REVISTA INVESTIGACIONES Y APLICACIONES NUCLEARES

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Presencia de polonio–210 (^{210}Po) en hojas de tabaco, tabaco, cigarrillo y fumadores y métodos de análisis: una revisión sistemática

Presence of Polonium-210 (^{210}Po) in tobacco leaves, tobacco, cigarette and smokers and methods of analysis: A systematic review

Mariana Segura[1], Anggy Suley Cañón[1], Marisol Ramos[1, a], David Leonardo Alonso[1, 2]

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 8, 2026

Recibido: 31 de mayo de 2025

Aceptado: 27 de julio de 2026.

Publicado en línea: 16 de octubre de 2026

DOI: https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.8.2026.801

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: M. Segura, A. S. Cañón, M. Ramos, y D. L. Alonso, «Presencia de polonio–210 en hojas de tabaco, tabaco, cigarrillo y fumadores y métodos de análisis: una revisión sistemática», *rev. investig. apl. nucl.*, n.º 8, oct. 2026.

Resumen

Se realizó una revisión del estado del arte respecto a los diferentes estudios elaborados alrededor del mundo entre 2008 y 2022, relacionados con la presencia del ^{210}Po en hojas de tabaco, tabaco, cigarrillos y fumadores, a través del método PRISMA. Se describen las principales metodologías empleadas para el análisis del ^{210}Po. Los estudios revisados evidencian la presencia de este radionúclido en productos de tabaco, humo de cigarrillo y muestras biológicas de fumadores. Se reporta actividad total de ^{210}Po en sangre de 422 ± 34 mBq para fumadores y de 362 ± 36 mBq para no fumadores. Se reportan actividades de ^{210}Po en marcas comercializadas de cigarrillo de entre 16,1 ± 1,0 mBq/cigarrillo y 37,6 ± 2,6 mBq/cigarrillo, con un valor medio de 22,4 ± 1,5 mBq/cigarrillo. Algunos estudios evidencian dosis efectivas anuales asociadas al consumo de productos de tabaco desde 8,3 µSv/año hasta 408 µSv/año para cigarrillo y desde 55 µSv/año hasta 876 µSv/año para tabaco. Las publicaciones muestran que el ^{210}Po es un radionúclido de interés para evaluar la exposición interna asociada al consumo de productos de tabaco, dado que es un emisor de partículas alfa y se incorpora al cuerpo por la inhalación de humo. Se identificó una limitada producción de estudios de ^{210}Po en tabaco en América Latina, lo que evidencia la necesidad de fortalecer la investigación en esta área.

Palabras clave: polonio-210, tabaco, cigarrillo, emisión alfa, radiactividad.

[1] Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Grupo de Investigación en Instrumentación Química, Bogotá

[2] Instituto Nacional de Salud, Grupo de Química y Toxicología, Bogotá

[a] Autor para correspondencia: jmramosr@udistrital.edu.co

Abstract

A state-of-the-art review was conducted of studies published worldwide between 2008 and 2022 concerning the presence of ^{210}Po in tobacco leaves, tobacco, cigarettes, and smokers, following the PRISMA methodology. The main methodologies employed for the analysis of ^{210}Po are described. The studies reviewed demonstrate the presence of this radionuclide in tobacco products, cigarette smoke, and biological samples from smokers. Total ^{210}Po activity in whole blood was reported as 422 ± 34 mBq in smokers and 362 ± 36 mBq in non-smokers. Additionally, ^{210}Po activities ranging from 16.1 ± 1.0 to 37.6 ± 2.6 mBq/cigarette, with a mean value of 22.4 ± 1.5 mBq/cigarette, have been reported for commercially available cigarette brands. Some studies have reported annual effective doses associated with the consumption of tobacco products ranging from 8.3 μSv/year to 408 μSv/year for cigarettes and from 55 μSv/year to 876 μSv/year for tobacco. The results indicate that ^{210}Po is a radionuclide of interest for assessing internal exposure associated with the consumption of tobacco products due to its alpha-particle emission and incorporation into the body through smoke inhalation. A limited number of studies on ^{210}Po in tobacco have been identified in Latin America, indicating the need to strengthen research in this area.

Keywords: *polonium*-210, tobacco, alpha emission, radioactivity.

1. Introducción

La planta *Nicotiana tabacum*, que pertenece al género nicotiana, se procesa para obtener el tabaco que, como producto agrícola, se usa en productos para fumar como cigarrillos, pipas, pipas de agua (narghiles, hookahs, bhangs), entre otros. Por otra parte, el alto consumo de estos productos tiene consecuencias negativas en la salud humana [1]. Predominan afecciones respiratorias y diferentes tipos de cáncer, principalmente de pulmón, entre otras patologías.

El tabaco posee varios compuestos tóxicos, dentro de los que se encuentran metales pesados como zinc, cobre y níquel [2], además de quimio-toxinas como la nicotina y compuestos como cianuro de hidrógeno (HCN), amoníaco (NH_3) y más de 20 alcaloides, entre los que se destacan la nornicotina, anabasina y anatabina [3], y el polonio – 210 un radionúclido emisor de partículas alfa y, por tanto, de importancia desde el punto de vista de la radiotoxicidad. Debido a su incorporación en el organismo mediante inhalación de humo, puede contribuir a la exposición interna a radiación ionizante, especialmente en los tejidos pulmonares [50].

El ^{210}Po (T½ = 138,4 días) es un elemento radiactivo natural que se encuentra presente de forma activa en la corteza terrestre. Luego de la combustión del tabaco, es posible detectar 600 compuestos químicos diferentes; 65 de ellos son posibles carcinógenos, mientras que 11 son agentes cancerígenos ya comprobados [4].

Diferentes estudios sobre el tabaco encontraron diversos radionúclidos de origen natural en alta proporción, además de elevados porcentajes de compuestos químicos tóxicos. Se han establecido diferentes niveles de actividad de los radionúclidos presentes en los cigarrillos, entre los cuales sobresalen los de la serie del uranio y del torio con las cantidades más altas para el ^{210}Po y ^{210}Pb, cuya presencia se debe al uso de fertilizantes de fosfato en los cultivos de tabaco [5]. Cabe destacar que los radionúclidos superan porcentualmente su cantidad en el tabaco fresco respecto a su presencia en otros alimentos, puesto que las hojas de las plantas del tabaco poseen un área superficial amplia, así como por la presencia de tricomas que permiten la captura de partículas de <0,1 μm de diámetro. Para el caso específico del ^{210}Po, emisor de partículas alfa, se encontró que, para una persona que fuma cerca de dos paquetes de cigarrillos al día, la dosis de radiación al epitelio bronquial de ^{210}Po inhalado en el humo del cigarrillo puede ser casi siete veces mayor en comparación con las fuentes de fondo natural, lo que le evidencia como agente significativo en la génesis del cáncer bronquial en los fumadores [5], [6], [7], [8].

Puesto que todos los suelos tienengran contenido de uranio y radio debido a su presencia en la corteza terrestre,

los cultivos de tabaco poseengran concentración de ^{210}Po y ^{210}Pb, radionúclidos pertenecientes la serie del uranio y radio [9]. Además, el suelo en el que se cultiva tabaco suele ser tratado con fertilizantes cuya composición química incluye fosfato y son fabricados con apatita, roca mineral que contiene altas concentraciones de ^{238}U y otros elementos radiactivos como ^{226}Ra, ^{210}Po, ^{232}Th y ^{210}Pb [2], [10], para cumplir con el requisito de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. No obstante, su uso excesivo por parte de los agricultores para producir mayor ganancia en las plantaciones de tabaco aumenta el nivel de radiactividad [1], [8], [11].

El ^{210}Po se caracteriza por su alta radiotoxicidad, que lo hace uno de los elementos radiactivos emisores alfa naturales de mayor contribución a las dosis por ingestión de alimentos. Su contenido estudiado en tabaco y cigarrillos refleja que entre 6,5 % y 37 % del ^{210}Pb y ^{210}Po, respectivamente, es inhalado por los fumadores, mientras que el resto se queda en las cenizas, el filtro o es liberado directamente a la atmósfera en forma de humo [12]. El humo producido por la combustión posee varios carcinogénicos que abarcan radionúclidos de origen natural, además de compuestos químicos tóxicos, que generan altas concentraciones del emisor alfa ^{210}Po. Este último se considera de mayor interés debido a su baja temperatura de volatilidad; la combustión de un cigarrillo alcanza entre 500 y 700°C, tan alta para que el polonio se volatilice y entre en el cuerpo al mezclarse con el humo del tabaco [1].

En Colombia se encuentra muy poca información sobre esta temática. Esto motivó la recopilación bibliográfica de fuentes primarias y secundarias que permiten identificar las técnicas empleadas para evaluar la concentración de ^{210}Po en cigarrillo, hojas de tabaco, tabaco y fumadores, con el fin de establecer cuál de estos métodos podría ser empleado dentro del contexto colombiano.

2. Metodología

Se diseñó una investigación exploratoria, descriptiva y correlacional teórica, bajo la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) [13], [14], con el interés de conocer la presencia de ^{210}Po en hojas de tabaco, tabaco, cigarrillos y fumadores.

La selección de los estudios se realizó de forma manual e incluyó artículos de revisión e investigación en los que se trabaja sobre el ^{210}Po en matrices ambientales, en cigarrillo y tabaco, así como sus efectos biológicos, además de abarcar métodos de análisis del ^{210}Po en cigarrillo, tabaco, fumadores, hojas de tabaco y humo de cigarrillo durante el período 2008-2022. No hubo límites en cuanto al estado de las publicaciones (resumen, revisión, fuente primaria) ni el idioma; sin embargo, la consulta abarcó en su mayoría artículos en inglés.

La recolección de artículos se hizo por medio de una búsqueda sistemática en las bases de datos científicas Sciencedirect, Reaxys, Springer y Pubmed central. Dentro de la consulta se emplearon las palabras clave: Polonio-210 (*polonium*-210), Polonio-210 en tabaco (*polonium*-210 *in tobacco*), Polonio-210 en cigarrillo (*polonium*-210 *in cigarette*), Polonio-210 en fumadores (*polonium*-210 *in smokers*) determinación del ^{210}Po, niveles de actividad del ^{210}Po (*activity concentration of* ^{210}Po). Se recogieron 79 referencias para el periodo elegido y de ellas, se escogieron 60 que cumplieron con los criterios de selección para, finalmente, ejecutar el análisis de 46 artículos.

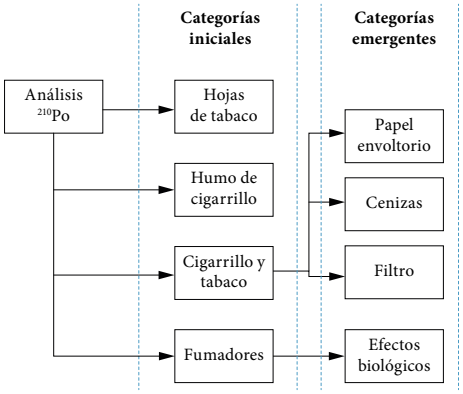
3. Resultados y discusión

3.1. Revisión inicial de la información

Los análisis presentados a continuación fueron realizados a partir de la información recolectada de los diferentes artículos seleccionados. En la primera parte, se realiza una descripción de los artículos seleccionados considerando las bases de datos, los años y los países de publicación. En la segunda parte, se analizan las metodologías empleadas por los diferentes autores para la determinación de la presencia y posterior estudio de ^{210}Po en muestras. Finalmente, se formula una propuesta metodológica para la aplicación del estudio en Colombia.

En la Figura 1 se muestra la organización de las categorías para la realización de la búsqueda.

Figura 1. Diagrama de clasificación temática.



La búsqueda manual recuperó 79 artículos inicialmente; dos de ellos se descartaron por estar duplicados para dejar 76. De igual manera se excluyeron del grupo "Análisis ^{210}Po" 27 artículos sobre la presencia del radionúclido en matrices ambientales (agua, atmósfera), al igual que estudios realizados en animales y comida, debido a que estudian el ^{210}Po en fuentes que no incluyen el tabaco ni el cigarrillo, o la relación existente entre la planta de tabaco con matrices ambientales como el suelo y el uso de fertilizantes. Los 6 artículos restantes son estudios en los que se trabaja la planta de tabaco, composición del humo de tabaco o el cáncer de pulmón, producto de fuentes diferentes a ^{210}Po.

