



Revisar

# Exposición ocupacional de dosis bajas a radiación ionizante y Efectos cardiovasculares: una revisión narrativa

Guglielmo Manenti <sup>1,\*</sup>, Luca Coppeta <sup>2</sup>,  
Andrea Magrini <sup>2</sup> y Roberto Floris<sup>1</sup> Ivan Valentinov Kirev <sup>1,\*</sup>, Greta Verno<sup>2</sup> Francesco Garaci,

1

<sup>1</sup> Departamento de Radiología Diagnóstica e Intervencionista, Imagenología Molecular y Radioterapia, Fundación PTV, Universidad de Roma Tor Vergata, 00133 Roma, Italia

<sup>2</sup> Departamento de Biomedicina y Prevención, Universidad de Roma Tor Vergata, 00133 Roma, Italia; luca.coppeta@uniroma2.it (LC); greta.verno@students.uniroma2.eu (GV)

\* Correspondencia: guglielmo.manenti@ptvonline.it (GM); ivanvalentinov.kirev@alumni.uniroma2.eu (IVK)

Resumen: Históricamente, las enfermedades no cancerosas no se han considerado un riesgo para la salud después de una exposición a dosis bajas de radiación ionizante. Sin embargo, ahora es bien sabido que las dosis altas de radiación ionizante causan enfermedades cardiovasculares, y la evidencia epidemiológica emergente sugiere un riesgo excesivo de enfermedades no cancerosas incluso después de la exposición a dosis más bajas de radiación ionizante de lo que se pensaba anteriormente. De hecho, la evidencia es más sólida en el caso de las enfermedades cardiovasculares (ECV). El objetivo de esta revisión fue informar los estudios y datos más representativos sobre el riesgo de ECV por radiación en dosis bajas en personas con exposición ocupacional. Informamos los resultados de 27 artículos seleccionados de una búsqueda en bases de datos de 1151 estudios. Los resultados muestran un complejo panorama de evidencia sobre la relación entre la exposición a la radiación y las enfermedades cardiovasculares. En general, los artículos publicados muestran una asociación positiva entre la exposición a la radiación ionizante y el daño a la microcirculación dérmica, la cardiopatía isquémica y la enfermedad cerebrovascular. En general, destacan la necesidad de una investigación exhaustiva y detallada para aclarar esta relación. Debido al poder estadístico limitado, la relación dosis-riesgo por debajo de 0,5 Gy no es concluyente, pero si se determina que esta relación no tiene un umbral, podría tener un impacto significativo en las estimaciones actuales de los riesgos para la salud en dosis bajas.

Palabras clave: enfermedad cardiovascular; radiación ionizante; radiaciones de dosis bajas; exposición ocupacional



Cita: Manenti, G.; Copeta, L.;

Kirev, IV; Verno, G.; Garaci, F.; Magrini,

A.; Floris, R. Exposición ocupacional a

dosis bajas de ionizantes

Radiación y efectos cardiovasculares:

Una revisión narrativa. Atención sanitaria 2024,

12, 238. <https://doi.org/10.3390/>

asistencia sanitaria12020238

Editor académico: Raffaele Giordano

Recibido: 27 de noviembre de 2023

Revisado: 16 de diciembre de 2023

Aceptado: 18 de diciembre de 2023

Publicado: 18 de enero de 2024



Copyright: © 2024 por los autores.

Licenciatario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto.

distribuido bajo los términos y

condiciones de los Creative Commons

Licencia de atribución (CC BY)

(https://creativecommons.org/licenses/by/cardiovasculares en los datos de la LSS. Más recientemente, aunque todavía es discutible, las investigaciones indican que la exposición a dosis y tasas de radiación muy reducidas, en particular en el ámbito

y las exposiciones de diagnóstico médico, pueden estar relacionadas con un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares [4].

Se sabe que detrás de los mecanismos implicados en la toxicidad cardiovascular inducida por la radiación ionizante, gran parte del daño temprano parece ser causado por cambios inflamatorios agudos y crónicos. Esto conduce a disfunción vascular, remodelación cardíaca y aterosclerosis [5].

Esta relación es de particular importancia dada la creciente exposición de la población a radiaciones ionizantes provenientes de fuentes como los rayos X de diagnóstico, la radioterapia, las actividades profesionales y los viajes aéreos. Sin embargo, el panorama completo de los efectos sobre el sistema cardiovascular tras la exposición a dosis bajas de radiación ionizante aún está sujeto a debate e investigación [6]. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), las ECV son un importante problema de salud mundial (la principal causa de muerte en todo el mundo), por lo que decidimos investigar la literatura actual para analizar los principales hallazgos sobre las ECV después de la exposición a bajas dosis de radiación para resaltar estos efectos perjudiciales y debatir sobre las medidas preventivas a utilizar en el terreno para reducir la incidencia de estas enfermedades entre la población trabajadora.

Esta revisión tiene como objetivo proporcionar una descripción general actualizada y completa de la evidencia científica actual sobre la asociación entre la exposición a bajas dosis de radiación ionizante y el riesgo cardiovascular en personas ocupacionalmente expuestas.

El objetivo principal es resumir el conocimiento existente, identificar los artículos más representativos, resaltar posibles lagunas en la literatura y proporcionar direcciones para futuras investigaciones sobre este tema.

Comprender si existe una dosis umbral para los efectos cardiovasculares de las radiaciones ionizantes puede permitir la implementación de programas preventivos que reduzcan la exposición del operador a valores por debajo de la dosis umbral, eliminando así el riesgo de accidentes cardiovasculares.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Preguntas de

investigación El objetivo principal de esta revisión narrativa es examinar la literatura existente sobre el riesgo de enfermedad cardiovascular en personas expuestas a bajas dosis de radiación ionizante por motivos ocupacionales. Redujimos el alcance de nuestra investigación excluyendo a los sujetos expuestos a dosis altas y a aquellos sometidos a tratamientos radioterapéuticos. También queremos identificar deficiencias en la literatura existente para proponer direcciones para investigaciones futuras más enfocadas y completas. Los términos de búsqueda que utilizamos fueron exposición ocupacional, enfermedad y riesgo cardiovascular, radiación en dosis bajas y radiación ionizante.

### 2.2. Selección del estudio y elementos

de datos El estudio se centró en una población compuesta principalmente por personas empleadas expuestas regularmente a radiaciones ionizantes.

Buscamos sistemáticamente en la literatura en septiembre de 2023 utilizando PubMed sin restricciones (fecha, idioma).

### 2.3. Criterios de elegibilidad

La búsqueda en la base de datos realizada por los revisores dio como resultado un total de 1151 artículos. Inicialmente, su elegibilidad se determinó evaluando solo el resumen y el título utilizando la herramienta web Rayyan. En la segunda etapa de la búsqueda se utilizó información más completa.

Se excluyeron los artículos marcados como duplicados por Rayyan, los artículos basados en estudios *in vitro* o en animales, los artículos que no están en inglés, todos los estudios sin resumen, los artículos en los que los revisores no llegaron a un acuerdo de inclusión y aquellos en los que la población principal eran individuos expuestos a la radiación con fines terapéuticos, como los pacientes sometidos a radioterapia.

Esto resultó en un conjunto final de 27 artículos representativos (Figura 1). Dos revisores extrapolaron de forma independiente la información de los artículos finales utilizando una hoja de cálculo y esquematizaron los resultados más relevantes.

Esto resultó en un conjunto final de 27 artículos representativos (Figura 1). Dos revisores en-  
Extrapoló de forma dependiente la información de los artículos finales utilizando una hoja de cálculo y  
esquematisó los resultados más relevantes.

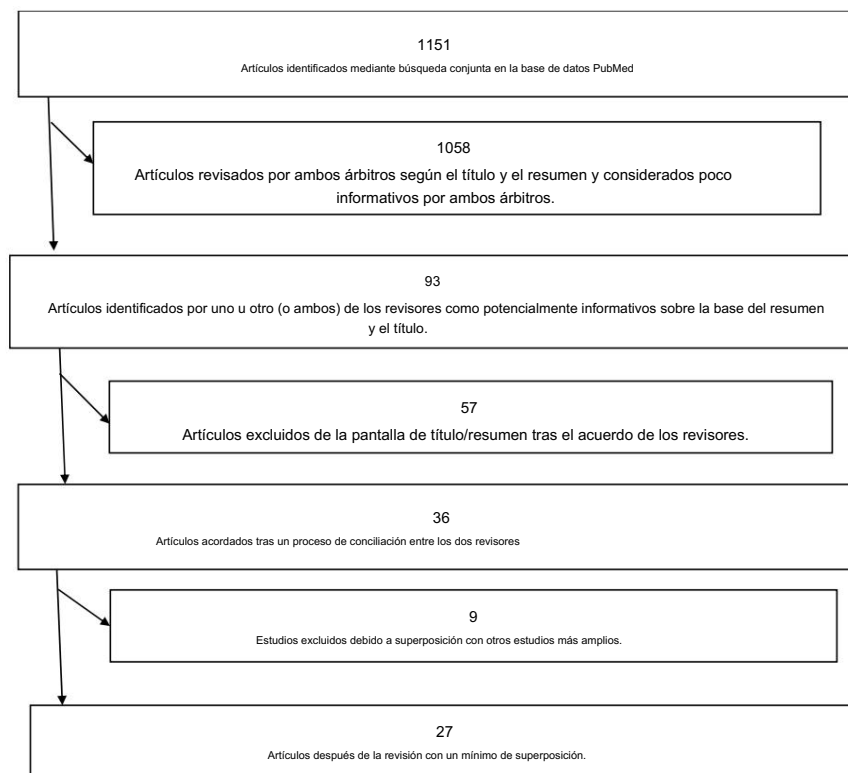


Figura 1. Diagrama de flujo que muestra las exclusiones realizadas para derivar el conjunto final de estudios utilizados.

