

**Informe del desarrollo y conclusiones de la**  
***Conferencia Internacional***  
**sobre**  
***Protección Radiológica Ocupacional:***  
***Fortalecimiento de la protección radiológica de los trabajadores-***  
***Veinte años de progreso y el camino a seguir***

y anexo con la presentación principal de apertura sobre el tema:  
***Protección de los Trabajadores contra***  
***Exposiciones Ocupacionales a la Radiación Ionizante:***  
***Génesis, Evolución, Consolidación y Desafíos***

**Abel Julio GONZÁLEZ**

Académico Titular de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires

## **I. INTRODUCCIÓN**

La *Conferencia internacional sobre protección radiológica ocupacional: Fortalecimiento de la protección radiológica de los trabajadores: veinte años de progreso y el camino a seguir*, se llevó a cabo en el Centro Internacional de Conferencias de Ginebra, Suiza, del 5 al 9 de septiembre de 2022. La conferencia fue organizada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) con el copatrocinio de la Organización internacional de Trabajo (OIT), y fue acogida por el Gobierno de Suiza y se llevo a cabo en cooperación con otras organizaciones internacionales. La presentación de apertura estuvo a cargo del autor y verso sobre el tema *Protección de los Trabajadores contra Exposiciones Ocupacionales a la Radiación Ionizante: Génesis, Evolución, Consolidación y Desafíos*

## **II. ANTECEDENTES**

La Conferencia fue precedida por otras dos conferencias internacionales sobre protección radiológica ocupacional.

La primera Conferencia sobre este tema fue la *Conferencia internacional sobre protección radiológica ocupacional: protección de los trabajadores contra la exposición a la radiación ionizante*, la que se celebró en Ginebra, Suiza, del 26 al 30 de agosto de 2002. Fue anfitrión el Gobierno de Suiza y organizada por la Internacional Organismo de Energía Atómica (OIEA), y fue convocado conjuntamente con la Organización

Internacional del Trabajo (OIT). La conferencia fue copatrocinada por la Comisión Europea (CE) y se llevó a cabo en cooperación con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Agencia de Energía Nuclear de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD/NEA), la Organización Científica de las Naciones Unidas Comité sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) y otras organizaciones internacionales. La conferencia reunió a 324 delegados de 70 Estados miembros y 13 organizaciones internacionales.

El autor presentó la memoria de apertura de esta primera Conferencia<sup>1</sup> y una memoria conjunta sobre el trabajo de UNSCEAR en el tema ocupacional<sup>2</sup>. Las recomendaciones y conclusiones de esta primera conferencia dieron como resultado un plan de acción internacional sobre protección radiológica ocupacional que ha estado acelerando y orientando los esfuerzos internacionales para mejorar la protección radiológica ocupacional en todo el mundo. Si bien la conferencia de Ginebra proporcionó un aporte internacional muy amplio sobre el estado de la protección radiológica ocupacional en ese momento, se destacó mucho trabajo como áreas prioritarias restantes y se abordaron desafíos específicos en el lugar de trabajo en las áreas de medicina, material radiactivo natural (NORM) y la industria nuclear en general, donde se necesita la atención de la comunidad internacional.

La segunda conferencia internacional tuvo como título ***Protección radiológica ocupacional: mejora de la protección de los trabajadores: brechas, desafíos y novedades***. Fue celebrada en la sede del OIEA en Viena (Austria), del 1 al 5 de diciembre de 2014, y estuvo dedicada a la mejora de la protección radiológica de los trabajadores en todo el mundo. La conferencia fue organizada por el OIEA y copatrocinada por la OIT, en cooperación con 15 organizaciones, incluidas la CE, la OMS, la AEN/OCDE, el UNSCEAR y otras organizaciones internacionales. La conferencia reunió a 471 delegados de 79 Estados miembros y 21

---

<sup>1</sup> Abel J. González. **Occupational Radiation Protection: IAEA functions and policies**. In Occupational Radiation Protection: Protecting Workers against Exposure to Ionizing Radiation, Proceedings of the International Conference organized by the International Atomic Energy Agency ... [et al] and held in Geneva, 26–30 August 2002. Proceedings series, ISSN 0074–1884, STI/PUB/1145, ISBN–92–0–105603–6, Pages 33-49, International Atomic Energy Agency, Vienna (issued 2003). 2002.

<sup>2</sup> Abel J. González and Norman Gentner. **UNSCEAR's Contribution to Occupational Radiation Protection** In Occupational Radiation Protection: Protecting Workers against Exposure to Ionizing Radiation, Proceedings of the International Conference organized by the International Atomic Energy Agency ... [et al] and held in Geneva, 26–30 August 2002. Proceedings series, ISSN 0074–1884, STI/PUB/1145, ISBN–92–0–105603–6, Pages 69-86, International Atomic Energy Agency, Vienna (issued 2003). 2002.

organizaciones internacionales. Expertos en protección radiológica y especialidades asociadas de todo el mundo revisaron los avances que habían tenido lugar durante el período de doce años desde la conferencia de Ginebra en 2002 e intercambiaron información y experiencia en el campo de la protección radiológica ocupacional con el objetivo de mejorar la protección de los trabajadores. El autor presidió la sesión sobre *Protección radiológica ocupacional en emergencias y situaciones de exposición existentes (post-accidente)*.<sup>3</sup> El principal resultado de la segunda conferencia fue una ***llamada a la acción sobre protección radiológica ocupacional***, que comprendió nueve áreas clave, incluidas: la implementación de las normas de seguridad existentes, el fortalecimiento de la asistencia a los países con programas menos desarrollados para la protección radiológica ocupacional, la mejora de la cultura de seguridad entre los trabajadores expuestos, y convocó un foro internacional para el intercambio de información.

### III. OBJETIVOS

La tercera Conferencia, que ocupa este informe, se focalizó en el análisis crítico de los pasados veinte años de progreso y en discutir el camino a seguir para resolver los desafíos remanentes. La Conferencia tuvo los siguientes objetivos:

- intercambiar información y experiencia en el campo de la protección radiológica ocupacional;
- revisar los avances, desafíos y oportunidades técnicas y regulatorias desde la última conferencia sobre el tema organizada en 2014;
- revisar la situación mundial sobre la protección radiológica de los trabajadores;
- identificar acciones prioritarias y necesidades futuras; y,
- formular conclusiones y recomendaciones.

El objetivo final fue identificar propuestas de acciones que conduzcan a un mejor sistema global de protección radiológica ocupacional.

### IV. PERSPECTIVAS

Es de hacer notar que el uso cada vez mayor de procedimientos médicos que utilizan radiación ionizante y un mejor acceso a esta

---

<sup>3</sup> International Atomic Energy Agency. *Occupational radiation protection: enhancing the protection of workers : gaps, challenges and developments*. Proceedings series (International Atomic Energy Agency), ISSN 0074-1884. IAEAL 22-01507. ISBN 978-92-0-122522-1 (paperback : alk. paper). ISBN 978-92-0-122422-4 (pdf). UDC 614.8.086.5. STI/PUB/2004. International Atomic Energy Agency, Vienna 2022.

tecnología de la salud dieron como resultado un rápido aumento en el número de trabajadores de la medicina expuestos ocupacionalmente a lo largo de los años. Puede ocurrir una exposición ocupacional sustancial en ciertos procedimientos médicos. Es un desafío continuo, en particular para el control de la exposición y la capacitación de los profesionales de la salud en temas de protección radiológica.

Por otra parte, la energía nuclear se utiliza en muchos países para satisfacer el rápido aumento de la demanda de energía. La introducción de plantas de energía nuclear (NPP) en los llamados países de embarque nuclear y los diseños de nuevos tipos de reactores nucleares han dado lugar a nuevos desafíos para la protección radiológica ocupacional. Dado que muchos reactores nucleares llegan al final de su vida útil, la protección radiológica durante las actividades de clausura ha aumentado y afecta a la protección radiológica de los trabajadores.

Finalmente, existe una conciencia cada vez mayor de la necesidad de proteger a los trabajadores en las industrias que involucran materiales radiactivos de origen natural (NORM) y de aplicar un enfoque graduado por parte de los reguladores y los recursos de los operadores para la gestión de la protección de los trabajadores. Es necesario el intercambio de experiencias para establecer los requisitos reglamentarios para la protección radiológica en procesos industriales que involucran NORM. La regulación y gestión de la exposición al radón en los lugares de trabajo también es un tema importante.

Esta situaciones hace que haya nuevos desafíos para la protección radiológica ocupacional, incluyendo los siguientes:

- El principio básico que dice que la protección radiológica debe ser optimizada es un tema clave para la protección radiológica ocupacional. Se han establecido sistemas de información (como el *Sistema de Información sobre Exposición Ocupacional* (ISOE), patrocinado conjuntamente por la NEA de la OCDE y el OIEA, y el *Sistema de Información del OIEA sobre Exposición Ocupacional en Medicina, Industria e Investigación* (ISEMIR), y redes como la Red de Protección Radiológica Ocupacional (ORPNET) la que promueve específicamente la optimización de la protección radiológica ocupacional. Estas iniciativas están destinados a facilitar el intercambio de experiencias sobre optimización en la industria nuclear, la radiografía industrial y la cardiología intervencionista. Se espera que la Conferencia ayude a promover la extensión de dichos enfoques a algunos otros sectores, como los procesos industriales que involucran NORM. Los hallazgos y observaciones de las

revisiones por pares de la protección radiológica ocupacional en varios países han indicado que dichas revisiones tienen un impacto positivo en la implementación de la optimización en algunas de las instalaciones.

