

# Investigaciones en salud y trabajo

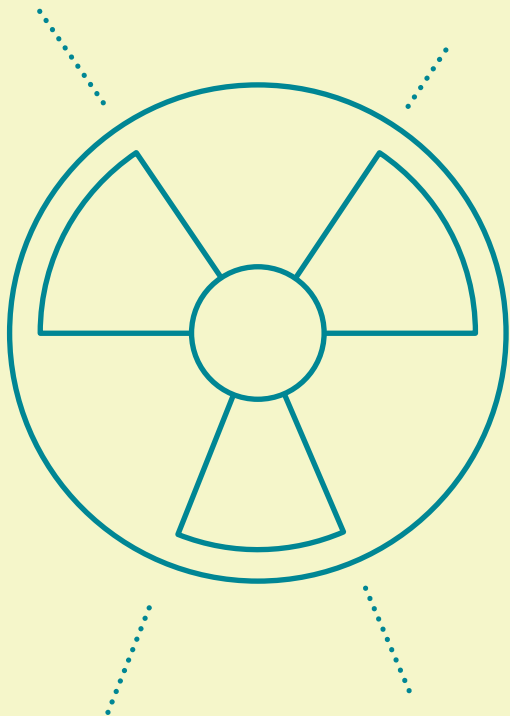
Facultad de Medicina

Año 1, julio-septiembre 2022, ISSN: 2954-6044

Grupo de investigación Salud, Ser Humano y Trabajo

## n.º 3

### Exposición ocupacional a radiaciones ionizantes y alteraciones hematológicas





---

Diana Carolina Garzón Leal ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9428-423X>

Clara Margarita Giraldo Luna ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8388-3528>

Adriana Sofía Peñates Ochoa ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4236-0760>

Alexandra Yepes Boada ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3288-5400>

Diana Carolina Sánchez Calderón ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5148-520X>

Eliana Marcela Rojas Sánchez ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0723-3643>

---

# n.º 3

Exposición ocupacional  
a radiaciones ionizantes  
y alteraciones hematológicas

Año 1, n.º 3, julio-septiembre 2022 | issn: 2954-6044

DOI: xxxxx

© Universidad El Bosque

© Editorial Universidad El Bosque

Rectora: María Clara Rangel Galvis

Vicerrector de Investigaciones: Gustavo Silva Carrero

Editora académica:

© Alexandra Yepes Boada

© Diana Carolina Garzón Leal

© Clara Margarita Giraldo Luna

© Adriana Sofía Peñates Ochoa

© Alexandra Yepes Boada

© Diana Carolina Sánchez Calderón

© Eliana Marcela Rojas Sánchez

Editor Universidad El Bosque:

Miller Alejandro Gallego Cataño

Coordinación editorial y Corrección de estilo:

Leidy De Ávila Castro

Dirección gráfica y diseño: María Camila Prieto Abello

Hecho en Bogotá D. C., Colombia

Vicerrectoría de Investigaciones

Editorial Universidad El Bosque

Av. Cra 9 n.º 131A-02, Bloque A, 6.º piso

(601) 648 9000, ext. 1100

editorial@unbosque.edu.co

<https://investigaciones.unbosque.edu.co/editorial>

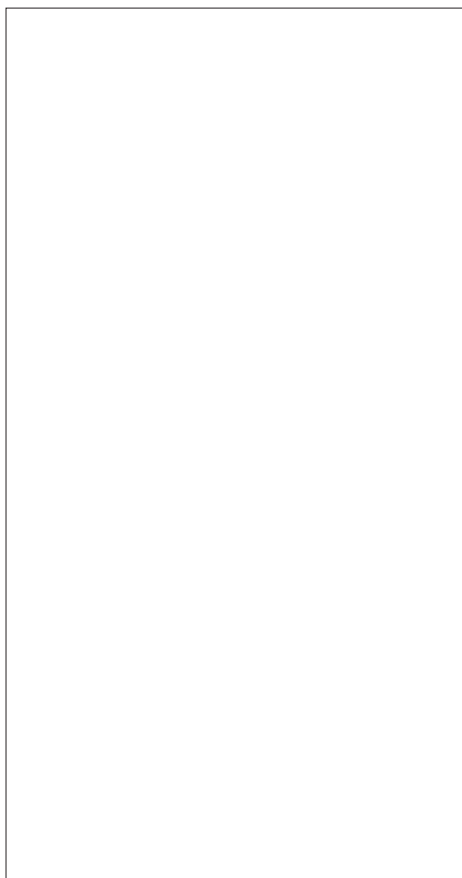
Septiembre de 2022

Bogotá, Colombia



Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la Editorial Universidad El Bosque.

Universidad El Bosque | Vigilada Mineducación. Reconocimiento como universidad: Resolución n.º 327 del 5 de febrero de 1997, MEN. Reconocimiento de personería jurídica: Resolución 11153 del 4 de agosto de 1978, MEN. Reacreditación institucional de alta calidad: Resolución n.º 013172 del 17 de julio 2020, MEN.



# Investigaciones en salud y trabajo

---

Facultad de Medicina

Año 1, julio-septiembre 2022, ISSN: 2954-6044

---

Grupo de investigación Salud, Ser Humano y Trabajo

---

## n.º 3

Exposición ocupacional  
a radiaciones ionizantes  
y alteraciones hematológicas

# Contenido

1. Introducción

Pag. 8

---

2. Radiación ionizante  
y alteraciones  
hematológicas

Pag. 14

---

3. Semiología  
dirigida a alteraciones  
hematológicas

Pag. 30

---

## 4. • Prevención en medicina laboral

---

Pag. 36

## 5. • Recomendaciones

---

Pag. 68

## 6. • Referencias bibliográficas

---

Pag. 74



# 1. Introducción

El trabajo representa uno de los aspectos fundamentales en el desarrollo del ser humano, es un rol básico y central en el que se invierten muchos años de vida, permitiendo la satisfacción de necesidades económicas y psicosociales al interrelacionarse con otras áreas del desarrollo del ser humano, sin embargo, el trabajo requiere de un intercambio o interacción en donde intervienen individuo, medio y la organización; en la interacción de manera positiva de estos factores se puede encontrar como resultado alcanzar una vida digna, autonomía y satisfacción mediante el goce de una buena salud, pero al encontrar interacciones negativas entre los factores expuestos, podemos encontrar resultados no favorables en la salud de los trabajadores. En esta interacción negativa intervienen factores de riesgos o peligros que pueden afectar la salud como son químicos, biológicos, ergonómicos, de seguridad, psicosociales, fenómenos naturales y físicos que de no ser controlados pueden propiciar la aparición de enfermedades de origen laboral. Entre los riesgos físicos podemos encontrar exposición al calor, frío, vibración, ruido y radiaciones las cuales corresponden a ionizantes y no ionizantes que si bien pueden ser muy beneficiosas en el desarrollo de la humanidad, son altamente nocivas para la salud de no ser controladas adecuadamente.

La radiación a grandes rasgos corresponde a un tipo de transmisión de energía que parte de una fuente, se transmite en un espacio y es absorbida por un receptor. La radiación ionizante es un tipo especial de radiación que consiste en partículas incluido los fotones, que causan la separación de electrones de átomos y moléculas, es decir, posee la suficiente energía que al impactar en el material receptor fragmenta su composición (1). La radiación ionizante se encuentra en todas partes, el ser humano ha estado expuesto a fuentes naturales a lo largo de su vida: como los rayos cósmicos, materiales radiactivos que se encuen-

tran en la composición de la corteza terrestre, a través del aire, de los alimentos, etc. Estas fuentes de radioactividad se utilizan en todo el mundo en múltiples sectores de la industria, en investigación, agricultura, educación y en el ámbito médico a través de fuentes artificiales como los equipos de radiodiagnóstico (rayos x, tomografías computarizadas, entre otras) que ante el envejecimiento poblacional se ha visto la necesidad de uso de un número cada vez mayor de estos exámenes, lo que conduce a un aumento de los riesgos para los operadores que trabajan con este tipo de equipos (2).

La exposición a radiaciones ionizantes se ha convertido en un peligro inherente al ejercicio de múltiples ocupaciones, es habitual “el uso de fuentes artificiales en la industria manufacturera y de servicios, en las industrias militares, en instituciones de investigación y universidades, en el sector de la energía nuclear” (3), en el sector de la aviación (no por uso de fuentes artificiales, sino por exposición a radiación cósmica), en el sector salud debido al uso dado por médicos, técnicos en radiología, físicos médicos, hemodinamistas, radiólogos intervencionistas, entre otros., estos últimos con el fin de brindar apoyos diagnósticos y tratamientos a diversas enfermedades principalmente de carácter neoplásico (3), estas exposiciones pueden ser a niveles altos y bajos, teniendo grandes consecuencias en la salud humana. Los efectos ocasionados por la exposición a radiaciones dependen de diferentes factores como el tipo de radiación, de su energía o transferencia lineal de energía (LET), la dosis recibida, la tasa de dosis, la edad y el sexo entre otros (4). Los rayos X, así como los rayos gamma (ondas electromagnéticas energéticas y de alta frecuencia) se asocian con grandes problemas en la salud como el cáncer, siendo clasificadas como carcinógenos por el Centro internacional de investigaciones sobre el cáncer de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (5). Este tipo

de radiaciones interactúan con las células humanas, ya sea mediante interacción directa con el objetivo crítico (el ADN) o indirectamente con las moléculas del agua, causando radiólisis de la misma y produciendo radicales libres (4). En el cuerpo humano la radiosensibilidad de las células y tejidos es completamente diferente, siendo la médula ósea, el cristalino, el tracto gastrointestinal y la piel altamente sensibles dado que sus tejidos se recambian rápidamente, sin embargo, también pueden verse afectados los tejidos del sistema nervioso central, el pulmón, el corazón, el hígado, el riñón y las gónadas cuyo recambio es lento (5).

A la fecha se han realizado diversos estudios acerca de la exposición ocupacional a radiación ionizante, tomando gran relevancia las exposiciones continuas a bajas dosis por los efectos deleterios en muchos sistemas, entre estos fundamentalmente el sistema hematopoyético por la alta tasa de recambio y renovación celular de la médula ósea. Se han encontrado en estudios de población ocupacionalmente expuesta a radiación ionizante en el sector salud, cambios relativos en las pruebas hematológicas y biomédicas con respecto a la dosis de exposición anual recibida (2), por lo que es fundamental implementar medidas de protección contra la radiación para los trabajadores, realizar mayor control y seguimiento ante la exposición a este agente físico.

En Colombia se presentan pocos estudios referentes a temas técnicos, algunos son de caracterización y medición predominantemente en el sector salud; la población de radiólogos y técnicos de imágenes diagnósticas se les reconoce su oficio relacionado con la manipulación, operación y mantenimiento de equipos diagnósticos, el cual se encuentra clasificado como una actividad de alto riesgo en el nivel 5 por el Decreto 1607 de 2002 (6), y como actividad de alto riesgo a través del artículo 2 del Decreto 2090 de 2003 del Ministerio de la Protección Social (7); “sin em-

bargo, esta situación no es igual para otras poblaciones ocupacionalmente expuestas” (8), lo que hace que los riesgos de la exposición a radiación ionizante (incluida la exposición a radiación ionizante de baja dosis) sean de importancia social convirtiéndose en un reto importante para la salud pública.



# 2. Radiación ionizante y alteraciones hematológicas

La hematopoyesis o también llamada hemopoyesis hace referencia a una serie de fenómenos interrelacionados que inician en la médula ósea a nivel unicelular con la célula madre hematopoyética (conocida también como célula troncal hematopoyética o pluripotencial), la cual sufre una serie de procesos que inician desde su autoduplicación, seguida de su diferenciación, maduración y finalmente producción de elementos formes sanguíneos funcionales (9) enviados hacia la periferia; dada su alta tasa de recambio y producción, la médula es altamente sensible a la radiación ionizante.

