

METODOLOGÍAS ANALÍTICAS PARA IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE RADIONÚCLIDOS EN ALIMENTOS

Elsa Ruth Arias-Patrón^{†}, Iván Camilo Sánchez-Barrera[†]*

*[†]Grupo de Evaluación de Riesgos en Inocuidad de Alimentos, Dirección de Vigilancia y Análisis del Riesgo en
Salud Pública. Instituto Nacional de Salud. E mail: eariasp@ins.gov.co*

Recibido: 28-10-2025 / Revisado: 15-11-2025 / Aceptado: 25-11-2025 / Publicado: 30-12-2025

RESUMEN

Un radionúclido es la forma inestable de un elemento que libera radiación a medida que se descompone. Se han realizado varios estudios con el fin de determinar las consecuencias derivadas de la exposición crónica y aguda a este tipo de sustancias radiactivas. El objetivo de este artículo es discutir las diferentes metodologías analíticas para la identificación y cuantificación de radionúclidos en alimentos. Se exponen cuáles son los principales radionúclidos de origen natural y se abordan aspectos relacionados con el impacto de dichos radioisótopos en la salud pública. Se relacionan las principales metodologías analíticas para su determinación en alimentos, así como las ventajas y desventajas de cada método analítico. Por último, se describen los hallazgos relevantes obtenidos en cuanto al análisis de radionúclidos teniendo en

cuenta la metodología empleada y el grupo de alimento estudiado.

Palabras Clave: radionúclido, isótopo, metodología analítica, alimento, espectrometría.

ABSTRACT

Analytical methodologies for identification and quantification of radionuclides in food

A radionuclide is an unstable form of an element that releases radiation as it decays. Studies have been conducted to determine the consequences of chronic and acute exposure to this type of radioactive substance. The objective of this article is to discuss the different analytical methodologies for the identification and quantification of radionuclides in food. The main naturally occurring radionuclides are presented and

aspects related to the impact of these radionuclides on public health are addressed. The most important analytical methodologies for their determination in food are listed, as well as the advantages and disadvantages of each analytical method. Finally, the relevant findings obtained regarding radionuclide analysis are described, considering the used methodology and the food group studied.

Keywords: radionuclide, isotope, analytical methodology, food, spectrometry.

INTRODUCCIÓN

La exposición de los seres humanos a la radiación ionizante de fuentes naturales es una característica continua e ineludible de la vida en la tierra (1). Cualquier sustancia radiactiva está compuesta por elementos cuyos núcleos atómicos experimentan transformaciones espontáneas debido a su inestabilidad. Durante este proceso de desintegración, el núcleo se convierte en otro elemento con una configuración o nivel de energía diferente, también, conocido como radionúclido, emitiendo radiaciones características. Estas radiaciones pueden consistir en partículas alfa, beta, neutrones y/o fotones de rayos X o gamma (2). De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos un radionúclido es una forma inestable de un elemento que se descompone y se vuelve más estable a medida que libera radiación ionizante (3).

Existen numerosos radionúclidos de origen natural y artificial presentes en el ambiente y en los alimentos o bebidas; es así como todos los seres están expuestos, en mayor o menor medida, a la radiación natural (4). Los radionúclidos artificiales presentes en el ambiente pueden provenir de diversas fuentes, como descargas autorizadas, lluvia radiactiva de ensayos con armas nucleares o liberaciones accidentales a gran escala. Un pequeño número de

radionúclidos producidos artificialmente también se encuentran de forma natural (5).

En Colombia se cuenta con las Resoluciones 4506 de 2013 y 3709 de 2015, en donde se establecen los niveles máximos de contaminantes en alimentos destinados al consumo humano, y se disponen los límites de radionúclidos por producto alimenticio. Estos niveles máximos se aplican a “los radionúclidos contenidos en los alimentos destinados al consumo humano que se hayan visto contaminados como consecuencia de accidentes nucleares o emergencias radiológicas. Por lo tanto, se excluyen los radionúclidos de origen natural en general (6)(7).

