene la virtud de que va a difundir las propiedades de las radiaciones ionizantes entre la ciudadanía en general, y entre los estudiantes en particular. El fin del proyecto es contribuir al objetivo marcado por la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica, por sus siglas en inglés) de que los ciudadanos sean protagonistas de su propia protección radiológica. Su desarrollo permitirá desplegar una red densa de vigilancia radiológica gamma que complemente a la red del CSN (Consejo de Seguridad Nuclear), que pueda ser utilizada para realizar misiones de medidas o que esté disponible para casos de emergencia.

Las misiones son campañas de medida que se llevarán a cabo en algunos lugares pertinentes para comprobar la utilidad y operatividad de la red ciudadana de medición.
Esta unidad didáctica es un elemento de gran interés para que los estudiantes y la población participante pueda entender lo que está midiendo y qué fines tiene.

La participación del CSN es clave para garantizar que los sensores tengan la calidad necesaria y estén bien calibrados, de tal manera que las medidas tomadas sean creíbles y las conclusiones extraídas sean confiables. Además de la participación del CSN, el proyecto Openred cuenta con la participación de los mejores expertos del país en radiaciones ionizantes y protección radiológica, lo que ha permitido desarrollar un proyecto de gran calidad y de utilidad para la protección radiológica, complementando al CSN.

Animamos a sumarse a esta actividad que pretende mejorar sustancialmente la protección radiológica de los ciudadanos y su comprensión de lo que son las radiaciones ionizantes.

Francisco Castejón
Consejero del CSN

Índice

—	Introducción	08
01	¿Qué es la radiación?	12
02	Efectos biológicos de la radiación ionizante	26
03	Detección de la radiación ionizante	35
04	¿Qué es la ciencia ciudadana?	48
05	Proyectos de ciencia ciudadana para la medida de radiación ionizante	56
06	Actividades propuestas	62
—	Referencias	82
—	Lista de figuras y créditos	88

Introducción

La presente guía, *Radiación gamma. Usos y protección ciudadana*, busca proporcionar a cualquier persona interesada –estudiantes y profesorado de Bachillerato o Formación Profesional, integrantes de asociaciones diversas, personas curiosas de cualquier edad— los conocimientos esenciales sobre la radiación ionizante y la protección radiológica. Su objetivo es contribuir a la formación de una ciudadanía informada, capaz de entender qué es la radiación, dónde se encuentra, cómo se mide y cómo gestionarla de manera crítica y responsable.

Este material forma parte del proyecto Openred, una iniciativa coordinada por el Consejo de Seguridad Nuclear y la Fundación Ibercivis, en colaboración con la Universidad de Zaragoza, la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech (UPC), la Universidad de Cantabria (UC) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). El objetivo de Openred es potenciar la cultura ciudadana sobre la radiación y promover la creación de una red de medición de radiación gamma ambiental distribuida por todo el territorio, mediante la participación ciudadana. Para lograrlo, es fundamental que todos tengamos conocimientos claros y rigurosos sobre este tema y a este objetivo se orienta esta guía.

Además de la comunidad educativa, también múltiples asociaciones, museos, centros juveniles, ferias de ciencia o entidades locales pueden utilizar este material para promover actividades divulgativas y talleres científicos. Con los conocimientos adquiridos, cualquier persona puede realizar acciones hacia una mayor implicación social: comprender mejor la información científica, tomar decisiones fundamentadas en cuestiones de seguridad y salud, o incluso participar en iniciativas de ciencia ciudadana.

En definitiva, esta guía invita a descubrir, reflexionar y actuar. Conocer la radiación es también aprender a protegernos, a cuidar del medio ambiente y a involucrarnos en aquello que es de interés común. La educación es una herramienta de fortalecimiento y cohesión social, y este documento quiere contribuir a que esa educación llegue a todas las personas.

Te damos la bienvenida a este recorrido por el mundo de la radiación gamma. Esperamos que lo disfrutes, que avive tu curiosidad y que te anime a seguir aprendiendo y participando activamente en la construcción de una sociedad más informada, segura y comprometida.

Objetivos de aprendizaje

Mediante el uso de esta guía podrás alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1.

Comprender la naturaleza de la radiación, sus tipos, aplicaciones y efectos, distinguiendo entre radiación ionizante y no ionizante, así como sus implicaciones para la salud y el medioambiente.

2.

Conocer y aplicar conceptos asociados a la medida de la radiación (unidades, métodos, instrumentación) e interpretar datos y resultados de forma crítica.

3.

Desarrollar pensamiento crítico sobre los usos de la radiación y de las tecnologías relacionadas, con especial atención a la protección radiológica y a sus implicaciones sociales y medioambientales.

4.
Adquirir las habilidades para buscar, analizar y presentar información científica relacionada con la radiación.

5.
Conocer proyectos de investigación colaborativa y ciencia ciudadana vinculados a la medición y análisis de la radiación ambiental.

6.
Adquirir y potenciar un espíritu emprendedor y el interés por la ciencia y la tecnología a través de proyectos de innovación y colaboración ciudadana.

7.
Actuar críticamente ante fenómenos como la radiación, valorando beneficios y riesgos, y tomando decisiones responsables en materia de prevención y seguridad.

8.
Colaborar en la construcción de conocimiento y en la lucha contra la desinformación científica mediante el trabajo en equipo y la participación social.

9.
Ejercer una ciudadanía democrática, responsable y científicamente informada sobre los retos sociales y medioambientales vinculados a la radiación.

10.
Reconocer la dimensión cultural y social de la ciencia, identificando su papel en la historia, la comunicación y la toma de decisiones colectivas.

Objetivos de Desarrollo Sostenible

Utilizar esta UD te permitirá además generar un impacto positivo en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), más directamente en los siguientes:

ODS 3. Salud y bienestar, favoreciendo la comprensión de los efectos de la radiación en la salud y el conocimiento de las medidas de protección, lo que fomenta conductas responsables, también respecto de prevención de riesgos.

ODS 4. Educación de calidad, integrando diversas metodologías activas como la observación, la experimentación, el análisis, la extracción de conclusiones, el debate y la reflexión, favoreciendo un aprendizaje crítico, inclusivo y participativo.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructura, a través del estudio de los usos tecnológicos de la radiación en distintos ámbitos y la comprensión del funcionamiento y la evolución de los sensores de radiación.

ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles, fomentando comunidades más resilientes al adquirir capacidades para detectar y medir la radiación, esenciales para el monitoreo ambiental.

ODS 12. Producción y consumo responsables, a partir de la reflexión crítica del uso responsable de la radiación y las implicaciones sociales y ambientales de las actividades humanas.

ODS 13. Acción por el clima, al comprender mejor el papel de la energía nuclear, potenciando el debate sobre la base de información rigurosa y sopesando riesgos y ventajas.

ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas, al facilitar la comprensión de la importancia de las regulaciones y tratados para el uso de tecnologías nucleares y radiológicas, así como de la relevancia de convenios y alianzas entre instituciones.

En la figura 1 se muestran las principales conexiones de la UD con los ODS.

Cómo manejar esta guía

El documento presenta cinco apartados con contenidos teóricos y un último apartado de actividades de diferente complejidad conceptual y tecnológica.

Al final de cada bloque de contenidos se indican las actividades más directamente relacionadas con el tema abordado. Estas actividades se plantean como elegibles de acuerdo con los intereses formativos de cada persona junto con sus comunidades, educativas, asociativas, etc. Se incluyen además abundantes referencias para su uso y consulta.

Figura 1. Principales conexiones de la Unidad Didáctica con los ODS. Elaboración propia.

01

¿Qué es la radiación?

1.1 Definición y clasificaciones de la radiación

La radiación es el fenómeno físico que implica la emisión, propagación y transferencia de energía, bien a través de ondas electromagnéticas (fotones), o bien a través de corpúsculos o partículas materiales (como electrones, protones, núcleos atómicos o neutrones).

Además de la distinción de acuerdo con su naturaleza electromagnética o corpuscular, la radiación también puede clasificarse según otros criterios. La radiación puede ser natural o artificial en función de su origen o fuente de procedencia. Con independencia de su origen, es particularmente relevante diferenciar los tipos de radiación según los efectos que produce sobre la materia, hablando entonces de radiación ionizante y no ionizante. A continuación se clasificarán las radiaciones según naturaleza, su origen y su efecto sobre la materia.

1.2 Tipos de radiación según su naturaleza

Radiación electromagnética

La radiación electromagnética transporta la energía mediante ondas electromagnéticas. Ejemplos de este tipo de radiación son la radiación infrarroja, la luz visible, los rayos X y la radiación gamma.

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse en medios materiales y en el vacío, a diferencia de las ondas mecánicas –como el sonido– que requieren de un medio físico (sólido, líquido o gaseoso) para su propagación. Una onda electromagnética puede caracterizarse por su frecuencia, su longitud de onda o la energía que transporta. Cuanto mayor es la frecuencia de la onda, menor su longitud de onda y mayor la energía transportada.

De acuerdo con la teoría cuántica, la radiación electromagnética puede describirse también como un conjunto de partículas llamadas fotones, que no tienen masa en reposo. La energía del fotón es directamente proporcional a la frecuencia de la onda, según la ecuación: $E=h\cdot\nu$ donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la onda. Esta relación explica por qué en la radiación mayor frecuencia implica mayor energía. La figura 2 presenta todo el conjunto de radiaciones electromagnéticas o espectro electromagnético.

Espectro electromagnético

Así por ejemplo, la radiación infrarroja tiene una longitud de onda mayor que la de la luz visible, los rayos X, o la radiación gamma y, por lo tanto, menor frecuencia y menor energía.

La radiación gamma ambiental es una forma de radiación electromagnética cuya energía es mayor que la de los rayos X y menor que la de los rayos cósmicos procedentes del espacio exterior.

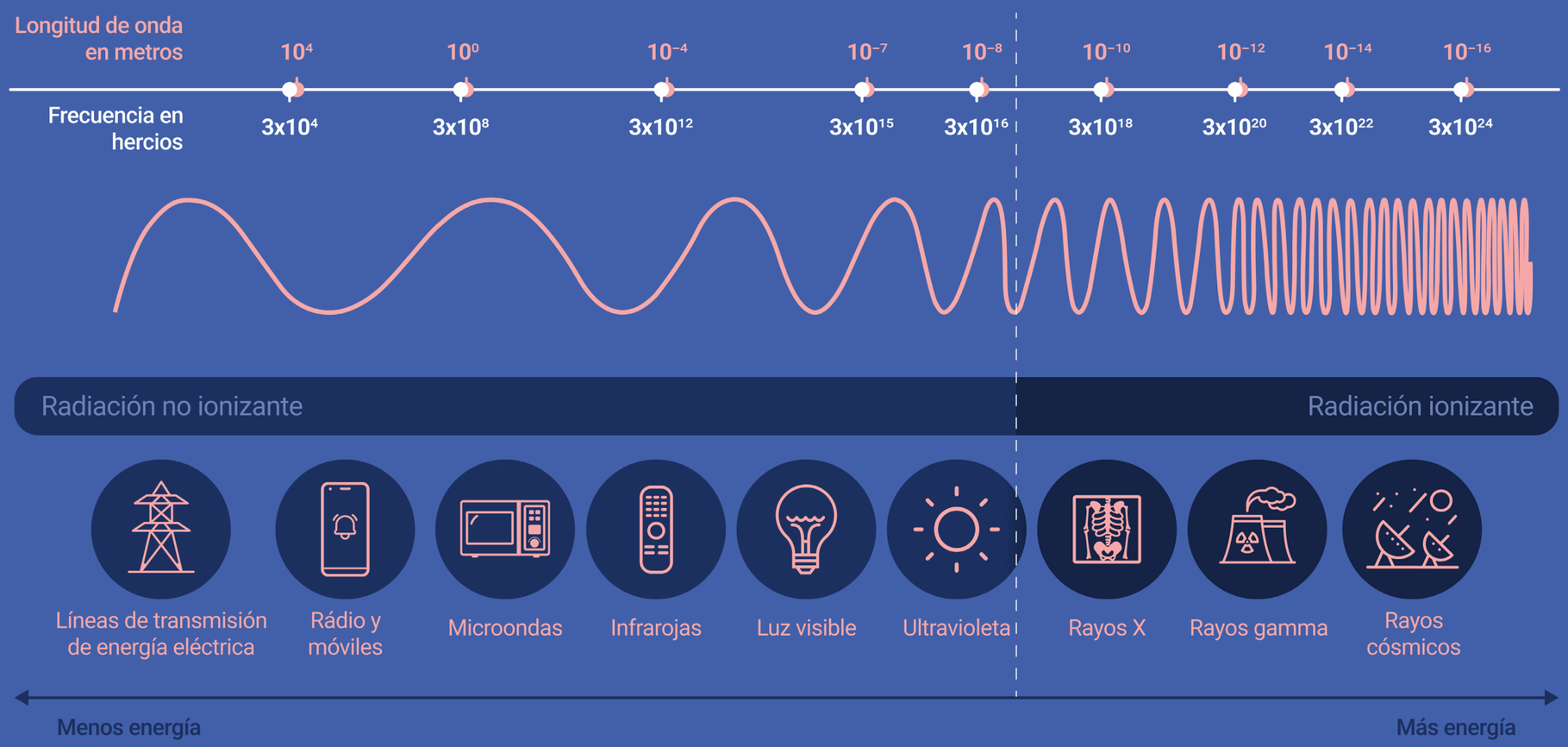


Figura 2.
Espectro electromagnético: conjunto de radiaciones electromagnéticas incluyendo su longitud de onda y frecuencia. Fuente: adaptada de International Atomic Energy Agency (IAEA).

Radiación corpuscular

La radiación corpuscular transporta la energía mediante partículas de tres tipos:

- Partículas alfa (α), o núcleos de helio-4 (^{4}He)
- Partículas beta (β^{-}/β^{+}), bien electrones bien positrones.
- Neutrones, partículas sin carga eléctrica.

Como se verá más adelante, las partículas alfa y beta proceden directamente de desintegraciones radiactivas, mientras que los neutrones intervienen en procesos nucleares más complejos, entre ellos la fisión nuclear.

1.3 Tipos de radiación según su origen o procedencia

La radiación también se puede clasificar, según su origen o procedencia, entre natural y artificial. La figura 2 representa los muy diversos tipos de radiación natural presente en el ambiente.

Radiación natural. Los seres vivos estamos expuestos continuamente a radiación de origen natural. Una parte importante proviene del espacio exterior, a través de la radiación solar y de los rayos cósmicos. Otra fuente la constituyen algunos elementos radiactivos que forman parte de la corteza terrestre, del agua y de los alimentos que consumimos. Estos elementos pueden incorporarse a nuestro organismo de forma natural. Además, muchos materiales que usamos para construir edificios, puentes o carreteras también contienen pequeñas cantidades de sustancias radiactivas, que liberan radiación con el tiempo.

Radiación artificial. Desde principios del siglo XX, además de la radiación natural, el ser humano ha desarrollado la capacidad de generar radiación artificial, en particular radiación ionizante, con distintos fines.[1] Esta radiación se utiliza en muchos campos. En la industria, por ejemplo, sirve para esterilizar alimentos, analizar materiales sin dañarlos o detectar fallos en procesos de fabricación. En la medicina, se emplea para diagnosticar y tratar enfermedades, como el cáncer. Por otro lado, en las centrales nucleares, donde se produce energía eléctrica a partir de determinadas reacciones nucleares, se libera radiación ionizante.

1.4 Tipos de radiación según su efecto sobre la materia

Un tercer criterio de clasificación, entre radiación no ionizante y radiación ionizante, tiene en cuenta el hecho de que los efectos de la radiación pueden ser útiles y beneficiosos, pero pueden tener también efectos perniciosos sobre la salud humana y de los diversos ecosistemas.

Radiación corpuscular

Es el tipo de radiación que no es suficientemente energética como para poder extraer electrones de los átomos o de las moléculas con que interacciona y, por tanto, no puede producir iones, o lo que es lo mismo, no puede ionizar los átomos y las moléculas. Por otra parte, la radiación no ionizante tiene la capacidad de alterar estos sistemas aun sin modificar su estructura, por ejemplo, haciéndolos vibrar o desplazarse.

Por otra parte, la radiación no ionizante tiene la capacidad de alterar estos sistemas aun sin modificar su estructura, por ejemplo, haciéndolos vibrar o desplazarse.

[1] Marie Curie –o Maria Skłodowska-Curie– junto con su esposo Pierre Curie, realizó investigaciones pioneras sobre la radiactividad, descubriendo los elementos polonio y radio. Su hija Irène Joliot-Curie, junto a Frédéric Joliot, descubrió la radiactividad artificial. Una síntesis sobre "Irene Joliot-Curie y la radiactividad artificial" puede encontrarse en Angulo (2024).

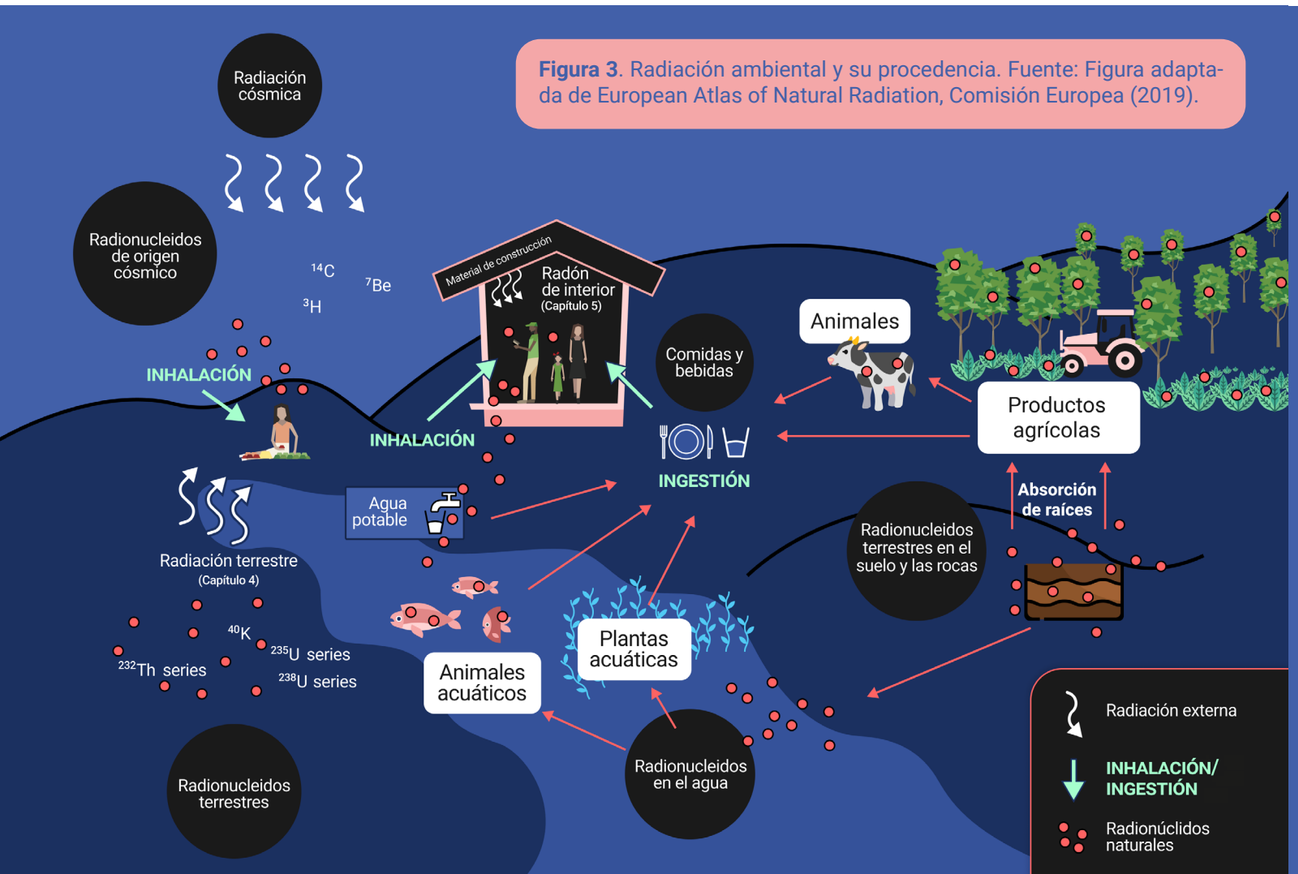


Figura 3. Radiación ambiental y su procedencia. Fuente: Figura adaptada de European Atlas of Natural Radiation, Comisión Europea (2019).

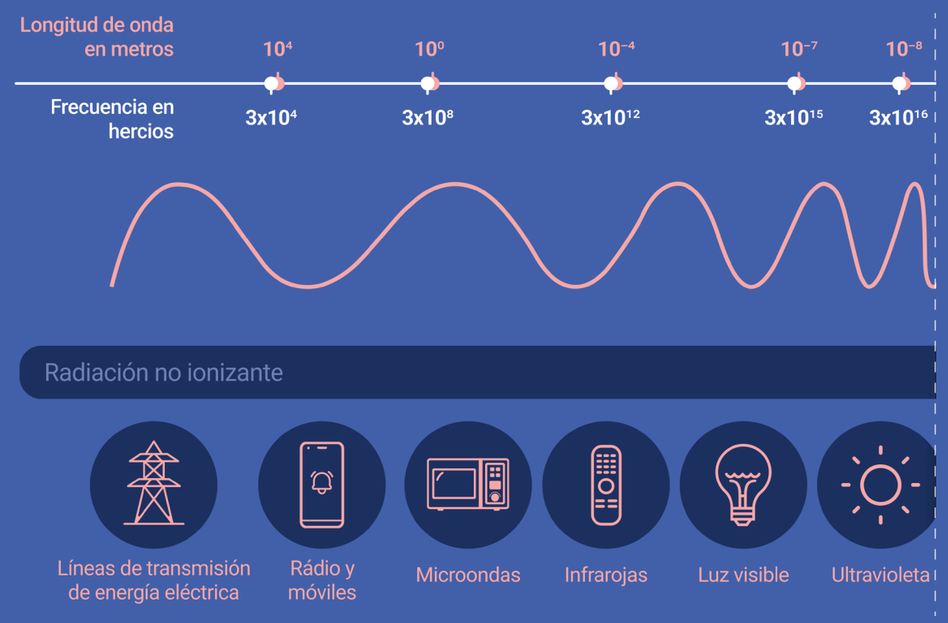


Figura 4. Zona del espectro electromagnético correspondiente a radiación electromagnética no ionizante.

Dentro de esta categoría se encuentran radiaciones tan presentes en la vida diaria como las ondas de radio, la luz visible o la radiación ultravioleta de baja energía. A la vista de los ejemplos se deduce que este tipo de radiación puede ser de origen natural, principalmente procedente del sol, y de origen artificial, generada en muy diversos dispositivos y sistemas tecnológicos.

A continuación se describen las cuatro grandes regiones del espectro electromagnético correspondientes a la radiación no ionizante, comenzando por las menos energéticas:

1.

Ondas de muy baja frecuencia
Radiaciones de menor energía en el espectro electromagnético, por debajo de las ondas de radio, como las generadas por redes de alta tensión, electrodomésticos, aparatos de resonancia magnética nuclear utilizados en medicina o en cocinas de inducción.

2.

Ondas de radio (radiofrecuencia)
Incluyen las ondas empleadas en la transmisión de señales de radio, televisión, radares de baja frecuencia y diversos dispositivos domésticos. Las ondas de radio tienen una amplia aplicación en las comunicaciones. Las de menor longitud de onda (mayor energía) se usan en la transmisión de señales de televisión; las de onda larga (menor energía) en las transmisiones radiofónicas; las de onda media, en telefonía móvil.

3.