La clasificación por temática de los artículos se muestra en la tabla 1, donde se indica el número de artículos incluidos en cada clasificación, según el tema y subtema.

Tabla 1. Temas seleccionados para la clasificación de análisis ^{210}Po

Tema	Subtema	No. artículos	
Planta de tabaco	Hojas	4	
	Fertilizantes	1	11
	Suelo	6	
Humo de cigarrillo	Efectos biológicos	5	
	Humo del cigarrillo	4	9
Cigarrillo y tabaco	Cigarrillo	16	16
Fumadores	Efectos biológicos	5	10
	Fumadores	5	
Total de artículos			**46**

Las bases de datos que proporcionaron el mayor número de artículos fueron PubMed Central y ScienceDirect, debido a su enfoque en ciencias biomédicas, ambientales y de la salud. Los estudios encontrados se relacionan principalmente con los efectos biológicos del ^{210}Po y su presencia en cigarrillos y fumadores. Entre las revistas con mayor número de publicaciones destacan Journal of Environmental Radioactivity y Radiation Protection Dosimetry. La primera presenta un enfoque orientado al estudio de radionúclidos y fenómenos de radiactividad ambiental, como presencia, distribución en diferentes matrices ambientales, y la segunda se centra en dosimetría y protección radiológica, incluyendo evaluación de dosis, dosimetría interna y externa y el monitoreo de la exposición a radiaciones ionizantes.

La mayor producción científica sobre ^{210}Po se encuentra en Europa y Asia; se atribuye al interés en los efectos del tabaquismo y las políticas de control promovidas por la Organización Mundial de la Salud [15], [16]. Países como Polonia, Hungría, India y Estados Unidos presentan numerosos estudios mientras que, en América Latina, la producción científica es bastante bastante limitada [17], [18]. Esta limitación puede estar asociada al acceso restringido a infraestructura especializada, particularmente a equipos de espectrometría alfa de alta sensibilidad, de elevado costo, así como con las dificultades económicas, regulatorias y logísticas para la adquisición y manejo de radiotrazadores.

3.2. Análisis de los artículos por temáticas

Los artículos seleccionados se agruparon en cuatro temáticas: análisis de ^{210}Po en planta de tabaco, cigarrillo, humo de cigarrillo y fumadores. En cada apartado se describen las características generales de los estudios, los métodos empleados para el tratamiento y análisis de las muestras, así como las similitudes y diferencias metodológicas entre autores. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos en términos de concentración de actividad de ^{210}Po y dosis efectiva anual.

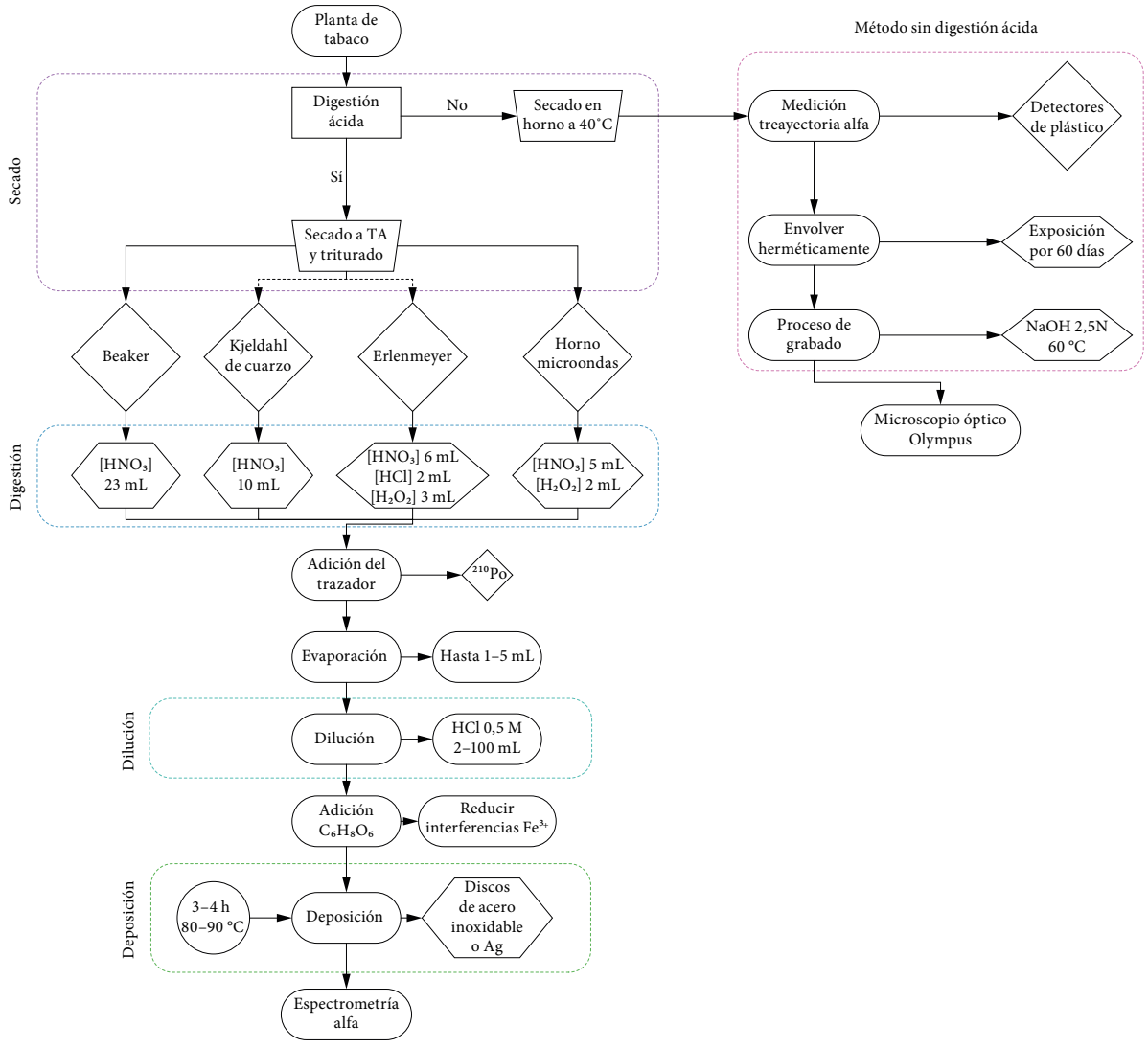
3.2.1 Análisis ^{210}Po en la planta de tabaco

Para el análisis de ^{210}Po en la planta de tabaco se identificaron dos metodologías: la primera comprende la digestión ácida de la muestra, seguida de la cuantificación mediante espectrofotometría alfa; la segunda consiste en la detección directa sobre la hoja de tabaco mediante un detector de trazas y coteo de las trazas con un microscopio óptico (Figura 2). Los métodos mencionados y tipos de muestras que fueron analizadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Artículos seleccionados en la categoría "análisis ^{210}Po en hoja de tabaco"

Referencia	Qué se analiza/ tipo de muestra	Método
[34]	Concentración de ^{210}Po y ^{210}Pb en planta de tabaco y muestras de suelo de su plantación.	Lixiviación ácida combinado con un marcador de ^{209}Po. Detección por espectrometría alfa (espectrómetro alfa semiconductor PIPS)
[9]	Efecto de los fertilizantes en el aumento de radiación alfa. Actividad alfa en hojas de tabaco.	Detectores de trayectoria de plástico LR-115 tipo II. Conteo a través de microscopio óptico Olympus
[19]	Determinación de Po-210 en hojas de tabaco.	Digestión ácida con ácidos en tubo de Kjeldahl, Erlenmeyer y horno microondas. Medición de partículas por espectrometría alfa con detectores de semiconductores de silicio planar pasivo (PIPS).

Figura 2. Metodología empleada por los autores en el análisis de diferentes muestras de hojas de tabaco [9],[19].



Las mediciones por espectrometría alfa reportadas por [19], proporcionan valores de concentración dependiendo de los métodos de digestión empleados: Kjeldahl a la llama, Erlenmeyer en plancha de calentamiento y sistema microondas. En el caso del tabaco oriental se reportan concentraciones de 15,7 ± 1,5 Bq/kg, 16,2 ± 1,7 Bq/kg y 17,5 ± 2,8 Bq/kg, y para el tabaco tipo Virginia 15,2 ± 0,1 Bq/kg, 11,4 ± 1,3 Bq/kg, 11,3 ± 1,1 Bq/kg, respectivamente.

Para evaluar la pérdida de ^{210}Po en las muestras tras el proceso de digestión se tiene en cuenta el porcentaje de recuperación del trazador, en todos los casos se empleó ^{209}Po, los valores se encontraron entre 70–100 % para la disolución en tubos de Kjeldahl, entre 80–100 % para disolución en Erlenmeyer en una placa de calentamiento y entre 80–100 % para el sistema microondas. En este caso, los autores evalúan el método de digestión denotando que no existe una diferencia significativa en cada uno de ellos, por lo que sugieren que la eficiencia del método dependerá del tipo de muestra y su masa [19].

Mandić et al. [20] estudiaron la presencia de radionúclidos naturales en 17 marcas de cigarrillos comercializadas en Serbia y observaron que las actividades de ^{210}Pb y ^{210}Po presentaban una relación cercana al equilibrio secular. Los autores mostraron que en las partes inferiores de la planta de tabaco se encuentra contenido de isótopos en correlación con las muestras de suelo en donde puede haber ^{226}Ra que se descompone en ^{222}Rn, gas que se deposita fácilmente en las hojas de tabaco más cercanas, debido a que este radionúclido tiene altas cargas eléctricas que se adhieren a partículas de polvo y son captadas con facilidad en los tricomas de la superficie de la hoja. Para el caso del estudio se obtienen valores relativamente altos, debidos a que se estudia la plantación en suelos altamente contaminados por NORM (materiales radiactivos de origen natural), debido a la explotación de una mina de uranio.

En el trabajo realizado por [9], se presenta una alternativa para la medición de la concentración de actividad del ^{210}Po en las hojas de tabaco. Se emplea un detector de pistas de plástico LR-115 tipo II que presenta una baja sensibilidad a partículas gamma y beta, característica que lo hace el más adecuado y de uso extendido para la detección de partículas alfa en campos de radiación mixta. Esto puede ser de gran ayuda en los estudios del ^{210}Po, tanto en hojas de tabaco como en los productos de la misma, debido a que este radionúclido presenta un nivel bajo de energía alfa y además, presenta un tiempo de vida media largo (t ½ = 138 días) y se descompone después de su emisor beta ^{210}Pb (t ½ = 22,3 años), lo que indica presencia de ambos radionúclidos por cuenta de su equilibrio secular [9].

Para el estudio del efecto de diferentes fertilizantes respecto al aumento de radiaciones alfa [9], los autores cultivan una serie de plantas de tabaco y emplean diferentes fertilizantes para su tratamiento. Se destacan con mayor radioactividad los fertilizantes de fosfato, los cuales se elaboran con una fuente mineral que posee ^{238}U, respecto a plantas que se fertilizan con estiércol y fertilizantes orgánicos.

A partir de la información presentada, es posible inferir que el uso de fertilizante influye notoriamente en el aumento de la radiación alfa en los cultivos de las plantas. Para el caso de plantaciones de tabaco es importante denotar una mayor trayectoria alfa sobre la parte inferior de la hoja de tabaco; se debe a que en la misma se encuentran mayor número de tricomas en comparación con la parte superior, lo que favorece la deposición de diferentes radionúclidos; a pesar de que el estudio no trata específicamente la presencia de ^{210}Po, se debe tener en cuenta que varios autores [2], [21], [22] reportan que el uso de fertilizante de fosfato aumenta la presencia de dicho radionúclido.

En los estudios [23], [24] se calcula la actividad de ^{210}Po en el fosfoyeso, un subproducto generado durante la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfática, constituida principalmente por minerales del grupo de las apatitas, el cual se emplea para la elaboración de fertilizantes. Durante este proceso, los radionúclidos naturales presentes en la roca se redistribuyen de forma tal que el ^{238}U permanece en el ácido fosfórico, mientras que ^{226}Ra, ^{210}Po, ^{232}Th y ^{210}Pb tienden a concentrarse en el fosfoyeso. En concordancia con este comportamiento, se reportaron concentraciones de actividad de ^{210}Po de 654 ± 11 Bq/kg y 927 ± 83 Bq/kg en las muestras analizadas.

