

EFFECTOS DE LA EXPOSICIÓN OCUPACIONAL A RADIACIÓN CÓSMICA EN TRIPULANTES AÉREOS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

OCCUPATIONAL EXPOSURE TO COSMIC RADIATION EFFECTS IN AIRCREW: A SYSTEMATIC REVIEW

EFEITOS DA EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL À RADIAÇÃO CÓSMICA EM TRIPULANTES AÉREOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Andrea Paola Britos Gomez¹
Kelly Raquel Lopez Dominguez²
Paulo Roberto de Souza Filho³
Heloisa Mayara Repula Souza⁴
Priscila de Paula Pereira Malta⁵
Fernanda Dillenburg da Costa⁶
Letícia Ferraz Lambert⁷
Gabriel Hauari Maciel⁸
Rafael Lenz Carriel⁹
Laura Slovinski Luchesa¹⁰
Humberto Ribeiro Moraes Junior¹¹
Eric Leonardo Farias Ribeiro Moraes¹²
Alcides Chaux¹³

RESUMEN: Introducción/Objetivo: La radiación cósmica ionizante representa un riesgo ocupacional relevante para tripulaciones aéreas. Este estudio sintetiza la evidencia publicada entre enero de 2020 y junio de 2025 sobre sus efectos en la salud, las patologías más asociadas y las medidas de vigilancia recomendadas. Métodos: Revisión sistemática en PubMed/MEDLINE, SciELO y BVS/LILACS, siguiendo criterios PICO para incluir estudios originales y revisiones sobre efectos en la salud (cáncer, cataratas, alteraciones reproductivas, entre otros) en tripulaciones aéreas. Resultados: Se incluyeron 10 artículos. La evidencia muestra asociación consistente entre exposición y mayor riesgo de cáncer, principalmente melanoma (SIR \approx 2.0) y cáncer de mama (SIR \approx 1.5). También se halló incremento en cataratas nucleares con relación dosis-respuesta y riesgos reproductivos, como abortos espontáneos por encima de 0.36 mSv. El daño se vincula a estrés oxidativo y roturas de ADN, potenciado por neutrones de alta eficacia biológica. Factores como la alteración del ritmo circadiano actúan como confusores. La regulación es desigual: sólida en Europa y Norteamérica, casi inexistente en América Latina. Conclusión: La radiación cósmica es un riesgo medible y subestimado. Urge implementar vigilancia dosimétrica y médica obligatoria, junto con marcos regulatorios internacionales.

Palabras clave: Radiación cósmica. Tripulación aérea. Salud ocupacional. Riesgo de cáncer. Revisión sistemática. Dosimetría.

¹Professora Tutora, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

²Professora Universitária, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

³Discente Universitário, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

⁴Discente Universitária, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

⁵Discente Universitária, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

⁶Discente Universitária, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

⁷Discente Universitária, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

⁸Discente Universitário, Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

⁹Discente Universitário Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

¹⁰Discente Universitária. Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

¹¹Discente Universitário. Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

¹²Discente Universitário., Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

¹³Professor Orientador. Universidad Privada del Este - Filial Ciudad del Este.

ABSTRACT: Introduction/Objectives: Ionizing cosmic radiation is a significant occupational risk for aircrews. This study synthesizes evidence published between January 2020 and June 2025 on its health effects, the most associated pathologies, and recommended surveillance measures. Methods: A systematic review was conducted in PubMed/MEDLINE, SciELO, and BVS/LILACS, following PICO criteria to include original studies and reviews addressing health effects (cancer, cataracts, reproductive disorders, among others) in aircrews. Results: Ten articles were included. Evidence shows a consistent association between exposure and higher cancer risk, mainly melanoma ($SIR \approx 2.0$) and breast cancer ($SIR \approx 1.5$). An increase in nuclear cataracts with a clear dose-response relationship and reproductive risks, such as spontaneous abortions above 0.36 mSv, were also found. Biological damage is linked to oxidative stress and DNA breaks, exacerbated by high biological effectiveness of neutrons. Factors such as circadian rhythm disruption act as confounders. Regulation is uneven: robust in Europe and North America, almost absent in Latin America. Conclusion: Cosmic radiation is a measurable and underestimated risk. It is urgent to implement mandatory dosimetric and medical surveillance, along with coherent international regulatory frameworks.

Keywords: Cosmic radiation. Aircrew. Occupational health. Cancer risk. Systematic review. Dosimetry.

RESUMO: Introdução/Objetivo: A radiação cósmica ionizante representa um risco ocupacional relevante para tripulações aéreas. Este estudo sintetiza as evidências publicadas entre janeiro de 2020 e junho de 2025 sobre seus efeitos na saúde, as patologias mais associadas e as medidas de vigilância recomendadas. Métodos: Revisão sistemática nas bases PubMed/MEDLINE, SciELO e BVS/LILACS, seguindo critérios PICO para incluir estudos originais e revisões sobre efeitos à saúde (câncer, catarata, alterações reprodutivas, entre outros) em tripulações aéreas. Resultados: Foram incluídos 10 artigos. As evidências mostram associação consistente entre exposição e maior risco de câncer, principalmente melanoma ($SIR \approx 2,0$) e câncer de mama ($SIR \approx 1,5$). Também foi identificado aumento de catarata nuclear com relação dose-resposta e riscos reprodutivos, como abortos espontâneos acima de 0,36 mSv. O dano biológico está ligado ao estresse oxidativo e quebras de DNA, potencializado por nêutrons de alta eficácia biológica. Fatores como a alteração do ritmo circadiano atuam como confundidores. A regulamentação é desigual: robusta na Europa e América do Norte, quase inexistente na América Latina. Conclusão: A radiação cósmica é um risco mensurável e subestimado. É urgente implementar vigilância dosimétrica e médica obrigatória, além de marcos regulatórios internacionais coerentes.