Microondas
Corresponden a la parte del espectro electromagnético situada entre las ondas de radio y los infrarrojos, por lo que su energía es relativamente baja. Estas radiaciones se usan, por ejemplo, en radares de alta frecuencia, telefonía móvil, hornos de microondas, y conexión bluetooth. Se sitúan entre las ondas de radio y los infrarrojos.

4.

Radiación óptica
Comprende la radiación infrarroja, la zona de luz visible y la radiación ultravioleta de tipo A y B. La luz visible para el ojo humano corresponde a los colores que se aprecian en un arco iris, desde el rojo al violeta. Existen aplicaciones tales como los distintos tipos de iluminación o como la fibra óptica para telecomunicaciones.

Radiación ionizante

Concepto de radiación ionizante

Se denomina radiación ionizante a aquella que es suficientemente energética como para modificar la estructura de un átomo o de una molécula, modificando su carga eléctrica y dando lugar, por tanto, a partículas ionizadas. La radiación ionizante puede originarse en procesos de desintegración nuclear (radiactividad), tanto natural como inducida artificialmente, emitiendo radiación alfa, beta o gamma, o en procesos de interacción de electrones con materiales densos, como ocurre en la producción de rayos X.

Tipos de radiación ionizante

La radiación ionizante procedente de la desintegración nuclear se presenta en forma de emisión de partículas, tales como la radiación alfa (núcleos de helio-4) y la radiación beta (electrones o positrones), y en forma de emisión de energía electromagnética, como la radiación gamma, que generalmente acompaña a otros procesos de desintegración nuclear.

- **Radiación alfa**
La radiación alfa consiste en la emisión de una partícula alfa por un núcleo atómico. La emisión puede ocurrir de modo espontáneo o ser inducida artificialmente. Una partícula alfa es un núcleo de helio-4 (4He), es decir, una partícula positiva de número atómico 2 y masa atómica 4. La reacción nuclear correspondiente a la emisión alfa puede expresarse de la forma:

$$^{A}_{Z}X \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

El símbolo X representa el núcleo original que, en el caso de la desintegración alfa natural, es energéticamente inestable en función del número relativo de neutrones y protones. El símbolo Y representa el núcleo resultante o núcleo hijo, que puede ser estable o quedar en un estado excitado, es decir, con más energía que la correspondiente a su estado fundamental o estable. La ecuación anterior expresa que la masa atómica (A) y el número atómico (Z) se conservan o, dicho de otro modo, el número total de protones y de neutrones se mantiene constante antes y después de la desintegración. La figura 5 representa este proceso.

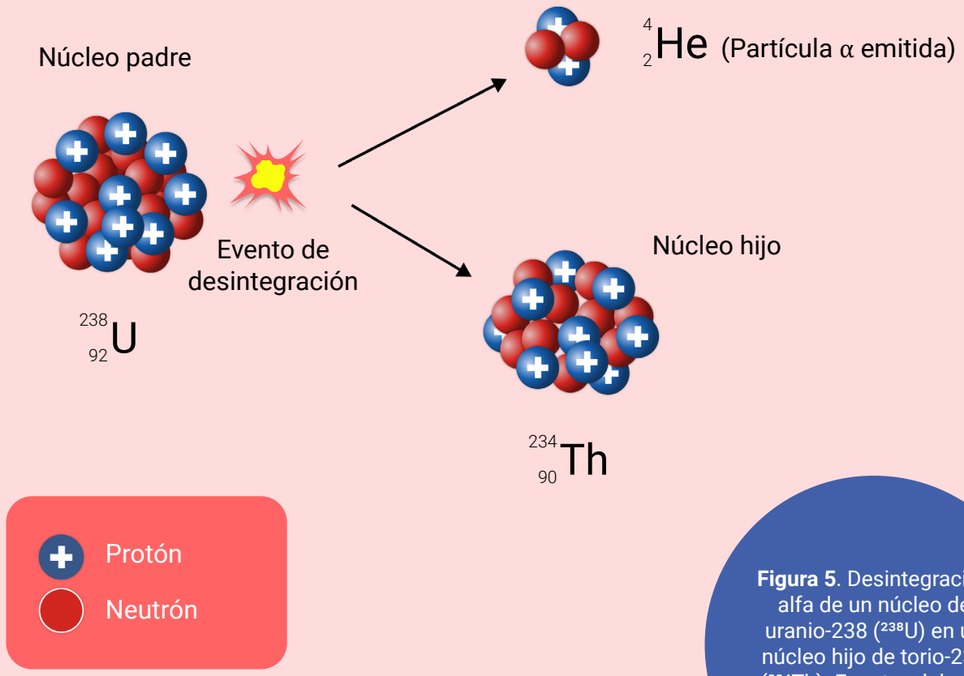


Figura 5. Desintegración alfa de un núcleo de uranio-238 (^{238}U) en un núcleo hijo de torio-234 (^{234}Th). Fuente: elaboración propia.

En general, cuanto más inestable es un núcleo, más rápidamente se desintegra (vida media más corta) y mayor es la energía de las partículas alfa que emite, generalmente entre 2 y 10 MeV. Debido a su carga eléctrica y a su masa relativamente grande, las partículas alfa pierden rápidamente su energía al interactuar con la materia, recorriendo distancias muy limitadas; de hecho, pueden ser detenidas con una hoja de papel.

La radiación alfa también puede ser inducida artificialmente mediante bombardeo de neutrones sobre núcleos originalmente estables. Estos núcleos incorporan neutrones a su estructura, volviéndose inestables y capaces de emitir radiación alfa.[2]

En la emisión de la partícula alfa, el núcleo hijo puede quedar directamente en su estado fundamental, es decir, energéticamente estable, –como en el ejemplo de la figura 4– o bien quedar en un estado excitado y emitir radiación gamma al decaer a su estado fundamental. La figura 6 muestra esta segunda situación.

- **Radiación beta**

La radiación beta consiste en la emisión de electrones (β^-) o positrones (β^+) por núcleos atómicos inestables.

En la desintegración beta negativa (β^-), un neutrón del núcleo atómico se transforma en un protón emitiendo un electrón. Además se emite un antineutrino electrónico.

En la desintegración beta positiva (β^+), un protón del núcleo atómico se transforma en un neutrón emitiendo un positrón. Además se emite un neutrino electrónico.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}^{A}Y + e^{+} + \nu_e \qquad {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + e^{-} + \bar{\nu} $$

Los dos procesos quedan representados respectivamente en las dos ecuaciones siguientes y en la ilustración de la figura 7.

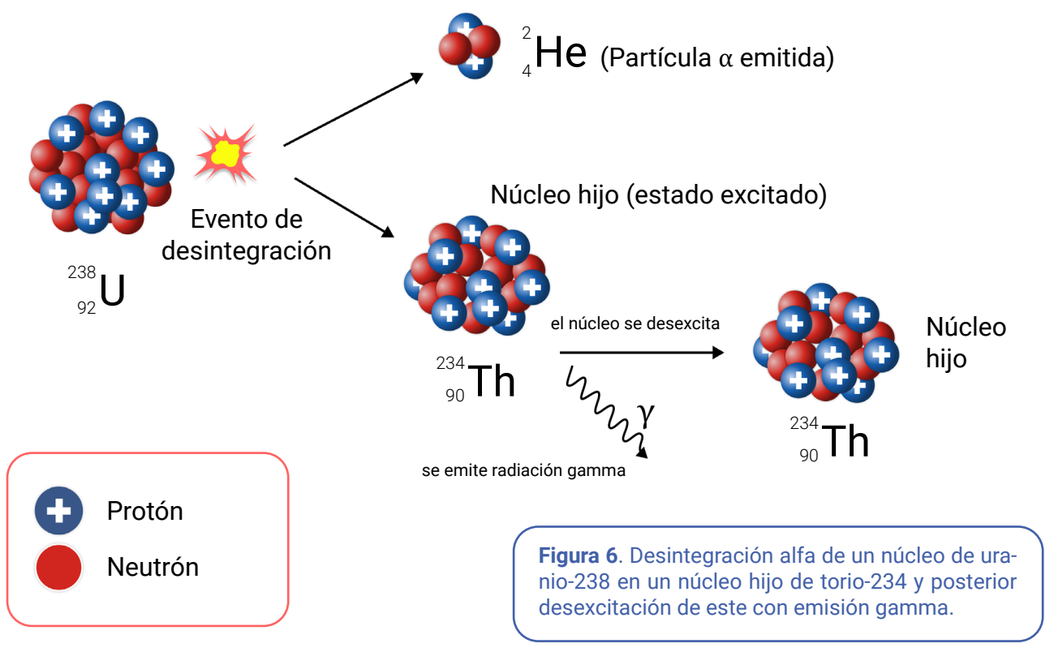


Figura 6. Desintegración alfa de un núcleo de uranio-238 en un núcleo hijo de torio-234 y posterior desexcitación de este con emisión gamma.

[2]Sobre "Irene Joliot-Curie y la radiactividad artificial" puede consultarse el texto de Angulo (2024).

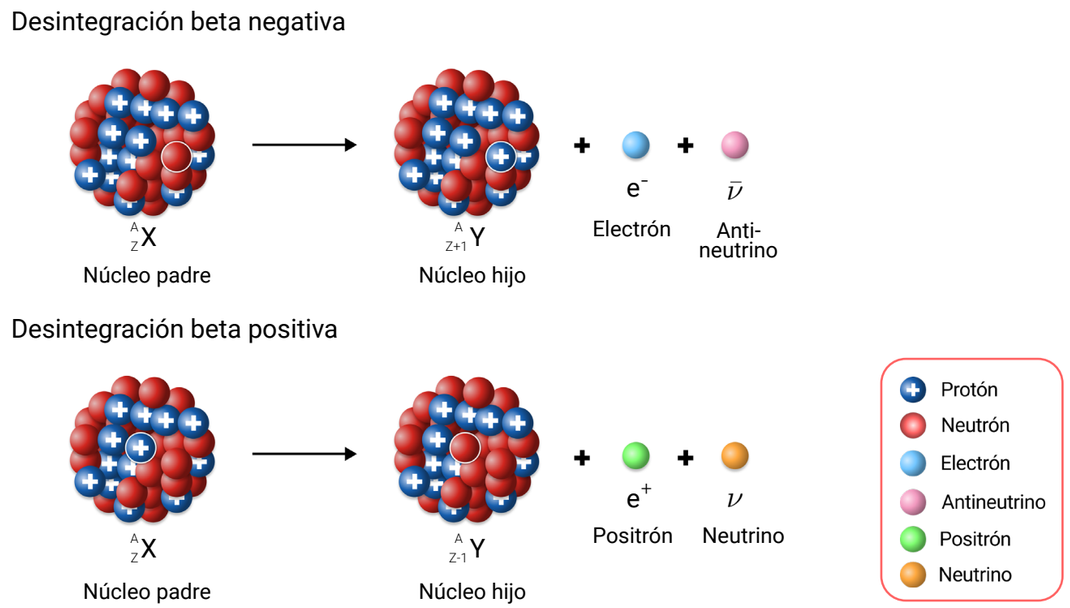


Figura 7. Representación gráfica de procesos de desintegración beta (negativa y positiva). En el primer caso un neutrón (color rojo) se transmuta en un protón (color azul), mientras que en el segundo caso un protón (color azul) se transmuta en un neutrón (color rojo), además de los otros productos de desintegración. Fuente: elaboración propia.

Las partículas beta tienen una masa mucho menor que las alfa, por lo que penetran más en la materia (varios milímetros o centímetros en tejidos) pero aún pueden ser detenidas por una lámina de aluminio delgada o plástico. La energía típica de las partículas beta está entre 0,1 y 2 MeV.

Al igual que en el caso de la desintegración alfa, el núcleo resultante (núcleo hijo) de una desintegración beta puede quedar en un estado excitado, emitiendo radiación gamma adicional.

- **Radiación gamma**

La radiación gamma consiste en la emisión de radiación electromagnética de alta energía por parte de un núcleo atómico, producida tras una desintegración alfa o beta así como en otros procesos nucleares más complejos. Un ejemplo de emisión gamma es la que se produce en la desintegración alfa del uranio-238 en torio-234 (ver figura 5). Su energía típica se encuentra entre unos pocos keV a varios MeV, dependiendo del núcleo emisor.

Dado su gran poder de penetración, la protección frente a la radiación gamma requiere materiales densos como el plomo y el hormigón, a diferencia de las radiaciones alfa y beta, que se detienen con materiales ligeros.

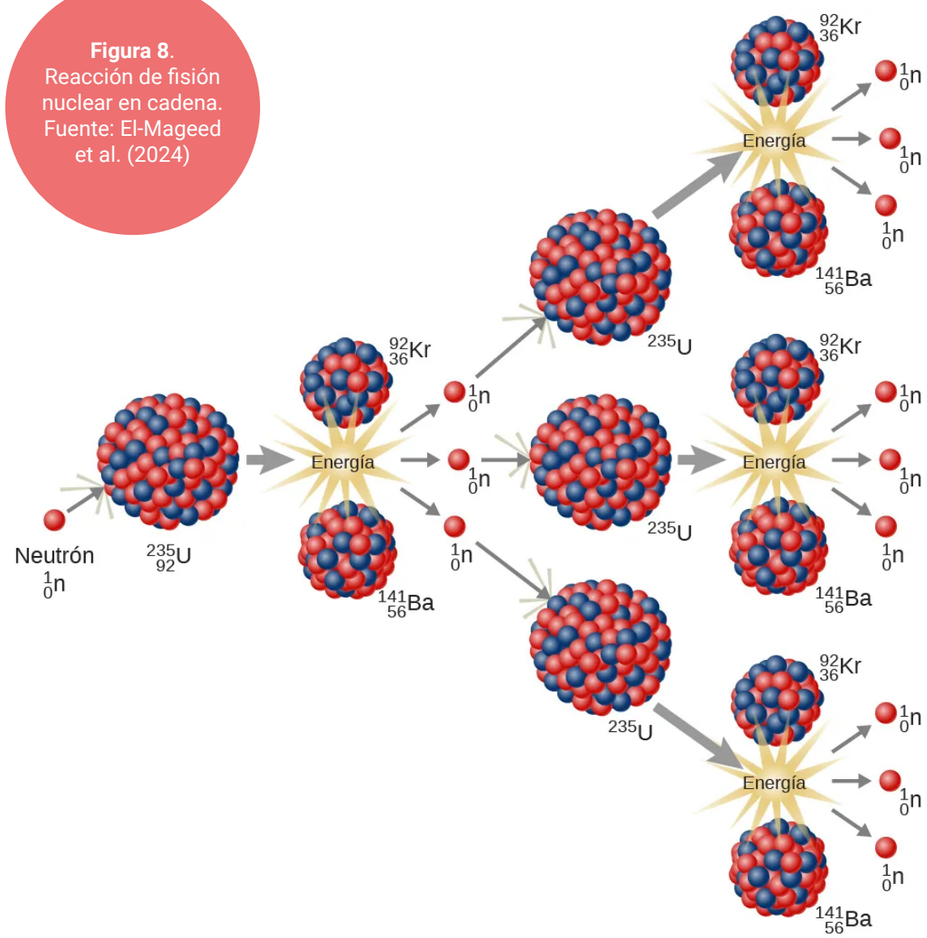
La radiación gamma se diferencia también de la radiación alfa y beta en que la primera está formada por fotones, partículas sin carga y sin masa en reposo, razón por la que puede atravesar la materia con mayor alcance, pudiendo dañar moléculas biológicas.

Como se ha indicado, la radiación gamma puede originarse también en procesos nucleares más complejos que la desintegración nuclear. Desde el punto de vista de la protección radiológica, el caso de mayor interés es el de la radiación gamma produ-

cida en la fisión nuclear. En los procesos de fisión, el núcleo de un átomo pesado (como el uranio-235 o el plutonio-239) se divide en fragmentos más ligeros tras capturar un neutrón, liberando gran cantidad de energía, radiación gamma y más neutrones. Estos neutrones liberados pueden provocar nuevas fisiones en otros núcleos cercanos, generando lo que se denomina una reacción en cadena, que multiplica la liberación de energía y la emisión de radiación (figura 8). Si esta reacción en cadena se mantiene controlada, como en los reactores nucleares, la energía liberada puede aprovecharse para producir electricidad.

Si, debido a fallos técnicos o humanos, o a catástrofes naturales, la reacción en cadena no se controla adecuadamente, puede producirse una liberación de energía y radiación muy superior a la prevista, dando lugar a accidentes nucleares. Ejemplos de ello son los ocurridos en Chernóbil (1986) y Fukushima (2011). Desde el punto de vista de la protección radiológica, la radiación gamma liberada en estos procesos constituye una de las principales fuentes de riesgo.

Figura 8. Reacción de fisión nuclear en cadena. Fuente: El-Mageed et al. (2024)



Capacidad de penetración de los diferentes tipos de radiación

En la figura 9 se muestra la capacidad de penetración en la materia de la radiación ionizante según sea alfa, beta y gamma. Se incluye también la radiación neutrónica, si bien esta no es ionizante. Además, como se ha indicado, las partículas alfa y beta proceden directamente de desintegraciones radiactivas, mientras que los neutrones intervienen en procesos nucleares complejos, como la fisión nuclear entre otros.

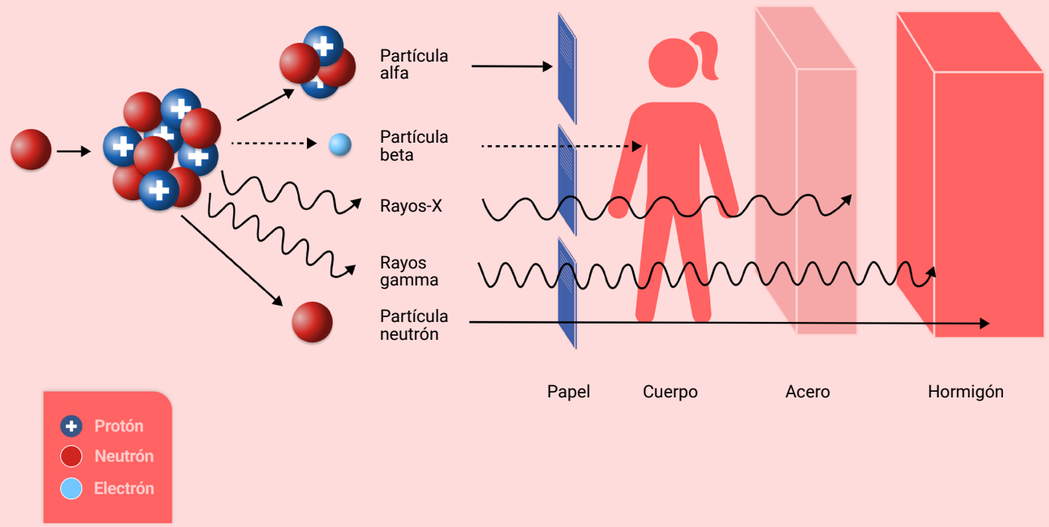


Figura 9. Capacidad de penetración de distintos tipos de radiación. Fuente: elaboración propia.

Magnitudes y unidades de medida

Para poder evaluar los efectos de la radiación ionizante sobre la materia y, en particular, sobre los seres vivos, es necesario definir una serie de magnitudes y unidades que permitan medirla de manera objetiva.

Actividad radiactiva. Representa el número de desintegraciones por segundo de un núcleo inestable o radionúclido. La unidad de medida en el Sistema Internacional (SI) es el becquerel (Bq), equivalente a una desintegración por segundo. Aunque la actividad no refleja directamente los efectos biológicos, constituye el punto de partida sobre el que se fundamentan otras magnitudes de interés en protección radiológica.

La necesidad de comprender los efectos de la radiación ionizante sobre los diferentes tejidos conduce a definir otras magnitudes y unidades, en concreto, la tasa de detección por radiación y la dosis, esta última magnitud de acuerdo con la consideración de diversas variables.

Tasa de detección de radiación. En la práctica, la actividad de una fuente no se mide de forma directa, sino mediante detectores de radiación (como los contadores Geiger-Müller, los cristales centelleadores o los semiconductores), que registran los eventos de radiación cuando una partícula o un fotón interactúa con el sensor. Para expresar esa tasa de detección se utilizan dos unidades:

- **CPS (Counts Per Second / Cuentas Por Segundo)**: número de detecciones en un segundo. Se emplea cuando se necesita respuesta rápida o cuando la radiación varía mucho en poco tiempo. Es, por ello, más habitual en la detección de radiación gamma y es la unidad más empleada en detectores de centelleo o semiconductores.

- **CPM (Counts Per Minute / Cuentas Por Minuto)**: número de detecciones en un minuto. Se utiliza sobre todo en la detección de radiación alfa y beta, donde las tasas suelen ser bajas por lo que conviene medir durante más tiempo y obtener un promedio para reducir la variabilidad estadística.

Las unidades CPS y CPM son proporcionales a la actividad de la fuente radiactiva, pero no indican directamente la intensidad real de la radiación, ya que dependen también de factores como la distancia entre la fuente y el detector, así como la eficiencia del instrumento. En la práctica, CPS se asocia a rapidez e identificación de fuentes, mientras que CPM se emplea en monitoreo ambiental o cuando se requieren mediciones de bajo nivel.

Ni la actividad de la fuente ni la tasa de cuentas bastan para estimar el efecto biológico real de la radiación. Por ello, se definen otras magnitudes relacionadas con la dosis –explicadas en la sección siguiente– que tienen en cuenta no solo la cantidad de radiación absorbida, sino también el tipo de radiación y la sensibilidad de los tejidos. En el caso de la radiación gamma, muchos equipos convierten las cuentas a unidades de dosis, que resultan más útiles en el ámbito de la protección radiológica.

Actividades relacionadas

Todas las actividades propuestas guardan relación con este apartado sobre la radiación:

La actividad 1 permite conocer el proyecto Openred y las posibilidades de la ciencia ciudadana en cualquier ámbito de investigación, especialmente en el estudio y la protección radiológica. La actividad 2 se orienta a identificar la presencia de radiación en entornos cotidianos y reconocer sus diversas fuentes. Las actividades 3 y 4 contribuyen a desarrollar pensamiento crítico y comprensión social en torno a los conceptos, mitos y dilemas asociados a la radiación. Las actividades 5 y 6 introducen el estudio experimental de la detección de radiación y permiten observar fenómenos relacionados con la radiación ionizante.La actividad 7 ayuda a no confundir la radiación ionizante con otros efectos o fenómenos La actividad 8 facilita la comprensión de cómo distintos tipos de radiación interaccionan con materiales y blindajes.Finalmente, las actividades 9, 10 y 11 consolidan la comprensión mediante la construcción de instrumentos de medida, la toma de datos reales y la elaboración de mapas de radiación ambiental.

02

Efectos biológicos de la radiación ionizante

La radiación está presente en la vida del ser humano y de todo ecosistema. La radiación de fondo, originada principalmente en materiales presentes en la naturaleza, no supone ningún riesgo en la gran mayoría de los casos. Sin embargo, la radiación ionizante puede generar efectos nocivos si la exposición no está controlada, a la vez que tiene aplicaciones con importantes beneficios sociales y ambientales. Por eso resulta esencial conocer tanto sus usos positivos como las medidas de protección y vigilan cia necesarias.

2.1 Efectos beneficiosos de la radiación ionizante

La radiación ionizante resulta de gran utilidad en múltiples ámbitos, entre los que se destacan los siguientes.

- **Salud**. En medicina nuclear se utiliza radiación ionizante para radiodiagnóstico, en radiografías (rayos X), tomografía axial computarizada (TAC) o gammagrafías (radiación gamma). La radiación ionizante se emplea también con fines terapéuticos –radioterapia– como en el uso de aceleradores lineales de electrones para tratar el cáncer.