### 3. Resultados

#### 3.1. Radiación y aterosclerosis temprana

##### En 1993, Tomei et al. realizó un estudio de microscopía capilar en 145 médicos

En 1993, Tomei et al. realizó un estudio de microscopía capilar en 145 médicos expuestos a radiaciones ionizantes ocupacionales, y encontró una fuerte asociación con la radiación dérmica planteado a la radiación ionizante ocupacional, encontrando una fuerte asociación con el daño de la microcirculación dérmica. Sólo el 20,7% del grupo expuesto tuvo un capilaroscopia normal, en comparación con el 91,5% en el grupo control. El índice de riesgo relativo para capilaroscopia normal, en comparación con el 91,5% en el grupo de control. La relación de riesgo relativo de daño capilaroscópico en individuos expuestos fue de 0,23 (IC del 95%: 0,16–0,31). Curiosamente, no hay nada destacable. el daño en individuos expuestos fue de 0,23 (IC 95%: 0,16-0,31). Curiosamente, no se observaron variaciones notables entre las especialidades médicas. Este estudio destaca una convincente Se observaron diferencias entre las especialidades médicas. Este estudio destaca un vínculo convincente entre la exposición a la radiación ocupacional y las anomalías capilaroscópicas, con matices específicos de género [7].

matices específicos [7]. La correlación entre la exposición a radiaciones ionizantes en dosis bajas y el daño endotelial La correlación entre la exposición a radiaciones ionizantes en dosis bajas y el daño endotelial, específicamente el riesgo de aterosclerosis, ha sido objeto de estudio de Andreassi La edad, específicamente el riesgo de aterosclerosis, ha sido objeto de estudio por Andreassi et al. Todos los participantes fueron invitados a someterse a evaluaciones, incluida la íntima-media carotídea.

Alabama. Todos los participantes fueron invitados a someterse a evaluaciones, incluido el espesor de la íntima-media carotídea (CIMT), análisis de sangre periférica para determinar la longitud de los telómeros y evaluación genética. Se realizaron evaluaciones CIMT en 171 miembros del personal del laboratorio de cateterismo y 156 sujetos no expuestos. Al Se realizaron evaluaciones CIMT en 171 miembros del personal del laboratorio de cateterismo y 156 sujetos no expuestos. Al clasificar al personal del laboratorio de cateterismo en trabajadores de baja (n = 80) y alta exposición (n = 91) según la mediana de exposición a la radiación ocupacional, surgió un hallazgo notable. CIMT exhibió sobre la mediana de la exposición a la radiación ocupacional, surgió un hallazgo notable. CIMT obtuvo un aumento significativo en los trabajadores de alta exposición en comparación con los de baja exposición. Al clasificar al personal del laboratorio de cateterismo en trabajadores de baja (n = 80) y alta exposición (n = 91) según la mediana de exposición a la radiación ocupacional, surgió un hallazgo notable. CIMT exhibió sobre la mediana de la exposición a la radiación ocupacional, surgió un hallazgo notable. CIMT obtuvo un aumento significativo en los trabajadores de alta exposición en comparación con los de baja exposición. Los resultados sugieren evidencia de envejecimiento vascular acelerado y aterosclerosis temprana [8].

Los resultados sugieren evidencia de envejecimiento vascular acelerado y aterosclerosis temprana [8].

#### 3.2. Enfermedad cardíaca isquémica (CI)

La indicación inicial que sugiere un riesgo potencial elevado de enfermedad cardiovascular (CVD) en dosis de radiación bajas o moderadas se originó a partir de un examen de la energía atómica japonesa. supervivientes de la bomba. Desde entonces, muchos otros grupos, incluidos los trabajadores nucleares y radiactivos, el personal de respuesta a accidentes y las poblaciones ambientalmente expuestas, han sido sometidos a escrutinio científico, que produce resultados que varían y presentan una gama de resultados en relación con la correlación entre la exposición a la radiación y el riesgo de enfermedades cardiovasculares.

De hecho, el análisis de la mortalidad cardíaca en la LSS entre 1950 y 2008 mostró asociaciones positivas entre la dosis de radiación y las tasas de mortalidad por enfermedad cardíaca total (ERR/Gy = 0,14; IC del 95 %: 0,06 a 0,22), valvulopatía cardíaca (ERR /Gy = 0,44; IC 95%: 0,13–0,85), daño orgánico por hipertensión (ERR/Gy = 0,36, IC 95%: 0,10–0,68) e insuficiencia cardíaca (ERR/Gy = 0,21, IC 95%: 0,07–0,37 ). El modelo dosis-respuesta no mostró ninguna desviación estadísticamente significativa de la linealidad [9].

El estudio INWORKS es una investigación de cohorte colaborativa integral que abarca a 308.297 miembros del personal de la industria nuclear (exposición externa acumulada promedio, 0,025 Gy) en el Reino Unido, Francia y los Estados Unidos. Como resultado del análisis específico de la mortalidad no relacionada con el cáncer, se encontró un exceso de riesgo relativo por Sv (ERR/Sv) estadísticamente significativo de 0,19 (IC del 90 %: 0,07–0,30) para todas las enfermedades no cancerosas, impulsadas principalmente por enfermedades circulatorias. enfermedades (ERR/Sv = 0,22; IC 90%: 0,08-0,37). La cardiopatía isquémica (CI) tuvo una ERR/Sv significativamente elevada de 0,18 (IC del 90 %: 0,004–0,36), impulsada particularmente por el infarto agudo de miocardio (IM), con una ERR/Sv de 0,26 (IC del 90 %: 0,03, 0,51) . El riesgo de CI crónica mostró poca evidencia de elevación (ERR/Sv = 0,07; IC del 90 %: –0,19, 0,36), sin heterogeneidad significativa entre los subtipos ( $p = 0,38$ ). La estimación de ERR/Sv para otras enfermedades cardíacas (no CI) fue comparable a la CI [10,11].

Laurent et al. analizaron una cohorte de 22.393 empleados de una compañía eléctrica francesa. No observaron ningún aumento significativo en el RR/100 mSv (10 rem) de mortalidad por enfermedad circulatoria o cardiopatía isquémica. Hubo un mayor riesgo de enfermedad cerebrovascular en solo 22 casos (RR/100 mSv (10 rem) 2,74; IC del 90 %: 1,02 a 5,39) [12].

La mortalidad debida a enfermedades cardiovasculares se investigó en una cohorte ampliada de empleados de Mayak, compuesta por 22.377 trabajadores contratados inicialmente en la Asociación de Producción de Mayak entre 1948 y 1982 y seguidos hasta 2018. Muchos de los trabajadores recibieron exposiciones crónicas a radiación gamma y/o plutonio. consumo. En el seguimiento inicial se evidenciaron tendencias ascendentes significativas en la incidencia de cardiopatía isquémica, tanto para la dosis gamma externa total como para la dosis hepática interna. La correlación entre la dosis externa y la mortalidad atribuida a la cardiopatía isquémica no alcanzó significación estadística. Se observaron importantes tendencias ascendentes en la incidencia de enfermedades cerebrovasculares, aunque no en la mortalidad, tanto para la dosis gamma externa completa como para la dosis hepática interna . Los trabajadores con dosis acumuladas de gamma superiores a 1 Gy presentaban mayores riesgos de morbilidad asociada con cardiopatía isquémica y enfermedad cerebrovascular. Las asociaciones dosis-respuesta para la radiación externa y la incidencia de enfermedades circulatorias fueron indicativas de linealidad para la cardiopatía isquémica (TRE/Gy = 0,11, IC 95%: 0,05-0,17) y la enfermedad cerebrovascular (TRE/Gy = 0,46, 95). IC %: 0,36-0,57). Una investigación posterior sobre la incidencia y mortalidad de la cardiopatía isquémica (CI) destacó una tendencia creciente estadísticamente significativa en la dosis total de rayos gamma externos y la incidencia de CI (ERR/Gy = 0,099, IC del 95 %: 0,045–0,153), siguiendo ajustes para diversos factores como la hipertensión, el índice de masa corporal, la duración del empleo y la exposición interna [13-16].