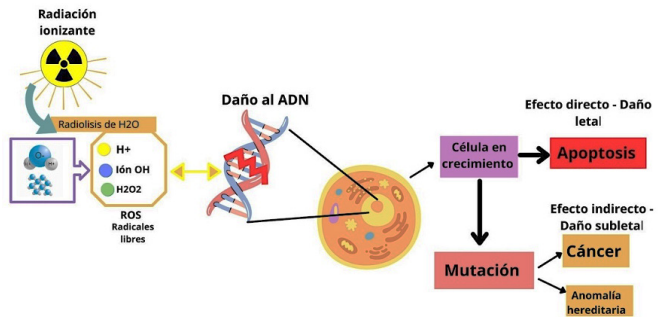
En general, los efectos causados por la exposición a radiación ionizante se pueden clasificar en efectos determinísticos y estocásticos. Los efectos determinísticos o también llamados no estocásticos hacen referencia a efectos de carácter agudo o inmediato, en estos, la exposición a corto plazo y a altas dosis de radiación ionizante sobre los tejidos en proliferación como en el caso de la médula ósea y sangre, entre otros tipos de tejidos, provocan la muerte no programa de millones de células afectadas por ruptura de enlaces químicos a nivel molecular en el ADN (10) (efecto directo de la radiación ionizante). Estos efectos son directamente proporcionales a la extensión del daño y duración de la exposición, por ejemplo, la aplasia de la médula ósea, las hemorragias, la hemotoxicidad, estados comatosos y la muerte podrían surgir en cuestión de minutos u horas tras la exposición masiva a este tipo de radiación; otros síntomas como la anemia, el envejecimiento y la diarrea podrían ser inducidos por exposiciones masivas más diluidas (10) como en el caso de la exposición en tratamientos oncológicos. En lo que respecta a los efectos estocásticos, estos abarcan efectos a largo plazo o también llamados crónicos, los cuales dependen de la dosis total de radiación recibida, por ejemplo, a estos efectos se les atribuye la aparición de diferentes tipos de cáncer, mutaciones genéticas, teratogé-



nicas y heredables (4). En los efectos estocásticos la afectación celular ocurre mediante un mecanismo de lesión indirecta por la radiólisis del agua (Figura 1).

Figura 1.

*Efectos de la radiación ionizante a nivel celular - Efecto estocástico*



Nota. La radiación ionizante afecta al organismo mediante la radiólisis del agua, la cual genera radicales libres (hidrogeniones, iones hidroxilo) y peróxidos en conjunto, especies reactivas de oxígeno (ROS por sus siglas en inglés) que interactúan con el ADN generando daño que resulta en efectos procarcinogénicos (si los genes afectados están implicados en el control del ciclo celular) o en la muerte celular programada (apoptosis).

En los seres humanos, el tejido más sensible es el sistema hematopoyético: tras la exposición a la radiación, se pueden evidenciar cambios en la composición de la sangre con irradiación tan baja como 1 Gy. La muerte puede producirse a partir de 2 Gy y es completamente segura por encima de 7 Gy como resultado de un fallo hematológico en 4 a 6 semanas (11). En el sistema hematopoyético las células madres son muy sensibles a cualquier estrés, la más mínima perturbación en el sistema, como por ejemplo infecciones, la pérdida de sangre, agentes químicos y físicos, o el estrés genotóxico puede desencadenar su diferenciación para mantener la homeostasis sanguínea, por lo que estas propiedades de autorrenovación y diferenciación deben ser preservadas cuidadosamente para evitar numerosas condiciones patológicas como su agotamiento, causando un fallo hematopoyético, o su transformación leucémica (11). Contrarrestar estos efectos lesivos implica la activación de las vías de respuesta para la reparación del ADN, sin embargo, en la actualidad es muy controvertida la reparación completa del ADN tras la existencia de daños.

A pesar de que los efectos ante la exposición a altas dosis de radiación ionizante están bien documentados al saber que esta implica un efecto lineal dependiente de la dosis basándose principalmente en el daño del ADN, la exposición a bajas dosis de radiación ionizante (dosis inferiores a 500 mGy, a veces hasta 1 Gy se consideran a menudo dosis bajas) siguen siendo objeto de debate dado que a la fecha existen reportes contradictorios y controvertidos. Las altas dosis de radiación producen radicales libres, ROS y especies de óxido de nitrógeno que producen daño mitocondrial (estrés oxidativo) y en el ADN, finalmente conducen a la apoptosis o a la senescencia celular, en respuesta a este daño se activan diferentes vías bien sea para inducir a la apoptosis o reparar el daño en el ADN, pero puede dar lugar a errores en el código de ADN lo que conduce a

anormalidades genómicas en la progenie e incluso puede inducir transformación leucémica. En lo que respecta a la exposición a dosis bajas de radiación ionizante, han tomado gran relevancia al demostrarse un mayor riesgo de desarrollar leucemia y tumores cerebrales en niños expuestos a varias tomografías computarizadas. En experimentos realizados en ratones (uno de los modelos más usados para el estudio de los tejidos hematopoyéticos) se logró descubrir efectos inesperados en comparación con el modelo lineal de dosis respuesta. En estudios realizados en el 2014 se informó que la radiación con Hierro 56 ( $^{56}\text{Fe}$ ) causó un impacto en la regulación epigenética de las células madre hematopoyéticas al aumentar la metilación global del ADN, disminuyendo los niveles de metiltransferasa a dosis entre 100 y 400 mGy a 4 semanas después de la exposición. A las 22 semanas los resultados fueron más visibles a dosis más altas (400mGy) pero se siguió observando una disminución de la metiltransferasa a 200 mGy. En otros estudios ante la exposición a radiaciones de bajas dosis en cultivos celulares de células madres hematopoyéticas murinas y humanas, no se evidenciaron efectos como en la exposición a altas dosis, sin embargo, se evidenció un aumento transitorio de ROS en ambos tipos celulares al encontrar presencia de lesiones oxidativas del ADN, así mismo, se evidenció que estas células murinas irradiadas mostraron niveles elevados de ROS varios meses después de la irradiación, lo que sugiere un estrés oxidativo persistente; en las células humanas se observó una disminución de la actividad metabólica (disminución de la clonogenicidad) horas posteriores a la irradiación. Parece ser que la transferencia lineal de energía (LET) es un factor muy importante para exposición a dosis bajas de radiación, por lo que se sospecha que para dosis bajas podría haber una curva dosis-respuesta específica para cada tipo de irradiación y célula, lo que hace difícil establecer un modelo universal para una dosis de irradiación específica (11).

De acuerdo con lo anterior, a la luz de estos estudios realizados, los efectos de la radiación van más allá de lo planteado en este modelo lineal y sin umbral (LNT) que ha sido reconocido durante medio siglo como la base metodológica para la predicción de daños biológicos por exposición a este agente físico.

Tras colocar la vista sobre los efectos de la radiación ionizante en exposiciones prolongadas y a bajas dosis (que resultan ser las más frecuentes), los científicos al analizar estudios relativos a daños genéticos inducidos por radiación, empezaron a comprender que el objetivo de esta no solo era el ADN, sino que también lo era toda la célula (10), así mismo, comprendieron que era un error suponer que la célula irradiada sobreviviente continuaba siendo capaz de replicarse completamente como una célula sana nunca irradiada. Las células que sobreviven al ser expuestas a radiación ionizante a baja dosis, a pesar de ser aparentemente normales acumulan daños; se descubrió que este tipo de células no podían ir más allá de 7 a 10 divisiones (en lugar de 60-70 divisiones normales) y a su vez la progenie de estas células era la que cursaban con mutaciones y eventos letales. En 1992 un estudio documentó la aparición de aberraciones cromosómicas no clonales en la progenie de células de la médula ósea irradiadas con partículas  $\alpha$  (alpha), en donde el daño parecía consistir principalmente en una inestabilidad genómica progresiva que afectaba las diferentes poblaciones celulares de la médula. La explicación más probable de este fenómeno radicaba en que la radiación ionizante provocaba la activación patológica de las células madres (poco diferenciadas) lo que conducía a la generación de alteraciones genómicas en la progenie. Estudios experimentales en hematología demostraron al exponer células de la médula ósea con diferentes grados de diferenciación celular a diferentes tipos y dosis de radiación ionizante, que los cultivos celulares mostraban una apa-

rición evidente de inestabilidad genómica, lo que parecía desempeñar un papel clave en la linfoma-leucemogénesis por radiación, con lo anterior era más claro que la irradiación inicial desencadenaba un proceso reactivo lento y que el daño y la inestabilidad se acumulaban en la descendencia celular, por lo que establecer un único vínculo lineal entre dosis inicial y daño biológico perdía validez, incluso la exposición a dosis mínimas de radiación (aproximadamente 2mGy) eran suficientes para producir efectos de inestabilidad genómica. Continuando con el cambio de paradigma con respecto al daño celular provocado por la radiación, en otros estudios se logró demostrar que las células no afectadas directamente por la radiación (pero que eran cercanas a las células irradiadas) podían producir mutaciones, formación de micronúcleos, rupturas cromosómicas e intercambio de cromátidas hermanas, con lo que se logró comprender que no se trataban de sucesos aislados y aleatorios, sino de efectos secundarios tisulares en donde células afectadas y no afectadas intercambiaban señales moleculares de daño y peligro donde no solo había presencia de radicales libres de oxígeno (producidos por la radiólisis del agua), sino también radicales de nitrógeno y citoquinas, con lo que se demostró que la exposición prolongada a bajas dosis de radiación ionizante induce a una respuesta inflamatoria sistémica de bajo grado en el organismo, es decir, este tipo de exposiciones que son las más frecuentes son peligrosas para el ser humano y tienen mecanismo de daño diferentes a las exposiciones cortas y masivas.

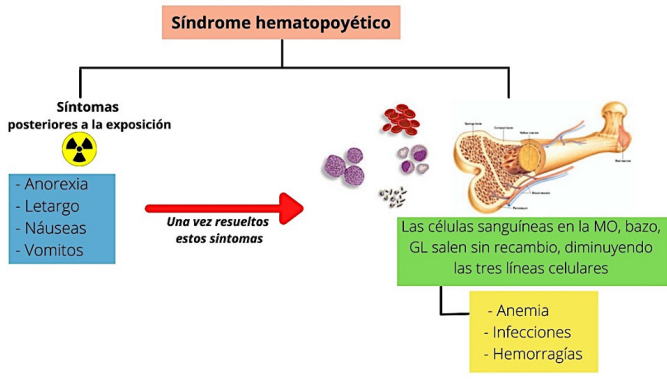
En estudios realizados acerca del estado antioxidante y daño citogenético en trabajadores hospitalarios expuestos a bajas dosis de radiación ionizante, se logró evidenciar que trabajadores en hospitales expuestos a bajas dosis de radiación ionizante presentan un mayor daño en el ADN y niveles elevados de peroxidación lipídica en comparación con los controles sanos. La exposición a bajas

dosis de radiación ionizante a la luz de diversos estudios puede acelerar la senescencia celular a través del aumento de la actividad de ROS. En condiciones de estrés oxidativo, todas las estructuras de una célula pueden resultar dañadas. El daño a los lípidos conduce a la formación de muchos metabolitos tóxicos, incluyendo al malondialdehído (MDA), un biomarcador ampliamente utilizado para medición de la intensidad del estrés oxidativo. Un mayor nivel de malondialdehído refleja un aumento de la carga de radicales libres que conduce a la peroxidación de los lípidos en los trabajadores ocupacionalmente expuestos. Esta forma de radical se adhiere a los dobles enlaces de las bases del ADN y extrae un átomo de hidrógeno del grupo metilo de la timina y de cada uno de los enlaces carbono-hidrógeno de la 2'-desoxirribosa. El daño oxidativo al ADN es causado predominantemente por el radical hidroxilo. Este radical forma aductos en los dobles enlaces de las bases del ADN y extrae un átomo de hidrógeno del grupo metilo de la timina y de cada uno de los enlaces carbono-hidrógeno de la 2'-desoxirribosa. Estas reacciones conducen a la formación de bases de ADN modificadas, sitios de labilidad alcalina, roturas de cadena simple y doble, y enlaces cruzados proteína-ADN. Los productos de la peroxidación lipídica tienen un potencial genotóxico para formar aductos en el ADN. La acumulación de radicales libres refuerza aún más el daño lipídico, lo que conduce a una mayor concentración de malondialdehído y radicales de oxígeno que posteriormente causan el daño de los materiales genéticos (12).

### 3.1. Manifestaciones clínicas y diagnóstico

La exposición a radiación ionizante causa efectos a nivel de las células sanguíneas (directamente a nivel de médula ósea, bazo y ganglios linfáticos) generando el llamado Síndrome Hematopoyético (Figura 2).

Figura 2.  
Síndrome hematopoyético



\*MO: Médula ósea - GL: ganglio linfático

Nota. En este síndrome se dan síntomas inespecíficos, posteriormente las células sanguíneas en la médula ósea (MO), ganglio linfático (GL) y bazo, salen a la periferia y no son reemplazadas produciendo déficit. La escasez de glóbulos blancos puede desencadenar infecciones (inmunodeficiencia) y la escasez de plaquetas, hemorragias no controladas en los tejidos (5).