- **Agroalimentación**. Muchos alimentos son irradiados para prolongar su tiempo de conservación, eliminar microorganismos perjudiciales y plagas, y garantizar su seguridad. La irradiación de semillas puede inducir mutaciones para la optimización agrícola, seleccionando variedades con características beneficiosas deseables.

- **Industria y ciencia**. La aplicación de radiación ionizante permite resolver retos tecnológicos complejos, como el sensado de materiales en diferentes condiciones; los sistemas de seguridad (p. ej.: dispositivos de rayos X en aeropuertos); la producción de componentes con características específicas o la esterilización de materiales. En ciencia se pueden distinguir aplicaciones tan diferentes como el uso del carbono-14 para datación de materiales y restos de gran antigüedad, o muy diversos usos en investigación celular, entre muchas otras.

- **Medio ambiente**. La radiación se utiliza en el tratamiento de aguas residuales, en el control de plagas y especies invasoras, en modificación de plantas, generando una diversidad genética que permite desarrollar variedades con características deseables, como mayor resistencia a plagas, sequía o condiciones adversas.

Debido a los efectos nocivos de una exposición excesiva a la radiación ionizante, un grupo de radiólogos pertenecientes a la Sociedad Internacional de Radiología creó, en 1928, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP, por sus siglas en inglés), que desde 1950 tiene asignada la misión de establecer las bases científicas y principios generales en que se sustenta la protección radiológica.

2.2 Efectos perjudiciales de la radiación ionizante y protección básica

La radiación ionizante puede producir alteraciones en átomos y moléculas de los seres vivos, lo que la convierte en un factor de riesgo biológico. Al interaccionar con los tejidos, la radiación puede dañar directamente estructuras celulares o generar radicales libres que afectan a componentes esenciales como el ADN. Estas modificaciones pueden originar problemas de salud, entre ellos el cáncer, y repercutir no solo en las personas, sino también en otros organismos vivos y en el medio ambiente en su conjunto.

Aunque toda persona recibe a lo largo de su vida cierta exposición a radiación ionizante, sus efectos dependen de la dosis, el tiempo y las circunstancias. Para evaluar y gestionar esos riesgos, las exposiciones se clasifican en tres categorías:

a.

Situaciones de exposición planificada

Surgen del uso planificado de una fuente de radiación o de una actividad humana que altera las vías de exposición, causando la exposición –o la exposición potencial– de las personas o del medio ambiente.

b.

Situaciones de exposición de emergencia

Se producen en el marco de un accidente nuclear o una radiológica, requiriendo medidas inmediatas de protección de las personas y el entorno.

c.

Situaciones de exposición existentes

Son aquellas situaciones que ya existen en el momento de tomar una decisión sobre su control, y no requieren (o ya no requieren) la adopción de medidas urgentes. También pueden ser situaciones de exposición creadas por una fuente de radiación cuya ubicuidad o magnitud hace injustificado su control de acuerdo con los mismos criterios aplicables a una situación de exposición planificada. Se incluyen en este caso las situaciones de exposición prolongada después de una emergencia nuclear o radiológica.

Frente a una fuente de radiación externa de radiación, la protección radiológica se basa en tres conceptos: tiempo, distancia y apantallamiento (figura 10).

• Tiempo

Cuanto menor tiempo se esté expuesto a la fuente de radiación menor dosis se recibirá y menor será la radiación absorbida.

• Distancia

Al aumentar la distancia a la fuente, la dosis disminuye de manera inversamente proporcional al cuadrado de la distancia.

• Blindaje

Al interponer una cobertura entre la fuente y el receptor, menor radiación se recibe.

2.3 Magnitudes principales en protección radiológica

Se explica a continuación el concepto “dosis”, considerado desde el punto de vista físico y desde el punto de vista biológico. La magnitud “dosis absorbida” se refiere al primer aspecto, el físico, mientras que las nociones “dosis equivalente” y “dosis efectiva” son magnitudes radiobiológicas, es decir, incluyen la consideración de la dosis desde el punto de vista de sus efectos sobre órganos y tejidos.

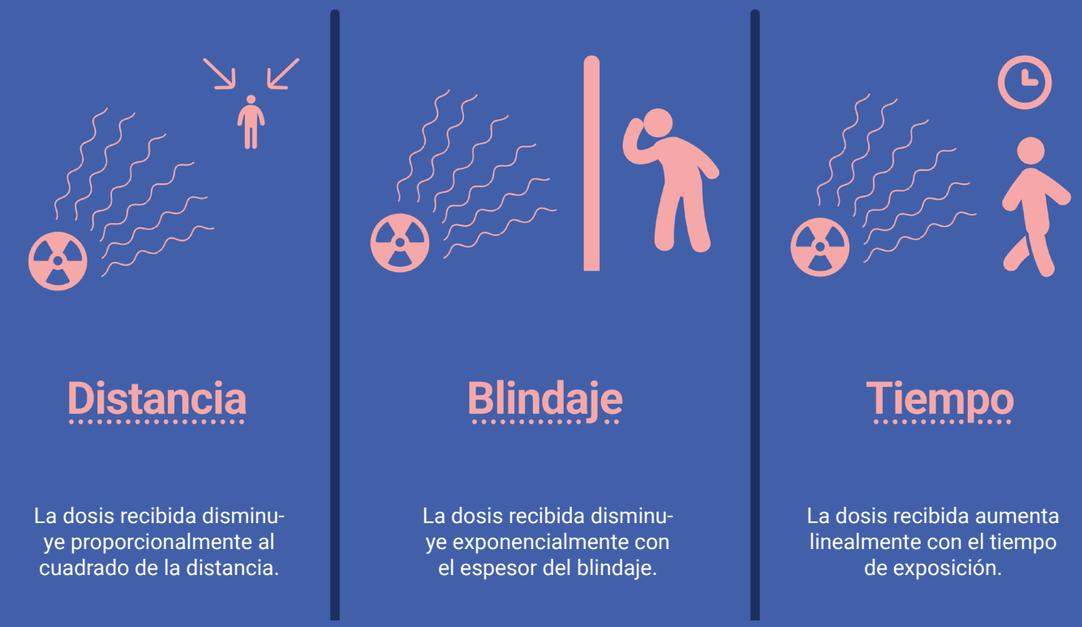


Figura 10. Tres factores clave para la protección radiológica: tiempo, distancia y blindaje. Fuente: adaptada de la infografía del CSN: Seguridad Ciudadana.

Dosis absorbida (D)

Es la cantidad de energía de radiación absorbida por unidad de masa de materia. La unidad en el SI es el gray (Gy). Un gray representa la absorción de un julio de energía de radiación por un kilogramo de masa (1 Gy = 1 J/kg).

$$D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m}\left[\frac{J}{kg}\right]$$

Una unidad todavía utilizada en algunos contextos es el rad, que equivale a 0,01 Gy; es decir, 1 Gy = 100 rad. Así, por ejemplo, si un tejido biológico u órgano de 2 kg absorbe 0,04J de energía radiante, la dosis absorbida es: D=0,04 J/ 2 kg = 0,02 Gy = 2 rad.

Cuando el medio irradiado es un órgano o un tejido biológico T, se obtiene el valor medio de las dosis absorbidas (D) en cada punto. En este caso la dosis absorbida se representa por D_T. Si también se tiene en cuenta el tipo de radiación R, la dosis absorbida se representa por $D_{T,R}$.

En cualquier caso, la dosis absorbida es una magnitud física que no refleja el efecto biológico de los diversos tipos de radiación ni la influencia del tipo de órgano o tejido, sino únicamente la energía de radiación absorbida por unidad de masa. Sin embargo, una misma cantidad de radiación produce distintos efectos según el tipo de radiación

recibida y el tipo de tejido biológico. Para tener en cuenta ambos efectos se definen, respectivamente, las magnitudes dosis equivalente y dosis efectiva.

Dosis equivalente (H_T)

La dosis equivalente es una magnitud radiobiológica que incorpora el efecto de los distintos tipos de radiación sobre los organismos vivos o tejidos.

La dosis equivalente (H_T) en un órgano o tejido es la suma de las dosis absorbidas medias debidas a cada tipo de radiación ($D_{T,R}$) ponderadas por el correspondiente factor de ponderación radiológica (w_R).

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

La unidad de medida en el SI de la dosis equivalente es el sievert (Sv).

Esta unidad es distinta de la de la dosis absorbida (Gy), al tratarse de dos magnitudes diferentes. La dosis absorbida mide la energía depositada mientras que la dosis equivalente introduce el efecto biológico al ponderar la dosis según el tipo de radiación. Ambas magnitudes expresan energía por unidad de masa, sin embargo, son magnitudes diferentes que se miden, por tanto, en diferentes unidades. El gray (Gy) mide la energía absorbida por un material, mientras que el sievert (Sv) es una medida de daño biológico que toma en cuenta tanto la dosis absorbida como el tipo de radiación, esto último a través de un factor de ponderación. Así pues, el sievert se usa para cuantificar el daño potencial de la radiación en el cuerpo humano.

Es relevante destacar que los valores de dosis absorbida y de dosis equivalente coinciden cuando la radiación es de baja peligrosidad biológica, como en el caso de los rayos X o la radiación gamma.

Tabla 3. Valores del factor wR, que pondera el efecto del tipo de radiación sobre un mismo tejido. Fuente: ICPR (2003)

Tipo de radiación y rangos de energía	Factor de ponderación de radiación, w_R
Fotones, todas las energías	1
Electrones y muones, todas las energías	1
Neutrones, energía <10 keV	5
Neutrones, energía de 10-100 keV	10
Neutrones, energía >100 keV - 2 MeV	20
Neutrones, energía >2 - 20 MeV	10
Neutrones, energía >20 MeV	5
Protones, diferentes a los protones de retroceso, energía >2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fisión, núcleos pesados	20

Esta tabla refleja que una misma dosis absorbida por un tejido puede tener un efecto veinte veces mayor si se trata de radiación alfa que si se trata de radiación gamma. Así, por ejemplo, si un tejido recibe 0.01Gy de radiación alfa (w_R=20), el valor de la dosis equivalente será: H_T=0.01Gy×20=0.2Sv.

Existe también la unidad rem (*abreviatura de Roentgen Equivalent Man*), equivalente a 0,01Sv, o lo que es lo mismo, 1 Sv = 100 rem. Esta unidad está en desuso, aunque se sigue utilizando en países anglosajones.

En protección radiológica es más frecuente utilizar el milisievert (1 mSv = 0,001 Sv) y el microsievert (1 μSv= 0,000001 Sv).

Para comprender mejor el valor de estas unidades[3]:

1 microsievert (1 μSv) es:

- 1/10 de la dosis que recibiría una persona en un viaje en un avión de reacción entre España y el Reino Unido.
- 1/5 de la dosis media anual recibida por cada persona a causa de la lluvia radiactiva.

1 milisievert (mSv) es:

- La dosis que recibiría por radiación cósmica una persona que viviera 42 días en una zona de la cordillera del Himalaya que estuviera a 6.700 metros de altitud.
- Algo más del 40% de la dosis anual promedio que recibe una persona en España a causa de la radiación natural.

Dosis efectiva (E)

Los distintos órganos y tejidos del cuerpo humano son dañados de diferente modo por un mismo tipo de radiación. Se define entonces la dosis efectiva (E) como la magnitud que mide el daño producido por la radiación en los distintos tejidos humanos.

Para valorar la influencia del tipo de tejido se utiliza el factor de ponderación de tejido, w_T.

$$E = \sum_T w_T H_T$$

La unidad de medida de la dosis efectiva es la misma la dosis equivalente, es decir, el sievert (Sv) en el SI.

La tabla 4 muestra valores del factor w_T en algunos tejidos del ser humano.

Tabla 4. Valores del factor de ponderación w_T en diversos tejidos humanos.

Tejidos	Factor de ponderación del tejido, w_T	Σw_T
Médula ósea (roja), colon, pulmón, estómago, mama, tejidos restantes(*)	1	0.72
Gónadas	0.08	0.08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0.04	0.16
Superficie ósea, cerebro, glándulas salivales, piel	0.01	0.04
	Total	1

(*) Tejidos restantes: glándulas suprarrenales, región extratorácica, vesícula biliar, corazón, riñones, ganglios linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix.

[3] Equivalencias tomadas del documento sobre Dosis de radiación del CSN: https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiación

Dosis recibida y tiempo de exposición

Dosis en actividades diversas

Actividades cotidianas como comer un plátano (0.0001 mSv) o dormir junto a otra persona (0.00005 mSv) suponen exposiciones minúsculas sin ningún tipo de riesgo. Incluso un vuelo largo en avión puede suponer una dosis de entre 0.03 y 0.05 mSv, debido a la menor protección de la atmósfera a gran altitud. En el ámbito médico, las dosis son más altas, pero están cuidadosamente controladas. Una radiografía dental supone solo 0.005 mSv, y una radiografía de tórax unos 0.1 mSv. Técnicas más complejas como una Tomografía Axial Computerizada (TAC) de cuerpo entero pueden llegar hasta los 10 mSv, lo cual sigue siendo una dosis permisible y sin riesgos, si bien su uso debe estar justificado clínicamente. En medicina nuclear, estudios como la gammagrafía o la Tomografía por Emisión de Fotón Único (SPECT, por sus siglas en inglés: Single Photon Emission Computed Tomography) pueden implicar dosis de entre 4 y 20 mSv, utilizadas para obtener imágenes funcionales que son clave para el diagnóstico temprano de enfermedades.

Tasa de dosis de radiación

La dosis total no es el único factor relevante para cuantificar; también lo es el tiempo en que se recibe. Por ejemplo, una TAC puede aportar una dosis de radiación de aproximadamente 10 mSv en un tiempo medio de exposición de 1 minuto. En comparación, vivir durante un año en una zona con niveles elevados de radiación natural puede suponer esa misma dosis, 10 mSv, pero distribuida a lo largo de 12 meses. Esta diferencia en el ritmo de exposición implica un impacto biológico mucho menor en el segundo caso, ya que el organismo tiene más tiempo para reparar el daño celular. Es por eso que se utiliza la magnitud tasa de dosis de radiación, correspondiente a la dosis por unidad de tiempo y medida en unidades tales como mSv/h o como mSv/año.

En una imagen de gran detalle (disponible a través del enlace https://informationisbeautiful.net/visualizations/radiation-dosage-chart/) se muestran diferentes dosis de radiación que se pueden recibir, así como sus efectos asociados en función del tiempo de exposición.

2.4 Mapas de radiación gamma ambiental en España

Para vigilar los niveles de radiación gamma ambiental en todo el territorio, el CSN dispone de una red nacional de estaciones automáticas y de estaciones de muestreo, y participa además en sistemas internacionales de intercambio de datos y alerta temprana.

Redes y programas de vigilancia nacionales e internacionales

La Red de Estaciones Automáticas (REA) es la herramienta fundamental para la vigilancia en tiempo real de la radiación gamma ambiental. Está formada por estaciones distribuidas por la península y los archipiélagos, y complementadas con estaciones portátiles de despliegue rápido. Estas estaciones miden de manera continua la tasa de dosis gamma y otras variables radiológicas y meteorológicas, enviando los datos automáticamente al centro de control del CSN, donde se procesan y publican en forma de mapas que muestran los niveles en tiempo real.

La Red de Estaciones de Muestreo (REM), gestionada así mismo por el CSN, se basa en la recogida de muestras de aire, agua, suelo, vegetación y alimentos, que son posteriormente analizadas en laboratorios especializados. Esta red incluye tanto una malla densa de puntos repartidos por todo el territorio como una red de alta sensibilidad con menos emplazamientos, pero con análisis más detallados. Los programas de la REM abarcan la vigilancia de la atmósfera y el medio terrestre, así como del medio acuático continental y costero.

Estas dos redes conforman la Red de vigilancia radiológica de ámbito nacional no asociada a instalaciones nucleares (REVIRA).

Junto a la anterior, existen los Programas de Vigilancia Radiológica Ambiental (PVRA), que son responsabilidad de los titulares de las centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible nuclear. Estos programas controlan el entorno próximo de cada instalación y sus resultados se presentan conjuntamente con los de la REM en el Mapa de valores radiológicos ambientales PVRA-REM. Dicho mapa permite consultar los niveles de radiactividad obtenidos en aire, agua, suelos, vegetación y alimentos desde el año 2006, con actualización anual.

La vigilancia radiológica española va más allá del ámbito nacional. El CSN participa en la Plataforma Europea de Intercambio de Datos Radiológicos (EURDEP), a través de la cual comparte la información de sus redes y recibe datos del resto de países europeos (https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Rad-Data-Exchange). También colabora con la Unión Europea y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en sistemas internacionales de alerta temprana, que garantizan una notificación rápida en caso de incidentes nucleares o radiológicos que puedan tener repercusión en España.

Mapas de vigilancia radiológica

Los resultados de estas actividades de vigilancia se reflejan en distintos mapas disponibles públicamente.

El mapa de la REA muestra los valores de tasa de dosis gamma en tiempo real registrados por las estaciones automáticas, con gráficas que permiten seguir la evolución en intervalos de minutos, horas o días (https://www.csn.es/varios/rea/).

Además, en los mapas de las redes autonómicas se publican los valores de tasa de dosis gamma obtenidos por las estaciones de comunidades como País Vasco, Cataluña, Comunidad Valenciana y Extremadura (https://www.csn.es/mapa-de-valores-ambientales).

El mapa de valores radiológicos Ambientales PVRA REM muestra los resultados de los programas de la red nacional (REM) y de la red asociada a instalaciones (PVRA) (https://www.csn.es/kprgisweb2/index.html?lang=es).

Actividades relacionadas

Las actividades más directamente relacionadas con este apartado son la 2, 3, 4,10 y 11.

La actividad 2 permite reconocer la presencia de radiación en nuestro entorno y reflexionar sobre su posible impacto biológico. La actividad 3 fomenta el análisis crítico de la información disponible sobre los riesgos y beneficios de la radiación, ayudando a distinguir mitos de realidades científicas. La actividad 4, mediante un juego de roles, invita a debatir los dilemas sociales y éticos derivados del uso de la radiación, vinculando los efectos biológicos con la toma de decisiones responsables. Las actividades 10 y 11 se orientan a la toma de datos reales y elaboración de mapas de radiación ambiental.

03

Detección de la radiación ionizante

Medir esta radiación es esencial para saber qué cantidad está presente en un lugar determinado y si puede suponer un riesgo para la salud. Para ello, se utilizan distintos tipos de sensores que convierten esa energía invisible en señales eléctricas que podemos contar o analizar.

La radiación ionizante no se mide de forma directa sino a través de los efectos que produce. Esos efectos se traducen en señales eléctricas –ya sea en forma de corriente continua o de pulsos– que sí pueden ser identificadas por los detectores. Esa señal se transforma y procesa electrónicamente para obtener valores que indican cuánta ha sido la radiación absorbida (dosis absorbida) o su posible efecto biológico (dosis equivalente). Algunos equipos incluso permiten obtener el espectro de energía de la radiación a partir de estas mediciones.

Existen varios tipos de sensores o detectores. Algunos se basan en gases, otros en cristales, otros en semiconductores, contando cada uno con ventajas y limitaciones. Existen también aplicaciones móviles que aprovechan las cámaras de los teléfonos inteligentes para detectar la radiación. Las diversas alternativas se han analizado durante el desarrollo de Openred, con el fin de usar el que más se adapte a los objetivos de monitorización ciudadana de la radiación.

3.1 Detectores de ionización gaseosa

La característica principal de estos detectores es que contienen un gas y dos electrodos entre los que se aplica una diferencia de voltaje. Cuando la radiación –ya sean partículas cargadas ya sean fotones (como rayos gamma o rayos X)– entra en el detector, interacciona con las partículas del gas (átomos o moléculas) provocando su ionización, es decir, generando iones positivos y electrones libres. Dependiendo del voltaje aplicado, esas partículas cargadas pueden generar bien una corriente o bien un pulso eléctrico que el detector registra. También según el voltaje aplicado, varía el comportamiento del gas en el interior del detector, distinguiéndose tres regiones de funcionamiento. Cada una de estas regiones se corresponde con un tipo de detector con distinta tecnología: cámara de ionización, contador proporcional y contador Geiger-Müller.

Cámara de ionización

La cámara de ionización funciona con un voltaje moderado, lo suficientemente alto como para evitar la recombinación entre electrones e iones positivos, pero sin llegar a provocar una multiplicación en cascada de las partículas cargadas generadas. En esta región, la señal eléctrica generada es constante, por lo que el detector trabaja en modo corriente, midiendo directamente la cantidad de carga generada en el tiempo. Así, cuando detecta radiación, este tipo de cámara no emite pulsos individuales sino una corriente eléctrica continua, proporcional a la cantidad de radiación presente. Este detector es muy útil para medir dosis acumuladas de radiación, como en aplicaciones médicas (por ejemplo, para saber cuánta radiación recibe un paciente durante una sesión de rayos X).

Ventajas:

- Muy estable y precisa para medir dosis.
- Ideal para radiación continua o prolongada.

Limitaciones:

- No detecta eventos individuales.
- No proporciona información sobre la energía de la radiación.

Contador proporcional

Este detector funciona con un voltaje más alto que el de la cámara de ionización. Con tal voltaje, los electrones liberados, resultantes de la ionización, tienen suficiente energía como para ionizar más partículas del gas (segunda ionización), generando nuevos electrones en un proceso en cadena. Este efecto se llama multiplicación por avalan-

cha. La señal eléctrica correspondiente, en este caso en modo pulso, es proporcional a la energía de la partícula original que entró en el detector. Esto permite no solo contar cuántas partículas han entrado, sino también analizar su energía, identificando así la espectrometría de la radiación. El factor de multiplicación de la primera ionización aumenta con el voltaje aplicado, pero es enormemente sensible a pequeñas variaciones de ese voltaje, por lo que este debe mantenerse muy estable para que las medidas sean precisas y reproducibles.

Ventajas:

- Permite obtener información sobre la energía de la radiación.
- Permite realizar análisis más detallados respecto del tipo y origen de la radiación.

Limitaciones:

- Necesita una fuente de voltaje muy estable, ya que pequeñas variaciones afectan mucho al resultado.
- Más complejo y costoso, por lo que no suelen encontrarse en detectores portátiles de uso general o en dispositivos comerciales.

Contador Geiger-Müller

Es uno de los detectores de radiación más utilizados, especialmente en dispositivos personales como dosímetros, gracias a su bajo coste, robustez y facilidad de uso.

El contador Geiger-Müller funciona con un voltaje muy elevado. Cuando la radiación ionizante entra en el tubo, los electrones liberados son acelerados rápidamente, generando una avalancha de nuevas cargas, como en el contador proporcional. La diferencia es que aquí la avalancha produce un pulso eléctrico intenso, que el sistema registra como un evento de radiación. Además, a diferencia del contador proporcional, todos los pulsos tienen la misma forma e intensidad, sin importar la energía del evento registrado, sino solo saber que se ha producido una ionización.

La dosis de radiación se estima contando cuántos pulsos se generan en un período de tiempo. Para convertir esos conteos en una unidad útil (como μSv/h), se usa un factor de conversión propio de cada modelo de tubo Geiger, según su sensibilidad y características.

Ventajas:

- Muy extendido y fácil de usar.
- Adecuado para una primera evaluación de la presencia de radiación.
- Ideal para ciencia ciudadana, uso educativo y vigilancia ambiental.

Limitaciones:

- No proporciona información sobre la energía de la radiación.
- Puede saturarse si la intensidad de la radiación es muy alta.

En la gráfica de la figura 11 se muestra la respuesta del detector de ionización gaseosa frente a la variación del voltaje aplicado. En la primera región se produce recombinación de electrones e iones, siendo el voltaje no suficiente para la detección de la radiación, al no producirse un pulso o corriente. A partir de ahí se observan las tres zonas de comportamiento que permiten diseñar los tres tipos de detectores explicados.