En un estudio reciente , se calcularon los riesgos relativos y el exceso de riesgos relativos por unidad de dosis absorbida (ERR/Gy) para toda la cohorte de Mayak, la subcohorte de residentes de Ozyorsk y la subcohorte de inmigrantes. Para hombres y mujeres, la dosis media acumulada de rayos gamma absorbida por el hígado debido a la exposición externa fue de 0,45 Gy y 0,37 Gy, respectivamente. Para hombres y mujeres, las dosis alfa acumuladas medias absorbidas en el hígado por exposición interna al plutonio fueron de 0,18 Gy y 0,40 Gy, respectivamente. El modelo lineal, ajustado por factores no relacionados con la radiación y la dosis de radiación alfa, no mostró asociaciones significativas de mortalidad por ECV, CI y enfermedad cerebrovascular (ECeVD) con una dosis de exposición a rayos gamma en toda la cohorte, subcohorte de residentes o subcohorte de inmigrantes. Si bien no se detectaron correlaciones significativas entre la dosis de gamma absorbida por el hígado y otros resultados, se observó una conexión notable entre la dosis de gamma y la mortalidad por accidente cerebrovascular isquémico masculino en la subcohorte de residentes (ERR/Gy = 0,43; IC del 95 %: 0,08–0,99 ). Los hombres no correlacionaron significativamente la dosis alfa absorbida en el hígado con la mortalidad por cualquier ECV en lo que respecta a la exposición interna, pero las mujeres sí demostraron correlaciones positivas con la mortalidad por CI (cohorte completa) y ECV (cohorte completa y subco

En un artículo reciente, Wakeford et al. informó las últimas actualizaciones de los extensos estudios realizados por Azizova et al. en el que, después de ajustar por factores no relacionados con la radiación, se identificó una notable tendencia ascendente en la mortalidad por enfermedades circulatorias relacionadas con dosis crecientes de rayos gamma externos, lo que arrojó una ERR/Gy de 0,05 (intervalo de confianza (IC) del 95 %: >0–0,11). La inclusión de un ajuste adicional para la dosis de radiación alfa interna al hígado dio como resultado un aumento del doble en la ERR/Gy a 0,10 (IC del 95 %: 0,02 a 0,21) [17].

Ivanov et al. (2001) [18] han analizado la mortalidad de los trabajadores de emergencia del accidente de Chernobyl que viven en Rusia. Su estudio se realizó con datos de una cohorte de 65.905 trabajadores de emergencias, que incluían exposiciones externas informadas de 0,005 a 0,3 Sv. Se descubrió que existían riesgos estadísticamente significativos de enfermedad cardiovascular y mortalidad por neoplasias malignas. En particular, se estima que los valores de ERR/Sv-1 para las enfermedades cardiovasculares son 0,54 (IC del 95 %: 0,18–0,91) para el control externo, lo que corresponde a la tasa de mortalidad (hombres) para la misma edad en Rusia en general. y 0,79 (IC 95%: 0,07–1,64) para el control interno. Sin embargo, la tasa de mortalidad en la cohorte EMS se acerca cada vez más a la de la población rusa general [18].

Además, en varios estudios se presenta un análisis de la incidencia de CeVD y CVD en la misma cohorte de trabajadores rusos involucrados en las operaciones de recuperación de Chernobyl. Los liquidadores (53.772 personas) que llegaron a la zona de Chernobyl durante el primer año después de la catástrofe (de abril de 1986 a abril de 1987) componen la cohorte objeto de estudio. En la cohorte, la dosis externa promedio para todo el cuerpo fue de 0,161 Gy, con dosis individuales que oscilaron entre 0,0001 Gy y 1,42 Gy. Se observó una respuesta posológica estadísticamente significativa en la incidencia de CeVD, sin tiempo de latencia y con una ERR/Gy promedio = 0,45; IC 95%: (0,28–0,62),  $p < 0,001$ . La duración de la estancia de los liquidadores en la zona de Chernobyl mostró una correlación estadísticamente sustancial ( $p = 0,03$ ) con los riesgos de radiación de enfermedades cardiovasculares. Para aquellos que pasaron menos de seis semanas en la zona de Chernobyl, la ERR/Gy = 0,64, IC del 95 % = (0,38–0,93),  $p < 0,001$ . La incidencia de ECV mostró una respuesta a la dosis estadísticamente significativa sin período de latencia y una ERR Gy promedio = 0,47, IC 95 % = 0,31–0,63,  $p < 0,001$ . Los riesgos de radiación de ECV mostraron una variación estadísticamente significativa ( $p = 0,01$ ) con el tiempo que los liquidadores pasaron en la zona de Chernobyl. Para aquellos que pasaron menos de seis semanas en la zona de Chernobyl, ERR/Gy = 0,80, IC 95% = 0,53–1,08,  $p < 0,001$  [19,20].

Un estudio de riesgos de enfermedades circulatorias en una cohorte de 337.397 trabajadores incluidos en el Registro Nacional de Dosis de Canadá informa que se observó una relación dosis-respuesta significativa para las enfermedades cardiovasculares, con un exceso de riesgo relativo (ERR) de 1,22 (IC del 90 %: 0,47–2,10) para hombres y 7,4 (IC 90%: 0,95–18,1) para mujeres. Los hombres tenían una dosis media de radiación corporal total de 8,6 mSv y las mujeres de 1,2 mSv. El exceso de riesgo absoluto para toda la cohorte fue de 37,5 por sievert por 10.000 personas-año (IC del 90%: 17,0–60,1), lo que sugiere una asociación positiva entre la exposición a la radiación y la mortalidad por ECV [21].

### 3.3. Mortalidad isquémica cardíaca y cerebral en trabajadores del enriquecimiento de uranio

Se encontró una fuerte correlación positiva y estadísticamente significativa entre la exposición a la radiación y las muertes por enfermedad cardíaca arteriosclerótica, incluida la enfermedad coronaria, en una cohorte de 53.698 trabajadores empleados en 15 empresas de generación de energía nuclear en los Estados Unidos (monitoreadas durante un período máximo de 18 años), de 1979 a 1997). La correlación tuvo una ERR de 8,78 (IC 95%: 2,10–20,0). Para todo el grupo, la dosis equivalente acumulada total media fue de 25,7 mSv, y para aquellos que tuvieron alguna exposición documentada, fue de 30,7 mSv. Aunque varios estudios ocupacionales anteriores han encontrado conexiones con enfermedades cardíacas, la magnitud de la asociación actual es inconsistente con estas relaciones, lo que requiere una interpretación cuidadosa y más investigación [22]. En una cohorte previamente estudiada de trabajadores estadounidenses del enriquecimiento de uranio, Anderson et al. examinaron las asociaciones dosis-respuesta entre la mortalidad por CI y CeVD y la dosis de radiación ionizante absorbida en los pulmones por la exposición interna al uranio y la radiación ionizante externa. La cohorte completa estaba formada por 29.303 trabajadores. Sus hallazgos más significativos indican que los sujetos con una dosis pulmonar interna de uranio superior a 1 millicurie

indicio elevado de riesgo de CI (RR = 1,4; IC del 95%: 0,76–2,3) y la tasa relativa excesiva lineal (TRE) por mGy en la cohorte completa de 0,019 (IC del 95%: –0,077–0,26) [23].

Otro artículo examina la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio después de una exposición prolongada al uranio en una muestra de 2.897 trabajadores empleados en una planta de procesamiento de uranio en Francia durante el período 1960–2006. Informaron que la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio (CSD) aumentó en los trabajadores expuestos a uranio reprocesado de solubilidad lenta (HR = 2,13, IC del 95 % = 0,96–4,70) y en trabajadores expuestos al uranio natural (HR = 1,73, IC del 95 % = 1,11–2,69) [24].

Posteriormente, Zhivin et al. sugirió realizar una investigación anidada de casos y controles sobre trabajadores nucleares en Francia. Había 102 personas en el grupo de casos y 416 personas en el grupo de control. La dosis máxima de 27 mGy se informó para el pulmón, mientras que las dosis internas acumuladas medias calculadas por la ingesta de uranio variaron de 0,01 mGy (corazón) a 1 mGy (pulmón). Incluso después de ajustar por la dosis de uranio, no se encontró una correlación significativa entre la mortalidad por CSD y la exposición externa a la radiación  $\gamma$  (a 1 mGy). Los resultados para CeVD y IHD fueron comparables. Todas las categorías de dosis internas acumuladas de uranio mostraron un mayor riesgo de muerte por CSD; sin embargo, la prueba de desviación de una tendencia no fue estadísticamente significativa ( $p = 0,4$ ). Después de ajustar las variables de riesgo individuales más significativas para las CSD, sus análisis no revelaron indicios de confusión y una correlación positiva, aunque imprecisa, entre la dosis interna acumulada de uranio y la mortalidad de las C

Drubay et al. incluyen factores de riesgo de enfermedad circulatoria sistémica en su análisis de la asociación entre la exposición a la radiación y el riesgo de mortalidad por CSD en un estudio anidado de casos y controles de mineros de uranio. En toda la cohorte (5086 mineros), la exposición acumulada al radón se asoció significativamente con un mayor riesgo de muerte por CSD y Cocientes de riesgo de CeVD: HR (CSD/100) meses de nivel de trabajo (WLM) = 1,11, intervalo de confianza del 95% (1,01–1,22) y HRCeVD/100 WLM = 1,25 (1,09–1,43), respectivamente [26].