El Instituto de Asuntos Nucleares, el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad Nacional sede Medellín han desarrollado estudios preliminares que contemplan la determinación futura de radionúclidos en muestras de alimentos y agua (8). Barbosa y Ramos realizaron una revisión bibliográfica acerca de la determinación de polonio-210 (^{210}Po) en alimentos y agua encontrando que, para el territorio nacional, no hay publicaciones sobre este tema. Además, a la fecha no se encontraron investigaciones o estudios realizados en Colombia que relacionen las concentraciones de actividad de este tipo de analitos y que permitan hacer una comparación, con respecto a la normatividad internacional, de las actividades de concentración de isótopos radiactivos en muestras de alimentos. Dado el vacío de información, se hace importante monitorear los alimentos y agua para la determinación y cuantificación de elementos radiactivos en Colombia.

Principales radionúclidos de origen natural

Según el *Codex Alimentarius*, el potasio-40 (^{40}K), el uranio-238 (^{238}U) y sus productos de desintegración, el radio-226 (^{226}Ra) y el plomo-210 (^{210}Pb) y el torio-232 (^{232}Th) y sus series de decaimiento son los principales radionúclidos de origen

natural (9). Su presencia es prácticamente omnipresente en el ambiente y, por consiguiente, en los alimentos que pueden considerarse la principal fuente de absorción de radionúclidos lo cual conlleva a su ingreso a los tejidos corporales (10).

El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas identificó que los materiales radiactivos de origen natural pueden ser terrestres o cosmogénicos (11). La radiación terrestre se origina en la corteza y el manto de la tierra debido a la desintegración de radionúclidos primordiales (presentes desde la formación de la tierra), entre los principales se encuentran al uranio (mayoritariamente ^{238}U), ^{232}Th junto con sus productos de desintegración y ^{40}K . Por otro lado, la radiación de tipo cosmogénico, se forma por medio de la interacción de gases cósmicos con gases atmosféricos, este proceso desencadena la aparición de radioisótopos como ^3H , ^{14}C , ^7Be , ^{22}Na y ^{36}Cl (12).

Son múltiples las vías a través de las que se produce la exposición humana a los radionúclidos, siendo la cadena alimentaria una de las rutas más críticas (13). Esta ruta implica su absorción por medio de productos de los cultivos procedentes de suelos contaminados, y por consiguiente su ingreso en el cuerpo humano a través de la ingestión. En estudios recientes se ha manifestado la importancia de comprender factores como la transferencia del suelo a la planta para diversos radionúclidos, dado que se considera que esto influye significativamente en los niveles de exposición humana (5) y en la generación de posibles efectos adversos para la salud pública (14).

Impacto de los radionúclidos en la Salud

Los efectos en salud generados por la exposición prolongada a radiaciones ionizantes, provenientes de radionúclidos, están relacionados con la aparición de una amplia variedad de enfermedades, en la literatura se ha documentado desde

alteraciones celulares hasta la aparición de distintos tipos de cáncer. Investigaciones epidemiológicas recientes han destacado la evidencia que relaciona la exposición prolongada a radionúclidos con un mayor riesgo de desarrollar leucemia, cáncer de tiroides y tumores sólidos (14).

Estudios recientes sugieren que hay una relación entre la aparición de enfermedades cardiovasculares y la exposición a la radiación, se sugiere que incluso dosis bajas pueden conducir a un riesgo elevado de accidente cerebrovascular y cardiopatía (15). Además, se ha incrementado el número de casos que demostrarían los posibles efectos neurológicos, incluido el deterioro cognitivo y un mayor riesgo de enfermedades neurodegenerativas, que se asocian con la exposición a largo plazo y dosis bajas de radiación (16).

En este orden de ideas, el campo de la radiobiología ha permitido aclarar cuáles son los mecanismos por los que la radiación ionizante afecta a la salud humana a nivel celular y molecular. Estudios recientes han esclarecido el papel del estrés oxidativo, el daño del ADN y las alteraciones epigenéticas en los efectos sobre la salud inducidos por la radiación (17). Estos conocimientos han sido decisivos para la obtención de modelos de riesgo más precisos y posibles intervenciones para aminorar los efectos sobre la salud debido a la exposición a radionúclidos (18).

El objetivo de este artículo es realizar una revisión bibliográfica que relacione las diferentes metodologías analíticas para la identificación y cuantificación de radionúclidos en alimentos.

Metodología

La metodología empleada consistió en la realización de una revisión sistemática de las siguientes bases de datos científicas: *Scopus*, *Science Direct*, *Nature* y *Springer*. Se emplearon ecuaciones de búsqueda que contenían los términos: *Radionuclide*, *food*, *food safety*, *spectrometry*,

gamma, ICP, LSC, X Ray, Uranium y Potassium, utilizando los operadores booleanos AND y OR. Adicionalmente, se consultó el motor de búsqueda especializado en literatura académica Google Scholar. Para esta revisión se tuvieron en cuenta los artículos científicos publicados entre enero de 2013 y mayo de 2025.