- La creación de capacidad de los servicios técnicos en protección radiológica y la participación de las partes interesadas, incluidos los reguladores, los representantes de las organizaciones de trabajadores y de empleadores, son esenciales para la toma de decisiones sobre protección radiológica ocupacional en los países en desarrollo.
- Con la publicación del informe conjunto de la Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU) y la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP), denominado Informe ICRU 95, sobre las magnitudes operativas para la exposición a la radiación externa, es necesario reevaluar el impacto en las técnicas existentes de monitoreo de radiación.
- La experiencia y los comentarios que surjan de la implementación de las *Normas básicas internacionales de seguridad* son importantes para la armonización y la futura revisión de las normas. En particular, la reducción del límite de dosis para el cristalino del ojo ha presentado desafíos prácticos en la implementación y el cumplimiento, que se discutieron en la Conferencia. Se debe promover el desarrollo continuo de una cultura de seguridad para prevenir incidentes/accidentes.

## V. TEMAS Y TÓPICOS

Con estos temas en mente, y considerando las tendencias y desarrollos actuales, la conferencia se focalizó en los siguientes temas y tópicos:

- Revisión de las normas y recomendaciones internacionales sobre protección radiológica ocupacional, avances en los últimos veinte años y desafíos existentes
- Efectos de la radiación y riesgos para la salud derivados de la exposición a la radiación en el lugar de trabajo
- Vigilancia y evaluación de la dosis de las exposiciones ocupacionales a la radiación
- Protección radiológica ocupacional en medicina
- Protección radiológica ocupacional en los lugares de trabajo que implican exposición a material radiactivo natural, radón y rayos cósmicos
- Protección radiológica ocupacional en instalaciones industriales, de investigación y educativas

- Protección radiológica ocupacional en centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible nuclear
- Protección radiológica ocupacional en situaciones de exposición de emergencia y períodos de transición posteriores
- Protección radiológica de los trabajadores en casos especiales (trabajadores itinerantes, aprendices, trabajadoras)
- Optimización en protección radiológica ocupacional
- Proveedores de servicios técnicos en protección radiológica ocupacional
- Educación y formación en protección radiológica ocupacional
- Vigilancia de la salud; probabilidad de causalidad del daño ocupacional atribuible a la exposición a la radiación; compensación
- Redes de protección radiológica ocupacional
- Sistemas de gestión
- Niveles de exposición ocupacional y registros de dosis
- Cultura de seguridad en protección radiológica ocupacional

Finalmente, la Conferencia ofreció una oportunidad a las partes interesadas involucradas en la implementación, gestión y/o desarrollo de políticas de protección radiológica ocupacional para compartir y discutir experiencias. Los participantes en la conferencia incluirán representantes de organismos reguladores, trabajadores y empleadores involucrados en el uso de fuentes de radiación y en la operación de instalaciones que contienen o manejan materiales radiactivos, incluidos NORM, expertos en protección radiológica, investigadores, personal de proveedores de servicios técnicos de protección radiológica ocupacional. y fabricantes de aparatos emisores de radiación y otras fuentes de radiación. Los representantes de las organizaciones de trabajadores y de empleadores, los trabajadores de emergencia/organizaciones de respuesta a emergencias, así como otras partes interesadas, también encontrarían interesante esta Conferencia.

## **VI. ESTRUCTURA**

Sobre esta base, la estructura de la Conferencia fue la siguiente:

- La sesión de apertura incluyó discursos de bienvenida de representantes del OIEA, el Gobierno de Suiza, la OIT como copatrocinador de la conferencia y el Presidente de la Conferencia.
- La sesión de apertura se complementó con una presentación principal a cargo del autor, la que se describe abajo.

- La sesión de apertura fue seguida por una sesión informativa en la que participaron organizaciones internacionales que han colaborado desde la última conferencia internacional.
- Una serie de sesiones temáticas cubrirán áreas seleccionadas de protección radiológica ocupacional. El tema de cada sesión fue presentado por un presidente, seguido de presentaciones invitadas y un resumen de los documentos aportados relacionados con la sesión presentados por un relator. Cada sesión temática concluyó con una discusión plenaria.
- Se incluyeron sesiones de posters en el programa, las que fomentaron el debate.
- Hubo varias mesas redondas dedicadas a identificar recomendaciones para acciones futuras. Después de una introducción del tema por parte del presidente, los miembros del panel hicieron breves declaraciones seguidas de una discusión plenaria con la participación de la audiencia.
- Finalmente, durante la sesión de clausura, los presidentes de las sesiones temáticas y las mesas redondas entregaron sus resúmenes y el presidente de la conferencia presentará los hallazgos, conclusiones y recomendaciones de la conferencia sobre el camino a seguir.
- Durante la conferencia, una exposición comercial permitirá a los proveedores presentar su experiencia y desarrollos recientes en protección radiológica ocupacional.

## VII. CONCLUSIONES

Desde el comienzo la Conferencia se enfocó en tres preguntas esenciales:

- ¿Cuáles son los avances, desafíos y oportunidades técnicas y regulatorias desde la última conferencia sobre el tema organizada en 2014?
- En general, y en particular, ¿cuál es la situación mundial sobre la protección radiológica de los trabajadores?
- ¿Cuál es la dirección prevista en el futuro que requiere la priorización de acciones?

Durante la Conferencia, hubo una variedad de respuestas a estas preguntas con la intención de cerrar las brechas y resolver los desafíos en la protección radiológica ocupacional. Las contribuciones al debate generaron ideas y recomendaciones sobre cómo mejorar la protección de los trabajadores aprovechando el impulso de la Conferencia.

Las Normas de protección radiológica desarrolladas a nivel internacional son marcos maduros y generalmente satisfactorios para el control, seguimiento y registro de las exposiciones ocupacionales. Esto se puede observar en misiones de revisión como las del *Servicio de evaluación de la protección radiológica ocupacional* (ORPAS) proporcionado por el OIEA.

Como se destacó durante la segunda conferencia internacional sobre, los cambios en los estándares solo deben realizarse cuando sea necesario para reflejar una mejor comprensión científica de los efectos de la exposición a la radiación ionizante o para llenar vacíos, mejorar la claridad, facilitar la aplicación o garantizar el nivel necesario de protección se cumple.

El informe ICRU-95 sobre las nuevas magnitudes operativas refleja esta comprensión científica mejorada de la radiación ionizante. Además, la iniciativa lanzada recientemente por la ICRP para revisar el Sistema de Protección Radiológica que actualizará las Recomendaciones Generales de 2007 de la Publicación 103 de ICRP, será muy relevante para la comunidad de la protección radiológica ocupacional. Los cambios injustificados pueden tener efectos secundarios inesperados y negativos y pueden socavar la confianza en el sistema de protección radiológica. La atención continua al desarrollo de la base ética para la protección radiológica ayudará a su aplicación más consistente, una mejor comprensión y una mejor comunicación.

Se observó la necesidad de claridad de la comunidad al proporcionar ejemplos de algunas áreas en las que la implementación de estándares de seguridad ha generado desafíos en los Estados miembros: por ejemplo,

- la identificación de los requisitos con respecto a una de las tres situaciones de exposición y las tres categorías de exposición;
- la implementación de los principios de justificación y optimización;
- y,
- la necesidad de estrategias de protección más consistentes para las situaciones de exposición existentes.

La conclusión es que el marco de seguridad internacional para proteger a los trabajadores está bien establecido y es eficaz, pero las decisiones sobre la optimización de la protección y la seguridad se centran demasiado en la reducción de la dosis y es necesario un enfoque más holístico que equilibre todos los beneficios frente a los riesgos. Es evidente que la protección radiológica debería ser una parte integral de la protección general de la salud y la seguridad de los trabajadores y de los sistemas de regulación y gestión de la seguridad en el lugar de trabajo. En algunos

entornos, la protección radiológica puede tener una importancia secundaria o terciaria. Por lo tanto, la aplicación de medidas de protección radiológica, incluida la aplicación de la optimización, debe examinarse en el contexto de la totalidad de los riesgos laborales, logrando así la mayor ganancia en la protección de los trabajadores. Se necesita un enfoque más holístico que reconozca y proteja adecuadamente contra esta amplia gama de peligros.

La exposición a la radiación natural es una característica ineludible y normal de la vida; sin embargo, el enfoque internacional para gestionar las exposiciones a la radiación en operaciones y procesos industriales que involucran materiales radioactivos naturales (NORM) es actualmente inconsistente e innecesariamente compleja. Este es uno de los principales hallazgos de la Conferencia Internacional sobre Seguridad Radiológica de 2020 organizada por el OIEA. Esta conferencia ha dejado en claro que los conceptos de exención y autorización son parte del enfoque graduado que juega un papel indirecto pero crucial para la protección de los trabajadores debido al enfoque de normativa internacional.

Se mostró un consenso sobre que existe una clara necesidad de fortalecer la aplicación del enfoque graduado a través de procesos de optimización que ahora está ganando más interés a través de la implementación de tecnologías innovadoras. En la energía nuclear, la industria se beneficia de la inteligencia artificial en áreas como la automatización, la optimización del diseño, el análisis de datos, la predicción y el pronóstico, y la extracción de conocimientos. Los esfuerzos en curso se centran en la transferencia de tecnologías de inteligencia artificial de estudios piloto a aplicaciones más amplias. Con respecto a la protección radiológica ocupacional, se espera que las aplicaciones de inteligencia artificial y su integración en los procesos de control y seguimiento, como la dosimetría individual para la exposición externa, produzcan resultados más rápidos y más flexibles y procesos más eficientes con potencial para una profunda transformación tecnológica en el campo. Como tal, la inteligencia artificial permite la emulación de la cognición humana en el análisis, la interpretación y la comprensión de procesos de trabajo complicados, incluida la exposición a la radiación.