Los resultados iniciales de un estudio de 20.608 trabajadores coreanos expuestos en el trabajo revelaron que la hiperlipidemia y las enfermedades cardiovasculares eran las enfermedades no cancerosas más prevalentes en la cohorte; sin embargo, no se observó correlación entre estas condiciones y la exposición ocupacional. La exposición acumulada media de la cohorte durante el período laboral de 1984 a 2017 fue de 11,8 (desviación estándar [DE] 28,8) mSv, mientras que la mediana fue de 0,6 mSv. Las razones de prevalencia estandarizadas (SPR) específicas por edad y sexo y el Cis del 95% que comparan la prevalencia de enfermedades cardiovasculares en trabajadores sometidos a radiación con la de la población general fueron 0,95 (IC del 95%: 0,90–0,99) y 0,88 (IC del 95%: 0,90–0,99). : 0,68–1,11) en hombres y mujeres, respectivamente.

En el análisis univariado que evaluó la asociación entre la dosis de radiación y la aparición de diversas enfermedades no cancerosas, se observaron tasas de prevalencia más altas con dosis acumuladas más altas. Sin embargo, estas asociaciones no alcanzaron significación estadística después del ajuste por factores de confusión [27].

En un estudio reciente que evaluó a 53.860 trabajadores médicos de radiación masculinos que estaban registrados en el Registro Nacional de Dosimetría (NDR) de Corea del Sur (de 1996 a 2011), se estimó una ERR por 100 mGy para CD [0,85, IC 95% –0,11–1,82], cardiopatía isquémica (1,18, IC 95% –0,69–3,05) y enfermedad cerebrovascular (0,23, IC 95% –0,48–0,94) con un desfase de 10 años se obtuvo utilizando un modelo lineal dosis-respuesta. El estudio no encontró evidencia estadística de una relación dosis-respuesta. El personal que sobrevivió y el que murió a causa de EC tenían dosis de placa acumuladas medias de 27,1 mSv y 10,2 mSv, respectivamente [28,29].

Engels et al. investigó la mortalidad por causas específicas entre operadores nucleares de cinco emplazamientos nucleares en Bélgica, comparando los resultados con los de la población general. El estudio incluyó un total de 7229 trabajadores empleados entre 1953 y 1994, y la mayoría recibió menos de 10 mSv de exposición ocupacional. El análisis se centró en la mortalidad por causas específicas tanto para trabajadores masculinos como femeninos, examinando cánceres específicos, enfermedades cardiovasculares y enfermedades respiratorias como criterios de valoración. Es importante destacar que en el estudio no se identificó ningún aumento significativo de la mortalidad [30].

Frank de Vocht realizó un análisis utilizando datos de un estudio de casos y controles anidado dentro de una cohorte de trabajadores industriales británicos involucrados en el ciclo del combustible nuclear. Esta población estaba compuesta por 1220 pares de casos y controles masculinos emparejados. Externo acumulativo

las dosis de radiación variaron de 0 a 1656 mSv, mientras que las dosis internas acumuladas, monitoreadas para detectar ingestas radiactivas, abarcaron de 0,004 a 5732 mSv. Se encontró que el riesgo de mortalidad por CI estaba asociado con la dosis externa acumulada no retardada, lo que revela un exceso de riesgo del 42 % (IC del 95 %: 4 %, 95 %) para dosis superiores a 103 mSv (cuartil más alto en relación con el cuartil más bajo) y 35 mSv. % (IC del 95 %: -1 %, 84 %) para dosis superiores a 109 mSv con una dosis retrasada de 15 años [31]. En un estudio posterior se consideran posibles variables de confusión como la presión arterial, el IMC, la exposición ocupacional, el nivel socioeconómico, el tabaquismo y la monitorización de la radiación interna. La investigación indica una relación dosis-respuesta no lineal de un 43% más de riesgo a 390 mSv mediante simulaciones y estudios de sesgo cuantitativo. Después de tener en cuenta posibles factores de confusión, datos faltantes y varios escenarios de error en la medición de la exposición, se concluye que la conexión observada entre la exposición a la radiación externa y la mortalidad por CI puede ser causal [32].

En un estudio de un subgrupo (n = 4054) de la cohorte WISMUT, Kreuzer et al. Se analizaron datos de hombres que trabajaron en plantas de uranio entre 1946 y 1989. No se consideraron los trabajadores en minas subterráneas o a cielo abierto. No se encontró ningún aumento en el riesgo de mortalidad al aumentar la dosis acumulada para ninguna enfermedad cardiovascular (ERR/Sv -0,09; IC 95 %: -1,04-0,86) o cardiopatía isquémica (ERR/Sv -0,10, IC 95 %: -1,48-1,27). Se observó un aumento estadísticamente no significativo (ERR/Sv 0,55, IC 95 %: -1,72-2,83) en la mortalidad relacionada con la enfermedad cerebrovascular [33].

#### 3.4. Grupos diagnósticamente expuestos

El objetivo del estudio de US Radiologic Technologists (USRT) fue calcular la incidencia y los riesgos de mortalidad de cáncer y enfermedades cardiovasculares relacionados con el uso de radionúclidos durante las operaciones. Determinaron los índices de riesgo (HR) ajustados multivariantes y los intervalos de confianza del 95% para la incidencia (hasta 2003-2005) y la mortalidad (hasta 2008) asociadas con la realización de estas operaciones en una cohorte nacional de 90.955 tecnólogos radiológicos estadounidenses. El análisis de la mortalidad relacionada con enfermedades cardiovasculares se limitó a 86.700 técnicos. Descubrieron que someterse a operaciones de braquiterapia estaba relacionado con mayores tasas de muerte por todas las causas (HR = 1,10, IC del 95 %: 1,00-1,20), mortalidad por todas las neoplasias malignas (HR = 1,20, IC del 95 %: 1,01-1,43) y enfermedad miocárdica. infarto (HR = 1,37, IC 95%: 1,10-1,70) [34].

Los principales resultados se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de estudios seleccionados y resultados principales.

Sección	ID del estudio	Tipo de estudio	Diseño del estudio	Resultados principales
Aterosclerosis temprana	Tomei, F. y col. 1996 [7]	Estudio comparativo	El objetivo del estudio es utilizar microscopía capilar para investigar el daño a la microcirculación dérmica causado por la exposición ocupacional a dosis de radiación ionizante inferiores a 5 rem/año, centrándose en una muestra de 145 médicos.	El estudio muestra que bajas dosis de radiación ionizante pueden provocar cambios morfológicos en los capilares, como se observa mediante capilaroscopia. Estos cambios, que ocurren antes de los signos clínicos, pueden servir como indicadores tempranos de daño vascular.
	Andreassi, MG et al. 2015 [8]	Estudio comparativo	El estudio tiene como objetivo vincular la exposición prolongada a la radiación en el laboratorio de cateterismo con indicadores tempranos de aterosclerosis subclínica. Va a medir la carótida espesor íntima-media en 223 trabajadores del laboratorio de cateterismo en comparación con 222 sujetos no expuestos.	La exposición prolongada a la radiación en el laboratorio de cateterismo puede correlacionarse con un aumento del espesor subclínico de la íntima-media carotídea y una longitud más corta de los telómeros, signos de envejecimiento vascular acelerado y aterosclerosis en etapa temprana.



Tabla 1. Cont.