En lo que respecta a la exposición a bajas dosis de radiación y tiempo prolongado de exposición, se ha demostrado en estudios que existen alteraciones en las líneas celulares en grupos de trabajadores como técnicos de rayos X. En el estudio realizado sobre los efectos ocupacionales por exposición a rayos X existen diferencias significativas entre algunos de los parámetros hematológicos en su grupo de estudio (técnicos de diagnóstico) y su grupo de control, en donde en el grupo de estudio los parámetros del hemograma (neutrófilos, monocitos, basófilos, volumen corpuscular medio, amplitud de distribución eritrocitaria y plaquetas) disminuyeron significativamente, mientras que los parámetros (linfocitos, glóbulos rojos, hemoglobina y hematocrito) aumentaron significativamente y se registró un fuerte aumento del parámetro linfocitos reactivos en todos los grupos de técnicos de diagnóstico en comparación con sus controles (4), lo que significa que la mayoría de estos parámetros hematológicos se ven afectados por uso de bajas dosis de radiación ionizante principalmente la serie de blancos, soportando el hecho de que la radiación ionizante a bajas dosis puede perturbar la inmunidad de los trabajadores expuestos, adicional, el daño y la capacidad de reconstitución de las células troncales hematopoyéticas depende de la dosis absorbidas por lo que este tipo de exposición puede alterar la producción de elementos estromales de la médula ósea que son importantes para mantener la homeostasis del sistema, propiciando disminución de las células hematopoyéticas circulantes inducida por las radiaciones ionizantes y una redistribución y apoptosis de las células maduras (4). Otro aspecto importante observado en este estudio es la influencia del número de horas de trabajo al día sobre los parámetros hematológicos alterados. Los parámetros hemoglobina, volumen corpuscular medio y hemoglobina corpuscular media disminuyeron significativamente en el grupo de experiencia laboral de 8-20 años



trabajando en promedio 6 horas por día en comparación con el grupo de experiencia laboral de 1-7 años trabajando en promedio 7 horas por día (4); a la luz de estos hallazgos, teniendo en cuenta la importancia de la dosis absorbida de radiación ionizante y el tiempo de exposición a estas, adicional a la sensibilidad de las células del sistema hematópoyético, el hemograma al evaluar el recuento de estos elementos formes en sangre periférica puede servir como un buen indicador para evaluar el daño biológico generado por este agente físico.

En consonancia al estudio realizado sobre los efectos ocupacionales por exposición a rayos x, en donde la mayoría de estos parámetros hematológicos se ven afectados por uso de bajas dosis de radiación ionizante principalmente la serie de blancos, lo que puede perturbar la inmunidad de los trabajadores, Lumniczky et al., (13) en una revisión exhaustiva de la literatura sobre efectos de las radiaciones ionizantes de baja intensidad sobre el sistema inmunitario, encontraron reportes en el estudio de Akleyev et al., (14) de cambios detectados en los parámetros inmunitarios de los individuos que vivían en zonas contaminadas por la radiación, como los alrededores del complejo nuclear de Mayak, incluido el río Techa, en la Federación Rusa. En este estudio se encontró que el sistema inmunitario innato, las células natural killer y los neutrófilos, en particular, podrían activarse por la exposición crónica a aproximadamente 0,9 Gy de una manera dependiente de la dosis y de la tasa de dosis, lo que favorecía el mantenimiento de un estado inflamatorio crónico, que podría contribuir al desarrollo de patologías tardías relacionadas con la radiación como enfermedades cardiovasculares y malignas. En otros estudios similares, como el de Kiselev et al. (15), llegaron a conclusiones muy similares, en donde revisaron los cambios inmunológicos en los trabajadores expuestos a radiación en un complejo químico siberiano (con más

de 4000 trabajadores), en la instalación nuclear de Mayak y en la planta química y metalúrgica de Chepetsk. La característica común de estas instalaciones era la presencia de una exposición de tipo mixto (rayos gamma externos y radiación alfa interna debida al uranio incorporado). En este estudio se registraron no solo los cambios básicos de laboratorio en los parámetros del sistema inmune, sino también disfunciones inmunitarias sintomáticas clínicamente relevantes, como presencia de infecciones, alergias, autoinmunidad y enfermedades inmunoproliferativas, y se descubrió un mayor riesgo de deficiencia inmunitaria que conduce a un síndrome infeccioso en los trabajadores de la industria nuclear en comparación con los controles. También se informó de niveles de inmunoglobulina E (IgE) significativamente elevados en un determinado grupo de trabajadores en ausencia de una historia previa alérgica, lo que podría indicar un desequilibrio inducido por la radiación de baja dosis en la inmunidad humoral (13). A pesar de que también en esta revisión se encuentran estudios con reportes contradictorios frente a los efectos lesivos de las radiaciones ionizantes a bajas dosis, incluso se constatan reportes en donde en determinados casos de patologías inflamatorias previas, la radiación ionizante puede ejercer un efecto antiinflamatorio, existiendo una dicotomía frente al efecto inflamatorio vs antiinflamatorios de este agente físico a baja dosis, se logra concluir que si bien se necesitan más estudios frente a los efectos en el sistema inmune ocasionados por exposición a baja dosis de radiación ionizante, los estudios realizados en seres humanos así como los datos experimentales, indican que las dosis bajas de radiación provocan daños en la inmunidad de las células T (especialmente en las células T CD4+) y existe bastante consenso en la literatura sobre el efecto de las dosis bajas de radiación sobre el cambio en el perfil funcional de las células T CD4+. En la mayoría de los estudios también se

informa de daños en las células CD8+ (tanto cuantitativos como funcionales), pero existen discrepancias en cuanto a su radiosensibilidad y su deterioro funcional dependiendo de si se realizaron exposiciones agudas o crónicas a largo plazo; adicional, los estudios epidemiológicos fueron los primeros en plantear la posibilidad de una aceleración del envejecimiento inmunitario (senescencia celular) inducida por la radiación, así como de perturbaciones metabólicas en las células inmunitarias inducidas por el agente físico, por lo que recientemente los datos experimentales parecen validar estas observaciones, aunque los estudios de dosis bajas en estos temas son extremadamente escasos (13).

Gao et al. (12), en su estudio acerca del estado antioxidante y daño citogenético en trabajadores hospitalarios expuestos a bajas dosis de radiación ionizante, tuvieron como objetivo evaluar el nivel de estrés oxidativo y el daño cromosómico inducido por radiaciones a bajas dosis, por lo que usaron dos ensayos: la evaluación bioquímica del estrés oxidativo y ensayos de micronúcleos; en este estudio se determinó el estado oxidativo y antioxidante de los individuos midiendo las actividades de la cobre zinc-superóxido dismutasa (CuZn-SOD), la glutatión peroxidasa (GSH-Px), las enzimas catalasa (CAT) y los niveles de malondialdehído (MDA) en los eritrocitos. El efecto de la radiación sobre la integridad cromosómica se midió mediante la frecuencia de formación de micronúcleos (MN) utilizando la técnica de bloqueo de la citocinesis, se incluyeron en este estudio 218 trabajadores hospitalarios expuestos laboralmente a bajas dosis de radiación ionizante, junto con 118 controles sanos comparables en edad y sexo. En este estudio el valor mediano de la dosis efectiva anual en los trabajadores expuestos fue de 0,48 mSv y se comprobó que ninguna de las dosis individuales controladas en el estudio superaba el límite de dosis ocupacional de 20 mSv/año recomendado por la Comisión Internacional de Protección Radiológica

(ICRP por sus siglas en inglés). Los resultados obtenidos demostraron que la exposición a largo plazo a bajas dosis de radiación ionizante en trabajadores de hospitales indujo las actividades de cobre zinc-superóxido dismutasa y enzimas catalasas, y adicional redujo las actividades enzimáticas de glutatión peroxidasa en los eritrocitos (las cuales corresponde al sistema de defensa antioxidante) en comparación con los controles. En cuanto a la posible influencia de la dosis de exposición en los parámetros de estrés oxidativo en los trabajadores expuestos, se observó que la dosis de exposición sí influyó en el nivel de malondialdehído y en la actividad de enzimas catalasas en todos los participantes; en lo que respecta a la frecuencia de micronúcleos esta fue significativamente mayor en los trabajadores expuestos que en los controles (3 frente a 2 por 1000 células binucleadas;  $p = 0,001$ ). Al parecer los micronúcleos en las células de la sangre periférica revelan daños en el ADN que podrían haber tenido lugar varios meses o incluso años antes de la toma de muestras de los participantes en este estudio, además, en los resultados se demostró que el número de micronúcleos inducido por la radiación está fuertemente correlacionado con la dosis de radiación y depende del nivel de radiación ( $p < 0,001$ ). Una correlación positiva entre la frecuencia de micronúcleos y la duración de la exposición también se ha confirmado en otros estudios similares asociándose con un riesgo elevado de cáncer en los trabajadores de rayos X a medida que aumenta la duración de su servicio. En otros hallazgos de este estudio se evidenció una relación positiva entre el nivel de malondialdehído y la frecuencia de micronúcleos ( $p = 0,002$ ), lo que indica que los trabajadores de hospitales expuestos a bajas dosis de radiación ionizante presentan un mayor daño en el ADN y niveles elevados de peroxidación lipídica en comparación con los controles sanos, lo que indica que la exposición crónica a bajas dosis de radiación ionizante provoca daños

citogenéticos. Las frecuencias de micronúcleos encontradas en los trabajadores de este estudio expuestos, indican riesgos genéticos potenciales que pueden desempeñar un papel crítico en la carcinogénesis y la enfermedad genética inducida por la radiación, adicional, la evaluación de los niveles de malondialdehído (MDA) como biomarcador oxidativo junto con el análisis de frecuencia de micronúcleos serviría como herramienta diagnóstica para identificar a los trabajadores del hospital con alto riesgo por exposición a bajas dosis de radiación ionizante siendo fiable en dosimetría biológica (12).



# 3. Semiología dirigida a alteraciones hematológicas

### 3.1. Anamnesis

La hematología como subespecialidad médica tiene por objeto el estudio de la sangre y los órganos hematopoyéticos, lo cual implica múltiples relaciones entre diversos órganos y sistemas, por lo que la evaluación médica del paciente debe ser meticulosa. Es importante tener en cuenta que son muy frecuentes los trastornos no hematológicos que se manifiestan con signos y síntomas hematológicos que las mismas hemopatías, así mismo, “los trastornos hematológicos y su tratamiento dan lugar a complicaciones no hematológicas como las cardiorrespiratorias, neurológicas, cutáneas y gastrointestinales, las cuales se deben interpretar y manejar oportuna y correctamente. Todo lo anterior para resaltar que la primera aproximación al paciente en el contexto de la evaluación hematológica debe ser clínica” (16).

### 3.2. Anamnesis dirigida a enfermedades hematológicas

Aunque el diagnóstico hematológico probable puede ser evidente a partir de pruebas realizadas antes de que el paciente haya sido derivado para su estudio, es esencial evaluar los antecedentes clínicos exhaustivamente, ya que pueden influir en el posible plan terapéutico (17).

Es importante realizar una adecuada historia clínica, a la que se le añade una anamnesis dirigida sobre características relevantes asociadas a los signos, síntomas de presentación y antecedentes relevantes (Tabla 1).



Tabla 1.

*Índices Biológicos de Exposición de sustancias químicas con afectación renal*

|  |  |
|--|--|
| <b>Síntomas inespecíficos</b>              | <b>Fatiga, fiebre, pérdida de peso inexplicable</b>  |
| Síntomas relacionados con la anemia        | Disminución de la capacidad para realizar ejercicio, aparición reciente de disnea, angina de pecho intensidad creciente o presencia de edemas maleolares.  |
| Síntomas relacionados con neutropenia      | Ulceración oral recidivante, infecciones cutáneas o sepsis oral.   |
| Signos de inmunodeficiencia                | Infecciones orofaríngeas recidivantes.   |
| Signos de posibles problemas de hemostasia | Facilidad para el sangrado cutáneo, episodios hemorrágicos o erupciones.   |
| Síntomas anatómicos                        | Molestias abdominales (esplenomegalia o presión por linfadenopatías) o síntomas del sistema nervioso central (compresión medular).   |
| Antecedentes médicos                       | Historial de enfermedades pasadas, historial de procedimientos quirúrgicos previos que sugieran problemas hematológicos anteriores (ej. Diátesis hemorrágica subyacente).  |
| Antecedentes farmacológicos                | Consumo de fármacos con y sin receta; los fármacos son variados y en ocasiones graves, como sucede con la aplasia medular y la agranulocitosis.  |
| Antecedentes alérgicos y ocupacionales     | Algunos trastornos hematológicos pueden estar relacionados con productos químicos y otros riesgos ambientales, es fundamental realizar preguntas específicas sobre factores ocupacionales y aficiones. "El uso de disolventes y de metales pesados en diversas ramas de la industria, así como, el uso y exposición a plaguicidas en la agricultura, son causa de hemopatías, en ocasiones graves como la aplasia medular" (16). |



|                              |  |
|------------------------------|--|
| Antecedentes transfusionales | Hay que preguntar acerca de si el paciente ha donado sangre. Los antecedentes de transfusiones previas y su cronología también son importantes en algunos casos ej. Púrpura postransfusional.  |
| Antecedentes toxicológicos   | El consumo de tabaco, alcohol y sustancias psicoactivas pueden producir una morbilidad hematológica significativa.   |
| Antecedentes epidemiológicos | Viajes a zonas endémicas de enfermedades con afectación hematológica como el paludismo y leishmaniasis.  |
| Antecedentes familiares      | Indagar si existen enfermedades hematológicas hereditarias. "La herencia ligada al sexo es típica de trastornos de coagulación (hemofilias, enzimopatías o déficit de glucosa 6-fosfato deshidrogenasa). La herencia autosómica dominante es característica de la esferocitosis, eliptocitosis, talasemias y enfermedad de Rendú-Osler-Weber y Von Willebrand. La herencia autosómica recesiva se aprecia en hemoglobinopatías (hemoglobina ss, sc, c), las metahe-moglobinemias y ciertos trastornos de la coagulación como el déficit de factores v, vii, x" (16). |

Fuente: elaboración propia con base en (16, 17).