Finalmente, se concluyó que se había aprendido mucho de la pandemia global y la Conferencia dio la oportunidad de compartir la experiencia de los profesionales. El brote mundial de Covid-19 paralizó el mundo, introduciendo nuevos desafíos que enfrentan los servicios técnicos en protección y seguridad radiológica. Los proveedores de servicios técnicos, como los servicios de calibración y monitoreo individual, se vieron afectados a pesar de la necesidad continua de monitorear a los trabajadores

ocupacionalmente expuestos en ciertos sectores. Por ejemplo, en el cuidado de la salud, los servicios se enfrentaron a una demanda de monitoreo de trabajadores que no estaban expuestos regularmente a la radiación durante el curso de su trabajo, períodos de monitoreo más prolongados y cómo estos cambios en el monitoreo impactan en la evaluación de la dosis. Sin embargo, la Conferencia demostró que se maneja la situación de una manera muy aceptable.

La Conferencia concluyó con un Llamado a la Acción 2022.

## **VIII. LLAMADO A LA ACCIÓN 2022**

Sobre la base de las conclusiones de la segunda Conferencia en Viena en 2014, se habían identificado nueve elementos de acción y cada uno de ellos se elaboró con éxito durante los años siguientes. De manera similar, la conferencia de Ginebra de 2022 identificó una serie de acciones deseables para mejorar la protección de los trabajadores, que incluyen:

- Implementar las normas internacionales de seguridad existentes y el Convenio sobre protección radiológica de la OIT (núm. 115) para mejorar la protección radiológica de los trabajadores y apoyar a los Estados miembros con programas desarrollados para la protección radiológica ocupacional en la aplicación práctica de las normas internacionales de seguridad.
- Ayudar a los Estados miembros en la optimización de la protección y la seguridad y el uso de un enfoque holístico para la protección de los trabajadores teniendo en cuenta los peligros radiológicos y no radiológicos.
- Aplicar el enfoque graduado de la normativa internacional en la protección de los trabajadores contra exposiciones debidas a niveles elevados de fuentes naturales de radiación, como el radón en los lugares de trabajo, la aviación civil, la minería y las industrias de procesamiento de materias primas.
- Desarrollar e implementar guías internacionales de seguridad para actividades con desafíos en protección radiológica ocupacional.
- Continuar promoviendo el intercambio de experiencias operativas y la aplicación de tecnologías innovadoras en protección radiológica ocupacional a través de diferentes enfoques, incluida la creación de redes.
- Fortalecer el desarrollo de capacidades en monitoreo y evaluación de la exposición ocupacional y promover el establecimiento de un registro nacional de dosis.
- Mejorar la capacitación y la educación en protección radiológica ocupacional para proporcionar a los oficiales de protección

radiológica y a los trabajadores ocupacionalmente expuestos los conocimientos y habilidades necesarios, incluida la capacitación periódica de actualización.

- Mejorar el compromiso con la cultura de seguridad en los niveles gerenciales y promover la cultura de seguridad entre los trabajadores a través de la divulgación y la educación.
- Apoyar el desarrollo de jóvenes profesionales en el área de la protección radiológica a través de la información, la comunicación, la creación de redes, la capacitación, la educación, la investigación, la experiencia práctica y la participación en reuniones y conferencias técnicas.

Han pasado 20 años desde la primera conferencia internacional sobre protección radiológica ocupacional. La experiencia adquirida después de dos décadas ha sido valiosa y ha confirmado la aplicación exitosa del marco de seguridad para proteger a los trabajadores de las radiaciones ionizantes. Esta es una historia de éxito para la protección de los trabajadores.

Se espera que el OIEA publique en los próximos meses las memorias de la Conferencia y sus conclusiones finales.

El adjunto es un resumen de la presentación principal de la sesión de apertura de la Conferencia, la que estuvo a cargo de la ARN.

# **Protección de los Trabajadores contra Exposiciones Ocupacionales a la Radiación Ionizante: Génesis, Evolución, Consolidación y Desafíos**

**Abel Julio GONZÁLEZ**

Académico pleno de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires

## **I. INTRODUCCIÓN**

La protección de los trabajadores contra los efectos perjudiciales que se pueden derivar del trabajo con radiaciones ionizantes o sustancias radioactivas es la disciplina que se conoce generalmente como *protección radiológica ocupacional*. Se trata de uno de los sistemas de seguridad laboral más elaborado y exitoso. El sistema es compuesto por un basamento científico consensuado globalmente, por un paradigma fundado en bases éticas universales y por un sistema de estándares y normas establecidas por las organizaciones internacionales e intergubernamentales competentes, fundamentalmente por la Organización Internacional del Trabajo (OIT) bajo la égida del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). El objetivo de esta memoria es presentar: su génesis, es decir su origen y modo de formación; su evolución, es decir su desarrollo gradual; su consolidación, es decir el proceso de combinar sus elementos en un todo efectivo y coherente; y, también, los desafíos futuros.

## **II. GÉNESIS**

### **La Organización Internacional del Trabajo (OIT)**

El origen de la *protección ocupacional*, es decir de la protección de los trabajadores contra elementos dañinos a su salud que pudiesen encontrar en sus trabajos, nace con la creación de la Organización Internacional del Trabajo (OIT), una organización única dentro del sistema de la Organización de las Naciones Unidas ONU. Es la única organización del sistema que no es absolutamente gubernamental sino que los gobiernos comparten su gestión con representantes de los trabajadores y los empleadores. Es decir, es la única organización del sistema de la ONU de características 'tripartita', la que reúne a gobiernos, empleadores y trabajadores de 187 Estados miembros a fin de establecer las normas ocupacionales, formular políticas y elaborar programas promoviendo el trabajo digno para todos, mujeres y hombres.

La OIT fue creada en 1919, como parte del Tratado de Versalles que terminó con la Primera Guerra Mundial, y reflejó la convicción de que la justicia social es esencial para alcanzar una paz universal y permanente. Su Constitución fue elaborada entre enero y abril de 1919 por una Comisión del Trabajo establecida por la Conferencia de Paz, que se reunió por primera vez en París y luego en Versalles. La Comisión fue presidida por el presidente de la Federación Estadounidense del Trabajo (AFL), y estaba compuesta por representantes de nueve países: Bélgica, Cuba, Checoslovaquia, Francia, Italia, Japón, Polonia, Reino Unido y Estados Unidos (ver Figura 1).



**Figura 1: La OIT fue creada en 1919, como parte del Tratado de Versalles.**

Pero el origen de la *protección radiológica ocupacional* hay que buscarlo en el origen de la disciplina que hoy se denomina *protección radiológica* sin otro calificativo, la que comenzó sin embargo limitada a lo ocupacional, es decir a un objetivo de protección laboral, y además limitada a situaciones planificadas. Estos comienzos tempranos han sido documentados por las autoridades pretéritas de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)<sup>4,5</sup>, un actor clave en esa génesis: y, más recientemente, en la Enciclopedia de la Energía Nuclear<sup>6</sup>.

## **El descubrimiento de la radiación ionizante y la radioactividad**

---

<sup>4</sup> R.H. Clarke and J.Valentin, 2008. The History of ICRP and the Evolution of its Policies. ICRP Publication 109. Annañs of ICRP. Elsevier Ltd

<sup>5</sup> Lindell, B., 1996a. The history of radiation protection. Rad. Prot. Dosim. 68, 83–95.

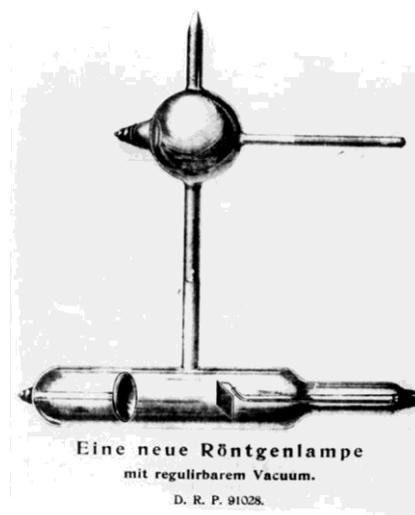
<sup>6</sup> DiGregorio, 2021. Discovery of Radioactivity. In Enciclopedia of Nuclear Energy. Elsevier

El descubrimiento de los rayos X por Wilhelm Röntgen en noviembre de 1895<sup>7</sup> (ver Figura 2), marcaría el inicio de la utilización de las radiaciones ionizantes y de los desafíos de protección ocupacional que este uso conllevaría. Además daría lugar a la disciplina de la radiología y de la profesión de radiólogo.



**Figura 2: Wilhelm Röntgen descubrió la radiación ionizante que denominó 'rayos x' en noviembre de 1895. La primera imagen de rayos x fue de la mano de la esposa de Röntgen**

Pocos meses después, el 21 de marzo de 1896, el primer tubo de rayos X fue patentado por la empresa Siemens, pionero en tiempo récord. (Ver Figura 3).



---

<sup>7</sup> Röntgen, W.C., 1895. Über eine neue Art von Strahlen. Sitzungsberichte d. Phys. Mediz. Ges. Würzburg

Figura 3: El primer tubo de rayos X fue patentado pocos meses después del descubrimiento.

Apenas un año después, Henri Becquerel constató una propiedad del uranio, que pasaría a conocerse como '*radiactividad*'<sup>8</sup> (ver Figura 4).