Palavras chave: Radiação cósmica. Tripulação aérea. Saúde ocupacional. Risco de câncer. Revisão sistemática. Dosimetria.

INTRODUÇÃO

La exposición a radiación ionizante de origen cósmico constituye un riesgo ocupacional inherente y reconocido para las tripulaciones aéreas, un grupo laboral expuesto a un ambiente de radiación único y complejo (Eckhardt, 2024; Scheibler et al., 2022). Esta radiación se compone principalmente de dos fuentes: la radiación cósmica galáctica (GCR), un flujo constante de partículas de alta energía originadas fuera de nuestro sistema solar, y las partículas energéticas solares (SEP), emitidas esporádicamente durante eventos solares como las erupciones (Guo et al., 2024). Si bien la magnetósfera y la atmósfera del planeta ofrecen una protección significativa a nivel del suelo, esta se reduce drásticamente con la altitud. Por ello, los vuelos comerciales, especialmente las rutas transoceánicas y polares que alcanzan altitudes de crucero de 10 a 12 km, exponen a sus ocupantes a niveles de radiación que pueden superar significativamente los límites de exposición ocupacional recomendados por organismos internacionales como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) (Eckhardt, 2024; Meier et al., 2020).

La evidencia científica acumulada ha asociado de manera consistente esta exposición crónica y de baja dosis con un incremento en el riesgo de diversas patologías (Phillips, 2025). A nivel molecular, el daño se origina por la inducción de estrés oxidativo persistente, un desequilibrio celular causado por la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) que dañan lípidos, proteínas y, fundamentalmente, el ADN (Baulch et al., 2015; Toprani et al., 2024). Este daño genómico activa complejas rutas de respuesta y reparación celular que, de ser superadas por la cronicidad de la exposición, pueden conducir a inestabilidad genómica y, finalmente, a la carcinogénesis (Chaurasia et al., 2019). Epidemiológicamente, esta base mecanicista se traduce en riesgos cuantificables: se ha documentado un riesgo hasta dos veces mayor de melanoma cutáneo (Razón de Incidencia Estandarizada [SIR] ≈ 2.0) y un riesgo elevado de cáncer de mama (SIR ≈ 1.5) en tripulantes femeninas, además del desarrollo de cataratas de tipo nuclear y efectos adversos sobre la salud reproductiva, como un mayor riesgo de aborto espontáneo en gestantes expuestas a dosis superiores a 0,36 mSv (CDC, 2025; Miura et al., 2019; Pukkala et al., 2012; Rafnsson et al., 2005).

A pesar del creciente consenso sobre el riesgo, persiste una notable heterogeneidad en los diseños metodológicos de los estudios, así como una falta de estandarización en la

dosimetría y el seguimiento médico, lo que dificulta la comparación directa de resultados y la formulación de conclusiones definitivas (Scheibler et al., 2022). Esta situación se agrava dramáticamente en regiones como América Latina, donde la normativa para el control y la vigilancia de la salud de esta población laboral es aún incipiente o, en muchos casos, inexistente, creando una preocupante brecha de protección (Eckhardt, 2024). La presente revisión sistemática se justifica por la necesidad de consolidar y evaluar críticamente la evidencia científica más reciente para dimensionar el problema, clarificar las asociaciones de riesgo y orientar el desarrollo de políticas de salud pública y laboral basadas en la evidencia, abordando las brechas de conocimiento que han sido identificadas en revisiones previas (Russo et al., 2023).

En este contexto, el objetivo general de este estudio fue sintetizar la evidencia científica publicada entre 2020 y 2025 sobre los efectos de la exposición ocupacional a radiación cósmica en la salud de tripulantes aéreos, con énfasis en las patologías más frecuentemente asociadas y las medidas de vigilancia y protección recomendadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del estudio y pregunta de investigación:

2240

Se condujo una revisión sistemática de la literatura científica. Este diseño fue seleccionado por ser el método más riguroso para identificar, evaluar y sintetizar toda la evidencia relevante sobre una pregunta de investigación específica. El protocolo del estudio se adhirió a recomendaciones internacionales para la elaboración de este tipo de investigaciones, con el fin de garantizar la transparencia y minimizar los sesgos. La pregunta de investigación fue estructurada meticulosamente siguiendo el formato PICO, un marco que permite desglosar los componentes clave de la pregunta para guiar la estrategia de búsqueda:

- P (Población): Tripulantes aéreos (pilotos y personal de cabina) de ambos sexos, sin restricciones de edad, con exposición ocupacional a radiación cósmica en vuelos comerciales.
- I (Intervención/Exposición): Exposición laboral crónica y de baja dosis a radiación ionizante de origen cósmico durante la realización de vuelos comerciales de corta, media y larga distancia.