En Openred se han analizado tres dispositivos basados en la tecnología de tubo Geiger, denominados GMC-500+, BGeigieZen (Do it Yourself) del proyecto SafeCast, y RIUMGM, del proyecto OpenRadiation.

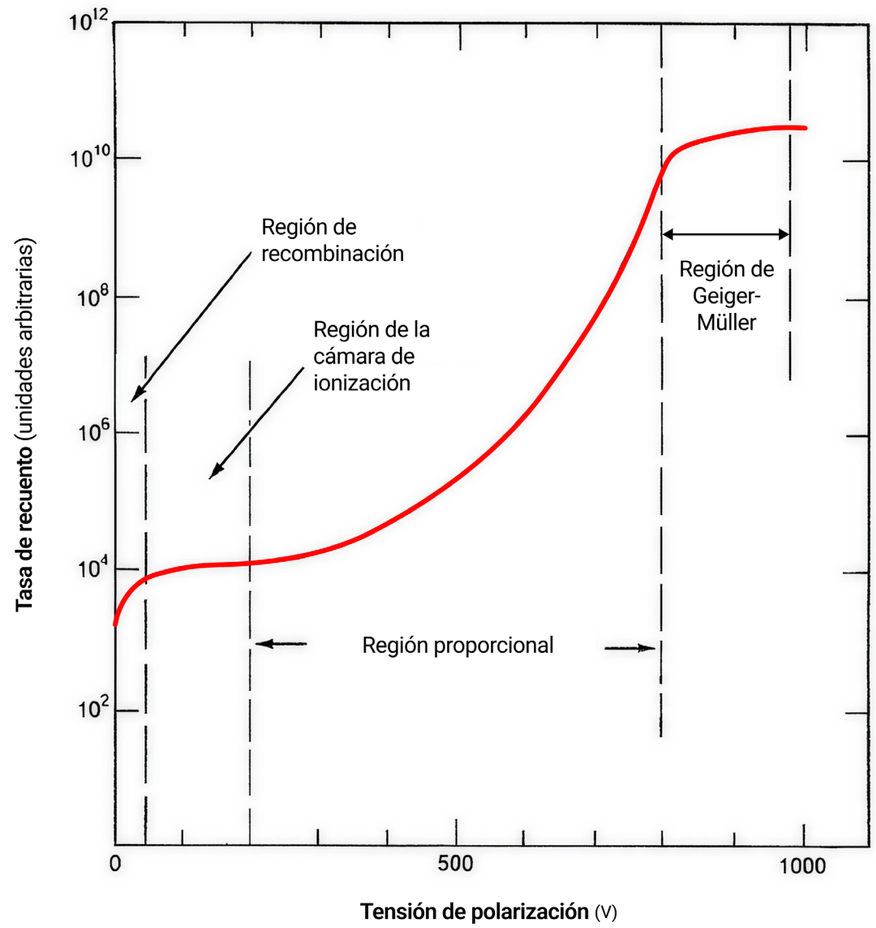


Figura 11. Curva cualitativa de la respuesta de un gas en un detector de radiación. Fuente: adaptado de *Physics OpenLab, X Ray Proportional Counter*.

3.2 Contadores centelleadores

Los detectores centelleadores utilizan materiales especiales llamados cristales centelleadores, que son capaces de emitir un pequeño destello de luz (centelleo o luminiscencia) cuando son atravesados por radiación ionizante. Esta luz es muy débil, por lo que necesita ser detectada y amplificada. Para ello, el sistema puede incluir un fotomultiplicador, un fotodiodo, o una combinación de ambos.

El fotomultiplicador ofrece una amplificación muy elevada y se usa cuando se requiere gran sensibilidad, aunque es más voluminoso y requiere alta tensión. El fotodiodo convierte la luz directamente en corriente eléctrica, siendo más compacto, robusto y adecuado para dispositivos portátiles.

Existen distintos tipos de cristales centelleadores, que varían en sensibilidad, precisión y

velocidad de respuesta. Una de las grandes ventajas de esta tecnología es que la cantidad de luz emitida es proporcional a la energía de la radiación detectada, lo que permite obtener su espectro energético. Así, es posible conocer cuánta radiación hay así como su energía y, con ello, inferir su origen o tipo.

Gracias a su alta eficiencia y rapidez, los detectores centelleadores se utilizan en aplicaciones científicas, médicas e industriales, que requieren una medición precisa de la energía de la radiación.

La figura 12 muestra un esquema básico de un detector centelleador acoplado al tubo fotomultiplicador (PMT, por sus siglas en inglés)[4] conectado, a su vez, a la electrónica del sensor.

Tras los diversos análisis de los detectores estudiados en Openred, se está utilizando el dispositivo Radiacode 102 (figura 13) para la toma de medidas, basado en esta tecnología.

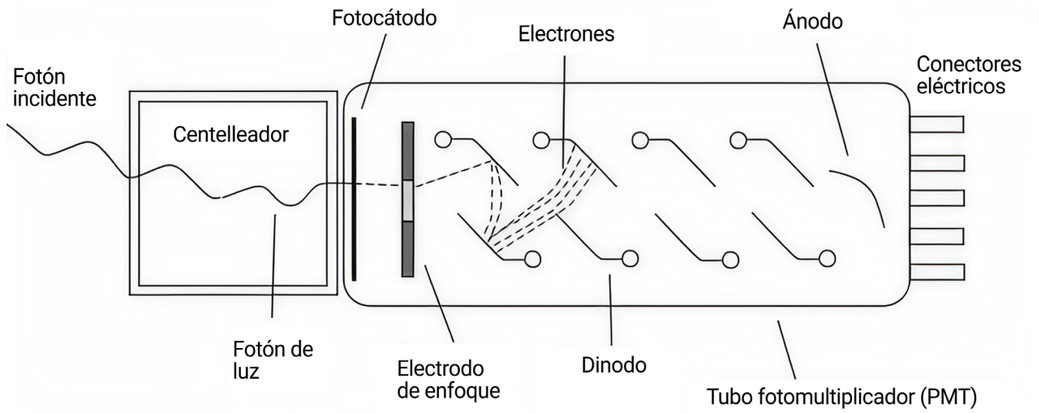


Figura 12. Esquema de contador centelleador que incluye el material centelleador (scintillator) acoplado a tubo fotomultiplicador. Fuente: *Stanford University: Scintillator Materials Group*.

[4] En un tubo fotomultiplicador los dínodos son electrodos que, al recibir electrones, emiten varios electrones más en un proceso llamado emisión secundaria. Los dínodos se disponen en serie, cada uno con un voltaje más positivo que el anterior, creando una cascada de electrones que amplifica enormemente una señal inicial débil, permitiendo la detección de la radiación.

1. **Envolvente** con protección IP considerado para el trabajo en campo de futuras misiones.

2. El **sensor** esta hecho con un cristal Centelleador de CsI (TL) de 1 cm³ que permite no solo la suficiente sensibilidad sino también conocer el espectro energético.

3. **Pantalla**. Muestra los datos principales de radiación, que serán visualizados también en otros dispositivos para la transmisión de datos.

4. El trabajar con un producto comercial testado en los laboratorios de la UPC nos permite obtener datos con la adecuada sensibilidad, repetitividad y fiabilidad.

Figura 13. Partes del dispositivo Radiacode 102. Fuente: sitio web de Radiacode

3.3 Detectores semiconductores

Existen también detectores de radiación basados en semiconductores. Aunque hoy en día están menos implantados y su rango de medida puede ser menor que el de tecnologías tradicionales (como cámaras de ionización, contadores Geiger-Müller o centelleadores), representan un desarrollo con gran potencial por su alta sensibilidad, bajo coste y capacidad de realizar mediciones espectrales. Un ejemplo son los diodos PIN (figura 14). Están formados por una capa P (positiva), una capa N (negativa) y, entre ellas, una capa intrínseca (I) no dopada. Esta capa I es la zona sensible del detector: al no tener portadores libres significativos, los electrones y huecos generados por la radiación pueden moverse libremente, produciendo una corriente proporcional a la dosis. Es allí donde la radiación ionizante, incluida la gamma, se convierte en señal eléctrica detectable.

Su comportamiento recuerda al de una cámara de ionización, pero en formato semiconductor, lo que facilita su uso en sistemas compactos y de alta resolución.

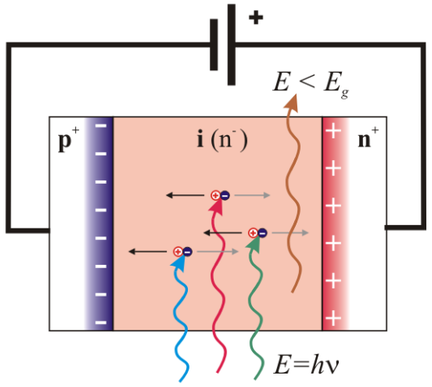


Figura 14. Esquema de fotodiodo PIN. Fuente: *PhysicsOpenLab: X Ray Spectroscopy with PIN Photodiode.*

3.4 Detectores ópticos

Otras tecnologías aprovechan las posibilidades de las cámaras CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), implementadas en la mayoría de teléfonos móviles actuales, ampliando el campo de la medición radiactiva. Diversos estudios han demostrado que los sensores CMOS, aunque diseñados para registrar luz visible, también son sensibles a la radiación ionizante de alta energía, como fotones gamma.

En este contexto, se han desarrollado iniciativas como OpenRadiation, proyecto colaborativo que permite recopilar y compartir mediciones de radiación ambiental utilizando sensores acoplados a *smartphones*, con el fin de generar mapas de radiación abiertos y accesibles. Existen también desarrollos comerciales, como la tecnología GammaPix, para detectar radiación gamma y estimar tasas de dosis en tiempo real. Si bien su precisión no es comparable a la de los equipos profesionales, constituye un recurso considerable para realizar estimaciones preliminares. Este tipo de dispositivos han sido también analizados en Openred.

3.5 Fuentes de radiación que afectan a la medición

Para medir la radiación ionizante deben considerarse los factores que permitan identificar su origen y evaluar el nivel de riesgo de esa radiación. Como se ha visto, existen múltiples fuentes de radiación. Al hacer una medición de radiación ambiental es fundamental tener en cuenta esas fuentes, ya que pueden influir en los resultados medida, y deberán ser compensadas según el criterio establecido para la medición.

La figura 15 refleja cómo un sensor de radiación ambiental se ve influido por fuentes como los siguientes:

1. Fondo de radiación del propio detector (*background*).
2. Radiación cósmica primaria.
3. Radiación natural terrestre.
4. Radiación artificial terrestre.
5. Radiación natural aerotransportada, que incluye:
  a. Radón
  b. Productos de desintegración del radón depositados en aerosoles y superficies.
  c. Radiación cósmica secundaria producida por la interacción de los rayos cósmicos con elementos de la atmósfera (nitrógeno, oxígeno, otros).
  d. Radionúclidos generados por interacción cósmica en la atmósfera y depositados en aerosoles y superficies.
6. Radiación artificial aerotransportada, por ejemplo, nubes de radiación.
7. Contaminación del sensor por medidas previas.
8. Señales espurias (ruido electrónico, interferencias).

También se deben tener en cuenta las condiciones climáticas. Por ejemplo, tras una precipitación, la capa de agua depositada sobre las superficies puede atenuar o enmascarar parcialmente la radiación emitida por estas.

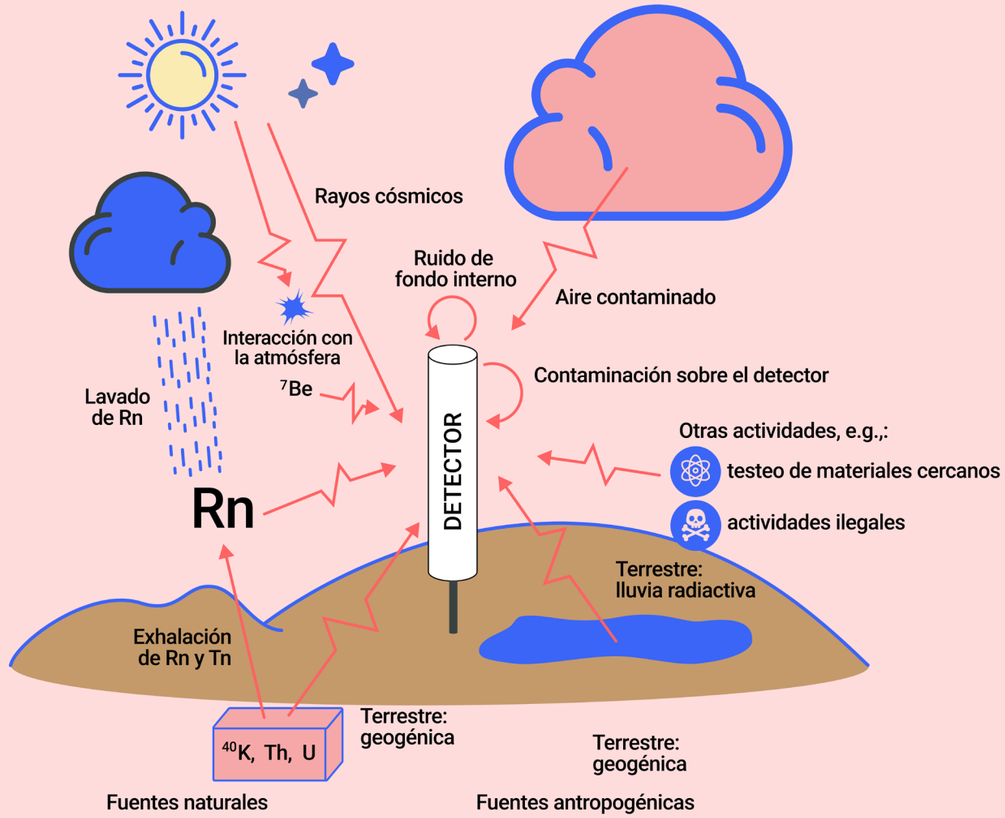


Figura 15. Fuentes que afectan a las medidas de un detector de radiación ambiental. Fuente: Figura adaptada del Gráfico de Peter Bossew del *European Atlas of Natural Radiation*. Comisión Europea (2019).

En particular, cuando se mide radiación gamma ambiental –como en el caso de Openred– se deben conocer las posibles fuentes de radiación que recogen los detectores.

3.6 Análisis de dispositivos e identificación de aquellos útiles en Openred

En el ámbito de la medición de radiación, como en otros campos de instrumentación y detección, existe una amplia gama de dispositivos. Sus características —precisión, calidad, peso y funcionalidades— condicionan la elección en función de la aplicación final. En este apartado se presentan tres contextos diferenciados de uso de detectores de radiación. Los dos primeros contextos se incluyen como referencia ilustrativa, ya que no forman parte de los objetivos directos de Openred: se muestran ejemplos de equipos de alta gama empleados en situaciones de emergencia y se aborda el ámbito sobre radiación cósmica. El tercer tipo de detectores, aquellos evaluados específicamente para Openred, constituyen el núcleo de interés del proyecto por suW aplicabilidad en escenarios de baja radiactividad y su potencial para el uso ciudadano.

Situaciones de emergencia

Existen diversos dispositivos de medición de alta gama encaminados a la medición en laboratorios para calibración, testeo, investigación, medicina o control. En la imagen (figura 16) se muestra, como ejemplo, el dispositivo *GammaTracer Spider de Bertin Technologies*. Se trata de un dispositivo orientado a mediciones de radiación en situaciones de emergencia.

Entre sus características específicas (ver tabla 5) se encuentra su alta autonomía (4 años), índice de protección IP68 (garantizando protección total frente al polvo y la inmersión en agua) y comunicación de datos a través de satélite, infrarrojos o señal de radio.

Figura 16. Dispositivo GammaTracer Spider para la medida de radiación en situaciones de emergencia. Fuente: *Bertin Technologies*: *Environmental Radiation Monitoring Systems*.

Tabla 5. Hoja de características del GammaTRACER Spider.

Tipo de radiación	X y gamma
Tipo de detector	Tubo Geiger-Müller con compensación de energía
Unidad de medida	H*(10) (Dosis equivalente 10mm)
Rango medición	de 20 nSv/h a1 Sv/h
Ciclo de medida	de 1 a 120 minutos
Rango de Energía	45 keV a 2 MeV(IEC60846-1:2009)
Temperatura de operación	-20ºC a 50ºC
Autonomía batería	4 años
Interfaz de comunicación	Infrared, ShortLINK/SkyLINK radio module, Iridium satellite modem
Índice IP	IP68

Radiación cósmica

Existen, además, dispositivos que estudian procesos de radiación a nivel cósmico. Un buen ejemplo se encuentra en el proyecto Fermi Gamma-ray Space Telescope, un potente observatorio espacial para la detección de rayos gamma (https://science.nasa.gov/mission/fermi). El Telescopio Espacial Fermi de Rayos Gamma es un observatorio de la NASA diseñado para estudiar el universo a través de la detección de radiación gamma. Lanzado el 11 de junio de 2008, Fermi permite abordar cuestiones fundamentales sobre una amplia gama de fenómenos astrofísicos y cosmológicos. Entre sus principales objetivos se incluyen la investigación de restos estelares como los púlsares, el origen de los rayos cósmicos y la observación de estallidos de rayos gamma, conocidos como GRBs por sus siglas en inglés. Equipado con dos instrumentos científicos principales, el Telescopio de Gran Área (LAT) y el Monitor de Estallidos de Rayos Gamma (GBM), Fermi ha transformado nuestra comprensión del universo al detectar más de 6.000 fuentes de rayos gamma y contribuir al estudio de la materia oscura y otros fenómenos cósmicos extremos.

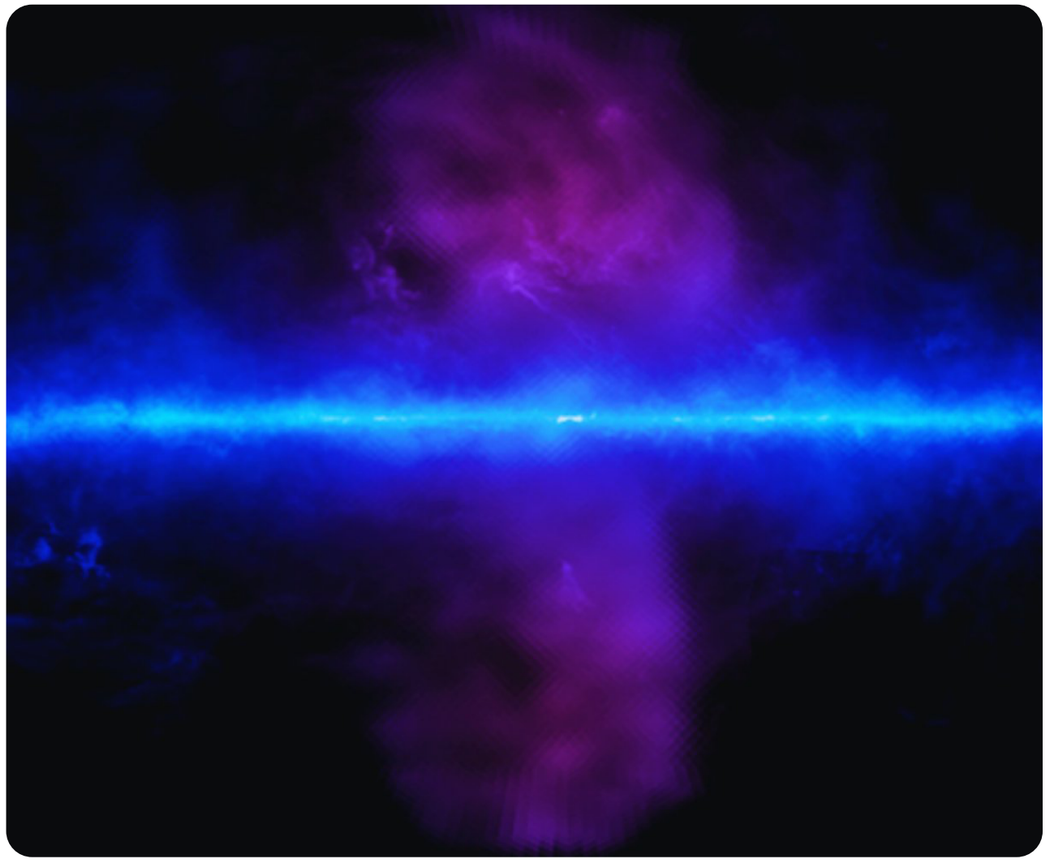


Figura 17. Burbujas de Fermi: estas se extienden por encima y por debajo del plano galáctico y abarcan unos 50.000 años luz. El plano de nuestra galaxia (azul) brilla intensamente en los rayos gamma emitidos cuando las partículas de alta energía interactúan con el gas y la luz de las estrellas. Las burbujas de Fermi destacan en los rayos gamma de mayor energía (magenta). Fuente: *NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration.*

Otro ejemplo es el proyecto High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.). El Sistema Estereoscópico de Alta Energía (H.E.S.S., por sus siglas en inglés) es una red de telescopios Cherenkov de imágenes atmosféricas (https://www.mpi-hd.mpg.de/HESS/pages/about/). La red se encuentra ubicada en las tierras altas de Khomas, Namibia. Este sistema está diseñado para estudiar rayos gamma cósmicos en el rango de energía de 0.03 a 100 TeV. H.E.S.S. consta de cinco telescopios: cuatro con espejos de 12 metros de diámetro y uno central con un espejo de 28 metros, conocido como H.E.S.S. II (fotografía de la figura 20). Desde su inicio en 2003, ha permitido la detección de más de 90 fuentes de rayos gamma de alta energía, incluyendo remanentes de supernovas, núcleos galácticos activos y agujeros negros supermasivos. Además, H.E.S.S. contribuye a la búsqueda de materia oscura y al estudio de fenómenos astrofísicos extremos.

El desarrollo de grandes proyectos como los anteriores permite el desarrollo de nuevas soluciones y herramientas que se pueden trasladar a dispositivos con distintas aplicaciones y de menores costes. Una de estas aplicaciones son los denominados dosímetros (ver sección siguiente), ampliamente utilizados en entornos tanto industriales como médicos en los que existe posibilidad de recibir por parte del personal radiación ionizante.

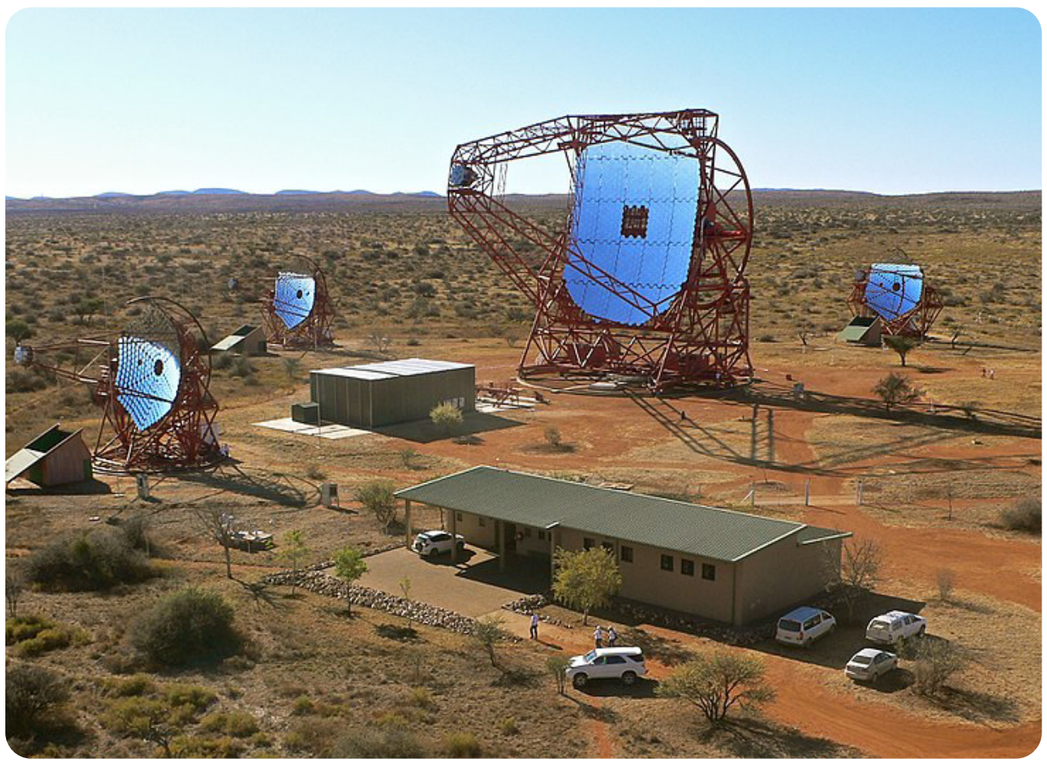


Figura 18. Los cinco telescopios del sistema *High Energy Stereoscopic System* (H.E.S.S.), en Khomas (Namibia). Entre otros fenómenos astrofísicos, permite detectar objetos emisores de rayos gamma (e.g., agujeros negros supermasivos). Fuente: Klepser at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0.