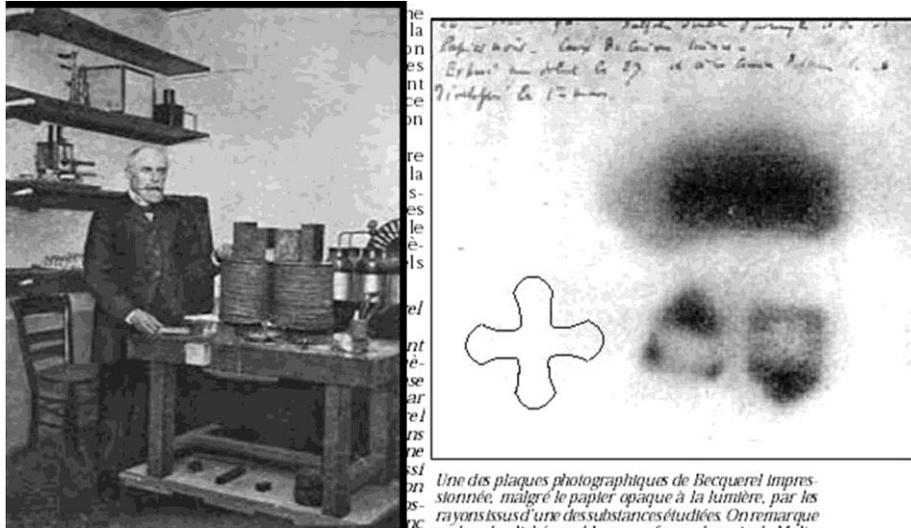


Figure 4: En 1896 Henri Becquerel constata la propiedad del uranio, que pasaría a conocerse como '*radiactividad*'.

Eventualmente la magnitud que cuantifica la radioactividad se denominaría *actividad*,  $A(t)$ , descrita como la magnitud correspondiente a una cantidad de un átomo radioactivo en un estado determinado de energía, en un tiempo dado, definida por la expresión  $A(t) = -dN/dt$ , siendo  $dN$  el valor esperado del número de transformaciones nucleares espontáneas a partir de ese estado determinado de energía, en el intervalo de tiempo  $dt$ .<sup>9</sup> La actividad ( $A(t)$ ) entonces la tasa a la que ocurren las transformaciones nucleares en un material radioactivo. En el Sistema Internacional de Unidades, la unidad de actividad es la inversa del segundo ( $s^{-1}$ ), que recibe el nombre de becquerel (Bq).

Solo dos años después del descubrimiento de la radioactividad, el 21 de diciembre de 1898, Madame Marie Skłodowska Curie descubre el radio

<sup>8</sup> Becquerel, H., 1896. Emission des radiations nouvelles par l'uranium métallique. C. R. Acad. Sci. Paris 122, 1086.

<sup>9</sup> International Atomic Energy Agency. *IEA safety glossary : terminology used in nuclear safety and radiation protection* : 2007 edition. STI/PUB/1290. ISBN 92-0-100707-8 International Atomic Energy Agency, Vienna, 2007.

(ver Figura 5). Este descubrimiento marcaría el inicio de la disciplina de la radioquímica y la profesión de radioquímica

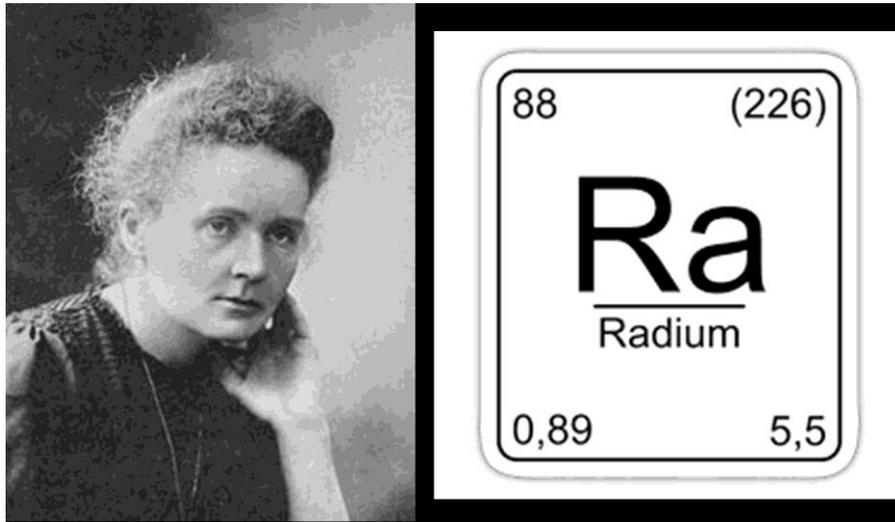


Figura 5: el 21 de diciembre de 1898, Madame Marie Skłodowska Curie descubrió el radio

### El uso de la radiación en espectáculos

Poco después de que se descubrieran estos fenómenos, su uso se expandió ampliamente. Los rayos x comenzaron a utilizarse en espectáculos circenses quizás convirtiendo a los artistas de circo en los primeros trabajadores expuestos a la radiación como resultado de su ocupación (ver Figura 6)



Figura 6: Artistas circenses, como esta 'deglutidora de sables' fueron los primeros trabajadores expuestos a las radiaciones ionizantes como resultado de su ocupación.

## La radioactividad y el agua

Al mismo tiempo, el radio comenzó a ser utilizado en una larga variedad de aplicaciones que incluyeron el uso de emanadores de agua que contenía radio, para una serie de empleos ‘terapeúticos’ (ver Figura 7). Las empresas que construían y distribuían esos productos empleaban trabajadores que seguramente recibían altas dosis de radiación.

### **RADIUM THERAPY**

The only scientific apparatus for the preparation of radio-active water in the hospital or in the patient's own home.

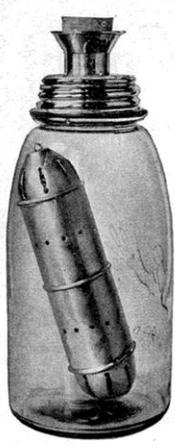
This apparatus gives a high and measured dosage of radio-active drinking water for the treatment of gout, rheumatism, arthritis, neuralgia, sciatica, tabes dorsalis, catarrh of the antrum and frontal sinus, arterio-sclerosis, diabetes and glycosuria, and nephritis, as described in Dr. Saubermann's lecture before the Roentgen Society, printed in this number of the "Archives."



#### **DESCRIPTION.**

The perforated earthenware "activator" in the glass jar contains an insoluble preparation impregnated with radium. It continuously emits radium emanation at a fixed rate, and keeps the water in the jar always charged to a fixed and measurable strength, from 5,000 to 10,000 Maché units per litre per diem.

SUPPLIED BY  
**RADIUM LIMITED,**  
93, MORTIMER STREET, LONDON, W.



## **RADIUM EMANATION WATER**

**Drives Out Uric Acid**

Suffering from too much uric acid and diseases caused by faulty elimination—**Rheumatism, Gout, Periodical Headaches, Neuralgia, Constipation, Neurasthenia, Auto-Intoxication and Lack of Bodily Vigor**—quickly relieved in a natural way without drugs or chemicals by our new discovery

**THE WAY TO MAKE  
RADIUM WATER  
IN YOUR OWN HOME**

with our Rayode. A little device containing Radium enough to supply 2,700 Maché Units of Radio-activity, in two quarts of water every twenty-four hours, for less than 10c a day. The Rayode will last a lifetime.

**SEND FOR FREE LITERATURE**

Tells how you can buy or rent a Rayode to make Radium Water in your own home, with your own ordinary drinking water. Address:

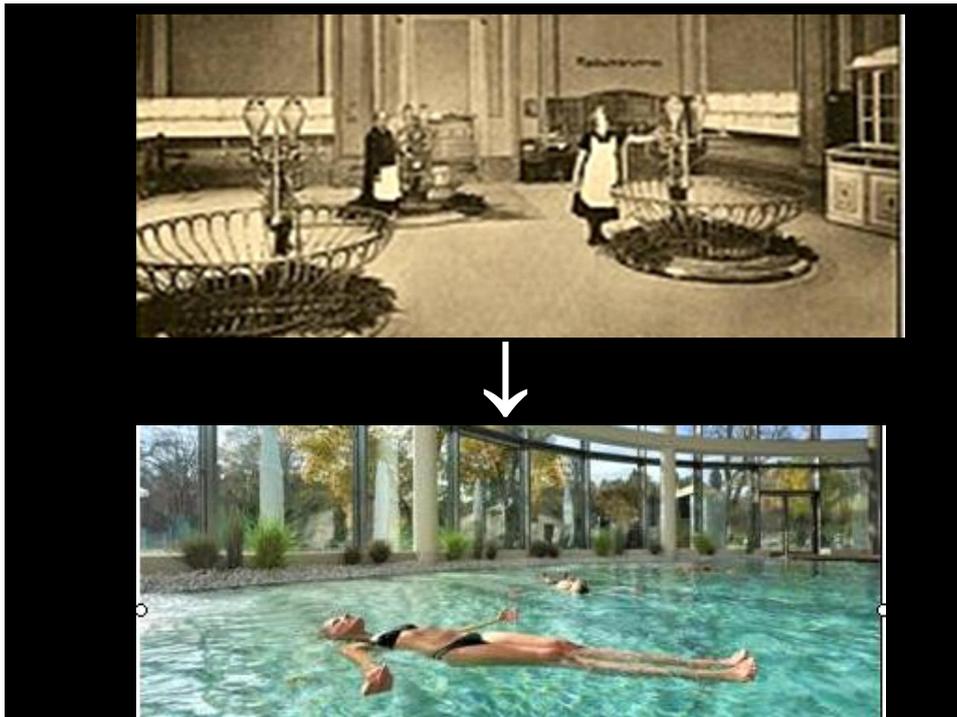
**THE COLORADO RADIUM PRODUCTS COMPANY**  
635 First National Bank Building      Denver, Colo

**Figura 7: En las primeras décadas del siglo se popularizó el uso de emanadores de agua conteniendo radio. La producción de estos aparatos seguramente ocasionó exposición a los trabajadores involucrados.**

El uso de agua con radio, y de la consecuente emanación de radón se popularizaría en los así llamados ‘spas’. ‘Spa’ es un acrónimo de la frase latina ‘salus per aquam’, es decir ‘salud mediante el agua’, el nombre del pueblo belga de Spa, donde los soldados romanos usaban fuentes termales minerales para tratar los músculos doloridos y las heridas ocasionadas en las batallas de las cohortes romanas.