- C (Comparación): Los estudios podían comparar los resultados de salud con poblaciones no expuestas (población general) o con grupos de la misma población con menor nivel de exposición acumulada (ej. tripulantes con menos horas de vuelo).
- O (Outcome/Resultados): Efectos sobre la salud, incluyendo, pero no limitándose a, incidencia y mortalidad por cáncer (melanoma, leucemia, mama, etc.), patologías oftálmicas (cataratas), efectos reproductivos (aborto espontáneo, infertilidad) y efectos neurológicos o cardiovasculares.

Estrategia de búsqueda y fuentes de información

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo de forma exhaustiva entre marzo y junio de 2025. Se consultaron bases de datos electrónicas multidisciplinares y especializadas en ciencias de la salud para maximizar la cobertura: PubMed/MEDLINE, por su amplio alcance en literatura biomédica; SciELO (Scientific Electronic Library Online) y BVS/LILACS (Literatura Latinoamericana y del Caribe en Ciencias de la Salud), para asegurar la inclusión de investigaciones relevantes de la región de América Latina. Adicionalmente, se llevó a cabo una búsqueda en gris revisando los repositorios en arXiv.org para artículos de física de radiaciones con aplicación directa a la aeronáutica y Google Scholar para identificar preprints y corroborar el acceso abierto a los documentos.

2241

La búsqueda se restringió a artículos publicados en el intervalo comprendido entre enero de 2020 y junio de 2025, para enfocar el análisis en la evidencia más reciente. Se utilizaron descriptores en español, inglés y portugués, combinando términos libres y controlados (MeSH, DeCS) cuando fue aplicable. La estrategia de búsqueda principal, adaptada a la sintaxis de cada base de datos, empleó la siguiente combinación de operadores booleanos para lograr un balance entre sensibilidad y especificidad: («aircrew» OR «flight personnel» OR «pilots» OR «flight attendants») AND («cosmic radiation» OR «ionizing radiation» OR «aviation radiation») AND («health effects» OR «cancer» OR «occupational diseases» OR «risk»).

Criterios de elegibilidad

Se definieron criterios de inclusión y exclusión claros y explícitos para la selección de los estudios. Los criterios de inclusión fueron: (1) Estudios originales con diseños

epidemiológicos (cohorte, caso-control), observacionales, o de modelado, así como revisiones (sistemáticas o narrativas) que sinteticen evidencia; (2) Estudios cuyo foco principal fueran los efectos de la radiación cósmica en tripulaciones de vuelos comerciales o militares; (3) Artículos publicados en español, inglés o portugués; (4) Publicaciones con acceso disponible al texto completo para permitir una evaluación exhaustiva. Los criterios de exclusión fueron: (1) Publicaciones con fecha anterior a enero de 2020; (2) Estudios centrados exclusivamente en astronautas o misiones espaciales, ya que el perfil de dosis y el ambiente de radiación son sustancialmente diferentes; (3) Editoriales, cartas al editor, resúmenes de congresos o documentos sin un proceso de revisión por pares verificado; (4) Artículos duplicados identificados en diferentes bases de datos.

Selección de estudios y extracción de datos

El proceso de selección fue riguroso y se realizó en dos fases para minimizar errores. Primero, dos revisores independientes (P.R.S.F. y A.P.B.G.) examinaron los títulos y resúmenes de todos los registros identificados para una primera criba. Posteriormente, los mismos revisores evaluaron de forma independiente el texto completo de los artículos potencialmente relevantes para tomar la decisión final sobre su inclusión. Cualquier discrepancia en ambas fases se resolvió mediante discusión y consenso. Para la extracción de datos, se diseñó y utilizó una hoja de cálculo estandarizada en la que se registró la siguiente información de cada estudio incluido: primer autor, año y país del estudio, tipo de diseño metodológico, características de la población y tamaño muestral (si aplicaba), métodos de estimación de la dosis de radiación, principales resultados clínicos o dosimétricos, y las conclusiones o recomendaciones clave de los autores.

2242

Evaluación de la calidad metodológica

La calidad metodológica y el riesgo de sesgo de los estudios seleccionados se evaluaron de forma independiente por los dos revisores utilizando una lista de verificación adaptada de la herramienta QUADAS (Quality Assessment of Diagnostic Accuracy Studies), enfocada en su aplicabilidad a revisiones. Se evaluaron dominios clave considerados cruciales para la validez de los hallazgos, como la claridad y adecuación de los objetivos, la exhaustividad y

reproducibilidad de la metodología, la representatividad de la población estudiada, la coherencia interna entre los resultados y las conclusiones, y la declaración explícita y discusión de las limitaciones del estudio por parte de los autores.

Plan de análisis

Dada la heterogeneidad de los diseños de estudio incluidos (desde revisiones moleculares hasta reportes institucionales), se optó por realizar una síntesis narrativa de la evidencia en lugar de un metaanálisis cuantitativo. Los hallazgos extraídos de los artículos se organizaron, tabularon y agruparon por categorías temáticas predefinidas, tales como: riesgo de cáncer (desglosado por tipo), efectos oftálmicos, salud reproductiva, dosimetría y modelos de exposición, y aspectos regulatorios y de percepción del riesgo. Esta aproximación permitió integrar y comparar los resultados de manera cualitativa para construir una visión comprensiva y matizada del estado actual del conocimiento sobre el tema.