Así como se relaciona la actividad agrícola y el uso de fertilizantes de fosfato con el aumento de la radiactividad, se estudian actividades humanas como la minería. En el trabajo realizado por [25] se demuestra este hecho pues, al estudiar muestras de diferentes hojas y granos de plantas (eucalipto, soja, pino y trigo), se obtienen factores de transferencia (FT) altos del suelo hacia las plantas; sin embargo, se indica que existe mayor FT en las hojas de las plantas debido a la deposición que ocurre de forma aérea [25]. Esto se demuestra también en el estudio [26], en el que se estima el FT del suelo a plantas de menta y perejil en sistemas abiertos y cerrados, y que encuentra valores dos veces más altos en los sistemas abiertos.

Al mismo tiempo, se han estudiado diferentes muestras de suelo en las que no existe evidencia de contaminación por prácticas humanas [27]. Con esto se comprueba que efec-

tivamente existen ciertos niveles de ^{210}Po (ej. 13,4 - 114 Bq/kg) [28] en el suelo de forma natural, lo que contribuye al aumento de este radionúclido en las diferentes rutas de transporte hacia la planta.

3.2.2 Análisis de ^{210}Po en cigarrillo y tabaco

Dentro de los estudios analizados se encontraron varias referencias en la que se describe el método empleado para realizar el análisis de ^{210}Po en cigarrillo, teniendo en cuenta el tipo de muestras, (Tabla 3) y en diferentes componentes de cigarrillo (filtro, papel) y residuos tras su combustión (cenizas) (Tabla 4).

Tabla 3. Artículos seleccionados en la categoría "análisis ^{210}Po en cigarrillos"

Referencia	Qué se analiza / tipo de muestra	Método
[29]	Actividad ^{210}Po en tabaco del cigarrillo y estimación de dosis efectiva.	Digestión ácida con HNO_3, $HClO_4$ y HF. Conteo en discos de A g por espectrometría alfa.
[30]	Actividad de ^{210}Po en diferentes marcas de cigarrillos iraníes. Consumo interno anual y concentración de ^{210}Po en tejidos pulmonares de fumadores.	Tratamiento de muestras por digestión ácida con HNO_3 y H_2O_2 y conteo alfa con discos de Cu.
[31]	Actividad de ^{210}Po en cigarrillo y bidis. Dosis efectiva anual.	Tratamiento de muestras por digestión ácida con HNO_3 y HCl y deposición en planchet de plata. Identificación por sistema de conteo alfa.
[32]	Actividad ^{210}Po en cigarrillos chinos. Estimación de dosis efectiva anual.	Digestión ácida con HNO_3, conteo alfa en disco de níquel.
[33]	Actividad ^{210}Po en cigarrillo.	Digestión ácida con HNO_3 y HF. Conteo alfa con discos de cobre.
[34]	Actividad ^{210}Po en 10 marcas de cigarrillo en Rumania	Digestión ácida con HNO_3, HCl y H_2O_2. Se disolvió en agua y se ajustó el pH con HCl. Se agregó ácido ascórbico y se realizó la deposición directa en discos de acero inoxidable. Enriquecimiento con ^{209}Po para el cálculo de recuperación química.
[35]	Actividad ^{210}Pb y ^{210}Po en 20 marcas de cigarrillo. Dosis efectiva por inhalación al fumar.	Se realizó un análisis de ^{210}Pb por espectrometría gamma y se estimó la actividad de ^{210}Po a partir de la de ^{210}Pb.
[36]	Actividad de ^{210}Pb y ^{210}Po en 10 marcas de cigarrillo	Digestión ácida con HNO_3, HCl. Se realizó una separación por medio de una resina. Se secó y recuperó con HCl, se transfirió a una celda para depositar en un disco de plata.
[1]	Actividad de ^{210}Pb y ^{210}Po en 17 marcas de cigarrillo	Se realizó un análisis de ^{210}Pb por espectrometría gamma y se estimó la actividad de ^{210}Po a partir de la de ^{210}Pb.
[37]	Actividad ^{210}Po en 11 marcas de cigarrillo de Cuba. Dosis efectiva anual en jóvenes y adultos.	Digestión ácida con HNO_3 y H_2O_2, conteo alfa con disco de cobre.
[38]	Actividad ^{210}Po en 7 marcas de cigarrillos romaníes. Dosis efectiva anual.	Digestión ácida con HNO_3, HCl y H_2O_2. Deposición en disco de acero inoxidable con Ni, conteo con espectrometría alfa.
[39]	Concentración de actividad promedio de ^{210}Po. Evaluación radioecológica debida a la dosis del consumo de radionúclidos.	Digestión ácida con HNO_3, deposición en discos de acero inoxidable. Cuantificación por espectrometría alfa.
[40]	Actividad de ^{210}Po en tabaco de cigarrillos.	Digestión ácida con HNO_3, HCl y H_2O_2. Conteo por espectrometría de centelleo líquido sobre la mezcla orgánica.

Tabla 4. Actividad de ^{210}Po en las partes del cigarrillo.

Actividad ^{210}Po (mBq)				Ref.
Papel envoltorio de cigarrillo	Filtro de cigarrillo antes de fumar	Filtro de cigarrillo después de fumar	Cenizas	
0,15 ± 0,03	0,06 ± 0,02	2,04 ± 0,2	3,23 ± 1,02	[29]
2,5 ± 0,1 - 6,3 ± 0,33	-	0,8 ± 0,10 - 2,9 ± 0,19	0,8 ± 0,10 - 2,9 ± 0,19	[41]
11,8 ± 0,61	0,9 ± 0,2	1,3 ± 0,3	2,8 ± 0,2	[37]

De acuerdo a las características generales de los métodos empleados en la identificación del ^{210}Po en cigarrillo, se generaliza un método en donde en primera se selecciona al azar una cantidad determinada de cigarrillos (ej. 3 cigarrillos) por cada marca analizada, se separa el tabaco de cada uno y se homogeniza para tomar una masa de muestra. Dicha masa se trata por medio de una digestión ácida en placa de calentamiento o microondas, con el uso de ácidos o mezclas de los mismos; se efectúa una posterior deposición en discos para

realizar un conteo, ya sea por espectrometría alfa o gamma, para estimar la concentración de actividad del ^{210}Po a partir del ^{210}Pb. Es importante mencionar que el análisis de ^{210}Po en las partes de cigarrillo, papel, filtro antes y después de fumar, y cenizas, se ejecuta de acuerdo con el procedimiento empleado para el estudio de este radionúclido en el tabaco del cigarrillo, según los parámetros que se emplean en cada estudio (Tabla 3). Los resultados de dicho análisis se muestran en la Tabla 5. Las técnicas empleadas en cada uno de los métodos se describen con detalle en la Figura 3.

Figura 3. Metodología empleada por los diferentes autores para el análisis en cigarrillo y tabaco.

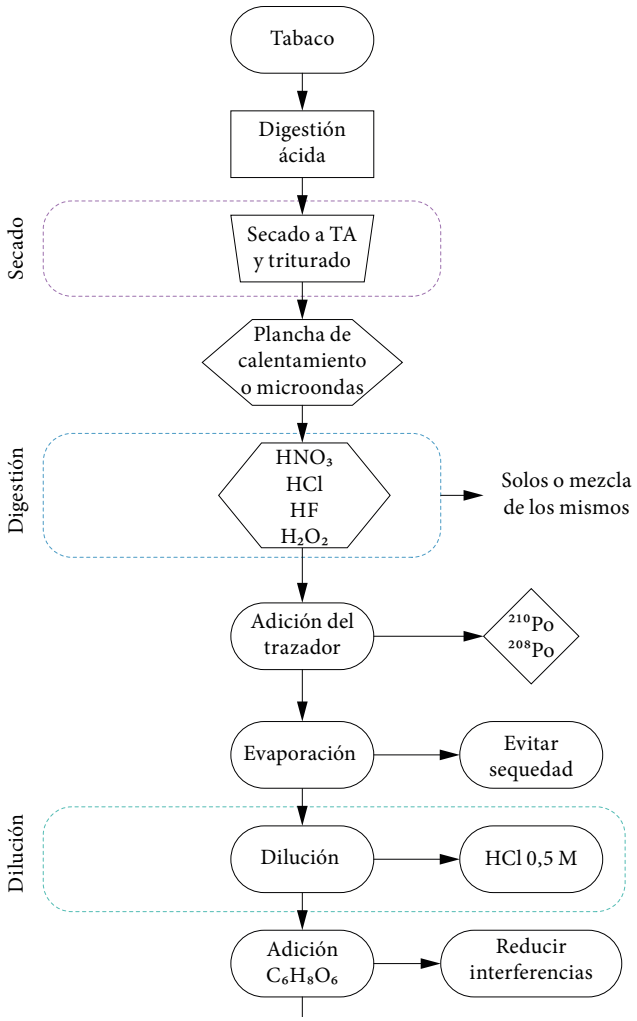


Tabla 5. Parámetros empleados en los estudios para realizar la digestión ácida y materiales empleados para la deposición de ^{210}Po.

Trazador	Ácidos	Tratamiento de la muestra	Disolución post digestión	Deposición	Ref.
^{209}Po	HNO_3 $HClO_4$ HF	Eliminación de impurezas con una columna de resina.	-	Discos Ag	[29]
^{208}Po	HNO_3- 70 mL H_2O_2- 10 mL	Filtrado en 5 mL de TBP en agitación por 10 min. Eliminación de Fe^{3+} con ácido ascórbico	HCl 20 mL	Discos Cu	[42]
^{209}Po	HNO_3 HCl	Tratamiento con dos porciones de 10 mL de HCL conc.	HCl 0,5 M-100 mL	Planchet Ag	[41]
^{209}Po	HNO_3-100 mL 15,9 M	Eliminación de Fe^{3+} con ácido ascórbico.	HCl 0,5 M- 50 mL	Disco Ni	[32]

-	HNO_3 conc.- 20 mL HF conc- 5 mL	Eliminación de razas de HF con $HClO_4$ Eliminación de Fe^{3+} con 0,5 g de ácido ascórbico. Ajuste de pH con NH_4OH 25 %	H_2O destilada-100 mL HCl 0,5 M- 100 mL	Disco Cu	[43]
^{209}Po	HNO_3 HCl H_2O_2	Eliminación de Fe^{3+} y del ion cromo (IV) con ácido ascórbico.	H_2O destilada-50 mL HCl pH:1-2	Discos acero inoxidable	[38]
-	HNO_3 HCl	Eliminación de interferencias con resina Sr	HCl 2 M	Disco Ag	[36]
^{209}Po	HNO_3 H_2O_2 HCl	Eliminación de ion férrico con 300 m g ácido ascórbico	-	Disco Cu	[37]
^{209}Po	HNO_3 HCl H_2O_2	Eliminación de Fe^{3+} con 0,5 g de ácido ascórbico.	H_2O destilada-60 mL	Discos de acero inoxidable con Ni	[38]
^{209}Po	HNO_3 65 % 150 mL	Tratamientos de la muestra con HCl 32 % 10 mL.	HCl 0,5 M 35 mL	Discos de acero inoxidable	[44]
-	HNO_3 65 %-2 mL H_2O_2 35 % 2 mL	Se filtró la sln con filtros (Macherey-Nagel)	Triisooctilamina en tolueno 5 %- 2 mLx3 NH_3 pH: 6	-	[40]
-	HCl H_2O_2 Mezcla de 10 mL1:1			-	
-	HNO_3 conc H_2O_2 35 % Mezcla de 10 mL 1:1	Digestión en microondas	Triisooctilamina en tolueno 5 %- 2 mLx3 HCl 1 M	-	

Las temperaturas oscilan entre los 50°C y los 180°C y la cantidad de muestra entre 0,2 g a 6,5 g

De acuerdo al método de análisis radioquímico para la determinación de emisores alfa, se deben seguir una serie de etapas previas a la preparación de fuentes y contaje: selección del trazador, preparación de la muestra y deposición [45].

Selección del trazador

Para el análisis de ^{210}Po, se emplearon como trazadores en los diferentes estudios ^{208}Po [42], [35] y ^{209}Po [37], [38], [29], [31], [18], isótopos del polonio que, al igual que el ^{210}Po, presentan un alto periodo de vida media en relación con otros isótopos de dicho elemento (Tabla 6). En la selección del trazador se considera principalmente su comportamiento químico similar al del ^{210}Po y una vida media suficientemente larga para permanecer detectable durante las etapas de procesamiento y análisis. Asimismo, sus características nucleares deben permitir diferenciarlo del ^{210}Po durante la determinación mediante espectrometría alfa. Por estas características, ^{208}Po y ^{209}Po son los adecuados, siendo ^{209}Po el empleado con mayor frecuencia en los estudios revisados.