Sección	ID del estudio	Tipo de estudio	Diseño del estudio	Resultados principales
Corazón isquémico Enfermedad	Takahashi, I. et al. 2017 <a href="#">[9]</a>	Estudio epidemiológico	Este estudio tiene como objetivo investigar los riesgos cardiovasculares asociados con la radiación a niveles de dosis más bajos a través de análisis de subtipos y períodos específicos en una población de 86.600 personas, incluida una gran proporción de sobrevivientes de la bomba atómica (Estudio de duración de vida).	Aunque las dosis de radiación de los supervivientes de la bomba atómica fueron generalmente mucho más bajas que los de otros estudios que han mostrado una mayor riesgo de enfermedad vascular enfermedad debida a la exposición a radiaciones ionizantes, el análisis actual muestra un riesgo significativamente mayor de enfermedad cardíaca en general durante todo el período.
	Gillies, M. y col. 2017 <a href="#">[10]</a>	Estudio epidemiológico	Este estudio examina las asociaciones entre la exposición de bajo nivel a la radiación ionizante y la mortalidad por enfermedades no cancerosas entre los trabajadores de la industria nuclear de Francia, el Reino Unido (Reino Unido) y los Estados Unidos (EE. UU.), como parte del Estudio Nuclear Internacional.  Estudio de Trabajadores.	En la cohorte INWORKS, radiación externa elevada  Los niveles estaban significativamente relacionados con la mortalidad no relacionada con el cáncer. El mayor riesgo se debió principalmente a una relación lineal con las enfermedades circulatorias, específicamente la cardiopatía isquémica y la enfermedad cerebrovascular.
	Laurier, D. y col. 2017 <a href="#">[11]</a>	Estudio epidemiológico	Este estudio presenta una comparación de las estimaciones del riesgo de mortalidad por cáncer derivados de la  Estudio de duración de la vida y el Nuclear internacional  Estudio de Trabajadores, que compara una selección de 45.625 supervivientes de la bomba atómica y 259.350 trabajadores nucleares.	En ambas cohortes, hubo evidencia de una modificación del exceso de riesgo absoluto de cánceres sólidos con la edad alcanzada. Estos hallazgos de diferentes poblaciones de estudio pueden contribuir a la comprensión de los riesgos de radiación, con una contribución importante proveniente de cohortes de trabajadores con exposiciones prolongadas a bajas dosis.
	Laurent, O. y col. 2010 <a href="#">[12]</a>	Estudio epidemiológico	Este estudio examinó las relaciones entre la exposición a radiaciones ionizantes y la mortalidad en trabajadores de la Compañía Eléctrica Francesa que fueron seguidos de 1961 a 2003 (n = 22.393).	Un total de 874 muertes ocurrió y 66 trabajadores se perdieron durante el seguimiento. Ninguna de las causas de muerte estudiado aumentó significativamente con la dosis, excepto para la enfermedad cerebrovascular (p = 0,01), pero esta última observación se basó en sólo 22 casos.



Tabla 1. Cont.

Sección	ID del estudio	Tipo de estudio	Diseño del estudio	Resultados principales
	Azizova, TV et al. 2012 <a href="#">[13]</a>	Estudio epidemiológico	La incidencia y mortalidad por cardiopatía isquémica fue estudiado de forma extendida en una cohorte de 22.377 trabajadores contratados por primera vez en Mayak Asociación de producción durante 1948-1982 y seguido hasta finales de 2008.	Esta investigación proporciona evidencia convincente que vincula la exposición a la radiación gamma externa con la incidencia y mortalidad de la cardiopatía isquémica. Además, existe cierta evidencia de una asociación entre la exposición a la radiación alfa y la incidencia y mortalidad por cardiopatía isquémica.
	Azizova, TV et al. 2015 <a href="#">[14]</a>	Estudio epidemiológico	Este estudio examinó la mortalidad por enfermedades circulatorias en un período prolongado. Cohorte de trabajadores de Mayak de 22.377 trabajadores empleados por primera vez en la Asociación de Producción de Mayak entre 1948 y 1982 y seguidos hasta finales de 2008.	Los análisis de la mortalidad por enfermedades circulatorias entre los miembros de la cohorte de trabajadores de Mayak reclutados por primera vez entre 1948 y 1982 mostraron una tendencia creciente significativa en la mortalidad por enfermedades circulatorias con dosis de agentes externos. radiación gamma.
	Azizova, TV et al. 2022 <a href="#">[15]</a>	Estudio epidemiológico	Este artículo presenta los resultados del estudio de la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio entre los trabajadores nucleares rusos de la Asociación de Producción Mayak (22.377 personas) contratados en la planta entre 1948 y 1982 y seguido hasta finales de 2018.	El análisis de la mortalidad por enfermedades circulatorias entre los miembros de la cohorte de trabajadores de Mayak mostró una tendencia creciente significativa en la mortalidad por enfermedades circulatorias con dosis de radiación gamma externa. La inclusión del ajuste por dosis alfa interna al hígado dio como resultado una estimación doble de la ERR/Gy.
	Azizova, TV et al. 2023 <a href="#">[16]</a>	Estudio epidemiológico	El objetivo de este estudio fue evaluar la incidencia de varios subtipos de enfermedades cardíacas en una cohorte de trabajadores expuestos crónicamente a radiaciones ionizantes en relación con la dosis de radiación y los factores no radiactivos.	En el presente estudio se encontró evidencia de una asociación positiva significativa de ciertos tipos de enfermedades cardíacas (cardiopatía isquémica, angina de pecho, insuficiencia cardíaca y arritmia cardíaca y trastornos de la conducción) entre hombres y mujeres con exposición ocupacional externa crónica a radiaciones ionizantes.

Tabla 1. Cont.

Sección	ID del estudio	Tipo de estudio	Diseño del estudio	Resultados principales
	Ivanov, VK y cols. 2001 [18]	Estudio epidemiológico	Este artículo presenta los resultados del análisis de la mortalidad entre los trabajadores de emergencia de Chernobyl que viven en Rusia, incluidas 65.905 personas.	Se investigó la dosis-respuesta de la mortalidad. Se encontraron riesgos de radiación estadísticamente significativos de mortalidad por neoplasias malignas (515 casos) y enfermedades cardiovasculares (1728 casos).
	Kashcheev, VV et al. 2001 [19]	Estudio epidemiológico	El estudio presenta un análisis de la incidencia de enfermedades cerebrovasculares entre los trabajadores rusos que participaron en las tareas de recuperación tras el accidente de Chernóbil, incluidos 53.772 trabajadores de las operaciones de recuperación.	Considerando como factores de riesgo para la incidencia de enfermedades cerebrovasculares: dosis, duración del trabajo de los liquidadores en la zona de Chernobyl y enfermedades concomitantes (hipertensión, cardiopatía isquémica, aterosclerosis y diabetes), se observó una asociación estadísticamente significativa hacia todas las enfermedades concomitantes. estudió. la incidencia de enfermedad cerebrovascular reveló una respuesta a la dosis estadísticamente significativa con ausencia de un período de latencia.
	Kashcheev, VV et al. 2017 [20]	Estudio epidemiológico	Este estudio analiza el impacto de la radiación en la incidencia de enfermedades del sistema circulatorio en la cohorte de trabajadores de operaciones de recuperación rusas y presenta los resultados del análisis de la incidencia de enfermedades cardiovasculares.	La incidencia de enfermedades cardiovasculares ha revelado una respuesta a la dosis estadísticamente significativa sin un período de latencia. Los riesgos de enfermedad cardiovascular por radiación mostraron una variación estadísticamente significativa con la duración de la estancia de los liquidadores en la zona de Chernobyl; para aquellos que permanecieron en la zona de Chernobyl menos de seis semanas.
	Zielinski, JM y cols. 2009 [21]	estudio de cohorte	Este estudio analiza el riesgo de mortalidad por enfermedades cardiovasculares en una cohorte canadiense de 337.397 personas expuestas ocupacionalmente a radiaciones ionizantes e incluidas en el Registro Nacional de Dosis de Canadá.	La investigación ha demostrado una correlación significativa entre la cantidad de exposición a la radiación y la probabilidad de mortalidad por enfermedades cardiovasculares.

Tabla 1. Cont.

Sección	ID del estudio	Tipo de estudio	Diseño del estudio	Resultados principales
Mortalidad isquémica cardíaca y cerebral	Howe, GR y cols. 2004 <a href="#">[22]</a>	estudio de cohorte	Este estudio analiza la mortalidad entre los trabajadores de la industria de la energía nuclear de EE. UU. después de enfermedades crónicas. exposición a bajas dosis de radiación ionizante. Un total de 53.698 trabajadores empleados en 15 empresas de servicios públicos que generan energía nuclear en los Estados Unidos han sido seguidos durante hasta 18 años entre 1979 y 1997.	Una fuerte asociación positiva y estadísticamente significativa entre dosis de radiación y muertes de corazón arteriosclerótico. En la cohorte se observaron enfermedades, incluida la enfermedad coronaria.
	Anderson, JL y cols. 2021 <a href="#">[23]</a>	Estudio epidemiológico	En este estudio, se examinaron las relaciones dosis-respuesta lineales y no lineales entre la dosis de radiación absorbida en los pulmones procedente del uranio depositado internamente y de fuentes externas y la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio en una cohorte de 23.731 hombres y 5.552 mujeres estadounidenses. trabajadores del enriquecimiento.	Los modelos no lineales de dosis-respuesta que utilizan splines cúbicos restringidos revelaron respuestas sublineales a dosis internas más bajas, lo que sugiere que los modelos lineales que son comunes en los estudios radioepidemiológicos del cáncer pueden describir mal la asociación entre dosis interna de uranio y enfermedad cardiovascular mortalidad.
	Guseva Canu, I. et al. 2012 <a href="#">[24]</a>	estudio de cohorte	Este trabajo examina la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio después de la ingesta crónica de uranio entre 2.897 trabajadores (79.892 años-persona) en una planta de procesamiento de uranio (1960-2006) en Francia.	Los autores observaron que la exposición a uranio lentamente soluble, es decir, uranio reprocesado, puede aumentar el riesgo de mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio.
	Zhivin, S. y col. 2018 <a href="#">[25]</a>	Estudio de casos y controles	Este artículo es un estudio de casos y controles anidado del AREVA NC Pierrelatte francés. trabajadores nucleares empleados entre 1960 y 2005 para estimar los riesgos de enfermedades del sistema circulatorio ajustándolos a los principales factores de riesgo de enfermedades del sistema circulatorio (tabaquismo, presión arterial, índice de masa corporal, colesterol total y glucemia) y dosis de radiación y externa.	Este estudio sugiere que podría existir una asociación positiva entre la exposición interna al uranio y la mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio, no confundida por los factores de riesgo de enfermedades del sistema circulatorio.
	Drubay, D. y col. 2015 <a href="#">[26]</a>	Estudio de casos y controles	Este estudio analiza la Cohorte francesa de uranio. mineros (n = 5086), que incluyó 442 muertes por enfermedades del sistema circulatorio, 167 de ellas por cardiopatía isquémica y 105 por enfermedad cerebrovascular.	Estos resultados sugieren que la relación significativa entre el riesgo de enfermedad cerebrovascular y la exposición al radón observada en toda la cohorte francesa probablemente no se ve afectada por los factores de riesgo de enfermedades del sistema circulatorio.