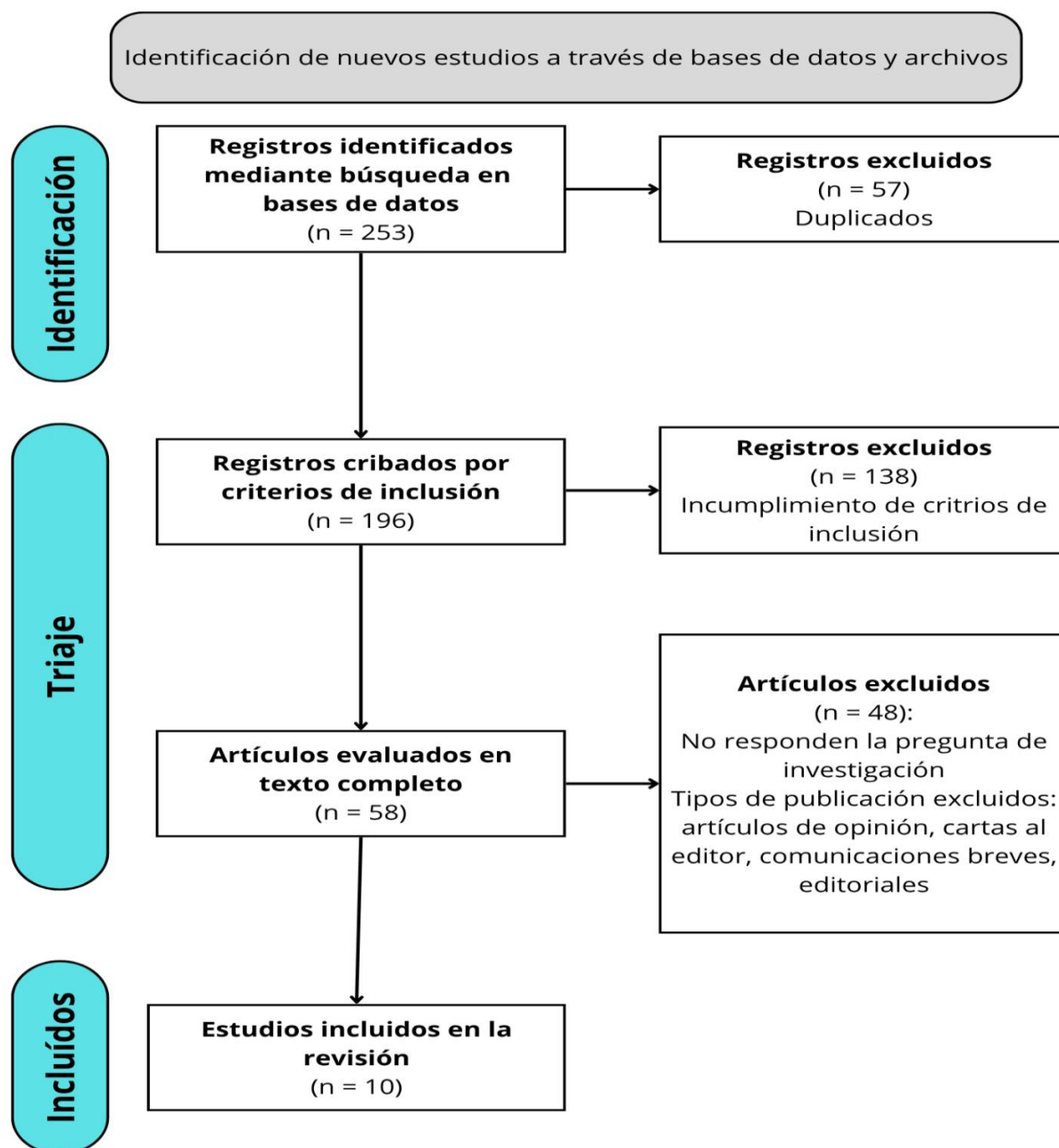
RESULTADOS

Proceso de selección de estudios:

2243

La estrategia de búsqueda inicial en las bases de datos consultadas identificó un total de 253 registros. Tras la eliminación de 57 duplicados, se procedió a la revisión de 196 títulos y resúmenes, de los cuales se excluyeron 138. Se evaluó el texto completo de 58 artículos, seleccionando finalmente 10 estudios para su inclusión. El proceso completo se detalla en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 1).

Figura 1. Diagrama de flujo de selección de estudios incluidos según la declaración PRISMA 2020.