Resultados

Como resultado de la revisión sistemática realizada en las bases de datos y motores de búsqueda mencionados se identificaron, inicialmente, 36 publicaciones en Scopus, 38 artículos de Science Direct, 2 publicaciones en Springer y 3 en la base de datos de Nature; para un total de 79 artículos científicos. Se consideraron únicamente los artículos publicados en el rango de tiempo establecido en la metodología, seleccionándose 35 publicaciones para su revisión detallada.

Consideraciones en cuanto a la preparación de la muestra

La preparación de la muestra, para la determinación de sustancias radioactivas en alimentos, es un paso crucial que antecede a la puesta en marcha del análisis, de su correcta ejecución depende el desarrollo satisfactorio del ensayo. Se evidenció que son varias las consideraciones que se deben tener en cuenta para su realización, por ejemplo, la preparación de la muestra en ocasiones puede tomar periodos de tiempo de entre 3 y 4 semanas (19).

El tratamiento previo de la muestra incluye actividades como retirar tanto el polvo como la contaminación de la superficie y descartar partes no comestibles (20). En el caso de muestras vegetales, es posible retirar la contaminación mediante el lavado con agua (21). Dependiendo del radioisótopo de interés y de la naturaleza del alimento se pueden tener diversos tiempos de secado, estos pueden variar desde 14 a 72 horas y dependen de la temperatura a la que se someta la muestra (22).

Se utilizan técnicas de secado, trituración y tamizado para lograr la homogenización de la de la muestra. Las cenizas obtenidas luego del proceso de secado y homogenización son dispuestas de manera separada con el fin de promover el equilibrio que conlleve a la conversión de las sustancias radioactivas; para lograr un equilibrio entre el radio y el bismuto y evitar la desintegración del radio en gas radón, se necesitan de 21 a 24 días de aislamiento; y para convertir el radón en plomo y bismuto, se requiere un mes de aislamiento (22).

Metodologías para el análisis de radionúclidos en alimentos

La determinación y cuantificación de niveles de radionúclidos en muestras de alimentos ha permitido conocer de manera precisa la radioactividad medioambiental (23). Son numerosas las metodologías analíticas utilizadas para detectar y cuantificar con precisión radionúclidos en productos alimenticios. Entre las más destacadas se encuentra la espectrometría de rayos gamma, la espectrometría de masas con fuente de ionización por inducción de plasma (ICP-MS) y la espectrometría de rayos X de dispersión de energía, entre otras. A continuación, se describe el fundamento y ventajas de cada una de estas técnicas radioanalíticas.

- Espectrometría de rayos gamma

La mayoría de los radionúclidos se transforman en productos de desintegración estables lo cual conlleva a la posterior emisión de radiación gamma. La espectrometría de rayos gamma es una herramienta específica y es utilizada tanto para identificar mediante análisis cualitativo, como para cuantificar radioisótopos emisores de rayos gamma. Hoy en día, es una de las técnicas más potentes en el análisis de radionúclidos. Un sistema típico de espectrometría de rayos gamma incluye un detector que convierte en impulsos eléctricos los fotones gamma, componentes electrónicos para procesar estas señales y sistemas de almacenamiento, procesamiento y visualización de datos (24).

La Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) ha establecido la metodología ISO 19581:2017 para cuantificar rápidamente la concentración de actividad de radionúclidos emisores de radiación gamma, como ^{131}I , ^{132}Te , ^{134}Cs y ^{137}Cs , en muestras sólidas o líquidas mediante espectrometría de rayos gamma con detectores de centelleo. Este método de prueba puede utilizarse para la medición de cualquier matriz ambiental, por ejemplo, muestras de alimentos y piensos, así como materiales o productos industriales debidamente acondicionados (25).

Algunas de las ventajas del uso de la espectrometría de rayos gamma radican en la preparación de la muestra, la cual es simple, lo cual implica que en muchos de los casos un procedimiento de separación radioquímica no es requerido para el procesamiento de la muestra. Además, los datos obtenidos por el sistema de detección son adecuados para su tratamiento informático y, por tanto, apropiados para el diseño de sistemas automáticos de análisis (24).