Tabla 1. Cont.

Sección	ID del estudio	Tipo de estudio	Diseño del estudio	Resultados principales
Mortalidad isquémica cardíaca y cerebral	Park, S. y col. 2021 [27]	Estudio epidemiológico	Este estudio tiene como objetivo evaluar la asociación entre Exposición ocupacional a la radiación y prevalencia de enfermedades no cancerosas. entre 42.607 trabajadores coreanos de la radiación.	Los hallazgos de referencia indicaron que La hiperlipidemia y las enfermedades del sistema circulatorio fueron las enfermedades no cancerosas más prevalentes en el grupo; sin embargo, no hubo asociación entre hiperlipidemia o enfermedades del sistema circulatorio y exposición ocupacional.
	Cha, ES et al. 2020 [28]	Estudio epidemiológico	Este estudio investiga la asociación entre externo en dosis bajas exposición a la radiación ocupacional y morbilidad por enfermedades circulatorias entre los trabajadores de radiación médica de diagnóstico (n = 11,500).	Este estudio proporciona poca evidencia que respalde una asociación positiva entre la exposición a la radiación ocupacional y el riesgo general de enfermedad circulatoria durante un corto período de seguimiento entre los trabajadores médicos de radiación en Corea del Sur.
	Bang, YJ y cols. 2023 [29]	Estudio epidemiológico	El objetivo de este estudio es investigar la relación entre la exposición a la radiación ocupacional y la mortalidad por enfermedades circulatorias entre los trabajadores médicos expuestos a la radiación (n = 53.860).	Las dosis de radiación ocupacional no se asociaron positivamente de manera significativa con la mortalidad por enfermedades circulatorias entre los trabajadores masculinos de radiación médica de diagnóstico.
	Engels, H. et al. 2005 [30]	Estudio epidemiológico	En este estudio se estudió la mortalidad por causas específicas en trabajadores nucleares de cinco instalaciones nucleares en Bélgica y se comparó con la población general.	Se realizó un análisis de la mortalidad por causas específicas para trabajadores y trabajadoras para tres criterios de valoración: sitios específicos de cáncer, enfermedades cardiovasculares y enfermedades respiratorias. No se observó ningún aumento significativo de la mortalidad.
	de Vocht, F. et al. 2020 [31]	Estudio comparativo	Este estudio es un estudio de casos y controles emparejado de trabajadores industriales masculinos empleados en una de las dos instalaciones nucleares anteriormente operadas por BNFL, involucrados en la producción y el trabajo manual calificado y no calificado asociado con la operación y el mantenimiento de plantas del ciclo del combustible nuclear.	Este estudio confirma asociaciones entre las dosis acumuladas de radiación de fuentes externas y la mortalidad por cardiopatía isquémica, similares a las observadas en varios de grandes cohortes nacionales e internacionales de oncólogos radioterapeutas.

Tabla 1. Cont.

Sección	ID del estudio	Tipo de estudio	Diseño del estudio	Resultados principales
Mortalidad isquémica cardíaca y cerebral	De Vocht, F. y col. 2021 [32]	Estudio epidemiológico	El estudio realizó análisis de sensibilidad y sesgo probabilístico para evaluar si la asociación entre la radiación externa la exposición y la mortalidad por cardiopatía isquémica son sólidas frente a varios supuestos hechos en los análisis originales de casos y controles emparejados.	Los análisis realizados en este estudio brindan mayor apoyo a la hipótesis de que la asociación observada entre la exposición a la radiación externa y la mortalidad por cardiopatía isquémica puede ser causal.
	Kreuzer, M. y col. 2015 [33]	Estudio epidemiológico	Este estudio tiene como objetivo examinar las relaciones exposición-respuesta entre la radiación ionizante y varios resultados de mortalidad en un subgrupo de 4054 hombres del estudio de cohorte de mineros de uranio alemanes, que trabajaron entre 1946 y 1989 en instalaciones de molienda, pero nunca bajo tierra o en minas a cielo abierto.	Este estudio muestra un exceso de mortalidad por cáncer de pulmón debido a la exposición al radón y por cánceres sólidos debido a la radiación gamma externa en los molinos de uranio que no fue estadísticamente significativo. La exposición al uranio no se asoció con ninguna causa de muerte, pero se estimó que las dosis absorbidas en los órganos eran bajas.
Grupos diagnósticamente expuestos	Kitahara, CM y cols. 2015 [34]	Estudio epidemiológico	Este estudio estima los riesgos de incidencia y mortalidad por cáncer y enfermedades circulatorias asociadas con realizar procedimientos que impliquen el uso de radionucleidos.	La realización de procedimientos con radionucleidos no se asoció con riesgos para la mayoría de los puntos finales examinados. Los modestos riesgos para la salud entre los tecnólogos radiológicos que realizan procedimientos que utilizan radionucleidos requieren un examen más detenido en estudios con estimaciones de dosis individuales, información más detallada sobre los tipos de procedimientos realizados y los radionucleidos utilizados, y un seguimiento más prolongado.

#### 4. Discusión

Los estudios revisados presentan un panorama complejo de hallazgos sobre la relación entre la exposición a la radiación y las enfermedades cardiovasculares. En conjunto subrayan la necesidad de realizar una investigación exhaustiva y matizada para dilucidar esta relación. Un punto en común entre estos estudios es el enfoque en poblaciones expuestas a radiaciones ionizantes, ya sea a través de entornos ocupacionales, procedimientos médicos o incidentes ambientales. Este elemento compartido resalta la importancia de comprender las posibles consecuencias para la salud de la exposición a la radiación, dado su uso generalizado y la ubicuidad de la radiación de fondo.

Sin embargo, las diferencias entre los estudios son igualmente notables. Estas disparidades surgen de variaciones en las poblaciones de estudio, niveles de dosis de radiación, criterios de valoración específicos de enfermedades cardiovasculares, diseños de estudios, factores geográficos y el alcance de los ajustes por posibles variables de confusión. Estas divergencias complican la interpretación de los resultados y resaltan la naturaleza multifacética de la relación entre la radiación y la salud cardiovascular. La presencia de hallazgos contradictorios en estos estudios es una observación crítica. Por ejemplo, algunos estudios sugieren un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares

Cardiopatía isquémica, asociada a la exposición a la radiación. La variación en los niveles de dosis de radiación entre los estudios es de particular interés. Algunos estudios involucran a personas expuestas a dosis relativamente bajas, lo cual es relevante para el diagnóstico médico y los escenarios de exposición a la radiación ocupacional. Por ejemplo, en el estudio de Soojin Park et al., la dosis acumulada media en la cohorte fue de 11,8 mSv.