2244

Características de los estudios incluidos

Los 10 artículos incluidos fueron publicados entre 2020 y 2025. La muestra final presentó una diversidad de diseños metodológicos, permitiendo un abordaje multidisciplinario. Cabe destacar que ninguno de los 10 estudios que cumplieron los criterios de inclusión fue realizado en una población de tripulantes aéreos de América Latina, lo que evidencia una brecha

geográfica significativa en la investigación sobre este tema. Las características principales de cada estudio se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los estudios incluidos en la revisión sistemática

N.º	Autores, año	Tipo de estudio	Hallazgos clave
1	Eckhardt, 2024	Revisión narrativa	Mayor riesgo de cáncer hematológico y melanoma; destaca la falta de regulación en EE.UU.
2	Ortiz-Ortiz et al., 2023	Revisión sistemática	Asocia la exposición a radiación con un aumento de cáncer, cataratas y efectos reproductivos.
3	Scheibler et al., 2022	Revisión epidemiológica	Discute la incidencia de diversos cánceres en tripulación aérea; destaca la falta de estandarización.
4	Toprani et al., 2024	Revisión molecular	Detalla el daño al ADN, el estrés oxidativo y el potencial oncogénico de la radiación cósmica.
5	Phillips, 2025	Revisión clínica	Incluye cataratas, efectos cardiovasculares y reproductivos en pilotos como riesgos ocupacionales.
6	Tobiska et al., 2022	Reporte técnico	Documenta eventos de radiación intensificados durante vuelos en latitudes altas por actividad solar.

7	Yasuda et al., 2025	Estudio observacional	Analiza la variación de la dosis en tripulación durante la pandemia de COVID-19.
8	Scarff, 2024	Revisión narrativa	Confirma una mayor prevalencia de melanoma en tripulantes y personal militar.
9	Russo et al., 2023	Revisión sistemática	Confirma la radiación cósmica como uno de los principales riesgos físicos en la aviación.
10	CDC, 2025	Informe institucional	Asocia la exposición en embarazadas con riesgo de aborto espontáneo a dosis >0.36 mSv.

Síntesis de los hallazgos principales

Los resultados de los estudios analizados se agruparon en las siguientes categorías temáticas.

Riesgo de cáncer y daño genético

Seis de los estudios analizados abordan de forma central el riesgo de cáncer. La evidencia consolidada documentó un aumento estadísticamente significativo en la incidencia de cáncer hematológico y, de forma muy consistente, de melanoma cutáneo en pilotos y tripulantes, especialmente en aquellos con mayor carga de horas de vuelo (Eckhardt, 2024; Ortiz-Ortiz et al., 2023; Scheibler et al., 2022). Una revisión narrativa específica sobre melanoma corroboró este hallazgo, encontrando una mayor prevalencia de esta neoplasia en tripulantes y personal militar en comparación con la población general (Scarff, 2024). A nivel molecular, una revisión profundizó en los mecanismos biológicos, sugiriendo que la radiación cósmica, a través de la ionización, induce daño directo e indirecto al ADN, genera un estado de estrés oxidativo

persistente y puede comprometer la eficacia de los mecanismos de reparación celular, lo que en conjunto subyace a su potencial oncogénico (Toprani et al., 2024).

Efectos oftálmicos

Dos de los estudios incluidos se centraron específicamente en los efectos oftálmicos de la exposición crónica. Los hallazgos describen una mayor prevalencia de cataratas, particularmente de tipo nuclear, en pilotos con una larga trayectoria profesional. Esta asociación se vincula directamente a la dosis acumulativa de radiación ionizante recibida a lo largo de su carrera, sugiriendo una relación dosis-respuesta para el daño en el cristalino (Phillips, 2025; Rafnsson et al., 2005).

Impacto en la salud reproductiva

Tres de los trabajos incluidos en esta revisión analizaron los efectos sobre la salud reproductiva, un área de especial preocupación. Un informe institucional de alta relevancia destacó que la exposición en mujeres embarazadas se asocia con un riesgo elevado de aborto espontáneo, estableciendo un umbral de riesgo cuando la dosis fetal acumulada en el primer trimestre de gestación supera los 0,36 mSv (CDC, 2025). Además de este riesgo específico, se reportaron menciones a otras alteraciones como desórdenes menstruales y subfertilidad, aunque los propios autores señalaron que la evidencia sistemática para estas condiciones es, por el momento, menos robusta y requiere más investigación (Phillips, 2025).

2247

Dosimetría y modelos de exposición

La correcta cuantificación de la dosis es fundamental para la gestión del riesgo. Estudios recientes han empleado simulaciones computacionales avanzadas (método de Monte Carlo) y datos de trayectorias de vuelo reales para modelar la dosis efectiva acumulada por los tripulantes. Estos modelos identificaron de forma consistente que las rutas que atraviesan latitudes altas (rutas polares) son las que implican una exposición más crítica y elevada (Yasuda et al., 2011; Yasuda et al., 2025). Adicionalmente, se documentaron eventos de radiación intensificada durante vuelos transatlánticos, los cuales están asociados a picos de actividad

solar o tormentas geomagnéticas, destacando la variabilidad temporal de la exposición (Tobiska et al., 2022).

Percepción del riesgo y marco normativo

Un hallazgo transversal y preocupante en cuatro de los estudios fue la brecha existente entre el riesgo documentado y las medidas de protección implementadas. Se evidenció la ausencia de sistemas normativos y de monitoreo dosimétrico obligatorio para el personal aéreo en varios países, lo que implica una falta de control sobre las dosis recibidas (Guo et al., 2024). En paralelo, se observó una subestimación de estos riesgos por parte de las propias aerolíneas y una baja percepción del mismo entre el personal operativo, según resultados de encuestas (Scarff, 2024). Finalmente, una revisión sistemática confirmó que la radiación cósmica, junto con otros agentes, es uno de los principales riesgos físicos en el entorno laboral de la aviación, reforzando la necesidad de su abordaje formal (Russo et al., 2023).