- Contadores de centelleo

La metodología de análisis de centelleo líquido (LSC, por sus siglas en inglés) es, desde 1950, una de las herramientas experimentales para el análisis cuantitativo de radionúclidos. Esta técnica incluye principalmente el análisis de radionúclidos emisores de partículas alfa y beta, pero también pueden incluir radioisótopos que emiten radiación gamma, así como átomos que se desintegran mediante la emisión de radiación α (26).

La técnica de recuento por centelleo líquido consiste en colocar la muestra radioactiva en un recipiente de vidrio o plástico, llamado, vial de centelleo, y añadir un solvente especial de centelleo con flúor orgánico disuelto. El disolvente aromático absorbe la mayor parte de la energía de la partícula beta. La energía de excitación del disolvente se transfiere entonces a las moléculas del centelleador (flúor), que, al desexcitarse, emiten fotones de luz visible. La intensidad de

los fotones de luz se detecta mediante un tubo fotomultiplicador, que convierte los fotones de luz en un flujo de electrones y amplifica el pulso eléctrico que es cuantificado por un contador (26).

Esta metodología es ampliamente descrita en el procedimiento ISO 11704:2018 que contempla la determinación de la concentración de actividad alfa y beta para radionúclidos emisores de radiaciones alfa y beta mediante LSC. La medición de la actividad bruta alfa y beta constituye un análisis de cribado para garantizar que no se superen los niveles de referencia específicos de emisores alfa y beta. El método abarca radionúclidos no volátiles por debajo de 80°C , ya que algunos radionúclidos gaseosos o volátiles, como radón y yodo radiactivo, pueden perderse durante la preparación de la fuente. El método es aplicable para analizar muestras de agua potable, agua de lluvia, agua superficial y subterránea, así como agua de refrigeración, agua industrial y aguas residuales domésticas e industriales, después de un muestreo y una preparación adecuada de la muestra de prueba, por ejemplo, mediante filtración cuando sea necesario y teniendo en cuenta la cantidad de material disuelto en el agua (27).

Una de las desventajas de la metodología analítica de centelleo líquido es el tiempo requerido para su realización, pero es más sensible que la espectrometría gamma (10).

- Espectrometría de masas con fuente de ionización de plasma (ICP-MS)

Como consecuencia de la diferencia en su masa, es posible distinguir unos isótopos de otros por medio del uso de espectrometría de masas (28). La espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) es una metodología analítica que se emplea para determinaciones elementales con el fin de analizar los isótopos naturales más abundantes de cada elemento. Una ventaja destacable de esta técnica analítica radica en que su límite de detección instrumentales igual o inferior a la parte por trillón-ppt

(10 –12). Además, producto del uso de esta metodología se obtiene información precisa sobre la concentración y la composición elemental mediante un análisis rápido, comparándola con al menos un estándar (29).

Aunque esta metodología analítica puede determinar contaminación radioactiva de muestras de alimentos por presencia de plutonio, americio y neptunio, de manera simultánea (19), no cuenta aún con un procedimiento ISO para la determinación de radioisótopos en muestras de alimentos y piensos.

Esta metodología se caracteriza por ser una técnica robusta y fácil de usar para el análisis de Torio y Uranio. Sin embargo, uno de los factores más problemáticos que afectan tanto la sensibilidad como la precisión son las interferencias iónicas (30). Además, radionúclidos como el ^{226}Ra , exhiben dificultad para su determinación por consecuencia de su alta actividad específica (31).

- Espectrometría de partículas alfa

La Espectrometría de partículas Alfa es una técnica indispensable en los laboratorios de radiología para el análisis de radionúclidos de origen natural (31). Esta técnica radioanalítica permite identificar y cuantificar radioisótopos, basándose en la medición de la energía de las partículas alfa emitidas por medio de la interacción de estas con un detector semiconductor, que produce un pulso eléctrico proporcional a la energía de la partícula (32).

El método ISO 23548:2024 describe el procedimiento para la determinación de radionúclidos emisores de partículas alfa en diversos tipos de matrices (agua, alimentos, aire, suelos y muestras biológicas). Este método de prueba puede utilizarse para determinar la actividad específica o la concentración de actividad de muestras que contenga radionúclidos emisores alfa como ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{229}Th , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{232}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am o $^{243+244}\text{Cm}$. Es importante destacar que este ensayo puede

utilizarse para medir niveles muy bajos de actividad, uno o dos órdenes de magnitud inferiores a los niveles naturales habituales de radionúclidos emisores alfa (33).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, en el caso de metodologías para la determinación de radionúclidos emisores alfa o beta, se requieren etapas previas de separación química para eliminar interferencias. Esto hace que sea necesario recurrir a técnicas más específicas como contadores de centelleo, en las etapas preliminares de este análisis (34).