Tabla 6. Datos de desintegración del ^{208}Po, ^{209}Po y ^{210}Po [46]

Radio-núclido	Vida media (T½)	Tipo de desintegración	Eα (MeV)
^{208}Po	2,898 y	α: 99,99777 %	5,115 4,220
^{209}Po	102 y	ε: 0,00223 % α: 99,52 %	4,883 4,885 4,622 4,310 4,110
^{210}Po	138,76 d	ε : 0,48 % α: 100 %	5,304 4,517

Preparación de la muestra

Para la determinación de elementos presentes en tejidos vegetales, tabaco, papel envoltorio y filtro (acetato de celulosa), debe efectuarse inicialmente un proceso de digestión ácida, ya sea con HNO_3, $HClO_4$, HF o HCl. Al tener una muestra sólida, es necesario transformarla en una solución para la medición del analito; este punto es crítico, debido a que puede perderse por causa de una digestión incompleta o de la volatilización [47].

Dentro de los métodos planteados por los diferentes autores se emplean ácidos o mezclas de ácidos para la descomposición de la materia orgánica. Esta se puede efectuar en vasos de teflón, en planchas de calentamiento o, como lo menciona [40], en un digestor de microondas.

La adición de los ácidos se hace en orden de disolución de la muestra. Varios autores emplean una cantidad de muestra por ensayo entre 2-5 gramos [42], [29], [33], para realizar la digestión, que es la destrucción de la materia orgánica mediante la adición de ácidos; [33] presentan un procedimiento bastante completo que es tomado en cuenta para proceder con la adición de 20 mL de HNO_3 concentrado y 5 mL de HF concentrado, mediante en una placa de calentamiento a 80°C por 30 minutos. Cabe resaltar que la temperatura empleada en la digestión se trabaja en relación con la temperatura de ebullición de los ácidos trabajados. Tras la digestión, se realiza un tratamiento con $HClO_4$ para eliminar trazas de HF, al igual que las interferencias de Fe^{3+}, con la adición de 0,5 g de ácido ascórbico; por último, disuelven la muestra en 100 mL de agua destilada y 100 mL de HCL 0,5 M, para finalmente hacer la deposición en discos cobre [33].

Por su lado [8], efectúa la digestión con el uso de100 ml de HNO_3 al 15,9 M únicamente, en una plancha de calentamiento a 80-90 °C. Luego, se adicionan 15 mL de HCl 12,1 M de alta pureza para la conversión a Cl^-, y la mezcla se disuelve en 50 mL de HCl 0,5 M, al igual que [33], [2] emplea ácido ascórbico para eliminar las interferencias del ión hierro y la solución se agita a temperatura ambiente durante 4 horas para promover la deposición espontánea del ^{210}Po sobre el disco de níquel.

Respecto a la selección de los ácidos, como se muestra en la Tabla 5, [40] realiza tres ensayos para la digestión ácida. Se realizó una serie de experimentos de extracción con ácido nítrico y ácido clorhídrico. Los experimentos con el HNO_3 mostraron bajo rendimiento de extracción de ^{210}Po; por su parte, la extracción con HCl mostró un rendimiento mayor a medida que aumentaba su concentración; con una concentración superior a 0,1 M, se dio la extracción de ^{210}Po, lo que muestra que desde este punto se puede realizar una medición cuantitativa del radionúclido. A su vez, en las soluciones acuosas no se obtuvo ^{210}Po residual en los espectros alfa.

La extracción con HCl 1 M resultó ser un método con alto rendimiento radioquímico (98 ± 3 %), lo que implica que se pueden tratar un número mayor de muestras. Sin embargo, al disolver muestras de tabaco en ácido clorhídrico concentrado, el material no se disolvió completamente, por lo cual se emplea una mezcla 1:1 de ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno, con lo que se obtienen mejores resultados; los autores destacan que al realizar una mezcla de ácido nítrico y peróxido de hidrógeno 1:1 se obtiene un mejor resultado para la digestión [40].

En este mismo estudio [40], realizan una digestión en microondas; a la mezcla de ácidos, para el caso HNO_3 con H_2O_2 y HCl con H_2O_2 , en lugar usar una plancha de calentamiento, como se hace de manera convencional en los otros estudios, esta mezcla se calienta en un digestor de microondas (SP-D Discovery de CEM) a una temperatura de 180°C. Además, los autores no realizan una deposición en discos de metal, sino que llevan a cabo un conteo sobre el producto de la digestión disuelto en 2 mL Triisooctilamina en tolueno al 5 %, operación que hacen por triplicado y con la adición de NH_3 hasta obtener un pH: 6, con el uso de un contador de centelleo líquido (LSC).

Deposición

La deposición se realiza en discos de metales como Cu, Ag, Ni, o aleaciones como el acero inoxidable; se aplica la mezcla disuelta en HCl, o previamente mezclada con H_2O destilada en un beaker, y se promueve la siembra espontánea del radionúclido por medio de agitación constante en una placa de calentamiento a 80°C, durante un periodo de 4-5 horas.

Se han realizado algunos estudios [48] donde se mide la eficiencia porcentual de deposición del ^{210}Po en estos materiales; los discos de A g son los que presentan mayor eficiencia con 84 %, en comparación con los discos de Ni y Cu, que presentan 72 % y 63 % respectivamente. Respecto a los discos de acero inoxidable, se da un porcentaje de eficiencia de 83 % [48], [49].

Después de la deposición, en los discos se realiza conteo por medio de espectrometría alfa o gamma. Algunos autores mencionan que los discos pueden ser lavados con agua desionizada o agua destilada, y secados con acetona o a temperatura ambiente [41], [42].

3.2.2.1 Medición por espectrometría alfa

Las partículas alfa emitidas por el ^{210}Po se miden por medio de un detector alfa, que permite la determinación de la concentración de actividad de este radionúclido, además de otros isótopos emisores alfa.

Generalmente, para calibrar los equipos se emplea como fuente estándar ^{241}Am (Americio-241), el cual presenta una actividad de 12,6 dps (desintegraciones por segundo);

se determina entonces la eficiencia de conteo de conteo del equipo [42], [51]. En el estudio presentado por [38] se menciona que, además del ^{241}Am para la estandarización, se puede emplear fuentes de ^{244}Cm y ^{239}Pu; también, se reporta un porcentaje de rendimiento y el límite inferior típico de detección (mBq g^{-1} / min).

En el experimento realizado por [40], se hace un ensayo directo sobre la solución orgánica obtenida tras la digestión mediante un cóctel de centelleo líquido (Ultima Gold AB, Perkin Elmer) para la medición en un LSC, que presenta ventajas debido a su alta eficiencia de conteo que, para las mediciones de partículas α, es típicamente >95 %. Al contar una solución orgánica directamente, basta mezclarla con un cóctel de centelleo y esperar un corto tiempo para la que la materia orgánica se desintegre; para este caso los tiempos de conteo son más cortos en comparación con los de conteo de partículas α en una cámara de vacío y además, la mayoría de los equipos de LSC permite la medición de ungran número de muestras, al tener incorporado un sistema cambiador de muestras [40]. Los autores que emplean una detección por centelleo sólido son [41], [42], y disuelven el producto de digestión en HCl 0,5 M.

Se identificó que la actividad del ^{210}Po en cigarrillo y en tabaco presenta variaciones entre los diferentes estudios, con valores reportados de aproximadamente 11,8 a 26,4 mBq/cigarrillo en diferentes productos. Estas diferencias pueden estar relacionadas con factores como la variedad de tabaco, las condiciones de cultivo, el origen geográfico y los procesos de manufactura. Así mismo, el tiempo transcurrido entre la cosecha de las hojas y el análisis o la comercialización puede influir en la actividad del ^{210}Po, debido a su vida media relativamente corta, de aproximadamente 138,4 días [29], [37]. Después de aproximadamente seis vidas medias, correspondientes a unos 830 días, la actividad del ^{210}Po puede alcanzar condiciones próximas al equilibrio con su precursor ^{210}Pb, siempre que no existan pérdidas. En este sentido algunos estudios [29], [41] han considerado la actividad del ^{210}Po en diferentes componentes del producto del tabaco, reportando actividades 32,8 ± 3,6 a 68,4 ± 5,9 mBq por cigarrillo, mientras que en el humo principal de los cigarrillos se encontraron valores de 15,2 ± 0,75 a 36,8 ± 2,1 mBq; para los bidis, los valores en el humo principal fueron de 20,7 ± 3,1 a 39,8 ± 4,0 mBq.

Otros estudios [2], [29] reportan que la actividad del ^{210}Po en plantas de tabaco es superior a la de otros radionúclidos, como los isótopos de uranio y el ^{226}Ra, cuyas concentraciones pueden ser hasta dos y diez veces menores, respectivamente. Esto se atribuye principalmente a la deposición aérea del ^{210}Po a partir del ^{222}Rn, además de su incorporación desde el suelo y del uso de fertilizantes fosfatados ricos en ^{238}U. Aunque otros radionúclidos, como los isótopos de torio, también pueden encontrarse en el tabaco, el ^{210}Po se considera una de las principales fuentes de radiactividad asociadas al consumo de cigarrillo y a sus efectos carcinogénicos.

Debido al tiempo transcurrido entre la recolección de la planta y el análisis, el ^{210}Po puede alcanzar equilibrio secular con su radionúclido padre, ^{210}Pb, generando concentraciones equivalentes entre ambos. Por esta razón, algunos estudios estiman la actividad de ^{210}Po a partir de la determinación de ^{210}Pb mediante espectrometría gamma [1], [35].

En la Tabla 5 se encuentran los resultados obtenidos de algunos autores que realizaron la medición de ^{210}Po en diferentes partes de cigarrillo, y se encuentra una concentración del radionúclido, como se indica en cada una de ellas. Cabe mencionar que estos estudios se hacen con el fin de verificar la efectividad que tiene el filtro del cigarrillo a la hora de intervenir el humo para eliminar ciertas sustancias, además de los residuos de ^{210}Po que pueden quedar en las cenizas y el valor del mismo que efectivamente se transfiere a la corriente principal. Como se muestra en dichos estudios, se detecta una deposición de ^{210}Po en el filtro de 0,8 a 2,4 mBq y en el residuo (cenizas), tras la quema del papel envoltorio y el tabaco del cigarrillo, de 0,8 a 3,33 mBq. Los reportes de [52] indican además que la actividad específica del ^{210}Po recuperada en las cenizas de las diferentes marcas de cigarrillos varió entre 11,8 % y 30,8 %. La baja actividad reflejada se debe a la volatilidad del polonio con la temperatura de quemado del cigarrillo (600- 800 °C), ya que el polonio se adhiere rápidamente a las partículas del humo y es parcialmente inhalado por los fumadores. Se reporta que 30 % del polonio total contenido en el cigarrillo se retiene en el filtro y en las cenizas, mientras que el porcentaje restante se distribuye entre la corriente principal y la corriente secundaria del humo, de acuerdo con las condiciones de combustión y las características del cigarrillo [52].

En la Tabla 7 se muestra la concentración de actividad del ^{210}Po en cigarrillos y tabaco y la dosis efectiva anual estimada. Además, se menciona el número de marcas analizadas por estudio; [8] hace una comparación entre las marcas chinas estudiadas con tres marcas de Estados Unidos.

Tabla 7. Nivel de actividad encontrado en el tabaco de diferentes marcas de cigarrillos y tabaco, dosis efectiva anual estimada

Marcas analizadas	País	Actividad ^{210}Po		Dosis efectiva μSv / año		Ref.
		mBq /cigarrillo	mBq /tabaco	Cigarrillo	Tabaco	
9	Eslovenia	14	-	61	-	[29]
-	Irán	26	-	408	-	[42]
8: cigarrillos 4: tabaco	India	15,2–36,8	20,7- 39,8	153,5-372,9	209,2-402,7	[41]
12 marcas chinas 3 marcas USA	China	23	-	80	-	[8]
18	Vietnam	26,4	-	223,0	-	[33]
10	Hungría	8,35	-	75,51	-	[20]
24	Japón	8	-	-	-	[11]
10	Italia	15,4	-	55 - 81	-	[35]
17	Serbia	32,8	-	171	-	[1]
11	Cuba	11,81	12,46	60	55	[37]
7	Hungría	13,97	-	8,36	-	[38]

3.2.2.2 Dosis efectiva anual

La dosis efectiva anual estimada asociada a la inhalación de ^{210}Po por consumo de cigarrillo presenta variaciones entre los estudios, con valores reportados de 8,36 μSv/año [38] hasta 408 μSv/año [53]. Estas diferencias pueden estar relacionadas con las condiciones para la estimación de las dosis, entre ellas el número de cigarrillos consumidos, la fracción de ^{210}Po transferida al humo y la cantidad inhalada. Por tanto, la comparación de las dosis debe considerar las condiciones y supuestos en cada estudio. La exposición al ^{210}Po resulta de interés radiológico debido a su emisión de partículas alfa de alta transferencia lineal de energía (LET), capaces de producir una elevada densidad de ionización en distancias muy cortas y por tanto generar daño en el ADN de las células del epitelio respiratorio.