DISCUSIÓN

Esta revisión sistemática de la literatura reciente confirma que la exposición ocupacional a radiación cósmica constituye un riesgo de salud tangible y multifacético para las tripulaciones aéreas. Los hallazgos de los 10 estudios analizados son consistentes con un cuerpo de evidencia más amplio que ha madurado en los últimos años, permitiendo no solo identificar las patologías asociadas, sino también comprender los mecanismos biológicos subyacentes, el rol de los factores de confusión y las profundas deficiencias en las políticas de protección a nivel global.

Los resultados de nuestra revisión que asocian la exposición con un mayor riesgo de melanoma y cánceres hematológicos están fuertemente respaldados por la literatura internacional. Metaanálisis recientes han cuantificado este riesgo, reportando un ratio de incidencia estandarizada (SIR) para melanoma de aproximadamente 2.0 en tripulantes aéreos en comparación con la población general (Miura et al., 2019; Sanlorenzo et al., 2015). La evidencia también sugiere un riesgo elevado para otros tumores sólidos, como el cáncer de mama en tripulantes femeninas, con un SIR de 1.5 (Pukkala et al., 2012).

La plausibilidad biológica de estos hallazgos es alta y se comprende cada vez mejor. La exposición crónica a la radiación cósmica induce estrés oxidativo persistente mediante la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), causando daño directo a macromoléculas celulares (Baulch et al., 2015). El componente de neutrones de la radiación a altitudes de vuelo es particularmente preocupante; es responsable de casi la mitad de la dosis efectiva y posee una alta eficacia biológica relativa (RBE), lo que significa que es más dañino por unidad de dosis que los fotones (rayos X o gamma) (Yasuda et al., 2011). Este daño complejo y denso puede superar los mecanismos de reparación celular y llevar a inestabilidad genómica, aberraciones cromosómicas y mutaciones puntuales, como las observadas en el gen supresor de tumores TP53, un factor conocido en la iniciación de la carcinogénesis (Toprani et al., 2024).

Más allá del cáncer, nuestra revisión identificó un riesgo elevado y consistente de cataratas nucleares (Phillips, 2025; Rafnsson et al., 2005). La literatura externa confirma una clara relación dosis-respuesta, con el dato alarmante de que el riesgo de opacidades del cristalino aparece a dosis acumuladas tan bajas como 0,1 Gy, muy por debajo de los umbrales históricos de 2-5 Gy que se consideraban seguros (Azizova et al., 2016; Stewart et al., 2012). En cuanto a la salud reproductiva, el riesgo de aborto espontáneo por encima del umbral de 0,36 mSv está bien documentado (CDC, 2025), pero la evidencia sobre otros resultados como infertilidad o parto prematuro es más débil y se ve fuertemente confundida por otros factores laborales (Meier et al., 2020). Es crucial señalar la baja percepción del riesgo y la falta de información adecuada entre los propios tripulantes, lo que dificulta la toma de decisiones informadas sobre su salud reproductiva (Pepin et al., 2023).

Es fundamental reconocer que la radiación cósmica no actúa de forma aislada. El riesgo de cáncer en los tripulantes es inequívocamente multifactorial. La alteración del ritmo circadiano, inherente a los vuelos transmeridianos, es un disruptor hormonal y del sistema inmune reconocido como un factor que puede amplificar el riesgo de cáncer de mama y melanoma (Zeeb et al., 2012). Asimismo, la exposición a radiación UV durante las escalas en destinos soleados es un factor de confusión ineludible para el melanoma, que puede actuar de forma sinérgica con la radiación ionizante (Dreger et al., 2020; Grossman et al., 2018). Estos factores interactúan de manera compleja, lo que dificulta aislar el efecto único de la radiación cósmica y subraya la necesidad de un enfoque holístico en la salud ocupacional de este colectivo.

Un hallazgo transversal y de gran relevancia para la salud pública es la heterogeneidad en las estrategias de vigilancia y protección. Mientras que en Europa la Agencia de Seguridad Aérea de la Unión Europea (EASA) exige un monitoreo de dosis con un límite efectivo de 20 mSv/año (promediado en 5 años) y un límite estricto de 1 mSv para la totalidad de la gestación, y la Administración Federal de Aviación (FAA) en EE. UU. promueve el uso de herramientas de cálculo como el software CARI-7, la situación en otras regiones es precaria (Brock & Sherbini, 2012; Eckhardt, 2024). El enfoque en América Latina representa una brecha crítica en la salud ocupacional. La falta de directrices regulatorias claras, la ausencia de un control dosimétrico sistemático y la baja prioridad política en esta región dejan a un colectivo laboral numeroso y creciente en una situación de vulnerabilidad y desprotección que contraviene los estándares internacionales de la ICRP (Eckhardt, 2024).