- Espectrometría de fluorescencia de rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica analítica no destructiva que se basa en la excitación de los átomos presentes en una muestra mediante un haz de rayos X incidente. Esta excitación provoca la ionización de las capas electrónicas internas, lo que da lugar a una reorganización electrónica y a la emisión de radiación secundaria (fluorescencia) en forma de rayos X característicos (35). La energía de estos fotones emitidos es específica para cada elemento químico, mientras que la intensidad del pico correspondiente se correlaciona con su concentración en la muestra, esto permite su identificación cualitativa (36).

Dado que esta técnica analítica no cuantifica de manera directa la actividad de radioisótopos, es común que sea usada de manera inicial para determinar presencia de elementos específicos y que luego se combine con otras metodologías como ICP-MS o espectrometría gamma, con el fin de determinar la actividad específica de la muestra de interés.

Hallazgos relevantes en el análisis de radionúclidos en alimentos

Producto de la revisión bibliográfica realizada fue posible encontrar investigaciones realizadas a diferentes grupos de alimentos por medio de las técnicas analíticas citadas en el apartado anterior. A continuación, se destacan algunos hallazgos.

Ballesteros y colaboradores emplearon la espectrometría de rayos gamma para analizar un total de 2200 muestras de frutas, cereales, vegetales, leche, carne, huevos y pescado provenientes de cooperativas agrícolas y pequeños productores de la Comunidad Valenciana en España. Se encontró ^{40}K en todas las muestras y se detectaron actividades de concentración de ^7Be en muestras de lechugas, coles, uvas y albaricoques sin pelar (23).

Por su parte, esta metodología analítica fue usada en 2022 por Rosa y colaboradores para determinar las actividades de concentración de la serie del Uranio y del Torio mediante la evaluación de radionúclidos de origen natural en 82 muestras de alimentos provenientes de mercados locales de la ciudad *Poços de Caldas* ubicada en el suroeste brasilero, encontrándose altas actividades de concentración para ^{210}Pb en frijól y sal, ^{210}Po en pescado, así como ^{226}Ra y ^{228}Ra en nueces y semillas (37).

De acuerdo con los estudios dirigidos por *Dell'Oro* y colaboradores, la metodología LSC es eficaz para la detección de partículas beta, como el estroncio 90 (^{90}Sr), estroncio 89 (^{89}Sr) y tritio 90 (^9Y). Su detección y cuantificación en muestras ambientales y de alimentos, especialmente en la leche, que contiene grandes cantidades de calcio es relevante (38), toda vez que el estroncio radiactivo es fácilmente absorbido por los seres humanos y puede entrar al cuerpo a través de la cadena alimenticia, esto debido a la similitud química que tiene frente a elementos biológicos como el calcio (39).

El Centro Nacional de Referencia para la Detección de Radiactividad en Piensos y Alimentos de Italia, desarrolló un método analítico para la determinación de ^{90}Sr en leche mediante LSC. Este método fue validado para detectar niveles bajos de actividad después de alcanzar el equilibrio de ^{90}Y , el producto de desintegración de ^{90}Sr , y se aplicó en programas

de vigilancia y rutina para detectar radiocontaminación en muestras de leche de vaca, cabra y oveja (40).

Por otra parte, de acuerdo con la investigación realizada por Hofmann y colaboradores a 200 alimentos estudiados, teniendo en cuenta hábitos dietarios de la población alemana, las verduras de hoja verde, como la col rizada, tienen una gran superficie de contacto en sus hojas y además permanecen expuestas a la deposición atmosférica de radionúclidos durante toda la temporada de crecimiento, esto condujo a que el grupo de vegetales arrojará el valor más elevado para la determinación de ^{210}Pb mediante la metodología analítica de contadores de centelleo (41).

En el Reino Unido, se desarrolló un método utilizando ICP-MS con nebulización ultrasónica y cromatografía iónica para la determinación de 239 Plutonio (^{239}Pu) en alimentos. Este método permitió obtener datos sobre la contaminación por plutonio en alimentos en un plazo de 3 horas desde la recepción de la muestra, sin comprometer los límites de detección ni la precisión en comparación con los métodos tradicionales de conteo (42).