Detectores analizados en Openred

El estudio de diferentes detectores para su uso ciudadano, realizado durante el desarrollo de Openred por la Universidad Politécnica de Cantabria y Fundación Ibercivis, ha demostrado que la selección del equipo es decisiva para obtener mediciones fiables y adecuadas a los objetivos del proyecto.

En concreto, quedan descartados dispositivos de baja sensibilidad, incluidos los que utilizan la cámara de tecnología CMOS de los teléfonos móviles, cuyo uso solo sería viable en situaciones de emergencia con altos niveles de radiación. Para el proyecto Openred, que se centra en escenarios de baja radiactividad, esta opción no se ha considerado adecuada.

Entre los equipos seleccionados destaca el detector Radiacode 102, que ofrece ventajas frente a otros detectores analizados. En particular, los sistemas basados en tubos Geiger, como los utilizados en OpenRadiation y SafeCast, presentan ciertas prestaciones más limitadas a pesar de tener precios similares. Los cristales centelleadores, además de la buena relación calidad-precio, permiten realizar espectrometría, lo que facilita la identificación de radionucleidos en el ambiente. Por otro lado, la empresa suministradora ha acompañado el proyecto con un relevante apoyo técnico.

Así pues, en el proyecto Openred se han valorado mejor los dispositivos de bajo coste, tanto por sus capacidades, conectividad y precio como por su mayor o menor facilidad de manejo. Algunos ejemplos de ellos se muestran en la imagen (figura 19).

Figura 19. Algunos detectores analizados en Openred: doble tubo Geiger (GMC-500+), tubo Geiger BGeigieZen (SafeCast), tubo Geiger RIUMGM (OpenRadiation) y cristal centelleador (RadioCode 102). Fuente: Ibercivis.

Se muestran a continuación las características principales del dispositivo Geiger modelo GMC-500+ (tabla 6) y del RadioCode 102 (tabla 7), siendo este último el que se está usando en Openred.

Tabla 6. Características principales del detector Geiger modelo GMC-500+

Tipo de radiación	beta, rayos X y gamma
Tipo de detector	Tubo Geiger-Müller doble
Unidad de medida	µSv/h
Rango medición	Hasta 42500 µSv
Ciclo de medida	Continuo
Rango de Energía	20 keV a 3 MeV
Temperatura de operación	–
Autonomía batería	1 día
Interfaz de comunicación	Wifi
Índice IP	–

Tabla 7. Características principales del detector RadioCode 102

Tipo de radiación	Rayos X y gamma
Tipo de detector	Cristal Centelleador CsI(Tl)
Unidad de medida	µSv/h
Rango medición	Hasta 1000 µSv
Ciclo de medida	Continuo
Rango de Energía	20 keV a 3 MeV
Temperatura de operación	-10 a 45 ºC
Autonomía batería	Más de 200 horas
Interfaz de comunicación	Bluetooth LE
Índice IP	–

Tras el análisis de los dispositivos mencionados más arriba, en Openred se usa el dispositivo Radiacode 102, que registra continuamente la dosis de radiación gamma, mostrando la tasa de radiación (CPS), la dosis acumulada (en Sv) y la dosis recibida por unidad de tiempo (en µSv/h).

Actividades relacionadas

Las actividades más estrechamente vinculadas con este apartado son la 5, 6, 7, 8 y 9.

La actividad 5, sobre la construcción de una cámara de niebla, y la actividad 6, sobre la construcción de un detector de radiación alfa, permiten comprender, de forma práctica, diferentes metodologías para la detección de radiación. La actividad 7 ofrece una comprobación experimental sobre cómo otros fenómenos pueden interferir en la detección de radiación. La actividad 8, a través de una simulación virtual, facilita la observación del comportamiento de distintos tipos de radiación y la influencia del blindaje. Por último, la actividad 9 profundiza en el conocimiento de los detectores Geiger-Müller mediante su construcción, integrando conceptos de radiactividad y electrónica.

04

¿Qué es la ciencia ciudadana?

4.1 Definiendo la ciencia ciudadana

La definición de ciencia ciudadana no es estática pues se trata de un concepto en evolución. Continuamente aparecen nuevas formas de participación junto a nuevas y diversas definiciones.[5] En el *White Paper for Citizen Science in Europe*, publicado en 2014, ya se afirmaba que no hay un única definición, sino más bien un conjunto de aproximaciones que revelan el dinamismo de este tipo de investigación que evoluciona continuamente e implica nuevas actividades colaborativas así como objetivos compartidos entre diversos agentes sociales.

Según el propio *White Paper*, la ciencia ciudadana se refiere a la participación en actividades de investigación científica en las que la ciudadanía contribuye activamente, ya sea con su esfuerzo intelectual o con el conocimiento de su entorno o aportando sus herramientas y recursos. Según la web de la Fundación Ibercivis, la ciencia ciudadana se puede definir como un conjunto de metodologías de investigación en las que toda persona interesada puede participar activamente en una o varias de las etapas del ciclo investigador, de acuerdo con sus capacidades siempre dinámicas.

Así, a través de la ciencia ciudadana, cualquier persona, comunidad o entidad puede participar en las diferentes fases de una investigación: desde la identificación de un problema y preguntas clave hasta la publicación de resultados, pasando por la conceptualización de la hipótesis, la recogida de datos o el análisis e interpretación de estos.

4.2 Caracterizaciones de la ciencia ciudadana

Una de las diversas caracterizaciones de la ciencia ciudadana es la de la *European Citizen Science Association* (ECSA). Tal caracterización queda recogida en los diez principios de la ciencia ciudadana de la ECSA, formulados entre 2013 y 2015 y traducidos actualmente a 41 idiomas (https://www.ecsa.ngo/10-principles/). Los diez principios fueron traducidos y publicados en español en septiembre de 2015. Se incluye a continuación la versión original en inglés.

Ten Principles of Citizen Science - European Citizen Science Association

1.

Citizen science projects actively involve citizens in scientific endeavour that generates new knowledge or understanding. Citizens may act as contributors, collaborators, or as project leader and have a meaningful role in the project.

2.

Citizen science projects have a genuine science outcome. For example, answering a research question or informing conservation action, management decisions or environmental policy.

3.

Both the professional scientists and the citizen scientists benefit from taking part. Benefits may include the publication of research outputs, learning opportunities, personal enjoyment, social benefits, satisfaction through contributing to scientific evidence e.g. to address local, national and international issues, and through that, the potential to influence policy.

[5] Una buena muestra de otras posibles definiciones, hasta treinta y cuatro, quedan recogidas en el libro "*The science of citizen science*", publicado por Vohland et al. (2021) en acceso abierto en 2021. Algunas de ellas hacen énfasis en la relevancia de la ciencia ciudadana para la conservación ambiental, otras se refieren a sus connotaciones sociales, otras a sus consecuencias en el ámbito de la educación. Puede decirse que todas coinciden en la noción de "participación activa" en la ciencia.

4.

Citizen scientists may, if they wish, participate in multiple stages of the scientific process. This may include developing the research question, designing the method, gathering and analysing data, and communicating the results.

5.

Citizen scientists receive feedback from the project. For example, how their data are being used and what the research, policy or societal outcomes are.

6.

Citizen science is considered a research approach like any other, with limitations and biases that should be considered and controlled for. However unlike traditional research approaches, citizen science provides opportunity for greater public engagement and democratisation of science.

7.

Citizen science project data and meta-data are made publicly available and where possible, results are published in an open access format. Data sharing may occur during or after the project, unless there are security or privacy concerns that prevent this.

8.

Citizen scientists are acknowledged in project results and publications.

9.

Citizen science programmes are evaluated for their scientific output, data quality, participant experience and wider societal or policy impact.

10.

The leaders of citizen science projects take into consideration legal and ethical issues surrounding copyright, intellectual property, data sharing agreements, confidentiality, attribution, and the environmental impact.

Las características de la ciencia ciudadana están siendo ampliamente estudiadas en una gran diversidad de dimensiones: científicas, tecnológicas, ambientales, educativas, económicas, políticas, éticas, jurídicas, etc. La literatura en este ámbito crece de manera exponencial en revistas especializadas en los campos específicos de aplicación de los proyectos (e.g., ecología, medicina, arqueología) y en publicaciones generalistas sobre ciencia, donde se abordan cuestiones metodológicas, sociológicas, cienciométricas, entre muchas otras. A continuación, se señalan algunas publicaciones representativas –un documento a modo de guía, un artículo científico, una revista, un informe técnico, un extenso manual y un libro de carácter divulgativo (todos ellos incluidos en la sección de referencias)– entre las miles que podrían citarse.

- ECSA's *Characteristics of Citizen Science*. Documento elaborado por la European Citizen Science Association (ECSA) que recoge un conjunto de características clave para identificar proyectos de ciencia ciudadana. Sirve como guía de buenas prácticas y referencia internacional para la comunidad investigadora y los gestores de proyectos.

- *Analysis of the evolution and collaboration networks of citizen science scientific publications*. Este artículo realiza un análisis cuantitativo de la literatura sobre ciencia ciudadana, destacando el crecimiento exponencial del número de publicaciones. Los resultados generados por un gran número de proyectos de ciencia ciudadana —incluyendo datos aportados por la ciudadanía y contribuciones colectivas— se publican en las mismas revistas que utilizan los investigadores en la ciencia convencional, lo que evidencia la consolidación del campo y su integración en la producción científica formal.

- *Citizen Science: Theory and Practice.* Revista académica revisada por pares, publicada por la Association for Advancing Participatory Sciences (antes Citizen Science Association), que difunde investigaciones teóricas, metodológicas y estudios de caso en ciencia ciudadana. Es uno de los principales canales de comunicación científica en este campo.

- *Impactos-CC: conocer y potenciar los impactos de la ciencia ciudadana en España.* Informe técnico que analiza de manera sistemática los efectos sociales, educativos, ambientales y científicos de la ciencia ciudadana en el contexto español. Constituye un relevante recurso para la formulación de políticas y la evaluación de proyectos.

- *The Science of Citizen Science*. Manual exhaustivo publicado por Springer en abierto, en 2021, que ofrece una visión panorámica de la disciplina, desde sus fundamentos históricos hasta sus aplicaciones contemporáneas. Reúne contribuciones de investigadores europeos y constituye una obra de referencia académica.

- *Ciencia ciudadana:* Cómo podemos todos contribuir al conocimiento científico. Libro de carácter divulgativo escrito por la investigadora Caren Cooper, especialista en ciencia ciudadana. A través de ejemplos y experiencias, muestra cómo la participación ciudadana contribuye a generar conocimiento científico y transformar las relaciones entre la ciencia y sus entornos

Respecto de los artículos científicos publicados en ciencia ciudadana y a modo de ejemplo, entre infinidad de ellos, pueden consultarse las publicaciones alojadas en Zooniverse y que son resultantes de los proyectos llevados a cabo a través de esta plataforma (https://www.zooniverse.org/about/publications).

Beneficios de la ciencia ciudadana

Los beneficios de la ciencia ciudadana, tanto para el avance de la ciencia como para el del conjunto de la sociedad y el medio ambiente, son reconocidos desde muy diversos ámbitos de estudio.

Ejemplos emblemáticos de ciencia ciudadana –aunque esta denominación comenzó a utilizarse a finales del siglo XX– son el estudio de la ornitología y otras áreas tales como la astronomía, la entomología, o la arqueología. Entidades como SEO /BIRDLife o la Sociedad Aranzadi, desarrollan, desde los años 50 del siglo XX, programas muy diversos con la involucración de decenas de miles de participantes, aunque no se han denominado generalizadamente como ciencia ciudadana hasta fechas recientes.

En particular, los beneficios de la ciencia ciudadana –en el ámbito de la ornitología y extensibles a otras áreas de estudio– han sido resumidos por SEO/BirdLife (https://seo.org/ciencia-ciudadana/https://seo.org/ciencia-ciudadana/).

Beneficios de la ciencia ciudadana en proyectos de SEO/BirdLife

- Obtiene resultados científicos difíciles de conseguir por otros medios.

- Facilita información sobre las poblaciones de aves que permita conocer el grado de amenaza de cada especie.

- Toma el pulso de la biodiversidad y el grado de nuestra calidad de vida a través de la evolución de las poblaciones de aves.

- Aporta evidencias de cambio climático mediante el estudio del cambio de comportamiento de las aves.

- Promueve la participación social en el estudio y conservación de la naturaleza.

- Asegura la conservación de las aves y sus hábitats mediante la implicación directa de voluntarios en decisivos trabajos de seguimiento de aves.

- Contribuye a la educación ambiental de los ciudadanos y a su formación en tareas de ciencia básica.

- Conecta a la ciudadanía con la naturaleza y genera en ellos mayor concienciación ambiental.

- Favorece investigaciones que mejoran la conservación de especies y hábitats.

- Al reunir un gran volumen de datos, recolectados de forma homogénea, los resultados de la ciencia ciudadana gozan de gran validez.

Un ámbito de estudio muy diferente es la cosmología. Y un proyecto emblemático, tanto por sus resultados científicos como por su alcance en participación y creación de comunidad, es Galaxy Zoo, lanzado en 2007 por astrónomos de la Universidad de Oxford para la clasificación morfológica de galaxias, y que daría lugar a la creación de la plataforma Zooniverse (https://www.zooniverse.org/). Los responsables de esta iniciativa (inicialmente *Citizen Science Alliance*)– agrupan a Investigadores, desarrolladores de software, y educadores. Desde sus inicios, se ha considerado a los "*citizen scientists*" como colaboradores que aportan su tiempo y habilidades. Un resumen de los beneficios de la ciencia ciudadana considerados por Zooniverse es el siguiente.[6]

Beneficios de la ciencia ciudadana en proyectos de Zooniverse

- Manejo de grandes volúmenes de datos. Permite procesar enormes cantidades de datos en tiempos mucho más cortos que el trabajo individual.

- Estimación cuantitativa del error. La participación de múltiples personas independientes permite calcular el margen de error con mayor precisión.

- Entrenamiento en inteligencia artificial. Genera conjuntos de datos ideales para entrenar algoritmos de aprendizaje automático.

- Descubrimiento inesperado. Facilita hallazgos fortuitos gracias a la observación humana, algo difícil de replicar automáticamente.

[6] La información proviene del texto "*Why citizen science?*", que formaba parte del sitio web –ya no disponible– de la *Citizen Science Alliance* (http://www.citizensciencealliance.org/philosophy.htm). El enlace anterior redirige a la web de Zooniverse (https://www.zooniverse.org), plataforma para la creación y desarrollo de proyectos de ciencia ciudadana de tipo *crowdsourcing*. Zooniverse fue puesta en marcha por la *Citizen Science Alliance*, iniciativa colaborativa de científicos, desarrolladores y educadores (https://sciencegateways.org/resources/citizenscienceallianc e) de varias instituciones de Reino Unido y de Estados Unidos, como el Adler Planetarium de Chicago, la Universidad de Minnesota y la Universidad de Oxford (https://www.zooniverse.org/about/faq).

- Educación y divulgación. Combina investigación con educación, ya que se aprende mientras se contribuye activamente a la ciencia.

Áreas y metodologías de investigación

Muy diversos estudios reflejan el predominio de proyectos relacionados con ecología y medioambiente (figura 20), aunque es también un hecho que la ciencia ciudadana está cada vez más presente en diferentes áreas de investigación.

Por otro lado, existen infinidad de metodologías para desarrollar proyectos de ciencia ciudadana, del mismo modo que ocurre en la ciencia académica. Esa variedad de metodologías conduce a proponer tipologías de proyectos según diversos criterios. Por ejemplo, podrían distinguirse proyectos online u offline, basados o no en apps o bien en dispositivos para detección y geolocalización, proyectos puntuales para el estudio de episodios específicos o extendidos en el tiempo para obtener series longitudinales de registros, proyectos locales, nacionales o internacionales, implicando a decenas de personas o a cientos de miles, promovidos desde las instituciones o desde las comunidades o bien situaciones híbridas, etc. Una tipología ampliamente extendida es la desarrollada en 2009 por investigadores de la Universidad de Cornell –Ricky Bonney y Jennifer Shirk entre ellos– particularmente en ornitología. Esta clasificación distingue entre proyectos contributivos, colaborativos y cocreados, en función de la relación entre científicos profesionales y ciudadanos así como del reparto de tareas.

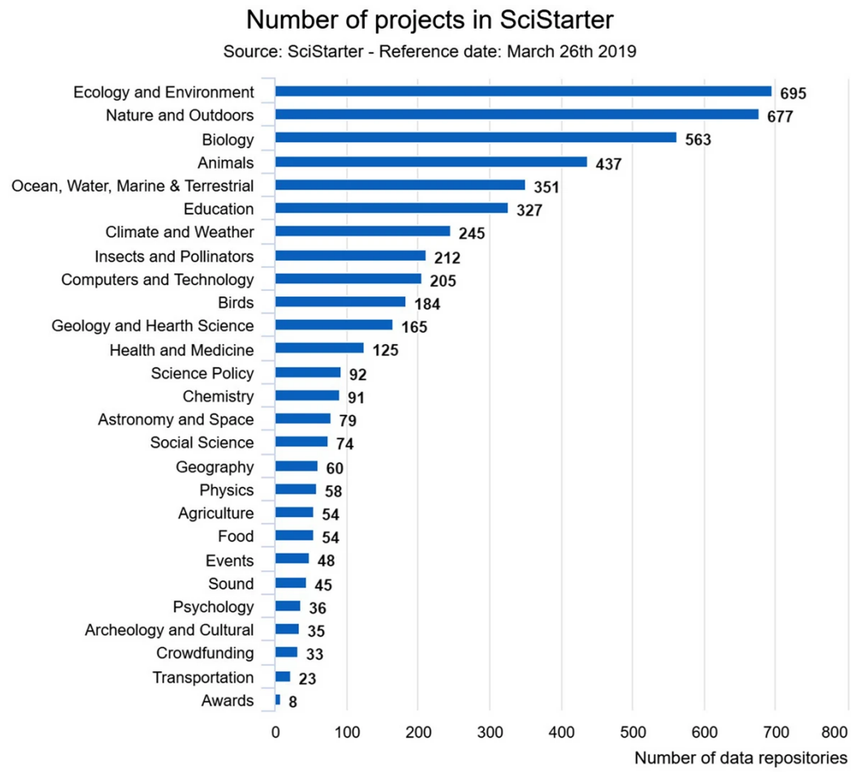


Figura 20. Distribución del número de proyectos incluidos en el portal *SciStarter* de acuerdo con su temática. Fuente: Comisión Europea (2019).

Contributivos. Generalmente diseñados por investigadores profesionales, estos proyectos solicitan a la ciudadanía la recogida de datos siguiendo protocolos establecidos. Los participantes pueden, por ejemplo, registrar observaciones mediante fotografías geolocalizadas o tomar medidas de variables diversas en su entorno local mediante protocolos establecidos. Aunque no participan en el diseño del proyecto, su contribución permite obtener grandes volúmenes de información imposibles de lograr solo desde la academia.

Colaborativos. En estos proyectos, los participantes trabajan junto a los investigadores profesionales en varias etapas del proyecto. Además de aportar datos, pueden ayudar a refinar el diseño, colaborar en el análisis de imágenes, registros o muestras, o participar en la difusión y comunicación de los resultados. Este tipo de proyectos combina el conocimiento ciudadano con la experiencia científica, y favorece un aprendizaje mutuo y una validación más robusta de los datos.

Cocreados. Generalmente codiseñados por investigadores y ciudadanos, estos proyectos implican que los participantes están activamente involucrados en la mayor parte o en todas las etapas del proceso científico. Algunos ejemplos pueden ser la identificación de un problema y la pregunta de investigación, la definición de una metodología, la recolección y análisis de datos, y la interpretación de resultados. La cocreación promueve un fuerte sentido de pertenencia en el proyecto y asegura que los intereses y prioridades de la comunidad se reflejan en la investigación.

Liderados por comunidades. Estos proyectos son impulsados principalmente por comunidades que buscan abordar problemas compartidos o necesidades locales específicas. La comunidad es capaz de decidir los objetivos y métodos de investigación, mientras que los científicos profesionales actúan como asesores o facilitadores. Este enfoque permite que la ciencia responda a contextos concretos, potenciando la relevancia práctica de los resultados.

Pueden encontrarse muy diversos ejemplos en cada una de las categorías anteriores. Para ello pueden utilizarse el portal web del Observatorio de la Ciencia Ciudadana en España https://ciencia-ciudadana.es/ y la plataforma europea de ciencia ciudadana https://citizenscience.eu/. Ambos sitios web son desarrollados por la Fundación Ibercivis, el primero lanzado en 2016 con cofinanciación de la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT), y el segundo en 2020 en el marco del proyecto europeo *EU-Citizen.Science*, desarrollándose actualmente bajo el proyecto *European Citizen Science*. En esta última se encuentran registradas más de 30 plataformas que permiten conocer proyectos en distintos ámbitos geográficos y escalas.

El proyecto Openred sería un proyecto de tipo contributivo, puesto que las personas participantes podrán aportar datos de radiación ambiental gamma. Por otro lado, teniendo en cuenta el desarrollo de hackathones llevados a cabo durante el proyecto (https://open-red.es/index.php/hackathon-resumen/), Openred incluye también tareas diferentes de la recolección de datos: quienes participan en los hackathones contribuyen también con sus propuestas a cuestiones tecnológicas de alcance real.

Creación y reconocimiento de capacidades: relevancia creciente de la ciencia ciudadana

Las iniciativas de ciencia ciudadana permiten la participación activa de toda persona interesada en la generación de conocimiento. Cientos de miles de personas capacitadas para ello aportan valor real a muy diversas investigaciones, voluntariamente y de forma no remunerada bajo motivaciones muy diversas para la participación. La capacitación para la realización de tareas científicas se logra muchas veces a través de la participación en los proyectos, al proporcionar estos la formación necesaria. En otras ocasiones, los participantes cuentan con habilidades adquiridas previamente por múltiples vías y las ponen en juego en proyectos de iniciativa ciudadana o de iniciativa académica-institucional.

La colaboración entre las comunidades científicas institucionales y las comunidades no académicas favorece así la creación y adquisición de las necesarias aptitudes para la realización de tareas de investición, así como el reconocimiento del conocimiento experto de diversos agentes sociales. Esta colaboración –cooperativa en los mejores casos– abre el modo de entender la democratización de la ciencia. En cualquier caso, la ciencia ciudadana promueve la formación y la cultura científica, asumiendo la ciencia como toda forma de generar conocimiento válido en cualquier ámbito del conocimiento.