### 3.3. Exploración física

Datos relevantes en el examen físico dirigido a enfermedades hematológicas

Es fundamental en la exploración física del paciente enfocado a patologías hematológicas, seguir un orden lógico como en la exploración general, haciendo énfasis en el sistema linfático, piel y anexos, boca, bazo y sistema nervioso central (Tabla 2), posterior al registro de signos, síntomas y revisión por sistemas. Es fundamental el registro de signos vitales básicos: temperatura, frecuencia cardiaca, presión arterial, frecuencia respiratoria, saturación de oxígeno mediante oximetría de pulso, así mismo, es fundamental el

registro de talla y peso con el fin de tener datos de referencia en el seguimiento de muchas patologías hematológicas.

Tabla 2.

*Exploración física en el abordaje de paciente con alteración hematológica*

|                           |  |
|---------------------------|--|
| <b>Linfadenopatías</b>    | Explorar todas las regiones ganglionares de fácil acceso mediante palpación, debe especificarse en la historia clínica localización, tamaño, consistencia, si existe adhesión a planos profundos o tejidos subyacentes o no. Se debe abordar el paciente sentado frente al examinador y luego en decúbito supino, es posible apoyarse de maniobras para la exploración (ej. Maniobra de valsalva para acceder a ganglios profundos en región supraclavicular, movilización del cuello pasivamente para explorar ganglios laterocervicales o abducción y aducción del brazo para palpar ganglios axilares).   |
| <b>Piel y anexos</b>      | <p>En el examen físico es más fiable evaluar el color de los pliegues palmares dado que se mantienen rosados hasta que la hemoglobina desciende a 7 g/dl, por ende, solo basarse en la palidez cutánea no es una condición sine qua non de anemia (existen anemia compensadas y toleradas que no presentan esta característica) y no se deben olvidar pacientes con tez morena o negra en los que no se evidencia la palidez cutánea. No se debe olvidar la valoración de los anexos, valorar la forma de las uñas, la coloniquia en la ferropenia crónica, en las anemias (no leves) se puede presentar palidez en el lecho ungueal.</p> <p>Otra de las alteraciones que es posible evaluar es la presencia de petequias, equimosis y víbices características, las purpuras trombocitopenicas; también es posible evidenciar ictericia cuando los niveles de bilirrubina total son mayores o igual a 2mg/dl; la cianosis se observa básicamente en metahemoglobina.</p> |
| <b>Boca y mucosa oral</b> | Evaluar el color de las mucosas y encías, evaluar presencia o antecedentes de gingivorragia o si existe o no hipertrofia gingival la cual puede estar presente en pacientes con leucemia aguda; evaluar  |



presencia de ulceraciones en las mucosas (habitual en pacientes neutropénicos), determinar si existen placas blanquecinas con bordes geográficos compatibles con candidiasis oral o en neutropenias de larga data. Es importante evaluar color y aspecto de la lengua, esta puede presentar un aspecto liso y depapilado en anemias megaloblásticas e incluso ferropénicas.

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>Bazo</b>             | El bazo siendo una viscera solida a la hora de ser abordada, semiológicamente no debe ser palpable al examen físico, el bazo palpable es en principio patológico. La esplenomegalia se palpa en el cuadrante superior izquierdo del abdomen y al tacto se percibe como una protuberancia lisa, cuyo borde inferior es redondeado y se desplaza con los movimientos respiratorios. En el contexto hematológico las esplenomegalias se pueden clasificar como neoplásicas y no neoplásicas siendo estas últimas asociadas a otros hallazgos clínicos como presencia de ictericia (anemias hemolíticas) o presencia de linfadenopatías.   |
| <b>Sistema nervioso</b> | Dentro de las hemopatías que cursan con alteraciones neurológicas encontramos las inducidas por la toxicidad por plomo que cursa con alteraciones tempranas como cefalea, irritabilidad y manera tardía con irritabilidad, falta de atención, letargo, disminución de las funciones cognitivas, disminución en el aprendizaje, memoria, torpeza en movimientos (signos de encefalopatía) y convulsiones (en el medio laboral alta exposición en personas que manipulan gasolina indiscriminadamente y baterías de vehículos); la exposición a alcaloides cursa con mononeuropatías u polineuropatías; la anemia megaloblástica cursa con alteraciones en los cordones posteriores; las hemoglobinopatías (ej. Anemia de células falciformes) pueden afectar al sistema nervioso central en la génesis de accidentes cerebrovasculares. |

Fuente: elaboración propia con base en (16, 17).

# 4. Prevención en medicina laboral

Al reconocer la omnipresencia de la radiación ionizante en el transcurso de nuestra vida, ya sea por fuentes naturales o artificiales, esta se convierte en un componente de nuestro entorno y a su vez una herramienta importante en muchos avances científicos. La exposición humana a la radiación ionizante es inevitable, pero en el ámbito ocupacional se deben implementar lineamientos y estrategias para minimizar la exposición tanto como sea posible.

La exposición ocupacional a la radiación ionizante aumenta de manera acelerada, en el sector salud con la inclusión de un número cada vez mayor de estudios diagnósticos, existe una exposición de manera prolongada a radiación ionizante; por ejemplo, en la tomografía computarizada, que es una herramienta de diagnóstico comúnmente utilizada en medicina, existe exposición a dosis bajas de radiación. Para el paciente, cada procedimiento implica una exposición a radiación, lo que implica que los trabajadores en radiodiagnóstico e intervencionismo radiológico como los cardiólogos intervencionistas también sufren una importante exposición profesional cuando están cerca del paciente y de la fuente de radiación. Cada operador realiza cientos o miles de procedimientos cada año, por lo que la dosis acumulada del operador no es despreciable. Muchos procedimientos conllevan una exposición a la radiación tanto para el paciente como para el operador. Los elevados niveles de exposición a radiación ionizante del paciente y del personal que lo trata constituyen un importante problema social y científico dado el conocimiento sobre los peligros de la radiación ionizante y sus efectos acumulativos en el organismo (18).

Es importante proteger a los trabajadores de los daños producidos por la exposición ocupacional a la radiación ionizante, por lo que en la década de los setenta se introdujo un principio aún vigente denominado ALARA el cual es un acrónimo que significa “*tan bajo como sea razonablemente*

posible". Este principio se refiere a minimizar la duración de la exposición a la radiación, maximizar la distancia de la fuente de radiación, maximizar el blindaje entre las personas y la fuente de radiación y minimizar la cantidad de material radiactivo (18). El principio ALARA es un concepto clave en el que se basan los programas de protección radiológica, suele implicar el mantenimiento de las dosis de radiación de los trabajadores por debajo de los límites de dosis ocupacionales reglamentarios federales y estatales tanto como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta el estado de la tecnología, la economía y los factores sociales. El principio ALARA en el lugar de trabajo busca minimizar las dosis de radiación y las emisiones de materiales radiactivos utilizando todos los métodos razonables disponibles. Los procedimientos ALARA suelen desarrollarse para trabajar con fuentes de radiación específicas, por ejemplo, la radiografía de diagnóstico (por ejemplo, los rayos X médicos), la fluoroscopia en medicina o la radiografía industrial (19).

La reducción de los niveles de radiación externa, durante la utilización de fuentes artificiales en atención en salud se logra aplicando los siguientes principios básicos correspondientes al principio ALARA (1):

- *Distancia*: se basa en la ley de los cuadrados inversos: la intensidad de la radiación emitida por una fuente puntual varía inversamente con el cuadrado de la distancia; al doblar la distancia se reduce la exposición a 1/4.
- *Blindaje*: es un método muy efectivo usado en el control de rayos X y gamma. Los materiales empleados para blindaje y su espesor dependerán de la intensidad de la radiación. Los materiales más usados son plomo, concreto y bario; el espesor de las paredes de-

- pende de la fuente que se va a cubrir y de la radiación incidente.
- *Tiempo de exposición*: la dosis es directamente proporcional al tiempo de exposición. Al reducir el tiempo en un porcentaje dado, se reduce la exposición en la misma proporción.
  - *Aislamiento*: es una medida para diseñar un servicio de rayos X.

## 4.1. Protección radiológica

Los objetivos de la protección radiológica corresponden a gestionar y controlar las exposiciones a las radiaciones ionizantes de modo que se eviten los efectos deterministas y se reduzcan los riesgos de efectos estocásticos en la medida razonablemente alcanzable, considerando los factores sociales y económicos, por lo que la ICRP en su publicación 139: Protección radiológica ocupacional en procedimientos intervencionistas, recomienda tres principios fundamentales: 1. Justificación de prácticas; 2. Optimización de la protección; y 3. Limitación de dosis para las personas ocupacionalmente expuestas.

El principio de justificación es que cualquier decisión que altere la situación de exposición a la radiación debería hacer más bien que mal, lo que significa que cuando se introduce una nueva fuente de radiación, o se trabaja para reducir una exposición existente o el riesgo de exposición potencial, se debe lograr un beneficio individual o social suficiente para compensar el daño que causa, lo que en el contexto médico se traduce en generar más beneficios que daños. El principio de optimización significa “el nivel de protección debe ser el mejor en las circunstancias imperantes, maximizando el margen de beneficio sobre el daño”, en el contexto de la exposición médica la



optimización de la protección implica mantener la dosis de radiación lo más baja posible, en consonancia con la consecución del objetivo clínico de las intervenciones, y debe aplicarse al diseño de instalaciones que utilicen radiaciones ionizantes; a la selección, configuración y uso de equipos (20). La limitación de la dosis establece que “la dosis total para cualquier individuo proveniente de fuentes reguladas en situaciones de exposición planificadas no debe exceder los límites apropiados recomendados por la ICRP”, los límites aplicados corresponden a:

- *Todo el cuerpo*: “una dosis efectiva de 20 mSv al año (promediada durante períodos definidos de 5 años, siempre que la dosis efectiva no exceda los 50 mSv en un solo año)” (20, 21).
- *Extremidades*: manos y pies, una dosis equivalente de 500 mSv al año (20, 21).
- *Piel*: una dosis equivalente de 500 mSv año (promediada sobre un área de piel de 1 cm<sup>2</sup>, independiente del área expuesta (20, 21).
- *Lente del ojo*: un límite de dosis equivalente para el cristalino del ojo 20 mSv al año (promediado durante períodos definidos de 5 años, siempre que la dosis equivalente al cristalino del ojo no supere los 50 mSv en un solo año) (20).

En el ámbito nacional los límites de exposición ocupacional se encuentran consignados en la Resolución 18-1434 de 2002 (22) en su anexo 1 adoptando los establecidos por la ICRP, adiciona la protección a los aprendices con edades comprendidas entre “16 a 18 años que reciban formación para un empleo que implique exposición a la radiación, y en el de los estudiantes de 16 a 18 años que tengan que utilizar fuentes en el curso de sus estudios” (22),

determinando que la exposición ocupacional se controlará de manera que no se rebasen los siguientes límites: “A. Una dosis efectiva de 6 mSv en un año; B. Una dosis equivalente al cristalino de 50 mSv en un año; y C. Una dosis equivalente a las extremidades o la piel de 150 mSv en un año” (22).

## 4.2. Controles para la reducción de la exposición a radiaciones X y gamma

- a. *Controles de ingeniería*: estos deben usarse para mantener las dosis de radiación ocupacional (y las dosis al público), los principios ALARA se aplican después de determinar que la dosis de radiación no excederá los límites de dosis reglamentarios. Los controles de ingeniería, en algunos casos, pueden incorporarse al diseño de la instalación. Algunos ejemplos de controles de ingeniería corresponden a diseños en el puesto de trabajo, los sistemas de blindaje y de enclavamiento.