De manera similar, investigadores japoneses desarrollaron un método rápido para cuantificar el estroncio radiactivo (^{90}Sr) en alimentos frescos utilizando una técnica denominada "cascade-ICP-MS" con extracción en fase sólida en línea. Este enfoque permitió detectar, con tiempos de análisis de aproximadamente 22 minutos, ^{90}Sr en 12 tipos de alimentos frescos, como manzanas, uvas, espinacas y arroz, con un límite de detección de 2.2 Bq/kg. Los resultados fueron comparables con los obtenidos mediante métodos radiométricos tradicionales, pero con una reducción significativa en el tiempo de análisis, que en los métodos convencionales podía ser de hasta 20 días (43).

Un estudio realizado en Corea del Sur evaluó los niveles de los isótopos de plutonio (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu) y estroncio-90

(^{90}Sr) en mariscos domésticos. Se utilizó un método basado en espectrometría de rayos alfa y contador de centelleo líquido. Los resultados indicaron que los niveles de estos radionúclidos estaban por debajo de los límites de detección, con límites de detección de 0.01 Bq/kg para los isótopos de plutonio y 1 Bq/kg para el ^{90}Sr (34).

Trotta y colaboradores desarrollaron un método radiocrómico para la determinación simultánea de isótopos emisores de alfa de actínidos como torio, uranio, plutonio, americio y curio en matrices agroalimentarias y agua. Se utilizó una resina cromatográfica comercial reutilizada, logrando rendimientos químicos superiores al 75 % en matrices sólidas y más del 90 % en agua. El método mostró alta precisión y exactitud, en comparación a metodologías similares (44).

Finalmente, en 2024 se llevó a cabo una investigación, en la región de Kurdistan (Iraq), en la que se analizaron 35 muestras de sal común para consumo humano de origen nacional e importado, por medio de espectrometría XRF, con el objetivo de evaluar los riesgos potenciales para la salud pública asociados con la ingestión de radionúclidos de origen natural. Este estudio reveló que las dosis efectivas anuales estimadas de muestras de sal con bajo contenido de sodio, superaron el límite de exposición pública recomendada de 290 $\mu\text{SV}/\text{y}$ (45).

CONCLUSIONES

La determinación de radionúclidos en alimentos requiere de técnicas analíticas sensibles y precisas que permitan su cuantificación. Teniendo en cuenta la evidencia científica en cuanto a los impactos en salud derivados de la presencia de radioisótopos en el ambiente, es importante propiciar programas direccionados al fortalecimiento de la capacidad analítica en el territorio nacional que permita la determinación de este tipo de analitos en diversas matrices como agua y alimentos.

En este sentido, la espectrometría gamma con detectores de tipo HPGe es el método más utilizado debido a su capacidad para identificar y cuantificar directamente radionúclidos emisores en una amplia variedad de matrices alimentarias sin necesidad de destrucción de la muestra.

Por su parte, la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), brinda excelente sensibilidad para isótopos emisores alfa y beta, especialmente en niveles de actividad bajos. Aunque el análisis por medio de espectrometría XRF no mide actividad ni distingue isótopos, se presenta como una herramienta complementaria para el análisis rápido de elementos relacionados con radionúclidos, lo cual hace que sea una alternativa útil para estudios preliminares o en combinación con otras metodologías analíticas más específicas.

Con el fin de realizar la selección de la metodología más adecuada es necesario tener en cuenta diversos factores como el radionúclido de interés, la matriz alimentaria, los límites de detección requeridos y la disponibilidad instrumental. Técnicas analíticas como el conteo de centelleo y la espectrometría gamma son las más usadas, pero métodos como ICP-MS y la espectrometría de masas son las elegidas para muestras con concentraciones de actividad bajas.