La actividad que se calcula en los diferentes ensayos, tanto en cigarrillo como en tabaco, permite estimar la dosis efectiva anual. Engeneral, algunos autores [29], [42] calculan en primera instancia la actividad anual de ingesta por consumo (Bq/año), de acuerdo con la concentración de ^{210}Po/ cigarrillo calculado (mBq/cigarrillo), según el número de cigarrillos fumados por día. La base es una cajetilla diaria (20 cigarrillos/día) para adultos, mientras algunos autores trabajan con 10 cigarrillos por día para jóvenes [37], en un tiempo determinado de 365 días/año. En los estudios de [1], [40], se estima mediante los gramos de cigarrillo o tabaco consumidos, con un valor de referencia de 20 g de tabaco por día, de acuerdo con el peso del tabaco en los cigarrillos y con un consumo de 20 de ellos por día en tabaco/cigarrillo y un valor de 27 g día/tabaco; por tanto, en estos casos se toma la actividad específica en mBq/g.

Es imprescindible estimar el porcentaje de ^{210}Po transferido a la corriente principal: diferentes autores reportan entre 50 % a 70 % [18], [20], [33], [40], [41], [42], [43] de transferencia. No obstante, en el estudio realizado por [18] la transferencia se calculó con una máquina para fumar que contó con un protocolo que consiste en una inhalación de 2 s, 50 ml cada 30 s, con un total de 13 a 16 caladas por cada cigarrillo. Esto se recolectó en filtros de membrana (Millipore tipo AA, tamaño de poro de 0,8 μm, Billerica, MA) y presentó un porcentaje de transferencia de ^{210}Po al humo de 13 %. Para este caso no se encontraron razones específicas para la diferencia en dichos porcentajes de transferencia; sin embargo, puede atribuirse al tipo de filtro y los protocolos empleados durante el ensayo, además de las características del tabaco analizado.

En la Tabla 8 se presentan las marcas de cigarrillo y tabaco trabajadas en los estudios analizados. Respecto a los tabacos que se comercializan en otros países, en la India se encontró

un tabaco que es bastante comercializado, conocido como Bidi. Por otro lado, en Arabia se comercializa uno llamado Moassel y se trabaja también un tabaco de tipo oriental. En el estudio realizado por [17] se reportan concentraciones para el tabaco Virginia, que se comercializa y se distribuye en Colombia, así como las marcas de cigarrillo Marlboro Gold y Marlboro Rosse. En Colombia, las marcas más vendidas son L&M menthol, L&M silver, Rothmans gris, Marlboro gold, Lucky strike plateado, Lucky red, Lucky strike flow, Marlboro ice, Marlboro rojo, L&M azul, Pielroja, Rothmans azul, Royal.

Tabla 8. Actividad de ^{210}Po presente en diferentes marcas de cigarrillo y tabaco analizadas

Marca analizada	Actividad ^{210}Po mBq / tabaco	Referencia
Marlboro Gold	15,7 ± 1,0	[11]
Marlboro Rosse	18,9 ± 1,2	
Camel Blu	13,4 ± 0,7	
Chesterfield Rosse	14,1 ± 1,0 14,3	
Diana Blu	± 1,2	
Diana Rosse	16,3 ± 1,5	
Merit Gialle	11,9 ± 1,1	
Winston Blu	11,6 ± 1,0	
MS Gialle	12,9 ± 1,0	
MS Rosse	20 ± 3	
Bidis	20,7 ± 3,1 a 39,8 ± 4,0	[31]
Moassel	13,14 ± 0,87	[39]
Virginia	11,3 ± 1,1-15,2 ± 0,1	[17]
Tabaco oriental	15,7 ± 1,5-17,5 ± 2,8	

3.2.3 Análisis de ^{210}Po en humo de cigarrillo

Como se mencionó anteriormente, el humo del tabaco es una mezcla compleja, dinámica y reactiva que contiene un estimado de 8.000 compuestos químicos. Esta mezcla tóxica y carcinógena probablemente es la fuente más importante de exposición y representa un alto factor de riesgo para la salud humana. Según estimaciones de la OMS, en el 2005 el consumo de tabaco fue responsable de aproximadamente 5,4 millones de muertes prematuras a nivel mundial, principalmente asociadas con enfermedad cardiovascular, la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y varios tipos de cáncer, en particular el cáncer de pulmón [55]. Aunque los componentes de los cigarrillos que causan cáncer de pulmón son conocidos, entre los que se encuentran sustancias químicas como el alquitrán, el cadmio, la acetona, el arsénico, etc. se ha establecido que los isótopos radiactivos también son componentes carcinógenos muy importantes y se encuentran en el 5 % del humo de cigarrillo [56]; entre estos compuestos peligrosos del humo de tabaco, el ^{210}Po se cita invariablemente. Algunos autores afirman que es responsable de 4 cánceres de pulmón en cada 10,000 fumadores [57]. El segundo factor de riesgo más importante del cáncer de pulmón después del tabaquismo activo es el tabaquismo pasivo, ya que el fumar afecta no solo al usuario, sino también a las personas en el medio ambiente a través de la inhalación de humo [56].

El ingreso de ^{210}Po al cuerpo empieza desde el encendido del cigarrillo. En el momento en que se respira para fumar se aumenta la temperatura del tabaco, produciendo el humo que contiene 5 % de fase particulada conocida como alquitrán y 95 % de fase de vapor. Los radionúclidos presentes en el tabaco tienden a asociarse predominantemente con la fase particulada del humo [56]. Hay una gran variedad de resultados respecto a la cantidad de ^{210}Po que puede ingresar al cuerpo humano, desde 5 % hasta 50 %. Esto puede deberse a diferentes causas: por un lado, están implicados los diferentes protocolos de medición de humo; también, durante las últimas décadas el diseño y la fabricación de cigarrillos han experimentado un considerable desarrollo y cambio, con lo que el grado de entrada de ^{210}Po al humo del cigarrillo y luego a los pulmones probablemente depende de varios parámetros [58]. Teniendo en cuenta el factor de riesgo del cáncer mortal debido a la exposición a la radiación del pulmón (tiempo de exposición de 30 años), el riesgo promedio estimado de cáncer mortal se estima en $1{,}5 \times 10^{-4}$, representado aproximadamente 1,5 casos por cada 10.000 personas expuestas. Se encontró que el 6,4 % de la actividad total del ^{210}Po por partículas gruesas (dp > 2,23 µm) del cigarrillo, tiene capacidad de penetración hasta el tracto respiratorio superior, y el 91,2 % de la fracción fina (0,1 – 2,23 µm) es capaz de infiltración pulmonar profunda y deposición alveolar [59].

Diferentes autores han realizado estudios para determinar la cantidad estimada de ^{210}Po que las personas inhalan como resultado de fumar cigarrillo. En la Tabla 9 se muestra una descripción de los estudios mencionados.

Tabla 9. Artículos seleccionados en la categoría "análisis ^{210}Po en humo de cigarrillo"

Referencia	Qué se analiza / tipo de muestra	Tratamiento de muestra/ método
[58]	^{210}Po en muestras de 7 marcas de cigarrillo y cálculo de la dosis efectiva anual	Absorción de ^{210}Po mediante máquina de fumar diseñada. Digestión ácida con HNO_3, HCl y agua destilada.
[59]	Masa fraccionada y concentración de actividad de ^{210}Po en el humo de cigarrillo de 3 marcas de cigarrillo.	Recolección de humo por impactador de cascada. Digestión ácida con HF, $HClO_4$ y HNO_3, secado y dilución con HCl.
[29]	^{210}Po en muestras de humo de 9 marcas de cigarrillo	Recolección de humo por burbujeadores de vidrio. Dilución en ácido, secado y separación por resina, dilución ácida.
[32]	^{210}Po en muestras de humo de 12 marcas de cigarrillo	Recolección de humo por una máquina de fumar en filtros de membrana. Digestión ácida con HNO_3, dilución en HCl.

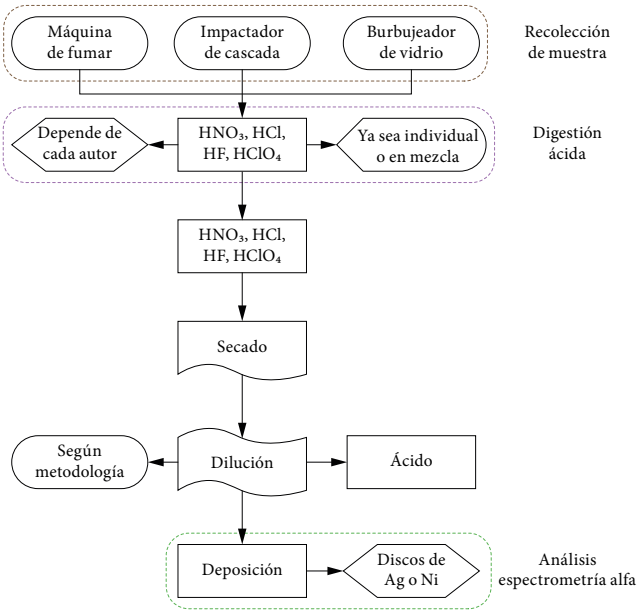
Demir y Okutan [56] afirman que medir el ^{210}Po en el humo del cigarrillo es difícil incluso en condiciones estandarizadas. Las máquinas para fumar disponibles comercialmente no están diseñadas para este propósito, pues los componentes medibles son nicotina, amoníaco, humectantes (propano-1,2-diol, glicerol (propano-1, 2,3-triol) y trietilenglicol (2,2-etilendioxibis (etanol), etc. Esto indica que, en el caso del estudio realizado, se hizo uso de una máquina de fumar que permite la absorción del ^{210}Po que normalmente tendría una persona al momento de fumar, a través de cuatro tanques de solución absorbente, en este caso HCl 2 M (determinado a partir de ensayos eficiencia de absorción).

Tiwari et al. [59] recolectaron el humo del cigarrillo del corriente principal fraccionado en tamaños mediante un impactador de cascada de configuración variable (VCCI) y con discos de papel filtro de fibra de vidrio como superficie de impacto para las partículas. Dichos papeles se cocieron en un horno a más de 450 °C de temperatura para eliminar cualquier impureza volátil y prepararlos para el posterior análisis del ^{210}Po.

Por otro lado, las muestras tomadas por [29], se obtuvieron a través de tres burbujeadores de vidrio conectados consecutivamente; estos contenían HCl 2 M para la absorción del radionúclido del humo del cigarrillo. El medio se seleccionó con el argumento de ser el adecuado para realizar la separación del polonio mediante una resina. Para este experimento se colocó un cigarrillo en el lado de entrada de los burbujeadores, y los voluntarios aspiraron el humo a través de los burbujeadores desde el lado de salida para simular el hábito normal de fumar.

Dentro de las metodologías utilizadas por los diferentes estudios se puede identificar una tendencia del tratamiento de las muestras para su posterior análisis, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Metodología empleada por los autores en el análisis de diferentes muestras de humo



Inicialmente, el humo de la corriente principal es recolectado mediante absorción según sea la metodología de cada autor. Luego, se realiza una digestión ácida con HNO_3, HCl, HF y $HClO_4$ hasta lograr sequedad en un baño de agua a temperatura controlada; esta digestión se realiza con los ácidos solos o en mezcla y su uso es trascendental, ya que pueden disolver la fibra de vidrio, eliminar la contaminación orgánica y traer metales en forma elemental que pueden interferir [59]. En el caso de la metodología usada por [29], se realiza una separación de ^{210}Po por medio de una resina. Enseguida se realiza una dilución con HCl y se adiciona ácido ascórbico para reducir el Fe^{3+}, ya que también compite con el polonio para depositarlo en los discos. La dilución se calienta a temperaturas entre 80 – 90°C para realizar la respectiva deposición en los discos, según sea la preferencia.