La exposición a radiaciones ionizantes exige características especiales en el diseño de los puestos de trabajo, así como la construcción de instalaciones adecuadas para minimizar el riesgo. En la administración de estas medidas de control, es de gran ayuda clasificar las zonas de trabajo en función de que exista o no radiación ionizante, contaminación radiactiva o ambas. “La introducción de estos conceptos clasificatorios de las zonas de trabajo en las primeras fases de la planificación permitirá que la instalación posea después todas las características necesarias para hacer menos peligrosas las operaciones con fuentes de radiación” (23).

La necesidad de blindaje depende del tipo y la actividad de la fuente de radiación. También hay que tener en cuenta los usos de las zonas adyacentes, incluidas las zonas situadas por encima y por debajo de la sala o instalación. Para el blindaje de salas que contienen equipos de rayos x médicos o salas con otros dispositivos de imagen de rayos x médicos, el Consejo Nacional de Protección y Mediciones de Radiación (NCRP por sus siglas en inglés) recomienda que el objetivo de diseño del blindaje sea de 500 mrad (5 mGy) en un año para cualquier persona en zonas controladas (restringidas). Para las zonas no controladas (no restringidas), el NCRP recomienda que el objetivo de diseño del blindaje sea de un máximo de 100 mrad (1 mGy) para cualquier persona en un año (~0,02 mGy por semana). El diseño del blindaje debe ser realizado por un experto cualificado. En general, los suelos, las paredes, los techos y las puertas deben construirse con materiales que proporcionen un blindaje para la protección radiológica deseada. Se puede instalar un blindaje de plomo, incluyendo vidrio emplomado, láminas de plomo (por ejemplo, incorporadas a las paredes), paneles de yeso prefabricados revestidos de plomo o madera contrachapada revestida de plomo, puertas y marcos de puertas prefabricados revestidos de plomo, placas de plomo y ladrillos de plomo. A veces puede ser suficiente construir una pared de un grosor adecuado de materiales de construcción normales (por ejemplo, hormigón denso). El diseño del blindaje pue-

de incluir una cabina de control o cortinas de equivalentes al plomo. A veces se pueden fabricar materiales de blindaje portátiles o temporales (por ejemplo, acero grueso, plomo o bloques de hormigón de alta densidad) en la zona de la inspección cuando se lleva a cabo la radiografía industrial portátil (por ejemplo, utilizando cámaras de radiografía industrial para inspeccionar la soldadura de tuberías o losas de hormigón). Cuando este tipo de blindaje portátil o temporal no sea práctico o adecuado para proteger a los trabajadores, los empleadores deben asegurarse de que los procedimientos operativos maximicen la distancia con respecto al equipo de radiografía industrial portátil mientras esté en funcionamiento.

Un sistema de enclavamiento de seguridad contra la radiación es un dispositivo que apaga o reduce automáticamente la tasa de emisión de radiación del equipo que la produce. El objetivo de un sistema de enclavamiento de seguridad radiológica es evitar la exposición y las lesiones de los trabajadores a causa de los altos niveles de radiación. Normalmente, los sistemas de enclavamiento son requeridos por las regulaciones estatales o federales en países como Estados Unidos para el registro o licencia de los equipos y las normas de rendimiento o seguridad.

En la mayoría de las aplicaciones, los sistemas de enclavamiento para detener la producción de rayos X o de haces de partículas pueden activarse mediante la apertura de un punto de acceso de los trabajadores (por

ejemplo, una puerta) a una zona controlada (restringida). Los sistemas de seguridad de enclavamiento también pueden incluir sensores de presión de la puerta o detectores de movimiento. Para las aplicaciones que implican fuentes de radiación de alta energía, un sistema con llaves de enclavamiento puede controlar el acceso o impedir la entrada en una sala de tratamiento de radiación o durante las operaciones del acelerador. Dado que la retirada de las llaves de enclavamiento detendrá la producción de rayos X o haces de partículas, estos sistemas de enclavamiento dependen de la supervisión constante de todas las llaves de enclavamiento y de la formación adecuada de los trabajadores para el acceso controlado a las zonas de alta radiación (19).

- b. *Controles administrativos*: en protección frente a la exposición a radiación ionizante los controles administrativos complementan a los controles de ingeniería. Algunos ejemplos de controles administrativos son la señalización, los sistemas de advertencia y los procedimientos operativos escritos para prevenir, reducir o eliminar la exposición a la radiación. Los procedimientos operativos suelen incluir tanto los procedimientos operativos normales como los procedimientos de emergencia (es decir, aquellos para derrames, fugas y evacuación de emergencia). Cada área de radiación debe estar visiblemente colocada con una o varias señales con el símbolo de precaución por radiación y las palabras Área de precaución por radiación. Cada zona de alta

radiación debe estar visiblemente expuesta con uno o varios carteles con el símbolo de precaución por radiación y las palabras Precaución área de alta radiación (19).

Los sistemas de advertencia pueden integrarse en el diseño de los equipos o dispositivos que producen radiación y también pueden utilizarse con materiales radiactivos. Estos sistemas de advertencia activarán una alarma audible (por citar ejemplos, para advertir a los trabajadores de que existe un peligro de radiación) o una señal de advertencia visible (iluminada) siempre que se emita radiación ionizante (19).

- c. *Controles en el individuo* (elementos de protección personal): los elementos de protección personal (EPP) se utilizan con el fin de evitar que los trabajadores se contaminen con material radiactivo, también se pueden utilizar para evitar la contaminación de la piel con partículas de radiación (partículas alfa y beta) y para evitar la inhalación de materiales radiactivos. Al momento de pensar en los EPP es importante identificar el tipo de radiación ionizante a la que está expuesto el trabajador dado que poseen poderes de penetración distintos:
1. Las partículas alfa tienen un poder de penetración muy bajo, viajan solo unos centímetros en el aire y no penetran la capa externa muerta de la piel, por lo general, no se requiere blindaje para las partículas alfa porque la exposi-

ción externa a las partículas alfa no proporciona ninguna dosis de radiación. Cuando hay partículas contaminadas con partículas alfa, pueden ser necesarios controles de ingeniería o protección respiratoria para evitar una exposición y dosis internas.

2. Las partículas beta de alta energía pueden viajar varios metros en el aire y pueden penetrar varios milímetros en la piel; para las partículas beta de alta energía, primero se debe seleccionar un blindaje adecuado con un espesor apropiado de materiales de bajo número atómico, como plásticos especializados o aluminio. El uso de gafas de seguridad como EPP puede ayudar a proteger los ojos de los trabajadores contra las partículas beta, así como proporcionar protección contra las salpicaduras en los ojos (evitando la posible exposición interna). Se pueden utilizar guantes y una bata de laboratorio para evitar la contaminación de la piel.
3. Los rayos gamma y los rayos x pueden viajar kilómetros en el aire y pueden penetrar profundamente en el cuerpo humano o atravesarlo por completo. Debe haber un blindaje adecuado para evitar o reducir las tasas de do-

sis de radiación (19). Algunos EPP para la protección de los trabajadores frente a los rayos gamma y x incorporan plomo u otros materiales densos de alto número atómico. Como se describe en los principios ALARA, también es importante tener en cuenta la ley del cuadrado inverso para los rayos gamma y los rayos x a la hora de elegir EPP adecuado. Algunos de los EPP utilizados corresponden a:

- Delantales o chalecos de plomo: el uso de delantales de plomo puede reducir la dosis de radiación del trabajador. Existen delantales de plomo personalizados (o equivalentes de plomo) para una amplia gama de entornos ocupacionales y tareas laborales. Un delantal de plomo solo es eficaz cuando se lleva correctamente y proporciona la protección adecuada necesaria frente a la fuente de radiación (19).
- Collarín tiroideo de plomo: un collarín de plomo para la tiroides ofrece una protección adicional contra la radiación para la tiroides que es especialmente sensible a la radiación.
- Guantes de plomo: los guantes revestidos de plomo ofrecen cierta protección a los trabajadores frente a la exposición de las manos a la radiación y deben utilizarse



para algunos equipos de rayos x si las manos deben colocarse en el campo directo de los rayos x. Sin embargo, durante la fluoroscopia, el uso de guantes de plomo cuando la mano del trabajador está en el haz primario (a veces inevitable por razones clínicas) puede hacer que el equipo aumente automáticamente la tasa de producción de radiación, lo que aumentará la dosis en las manos del trabajador, en el paciente y en otros trabajadores de la sala.

- - Gafas de seguridad: las gafas de plomo (gafas de plomo o gafas de radiación) o las gafas de seguridad opacas pueden proteger los ojos del trabajador de la exposición a la radiación.
- - Respiradores: aunque los respiradores suelen ser la última opción para controlar la exposición interna a los radionucleidos transportados por el aire, reduciendo la dosis de radiación interna, los empleadores deben asegurarse de que los trabajadores utilicen respiradores adecuadamente seleccionados y los lleven puestos cuando sea necesario (19).

### 4.3. Protección de las trabajadoras embarazadas

En lo que respecta a la protección de trabajadoras gestantes con exposición a radiación ionizante, la ICRP recalca que la primera responsabilidad frente a la protección del feto recae sobre la trabajadora haciendo alusión a que debe notificar a su empleador inmediatamente la confirmación del embarazo, antes de declarar el estado de embarazo está protegida por la protección radiológica normal de los trabajadores; al confirmarse el estado de gestación, la protección a la embarazada debe extremarse asegurando que las condiciones de trabajo sean tales que hagan improbable que la dosis adicional al feto supere aproximadamente 1 mGy durante el resto del embarazo. En lo que concierne al uso de la dosimetría personal, cuando se utilicen dos dosímetros individuales, el dosímetro bajo el delantal debe llevarse en el abdomen para controlar la dosis en el feto (20). En el ámbito nacional, de acuerdo con lo consignado en el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica (Resolución 18-1434 de 2002), la notificación de embarazo no se deberá considerar una razón para separar a la interesada del trabajo, pero el empleador deberá adaptar las condiciones de trabajo de la trabajadora gestante a fin de proporcionar al embrión o al feto el mismo nivel general de protección que se prescribe para los miembros del público (1 mGy) (22).

### 4.4. Programas de vigilancia epidemiológica

El monitoreo y vigilancia de la población trabajadora expuesta a radiación ionizante es la herramienta fundamental que contribuye al logro de los objetivos de la protección radiológica; la implementación de programas de vigilancia

permite asegurar que en condiciones normales de trabajo no se superen los límites de dosis ocupacional y se reduzcan las exposiciones de acuerdo a lo consignado en el principio ALARA, además buscan generar conciencia en los trabajadores ante el peligro físico al que están expuestos proporcionando elementos y herramientas necesarias para que la exposición ocupacional sea la mínima posible, y así prevenir enfermedades de origen laboral y accidentes por ocasión del trabajo. Estos programas deben ser evaluados periódicamente con direccionamiento al mejoramiento continuo (ciclo PHVA) con realización de mediciones (aplicadas al lugar de trabajo y directamente sobre el trabajador) y registro de la exposición ocupacional del individuo (24).

Los programas de control en la salud de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a radiación ionizante deben ir enfocados desde la perspectiva de la prevención primaria, por lo que es fundamental establecer una categorización de los trabajadores expuestos. Desafortunadamente en nuestro país, en materia de regulación de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a radiación, la información es poco precisa (24), por lo que es posible tomar como ejemplo lo indicado por países como Chile o España en donde definen a su población ocupacionalmente expuesta para tomar medidas en los programas de prevención. De acuerdo a lo establecido por la Resolución 18-1434 de 2002 es fundamental la implementación de programas de vigilancia radiológica en los puestos de trabajo, los cuales deben ser bajo la supervisión de un experto cualificado y de un responsable de protección radiológica, y estos programas deben especificar las magnitudes que han de medirse, dónde y cuándo han de efectuarse las mediciones y con qué frecuencia, los métodos y procedimientos de medición más apropiados y los niveles de referencia y las medidas a adoptar (22). En lo referente a la vigilancia de la salud de los trabajadores ocupacionalmente expuestos en la misma

resolución, se establecen requisitos los cuales deben basarse en los principios generales de la salud ocupacional y deben tener por objetivo la evaluación de la aptitud inicial y permanente de los trabajadores para las tareas que se les asignen, así mismo en los seguimientos de estos programas se deben tener registros de la “vigilancia radiológica individual, vigilancia radiológica de los puestos de trabajo, inventario y movimiento de las fuentes y equipos de radiación, inventario de desechos radiactivos, revisión y calibración de los equipos de protección radiológica, ensayos de los planes de emergencias radiológicas, su evaluación y actualización, preparación y evaluación en protección radiológica de los trabajadores” (22). En lo que concierne a vigilancia radiológica individual en nuestro país, a pesar de estar definidos los límites de exposición ocupacional, los cuales están consignados en la Resolución 18-1434 de 2002 en su anexo 1 adoptando los establecidos por la ICRP, no existe un periodo de uso recomendado para la dosimetría personal, esto depende de la tecnología de los dosímetros (24).