Con el descubrimiento de la radioactividad, ‘spas’ radioactivos conteniendo radio se hicieron muy populares. Ya en 1924 funcionaba a pleno una ‘fontana de radio’ en el pueblo de Bad Elster, en el distrito de Vogtlandkreis, en el Estado Libre de Sajonia, en Alemania,. Se encuentra en la frontera de Baviera y la República Checa en las colinas de Elster Gebirge. A las aguas de la región se le asignaron ‘propiedades curativas’ desde 1669. Proviene de un manantial ahora conocido como Moritzquelle. Desde entonces los habitantes de Adorf y Elster y pacientes con diversos dolores acudían al manantial para tomar las aguas. Bad Elster devino con el tiempo devino en una ciudad balneario que continua hasta el presente. Se

ha desarrollado una verdadera industria dedicada al turismo y la 'salud'. Al momento existen siete clínicas especializadas en 'recuperación', con 35 establecimientos que ofrecen alojamiento con 2.400 camas. Los trabajadores que atendían a estos establecimientos obviamente reciben grandes dosis de radiación y su protección ocupacional es discutible. Es razonable preguntarse si el personal atendiendo este complejo debería considerarse ocupacionalmente expuesto. La Figura 8 muestra la evolución temporal de Bad Elster.



**Figura 8: El 'spa' de Bad Elster en 1924 y en la actualidad**

Bad Elster es solo un ejemplo de varios 'spas' de esta característica que continúan en operación. En los comienzos solo se sabía de la presencia de radio, hoy en día se conoce de la presencia de uno de los radionucleidos descendientes del radio, el gas radón. Las propiedades 'curativas' del radio se han extendido ahora al gas radón. Uno de los principales spas aún existentes es el de Bad Gastein en la región de Salzburgo en Austria.

Muchos trabajadores de estos 'spas' están expuestos a la radiación del radio y el radón causa de su ocupación. Estos trabajadores deben estar muy confundidos porque mientras los radio-proteccionistas tratan de protegerlos, la información oficial sobre Bad Gastein indica que *'El efecto de la terapia con radón en Bad Gastein ha sido científicamente probada: estimula la renovación celular y estabilizar el sistema inmunológico; alivia*

el dolor de espalda, cadera y rodilla; y también mejora enfermedades de la piel como la neurodermatitis o los síntomas asmáticos' [SIC]<sup>10</sup>

## El uso de radioactividad en cosméticos

El uso de radio también se hizo popular en la industria de la cosmética y aún en productos como los dentífricos (ver Figura 9). Poco después del descubrimiento del radio, los productos de belleza radiactivos comenzaron a poblar los estantes de los comercios especializados. Una 'crema milagrosa' fue lanzada en París, anunciada como un "producto de belleza científico", prometía mejorar la circulación, reafirmar el tejido muscular, reducir la grasa y suavizar las arrugas. Era parte de una línea de cosméticos llamada Tho-Radia, por el torio y el radio, los elementos radiactivos que contenía. Se produjo una gama completa de productos destinados a liberar los 'beneficios' de la radiactividad, incluidos lápiz labial y polvos faciales, así como ungüentos, jabones, supositorios, hojas de afeitar, bebidas energéticas e incluso condones. También pronto odontológicos y hubo implicaciones de que la energía de la radioactividad puesta en dentífricos ayudaría a tus dientes les daría una expresión radiante. Esta industria de la cosmética empleó a muchos trabajadores que se vieron expuestos a la radiación sin ninguna medida de protección. (ver Figura 9)



Figura 9: El uso de radio se hizo popular en cosméticos y aún en dentífricos

<sup>10</sup> Martin Gaisberger. Medically proven and completely natural: a stay in Gastein is a cure for body and soul. Gastein Research Institute. <https://www.gastein.com/kur/>

## Las ‘chicas del radio’

Un grupo de trabajadores que fue desvastado por la falta de medidas de protección radiológica pasó a la historia con el nombre de ‘las chicas del radio’ (ver Figura 10). Las chicas del radio fueron trabajadoras de fábricas que incorporaron grandes actividades de radio a causa de su trabajo, el que había consistido en aplicar pintura luminiscente radiactiva a esferas de relojes. Solo en 1920, se produjeron 4 millones de relojes con números luminosos que contenían radio.



27

**Figura 10: Las ‘chicas del radio’, trabajadoras de fábricas de relojes que incorporaron grandes actividades de radio mientras aplicaban pintura luminiscente radiactiva a las esferas de los relojes**

Estas trabajadoras ingirieron dosis muy altas de radio porque lamían los pinceles para dibujar las líneas finas de los relojes. Algunas también se pintaron las uñas con la pintura. Como resultado, casi todas enfermaron gravemente y muchas murieron. Aunque originalmente no se conocía la nocividad del radio, la notable acumulación de enfermedades se ignoró e incluso se ocultó durante años. Muchas de las mujeres contrajeron anemia, huesos fracturados y necrosis de la mandíbula, que más tarde se conoció como ‘mandíbula de radio’. Se cree que estudios de rayos X de médicos examinadores contribuyeron a un mayor deterioro. Varios patólogos atribuyeron las muertes de las trabajadoras a otras causas: la sífilis fue un intento para socavar la reputación de las mujeres al mismo tiempo.

## Conocimiento inicial de los efectos dañinos de la radiación

Ya en 1896, aparecieron informes sobre lo que ahora se clasificaría como una lesión por radiación ocupacional, en términos de radiodermatitis y daño por radiación en las manos y los dedos<sup>11, 12</sup> (ver Figura 11).



**Figura 11: Las lesiones debidas a la exposición ocupacional a la radiación se hicieron evidentes, en términos de radiodermatitis y daño por radiación en las manos y los dedos,**

El uso cada vez mayor de los nuevos fenómenos condujo a muchos más casos de daño por radiación ocupacional a radiólogos y radioquímicos, particularmente a aquellos que trabajaban con el peligroso radio. Sin embargo, el desconocimiento de los mecanismos que provocaban tales lesiones en ese momento hizo que la protección radiológica ocupacional fuera prácticamente inexistente y la exposición ocupacional provocó numerosas lesiones, especialmente en la manos. Por lo tanto, el cáncer de piel se describió temprano como una lesión por radiación ocupacional<sup>13</sup>. Rápidamente quedó claro que la exposición a la radiación ocupacional podría ser letal.

<sup>11</sup> Drury, H.C., 1896. Dermatitis caused by Roentgen X-rays. Br. J. Med. 2, 1377.

<sup>12</sup> Leppin, O., 1896. Aus kleine Mitteilungen. Wirkung der Ro`ntgenstrahlen auf die Haut. Dtsch. Med. Wschr. 28, 454.

<sup>13</sup> Frieben, A., 1902. Demonstration eines Cancroid des rechten Handru`ckes, das sich nach langdauernderEinwirkung von Ro`ntgenstrahlen entwickelt hat. Fortschr. Ro`ntgenstr. 6, 106–111.

El desconocimiento sobre protección radiológica en aquellos primeros tiempos era notorio: las primeras guías de protección radiológica incluían una curiosa medida de protección: recubrir la piel con vaselina y dejar una capa extra en la zona más expuesta<sup>14</sup>.

### **La protección radiológica de los radiólogos**

Pero naturalmente serían los profesionales médicos, los radiólogos, quienes dieran pasos en la dirección de lo que hoy se define como protección radiológica ocupacional. La ‘práctica’ de la radiología tuvo una gran expansión y en su afán diagnóstico y también por desconocimiento de los efectos nocivos de la radiación, los radiólogos se vieron muy expuestos (ver Figura 12) Se ha informado que varios cientos de trabajadores médicos murieron a causa del daño por radiación<sup>15</sup>.



**Figura 12: La ‘práctica’ de la radiología tuvo una gran expansión y los radiólogos se vieron muy expuestos**

---

<sup>14</sup> Fuchs, W., 1896. Simple recommendations on how to avoid radiation harm. Western Electrician 12.

<sup>15</sup> Molineus, W., Holthusen, H., Meyer, H., 1992. Ehrenbuch der Radiologen aller Nationen, third ed. Blackwell Wissenschaft, Berlin.

Así que fueron los radiólogos quienes emprendieron una iniciativa internacional de protección radiológica: la creación del embrión de la ICRP. En 1928, en el segundo Congreso Internacional de Radiología que tuvo lugar en Estocolmo, Suecia se creó el Comité Internacional de Protección contra los rayos X y el radio (IXRPC) (Ver Figura 13)<sup>16</sup>, el que con el tiempo evolucionaría a la ICRP actual. Este Comité fue originalmente creado para responder a las crecientes preocupaciones sobre los efectos de la radiación ionizante que se observan en la comunidad médica (es decir, los radiólogos), pero eventualmente sería reestructurado para tener mejor en cuenta los usos de la radiación fuera del área médica y se re-denominaría con su nombre actual de ICRP en 1950. Pero indudablemente el origen de esta institución señera para la protección radiológica tuvo el propósito de la protección radiológica ocupacional, es decir, de proteger a los radiólogos contra los efectos perjudiciales de la exposición a la radiación.