Por todo ello, la ciencia ciudadana ocupa un papel cada vez más relevante en las interacciones y creación de vínculos relevantes entre ciencia, política, empresa-industria, y toda la sociedad en su conjunto. Esa importancia – notablemente creciente desde finales de siglo XX– se debe, en muy buena parte, a la promoción de la ciencia abierta, la revolución digital, los grandes volúmenes de datos, la inteligencia artificial, las múltiples posibilidades de internet, y junto a todo ello, el reconocimiento creciente del valor de la participación ciudadana en todos los ámbitos de la sociedad. La ciencia ciudadana favorece el aumento de la creatividad colectiva y el potencial de la innovación investigadora, como consecuencia del mayor número y variedad de colaboradores.

Actividades relacionadas

Las actividades más relacionadas con este apartado son la 1, 10 y 11.

La actividad 1 introduce los fundamentos de la ciencia ciudadana y destaca cómo cualquier persona interesada puede contribuir a la investigación mediante su participación activa. La actividad 10 ejemplifica la aplicación práctica de la ciencia ciudadana en la medición y análisis de la radiación gamma ambiental. Finalmente, la actividad 11 presenta un proyecto colectivo de ciencia ciudadana real, en el que los participantes elaboran un mapa de radiación local y comparten sus resultados con la comunidad.

05

Proyectos de ciencia ciudadana para la medida de radiación ionizante

La medición de la radiación ambiental ha sido y es responsabilidad de organismos reguladores y centros especializados. A la vez, en los últimos años se ha observado que la participación ciudadana puede complementar estas mediciones, especialmente para ampliar la cobertura geográfica de los datos y fomentar un conocimiento más directo de la radiación ambiental. Los proyectos de ciencia ciudadana emplean herramientas tecnológicas accesibles que permiten a toda persona interesada registrar, procesar y compartir información, contribuyendo a la disponibilidad de datos que pueden ser útiles tanto para la gestión de la seguridad radiológica como para la investigación científica.

5.1 Accidente de Fukushima: un antecedente clave en la protección radiológica ciudadana

El 11 de marzo de 2011, un terremoto de magnitud 9.0 sacudió la región de Tohoku (Japón). Una hora más tarde, un devastador maremoto (*tsunami* en japonés) impactó la costa y provocó un grave accidente en la central nuclear de Fukushima Daiichi, operada por la compañía Tepco (Tokyo Electric Power Company). Esta central, situada junto al mar, contaba con seis reactores nucleares, de los cuales tres estaban en funcionamiento en el momento del desastre. El accidente alcanzó el nivel 7 en la escala INES (acrónimo en inglés correspondiente a Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos), el máximo posible (de 0 a 7), al igual que el desastre de Chernóbil de 1986.

A raíz del terremoto, la central nuclear de Fukushima Daiichi perdió el suministro eléctrico externo, y el posterior *tsunami* dañó gravemente los sistemas de seguridad y control. La interrupción del circuito de refrigeración provocó la fusión del núcleo en varios reactores, así como su fractura parcial. Como consecuencia, se produjeron explosiones de hidrógeno que liberaron radionucleidos tanto a la atmósfera como al océano. Aunque la central cumplía con los estándares de seguridad vigentes en ese momento, el accidente obligó a evacuar a decenas de miles de personas, desencadenó prolongadas tareas de descontaminación y motivó una profunda revisión de la normativa internacional sobre seguridad nuclear.

El desastre también despertó un fuerte interés social por comprender sus causas y consecuencias, promoviendo una mayor participación ciudadana en temas relacionados con la radiación y la protección radiológica. En los días siguientes al accidente, la información pública disponible sobre los niveles de radiación era escasa y difícil de verificar. Un grupo de personas inició una conversación por correo electrónico que rápidamente evolucionó en una colaboración para crear sus propios sistemas de medición. Contaron con la contribución de hackers del Tokyo *Hackerspace*, ingenieros y diseñadores. El proyecto RDTN.org (*Radiation Detection Network*) se transformó en lo que hoy conocemos como Safecast. En apenas unas semanas, diseñaron y construyeron el primer dispositivo portátil para mediciones móviles, pudiendo así mapear la radiación. Los primeros voluntarios recorrieron zonas como Fukushima, midiendo niveles de radiación cerca de escuelas y carreteras. Safecast organizó varios hackatones desde sus inicios, especialmente en sus primeros años. Todos estos eventos fueron fundamentales para el desarrollo de la plataforma, la mejora de la visualización de datos y la expansión de su red de sensores. Así comenzó a utilizarse la ciencia ciudadana en el ámbito de la medición de radiación gamma, como estrategia para mejorar la cobertura, la transparencia y la participación social en situaciones de riesgo radiológico.

5.2 Proyectos de ciencia ciudadana para medir radiación ambiental

- ***Safecast.*** Actualmente es una organización internacional, sin ánimo de lucro y basada en la participación de voluntarios. Safecast nació como un

proyecto de ciencia ciudadana open source tras el *tsunami* y el accidente nuclear de Fukushima de 2011. Safecast incluye la creación de herramientas de visualización de datos de libre acceso y de dispositivos para la medición de radiación gamma.[7]

Se han desarrollado dispositivos como el bGeigie Nano, así como estaciones fijas, todos compatibles con estándares profesionales. Todos los datos se publican bajo licencia CC0, y están disponibles mediante una API y una plataforma de mapas interactivos (Fig 21).

Safecast ha recogido cientos de millones de mediciones en más de 100 países y se ha convertido en referente mundial en ciencia abierta y monitoreo ambiental. https://safecast.org/

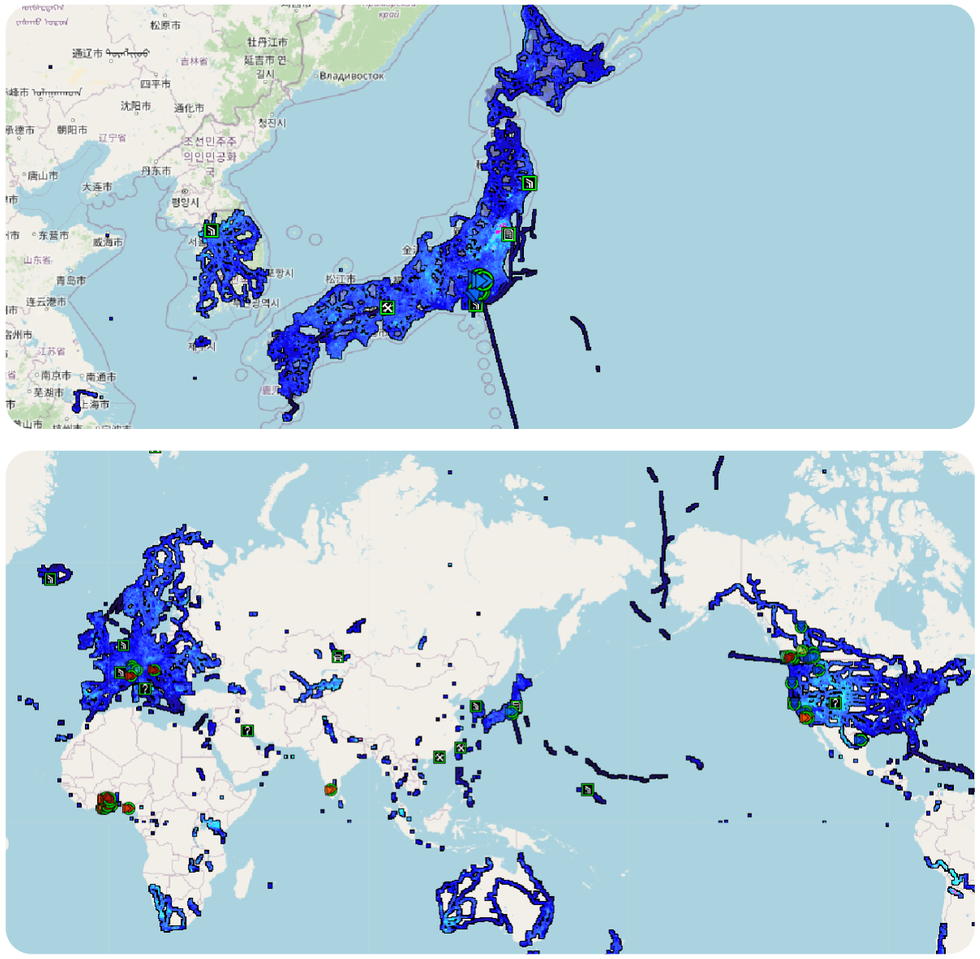


Figura 21. Mapas que reflejan los cientos de millones de mediciones realizadas por participantes en Safecast en más de 100 países. Fuente: SafeCast - OpenStreetMap

[7] Más información sobre los acontecimientos más relevantes en torno al accidente y acciones emprendidas desde marzo de 2011 hasta la actualidad, así como planes futuros en https://www4.tepco.co.jp/en/decommissiontraject/index-e.html y sobre la herramienta virtual Inside Fukushima Daiichi, que permite a cualquier persona explorar, de forma accesible, el proceso de desmantelamiento de la central, llevado a cabo colaborativamente en https://www.tepco.co.jp/en/insidefukushimadaiichi/index-e.html

• ***RAMESIS*** (*Radiation Monitoring Network for institutions and schools to assure early awareness and enhancing safety of citizens*). Proyecto que fue desarrollado por el Instituto Nacional de Protección Radiológica (SURO) en colaboración con la Facultad de Ingeniería Nuclear de la Universidad Técnica Checa (CTU UTEF) y la empresa NUVIA, y cuyos orígenes se remontan a 2015. *RAMESIS* formó parte de una investigación en seguridad financiada por el Ministerio del Interior de la República Checa. El objetivo era mejorar la seguridad de la población mediante el apoyo al Monitoreo Ciudadano en Chequia, implementando un sistema de vigilancia de la radiación gamma a nivel de instituciones, escuelas y ciudadanía en general. La relevancia del monitoreo ciudadano radica en que permite la detección temprana de niveles de radiación, fomenta la confianza pública en la información oficial, facilita una respuesta más eficaz ante emergencias radiológicas, y contribuye a la comprensión ciudadana sobre radiación y medidas de protección.

RAMESIS utilizó un sistema de vigilancia (figura 22) con detectores fijos y móviles de diseño sencillo y fácil de usar, distribuidos gratuitamente y a bajo coste para instituciones, escuelas y población.

Una aplicación central permitía recibir, procesar, almacenar y presentar los datos mediante mapas, gráficos y tablas. Se desarrolló también un portal wiki informativo sobre radiación, métodos de medición, uso de equipos, y contenido educativo. Se crearon herramientas para procesar y visualizar localmente los datos en PC, basado en software libre (como QGIS) y mapas OpenStreetMap.https://www.suro.cz/en/rms

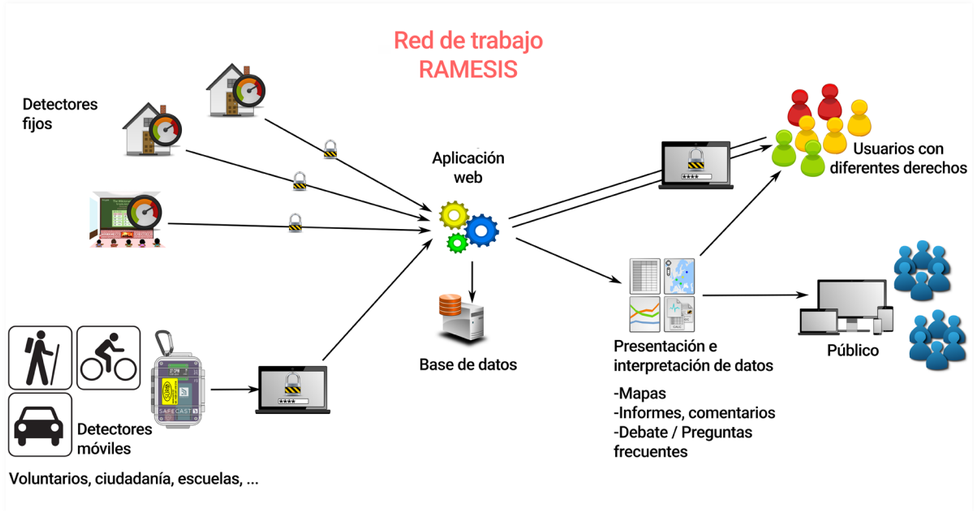


Figura 22. Esquema de la red de trabajo RAMESIS. Traducida de la versión original de Jan Helebrant, CC BY-SA.

• ***OpenRadiation.*** Iniciativa de ciencia ciudadana colaborativa, educativa y sin ánimo de lucro, que busca involucrar a la ciudadanía en la medición de la radiación ambiental. El proyecto, lanzado en 2017, está impulsado por cinco organizaciones francesas: ANCCLI (*Association Nationale des Comités et Commissions Locales d'Information*), IFFO-RME (*Institut français des formateurs Risques Majeurs et protection de l'environnement*), IRSN (*Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire*), *Planète Sciences* y *Sorbonne Université*. *OpenRadiation* ha facilitado la participación de miles de personas en la medición de la radiación ambiental, acumulando más de un millón de mediciones gracias al compromiso de la comunidad. El proyecto ofrece kits de sensores de radiación, disponibles en versiones tanto para el público general como para proyectos educativos, permitiendo a estudiantes y ciudadanos medir la radiación en su entorno. Además, el proyecto promueve la realización de misiones específicas, como el estudio de la radiación durante vuelos aéreos en *Cosmic on Air* (figura 23 a y b) y la medición de la radiación en áreas cercanas a zonas afectadas por accidentes nucleares, como Chernóbil. Estas misiones permiten a los participantes contribuir a investigaciones científicas reales y adquirir experiencia práctica en el campo de la protección radiológica. https://www.openradiation.org/

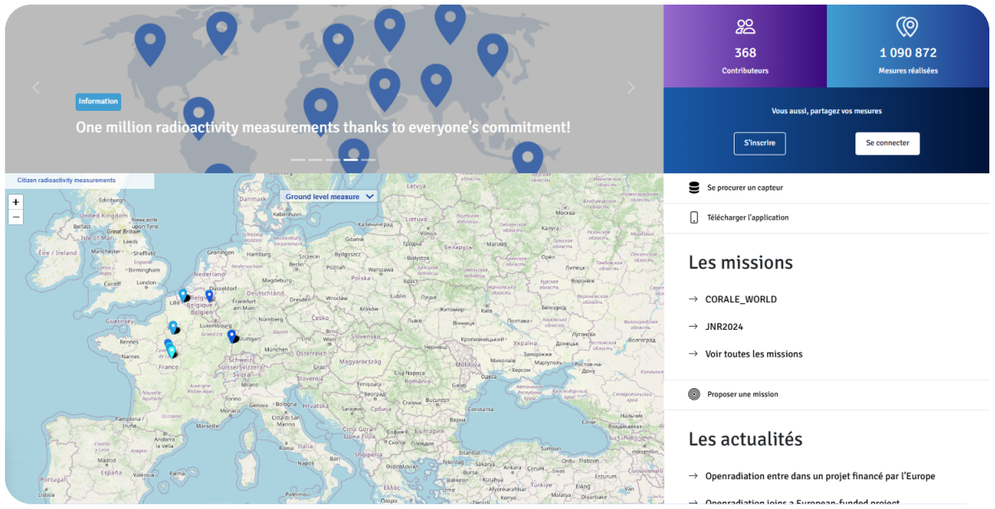


Figura 23a. Mapas que muestran las diferentes mediciones realizadas por los participantes de Openradiation. Fuente: Openradiation.

Figura 23b. Mapas que muestran las diferentes mediciones realizadas por los participantes de Openradiation. Fuente: Openradiation.

Actividades relacionadas

Este apartado, al igual que el anterior, se vincula especialmente con las actividades 1, 10 y 11.

06

Actividades propuestas

Encontrarás a continuación una serie de actividades, de mayor o menor dificultad y complejidad, que te permitirán desarrollar tus competencias científicas y tecnológicas, así como tu actitud necesariamente crítica ante noticias e informaciones recibidas diariamente.

No se trata de realizar todas las actividades –aunque también es posible–, sino aquellas más acordes a tus intereses y al desarrollo de tus capacidades, a través del trabajo cooperativo y, en el caso de estudiantes, con la orientación y apoyo del profesorado. Una clave del trabajo científico es compartir el conocimiento adquirido con la comunidad educativa y con la comunidad científica. Probablemente conoces muchas herramientas de comunicación y cómo utilizarlas de manera efectiva.

Conviene recordar que esta guía está orientada a diversos colectivos ciudadanos –además de centros educativos de bachillerato y formación profesional– que podréis adaptar según vuestros intereses. En concreto, cuando se hace alusión al aula, al grupo, al profesorado, etc. pueden entenderse, por extensión, el conjunto de entornos y agentes sociales tan distintos como pueden ser: centros cívicos, casas de juventud, museos, asociaciones diversas, monitores de tiempo libre, coordinadores de talleres, entre muchos otros.

Actividad 1 ¿Qué es la ciencia ciudadana?

Investigación, reflexión, debate, comunicación

Esta actividad te permitirá comprender que puedes contribuir al avance del conocimiento científico participando en proyectos de ciencia ciudadana.

En las discusiones planteadas, debes razonar cada uno de los argumentos presentados, compartir tus conclusiones con tu clase y con el profesorado. Es necesario, además, ir registrando en un cuaderno de trabajo las ideas que surjan, argumentos y contraargumentos, así como las conclusiones. La participación de todas las personas repercute en un aprendizaje común y en una generación de conocimiento cooperativa.

a. Para empezar, te planteamos discutir las siguientes cuestiones:

- ¿Quién genera el conocimiento científico?
- ¿Crees que tú podrías contribuir o aportar conocimiento científico? ¿Por qué? ¿Cómo?

b.

El siguiente paso implica otro bloque de cuestiones sobre las que buscar información además de discutirlas, analizando pros y contras.

- ¿Qué es la ciencia ciudadana y qué características tiene?

- Busca información sobre proyectos específicos de ciencia ciudadana en alguna plataforma de nivel nacional, europeo, global. Puedes utilizar el portal web del Observatorio de la Ciencia Ciudadana en España (https://ciencia-ciudadana.es/) y la plataforma europea de ciencia ciudadana (https://citizenscience.eu/). En esta última se encuentran registradas más de 30 plataformas que permiten conocer proyectos en distintos ámbitos geográficos y escalas.

- A partir de ahí: ¿Cuál era el objetivo y el contexto de este proyecto? ¿Qué tipo de personas participaron en el proyecto? ¿Quién lo puso en marcha? ¿Crees que el proyecto se podría haber desarrollado sin la participación de personas no vinculadas directamente al mundo de la ciencia? ¿Qué aportaron las personas participantes a la ciencia? ¿Qué aprendieron y qué competencias desarrollaron las personas participantes en el proyecto?

c.

Ahora puedes visualizar el vídeo (6 minutos) sobre Radiación y Salud: (https://www.youtube.com/watch?v=9WTTNx-0XaQ).

- ¿Te ha aportado conocimiento nuevo? ¿Te parece una temática relevante? ¿Crees que tú, con tu clase, podrías aportar conocimiento científico en la temática? ¿Qué deberías hacer con el conocimiento adquirido?

d.

Para finalizar este reto, te invitamos a conocer el proyecto Openred, navegar a través de los contenidos y visualizar los vídeos del repositorio: https://open-red.es/index.php/videos/.

También, te proponemos formar un equipo de 3-4 miembros para elaborar vuestro propio vídeo (30 segundos puede ser suficiente para plasmar las ideas más relevantes).

e.

Finalmente, compartid el vídeo con la clase y analizad los materiales elaborados por otros equipos en sus diferentes aspectos, entre ellos: guion previo, mensajes claros, imágenes libres, accesibilidad, resultado final.

Podéis plantear el análisis como si estuvierais en un congreso científico o médico, es decir, un encuentro donde se comparten, se discuten y se difunden conocimientos.

Actividad 2 Radiación por todas partes

Observación y clasificación basada en documentación

A través de esta breve actividad tomarás conciencia de, o quizá descubrirás, que la radiación nos rodea y nos envuelve en nuestro día a día. Partiendo de la información proporcionada en esta guía, vais a localizar distintas fuentes de radiación en vuestro entorno cotidiano, incluyendo el centro (educativo, asociativo, etc.).

Tendrás que identificar aquellas fuentes que sean naturales y aquellas que sean artificiales, además de indicar en qué zona del espectro electromagnético se encuentran, en el caso en el que se trate de ondas. Clasificar la información recabada de acuerdo con criterios diversos te resultará útil para comprender mejor la radiación.

La figura 2 de este documento muestra algunos aspectos del espectro electromagnético. Hay muchas otras imágenes que pueden ayudarte, entre ellas, la imagen de dominio público de Wikimedia Commons (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_es.svg)

Actividad 3 Mitos y realidades sobre la radiación

Análisis de textos y discusión o debate

Continuamente recibimos información procedente de distintas vías, especialmente de las redes sociales. Como sabes, no toda esa información es verdadera: circulan noticias falsas que, intencionalmente o no, pueden confundir o alarmar. Así pues, debemos adquirir la costumbre de comprobar si lo que leemos –y lo que vemos– es cierto, buscando fuentes fiables de información, contrastando y pensando de forma crítica. Esto nos permitirá tomar mejores decisiones y prevenir engaños.

A continuación te sugerimos la lectura reflexiva de tres documentos para su análisis crítico, realizado con la guía del profesorado y a través de discusiones grupales.

a.

Artículo publicado por Marta Macho-Stadler en National Geographic sobre “Las chicas del radio y los riesgos de la radiación” (https://historia.nationalgeographic.com.es/a/chicas-radio-y-riesgos-radiacion_15809).

Tras la lectura, puedes analizar críticamente y después discutir, utilizando como base las siguientes preguntas: ¿Por qué la empresa permitió esas prácticas? ¿Qué responsabilidad tenían los supervisores, los dueños, los gobiernos, los sindicatos?

¿Qué hubiera pasado si en ese momento hubiese habido más transparencia científica? ¿Y si hubiese regulaciones fuertes sobre radiaciones?

b.

Artículo publicado por la BBC sobre "Qué contienen las aguas residuales de la planta nuclear de Fukushima que Japón comenzó a verter en el océano", (https://www.bbc.com/mundo/articles/c28p8jw17j9o). Tras la lectura y síntesis del artículo, podéis plantear la discusión en torno a tres cuestiones, buscando conocer si la narrativa en torno a cada concepto se ajusta a la realidad o es falsa.

Cuestión	Narrativa ¿falsa?	Realidad
¿El agua liberada es radiactiva?		
¿Se producirá un daño ecológico inminente?		
¿Existen alternativas a liberar el agua al mar?		

c.

Artículo publicado en el blog del radioterapeuta "El lanzallamas" sobre "¡Aquellos tiempos del Radium…!", https://ellanzallamas.com/2014/08/27/aquellos-tiempos-del-radium/. Probablemente te sorprenderá y te quedará clara la necesidad de consultar siempre fuentes científicas y rigurosas, y tener la necesaria prevención ante modas virales.

Algunas preguntas para guiar el análisis crítico podrían ser las siguientes:

¿Cuáles eran los supuestos beneficios que se atribuían al radio en cosméticos, salud y vida diaria? ¿Eran reales? ¿Qué riesgos se descubrieron con el tiempo, y por qué no se anticiparon entonces? ¿Conoces ejemplos actuales de sustancias, tecnologías o productos que hoy se promocionan como benéficos y podrían tener riesgos ocultos? ¿Cómo podemos evitar repetir errores del pasado en cuanto a la falta de información, publicidad engañosa o regulaciones débiles? ¿Cómo podríamos verificar si un producto contemporáneo que afirma tener propiedades radiactivas beneficiosas es seguro o no?