Otros incluyen personas con dosis acumuladas más altas, como el personal de la industria nuclear y los trabajadores de emergencia de Chernobyl. Además, las diferencias en los diseños de los estudios, incluidos los estudios de cohortes, los estudios de casos y controles y los estudios de casos y controles anidados, introducen variaciones metodológicas que afectan la interpretación de los hallazgos. Por ejemplo, Kreuzer et al. realizaron un estudio anidado de casos y controles de mineros de uranio e informaron de un aumento estadísticamente no significativo (ERR/Sv 0,55) en la mortalidad relacionada con la enfermedad cerebrovascular. Las variaciones geográficas entre estos estudios introducen un aspecto crucial de la diversidad del mundo real. Los diferentes sistemas de salud, estilos de vida y factores ambientales en varios países pueden influir en el riesgo de enfermedad cardiovascular independientemente de la exposición a la radiación. Por ejemplo, el estudio INWORKS, que abarcó a 308.297 empleados de la industria nuclear en Francia, el Reino Unido y los Estados Unidos, encontró un exceso de riesgo relativo por Sv (ERR/Sv) estadísticamente significativo de 0,19 para todas las enfermedades no cancerosas, principalmente causadas por enfermedades circulatorias (ERR/Sv = 0,22) y car-

Pequeño y col. coordinó varios grupos que han publicado importantes revisiones integrales, así como varios metanálisis de la evidencia epidemiológica disponible. Un metanálisis anterior de datos epidemiológicos sobre la incidencia de enfermedades cardiovasculares después de dosis bajas a intermedias de radiación (dosis medias corazón/cerebro todas <2,5 Sv y en su mayoría <0,5 Sv) sugirió una ERR/Sv agregada positiva y significativa para ECV de 0,08 ( IC 95% 0,05–0,11 ), enfermedad cardíaca 0,07 (IC 95% 0,04–0,11) y accidente cerebrovascular 0,27 (IC 95% 0,20–0,34) [4]. Un metanálisis más reciente mostró que la exposición a la radiación se asociaba con un metaexceso de riesgo relativo por Gy generalmente significativo para la enfermedad cardiovascular total 0,11 ( intervalo de confianza del 95%: 0,08–0,14), cardiopatía isquémica 0,07 (0,05–0,10), otras enfermedades cardíacas. enfermedad 0,03 (0,02–0,05), enfermedad cerebrovascular 0,19 (0,09–0,28) y otras enfermedades cardiovasculares 0,17 (–0,03–0,37) [35].

El ajuste por posibles factores de confusión es otra consideración crucial. Algunos estudios tienen en cuenta meticulosamente variables como el tabaquismo, el IMC y el nivel socioeconómico, mientras que otros pueden tener ajustes más limitados. Estos ajustes desempeñan un papel fundamental para garantizar que las asociaciones observadas no se vean confundidas por factores externos. Por ejemplo, el estudio de la USRT informó que la realización de procedimientos de braquiterapia se asoció con una mayor incidencia de infarto de miocardio (HR = 1,37) y mortalidad por todas las causas (HR = 1,10) después de ajustar por factores relevantes. Se debe tener precaución al interpretar estos resultados debido al posible sesgo introducido por las incertidumbres dosimétricas, los posibles errores en la vinculación de los registros y, especialmente, la falta de ajuste por factores de riesgo no relacionados con la radiación. La principal limitación de nuestra revisión es que no pudimos tener en cuenta todos los posibles factores de confusión presentes en los estudios revisados, en particular, factores de estilo de vida, la presencia de predisposición genética al desarrollo de ECV, factores geográficos y el tipo de enfermedad. población estudiada (trabajadores de la salud, supervivientes de accidentes nucleares y trabajadores de la industria nuclear). Puede ser útil realizar más estudios para evaluar el efecto de todos estos factores sobre el riesgo de ECV. Otra limitación es que no incluimos artículos escritos en idiomas distintos del inglés.

Según nuestra revisión, es fundamental minimizar la exposición a la radiación ionizante.

En Italia, el Decreto Legislativo 101/2020 regula los valores de dosis que deben respetarse para evitar los efectos deterministas de las radiaciones ionizantes y reducir la incidencia de las probabilísticas en el lugar de trabajo.

Respetar estos límites también puede reducir el riesgo de ECV. Sin embargo, la mejor medida preventiva es mantener los niveles de radiación ionizante lo más bajos posible para lograr los objetivos deseados [36].

## 5. Conclusiones

En cuanto a la protección radiológica, sigue siendo crucial el tema científico de si la exposición prolongada a bajas dosis o bajas dosis de radiación procedente de fuentes externas aumenta el riesgo de enfermedad cardiovascular. Aunque todavía son propensos al sesgo, los estudios epidemiológicos observacionales en comunidades de trabajadores radiológicos en varios países ofrecen datos convincentes. Debido a que el impacto de otros factores de riesgo ambientales, de estilo de vida y personales superan el riesgo de enfermedad cardiovascular por exposición a dosis bajas de radiación, el poder estadístico de un estudio epidemiológico es crucial. La falta de información sobre los factores del estilo de vida, especialmente aquellos que afectan la etiología e incluyen el consumo de alcohol, el tabaquismo, la alimentación, la obesidad, la actividad física y los antecedentes genéticos, es una limitación general de las investigaciones de ECV con dosis bajas que se están realizando actualmente. Las dos recomendaciones clave para futuras investigaciones son recolectar más muestras biológicas para comprender mejor el efecto de la radiación en el proceso de la enfermedad y llevar a cabo grandes estudios de cohortes de adultos con sobrevivientes de la bomba atómica japonesa, trabajadores y ensayos clínicos.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, GM y LC; metodología, GM y LC; curación de datos, GV e IVK; redacción: preparación del borrador original IVK y GV; redacción: revisión y edición, GM y LC; visualización, FG; supervisión, AM y RF; administración del proyecto, FG Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: No aplicable.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplicable.

Declaración de disponibilidad de datos: No aplicable.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

## Referencias

1. Jiao, Y.; Cao, F.; Liu, H. Muerte celular inducida por radiación y sus mecanismos. *Médico de Salud*. 2022, 123, 376–386. [\[Referencia cruzada\]](#)
2. Hill, MA; Ullrich, RL Radiaciones ionizantes. En *Concordancia del sitio del tumor y mecanismos de carcinogénesis; Publicaciones científicas de la IARC*, núm. 165, capítulo 18; Baan, RA, Stewart, BW, Straif, K., Eds.; Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer: Lyon, Francia, 2019.
3. Poco, diputado; Tawn, EJ; Tzoulaki, I.; Wakeford, R.; Hildebrandt, G.; París, F.; Tapio, S.; Elliott, P. Una revisión sistemática de las asociaciones epidemiológicas entre dosis bajas y moderadas de radiación ionizante y efectos cardiovasculares tardíos, y sus posibles mecanismos. *Radiación. Res.* 2008, 169, 99–109. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
4. Poco, diputado; Tawn, EJ; Tzoulaki, I.; Wakeford, R.; Hildebrandt, G.; París, F.; Tapio, S.; Elliott, P. Revisión y metanálisis de las asociaciones epidemiológicas entre dosis bajas/moderadas de radiación ionizante y riesgos de enfermedades circulatorias, y sus posibles mecanismos. *Radiación. Reinar. Biofísica*. 2010, 49, 139–153. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Bhattacharya, S.; Asaithamby, A. Radiaciones ionizantes y riesgos cardíacos. *Semin. Desarrollo celular. Biol.* 2016, 58, 14–25. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#) 6. Poco, diputado; Azizova, TV; Hamada, N. Efectos no cancerígenos de dosis bajas y moderadas de la radiación ionizante en personas expuestas directamente, especialmente enfermedades circulatorias y oculares: una revisión de la epidemiología. En t. *J. Radiat. Biol.* 2021, 97, 782–803. [\[Referencia cruzada\]](#)
7. Tomei, F.; Papaleo, B.; Fantini, S.; Iavicoli, S.; Bacolo, TP; Rosati, MV Efectos vasculares de la exposición ocupacional a dosis bajas radiación ionizante. *Soy. J. Ind. Med.* 1996, 30, 72–77. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
8. Andreassi, MG; Piccaluga, E.; Gargani, L.; Sabatino, L.; Borghini, A.; Fata, F.; Bruno, RM; Padovani, R.; Guagliumi, G.; Picano, E. Aterosclerosis carotídea subclínica y envejecimiento vascular temprano debido a la exposición prolongada a dosis bajas de radiación ionizante: un estudio genético, de telómeros y de ultrasonido vascular en el personal del laboratorio de cateterismo cardíaco. *JACC Cardiovascular. Interv.* 2015, 8, 616–627. [\[Referencia cruzada\]](#)
9. Takahashi, I.; Shimizu, Y.; Grant, EJ; Colonia, J.; Ozasa, K.; Kodama, K. Estudio sobre la mortalidad por enfermedades cardíacas a lo largo de la vida, 1950–2008. *Radiat Res.* 2017, 187, 319–332. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
10. Gillies, M.; Richardson, DB; Cardis, E.; Daniels, RD; O'Hagan, JA; Haylock, R.; Laurier, D.; Leuraud, K.; Moissonnier, M.; Schubaer-Berigan, MK; et al. Mortalidad por enfermedades circulatorias y otros resultados no relacionados con el cáncer entre trabajadores nucleares en Francia, el Reino Unido y los Estados Unidos (INWORKS). *Radiación. Res.* 2017, 188, 276–290. [\[Referencia cruzada\]](#)
11. Laurier, D.; Richardson, DB; Cardis, E.; Daniels, RD; Gillies, M.; O'Hagan, J.; Hamra, GB; Haylock, R.; Leuraud, K.; Moissonnier, M.; et al. El estudio internacional de trabajadores nucleares (Inworks): un estudio epidemiológico colaborativo para mejorar el conocimiento sobre los efectos en la salud de la exposición prolongada a dosis bajas. *Radiación. Prot. Dosim.* 2017, 173, 21–25. [\[Referencia cruzada\]](#)