La vigilancia médica que es un aspecto importante en los programas de vigilancia epidemiológica tiene como propósito “1. Evaluar la salud de la persona que va a trabajar con radiación ionizante; 2. Evaluar la salud del trabajador que ya está ocupacionalmente expuesto; 3. Mantener la compatibilidad entre la salud del trabajador y sus condiciones de trabajo; y 4. Proveer información de referencia en caso de exposiciones anormales” (25) (26).

Previo al ingreso de un nuevo trabajador se debe solicitar historial dosimétrico y realizar la historia clínico-laboral con una anamnesis laboral dirigida donde se detallen los siguientes aspectos (26):

- Los antecedentes laborales con especial atención a exposiciones anteriores a radiaciones ionizantes o a exposición a sustancias tóxicas

para la médula ósea, se debe establecer el periodo de tiempo de duración en las antiguas ocupaciones y la actividad económica de la empresa.

- Exposición actual al riesgo: descripción detallada del puesto de trabajo actual y riesgo asociado, tiempo de permanencia en el puesto de trabajo, medidas de protección utilizadas, información dosimétrica e información de exposición a productos químicos.
- Antecedentes personales en donde se recogerán datos de antecedentes patológicos, quirúrgicos y tratamientos realizados, especificar si ha tenido tratamientos con radiaciones ionizantes.
- Antecedentes familiares sobre todo si son antecedentes de cáncer o lesiones precancerosas.
- Hábitos personales de los trabajadores como consumo de tabaco (cuantificar consumo) y alcohol.
- Realizar una revisión por sistemas orientada a la existencia de síntomas relacionados con los efectos de la radiación ionizante.
- Examen físico específico por aparatos y sistemas, valorando si existen alteraciones relacionadas con la exposición a radiación ionizante.

Adicionalmente, se debe realizar un control biológico y estudios complementarios como la medición de parámetros hematológicos: hemograma completo, velocidad de sedimentación globular (vsg) y recuento de reticulocitos; también se deben evaluar parámetros bioquímicos dado que a pesar de que el sistema hematológico es el más afectado con la exposición a radiación, esta puede afectar

sobremano a otros sistemas y la evaluación médica del trabajador debe ser holística. Entre los parámetros bioquímicos se realiza perfil tiroideo (T4, T3 y TSH); en programas de vigilancia médica realizados en países como España aumentan la pesquisa bioquímica incluyendo mediciones de glucosa, proteínas totales, albúmina, proteinograma, coeficiente albúmina/globulina, fosfatasa alcalina, GOT, GPT, bilirrubina total y diferenciada, colesterol total y fracciones, triglicéridos, pruebas de función renal (creatinina sérica y urea) e inmunoglobulinas; adicionalmente, en el examen de ingreso se realizará énfasis en la exploración oftalmológica, se debe realizar electrocardiograma, espirometría y audiometría (26). La evaluación periódica del trabajador en lo que respecta a su examen médico debe ser anual, la realización de pruebas (como espirometría, electrocardiograma y audiometría) deberá ser con una frecuencia de mínimo 5 años o según criterio médico, y en función del puesto de trabajo, la exploración oftalmológica deberá ser anual (26) (27). También se debe realizar examen médico post ocupacional o de egreso, post incapacidad o por reintegro con el fin de identificar las condiciones de salud que puedan ser agravadas por ocasión del trabajo o que puedan interferir en la labor a realizar.

### ***Vigilancia de la exposición: Monitoreo de exposición individual a radiación ionizante***

En la exposición a radiación ionizante el control es necesario para demostrar el cumplimiento de los límites de dosis estandarizados anuales, así mismo, es fundamental para optimizar la protección al personal expuesto; para realizar el adecuado cumplimiento de los límites en cuanto a las dosis, se hace necesario la evaluación de las dosis efectivas y las dosis equivalentes para piel, cristalino y manos y pies

las cuales no se pueden medir directamente en los tejidos corporales. La vigilancia de la exposición ocupacional se basa en una serie de supuestos sobre la relación entre lo que mide un dosímetro y la dosis que recibe un individuo, ninguna dosis para un individuo puede estimarse razonablemente en campos de radiación altamente variables sin tener algún tipo de monitoreo individual de los trabajadores durante todo el tiempo de exposición (20).

La dosimetría se utiliza para indicar los equivalentes de dosis que los trabajadores reciben de los campos de radiación externos a los que puedan estar expuestos. Los tipos principales de dosímetros corresponden a dosímetros termoluminiscentes, de película y cámaras de ionización. Los dosímetros termoluminiscentes también llamados dosímetros pasivos (suelen ser pequeños, livianos y no requieren energía) son los dosímetros personales más utilizados. Los dosímetros termoluminiscentes están formados por materiales específicos que cuando absorben energía de la radiación ionizante la van almacenando, de modo que pueden recuperarse después en forma de luz cuando los materiales se calientan, y la cantidad de luz liberada directamente es proporcional, con bastante exactitud, a la energía absorbida de radiación ionizante, y a su vez, a la dosis absorbida por el material del dosímetro (23). Para la vigilancia de la exposición a radiación, el dosímetro de cuerpo entero debe llevarse a una altura comprendida entre los hombros y la cintura, en un punto donde se prevea la exposición máxima, usualmente cerca del cuello en la parte superior del delantal plomado para evaluar las dosis en áreas no protegidas; también pueden llevarse otros dosímetros en partes específicas del cuerpo en donde se prevea mayor irradiación (en segmentos corporales) como por ejemplo: dosímetros en forma de anillos o en las muñecas, en el abdomen o en un collar.

- Dosimetría

Los dosímetros personales (pasivos) proporcionan la dosis total acumulada durante el período de uso y deben cambiarse por nuevos dosímetros al final del período de uso. En general, el personal de vigilancia debe ser monitoreado durante períodos mensuales para proporcionar datos de dosis con la frecuencia suficiente y así puedan detectarse dosis y eventos de radiación inusuales y aplicarse las respuestas adecuadas. En materia de la evaluación de la dosis eficaz en los individuos expuestos, si en la institución donde labora se puede suponer con certeza que todo el personal ocupacionalmente expuesto usa delantales de protección con atenuación suficiente durante todas las intervenciones, es factible el uso de un solo dosímetro sobre el delantal, dado que existe controversia sobre el porte de dos dosímetros al existir partes del cuerpo que están protegidas mientras que otras partes pueden estar desprotegidas durante la realización de las actividades. Por esto, a la hora de evaluar la lectura de un solo dosímetro colocado sobre el delantal protector, sobreestima la dosis efectiva porque la lectura no refleja la dosis a los órganos del tronco protegidos por el delantal, mientras que el dosímetro único colocado debajo del delantal subestima la dosis efectiva porque la lectura no lo hace y esta no refleja la mayor exposición de las partes del cuerpo desprotegidas, como la cabeza, el cuello, parte de los pulmones y otros órganos del tórax que están expuestos a través de los orificios de



los brazos; sin embargo, la recomendación de la ICRP para el ámbito en salud, es que usen dos dosímetros, uno por debajo del delantal y otro por encima del delantal, en el cuello para los procedimientos de intervención, ya que proporciona no solo la mejor estimación disponible de la dosis efectiva, sino también una indicación de la dosis en el cristalino y la cabeza, y la confirmación de que el delantal protector ha sido utilizado realmente por el trabajador. Adicional, se realiza la precisión de casos en donde el trabajador este empleado con más de un empleador en el oficio con exposición a radiación ionizante, la cooperación entre los empleadores es esencial. Una opción de dosimetría puede ser que el trabajador tenga diferentes dosímetros suministrados por cada empleador, pero debe obtenerse la suma de todas las dosis individuales incurridas en cada una de las instalaciones y debe mantenerse un registro de dosis completo (20).

Existen problemas que deben considerarse con el uso de dosímetros personales que pueden causar no solo lecturas de dosis muy altas, sino también lecturas de dosis muy bajas que puedan sugerir un mal uso o falta de uso de los dosímetros, como por ejemplo, el uso incorrecto de un dosímetro sobre un delantal siendo diseñado para usarse debajo del delantal de protección, usar un dosímetro de anillo en la mano incorrecta, usar un dosímetro entregado a otra persona o un dosímetro perdido; si el dosímetro indica dosis grandes,

en especial si superan en mucho las dosis definidas en las normas reguladoras, se deben analizar con cuidado la “colocación del dosímetro y los campos de radiación reales a los cuales ha estado expuesto el trabajador para estimar la dosis que el trabajador recibió en realidad” (23). Se debe obtener del trabajador una declaración, que formará parte de la investigación y será incluida en el informe, dado que, en ocasiones ante la presencia de dosis muy grandes recibidas por el dosímetro, la exposición radiológica del dosímetro es liberada mientras nadie lo llevaba puesto (23).

- **Dosimetría biológica: Biomarcadores**

La radiación ionizante a sabiendas que puede ocasionar efectos negativos sobre la salud también es la forma de tratamiento más usada para manejo de neoplasias, lo que lleva a considerar la radiación como arma de doble filo (28). Ante la creciente preocupación por la exposición ocupacional, así como la exposición de manera accidental aprendiendo de los grandes desastres nucleares en la historia de la humanidad y el inminente riesgo de terrorismo nuclear (18), se hace fundamental contar con biomarcadores de exposición para la evaluación individual dado que los efectos estocásticos secundarios a la exposición a radiación ionizante son retardados.

Un biomarcador se define como cualquier medida que demuestre “una interacción entre un sistema biológico y un agente ambiental el cual puede ser químico, físico

o biológico” (29); estos biomarcadores pueden utilizarse para múltiples fines en investigación; en lo referente a la exposición a radiación ionizante, tiene como propósito la estimación o validación de la dosis recibida (mejorando así la validez de una correlación entre exposición y las respuestas biológicas), en la investigación de la susceptibilidad individual y en la detección temprana de efectos sobre la salud (30). A grandes rasgos y para fines de investigación los biomarcadores ante las exposiciones a radiación ionizante se pueden clasificar como: marcadores citogenéticos, biomarcadores relacionados con el daño del pool de nucleótidos y el daño del ADN, biomarcadores relacionados con mutaciones y variantes heredadas de la línea germinal, biomarcadores relacionados con cambios transcripcionales y traslacionales, biomarcadores relacionados con modificaciones epigenómicas y biomarcadores biofísicos de exposición (30).

En la actualidad es de gran utilidad el análisis dicéntrico de cromosomas, el cual hace parte de los biomarcadores citogenéticos, este método es considerado el gold estándar para evaluar la dosis de radiación en individuos tras exposiciones accidentales y nucleares; este análisis de cromosomas dicéntricos es muy laborioso y requiere de mucho tiempo (72 a 96 horas) para la estimación de la dosis. En estudios realizados recientemente se ha demostrado una mayor sensibilidad en la detección y puntuación de cromosomas dicéntricos usando la hibridación fluorescente in situ (FISH) utilizando sondas de

ácido nucleico peptídico específicas para los centrómeros y los telómeros. El análisis dicéntrico de cromosomas basado en FISH no solo ha aumentado la sensibilidad, sino que también ha reducido considerablemente el tiempo de análisis. Otro de los ensayos pertenecientes a los biomarcadores citogenéticos es el ensayo de micronúcleos por bloqueo de citocinesis, el cual ha adquirido una importancia considerable como un indicador fiable de la exposición a radiación ionizante; este análisis detecta los micronúcleos resultantes de cromosomas enteros o de fragmentos de cromosomas que se excluyen del huso mitótico durante la división celular. Los micronúcleos se forman cuando los cromosomas intactos o los fragmentos no se segregan adecuadamente en los núcleos de las células hijas en la anafase de la división celular, sino que permanecen en el citoplasma tras la división celular. El fundamento de este ensayo es bloquear la progresión del ciclo celular de los linfocitos de sangre periférica en la fase de citocinesis después de la primera mitosis utilizando citocalasina B (30), dado que los micronúcleos se forman en la división celular y se pierden cuando la célula continúa dividiéndose. Estos micronúcleos pueden visualizarse como pequeños objetos esféricos utilizando cualquier colorante de ADN de uso convencional, esta técnica es mucho más fácil de marcar tanto de manera manual como utilizando sistemas automatizados. De manera reciente se estableció un nuevo método de ensayo de micronúcleos por bloqueo

de citocinesis de alto rendimiento y miniaturización para procesar rápidamente un gran número de muestras (en 72 horas), lo que se convierte en un requisito fundamental en el triaje radiológico, al ser este ensayo más fácil de realizar también es usado de manera habitual para estimación de dosis de exposición en complemento al análisis dicéntrico de cromosomas (28).