Para el análisis de la dosis efectiva anual de radiación causada por el ^{210}Po en el humo de cigarrillo, se consideró la cantidad de 20 cigarrillos bajo la premisa de que un fumador

frecuente consume un paquete de cigarrillos por día, lo que facilita la comparación con lo estimado por diferentes autores. La dosis de radiación efectiva evaluada para un fumador debido al hábito de fumar está muy influenciada por la selección de la dosis de radiación efectiva recomendada por unidad de ingesta, así como por el factor seleccionado para la transferencia de un radionúclido al cuerpo de un fumador [29].

3.2.4 Análisis de ^{210}Po en fumadores

La tasa de dosis de exposición del ser humano al ^{210}Po se ha evaluado a partir del análisis de muestras de varias naturalezas obtenidas de la participación de ungrupo de personas, en su mayoría fumadores y exfumadores. Cinco estudios realizados desde esta perspectiva se encuentran caracterizados en la Tabla 10. Se registraron en muestras como sangre, orina, células y en dientes de fumadores, al considerar que el tabaquismo es un factor responsable del contenido de ^{210}Po en tejidos humanos [60]. Dichos análisis han sido determinados resaltando que las diferencias significativas del contenido de ^{210}Po varían, según sean grupos de fumadores o grupos de no fumadores, lo que también puede atribuirse al hecho de que la incorporación de ^{210}Po en el cuerpo humano normal puede diferir de una persona a otra. Además, después de la incorporación de radionúclidos en el cuerpo, estos pueden translocarse, desintegrarse o excretarse. Tales procesos pueden ocurrir a diferentes velocidades y los efectos de futuros decaimientos deben ser considerados al estimar la dosis que resulta de una incorporación particular [61]. La entrada de ^{210}Po se asocia con factores ambientales como lugar de residencia y empleo, así como con el hábito de fumar. El período para fumar, el tipo de material para fumar y la cantidad de cigarrillos por día pueden tener diferentes impactos en las variaciones de las concentraciones de actividad de ^{210}Po en el cuerpo [10]. Por ello, se han utilizado diferentes muestras para determinar el polonio que se encuentra presente en el cuerpo de los fumadores y no fumadores.

En el trabajo [61], se realizó un análisis en muestras de orina al evaluarse como herramienta importante para la estimación de la dosis interna, ya que puede ser recolectada con facilidad y es un tipo de muestra manejable para análisis en laboratorio. El análisis de orina se puede utilizar en una situación de respuesta de emergencia o como parte de un programa de evaluación de rutina; los autores demostraron que las concentraciones de actividad de ^{210}Po y los niveles de metales traza en la orina pueden ser más altos para los hombres que para las mujeres, y que esta diferencia podría depender de las variaciones en el estilo de vida en lugar de cualquier diferencia en el metabolismo [10]. Por otro lado, [62] sugiere que a partir de la cantidad de ^{210}Po excretada en la orina, por métodos bien establecidos, es posible calcular la cantidad de ^{210}Po que ingresó originalmente al cuerpo y al utilizar los factores de conversión de dosis apropiados, se obtendrá la dosis de radiación resultante.

Tabla 10. Artículos seleccionados en la categoría "análisis ^{210}Po en fumadores"

Referencia	Qué se analiza / tipo de muestra	Tratamiento de muestra/ método
[10]	^{210}Po en muestra de sangre de 43 pacientes, fumadores y no fumadores, con cardiopatía isquémica	Mineralización con HNO_3, secado y dilución con HCl 0,5 M. Reducción de Fe^{3+} con ácido ascórbico. Transferencia a PTEE para auto-deposición.
[63]	^{210}Po en muestra de sudor de 42 personas	Digestión ácida con HCl, HNO_3 y HF, secado y coprecipitación de con MnO_2 en agua, la mineralización de muestras, separación y purificación secuencial en resinas de intercambio aniónico.
[62]	^{210}Po en muestra de orina de 132 personas, entre ellos 39 fumadores y 67 no fumadores	Digestión ácida con HCl y HNO_3 a 150°C, secado y dilución con HNO_3 y H_2O_2 para la liberación del polonio. Tratamiento con más acido.
[60]	^{210}Po en muestra de dientes de 30 personas, entre fumadores y no fumadores	Ceniza húmeda con HNO_3 y H_2O_2 a 903°C, secado y dilución con HNO_3 y agua, separación de polonio por centrifugación, tratamiento con HCl, adición de ácido ascórbico
[61]	^{210}Po en muestra de orina de 19 personas	Digestión ácida con HNO_3 y HCl, co-precipitación con MnO_2

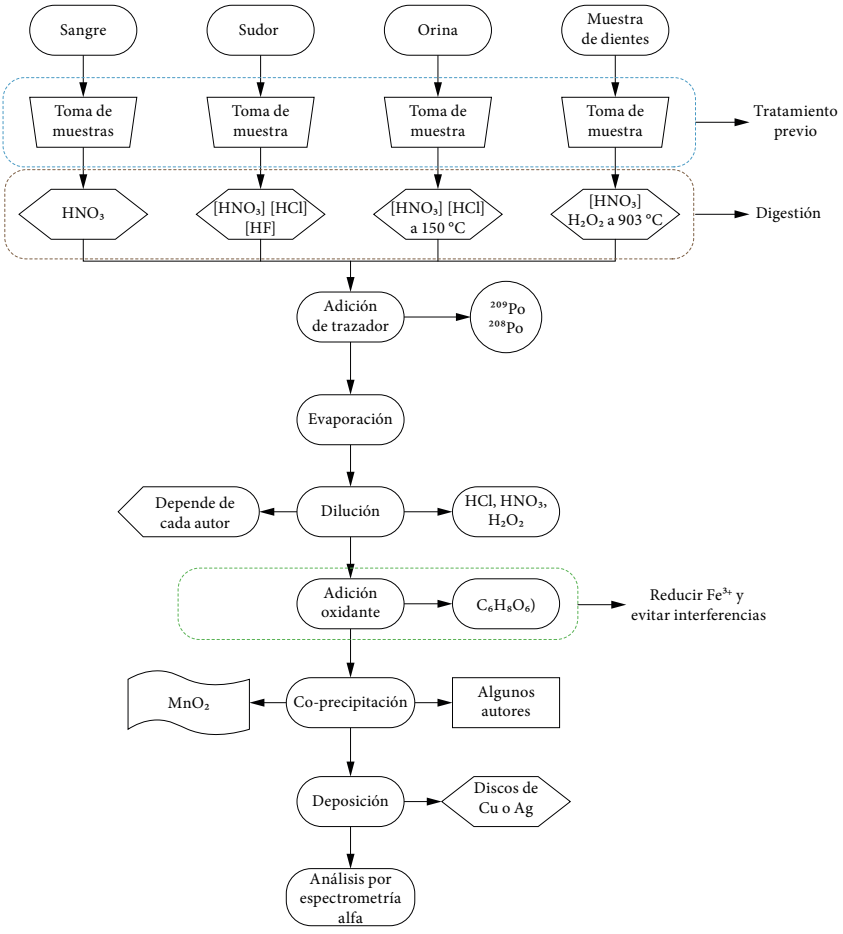
Según [63], la excreción de las trazas metálicas con el sudor puede ser mayor con la transpiración producida por la realización de ejercicios diarios y/o el trabajo en ambientes cálidos; en el caso del ^{210}Po, la piel recibe el 5 % del polonio presente en el plasma. Cuando se deposita en la piel, se elimina ^{210}Po con una vida media de 50 días, con 50 % de excreción a través del cabello y el sudor, y 50 % de retorno al plasma; lo anterior sugiere que la sudoración no es la vía principal para la eliminación del polonio del cuerpo humano. Respecto a los resultados, afirman que cuando la cantidad de cigarrillos fumados es inferior a 10 por día, las concentraciones de actividad de ^{210}Po es similar para fumadores

y no fumadores, mientras que las concentraciones de actividad de ^{210}Po en el cuerpo aumentan significativamente cuando se fuman más de 20 cigarrillos por día. Se especifica que los resultados para la actividad de ^{210}Po en las muestras de sudor varía significativamente según la edad de las personas. Se encontró una concentración mayor para personas en edades de 35 a 45 años, a diferencia de personas con edades entre 23 y 30 años que participaron en el estudio; esto puede explicarse por la aparición de ^{210}Po que proviene de la desintegración de ^{210}Pb y ^{226}Ra que se acumula en los huesos durante la vida de una persona [64].

El análisis también se ha realizado en muestras de dientes, debido a su utilidad como bioindicadores de la exposición interna a estos radionúclidos. Su análisis permite estimar la carga corporal acumulada y aportar información sobre una posible incorporación crónica de los radionúclidos en el organismo. La concentración de actividad promedio determinada fue de 3,94 ± 2,3 mBq/ g para fumadores y en comparación con no fumadores fue menor, lo que indicó que esta concentración depende del hábito de fumar. Además, se informó que la captación de ^{210}Po en los dientes se encuentra relacionada positivamente con la edad.

Diversos estudios [57], [62], [65] han reportado el análisis de ^{210}Po en muestras de saliva, cabello y semen, principalmente en personas expuestas por consumo de productos de tabaco sin humo, ingestión directa de ^{210}Po o consumo de pescados y mariscos. Estas matrices biológicas han permitido evaluar la exposición a radionúclidos desde diferentes fuentes y podrían representar una alternativa importante para futuros estudios en fumadores. En particular, el cabello ha mostrado relación con la incorporación diaria de ^{210}Po [65], mientras que estudios en semen han explorado su posible asociación con infertilidad relacionada con el tabaquismo [57], aunque los resultados obtenidos no fueron concluyentes debido a limitaciones en la selección de la población estudiada.

Figura 5. Metodología empleada por los autores en el análisis de diferentes muestras biológicas de fumadores



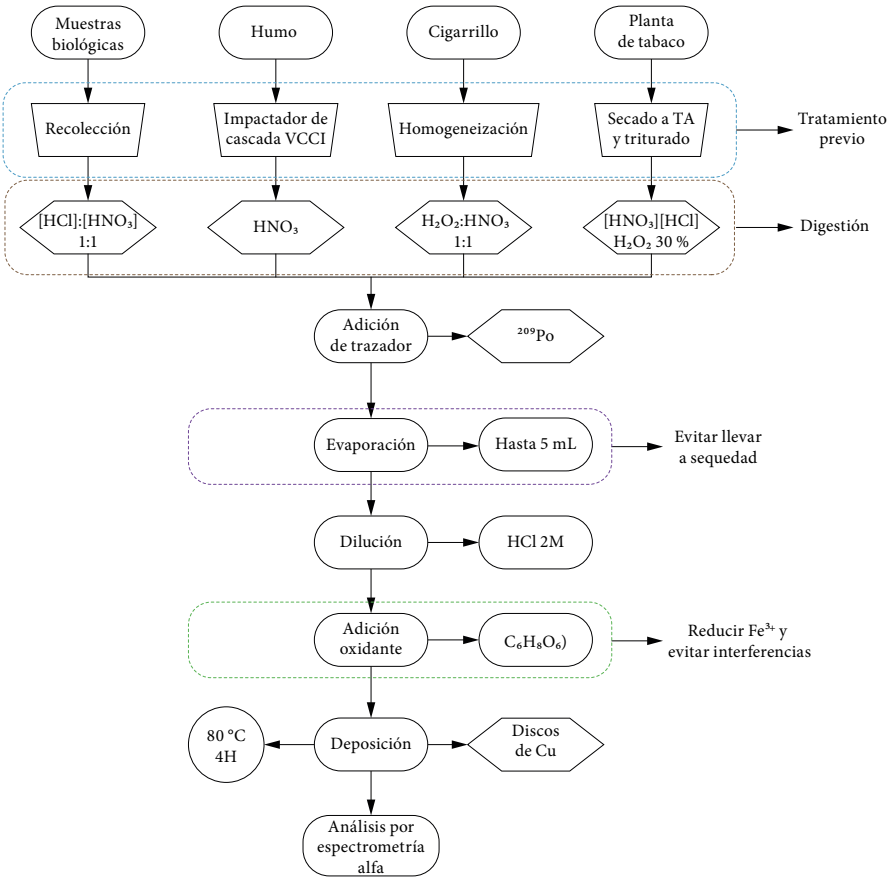
Ahora bien, dentro de las metodologías utilizadas para el tratamiento previo de las muestras en la identificación de ^{210}Po mediante espectrometría alfa se evidencia que inicialmente, en cada una implementadas por los diferentes autores, como se muestra en la Figura 5, se realizó una digestión ácida de la muestra, que en estos casos utilizan HNO_3, HCl o HF, de manera individual o en mezcla; dicha digestión es necesaria para solubilizar ^{210}Po que puede ser ligado de manera orgánica en la matriz de la muestra [61]. Posteriormente, o durante la etapa de digestión según el procedimiento empleado, se adiciona una cantidad conocida del trazador como indicador del rendimiento químico (^{209}Po o ^{208}Po, según diferentes autores) [62]. Luego de la digestión se realiza una evaporación hasta sequedad de la muestra; sin embargo, en el estudio de [61] no se dejó que la muestra se secara después de la digestión, con el fin de evitar pérdidas de polonio como resultado de la volatilización. Seguidamente se realiza la dilución de la muestra con HCl, seguida de una adición de ácido ascórbico para reducir el Fe^{3+} a Fe^{2+} y eliminar su interferencia. Se trata de un procedimiento ineludible, ya que una característica clave de la preparación de la fuente es evitar las interferencias de los iones que compiten en el proceso de deposición, en particular el Fe^{3+} que, de lo contrario, puede causar grandes depósitos en los discos y, después, puede conducir a una pérdida de la eficiencia de conteo y la resolución durante la medición por espectrometría alfa. [60] El polonio fue depositado en los diferentes discos (A g o Cu, según autores) a temperaturas controladas que oscilaban entre 80 – 90°C.