La principal fortaleza de este estudio es su enfoque sistemático en la evidencia más reciente, proporcionando una síntesis actualizada y relevante. La inclusión de una tabla de características y un diagrama de flujo PRISMA aumenta la transparencia y reproducibilidad. Sin embargo, esta revisión hereda las limitaciones de los estudios incluidos. Muchos son de diseño retrospectivo, con posible sesgo de recuerdo, y presentan heterogeneidad en la metodología de estimación de dosis. Además, los modelos dosimétricos computacionales, aunque indispensables, pueden subestimar la exposición real hasta en un 10–20 % en ciertas condiciones (Lestaevel et al., 2023). La exclusión de artículos en idiomas distintos al inglés, español o portugués también podría ser una limitación. Finalmente, la falta de estudios primarios en América Latina, un hallazgo en sí mismo, limita la generalización de los resultados a esa región específica.

Los hallazgos de esta revisión tienen implicaciones directas. Para la práctica clínica y la salud ocupacional, es fundamental que los médicos laborales consideren la exposición a radiación cósmica en la evaluación de salud de los tripulantes, especialmente en el cribado de cáncer de piel y mama, y en el asesoramiento a tripulantes gestantes. Para las políticas públicas y la regulación, es urgente que las autoridades de aviación civil, especialmente en América Latina, adopten las recomendaciones de la ICRP, estableciendo límites de dosis y programas de monitoreo obligatorio. Para futuras investigaciones, es imperativo el desarrollo de estudios de cohorte longitudinales en regiones poco estudiadas, investigar la susceptibilidad genética al

daño por radiación, y evaluar el impacto psicosocial del riesgo percibido en los tripulantes (Russo et al., 2023). También es crucial validar y mejorar los modelos dosimétricos y evaluar la efectividad de las medidas de mitigación (Xue et al., 2022).

En conclusión, la evidencia científica sintetizada en esta revisión sistemática demuestra de manera concluyente que la exposición ocupacional a radiación cósmica en tripulantes aéreos es una realidad subestimada con efectos deletéreos documentados sobre la salud. Las asociaciones con un mayor riesgo de patologías neoplásicas, oftálmicas y reproductivas son robustas y biológicamente plausibles. La disparidad existente en la vigilancia y regulación a nivel mundial, con una marcada deficiencia en regiones como América Latina, constituye una falla inaceptable en la protección de la salud laboral. Por lo tanto, es imperativo que las autoridades de salud pública, las agencias de aviación civil y las aerolíneas colaboren para implementar programas de vigilancia dosimétrica y médica que sean estandarizados, obligatorios y basados en los principios de la protección radiológica internacional. La acción coordinada es fundamental para proteger adecuadamente a este colectivo profesional vulnerable y para garantizar que el progreso de la aviación comercial no se realice a expensas de la salud de sus trabajadores.

2251

CONSIDERACIONES FINALES

La exposición ocupacional a radiación cósmica en tripulantes aéreos representa un riesgo real y subestimado, con efectos nocivos comprobados sobre la salud. La falta de regulación y vigilancia, especialmente en regiones como América Latina, es una falla crítica que debe ser corregida con urgencia. Es fundamental implementar programas estandarizados y obligatorios de monitoreo dosimétrico y médico, junto con acciones educativas para mejorar la percepción del riesgo. Solo mediante la colaboración de autoridades sanitarias, agencias aeronáuticas y empleadores se podrá proteger adecuadamente a este colectivo y asegurar que el avance de la aviación no comprometa la salud de sus trabajadores.

REFERENCIAS

AZIZOVA, T. V.; BRAGIN, E.; HAMADA, N.; BANNIKOVA, M. V. Risk of cataract incidence in a cohort of Mayak PA workers following chronic occupational radiation exposure.

PLoS One, v. 11, n. 10, e0164357, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164357>. Acesso em: 9 ago. 2025.

BAULCH, J. E. et al. Persistent oxidative stress in human neural stem cells exposed to low fluences of charged particles. *Redox Biology*, v. 5, p. 24–32, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.redox.2015.03.001>. Acesso em: 9 ago. 2025.

BROCK, T. A.; SHERBINI, S. Principles in practice: radiation regulation and the NRC. *Bulletin of the Atomic Scientists*, v. 68, n. 3, p. 36–43, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0096340212444869>. Acesso em: 9 ago. 2025.

CDC. Aircrew and reproductive health. *Aviation Safety and Health*, 30 jan. 2025. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/aviation/prevention/aircrew-reproductive-health.html>. Acesso em: 9 ago. 2025.

CHAURASIA, M. et al. Radiation induces EIF2AK3/PERK and ERN1/IRE1 mediated pro-survival autophagy. *Autophagy*, v. 15, n. 8, p. 1391–1406, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15548627.2019.1582973>. Acesso em: 9 ago. 2025.

DREGER, S. et al. Cohort study of occupational cosmic radiation dose and cancer mortality in German aircrew, 1960–2014. *Occupational and Environmental Medicine*, v. 77, n. 5, p. 285–291, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/oemed-2019-106165>. Acesso em: 9 ago. 2025.

ECKHARDT, L. Cosmic radiation exposure: a review of recent research on the incidence and prevention of cancer in aircrews. *Health Physics*, v. 128, n. 4, p. 291–297, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001894>. Acesso em: 9 ago. 2025.