En el análisis de biomarcadores relacionados con el daño del pool de nucleótidos y del ADN, encontramos que el ensayo  $\gamma$ -H2AX; H2AX es una variante de la histona de H2A, la cual se fosforila rápidamente en la serina 139 por la exposición a los agentes que generan ruptura de la doble cadena de ADN, entre estos agentes la radiación ionizante y la H2AX fosforilada ( $\gamma$ -H2AX), los cuales se acumulan en los sitios de la ruptura de doble cadena del ADN, este ensayo a diferencia de los dos anteriores evita la necesidad de estimular a los linfocitos durante 48-72 horas, lo que lo hace un ensayo mucho más rápido para la estimación de la dosis, pero posee una limitación; la rápida cinética de formación de los focos de  $\gamma$ -H2AX y su desaparición dentro de un margen de 6 a 8 horas lo hace poco fiable en cuanto a precisión de dosis, pero lo hace realmente útil como indicador biológico de la exposición (28). En lo que respecta a los biomarcadores relacionados con cambios transcripcionales y traslacionales, encontramos el ensayo de traslocación cromosómica por hibridación in situ con fluorescencia multicolor (FISH), este ensayo es muy útil para el

análisis de cambios numéricos y estructurales en todo el genoma humano, por lo que es posible detectar de manera fiable intercambios simples y complejos como translocaciones e inversiones inducidas por la radiación ionizante, las cuales pueden ser utilizados para biodosimetría retrospectiva debido a su persistencia en el tiempo después de la exposición a radiación. El tiempo total de este ensayo para el análisis de estas alteraciones a nivel cromosómico puede oscilar entre 10 y 14 días dependiendo de la calidad de las metafases del ciclo celular y de la hidridación (28).

En definitiva, el campo de la biodosimetría para radiaciones ionizantes puede ayudar a predecir las consecuencias para la salud ante la exposición a la radiación en una población, lo que es fundamental en el enfoque preventivo de la colectividad en medicina laboral. Este tipo de ensayos puede facilitar la estratificación de los individuos que requieran atención inmediata y las posibles medidas desde el enfoque médico para mitigar algunas de las lesiones asociadas a la radiación. En muchos países con adecuado control y medidas de prevención ante accidentes radiológicos, la utilidad de la biodosimetría radica en la evaluación retrospectiva de la exposición y la evaluación de la dosis absorbida después de presuntas exposiciones no controladas, mediante la evaluación de aberraciones cromosómicas que reflejan el daño generado por la radiación, también son de utilidad cuando se conocen mal los detalles del suceso en la exposición y no se

disponen de mediciones o cálculos de la dosis física o incluso para confirmar la dosis física del dosímetro. La biodosimetría ha mejorado la protección contra la radiación, ya que es una herramienta esencial para estimar una dosis absorbida real sin estar influenciada por variaciones temporales o individuales o factores de confusión. Este tipo de dosimetría aplica con fines de protección radiológica y complementa la dosimetría física, con respecto a los ensayos con mayor aplicación, la evaluación dicéntrica es el estándar en la actualidad con la ventaja del uso de linfocitos en sangre periférica dado que circulan por todo el cuerpo y están todos en la misma fase del ciclo celular en el momento de la exposición a radiación ionizante así como al momento de realizar la extracción de sangre con lo que es posible evaluar el daño inducido por exposiciones a radiaciones ionizantes (31). En la actualidad se trabaja en tecnologías de alto rendimiento o tecnologías ómicas siendo enfoques alternativos que analizan todo el genoma o las modulaciones del transcriptoma, el proteoma, el epigenoma o el metaboloma, los cuales podrían resultar una herramienta prometedora para el descubrimiento de nuevos biomarcadores ante la exposición a radiaciones ionizantes, pudiendo ser utilizados en la biodosimetría en caso de incidentes o accidentes radiológicos.

## 4.5. Vacaciones profilácticas

En nuestro país de acuerdo a lo consignado en el Título VII, Capítulo IV (vacaciones anuales remuneradas), Artículo 186, numeral 2 del Código sustantivo del trabajo “*los profesionales y ayudantes que trabajan en establecimientos privados dedicados a la lucha contra la tuberculosis, y los ocupados en la aplicación de rayos X, tienen derecho a gozar de quince (15) días de vacaciones remuneradas por cada seis (6) meses de servicios prestados*” (32), y se hace alusión al goce de vacaciones profilácticas las cuales tienen la finalidad de la separación temporal del trabajador frente a situaciones que signifiquen riesgo a la salud en materia laboral. En lo que respecta a la radiación ionizante es claro que es altamente peligrosa para un individuo trabajador, por lo que es fundamental el cumplimiento de las normas básicas de seguridad radiológica (24). Adicionalmente, este tipo de actividad es reconocida como de alto riesgo para la salud de los trabajadores de acuerdo al Decreto ley 2090 de 2003 (7), con lo que se busca preservar el estado óptimo de salud del trabajador.

## 4.6. Sustancias radioprotectoras

Basado en el riesgo cada vez mayor tras las exposiciones a radiación ionizante, es indispensable la búsqueda de compuestos químicos o biológicos que confieran protección ante los efectos secundarios producidos por este agente físico. Las sustancias radioprotectoras suponen ser medidas preventivas, las cuales podrían encasillarse en el segundo nivel de prevención en salud, ya que estas sustancias son compuestos que pueden ser químicos o biológicos que se utilizan para mitigar el daño inducido por la radiación en las diferentes células y tejidos del cuerpo humano, las cuales deben poseer unas características fundamentales:



a). Reparar el ADN y el daño celular; b). Ayudar a la repoblación de los órganos dañados; c). Inmunomodulación; d). Eliminación de radicales libres; y finalmente e) Disminución del estrés oxidativo (33).

Existen tres grupos de agentes radioprotectores: los agentes absorbentes, radioprotectores químicos y adaptógenos. Los absorbentes generan protección al organismo frente a los efectos internos de la exposición a radiación e incluye fármacos que impiden la incorporación de radioyodo y la absorción de radionúclidos; los adaptógenos estimulan la radiorresistencia que proporciona una protección química contra la radiación ionizante de bajo LET; y los radioprotectores químicos suelen ser complejos sulfhidrilos y antioxidantes. De este grupo de compuestos, la amifostina es la única aprobada por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA por sus siglas en inglés), y es usada en radioterapia y durante viajes espaciales; a pesar de que la aplicación de compuestos sintéticos ha mostrado eficacia genera grandes efectos secundarios: “la amifostina genera efectos como estornudos, náuseas, vómitos, diarrea, hipotensión, cefalalgia, hipotensión y tos seca” (33).

Basado en investigaciones, los radiobiólogos y oncólogos han tratado de identificar sustancias radioprotectoras que sean eficaces, seguras, no tóxicas y que adicional sean baratas, fiables y accesibles; entre estas sustancias se han identificado compuestos antioxidantes que interfieren y pueden ofrecer protección contra los daños causados por la radiación ionizante, los cuales pueden estar presentes en la dieta humana.

A grandes rasgos, los antioxidantes pueden ser endógenos y exógenos, nuestro organismo posee un sistema de defensa antioxidante endógeno (el cual es producido por el organismo) que pueden inactivar las ROS y neutralizar el estrés oxidativo inducido por la radiación, mientras que los antioxidantes exógenos pueden ingresar al organismo a través

de los alimentos ricos en estas sustancias, también en especias, hierbas y vitaminas. A manera de ejemplo, en muchos estudios se ha logrado demostrar el efecto protector del extracto de hoja de albahaca y sus compuestos derivados tras inducir la regeneración de las células madres hematopoyéticas aumentando su supervivencia en la médula ósea y disminuyendo las aberraciones cromosómicas (33), así mismo, frutos secos como cardamomo, el zumo de uva negra, cebolla, salvia común y orégano, demostraron efectos radioprotectores contra el daño oxidativo inducido por la radiación.

El ácido ascórbico (vitamina C), el cual es conocido como antioxidante, se encuentra también en muchas plantas y como suplemento dietario; en diversos estudios se ha observado una reducción de la apoptosis inducida por radiación en células de la médula ósea y restauración de la función hematopoyética tras su administración a dosis altas. En otro estudio realizado por Brand y colaboradores (34), se evidenció que la vitamina C redujo de manera significativa el número de roturas de doble cadena en el ADN en un 25 % ( $p < 0,0001$ ) en los linfocitos en sangre periférica tras la incubación antes de la exposición a radiación gamma de 10 mGy (34). Otras de las sustancias con efectos radioprotectores corresponden a los flavonoides que son fitoquímicos de color amarillento derivados de los flavanos, entre los más destacados:

las isoflavonas de la soja (como la genisteína, la daidzeína y la gliciteína), el epigallocatequina-3-galato (EGCG), la epicatequina del té verde, la silimarina del *Silybum marianum*, la apigenina de los guisantes o el ajo, la baicaleína de la *Scutellaria baicalensis*, la crisina, extraída del propóleo y la quercetina de la piel exterior de las cebollas mostraron varios efectos protectores contra los daños inducidos por la radiación. (34)

Otro de los compuestos con efecto radioprotector es la curcumina que corresponde a un polifenol flavonoide que es ingrediente activo de la especia cúrcuma, diversos estudios han demostrado los efectos radioprotectores de la curcumina contra las roturas de cromátidas inducidas por la radiación en varios modelos tanto *in vitro* como *in vivo* (33).



# 5. Recomendaciones

La exposición a radiaciones ionizantes se ha convertido en un peligro inherente al ejercicio de múltiples ocupaciones en donde es habitual el uso de fuentes artificiales como en la industria manufacturera y de servicios, en las industrias militares, en instituciones de investigación y universidades, en el sector de la energía nuclear, en el sector salud por médicos, técnicos en radiología, físicos médicos, hemodinamistas, radiólogos intervencionistas, etc.; sin embargo, en el sector de la aviación también existe exposición a radiación ionizante no por uso de fuentes artificiales, sino por exposición a radiación cósmica de manera natural, la ICRP recomendó que las exposiciones a los rayos cósmicos sean parte de la exposición ocupacional, con la precisión de que solo las tripulaciones aéreas deberían considerarse ocupacionalmente expuesta (35); las únicas medidas reguladoras prácticas consisten en el control de la exposición individual mediante el control de las horas de vuelo y la selección de las rutas, en promedio, la dosis anual está situada en torno a 3 mSv, aunque podría llegar al doble en vuelos de larga duración y a gran altitud. Debido a la naturaleza de la radiación y de las operaciones, esas dosis son inevitables (8), lo que abre la puerta a la investigación en este grupo ocupacionalmente expuesto a sabiendas de que en nuestro país hay ausencia de legislación que adopte las recomendaciones emitidas por la ICRP en relación con el reconocimiento de la exposición ocupacional en pilotos tal como lo expresa Jaramillo Osorio et al. (8), en su monografía. Se hace indispensable investigar y generar conocimiento científico en cuanto a estudios de ámbito epidemiológico que permitan encontrar asociación entre radiación ionizante y efectos negativos a la salud, y de esta forma implementar sistemas de vigilancia epidemiológica, así como medidas de protección adecuadas para este grupo de trabajadores.

En el sector económico de la salud, al tener en cuenta el panorama nacional donde los trabajadores con exposición a radiación ionizante (técnicos en imágenes diagnósticas, médicos radiólogos, cardiólogos intervencionistas, entre otros) poseen no solo un trabajo con exposición a radiación ionizante, sino múltiples contrataciones en diferentes instituciones con diferentes magnitudes de exposición, se convierte en una carta de invitación a realizar más investigación en este grupo de trabajadores para realizar una adecuada protección radiológica; teniendo en cuenta que si bien es cierto que las exposiciones a dosis altas y moderadas de radiación ionizante producen diferentes tipos de cáncer entre ellos cáncer hematológico, gracias a datos obtenidos en diversos estudios epidemiológicos sobre exposición a dosis bajas de este agente físico, se logra satisfacer la mayoría de los criterios sobre la determinación de causalidad de Bradford-Hill, los cuales son fundamentales para la investigación en medicina laboral. Sin embargo, a pesar de que en múltiples estudios el criterio de fuerza de asociación no logra cumplirse en un 100 %, este criterio no se considera un aspecto único y necesario, y de hecho, Hill en la descripción de sus criterios hace hincapié de manera explícita que no se deben descartar las asociaciones débiles observadas, por lo que en la mayoría de estos estudios se informan de estimaciones de riesgo positivas no despreciables, las cuales apoyan y denotan un exceso de riesgo para cáncer secundario a radiación ionizante (36).