Las recuperaciones de polonio en muestras analizadas oscilaron entre 58 % y 98 % para el caso del análisis en muestras de sangre, mientras que los resultados de las concentraciones de ^{210}Po en las muestras analizadas se proporcionan con la desviación estándar (SD) calculada para un intervalo de confianza del 95 %. Para el método realizado en el análisis de muestras de sudor, se obtuvo un rendimiento del 85 % y para el análisis de muestras de orina, se obtuvo un rendimiento del 60,1 % [62] y 85 % [61]; *La* recuperación del trazador de ^{208}Po para Po en muestras de orina se consideró razonable, dado que las muestras se someten a múltiples pasos en la preparación y purificación de Po.

3.3. Propuesta metodológica

Teniendo en cuenta la metodología utilizada por los diferentes autores, nos permitimos proponer una metodología (Figura 6) que reúne cada uno de los pasos, y considera los más viables para la posterior realización de estos estudios en plantas de tabaco, cigarrillos (y/o tabaco) humo de cigarrillo y fumadores en Colombia.

Figura 6. Diagrama de flujo para el análisis de ^{210}Po en diferentes tipos de muestras



La metodología planteada a partir del análisis de los artículos de la presente revisión servirá para el análisis de ^{210}Po en muestras biológicas, humo cigarrillo y planta de tabaco. La selección de los procesos y reactivos se realizó de acuerdo con el uso frecuente de los mismos y la eficiencia en los ensayos realizados por los diferentes autores. La metodología para cada una de las matrices que se analizan difiere en cuanto al tratamiento previo de la muestra: para el caso de las muestras biológicas, es necesario seguir el procedimiento descrito en detalle para cada tipo muestra y fluido; en cuanto al humo, de acuerdo con los resultados presentados por [59], se recomienda recolectar las muestras de humo con un impactador de cascadas. El tratamiento de la muestra para el análisis del cigarrillo se recomienda con una proporción de 5 gramos que debe ser homogenizada; las hojas de tabaco se secan a temperatura ambiente y se trituran.

Posterior al tratamiento de la muestra, se debe realizar una digestión ácida de la misma; para el caso, el volumen de los ácidos empleados se define según el tipo de muestra, ya que se verifica si la misma se degradó por completo. Se debe usar de 25 mL a 100 mL del ácido (HNO_3 y HCl) solo o en mezcla con adición de H_2O_2, y la digestión se realiza a una temperatura de 80°C-90°C con la adición de un trazador con concentración conocida para evaluar la pérdida del analito. La muestra se llevará a un volumen de 5 mL por evaporación controlada para evitar sequedad. Para el proceso de deposición del ^{210}Po, se diluye la muestra en HCl al 0,5 M y se adiciona ácido ascórbico para reducir interferencias de algunos iones como Fe^{3+}; luego, se introduce un disco de cobre en la solución y se somete a agitación por 4h a una temperatura de 80 °C. finalmente, se realiza una lectura por espectrometría alfa.

4. CONCLUSIONES

La producción científica relacionada con el ^{210}Po se concentra principalmente en Europa y Asia, impulsada por el interés sanitario en el control del tabaquismo y la presencia de importantes industrias tabacaleras en países como China y Polonia. En contraste, en América Latina son limitados

los estudios que relacionan el ^{210}Po con cáncer, y predominan investigaciones enfocadas en compuestos químicos del cigarrillo, como nicotina y alquitrán. La mayoría de las publicaciones se encuentran en ScienceDirect y PubMed Central, especialmente en revistas especializadas como Journal of Environmental Radioactivity y Radiation Protection Dosimetry.

En este contexto, se requiere fortalecer y ampliar la investigación sobre la presencia, transferencia y efectos radiológicos del ^{210}Po asociado al consumo de tabaco en América Latina, con el fin de generar evidencia que contribuya a una mejor caracterización de la exposición a este radionúclido en la población.

La exposición a radiación alfa proveniente del ^{210}Po asociada al consumo de cigarrillo constituye un factor de interés radiológico debido a su incorporación mediante la inhalación de humo y posterior deposición en el sistema respiratorio. La evaluación del riesgo asociado debe considerar la dosis acumulada, la distribución del radionúclido en el organismo y las condiciones de exposición. Los estudios revisados indican que la exposición prolongada al ^{210}Po y ^{210}Pb presente en el humo de cigarrillo puede contribuir al riesgo radiológico asociado al consumo de cigarrillo. En sangre se han reportado actividades totales de 362 ± 36 mBq para no fumadores y de 422 ± 34 mBq para fumadores.

Asimismo, se destaca la importancia de emplear metodologías analíticas precisas y reproducibles para la determinación de ^{210}Po en matrices asociadas al tabaquismo. La mayoría de los métodos reportados incluyen digestión ácida de la muestra, deposición sobre discos metálicos y posterior cuantificación mediante espectrometría alfa, como técnicas consideradas altamente adecuadas para el análisis de muestras biológicas, tabaco, cigarrillos y humo de cigarrillo.

En Colombia, el consumo de productos de tabaco constituye un problema de salud pública que sustenta la necesidad de fortalecer la investigación sobre la presencia de ^{210}Po en estos productos. La generación de evidencia sobre su actividad, transferencia y exposición interna permitiría ampliar el conocimiento disponible sobre la contribución de este radionúclido a la exposición radiológica asociada al consumo de tabaco en el país.

Referencias

[1] D. Marković, D. Todorović, A. Onjia, y L. Janković, "Natural radionuclides *in cigarette* tobacco from Serbian market and effective dose estimate," *Nuklearna Medicina*, vol. 48, no. 2, pp. 1–5, 2015.

[2] P. Chauhan y R. P. Chauhan, "Measurement of fertilizers induced radioactivity *in tobacco* plants and elemental analysis using ICAP-AES," *Radiat. Meas*, vol. 63, pp. 6–11, 2014. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2014.02.006.

[3] B. Cai, Z. Li, R. Wang, Z. Geng, Y. Shi, y S. Xie, "Emission level of seven mainstream smoke toxicants from cigarette with variable tobacco leaf constituents," Regul. Toxicol. Pharmacol., vol. 104, Art. no. 104169, 2019. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.01.032.

[4] M. Ballén, A. Jagua, D. L. Álvarez, y A. Rincón, "El cigarrillo: implicaciones para la salud," *Rev. Fac. Med.*, vol. 54, no. 3, pp. 191–205, 2006.

[5] A. C. Peres y G. Hiromoto, "Evaluation of ^{210}Pb and ^{210}Po *in cigarette* tobacco produced in Brazil," *J. Environ. Radioact.*, vol. 62, no. 1, pp. 115–119, 2002. https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00146-1.

[6] J. P. Gwynn, A. Nalbandyan, y G. Rudolfsen, "^{210}Po, ^{210}Pb, ^{40}K and ^{137}Cs in edible wild berries and mushrooms and ingestion doses to man from high consumption rates of these wild foods," *J. Environ. Radioact.*, vol. 116, pp. 34–41, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.08.016.

[7] R. L. Prueitt, J. E. Goodman, y P. A. Valberg, "Radionuclides *in cigarette*s may lead to carcinogenesis via p16INK4a inactivation," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 100, no. 2, pp. 157–161, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.11.008.

[8] A. Berthet et al., "^{210}Po and ^{210}Pb content in the smoke of heated tobacco products versus conventional cigarette smoking," Sci. Rep., vol. 12, Art. no. 10314, 2022. https://doi.org/10.1038/s41598-022-14117-0.

[9] M. Nain, R. P. Chauhan, y S. K. Chakravarti, "Alpha radioactivity *in tobacco* leaves: effect of fertilizers," *Radiation Measurements*, vol. 43, no. 6, pp. 883–886, 2008. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.04.034.

[10] B. Skwarzec, A. Boryło, y D. Strumińska, "^{234}U and ^{238}U isotopes in water and sediments of the southern Baltic," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 61,

no. 3, pp. 345–363, 2002. https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00144-8.

[11] V. Zagà, M. S. Cattaruzza, P. Martucci, R. Pacifici, R. Trisolini, P. Bartolomei, R. Giacobbe, M. Patelli, D. Paioli, M. Esposito, V. Fabbri, S. Gallus, y G. Gorini, "The 'Polonium In Vivo' study: Polonium-210 in bronchial lavages of patients with suspected lung cancer," *Biomedicines*, vol. 9, no. 1, Art. no. 4, Dec. 2020. https://doi.org/10.3390/biomedicines9010004.

[12] H. Mussalo-Rauhamaa y T. Jaakkola, "^{239}Pu, 240Pu and ^{210}Po contents of tobacco and cigarette smoke," *Health Phys.*, vol. 49, pp. 296–301, 1985.

[13] G. Urrútia y X. Bonfill, "PRISMA declaration: a proposal to improve the publication of systematic reviews and meta-analyses," *Med. Clín.*, vol. 135, no. 11, pp. 507–511, 2010. https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015.

[14] B. Hutton, F. Catalá-López, y D. Moher, "The PRISMA statement extension for systematic reviews incorporating network meta-analysis: PRISMA-NMA," *Med. Clin.*, vol. 147, no. 6, pp. 262–266, 2016. https://doi.org/10.1016/j.medcli.2016.02.025

[15] Organización Mundial de la Salud, *Convenio Marco de la OMS para el Control del Tabaco*. Ginebra, Suiza: OMS, 2003. [En línea]. Disponible: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42813/9243591010.pdf

[16] U.S. Environmental Protection Agency, "Radioactivity *in tobacco*." [En línea]. Disponible: https://www.epa.gov/radtown/radioactivity-tobacco

[17] P. Planinšek, L. Benedik, y B. Smodiš, "Comparison of various dissolution techniques for determination of Po-210 in biological samples," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 81, pp. 53–56, 2013. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.03.008.

[18] S. R. Schayer, Q. Qu, Y. Wang, and B. S. Cohen, "^{210}Pb: a predictive biomarker of retrospective cigarette smoke exposure," *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*, vol. 19, no. 2, pp. 338–350, Feb. 2010, doi: https://doi.org/10.1158/1055-9965.EPI-09-1008.

[19] P. Vrecek, L. Benedik, y B. Pihlar, "Determination of Pb-210 and Po-210 in sediment and soil leachates and in biological materials using a Sr-resin column and evaluation of column reuse," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 60, no. 6, pp. 717–723, 2004. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2003.11.088.

[20] C. Kranrod, Y. Tamakuma, M. Hosoda, S. Tokonami, "Importance of discriminative measurement for radon isotopes and its utilization in the environment and lessons learned from using the RADUET monitor," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 11, Art. no. 4141, 2020. https://doi.org/10.3390/ijerph17114141.