**Figura 13: Comité Internacional de Protección contra los Rayos X y el Radio fue creado en el segundo Congreso Internacional de Radiología, en Estocolmo, Suecia, en 1928**

Las primeras recomendaciones de este primigenio Comité pueden considerarse las bases de la protección radiológica ocupacional. Identifican los efectos detrimentales que se venían descubriendo: lesiones en los tejidos superficiales; trastornos de los órganos internos; y, cambios en la sangre. Las recomendaciones, por vez primera reclaman que se debe

---

<sup>16</sup> Sievert, R.M., 1957. The International Commission on Radiological Protection (ICRP). In: International Associations. Union of International Associations, Palais d'Egmont, Brussels, pp. 3-7.

proporcionar una protección adecuada y condiciones de trabajo adecuadas y que los empleadores (en aquel tiempo los encargados de los departamentos de rayos X y radio) debían garantizar tales condiciones para su personal.

Pero estas recomendaciones también reflejaban el amplio desconocimiento sobre la materia que había en ese momento. Entre otras cosas recomendaban que los consultorios radiológicos debía estar situados por debajo del nivel del suelo, y que debían estar provistas de: ventanas que brindaran buena iluminación natural e instalaciones preparadas para admitir la luz del sol y el aire fresco, y de 'ventilación de escape' adecuada capaz de renovar el aire de la habitación no menos de 10 veces por hora; y de entradas y salidas de aire dispuestas para permitir una ventilación transversal. Mas aun, ¡se recomendaba que todas las habitaciones debían estar preferiblemente decoradas en colores claros!

En resumen, la disciplina que hoy denominamos 'protección radiológica' se generó con fines de protección ocupacional solamente, donde los 'trabajadores' eran los médicos, y estaba solo dedicada a las 'prácticas' de radiología y terapia con radio y no a las otras incipientes industrias y espectáculos que hacían uso de las propiedades de la radiación y el radio.

Es de hacer notar que el término médico denominado 'practica' permanecerá en uso en la profesión aplicado a cualquier actividad, y definido como 'toda actividad humana que introduce fuentes de exposición o vías de exposición adicionales o extiende la exposición a más personas o modifica el conjunto de las vías de exposición debidas a las fuentes existentes, de forma que aumente la exposición o la probabilidad de exposición de personas o el número de las personas expuestas' El concepto eventualmente evolucionaría al concepto de "situaciones de exposición planificadas", actualmente simplemente definidas como 'aquéllas que involucran la introducción y la operación planificada de fuentes'.

También es de destacar que en aquellos comienzos el foco estaba en las maquinas de rayos x y los productos conteniendo radio únicamente. La exposición a radiación natural de fondo se ignoraba, por la simple razón que su misma existencia se ignoraba.

### **III. EVOLUCIÓN**

La evolución de la protección radiológica comenzo en los años 30 y quizás una buena manera de iniciar esta nueva saga es recordar como se

inicio la regulación de la protección. El primer instrumento regulatorio fue una ley establecida por el parlamento de la República Oriental del Uruguay. Si, aunque parezca increíble, la regulación de la protección radiológica de inició en Latinoamérica.

En las primeras décadas de esta evolución, el progreso fue limitado y se vió seriamente interrumpido por los avatares de la Segunda Guerra Mundial. Pero luego de la guerra se produciría un verdadero renacimiento.

## **El lustro trascendental**

Sin lugar a dudas el periodo más trascendental de la historia de la protección radiológica es el lustro que va desde 1955 a 1960. Ocurren en ese período acontecimientos que modelaran el devenir de esta profesión.

### *La creación de UNSCEAR*

El primer evento de aquel lustro que seria de gran importancia para la protección radiológica ocupacional fue la creación del *Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica* (UNSCEAR) el que proveeria de allí en mas el imprescindible consenso científico universal solo los efectos dañinos para la salud de las radiaciones ionizantes.

En efecto, al comienzo de aquel lustro, y supuestamente con la intención de desviar una propuesta que pedía el fin inmediato de todas las explosiones nucleares, se propuso a la Asamblea General de las Naciones Unidas que estableciera un Comité para recopilar y evaluar información sobre los niveles y efectos de la radiación ionizante. Es así que el 3 de diciembre de 1955, la Asamblea General aprobó por unanimidad la resolución 913 (X), que estableció el (UNSCEAR). Desde sus comienzos, el Comité estuvo compuesto por científicos de alto nivel. En el primero, estos científicos provinieron de 15 Estados miembros designados de la ONU, a saber, Argentina, Australia, Bélgica, Brasil, Canadá, Checoslovaquia, Egipto, Francia, India, Japón, México, Suecia, Reino Unido, Estados Unidos y la ex-URSS.

### *La creación del OIEA*

El otro evento de este lustro que seria trascendental para la protección radiológica ocupacional fue la creación del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Bajo la égida del OIEA se

desarrollarían las normas de protección radiológica ocupacional que hoy en día gobiernan a esta disciplina.

A comienzos de 1955, se comenzó a redactar el proyecto de Estatuto del OIEA y en Julio de ese año se celebró en Ginebra la Primera Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre el Uso Pacífico de la Energía Nuclear, una reunión científica memorable a la que asistieron más de 1 500 delegados. En 1956, en una conferencia de 82 Estados celebrada en octubre en la sede de las Naciones Unidas, en Nueva York, los Estados aprueban el Estatuto del OIEA. El Estatuto incorpora responsabilidades tanto sobre el control como sobre el desarrollo de la energía nuclear exclusivamente para fines pacíficos, pero específicamente, el Estatuto establece que una función crucial del OIEA es *establecer o adoptar, en consulta, y cuando proceda, en colaboración con los órganos competentes de las Naciones Unidas y con los organismos especializados interesados, normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad (inclusive normas de seguridad sobre las condiciones de trabajo), y proveer a la aplicación de estas normas ... a petición de un Estado, a cualquiera de las actividades de ese Estado en el campo de la energía atómica.*

El OIEA nace oficialmente el 29 de julio de 1957, día en que el Estatuto es ratificado por el número requerido de Estados Miembros. En octubre de ese año, los delegados de 59 Estados asisten a la Primera Conferencia General del OIEA en Viena (Austria). La Primera Junta de Gobernadores del OIEA consta de 23 Estados Miembros: Argentina, Australia, Brasil, Canadá, Checoslovaquia, Corea, Estados Unidos, Francia, Guatemala, India, Indonesia, Italia, Japón, Pakistán, Perú, Portugal, Reino Unido, República Árabe de Egipto, Rumania, Sudáfrica, Suecia, Turquía y la Unión Soviética.

### La re-creación de la ICRP

Otro evento significativo el lustro es la recreación de la ICRP. La ICRP proveería el paradigma universal que forma la base de la protección radiológica ocupacional.

Después de la parálisis impuesta por la segunda Guerra Mundial, el ICRPC volvió a reunirse a comienzos de los 50 y se reorganizó en la actual ICRP. La recreada ICRP se reunió en la primavera de 1956 en Ginebra. En esta reunión, la ICRP se afilió formalmente a la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una “organización no gubernamental participante”. En 1959, también se había establecido una relación formal con la Agencia

Internacional de Energía Atómica (OIEA), y también se establecieron diversas formas de relación con UNSCEAR, la Oficina Internacional del Trabajo (OIT), la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización Internacional de Normalización (ISO) y Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

Significativamente la ICRP aprobó la primera recomendación de su estructura actual. La Publicación 1 de la ICRP, Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica, fue publicada por Pergamon Press en Nueva York en 1959<sup>17</sup>.

### *El establecimiento de la Convención 1960*

Pero posiblemente, el hecho más significativo para la protección radiológica ocupacional, el que ocurre al final de este increíble lustro, fue la adopción bajo la égida de la OIT de la Convención (o Convenio) sobre protección radiológica, número 115.<sup>18</sup>

El Consejo de Administración de la entonces Oficina Internacional del Trabajo se reunió en su cuadragésima cuarta reunión el 1 de junio de 1960, y decidió la adopción de ciertas propuestas relativas a la protección de los trabajadores contra las radiaciones ionizantes, determinó que dichas proposiciones revisten la forma de un convenio internacional. Por lo tanto adoptó, con fecha veintidós de junio de mil novecientos sesenta, el Convenio, que sería citado como el la Convención o Convenio sobre protección radiológica, 1960.

La Convención 1960 introdujo por vez primera obligaciones legales vinculantes respecto a la protección radiológica ocupacional. Todo Miembro de la Organización Internacional del Trabajo que ratificara la Convención se comprometía a hacerla efectivo por medio de leyes o reglamentos, repertorios de recomendaciones prácticas u otros medios apropiados, con el proviso que al aplicar las disposiciones de la Convención, la autoridad competente consultará a los representantes de los empleadores y de los trabajadores. Mas aún se especifica claramente que la Convención aplica a todas las actividades que entrañen la exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes en el curso de su trabajo.

---

<sup>17</sup> ICRP, 1959. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Now known as ICRP Publication 1. Pergamon Press, New York.