Con la llegada del nuevo coronavirus desde finales de 2019, el cual ocasionó la enfermedad COVID-19 y tomó el calificativo de pandemia en 2020, al ser una enfermedad con una alta tasa de propagación, los métodos convencionales para la detección como la RT-PCR, las radiografías de tórax y las tomografías computarizadas de tórax son incapaces de satisfacer las necesidades del rápido

aumento de personas contagiadas, sin embargo, la prueba RT-PCR, la cual cursa con un mayor tiempo de respuesta supone un reto en el diagnóstico, sobre todo en los países en vías de desarrollo debido a las limitadas instalaciones médicas y equipos especializados en el procesamiento de estas pruebas. A consecuencia de lo anterior, sumado al número cada vez mayor de pacientes, el diagnóstico basado en imágenes, como las radiografías, permiten realizar la impresión diagnóstica, la comprobación de la progresión de la enfermedad y el seguimiento de las consolidaciones pulmonares dado que la consolidación por coronavirus no es similar a la consolidación por neumonía bacteriana o vírica (37); estos hallazgos de la radiografía de tórax pueden mejorar de cierta forma el diagnóstico de la enfermedad con una mayor capacidad de detección, lo que genera un uso cada vez mayor de este tipo de pruebas (sumado al uso de la tomografía de toráx) lo que supone una mayor exposición del personal en salud a la radiación ionizante. Se hace necesaria una extrema vigilancia en esta población trabajadora, es de vital importancia realizar estudios en esta población ocupacionalmente expuesta, teniendo en cuenta que los efectos estocásticos de la radiación no son inmediatos, esto con el fin de mejorar los programas de vigilancia epidemiológica y evaluar el uso de biomarcadores para determinar la condición de salud real de los trabajadores expuestos a radiaciones ionizantes.

Finalmente, en lo referente al enfoque salubrista de la medicina laboral con énfasis en la promoción y prevención en salud, al tener en cuenta que la primera busca proporcionar a los individuos y al colectivo medios necesarios para influir positivamente y ejercer un mayor control sobre el propio estado de salud, y la segunda posee a grandes rasgos tres niveles como objetivo (prevención primaria, secundaria y terciaria), en esta disciplina y concerniente a la



exposición a radiación ionizante, la cual sabemos provoca efectos deletéreos secundarios al daño en órganos y tejidos, es fundamental la educación al colectivo con respecto a los riesgos secundarios a la exposición a radiación en las diferentes ocupaciones implicadas, sus mecanismos de control y la importancia de fomentar estilos de vida saludables para cuidar de la propia salud; basado en los hallazgos con referencia a las sustancias radioprotectoras, y a pesar de que son necesarios más estudios y ensayos clínicos respecto al tema, al conocer y comprender los mecanismos de acción de las sustancias radioprotectoras de origen natural, la inclusión de estilos de vida referentes a llevar una alimentación saludable rica en flavonoides puede generar un impacto positivo en la protección del colectivo basado en lo descrito en la literatura médica.



# 6. Referencias

1. Guerrero E. Manual de Salud Ocupacional Bogotá, D. C.: Manual Moderno S. A.; 2017.
2. Ismail A, Abdulla K. Biochemical and hematological study of the effects of annual exposure radiation doses on the operators of X-ray and CT-scan in some Erbil hospitals. *Radiation Physics and Chemistry*. 2021; 184.
3. Niu S. Protección de los trabajadores frente a la radiación [Internet]. 1st ed. Organización Internacional del Trabajo 2011, editor. 2011 [cited 2021 May 28]. Available from: [www.ilo.org/safework](http://www.ilo.org/safework)
4. Taqi A, Faraj A, Zaynal S, Hameed A, Mahmood A. Effects of occupational exposure of X-Ray on hematological parameters of diagnostic technicians. *Radiation Physics and Chemistry*. 2018; 147: p. 45-52.
5. Shahid S, Chauhdry M, Mahmood N, Sheikh S. Impacts of Terrestrial Ionizing Radiation on the Hematopoietic System. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2015; 24(4): p. 1783-1794.
6. Presidencia de la República de Colombia. Decreto 1607 del 31 de julio de 2002 [Por el cual se modifica la Tabla de Clasificación de Actividades Económicas para el Sistema General de Riesgos Profesionales y se dictan otras disposiciones] [Internet]. Colombia; 2002. Available from: [https://www.minsalud.gov.co/Normatividad\\_Nuevo/DECRETO\\_1607\\_DE\\_2002.pdf](https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/DECRETO_1607_DE_2002.pdf)
7. Ministerio de la Protección Social. Decreto Ley 2090 del 28 de julio de 2003. Diario Oficial No. 45.262 [Por el cual se definen las actividades de alto riesgo para la salud del trabajador y se modifican y señalan las condiciones, requisitos y beneficios del régimen de pensiones de los...] [cited 2021 Jun 13]. p. 2. Available from: <https://www.minsalud.gov.co/>

- sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Decreto-2090-2003.pdf
8. Jaramillo C, Zapata N, Garzón M. Exposición ocupacional de pilotos y radiólogos-técnicos de imágenes a radiaciones ionizantes y su clasificación en la legislación colombiana dentro del sistema de riesgos laborales. Medellín, 2014 [Internet]. [Medellín, Colombia]: Universidad CES; 2014 [cited 2021 Jun 13]. Available from: <http://bdigital.ces.edu.co:8080/repositorio/handle/10946/3796>
  9. López X. Hematopoyesis. En Ruiz-Argüelles G, Ruiz-Delgado G. Fundamentos de Hematología. México, D. F.: Editorial Médica Panamericana; 2014. p. 3-12.
  10. Burgio E, Piscitelli P, Migliore L. Ionizing Radiation and Human Health: Reviewing Models of Exposure and Mechanisms of Cellular Damage. An Epigenetic Perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(9).
  11. Henry E, Arcangeli M. How Hematopoietic Stem Cells Respond to Irradiation: Similarities and Differences between Low and High Doses of Ionizing Radiations. *Experimental Hematology*. 2021;(94): p. 11-19.
  12. Gao J, Dong X, Liu T, Zhang L, Ao L. Antioxidant status and cytogenetic damage in hospital workers occupationally exposed to low dose ionizing radiation. *Mutation Research*. 2020; p. 850-851.
  13. Lumniczky K, Impens N, Armengol G, Candéias S, Georgakilas A, Hornhardt S. Low dose ionizing radiation effects on the immune system. *Environment International*. 2021; 149.
  14. Akleyev A, Blinova E, Dolgushin I. Immunological status of chronically exposed persons with increa-

- sed level of TCR mutations. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2019; 58: p. 81-88.
15. Kiselev S, Sokolnikov M, Lyss L, Ilyina N. Immunological monitoring of the personnel at radiation hazardous facilities. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017; 173: p. 124-130.
  16. Romero H, Caraballo A. Hematología práctica. In: Publicaciones de la U de los Andes, editor. 2o Edición. Mérida, Venezuela; 2019. Available from: [https://www.svmi.web.ve/wh/documentos/Hematolog\\_Pract.pdf](https://www.svmi.web.ve/wh/documentos/Hematolog_Pract.pdf)
  17. Provan D, Baglin T, Dokal I, Vos J. Enfoque clínico. En Provan D, Baglin T, Dokal I, Vos J. *Manual de hematología clínica*. Barcelona: Elsevier; 2017. p. 1-30.
  18. Mu H, Sun J, Li L, Yin J, Hu N, Zhao W, et al. Ionizing radiation exposure: hazards, prevention, and biomarker screening. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018; 25(16): p. 15294-15306.
  19. Occupational Safety and Health Administration [OSHA]. Ionizing Radiation. Control and Prevention | Occupational Safety and Health Administration. [Internet].; s.f. [consultado 2021 Jun 7]. Disponible en: <https://www.osha.gov/ionizing-radiation/control-prevention> <https://www.osha.gov/ionizing-radiation/control-prevention>.
  20. Ortiz P, Dauer L, Loose R, Martin C, Miller D, Vañó E, et al. ICRP Publication 139: Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures. *Ann ICRP*. 2018; 47(2): p. 1-118.
  21. Rodríguez Y. Manual de Protección Radiológica Subred Integrada De Servicios De Salud Sur E.S.E. [Internet]. Bogotá D.C.: 2017 [revised 2017; cited 2021 Jun 13]. Available from: [77](https://www.subred-sur.gov.co/sites/default/files/planeacion/EA-ADI-</a></li></ol></div><div data-bbox=)

- MA-05%20V2%20MANUAL%20DE%20PROTECCION%20RADIOLOGICA.pdf
22. Ministro de Minas y Energía. Resolución 18-1434 del 5 de diciembre de 2002 [Por la cual se adopta el Reglamento de Protección y Seguridad Radiológica]. Bogotá D.C: Ministerio De Minas Y Energía; 2002. Available from: [https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion\\_minminas\\_181434\\_2002.htm](https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minminas_181434_2002.htm)
  23. Cherry N. Radiaciones ionizantes. En Chantal B. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Madrid; 1998.
  24. Sánchez J. Un análisis sobre la aplicación en Colombia de las vacaciones profilácticas de los trabajadores ocupacionalmente expuestos a radiaciones ionizantes [Internet]. Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia - RIUCaC. [Bogotá D.C]: Universidad Católica de Colombia; 2017 [cited 2021 Jun 13]. Available from: <http://hdl.handle.net/10983/15907>
  25. Zelaya P, Herrera J, Molina R, Maldonado A, Flores L, Stolavas N, Tomasina F. Guía sobre vigilancia de la salud de las personas ocupacionalmente expuestas a las radiaciones Ionizantes. [Internet]. Uruguay: Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay; 2014 [revised 2014; cited 2021 Jun 13]. Available from: <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/comunicacion/publicaciones/guia-sobre-vigilancia-salud-trabajadores-ocupacionalmente-expuestos>
  26. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo [INSST]. Hematología laboral. En Servicio de Ediciones y Publicaciones del INSST. Madrid: Enciclopedia práctica de Medicina del Trabajo; 2019. p. 1572-1577.

27. García F, Fernández M, Castell R, Valls A. Protocolos de vigilancia sanitaria específica: radiaciones ionizantes. [Internet]. Madrid, España; 2004 [cited 2021 Jun 13]. Available from: <https://www.saludcastillayleon.es/institucion/es/publicaciones-consejeria/buscador/protocolos-vigilancia-sanitaria-especifica-radiaciones-ioni.ficheros/327930-Ionizantes.pdf>
28. Zeegers D, Venkatesan S, Koh S, Low G, Srivastava P, Sundaram N, et al. Biomarkers of Ionizing Radiation Exposure: A Multiparametric Approach. *Genome Integrity*. 2017; 23.
29. Arango S. Biomarcadores para la evaluación de riesgo en la salud humana. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*. 2011; 30(1): p. 75-82.
30. Pernot E, Hall J, Baatout S, Benotmane M, Blanchardon E, Bouffler S, et al. Ionizing radiation biomarkers for potential use in epidemiological studies. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*. 2012; 751(2): p. 258-286.
31. Monteiro O, Martins J, Rosário P. Use of biological dosimetry to confirm radiation exposure: Case study. *Radiation Physics and Chemistry*. 2020; 171.
32. Presidencia de la República de Colombia. Decreto 2663 del 5 de agosto de 1950 [Adoptado por el Decreto Ley 2663 del 5 de agosto de 1950 “Sobre Código Sustantivo del Trabajo”, en virtud del Estado de Sitio promulgado por el Decreto Extraordinario No 3518 de 1949]. Available from: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=33104>
33. Dowlath MJH, Karuppannan SK, Sinha P, Dowlath NS, Arunachalam KD, Ravindran B, et al. Effects of radiation and role of plants in radioprotection: A



- critical review. Vol. 779, *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V.; 2021. p. 146431.
34. Fischer N, Seo EJ, Efferth T. Prevention from radiation damage by natural products. Vol. 47, *Phytomedicine*. Elsevier GmbH; 2018. p. 192-200.
  35. Comisión Internacional de Protección Radiológica [ICRP]. Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica. [Internet]. 2007 [cited 2021 Jun 13]. Available from: [https://www.icrp.org/docs/P103\\_Spanish.pdf](https://www.icrp.org/docs/P103_Spanish.pdf)
  36. Hauptmann M, Daniels R, Cardis E, Cullings H, Kendall G, Laurier D, et al. Epidemiological Studies of Low-Dose Ionizing Radiation and Cancer: Summary Bias Assessment and Meta-Analysis. *Journal of the National Cancer Institute Monographs*. 2020;(56): p. 188-200.
  37. Bhatt A, Ganatra A, Kotecha K. COVID-19 pulmonary consolidations detection in chest X-ray using progressive resizing and transfer learning techniques. *Heliyon*. 2021; 7(6).

# Investigaciones en salud y trabajo

---

Facultad de Medicina

Año 1, julio-septiembre 2022, ISSN: 2954-6044

---

Grupo de investigación Salud, Ser Humano y Trabajo

---

## n.º 3

# Exposición ocupacional a radiaciones ionizantes y alteraciones hematológicas

Fue editado y publicado por la Editorial Universidad El Bosque  
Septiembre de 2022  
Bogotá, Colombia

---

Para esta edición, se usaron las familias tipográficas:  
Ancizar Serif de 10 a 50 puntos.  
El formato de este ejemplar es de 14,5 x 21 cm.