[21] J. Mandić L, M. Đolić, D. Marković, D. Todorović, A. Onjia, S. Dragović, "Natural radionuclides in cigarrette tobacco from Serbian market and effective dose estimate from smoke inhalation,". *Radiation protection dosimetry*, vol 81, no 1, pp 111-115, 2016. https://doi.org/10.1093/rpd/ncv010

[22] A. Boryło y G. Romańczyk, "^{210}Po secretion from sweat glands," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 167, pp. 70–74, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.11.004. [23] A. Boryło, B. Skwarzec, y G. Olszewski, "The radiochemical contamination (^{210}Po and ^{238}U) of zone around phosphogypsum waste heap in Wiślinka (northern Poland)," Nukleonika, vol. 60, no. 3, pp. 37–41, 2011.,

[24] L. Al Attar, M. Al-Oudat, S. Kanakri, Y. Budeir, H. Khalily, y A. Al Hamwi, "Radiological impacts of phosphogypsum," *J.of Environ. Manage.*, vol. 92, no. 9, pp. 2151–2158, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.03.041.

[25] J. Galhardi , R. García-Tenorio, y D. Marcos, "Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 177, pp. 37–47, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001.

[26] M. S. Al-Masri, A. Al-Hamwi, Z. Eadan, y Y. Amin, "Transfer factors of polonium from soil to parsley and mint," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 101, no. 12, pp. 1038–1042, 2010. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.08.002.

[27] J. E. Brown, R. Gjelsvik, P. Roos, J. A. Kålås, I. Outola, y E. Holm, "Levels and transfer of ^{210}Po and ^{210}Pb in Nordic terrestrial ecosystems," *J. Environ. Radioact.*, vol. 102, no. 5, pp. 430–437, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2010.06.016.

[28] G. Jia, "Simultaneous determination of ^{210}Po and ^{210}Pb in solid samples: a new method for ^{210}Pb determination," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 137, pp. 12–17, 2018. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2018.02.019.

[29] D. Kubalek, G. Ser, L. Benedik, y Z. Jeran, "Radioactivity of cigarettes and the importance of ^{210}Po and thorium isotopes for radiation dose assessment due to smoking," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 156, pp. 97–104, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.015.

[30] B. Xia et al., "Investigation of the chemical compositions *in tobacco* of different origins and maturities at harvest by GC-MS and HPLC-PDA-QTOF-MS," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 62, no. 22, pp. 4979–4987, 2014. https://doi.org/10.1021/jf5009204.

[31] G. Wesley, "Bioaccumulation of ^{210}Po and ^{210}Pb in cephalopods collected from Kudankulam (Southeastern coast of Gulf of Mannar, India) and assessment of dose in human beings," *Radiation Prot. Dosimetry*, vol. 147, no. 3, pp. 457–466, 2010. https://doi.org/10.1093/rpd/ncq447.

[32] S. Schayer, B. Nowak, Y. Wang, Q. Qu, y B. Cohen, "^{210}Po and ^{210}Pb activity in Chinese cigarettes," *Health Phys.*, vol. 96, no. 5, pp. 543–549, May 2009. https://doi.org/10.1097/01.HP.0000342164.08042.9c.

[33] T. N. Tran, C. Le, y V. Chau, "Po and ^{210}Pb activity concentrations *in cigarette*s produced in Vietnam and their estimated dose contribution due to smoking," *JPS Conf. Proc.*, vol. 1, Art. no. 019002, 2014. https://doi.org/10.7566/JPSCP.1.019002.

[34] R.-C. Begy, J. Somlai, T. Kovacs, O. A. D. Rusu, y C. Cosma, "The *activity concentration of* ^{210}Po in Romanian commercial cigarettes and the radiation exposure estimation derived from their regular consumption," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 157, no. 1, pp. 120–124, Nov. 2013. https://doi.org/10.1093/rpd/nct121.

[35] A. Sakoda, K. Fukao, A. Kawabe, T. Kataoka, K. Hanamoto, K. Yamaoka , "Radioactivity of ^{210}Pb in Japanese cigarettes and radiation dose from smoking inhalation," J. Radiat. Res., vol. 53, no. 1, pp. 109–113, 2012.

[36] M. Taroni, V. Zagà, P. Bartolomei, E. Gattavecchia, R. Pacifici, P. Zuccaro, y M. Esposito, "Po concentrations in Italian cigarettes and effective dose evaluation," *Health Phys.*, vol. 107, no. 2, pp. 195–199, 2014. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000104.

[37] O. B. Flores, A. M. Estrada, A. B. Caballero, y O. F. Bonet, "Polonium-210 concentration of cigarettes traded in Cuba and their estimated dose contribution due to smoking," Department of Applied Nuclear Technology, Feb. 2015.

[38] R.-C. Begy, H. Simon, y S. Kelemen, "Po inhalation due to smoking: A dose estimation," *Radiat. Environ. Biophys.*, vol. 54, no. 3, pp. 257–261, 2015. https://doi.org/10.1007/s10967-015-4073-x.

[39] A. E. M. Khater, N. S. A. El-Aziz, H. A. Al-Sewidan, y K. Chaouachi, "Radiological hazards of Narghile (hookah, shisha, goza) smoking: Activity concentrations and dose assessment," *J. Environ. Radioact.*, vol. 99, no. 12, pp. 1808–1814, 2008. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.07.005.

[40] A. Srivastava, V. Tuli, y U. Scherer, "Study of radiotoxic ^{210}Po in Indian tobacco using liquid scintillation spectrometry," *Radiochim. Acta*, vol. 106, no. 9, pp. 787-792 ,2018. https://doi.org/10.1515/ract-2017-2848..

[41] W. S. Godwin, V. R. Subha, y K. M. Feroz, "^{210}Po radiation dose due to cigarette smoking," *Curr. Sci.*, vol. 98, no. 5, pp. 681–686, 2010.

[42] S. Mohammadi, "^{210}Po activity concentrations in Iranian drinking water," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 284, no. 2, pp. 235–239, 2010, https://doi.org/10.2478/10004-1254-61-2010-1989.

[43] T. T. Van, L. T. Bat, D. D. Nhan, N. H. Quang, B. D. Cam, y L. V. Hung, "Estimation of radionuclide concentrations and average annual committed effective dose due to ingestion for the population in the Red River Delta, Vietnam," *Environ. Manage.*, vol. 63, no. 4, pp. 444–454, Apr. 2019, https://doi.org/10.1007/s00267-018-1007-8.

[44] K. Iwaoka y H. Yonehara, "Estimation of effective dose to smokers—naturally occurring radionuclides *in cigarette*s," Radioisotopes, vol. 59, no. 9, p. 733, 2010. https://doi.org/10.3769/radioisotopes.59.733.

[45] M. Crespo, "Determinación de isótopos naturales emisores alfa de uranio y torio en muestras ambientales y geológicas [Determination of natural alpha-emitting isotopes of uranium and thorium in environmental and geological samples]," 1996. [En línea]. Disponible: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/28/000/28000001.pdf

[46] L. L. Hernández y J. Ortiz Moragón, "Optimización de un procedimiento de digestión en muestras ambientales con horno microondas y su aplicación

a la separación radioquímica del Po-210," Trabajo Fin de Grado, Univ. Politèc. València, Valencia, España, 2016. [En línea]. Disponible: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/90691/TFG-COMPLETO_1504607340908919868180257754582 2.pdf?sequence=2

[47] B. Mendoza, L. Almao, L. M. Marcó Parra, y V. Rodríguez, "Evaluación de dos métodos de digestión ácida en el análisis de tejido foliar de caña (Saccharum officinarum L.)," *Ciencia y Tecnología*, vol. 7, no. 2, pp. 9–20, 2015. https://doi.org/https://doi.org/10.18779/cyt.v7i2.140.

[48] T. Karali, S. Ölmez, G. Yener, "Study of spontaneous deposition of ^{21}Po on various metals and application for activity assessment *in cigarette* smoke," *Applied Radiation and Isotopes* vol. 47, no. 4, pp. 1974–1976, 1996.

[49] A. Sutar, P. Rath, V. Jha, y R. Tripathi, "A review of radiochemical analysis and estimation of ^{210}Po in soil matrices," *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 8, pp. 590-596, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.07.001.

[50] S. Cankurt y A. U. Gorgun, "Determination and distribution of ^{210}Po in different morphological parts of tobacco plants and radiation dose assessment from cigarettes in Turkey," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 197, Art. no. 110603, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110603.

[51] A. Savidou, K. Kehagia, y K. Eleftheriadis, "Concentration levels of ^{210}Pb and ^{210}Po in dry tobacco leaves ingreece," *J. Environ. Radioact.*, vol. 85, pp. 94–102, 2006. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.06.004.

[52] P. Chauhan ,M. Nain, M. Gupta, R., K. Kant, R. G. Sonkawade, and S. K. Chakarvarti, "Estimation of Radioactivity in Tobacco," *Indian J. Pure Appl. Phys.*, vol. 48, pp. 820–822, Nov. 2010.

[53] A. Boryło, B. Skwarzec, G. Romańczyk, y J. Siebert, "Polonium ^{210}Po activities in human blood of patients with ischaemic heart disease from Gdańsk in Poland," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 298, no. 3, pp. 1685–1691, 2013. https://doi.org/0.1007/s10967-013-2670-0.

[54] International Commission on Radiological Protection, Radiological Protection in Medicine. Sociedad Argentina de Radioprotección, 2011.

[55] R. Talhout, T. Schulz, E. Florek, J. van Benthem, y P. Wester, "Hazardous compounds *in tobacco* smoke," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 8, no. 2, pp. 613–628, 2011. https://doi.org/10.3390/ijerph8020613.

[56] B. Demir y M. Okutan, "Radyoaktif sigara: Tütün + Polonyum-210 + Kurşun-210 [Radioactive cigarettes: Tobacco + Polonium-210 + Lead-210]," *Türk Onkoloji Dergisi*, vol. 29, no. 1, pp. 27–31, 2014. https://doi.org/10.5505/tjoncol.2014.940.

[57] A. Kelecom y R. D. Cássia, "Po levels in human semen fluid after mussel ingestion," *J. Environ. Radioact.*, vol. 102, no. 5, pp. 443–447, 2011. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.01.002.

[58] B. Ozden, E. Guler, T. Vaasma, M. Horvath, y M. Kiisk, "Enrichment of naturally occurring radionuclides and trace elements in Yatagan and Yenikoy coal-fired thermal power plants, Turkey," *J. Environ. Radioact.*, vol. 177–178, pp. 101–108, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.016.

[59] M. Tiwari, S. K. Sahu, R. C. Bhangare, y G. G. Pandit, "Polonium in size fractionated mainstream cigarette smoke, predicted deposition and associated internal radiation dose," *J. Environ. Radioact.*, vol. 162–163, pp. 251–257, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.06.005.

[60] S. G. Rad, M. V. Moghaddam, T. Hosseini, H. Barati, y E. Fattahi, "Measurement of ^{210}Po in Iranian smokers' and non-smokers' teeth," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 284, no. 4, pp. 389–392, 2010.

[61] E. Manickam, A. S. Sdraulig, y R. O. B. Byfleet, "An improved and rapid radiochemical method for the determination of polonium-210 in urine," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 284, no. 1, pp. 38–46, 2010.

[62] M. A. Meli, D. Desideri, C. Roselli, y L. Feduzi, "^{210}Po determination in urines of people living in Central Italy," *J. Environ. Radioact.*, vol. 100, no. 1, pp. 84–88, 2009. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.11.004.

[63] A. Boryło, B. Skwarzec, y J. Wieczorek, "Sources of polonium ^{210}Po and radio-lead ^{210}Pb in human body in Poland," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 4, Art. no. 1984, 2022. https://doi.org/10.3390/ijerph19041984.

[64] Z. Pietrzak-Flis, L. Rosiak, M. M. Suplińska, E. Chrzanowski, y S. Dębińska, "Daily intakes of ^{238}U,

^{234}U, ^{232}Th, ^{230}Th, ^{228}Th, and ^{226}Ra in the adult population of central Poland," *Sci. Total Environ.*, vol. 266, no. 1–3, pp. 147–153, 2001. https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00849-4.

[65] H. Holstein, E. Holm, y P. Roos, "Hair as an indicator of the body content of polonium in humans: Preliminary results from a study of five male volunteers," *J. Environ. Radioact.*, vol. 141, pp. 71–75, 2015. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.12.004.