<sup>18</sup> [https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=1000:12100:0::NO::P12100\\_INSTRUMENT\\_ID,P12100\\_LANG\\_CODE:312260,es:NO](https://www.ilo.org/dyn/normlex/en/f?p=1000:12100:0::NO::P12100_INSTRUMENT_ID,P12100_LANG_CODE:312260,es:NO)

La Convención ha tenido una amplia ratificación pero hay algunos países importantes que no la han ratificado. Los países ratificantes, y fecha de ratificación son los siguientes: Argentina 15 jun 1978; Azerbaiyán 19 de mayo de 1992; Barbados 8 de mayo de 1967; Bielorrusia 26 de febrero de 1968; Bélgica 2 de julio de 1965; Belice 15 de diciembre de 1983; Brasil 05 Sep 1966; Chile 14 oct 1994; Chequia 1 de enero de 1993; Dinamarca 7 de febrero de 1974; Djibouti 03 Ago 1978; Ecuador 09 Mar 1970; Egipto 18 de marzo de 1964; Finlandia 16 de octubre de 1978; Francia 18 de noviembre de 1971; Alemania 26 de septiembre de 1973; Ghana 7 de noviembre de 1961; Grecia 04 junio 1982; Guinea 12 de diciembre de 1966; Guyana 08 junio 1966; Hungría 08 jun 1968; India 17 de noviembre de 1975; Irak 26 de octubre de 1962; Italia 5 de mayo de 1971; Japón 31 de julio de 1973; Kirguistán 31 de marzo de 1992; Letonia 8 de marzo de 1993; Líbano 6 de diciembre de 1977; Lituania 27 de mayo de 2013; Luxemburgo 8 de abril de 2008; México 19 oct 1983; Países Bajos 29 de noviembre de 1966; Nicaragua 01 Oct 1981; Noruega 17 de junio de 1961; Paraguay 10 Jul 1967; Polonia 23 de diciembre de 1964; Portugal 17 de marzo de 1994; República de Corea 7 de noviembre de 2011; Federación de Rusia 22 de septiembre de 1967; Eslovaquia 1 de enero de 1993; España 17 julio 1962; Sri Lanka 18 de junio de 1986; Suecia 12 de abril de 1961; Suiza 29 de mayo de 1963; República Árabe Siria 15 de enero de 1964; Tayikistán Turquía 15 de noviembre de 1968; Ucrania 19 de junio de 1968; Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte 9 de marzo de 1962; y, Uruguay 22 Sep 1992.

### **Primeros requerimientos**

Inmediatamente después del increíble lustro 1955-1960 comienza un período de crecimiento reciente de requerimientos relacionados con la protección radiológica ocupacional. Pareciera que hay un consenso universal para responder al llamado de la Convención 1960 de la ILO: “*A la luz de los conocimientos disponibles en ese momento, se adoptarán todas las medidas oportunas para garantizar una protección eficaz de los trabajadores, en lo que respecta a su salud y seguridad, contra las radiaciones ionizantes.*”

#### *Las recomendaciones primeras*

La Publicación 1 de la ICRP introduce la primera definición de *exposición ocupacional* en lo que eventualmente sería el paradigma fundamental de la protección radiológica. El párrafo 37 indica que *la exposición de un individuo que normalmente trabaja en un área controlada*

*constituye una exposición ocupacional, y el 71 indica que se establecerá un área controlada donde las personas ocupacionalmente expuestas puedan recibir dosis superiores a 1,5 rems/año.*

La Publicación 1 también establece la primera definición del concepto de *dosis máxima permisible*. El párrafo 47 establece que *la dosis total máxima permisible acumulada en las gónadas, los órganos hematopoyéticos y el cristalino de los ojos a cualquier edad mayor de 18 años se registrará por la relación  $D = 5 (N - 18)$ ; donde:  $D$  es la dosis tisular en rems, y  $N$  es la edad en años.*

Estas dos decisiones fundamentales marcan el comienzo del paradigma internacional sobre la protección radiológica ocupacional. La definición de exposición ocupacional de mantendría en su términos generales pero con varias acepciones que no se han resuelto hasta el día de hoy. Sin embargo, la limitación de dosis sufriría un cambio conceptual profundo: mientras que esta primerarecomendación intenta limitar la dosis acumulada, el paradigma terminara decidiendo por la limitación de las dosis diferenciales anuales comprometidas.

### *Las bases del paradigma*

Una de las primeras iniciativas para recomendar un paradigma de protección, completo, fundado y universal fue la publicación de la Publicación 9 de la ICRP<sup>19</sup>, la que había sido adoptada el 17 de septiembre de 1965.

Los principios básicos subyacentes al paradigma que forma la base de las recomendaciones de la ICRP se comienzan a formular por vez primera en esta Publicación. Los objetivos de la protección radiológica son claramente definidos por vez primera como *prevenir los efectos agudos de la radiación y limitar los riesgos de los efectos tardíos a un nivel aceptable*, incluyendo discusiones sobre *el concepto de riesgo aceptable*, y clarificando que *los efectos agudos suelen manifestarse unas pocas semanas después de la exposición[y] los efectos tardíos pueden tener un período de latencia de decenas de años.*

La Publicación 9 introduce por vez primera una serie de conceptos sobre los cuales se construirá el paradigma de la protección radiológica ocupacional. El equivalente de dosis, la influencia de la tasa de dosis, los

---

<sup>19</sup> ICRP, 1966. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 9. Pergamon Press, Oxford.

órganos y tejidos críticos, y los conceptos de riesgo y de riesgo aceptable son parte de los nacientes modelos. También por primera vez se introduce el concepto de categorías de exposición, se diferencia la exposición de individuos y la exposición de las poblaciones y se separa y distingue a los miembros del público de los trabajadores. Más aún se diferencia las fuentes de exposición controlables y las no controladas y se desiguala la limitación de exposiciones de fuentes controlables de los niveles de acción para exposiciones de fuentes no controladas

La publicación 9 también introduce el primer sistema de limitación de dosis para exposiciones de fuentes controlables, separando a la exposición de individuos miembros del público de la exposición ocupacional y resuelve la transición demandada por las personas expuestas de acuerdo con las dosis máximas permisibles anteriores.

Otra novedad que la publicación 9 introduce son las limitaciones para la exposición de mujeres en capacidad reproductiva y la exposición de mujeres embarazadas, incluyendo la de los exámenes radiológicos de mujeres con capacidad reproductiva

Sorprendentemente la Publicación 9 también introduce por vez primera la consideración de la distribución logarítmica normal de la exposición ocupacional y sus consecuencias.

En aquellos momentos existían muchas dudas sobre los efectos heredables causados por la exposición a la radiación. Por ello, la Publicación 9 dedica atención a la exposición de las poblaciones e introduce los conceptos de dosis genética y su evaluación y el de límite de dosis genética y analiza los contribuyentes a la dosis genética

La distinción entre la exposición ocupacional, la exposición pública y la exposición médica introducida por la Publicación 9 se mantendrá en toda la evolución del paradigma de protección radiológica.

Notablemente para la protección radiológica ocupacional, la Publicación 1 introduce el concepto de niveles de acción para exposiciones de fuentes no controladas y analiza problemas que aún hoy no se han resuelto completamente tales como: las exposiciones anormales de los trabajadores a la radiación, las exposiciones de emergencia, y las exposiciones accidentales.

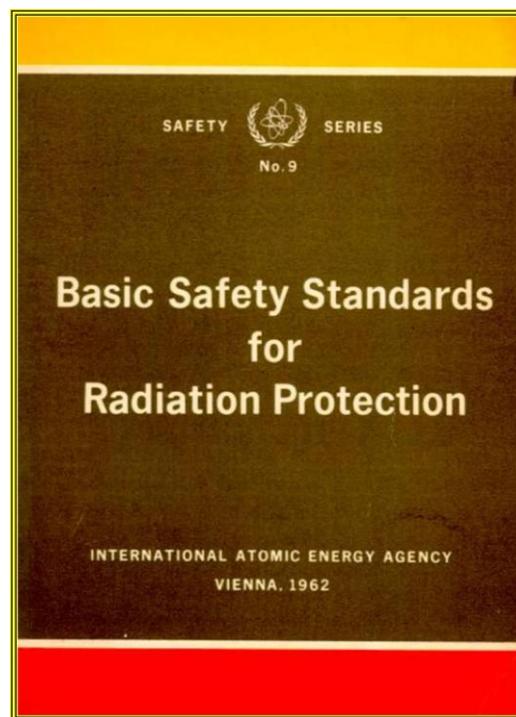
La publicación 9 también introduce por primera vez los principios generales para la protección radiológica operacional para la protección

radiológica de los trabajadores, incluyendo los programas de protección radiológica y de vigilancia de la salud, el mantenimiento de registros, y el conflictivo tema de la horas de trabajo y duración de las vacaciones.

En resumen, la Publicación 9 de la ICRP fue un presentó un buen consenso sobre el periodo de evolución de la protección radiológica ocupacional.

### **Las Normas tempranas**

Mientras tanto comenzaron a aparecer las primeras normas de seguridad internacionales. Ya en la década de los 60, y de conformidad con las disposiciones de su Estatuto relativas a la adopción y aplicación de normas de seguridad para la protección contra las radiaciones, el OIEA convocó a un grupo de expertos que formuló las primeras Normas Básicas de Seguridad para la Protección Radiológica de carácter internacional (ver Figura). La Junta de Gobernadores del OIEA en junio de 1962 aprobó las Normas y autorizó al Director General del OIEA a aplicar las Normas en las operaciones del OIEA y asistidas por el OIEA e invitar a los gobiernos de los Estados miembros para tomarlas como base al formular reglamentos o recomendaciones nacionales sobre protección contra los peligros derivados de las radiaciones ionizantes (ver Figura 14).



**Figura 14: Cubierta de la primera norma internacional de protección radiológica**

Estas primeras normas se revisaron en 1967. Estos documentos fueron desarrollados con la participación de expertos de la OIT y contienen las primeras normas internacionales para la protección radiológica ocupacional.