12. Laurent, O.; Metz-Flamant, C.; Rogel, A.; Hubert, D.; Riedel, A.; Garcier, Y.; Laurier, D. Relación entre la exposición ocupacional a radiaciones ionizantes y la mortalidad en la compañía eléctrica francesa, período 1961-2003. En t. Arco. Ocupar. Reinar. Salud 2010, 83, 935–944. [\[Referencia cruzada\]](#)
13. Azizova, TV; Muirhead, CR; Moseeva, MB; Grigoryeva, ES; Vlasenko, EV; Cazador, N.; Haylock, RG; O'Hagan, JA Cardiopatía isquémica en trabajadores nucleares empleados por primera vez en Mayak PA en 1948-1972. Médico de Salud. 2012, 103, 3–14. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Azizova, TV; Grigorieva, ES; Cazador, N.; Pikulina, MV; Moseeva, MB Riesgo de mortalidad por enfermedades circulatorias en la cohorte de trabajadores de Mayak después de la exposición a la radiación ocupacional. J. Radiol. Prot. 2015, 35, 517–538. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Azizova, TV; Bannikova, MV; Grigoryeva, ES; Briks, KV; Hamada, N. Mortalidad por diversas enfermedades del sistema circulatorio en la cohorte de trabajadores nucleares rusos Mayak: 1948-2018. J. Radiol. Prot. 2022, 42, 21511. [\[Referencia cruzada\]](#)
16. Azizova, TV; Bannikova, MV; Briks, KV; Grigoryeva, ES; Hamada, N. Riesgos de incidencia de subtipos de enfermedades cardíacas en una cohorte rusa de trabajadores nucleares de la Asociación de Producción Mayak. Radiación. Reinar. Biofísica. 2023, 62, 51–71. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. Wakeford, R. Riesgo de enfermedades del sistema circulatorio después de una exposición a radiación de bajo nivel: una evaluación de la evidencia de exposiciones ocupacionales. J. Radiol. Prot. 2022, 42, 20201. [\[Referencia cruzada\]](#)
18. Ivanov, VK; Gorski, AI; Maksioutov, MA; Tsyb, AF; Souchkevitch, GN Mortalidad entre los trabajadores de emergencia de Chernobyl: Estimación de los riesgos de radiación (análisis preliminar). Médico de Salud. 2001, 81, 514–521. [\[Referencia cruzada\]](#)
19. Kashcheev, VV; Chekin, SY; Maksioutov, MA; Tumanov, KA; Menyaylo, AN; Kochergina, EV; Kashcheeva, PV; Gorsky, AI; Shchukina, NV; Karpenko, SV; et al. Estudio radioepidemiológico de enfermedades cerebrovasculares en la cohorte de trabajadores rusos de la operación de recuperación del accidente de Chernobyl. Médico de Salud. 2016, 111, 192–197. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
20. Kashcheev, VV; Chekin, SY; Karpenko, SV; Maksioutov, MA; Menyaylo, AN; Tumanov, KA; Kochergina, EV; Kashcheeva, PV; Gorsky, AI; Shchukina, NV; et al. Riesgo de radiación de enfermedades cardiovasculares en la cohorte de trabajadores de emergencia rusos del accidente de Chernobyl. Médico de Salud. 2017, 113, 23-29. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
21. Zielinski, JM; Ashmore, PJ; Banda, PR; Jiang, H.; Shilnikova, NS; Tait, VK; Krewski, D. Exposición a radiaciones ionizantes en dosis bajas y mortalidad por enfermedades cardiovasculares: estudio de cohorte basado en el registro nacional canadiense de dosis de trabajadores sometidos a radiación. En t. J. Ocupar. Medicina. Reinar. Salud 2009, 22, 27–33. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
22. Howe, GR; Zablotska, LB; Arreglar, JJ; Egel, J.; Buchanan, J. Análisis de la experiencia de mortalidad entre los trabajadores de la industria de la energía nuclear de EE. UU. después de una exposición crónica a dosis bajas de radiación ionizante. Radiación. Res. 2004, 162, 517–526. [\[Referencia cruzada\]](#)
23. Anderson, JL; Bertke, SJ; Yiin, J.; Kelly-Reif, K.; Daniels, RD Mortalidad por enfermedades cerebrovasculares y cardíacas isquémicas en trabajadores del enriquecimiento de uranio. Ocupar. Reinar. Medicina. 2021, 78, 105–111. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. Guseva Canu, I.; Garsi, JP; Caër-Lorho, S.; Jacob, S.; Colomb, P.; Acker, A.; Laurier, D. ¿El uranio induce enfermedades circulatorias? Primeros resultados de una cohorte francesa de trabajadores del uranio. Ocupar. Reinar. Medicina. 2012, 69, 404–409. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
25. Zhivin, S.; Guseva Canu, I.; Davesne, E.; Blanchardon, E.; Garsi, JP; Sansón, E.; Niogret, C.; Zablotska, LB; Laurier, D. Enfermedad circulatoria en trabajadores franceses del ciclo del combustible nuclear expuestos crónicamente al uranio: un estudio de casos y controles anidado. Ocupar. Reinar. Medicina. 2018, 75, 270–276. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Drubay, D.; Caër-Lorho, S.; Laroche, P.; Laurier, D.; Rage, E. Mortalidad por enfermedades del sistema circulatorio entre los uranios franceses. Mineros: un estudio de casos y controles anidado. Radiación. Res. 2015, 183, 550–562. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Parque, S.; Lee, DN; Jin, YW; Cha, ES; Jang, Wisconsin; Parque, S.; Seo, S. Prevalencia de enfermedades no cancerosas y asociación con el trabajo exposición a la radiación entre los trabajadores coreanos a la radiación. Ciencia. Rep. 2021, 11, 22415. [\[CrossRef\]](#)
28. Cha, ES; Zablotska, LB; Explosión, YJ; Lee, WJ Exposición a la radiación ocupacional y morbilidad de las enfermedades circulatorias entre los trabajadores de radiación médica de diagnóstico en Corea del Sur. Ocupar. Reinar. Medicina. 2020, 77, 752–760. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
29. Bang, YJ; Kim, YM; Lee, WJ Mortalidad por enfermedades circulatorias entre trabajadores masculinos de radiación médica en Corea del Sur, 1996-2019. Escanear. J. Entorno de Trabajo. Salud 2023, 49, 99–107. [\[Referencia cruzada\]](#)
30. Engels, H.; Swaen, GM; Slangen, J.; van Amersvoort, L.; Holmstock, L.; Van Mieghem, E.; Van Regenmortel, I.; Wambersie, A. Exposición a la radiación y causa de mortalidad específica entre los trabajadores nucleares en Bélgica (1969-1994). Radiación. Prot. Dosim. 2005, 117, 373–381. [\[Referencia cruzada\]](#)
31. de Vocht, F.; Hidajat, M.; Martín, RM; Agio, R.; Wakeford, R. Mortalidad por enfermedad cardíaca isquémica y exposición ocupacional a la radiación en un estudio de casos y controles anidado de trabajadores británicos del ciclo del combustible nuclear: investigación de factores de confusión por estilo de vida, rasgos fisiológicos y exposiciones ocupacionales. Radiación. Res. 2020, 194, 431–444. [\[Referencia cruzada\]](#)
32. de Vocht, F.; Martín, RM; Hidajat, M.; Wakeford, R. Análisis de sesgo cuantitativo de la asociación entre la exposición ocupacional a la radiación y la mortalidad por enfermedad cardíaca isquémica en trabajadores nucleares del Reino Unido. Radiación. Res. 2021, 196, 574–586. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
33. Kreuzer, M.; Dufey, F.; Laurier, D.; Nowak, D.; Marsh, JW; Schnelzer, M.; Sogl, M.; Walsh, L. Mortalidad por exposición a radiación interna y externa en una cohorte de molineros de uranio alemanes varones, 1946-2008. En t. Arco. Ocupar. Reinar. Salud 2015, 88, 431–441. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
34. Kitahara, CM; Linet, MS; Drozdovitch, V.; Alejandro, BH; Preston, DL; Simón, SL; Freedman, DM; Brill, AB; Molinero, JS; Poco, diputado; et al. Riesgos de cáncer y enfermedades circulatorias en tecnólogos radiológicos estadounidenses asociados con la realización de procedimientos que involucran radionucleidos. Ocupar. Reinar. Medicina. 2015, 72, 770–776. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)

- 
35. Pequeño, diputado; Azizova, TV; Richardson, DB; Tapio, S.; Bernier, M.; Kreuzer, M.; Cucinotta, FA; Bazyka, D.; Chumak, V.; Ivanov, VK; et al. Radiaciones ionizantes y enfermedades cardiovasculares: revisión sistemática y metanálisis. *BMJ* 2023, 380, e072924. [Referencia cruzada]
36. El Decreto Legislativo italiano n. 101/2020. Disponible en línea: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/08/12/20G00121/sg> (consultado el 26 de noviembre de 2023).

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.