Actividad 4 Juego de roles: comité ciudadano

Simulación, expresión interpretativa, discusión y debate

La radiación produce beneficios en la medicina, en la industria y en la producción de energía, pero también puede generar riesgos. Por eso es importante aprender a analizar los dilemas sociales y éticos que surgen alrededor de su uso. Reflexionar sobre estos dilemas te ayudará a formar un pensamiento crítico y a convertirte en una persona informada, de modo que puedas participar responsablemente en las decisiones de la sociedad.

1.

Te proponemos organizar un juego de rol a partir de una hipotética noticia en prensa sobre la construcción de una instalación que utiliza radiación (por ejemplo: planta de tratamiento de residuos radiactivos, centro de investigación en radioactividad, instalación de tratamiento de alimentos). Cada participante tiene que adquirir un papel distinto (vecindario y asociaciones, entidad nuclear, empresas relacionadas, profesionales sanitarios, activistas, asesores científicos, responsables políticos…). Tienes que simular una reunión o asamblea, dividida en grupos según sus distintos roles, para decidir sobre la instalación de la infraestructura radiactiva, enfocando el conflicto en el sector que se seleccione. Deberás pensar la estructura de la reunión: orden del día, tiempos de intervención, turnos de palabra.

2.

Previamente deberás documentarte sobre casos reales, regulaciones, beneficios, riesgos, impactos (ambientales, económicos, etc.), elaborando un documento con argumentos a favor y en contra. Posteriormente se abrirá una fase de debate y negociación, a través de la realización de una asamblea en la que cada grupo expresa y defiende su postura en función de su rol.

3.

Para finalizar, indica a qué acuerdos se llegó y qué factores influyeron en las decisiones tomadas. Puede analizarse también, en grupo, el estilo argumentativo (lógico, de experiencia, de autoridad, emocional, ideológico, basado en valores, basado en hechos, etc.) y si se han utilizado falacias, aun no intencionalmente.

Actividad 5 Construcción de una cámara de niebla

Trabajo de laboratorio/taller de tecnología en centro educativo o en espacio ciudadano

Este reto supone adentrarse en la investigación de la física de partículas. La cámara de niebla que vas a construir te permitirá observar algo que habitualmente es invisible: las huellas de las partículas subatómicas al pasar por un medio. Observarás y comprenderás fenómenos de la física nuclear tal y como lo hicieron grandes figuras de la ciencia del siglo XX.

Una cámara de niebla puede detectar diferentes tipos de radiación, como partículas alfa, partículas beta, positrones y muones. En el interior de la cámara se encuentra una mezcla de aire y vapor sobresaturado de alcohol, de forma que, cuando una partícula cargada atraviesa el vapor, choca contra las moléculas de alcohol y las ioniza. Entonces, estos iones actúan como núcleos de condensación, lo que provoca que el vapor de alcohol se condense. Este fenómeno permite visualizar las trayectorias de las partículas. Otros tipos de radiación, como los rayos X y gamma, al ser radiación electromagnética no tienen carga eléctrica; sin embargo, pueden producir electrones y positrones, cuyas trayectorias podrás visualizar. Igualmente ocurre con los rayos cósmicos y con la radiación natural terrestre. Quizá esas trayectorias visibles te recuerden a las estelas de los aviones; puedes investigar si existe alguna relación entre ambos fenómenos.

En este vídeo del CSN puedes ver el funcionamiento de una cámara de niebla: https://www.youtube.com/watch?v=Sj3LK5XZ3Lo Como has podido comprobar, se trata de construir algo parecido a una pecera que deberás cerrar herméticamente.

1.

Lista de materiales necesarios

- Un recipiente transparente (de vidrio o acrílico) con cierre hermético.
- Fieltro absorbente para cubrir las paredes del interior de la cámara.
- Alcohol isopropílico (de, al menos, 90%).
- Una placa de aluminio o acero para la base.
- Hielo seco, que actuará como refrigerante.
- Una fuente de luz.
- Guantes y gafas de protección.

2.

Pasos para la construcción de la cámara de niebla

1 • Preparación del interior: forra las paredes interiores de fieltro y humedece con abundante alcohol sin que llegue a gotear.• Fieltro absorbente para cubrir las paredes del interior de la cámara.

2 • Sistema de refrigeración: utilizando la placa metálica como base, sitúa sobre esta el recipiente boca abajo, colocando, a su vez, el hielo seco bajo la placa metálica para que se enfríe todo el recipiente.

3 • Generación de niebla: tras unos minutos, el alcohol se evapora, condensándose en el inferior, mientras se crea una neblina sobresaturada.

Para poner a prueba el dispositivo, deberás iluminar lateralmente el interior de la cámara con una linterna, para que puedas observar las trazas o trayectorias de las partículas.

En la fotografía siguiente (figura 24) pueden apreciarse las trazas producidas por el paso de partículas a través de la niebla, similares a las que podrás observar con la cámara construida.

Figura 24. Trazas visibles en la cámara de niebla procedentes de radiación ionizante. Fuente: Nuledo. Creative Commons CC-BY-SA 4.0.

Puedes consultar los siguientes documentos para profundizar en la construcción de la cámara de niebla y analizar distintas posibilidades.

• Fabricación de una cámara de niebla casera para la observación de rayos cósmicos.
https://fciencias.ugr.es/images/stories/documentos/semanaCiencia/camara.pdf

• Construcción de cámara de niebla.
https://gifna.unizar.es/cloudz/wp-content/uploads/2012/07/montaje.pdf

• Cloud chamber. Do-it-yourself manual.
https://scoollab.web.cern.ch/sites/default/files/documents/SCoolLAB_Cloud-Chamber_DIYManual_2018_v6.pdf

• ¿Cómo funciona la cámara de niebla?
https://nuledo.com/es/

3.

Te sugerimos además las siguientes actividades:

1 • Dibuja las formas de las trazas que aparecen en la cámara de niebla, e intenta identificar el tipo de partícula consultando este documento:
https://scoollab.web.cern.ch/sites/default/files/documents/SCoolLAB_Cloud-Chamber_DIYManual_2018_v6.pdf

2 • Acerca un imán potente a un lado de la cámara y observa la desviación de las trazas.

3 • Cuantifica la radiación de fondo: cuenta el número de trazas en intervalos de 30 segundos durante varios minutos. Puedes investigar y discutir la procedencia de la radiación ambiental (rayos cósmicos, radón, materiales de construcción).

4 • Investiga qué descubrió Charles Wilson con su cámara de niebla.

Actividad 6 Construcción de un dispositivo para la detección de radiación alfa

Trabajo de laboratorio/taller de tecnología en centro educativo o en espacio ciudadano

Este reto consiste en construir un *Alpha Spark* Detector con el que podrás ver las chispas producidas por partículas alfa en tiempo real. Comprenderás cómo se detecta la radiación y por qué es importante entenderla para utilizarla de forma segura. Este reto te acercará al trabajo de investigación de la radiación en laboratorios y ambientes de todo el mundo. Necesitarás una fuente radiactiva que te suministrará el profesorado (Americio-241 o Polonio-210, por ejemplo).

Para comprender el funcionamiento del detector de radiación alfa por chispa (*Alpha Spark Counter*) tienes que imaginarte dos electrodos separados por una distancia muy pequeña a los que se aplica un alto voltaje (del orden de 2-5 kV), justo por debajo del nivel que permitiría una descarga continua en el aire. Cuando una partícula alfa entra en en la región entre los electrodos se ioniza el aire haciendo que se provoque una descarga puntual entre ellos. Esto podrás verlo (una chispa) y oírlo (un pequeño chisporroteo). Contando las chispas que se forman, podrás estimar la actividad relativa de la muestra.

Para construir tu propio contador de partículas alfa, dispones de los siguientes recursos (además del asesoramiento y guía del profesorado):

• Vídeo del profesor César Guazzaroni, que describe el proceso de construcción del dispositivo:
https://youtu.be/yovQDBoAOI8?si=uMPhrmfVVmoNm1x5

• Página de Images SI, Inc., con una explicación paso a paso y con vídeos que te permitirán seguir el proceso:
https://www.imagesco.com/articles/geiger/alpha_particle_spark_detector_p1.html

• Artículo científico publicado en 1944:
https://carlwillis.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/09/phys-rev-67-222.pdf

Una vez que hayas construído el detector, puedes contar el número de chispas en intervalos de tiempo fijos (30 segundos o 1 minuto, por ejemplo) y registrar los datos en una tabla. No olvides repetir las medidas varias veces (10, por ejemplo) para obtener una muestra estadística con la que calcular la media y la desviación típica. En cada medida que has realizado, ¿observas el mismo número de chispas? ¿a qué puede deberse esto?

Además, puedes comprobar el poder de penetración de las partículas alfa, colocando distintos materiales y de distintos grosores entre la fuente de radiación y el detector. Te proponemos para ello tres experimentos, habiendo establecido previamente el intervalo temporal por medida (60 segundos, por ejemplo) y el número de repeticiones para cada medición (10, por ejemplo). En las tablas correspondientes a cada experimento no se han especificado las unidades de medida de radiación (μSv/h o CPM), indicándose únicamente “u”, siendo la primera fila en cada caso un ejemplo ficticio.

1.

Toma materiales distintos del mismo grosor y registra los datos en una tabla como la siguiente.

Comparación de materiales del mismo grosor (0.1 mm, p.ej.)

Material	Grosor (mm)	Mediciones (u)	N repeticiones	Media N	Desv. típica
Material 1	0.1	6, 7, 5, 8, 6, 7, 6, 5, 9, 7	10	6.6	1.3
Material 2	0.1				
Material 3	0.1				

2.

Selecciona un mismo material pero utiliza distintos grosores y registra los datos.

Mismo material (material 3, p.ej.) con distintos grosores

Material	Grosor (mm)	Mediciones (u)	N repeticiones	Media N	Desv. típica
Material 3	0.05	125, 128, 120, 122, 127, 124, 121, 126, 119, 123	10	123.5	3.0
Material 3					
Material 3					

3.

Ahora, selecciona un material (o sin material, simplemente el aire), y varía la distancia entre la fuente y el detector. Registra el número de chispas que observas en una tabla como la siguiente:

Dependencia con la distancia (sin material)

Distancia (cm)	Mediciones (u)	N repeticiones	Media N	Desv. típica
Distancia 1	200, 195, 202, 198, 201, 199, 203, 196, 197, 200	10	199.1	2.6
Distancia 2				
Distancia 3				

Representa gráficamente los resultados, especificando el intervalo temporal definido, los materiales utilizados y las unidades de las magnitudes medidas. ¿Qué te sugieren los resultados? ¿Qué conclusiones pueden extraerse?

Actividad 7 Efecto de una bola de plasma en un detector de radiación

Trabajo de laboratorio/taller de tecnología en centro educativo o en espacio ciudadano

Probablemente hayas visto con asombro el comportamiento de una bola de plasma. Y quizá te has preguntado si podría emitir radiación. Puedes intentar averiguarlo utilizando un detector de radiación. Recuerda que, a veces, las apariencias engañan.

Para empezar, debemos comprender cómo funciona una bola de plasma.

Una bola de plasma está formada por una esfera de vidrio llena de un gas noble a baja presión, en cuyo centro se encuentra un electrodo conectado a un generador de alta tensión alterna (2–50 kV), lo que produce un campo eléctrico muy intenso en su interior. Este campo eléctrico acelera los electrones libres que se encuentran en el

interior del gas, que chocan, a su vez, con los átomos del gas, logrando arrancarles más electrones. La ionización del gas provoca que se vuelva parcialmente conductor, formándose canales filamentosos a través de las zonas en las que el gas es más conductor, que llevan la corriente y emiten luz visible (figura 25). Puedes pensar o investigar sobre la similitud de este fenómeno con una tormenta eléctrica.

Figura 25. Esfera de plasma del Museo de la Luz. Fuente: Felipe Cerda ML.

El reto propuesto en esta actividad consiste en comprobar que la radiación electromagnética generada por la bola de plasma puede producir algún efecto medible por un detector de radiación.

Esta actividad implica contar con un detector, que puede ser de bajo coste (p.ej., RadMon, uRADMonitor o Radiocode 102) –adquirido por el centro o colectivo– o bien puede construirse el propio dispositivo (p.ej., un contador Geiger-Müller, actividad 9).

Para ello, debes seguir la siguiente secuencia de pasos:

a.

Calibración del instrumento. Sitúa el detector alejado de la bola de plasma, de forma que puedas registrar la radiación de fondo y obtener un valor de referencia. Mide durante 5 minutos.

b.

Mediciones con el detector. Sitúa el detector a diferentes distancias de la bola de plasma (50 cm, 25 cm, 10 cm, y en contacto con la superficie esférica), registrando las medidas en cada posición durante 1 minuto. Realiza cada medida al menos tres veces para trabajar con valores promedio.

c.

Repite cada medida mientras estás tocando la esfera con la mano para generar filamentos más intensos.

Cuestiones relevantes: ¿Es posible que el dosímetro pueda estar midiendo interferencias en lugar de radiación ionizante? ¿Qué tipo de interferencias? ¿Se produjo realmente un aumento de radiación? ¿Cuáles son las principales conclusiones respecto del concepto “instrumento de medida”?

Actividad 8 Simulación: medida de radiación e influencia del blindaje

Trabajo de laboratorio/taller de tecnología en centro educativo o en espacio ciudadano

En esta actividad pondrás a prueba tus conocimientos sobre radiación. En concreto, podrás comprobar cómo distintos tipos de radiación interactúan con diferentes materiales de blindaje y cómo se detectan con un contador Geiger virtual. Sigue los pasos y utiliza el método científico para desarrollar tu experimento.

a.

Accede al simulador

Abre el simulador de detector Geiger-Müller https://www.gigaphysics.com/gmtube_lab.html Familiarízate con las fuentes radiactivas y los materiales de blindaje disponibles.

b.

Diseña tu experimento

Decide cómo vas a identificar el tipo de radiación de cada fuente. Piensa en qué variables vas a medir (tipo de radiación, distancia, tipo de blindaje) y cómo vas a organizarlas. Puedes usar las fichas adicionales del simulador para organizar tus datos y presentarlos de manera clara.

c.

Realiza las mediciones

- Coloca cada fuente radiactiva en el simulador.

- Mide la tasa de conteo a diferentes distancias y con distintos materiales de blindaje.

- Anota todos los datos en tablas para poder analizarlos.

d.

Representa los resultados

Crea gráficas sencillas (cuentas por minuto frente a tipo de blindaje) para visualizar cómo se atenúa cada radiación.

e.

Analiza y reflexiona

- Describe por escrito el procedimiento que seguiste y los datos que obtuviste.

- Interpreta tus resultados: identifica el tipo de radiación de cada fuente y evalúa su poder de penetración.

- Reflexiona sobre aplicaciones reales de la radiación (medicina, energía, medio ambiente) y la importancia de las medidas de seguridad.

Actividad 9 Construcción de un detector Geiger-Müller

Trabajo de laboratorio/taller de tecnología en centro educativo o en espacio ciudadano

A través de esta actividad puedes construir con tus propias manos un detector de radiación, en particular un detector o sensor Geiger-Müller, también llamado contador Geiger. Con este instrumento podrás explorar el mundo invisible que nos rodea y aprender, además, cómo funciona la electrónica en estos dispositivos.

Los elementos principales de los que consta este son un tubo Geiger-Müller y la correspondiente electrónica de visualización (figura 26).

El tubo Geiger-Müller está formado por un cilindro metálico que hace las veces de cátodo y que contiene un gas inerte (helio, argón, neón). En su interior incorpora un hilo metálico que actúa como ánodo. Cuando las partículas ionizantes penetran en el tubo, debido al alto voltaje establecido entre el ánodo y el cátodo, se ioniza el gas, produciendo a su vez una corriente de electrones que genera una señal eléctrica que puede ser detectada por la electrónica del sensor. De esta forma, aunque no proporciona información sobre el tipo de radiación, permite contar el número de partículas que inciden.

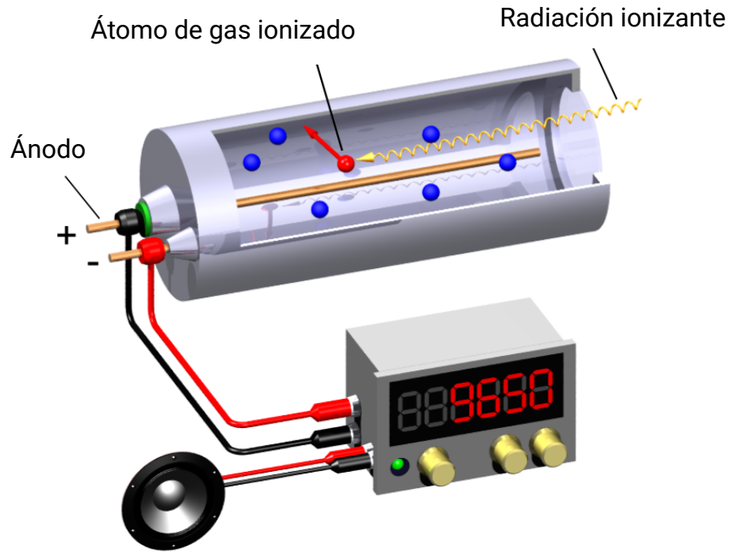


Figura 26. Esquema mostrando las partes de un contador Geiger. Fuente: Traducida de la versión original de Svjo-2 (Wikimedia Commons).

La propuesta que te presentamos a continuación es la de construcción de un detector Geiger-Müller. Entre las distintas propuestas existentes se ha seleccionado la desarrollada por Marb's lab, por formar parte de un proyecto abierto. El esquema de este contador, mostrando los elementos principales, se representa en la figura 27.

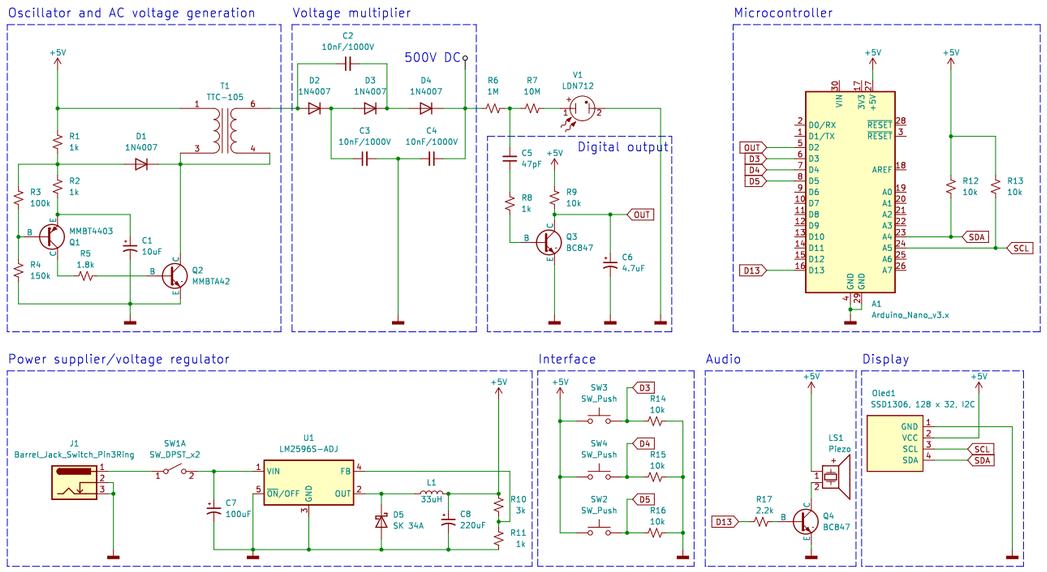


Figura 27. Esquema del contador Geiger. Fuente: Marb's lab (GitHub).

Estos elementos son los siguientes:

- Oscilador y fuente AC: genera una señal alterna de alta frecuencia a partir de la tensión de alimentación. Esta señal es necesaria para alimentar el transformador que eleva la tensión a los cientos de voltios que requiere el tubo Geiger-Müller para operar.
- Multiplicador de tensión: es un circuito que convierte la señal alterna del oscilador en corriente continua y la multiplica hasta obtener el alto voltaje necesario.
- Microcontrolador: procesa las señales de pulso que provienen del tubo Geiger cuando detecta radiación (en este caso se utilizará Arduino Nano v3 o similar).
- Fuente de alimentación: proporciona la energía eléctrica a todo el sistema.
- Interfaz: permite la interacción del usuario con el equipo.
- Audio: emite el clásico "clic" cada vez que el tubo detecta un evento radiactivo. Sirve como indicador sonoro en tiempo real de la radiación.
- Display: muestra la información procesada.
- Salida digital: enviar una señal eléctrica en formato digital cada vez que el tubo Geiger detecta una partícula ionizante.

En el vídeo Building a Geiger counter and testing different free available radioactive materials (https://www.youtube.com/watch?v=Xz30onfQ6RM), puedes ver el proceso de construcción del contador Geiger. Toda la documentación necesaria para la construcción del dispositivo, programación, etc., puedes encontrarla en: https://github.com/Marbslab/Open-source-Geiger-counter/

Una vez construído el contador, puedes utilizarlo para localizar en tu hogar las zonas en las que se detecta más radiación y contrastar los valores obtenidos por el resto del grupo en una puesta en común.

Actividad 10 Midiendo la radiación gamma ambiental

Trabajo experimental y de campo

En esta ocasión tendrás que meterte en el papel de científica o científico ambientalista para lograr este reto. Vas a medir los niveles existentes de radiación gamma ambiental y analizar los resultados.

Presta mucha atención a la presentación de los materiales que va a realizar el profesorado. Si eres muy impaciente, puedes ir buscando información sobre algunos sensores (como el contador Geiger, RadMon o uRADMonitor, Radiocode 102), y cómo registrar las medidas (tiempo de muestreo, unidades de medida: µSv/h o CPM). Tendrás que formar un equipo de trabajo para organizar las distintas tareas y, en particular, compartir ideas y discutir científicamente.

Puedes utilizar una tabla similar a la siguiente para realizar los registros, realizando varias medidas (tres como mínimo) en cada ubicación, y en intervalos, por ejemplo, de 5 o 10 minutos.

Ubicación	Coordenadas	Descripción cualitativa del entorno	Altura del detector (m)	Distancia a muros (m)	Medidas (µSv/h o CPM)	Media	Desv. típica
Zona ajardinada	41°02'15"N 0°08'45"O	Suelo de tierra con vegetación	1,0	3	0,09 0,10 0,09	0,093	0,006

La descripción del entorno implica registrar variables relevantes –cualitativas y cuantitativas– que podrían influir en las medidas, tales como:

- Distancia a muros u objetos (m)
- Altura del detector sobre el suelo (m)
- Tipo de suelo (tierra, baldosa…)
- Materiales cercanos (granito, hormigón, metal…)
- Condiciones meteorológicas (lluvia, humedad alta…)
- Presencia de objetos radiactivos comunes (baldosas porcelánicas, fertilizantes, etc.)

Una vez recogidos estos datos, compáralos con el valor promedio típico de radiación ambiental (~0.1 µSv/h). Si mides en el patio o en tu calle, como a 1m de altura del suelo y lejos de muros, podrías obtener valores de unos 80 nSv/h, valor concordante con rangos urbanos/medios, los cuales no suponen ningún tipo de alarma. Si mides en el patio junto a un muro, puedes obtener valores mayores, según sean los materiales de construcción, comprobando entonces que hay materiales de construcción que pueden emitir radiación.

También puedes realizar comparaciones más específicas de acuerdo con los mapas del CSN mencionados en esta guía. ¿Hay diferencias significativas? ¿Podrían deberse a factores naturales (materiales de construcción, altura, etc.)? ¿Son valores preocupantes o están dentro de la normalidad?