2252

GROSSMAN, D. C. et al. Behavioral counseling to prevent skin cancer. *JAMA*, v. 319, n. 11, p. 1134, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jama.2018.1623>. Acesso em: 9 ago. 2025.

GUO, J. et al. Particle radiation environment in the heliosphere: status, limitations, and recommendations. *Advances in Space Research*, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.03.070>. Acesso em: 9 ago. 2025.

LESTAÈVEL, P. et al. Cosmic radiation exposure of airline crews in France over the period 2015–2019. *Radioprotection*, v. 58, n. 4, p. 317–325, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023027>. Acesso em: 9 ago. 2025.

MEIER, M. et al. Radiation in the atmosphere—A hazard to aviation safety? *Atmosphere*, v. 11, n. 12, 1358, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos11121358>. Acesso em: 9 ago. 2025.

MIURA, K. et al. Do airline pilots and cabin crew have raised risks of melanoma and other skin cancers? Systematic review and meta-analysis. *British Journal of Dermatology*, v. 181, n. 1, p. 55–64, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/bjd.17586>. Acesso em: 9 ago. 2025.

ORTIZ-ORTIZ, M. T.; ROMERO-AGUIRRE, A. C.; MORILLO, V. O.; GONZALES-ALVARADO, F. R. Efectos adversos de la radiación cósmica en personal aeronáutico: Revisión

sistemática. *Medicina y Seguridad del Trabajo*, v. 69, n. 272, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4321/s0465-546x2023000300004>. Acesso em: 9 ago. 2025.

PEPIN, S. et al. Information on cosmic radiation received by Belgian aircrew: a survey. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 199, n. 8-9, p. 742-746, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncado74>. Acesso em: 9 ago. 2025.

PHILLIPS, J. Occupational health considerations of airline pilot radiation exposure. *J Oper Med*, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.62573/46sb2748>. Acesso em: 9 ago. 2025.

PUKKALA, E. et al. Cancer incidence among Nordic airline cabin crew. *International Journal of Cancer*, v. 131, n. 12, p. 2886-2897, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ijc.27551>. Acesso em: 9 ago. 2025.

RAFNSSON, V. et al. Cosmic radiation increases the risk of nuclear cataract in airline pilots: a population-based case-control study. *Archives of Ophthalmology*, v. 123, n. 8, p. 1102-1105, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/archophth.123.8.1102>. Acesso em: 9 ago. 2025.

RUSSO, A. C. et al. Aircrew health: a systematic review of physical agents as occupational risk factors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 10, p. 5849, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph20105849>. Acesso em: 9 ago. 2025.

SANLORENZO, M. et al. The risk of melanoma in airline pilots and cabin crew. *JAMA Dermatology*, v. 151, n. 1, p. 51, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2014.1077>. Acesso em: 9 ago. 2025.

2253

SCARFF, C. E. Melanoma in aircrew and defence members: a narrative literature review. *Journal of Military and Veterans' Health*, v. 32, n. 4, p. 9-15, 2024.

SCHEIBLER, C. et al. Cancer risks from cosmic radiation exposure in flight: a review. *Frontiers in Public Health*, v. 10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.947068>. Acesso em: 9 ago. 2025.

STEWART, F. A. et al. ICRP Publication 118: ICRP statement on tissue reactions and early and late effects of radiation in normal tissues and organs—Threshold doses for tissue reactions in a radiation protection context. *Annals of the ICRP*, v. 41, n. 1-2, p. 1-322, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2012.02.001>. Acesso em: 9 ago. 2025.

TOBISKA, W. K.; HALFORD, A. J.; MORLEY, S. K. Increased radiation events discovered at commercial aviation altitudes. *arXiv*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.05599>. Acesso em: 9 ago. 2025.

TOPRANI, S. M. et al. Cosmic ionizing radiation: a DNA damaging agent that may underly excess cancer in flight crews. *International Journal of Molecular Sciences*, v. 25, n. 14, p. 7670, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijms25147670>. Acesso em: 9 ago. 2025.

XUE, D.; YANG, J.; LIU, Z.; WANG, B. An optimized solution to long-distance flight routes under extreme cosmic radiation. *Space Weather*, v. 20, n. 12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2022sw003264>. Acesso em: 9 ago. 2025.

YASUDA, H. et al. Measurement of cosmic-ray neutron dose onboard a polar route flight from New York to Seoul. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 146, n. 1-3, p. 213-216, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr152>. Acesso em: 9 ago. 2025.

YASUDA, H.; MOTOYAMA, H.; YAJIMA, K. Recent trends in cosmic radiation exposure onboard aircraft: effects of the COVID-19 pandemic on Japanese in-flight doses. *Frontiers in Public Health*, v. 13, 1554332, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2025.1554332>. Acesso em: 9 ago. 2025.

ZEEB, H.; HAMMER, G. P.; BLETTER, M. Epidemiological investigations of aircrew: an occupational group with low-level cosmic radiation exposure. *Journal of Radiological Protection*, v. 32, n. 1, p. N15-N19, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0952-4746/32/1/n15>. Acesso em: 9 ago. 2025.