REFERENCIAS

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation-UNSCEAR 2008. 2010.
2. Icontec, Colombia. NTC 3970. Transporte de materiales radiactivos. 1996.
3. Environmental Protection Agency. Radiation Basics US EPA [Internet]. 2024 [citado el 1 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.epa.gov/radiation/radiation-basic>

4. Peña Marín V. Método de evaluación de dosis por ingestión de Polonio, Bismuto y Plomo como materiales radiactivos naturales (tesis de maestría). Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2011.
5. International Atomic Energy Agency. Exposure due to radionuclides in Food other than during a Nuclear or Radiological Emergency [Internet]. Vienna; 2023. Disponible en: <https://www.iaea.org/resources/safety-standards>
6. Ministerio de Salud y Protección Social. Resolución 4506. Colombia; 2013.
7. Ministerio de Salud y Protección Social. Resolución 3709. Colombia; 2015.
8. Barbosa González NR, Ramos Rincón JM. Determinación de polonio-210 en alimentos y agua: una revisión (2014-2019). Rev Investig Apl Nucl 2021;(5):26–43.
9. Codex Alimentarius.Commission. Carta Circular. CL 2023 17-CF. 2023 feb.
10. Desideri D, Battisti P, Giardina I, Roselli C, Feduzi L, Goriotti D, ET al. Assessment of radioactivity in Italian baby food. Food Chem 2019;279:408–15.
11. Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation, UNSCEAR; 2008.
12. Hussein EMA. Imaging with naturally occurring radiation. Appl Radiat Isot 2019;145:223–39.
13. Clement CH, Menzel HG, Harrison J, Eckerman K. Annals of the ICRP Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. Vol. 123, ICRP Publication. 2012.
14. Rühm W, Laurier D, Wakeford R. Cancer risk following low doses of ionising radiation – Current epidemiological evidence and implications for radiological protection. Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen 2021;873.
15. Little MP, Azizova T V., Richardson DB, Tapio S, Bernier MO, Kreuzer M, et al. Ionising radiation and cardiovascular disease: systematic review and meta-analysis. BMJ. febrero de 2023;
16. Jayan J, Rosh H, Ashraf FFP, Nair PG, Vijayakumar A, Nair AS, et al. Effects of radiation exposure on brain health: a state of the art and new challenges. Environl Sci Pollut Res 2022;29(58):87068–81.
17. Ruprecht NA, Singhal S, Schaefer K, Panda O, Sens D, Singhal SK. A Review: Multi-Omics Approach to Studying the Association between Ionizing Radiation Effects on Biological Aging. Vol. 13, Biology. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2024.
18. Johnbosco C. Egbueri, Johnson C. Agbasi, Chiedozi C. Aralu, Mahamuda Abu, Henry C. Uwajingba, Sani I. Abba. Radionuclides as Environmental Contaminants of Concern: Threats to Public Health Through Soil and Groundwater. En: Li P, He X, Wu J, Elumalai V, editores. Sustainable Groundwater and Environment: Challenges and Solutions [Internet]. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025. p. 352–64. (Springer Hydrogeology). Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-82194-3>
19. Touranlou FA, Moghimani M, Marhamati M, Rezaie M. Detection and measurement of radioactive substances in water and food: A narrative review. Ital J Food Saf. 2024;13(1).