Una actividad más amplia consiste en hacer un seguimiento en el tiempo, con el fin de ver si se producen cambios significativos. ¿Crees que estas acciones podrían formar parte de un proyecto de ciencia ciudadana? ¿Cómo y quién podría llevar a cabo el proyecto?

Actividad 11 Proyecto: cartografía de radiación local

Trabajo multidisciplinar

A estas alturas del proyecto ya has podido confirmar que la radiación está presente en todo nuestro entorno. En esta actividad elaborarás un mapa de radiación gamma ambiental de una zona cercana, que puede incluir distintos puntos dentro del centro educativo (por ejemplo, a diferentes alturas, próximos o alejados de muros, interiores o exteriores, etc.).

Formarás un equipo de investigación encargado de planificar las mediciones y elaborar un plan de recogida de datos.

Puedes basarte en la tabla utilizada en la actividad anterior (medida de la radiación gamma ambiental) para registrar las variables relevantes —como la distancia a muros, el tipo de suelo o las condiciones meteorológicas— y ampliar la información con los siguientes campos para coordinar mejor el trabajo en grupo:

Miembro responsable	Ubicación/ descripción del punto	Hora	Coordenadas (lat., long.)	Medidas (μSv/h o CPM)	Media	Desv. típica

Realiza también fotografías o pequeños vídeos de las zonas de medición. Servirán como evidencia y podrás incorporarlas a informes, presentaciones o pósteres.

Cuando dispongas de los datos, realiza un análisis en hoja de cálculo (por ejemplo, Excel o LibreOffice Calc) y elabora gráficos que representen los niveles de radiación registrados.

Finalmente, prepara un póster o informe científico, con la orientación del profesorado, incluyendo tus conclusiones y una reflexión sobre la importancia del estudio y la prevención de riesgos.

Si es posible, organiza una exposición final para compartir y debatir los resultados, como en un congreso científico, fortaleciendo tus competencias comunicativas y de trabajo en equipo.

Referencias

Referencias sobre radiación

Angulo, E. (2024). “Irene Joliot-Curie y la radiactividad artificial”. En *Alfa*, *57*, CSN. https://www.csn.es/-/irene-joliot-curie-y-la-radiactividad-artificial

Depois, J. F. B., Allain, E., Berthelot, N., Darley, G., Cassandre, D., Helene, F., ... y Trompier, F. (2021). OpenRadiation: a collaborative project for radioactivity measurements in the environment by the public. En *International Congress of the International Radiation Protection Association, IRPA*. https://hal.science/hal-03221232v1/file/0000171177_001.PDF

Chang, W. Y., y Rosenblum, S. (1945). A Simple Counting System for Alpha-Ray Spectra and the Energy Distribution of Po Alpha-Particles. *Physical Review, 67(7-8), 222*. https://carlwillis.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/09/physrev-67-222.pdf

Comisión Europea (2019). *European Atlas of Natural Radiation*. https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation

Consejo de Seguridad Nuclear (2009). *Radiación y protección radiológica radiológica. Guía didáctica para centros de enseñanza primaria*. https://www.csn.es/documents/10182/914813/OFC-04-05%20Radiación%20y%20protección%20radiológica%20(Guía%20didáctica%20para%20centros%20de%20Educación%20Primaria)

Consejo de Seguridad Nuclear (2010). *Radiación y protección radiológica radiológica. Guía didáctica para centros de enseñanza secundaria*. https://www.csn.es/documents/10182/914813/OFC-04-06%20Radiación%20y%20protección%20radiológica%20(Guía%20didáctica%20para%20Educación%20Secundaria)

Consejo de Seguridad Nuclear (2010). *Dosis de radiación*. https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiación

Consejo de Seguridad Nuclear (2012). *Protección radiológica*. https://www.csn.es/documents/10182/914805/Protección%20radiológica

Consejo de Seguridad Nuclear (2016). *Las radiaciones en la vida diaria*. https://www.csn.es/documents/10182/914805/Las%20radiaciones%20en%20la%20vida%20diaria

Consejo de Seguridad Nuclear. *Seguridad ciudadana*. https://www.csn.es/documents/10182/914801/FDE-01.07+Seguridad+ciudadana+%28P%C3%B3ster%29/f7c82f6d-843d-49e4-9aa9-70a0a2fa6ea2

Consejo de Seguridad Nuclear. *Protección radiológica*.https://www.csn.es/proteccion-radiologica

Consejo de Seguridad Nuclear (2000). *Proyecto MARNA: Mapa de radiación gamma natural*. https://www.csn.es/documents/10182/27786/INT-04-02%20Proyecto%20Marna.%20Mapa%20de%20radiación%20gamma%20natural

Consejo de Seguridad Nuclear. *Sistema de vigilancia ambiental en España*. CSN. https://www.csn.es/sistema-de-vigilancia-ambiental-en-espana

Consejo de Seguridad Nuclear. Red de Vigilancia Radiológica de Ámbito Nacional (REVIRA). https://www.csn.es/red-de-vigilancia-radiologica-de-ambito-nacional-revira

El-Mageed, A.A.A., Elkhouli, A.E., Abohany, A.A. et al. Gene selection via improved nuclear reaction optimization algorithm for cancer classification in high-dimensional data. *J Big Data* 11, 46 (2024). https://doi.org/10.1186/s40537-024-00902-z

Fojtíková, I., Helebrant, J., y Kuča, P. (2019). RAMESIS project: Collaboration with schools and institutions on the building of a citizen monitoring network. *Radiation Protection Dosimetry*, 186(2-3), 288-290. https://doi.org/10.1093/rpd/ncz219

Grossi, C., Camp, A., Alamany, B., Duch, M.A., y Vargas, A. (2025). Informe E2.1: *Estado del arte de dispositivos de medida utilizados en las redes de ciencia ciudadana*. Proyecto Openred.

Alamany Riera, B. (2024). *Caracterització de detectors de baix cost per a la mesura de la radioactivitat ambiental* [Treball de Fi de Grau, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons. https://hdl.handle.net/2117/428649

Helebrant, J., y Kuca, P. (2019). Support to citizen radiation monitoring of radioactivity in the Czech Republic - project RAMESIS. *Radiation Protection Dosimetry*, *186* (2-3), 291-295. https://doi.org/10.1093/rpd/ncz220

International Commission on Radiological Protection. (2003). *Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (wR) (ICRP Publication 92). Annals of the ICRP, 33*(4).

Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons. https://phyusdb.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/03/radiationdetectionandmeasurementbyknoll.pdf

Organismo Internacional de Energía Atómica. *Escala Internacional de Sucesos Nucleares y Radiológicos (INES)*. https://www.iaea.org/es/recursos/escala-internacional-de-sucesos-nucleares-y-radiologicos-ines

Salas Collantes, R., y Rey del Castillo, P. (2004). *El sistema de vigilancia radiológica ambiental en España*. Revista de Sanidad Ambiental, 4(2), 187-197. https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/182

Valentin, J. (2003). Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (wR) ICRP Publication 92: approved by the Commission in January 2003. *Annals of the ICRP, 33*(4), 1-121. https://doi.org/10.1016/S0146-6453(03)00024-1

Referencias sobre ciencia ciudadana

Cooper, C. (2018). *Ciencia ciudadana: Cómo podemos todos contribuir al conocimiento científico*. Ed. Grano de Sal.

Fundación Ciencia Ciudadana y Universidad Autónoma de Chile. (2017). *Guía para conocer la Ciencia Ciudadana*. Ediciones Universidad Autónoma de Chile. https://ediciones.uautonoma.cl/index.php/UA/catalog/book/29

Haklay, M., Motion, A., Balázs, B., Kieslinger, B., Greshake Tzovaras, B., Nold, C., Dörler, D., Fraisl, D., Riemenschneider, D., Heigl, F., Brounéus, F., Hager, G., Heuer, K., Wagenknecht, K., Vohland, K., Shanley, L., Deveaux, L., Ceccaroni, L., Weißpflug, M., …, y Wehn, U. (2020). *ECSA's Characteristics of Citizen Science. Zenodo.* https://doi.org/10.5281/zenodo.3758668

Heigl, F., Dörler, D., Bartar, P., Brodschneider, R., Cieslinski, M., Ernst, M., Fritz, S., Krisai-Greilhuber, I., Hager, G., Hatlauf, J., Hecker, S., Hübner, T., Kieslinger, B., Kraker, P., Krennert, T., Oberraufner, G., Paul, K. T., Tiefenthaler, B., Vignoli, M., … Ziegler, D. (2018). Qualitätskriterien für Citizen Science Projekte auf Österreich forscht (1.0). *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.1161922

Heigl, F., Kieslinger, B., Paul, K.T., Uhlik, J., Frigerio, D. and Dörler, D. (2020) 'Co-Creating and Implementing Quality Criteria for Citizen Science', *Citizen Science: Theory and Practice*, 5(1), 23. https://doi.org/10.5334/cstp.294

Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (INTEF). *Guías - La Aventura de Aprender*. Ministerio de Educación y Formación Profesional. https://laaventuradeaprender.intef.es/guias/

Oltra, A., Piera, J., y Ferrando González, L. (2022). *Breve guía sobre Ciencia Ciudadana*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). https://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/15221

Pelacho, M., Ruiz, G., Sanz, F., Tarancón, A., & Clemente-Gallardo, J. (2021). Analysis of the evolution and collaboration networks of citizen science scientific publications. *Scientometrics*, 126(1), 225–257. https://doi.org/10.1007/s11192-020-03724-x

Pelacho, M., Serrano Sanz, F., Lucea, V., Álvaro, J., Díez Ojeda, M., Rabadán-González, J., Kubus, R., Sanz García, F., Moreno, L., Varela, O., Arboleya, A. M., Arias, R., Barba, J., Bautista-Puig, N., Bielsa, J., Blanco-Aguiar, J. A., Burbano, J., Canepa, A., Castejón, F., … Vallés Sales, A. (2024). Impactos-CC: *Conocer y potenciar los impactos de la ciencia ciudadana en España. Informe final* [Corrección 2]. *Zenodo*. https://doi.org/10.5281/zenodo.14925892

Queiruga-Dios, M. Á., López-Iñesta, E., Diez-Ojeda, M., Sáiz-Manzanares, M. C., y Vázquez Dorrío, J. B. (2020). Citizen science for scientific literacy and the attainment of sustainable development goals in formal education. *Sustainability, 12*(10), 4283. https://doi.org/10.3390/su12104283

Sanz-García, F., Pelacho, M., Woods, T., Fraisl, D., See, L., Haklay, M., y Arias, R. (2021). Finding What You Need: A Guide to Citizen Science Guidelines. En K. Vohland, A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, … y K. Wagenknecht (Eds.), *The Science of Citizen Science* (pp. 419-437). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_21

Sanz García, F., y Pelacho, M. (2021). *Cómo hacer ciencia ciudadana*. La Aventura de Aprender – Instituto Nacional de Tecnologías Educativas y de Formación del Profesorado (INTEF). https://laaventuradeaprender.intef.es/wp-content/uploads/2023/07/Guia_Como-hacer-ciencia-ciudadana.pdf

Serrano Sanz, F., Holocher-Ertl, T., Kieslinger, B., Sanz García, F., Silva, C.G. (2014). *White Paper on Citizen Science for Europe*, Socientize Consortium. https://ec.europa.eu/futurium/en/content/white-paper-citizen-science.html

Shirk, J. L., Ballard, H. L., Wilderman, C. C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., ... y Bonney, R. (2012). Public participation in scientific research: A framework for deliberate design. *Ecology and Society*, 17(2), 29. http://dx.doi.org/10.5751/ES-04705-170229

Vohland, K., Land-Zandstra, A., Ceccaroni, L., Lemmens, R., Perelló, J., Ponti, M., Samson, R., & Wagenknecht, K. (Eds.). (2021). *The science of citizen science*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4

Otros documentos, sitios web y enlaces consultados

BBC, Redacción (2023) "¿Qué contienen las aguas residuales de la planta nuclear de Fukushima que Japón comenzó a verter en el océano?", https://www.bbc.com/mundo/articles/c28p8jw17j9o.

CEDECOM, Topics. "Radiación y Salud": https://www.youtube.com/watch?v=9WTT-Nx-0XaQ

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. *Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas* (CIEMAT). https://www.ciemat.es

Citizen Science: *Theory and Practice*. https://theoryandpractice.citizenscienceassociation.org/

Cloud chamber. Do-it-yourself manual. https://scoollab.web.cern.ch/sites/default/files/documents/SCoolLAB_CloudChamber_DIYManual_2018_v6.pdf

Consejo de Seguridad Nuclear. (2024, 4 de enero). R*esolución de 22 de diciembre de 2023, por la que se publica el convenio con la Fundación Ibercivis, para la ejecución del proyecto de innovación "Desarrollo de una red de ciencia ciudadana para la medida de la radiación gamma ambiental en España" (Openred)* (BOE núm. 4, pp. 1517–1542). https://www.boe.es/eli/es/res/2023/12/22/277

Consejo de Seguridad Nuclear. Funcionamiento de una cámara de niebla. https://www.youtube.com/watch?v=Sj3LK5XZ3Lo

¿Cómo funciona la cámara de niebla? https://nuledo.com/es/

Construcción de cámara de niebla. https://gifna.unizar.es/cloudz/wp-content/uploads/2012/07/montaje.pdf

Díaz Alcalá, L. A., Cázares Ramírez, R. I., y Sociedad Nuclear Mexicana. (2020). *Prototipo de un detector Geiger-Müller para su implementación en una estación meteorológica. En 30 years of nuclear power in Mexico (31st SNM Annual Congress)*, Ciudad de México, México. Sociedad Nuclear Mexicana. https://inis.iaea.org/records/qcs9e-fn235

DIY Alpha Particle Spark Detector. https://www.imagesco.com/articles/geiger/alpha_particle_spark_detector_p1.html

El Lanzallamas (2014). "¡Aquellos tiempos del Radium…!" https://ellanzallamas.com/2014/08/27/aquellos-tiempos-del-radium/.

European Citizen Science Association. https://www.ecsa.ngo/

EU-Citizen.Science consortium. *EU-Citizen. Science platform*. https://citizenscience.eu/

Fabricación de una cámara de niebla casera para la observación de rayos cósmicos. https://fciencias.ugr.es/images/stories/documentos/semanaCiencia/camara.pdf

Fermi Gamma-ray Space Telescope. https://science.nasa.gov/mission/fermi/

Fundación Ibercivis. *Fundación Ibercivis - Ciencia ciudadana*. https://ibercivis.es/

Fundación Ibercivis. *Observatorio de la Ciencia Ciudadana en España: Home observatorio*. https://ciencia-ciudadana.es/sobre-el-observatorio/

Fundación Ibercivis. *Educación*. https://ciencia-ciudadana.es/area-de-conocimiento/educacion/

Gigaphysics. Geiger-Müller Tube. https://www.gigaphysics.com/gmtube_lab.html

Guazzaroni, Cesar. (2016). Construcción de un dispositivo para la detección de radiación alfa. https://www.youtube.com/watch?v=yovQD-BoAOI8&t=1s

High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.). https://www.mpi-hd.mpg.de/HESS/pages/about/

Information is Beautiful. Radiation Dosage Chart. https://informationisbeautiful.net/visualizations/radiation-dosage-chart/

Macho-Stadler, Marta. (2020). Las chicas del radio y los riesgos de la radiación. *National Geographic Society*. Historia. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/chicas-radio-y-riesgos-radiacion_15809

Marb's lab. "Building a Geiger counter and testing different free available radioactive materials" https://www.youtube.com/watch?v=Xz30onfQ6RM

Nuclear Power (s.f). *Equivalent Dose*. https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-protection/equivalent-dose/

Organización de Naciones Unidas. *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/

Planète Sciences. *OpenRadiation: mesurez vous-même la radioactivité!* https://www.planete-sciences.org/enviro/sciences-participatives/openradiation-mesurez-vous-meme-la-radioactivite?lang=fr

Proyecto Openred. "Dispositivos de Openred: reacciones ante la bola de plasma" https://www.youtube.com/watch?v=TTtiKmMuQuA

Proyecto Openred. https://open-red.es

Publicaciones científicas de proyectos en Zooniverse. https://www.zooniverse.org/about/publications

¿Qué es ciencia ciudadana? SEO/BirdLife. https://seo.org/ciencia-ciudadana/https://seo.org/ciencia-ciudadana/.

Lista de figuras y créditos

Fig.	Título y fuente	Pág.
1	Principales conexiones de la Unidad Didáctica con los ODS. Elaboración propia.	11
2	Espectro electromagnético: conjunto de radiaciones electromagnéticas incluyendo su longitud de onda y frecuencia. Fuente: adaptada de International Atomic Energy Agency (IAEA). https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion	15
3	Radiación ambiental y su procedencia. Fuente: Adaptada de *European Atlas of Natural Radiation*, Comisión Europea (2019). https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation	16
4	Zona del espectro electromagnético correspondiente a radiación electromagnética no ionizante. Fuente: parte de la figura 2, adaptada de International Atomic Energy Agency (IAEA). https://www.iaea.org/es/newscenter/news/que-es-la-radiacion	17
5	Desintegración alfa de un núcleo de uranio-238 en un núcleo hijo de torio-234. Elaboración propia.	19
6	Desintegración alfa de un núcleo de uranio-238 en un núcleo hijo de torio-234 y desexcitación posterior de este con emisión de radiación gamma. Elaboración propia.	20
7	Representación gráfica de procesos de desintegración beta (negativa y positiva). Elaboración propia.	21
8	Reacción de fisión nuclear en cadena. Fuente: El-Mageed et al. (2024).	22
9	Capacidad de penetración de distintos tipos de radiación. Elaboración propia.	23
10	Tres factores clave para la protección radiológica: tiempo, distancia y blindaje. Fuente: adaptada de la infografía del CSN: Seguridad Ciudadana https://www.csn.es/documents/10182/914801/FDE-01.07+Seguridad+ciudadana+%28P%C3%B3ster%29/f7c82f6d-843d-49e4-9aa9-70a0a2fa6ea2	29
11	Curva cualitativa de la respuesta de un gas en un detector de radiación. Fuente: adaptado de Physics OpenLab, X Ray Proportional Counter. https://physicsopenlab.org/2017/07/23/x-ray-proportional-counter-2/	37
12	Esquema de contador centelleador que incluye el material centelleador (scintillator) acoplado a tubo fotomultiplicador. Fuente: Stanford University: Scintillator Materials Group. https://web.stanford.edu/group/scintillators/scintillators.html	38
13	Partes del dispositivo Radiacode 102. Fuente: sitio web de RadiaCode., https://www.radiacode.com/products/radiacode-102?variant=26f3faf9e2c8	39
14	Esquema de fotodiodo PIN. Fuente: Physics OpenLab: X Ray Spectroscopy with PIN Photodiode. https://physicsopenlab.org/2017/06/22/x-ray-spectroscopy-with-pin-photodiode/	40
15	Fuentes que afectan a las medidas de un detector de radiación ambiental. Fuente: figura adaptada del Gráfico de Peter Bossew del *European Atlas of Natural Radiation*. Comisión Europea, (2019). https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Atlas-of-Natural-Radiation	41
16	Dispositivo Gamma Tracer Spider para la medida de radiación en situaciones de emergencia. Fuente: Bertin Technologies: Environmental Radiation Monitoring Systems. https://www.bertin-technologies.com/product/environmental-radiation-monitoring/gammatracer-spider/	42

17	Burbujas de Fermi: Fuente: *NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration*. https://science.nasa.gov/mission/fermi/	43
18	Los cinco telescopios del sistema High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.), en Khomas (Namibia). Fuente: Klepser at English Wikipedia, CC BY-SA 3.0. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=61288242	44
19	Algunos detectores analizados en OpenRed: doble tubo Geiger (GMC-500+), tubo Geiger BGeigieZen (SafeCast), tubo Geiger RIUMGM (OpenRadiation) y cristal centelleador (RadioCode 102). Fuente: Ibercivis.	45
20	Distribución del número de proyectos incluidos en el portal SciStarter de acuerdo con su temática. Fuente: European Commission (2019). Originalmente pero ya no disponible en: Open Science monitor https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/strategy/goals-research-and-innovation-policy/open-science/open-science-monitor/data-open-collaboration_en. Actualmente disponible en Pelacho et al. (2021)	53
21	Mapas que reflejan los cientos de millones de mediciones realizadas por participantes en Safecast en más de 100 países. Fuente: SafeCast. https://map.safecast.org/?y=36.14&x=136.56&z=6&l=0&m=0	58
22	Esquema de la red de trabajo RAMESIS. Traducida de la versión original de Jan Helebrant, CC BY-SA. https://www.flickr.com/photos/96541566@N06/51012590251/in/abum72157718074988738	59
23a /23b	Mapas que muestran las diferentes mediciones realizadas por los participantes de Openradiation. Fuente: Openradiation. https://www.openradiation.org/index.php/fr	60 /61
24	Trazas visibles en la cámara de niebla procedentes de radiación ionizante. Fuente: Nuledo. Creative Commons CC-BY-SA 4.0. https://nuledo.com/es/	69
25	Esfera de plasma del Museo de la Luz. Fuente: Felipe Cerda ML. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Esfera_de_plasma_del_Museo_de_la_Luz.jpg	74
26	Esquema mostrando las partes de un contador Geiger. Fuente: Traducida de la versión original de Svjo-2 (wikimedia commons). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Geiger-Muller-counter-en.png	77
27	Esquema del contador Geiger. Fuente: Marb's lab, Geiger counter schematics. https://github.com/Marbslab/Open-source-Geiger-counter/	77

La presente guía, *Radiación gamma. Usos y protección ciudadana*, busca proporcionar a cualquier persona interesada –estudiantes y profesorado de Bachillerato o Formación Profesional, integrantes de asociaciones diversas, personas curiosas de cualquier edad— los conocimientos esenciales sobre la radiación ionizante y la protección radiológica. Su objetivo es contribuir a la formación de una ciudadanía informada, capaz de entender qué es la radiación, dónde se encuentra, cómo se mide y cómo gestionarla de manera crítica y responsable.

Este material forma parte del proyecto Openred, una iniciativa coordinada por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y la Fundación Ibercivis, en colaboración con la Universidad de Zaragoza, la Universitat Politècnica de Catalunya - BarcelonaTech (UPC), la Universidad de Cantabria (UC) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (Ciemat). El objetivo de Openred es potenciar la cultura ciudadana sobre la radiación y promover la creación de una red de medición de radiación gamma ambiental distribuida por todo el territorio, mediante la participación ciudadana. Para lograrlo, es fundamental que todos tengamos conocimientos claros y rigurosos sobre este tema y a este objetivo se orienta esta guía.

Además de la comunidad educativa, también múltiples asociaciones, museos, centros juveniles, ferias de ciencia o entidades locales pueden utilizar este material para promover actividades divulgativas y talleres científicos. Con los conocimientos adquiridos, cualquier persona puede realizar acciones hacia una mayor implicación social: comprender mejor la información científica, tomar decisiones fundamentadas en cuestiones de seguridad y salud, o incluso participar en iniciativas de ciencia ciudadana.

En definitiva, esta guía invita a descubrir, reflexionar y actuar. Conocer la radiación es también aprender a protegernos, a cuidar del medio ambiente y a involucrarnos en aquello que es de interés común. La educación es una herramienta de fortalecimiento y cohesión social, y este documento quiere contribuir a que esa educación llegue a todas las personas.

Te damos la bienvenida a este recorrido por el mundo de la radiación gamma. Esperamos que lo disfrutes, que avive tu curiosidad y que te anime a seguir aprendiendo y participando activamente en la construcción de una sociedad más informada, segura y comprometida.

CSN CONSEJO DE SEGURIDAD NUCLEAR
ibercivis gente haciendo ciencia
Open red