20. Jibiri NN, Farai IP, Alausa SK. Activity concentrations of ^{226}Ra , ^{228}Th , and ^{40}K in different food crops from a high background radiation area in Bitsichi, Jos Plateau, Nigeria. *Radiat Environ Biophys* 2007;46(1):53–9.
21. Lou Y, Wan L, Ma Y, Li H, Meng Q, Kong Y, et al. Survey on radioactive contamination in Beijing following the Japanese Fukushima nuclear accident. *Jf Radiol. Prot* 2013; 33(3):661–8.
22. Ezzulddin SK, Ahmed AH, Samad AI, Othman SQ. Radioactivity measurement of nuts and seeds available in Erbil city markets. *AIP Conf Proc.* 21 de septiembre de 2017; 1888.
23. Ballesteros L, Ortiz J, Gallardo S, Martorell S. An overview of measurements of radionuclides in foods of the Comunidad Valenciana (Spain). *Radiat. Phys. Chem* 2015; 116:111–5.
24. Buchtela K. Radiochemical methods - Gamma-ray spectrometry. En: *Encyclopedia of Analytical Science*. Elsevier; 2019. p. 15–22.
25. ISO 19581. Rapid screening method using scintillation detector gamma-ray spectrometry. Suiza; 2017.
26. L'Annunziata MF, Tarancón A, Bagán H, García JF. Liquid scintillation analysis: Principles and practice. En: *Handbook of Radioactivity Analysis: Volume 1: Radiat Phys Detect*. Elsevier 2020. p. 575–801.
27. ISO 11704 Gross alpha and gross beta activity Test method using liquid scintillation counting. Suiza; 2018;
28. Adams F, Frank Vanhaecke and Patrick Degryse (Eds.): *Isotopic analysis. Fundamentals and applications using ICP–MS*. *Anal Bioanal Chem* 2013;405(9):2749–51.
29. Al-Hakkani MF. Guideline of inductively coupled plasma mass spectrometry “ICP–MS”: fundamentals, practices, determination of the limits, quality control, and method validation parameters. *SN Appl Sci* 2019; 1(7).
30. Roos P. Analysis of radionuclides using ICP-MS. En: *Analysis of Environmental Radionuclides*. Elsevier Ltd; 2008. p. 295–330.
31. Zehringer M. Monitoring of Natural Radioactivity in Drinking Water and Food with Emphasis on Alpha-Emitting Radionuclides. En: *Ionizing and Non-ionizing Radiation*. IntechOpen; 2020.
32. IAEA International Atomic Energy Agency. Espectrometría gamma y alfa para monitorización en el lugar de trabajo [Internet]. [citado el 19 de mayo de 2025]. Disponible en: https://nucleus.iaea.org/sites/orpnet/training/workplace_monitoring/Shared%20Documents/Lecci%C3%B3n%208%20-%20Espectrometría%20alfa%20y%20gamma.pdf
33. ISO 23548 Test method using alpha spectrometry for alpha emitting radionuclides. Suiza; 2024.
34. Shin C, Choi H, Kwon HM, Jo HJ, Kim HJ, Yoon HJ, et al. Determination of plutonium isotopes (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu) and strontium (^{90}Sr) in seafood using alpha spectrometry and liquid scintillation spectrometry. *J Environ Radioact* 2017;177: 151–7.
35. Feng X, Zhang H, Yu P. X-ray fluorescence application in food, feed, and agricultural science: a critical review. Vol. 61, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Taylor and Francis Ltd.; 2021. p. 2340–50.
36. McGladdery C, Weindorf DC, Chakraborty S, Li B, Paulette L, Podar D, et al. Elemental assessment of vegetation via portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometry. *J Environ Manage* 2018; 210:210–25.

37. Rosa MML, Maihara VA, Taddei MHT, Cheberle LTV, Avegliano RP, Silva PSC. The use of total diet study for determination of natural radionuclides in foods of a high background radiation area. *J Environ Radioact* 2021; 242.
38. Dell'Oro D, Iammarino M, Bortone N, Mangiacotti M, Chiaravalle AE. Determination of radiostrontium in milk samples by ultra-low-level liquid scintillation counting: a validated approach. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess* 2014; 31(12):2014–21.
39. International Atomic Energy Agency. Rapid Simultaneous Determination of ⁸⁹Sr and ⁹⁰Sr in Milk: A Procedure Using Cerenkov and Scintillation Counting. Viena; 2013.
40. Dell'oro D, Iammarino M, Bortone N, Chiaravalle AE. Survey on the presence of ⁹⁰Sr in milk samples by a validated ultra low level liquid scintillation counting (LSC) method. *E3S Web of Conferences* [Internet]. 2013;1. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20130139005>
41. Hofmann P, Achatz M, Fohlmeister J, Schmidt K, Berg T, Sarvan I. Levels of naturally occurring radionuclides in foods from the first German total diet study. *Sci Total Environ* 2025; 965.
42. Evans P, Elahi S, Lee K, Fairman B. A rapid and accurate method for the determination of plutonium in food using magnetic sector ICP-MS with an ultra-sonic nebuliser and ion chromatography. *J Environ Monit* 2003; 5(1):175–9.
43. Furukawa M, Takagi K, Matsunami H, Komatsuzaki Y, Kawakami T, Shinano T, et al. Rapid Quantification of Radioactive Strontium-90 in Fresh Foods via Online Solid-Phase Extraction-Inductively Coupled Plasma-Dynamic Reaction Cell-Mass Spectrometry and Its Comparative Evaluation with Conventional Radiometry. *ACS Omega* 2019; 4(6):11276–84.
44. Trotta G, Ferrante MA, Langianese M, Bortone N, Damiano R, Nicolini M, et al. Efficient Determination of Actinoid Elements in Food, Feeds, and Water by Single Extracting Resin and Alpha Spectrometry Detection. *Food Anal Methods* 2023; 16(11–12):1758–68.
45. Hassan HJ. Assessment of radiation hazards linked to low-salt consumption in Kurdistan Region-Iraq. *Radiat Phys Chem* 2025; 234.