### **Desarrollo de un índice de daño**

Un paso importantísimo en el desarrollo del paradigma de la protección radiológica se dio con la primera decisión sobre un método para juzgar la aceptabilidad del nivel de riesgo en el trabajo con radiación. Esto se logró mediante el desarrollo de un índice de daño por parte de la ICRP<sup>20</sup>. En abril de 1973, la ICRP solicitó al renombrado epidemiólogo inglés, Sir Edward Pochin, que preparara un informe sobre los problemas que implicaba comparar la seguridad de diferentes industrias, incluidas las que implicaban exposición a la radiación, teniendo en cuenta el hecho de que los tipos de lesiones o enfermedades inducidas, y su severidad y frecuencias relativas, pueden diferir completamente en diferentes ocupaciones.

Así se llevó a cabo un estudio muy detallado de las muertes y graves lesiones ocupacionales atribuibles al trabajo en distintas industrias en Inglaterra. Comparando esos valores con el conocimiento que se disponía entonces de los riesgos de la exposición a la radiación derivados de los estudios de las cohortes de Hiroshima y Nagasaki se revalidó el límite ocupacional recomendado por la ICRP.

La ICRP aclaró que la muerte se había utilizado comúnmente como un índice de la seguridad o daño comparativo de diferentes industrias y la frecuencia de muertes atribuibles a causas ocupacionales claramente tiene una cierta validez como para utilizarla para buscar un índice de daño atribuible a la exposición ocupacional a la radiación. De esta manera, la ICRP basa las estimaciones del riesgo de exposición a la radiación en la probabilidad de que una exposición determinada pueda inducir una forma mortal de cáncer, y la tasa de mortalidad estimada se compara con la de la frecuencia de muertes accidentales en otras ocupaciones.

Este criterio simple, aunque fácilmente calculable e inequívoco, tiene numerosas limitaciones. En primer lugar, omite la consideración de todas las lesiones, enfermedades y lesiones permanentes no mortales y discapacidades, que pueden ser muy frecuentes en muchas ocupaciones.

---

<sup>20</sup> ICRP, 1977. Problems Involved in Developing an Index of Harm. ICRP Publication 27. Ann. ICRP 1 (4).

Sin embargo, la ICRP consideró que es improbable que la radiación, en las dosis bajas involucradas en la mayoría de las exposiciones ocupacionales, cause un número sustancial de lesiones no fatales y, por lo tanto, si una ocupación que implica exposición a la radiación es más segura que otras ocupaciones en términos de muertes inducidas, debería ser aún más segura en términos de efectos no fatales.

Una segunda limitación radicaba en la diferencia entre una cierta frecuencia de muertes inmediatas por accidentes y una frecuencia igual de muertes tardías por diversas formas de enfermedades malignas atribuibles a la radiación, y la mayor aprensión que es probable que suceda con las últimas. Además, lo primero puede atribuirse, con razón o sin ella, a la falta de habilidad de la víctima, mientras que lo segundo puede considerarse como un riesgo más fortuito, en el que interviene una cierta proporción de personas que trabajan correctamente y por igual dentro de un mismo margen de límites permitidos de exposición.

Un tercer defecto en el uso exclusivo de las tasas de mortalidad es que la duración de la vida perdida por las muertes puede ser más importante que el hecho de la muerte misma. Es decir que la distribución de edad observada o esperada de las muertes necesitaba alguna consideración,

Más aún, la evaluación se ocupó esencialmente del daño de los eventos, y no adecuadamente de las ansiedades acerca de su ocurrencia, aunque estas ansiedades son muy diferentes en diferentes ocupaciones. En particular, existe una gran diferencia entre un riesgo dado de muerte accidental, que el trabajador puede sentir, con razón o sin ella, que puede evitar con su propia habilidad, y un riesgo igual de muerte por una enfermedad maligna inducida por radiación en el ambiente normal de trabajo. Tales inquietudes, por parte del trabajador o de su familia, variarán de acuerdo con la publicidad, el secretismo o sucesos fortuitos relacionados con tales enfermedades. Es posible que estas ansiedades no impliquen un daño comparable con el de la enfermedad real o las muertes que ocurren, pero pueden afectar a un gran número de trabajadores que nunca desarrollarán tales enfermedades y claramente hubiesen requerido una consideración más completa.

De manera similar, la contribución al daño de los accidentes y enfermedades se ha considerado solo sobre la base de muy pocas encuestas para ser confiable, y la importancia de, por ejemplo, las muertes por enfermedades industriales o el daño al feto en trabajadoras embarazadas,

hubiese necesitado más estudio. Además, el daño por daño por efectos heredables también hubiese requerido una evaluación más completa.

También se hubiese debido tener en cuenta varias otras limitaciones epistemológicas, por ejemplo: las diferencias probables en la duración de la vida perdida por muerte accidental y por tumores malignos inducidos por radiación; la mayor duración media de la vida perdida por muertes accidentales que por la suma de los períodos de ausencia en el trabajo, para ocupaciones de riesgo sustancial; la relación no lineal entre la frecuencia de muertes accidentales y la de lesiones accidentales; y, la contribución relativamente pequeña al tiempo perdido, de las enfermedades profesionales en la mayoría de las industrias.

Al mismo tiempo, sin embargo, algún "índice de daño" era esencial para comparar la seguridad de las ocupaciones que involucran exposición a la radiación con la de otras ocupaciones existentes. Y es así que pese a todas estas limitaciones descritas la ICRP evaluó un índice de daño y derivó del mismo los límites ocupacionales que aun rigen actualmente aun reconociendo las limitaciones del índice sugerido

El valor de 50 milliSievert por año (mSv/a como límite de las dosis ocupacionales se deriva de este análisis de índice de daño. Es el único valor del sistema de limitación de dosis que tiene una racional cuantitativa que lo apunta.

Lo que es menos sostenible es el valor del límite para el público. La ICRP decidió utilizar un décimo del valor ocupacional; la lógica detrás de esta decisión nunca fue clara. Así se decidió el límite de 5 mSv/a que se utilizó durante muchos años para miembros del público.

Varios años después, se reevaluaron los resultados epidemiológicos de la cohorte de Hiroshima y Nagasaki sobre la base que habían ocurrido errores en la evaluación dosimétrica (no se había considerado el nivel de humedad y su efecto en la moderación de la radiación neutrónica). Como resultado se consideró que la estimación de riesgo derivada de esta cohorte debía multiplicarse por 5. La ICRP decidió entonces reducir el valor de 5 milliSv por año al famoso **1 mSv/a** que se ha transformado en la base de la protección radiológica del público y la causa de muchos malos entendidos sobre la radiación.

Sin embargo no se aplicó el mismo criterio para el límite ocupacional que se mantuvo sin modificaciones pero con el proviso que no podía

superar 100 milliSv en cinco años lo que introdujo un límite de facto de 20 mSv/a.

## **La Publicación 60 de la ICRP**

Se podría establecer al año 1990 como el del nacimiento del paradigma que conformaría a la protección radiológica ocupacional. En ese año se emitió la publicación 60 de la ICRP<sup>21</sup> en la que por vez primera se presentan las bases de ese paradigma.

La Publicación 60 analiza por vez primera las magnitudes utilizadas en la protección radiológica, tanto las magnitudes dosimétricas básicas, así como su ponderación por el tipo y energía de la radiación y por los tejidos afectados introduciendo el concepto nuevo de dosis efectiva. También lleva a cabo un análisis pormenorizado de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes e introduce el concepto de detrimento. Analiza en detalle los efectos determinísticos y estocásticos así como los efectos de la exposición prenatal

La Publicación 60 introduce por vez primera el marco conceptual de la protección radiológica, dividiendo las situaciones en ‘prácticas’ e ‘intervenciones’ y los principios que se convertirían en las bases éticas del sistema: la justificación de una práctica, a optimización de la protección y los límites individuales. También por vez primera se discute el tema de la exposición potencial.

La Publicación 60 dedica mucho esfuerzo sistema de protección en exposición ocupacional incluyendo a la optimización de la protección en la exposición laboral, los límites de dosis en exposición ocupacional y la exposición ocupacional de las mujeres. También aborda por vez primera la protección en la exposición médica, incluyendo la justificación de una práctica con exposición médica, la optimización de la protección en la exposición médica, los límites de dosis en exposición médica y la exposición médica de mujeres embarazadas

El sistema de protección de la exposición pública también se aborda en detalle, incluyendo la optimización de la protección en la exposición pública, los límites de dosis en la exposición pública y las exposiciones potenciales incluyendo límites y restricciones de riesgo individual.

---

<sup>21</sup> ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3).

La Publicación 60 dedica gran atención al sistema de protección en intervenciones incluyendo las bases de la intervención en la exposición pública y las situaciones en las que puede ser necesaria una acción correctiva. Se focaliza en algunas situaciones tales como las del radón en viviendas y los residuos radiactivos de eventos anteriores. Para accidentes y emergencias aborda la intervención que afecta al público y la limitación de la exposición ocupacional en emergencias.

La Publicación también incluye sugerencias administrativas para la implementación de las recomendaciones de la ICRP, incluyendo responsabilidad y autoridad, requisitos reglamentarios, la regulación de las prácticas, la regulación en el contexto de exposiciones potenciales, requisitos de gestión, clasificación de los lugares de trabajo y las condiciones de trabajo, guías operativas, niveles de referencia, servicios de protección y salud, evaluación de las dosis, cumplimiento del estándar de protección previsto, planificación de emergencias, y el aun irresuelto problema de la exclusión y exención de la normativa.

La Publicación 60 incluyo quizás una de las mejores recomendaciones de la ICRP y cambios posteriores, por ejemplo el cambio de prácticas e intervenciones a lo que hoy se denomina situaciones de exposición planeadas, de emergencia y existentes, no fue necesariammete beneficioso.

## **Las bases éticas**

El paradigma de protección que se estaba generando en aquellos momentos estaba basado en sólidas consideraciones éticas. Lamentablemente, la ICRP no las describió detalladamente en su momento, aunque fueron registradas en la literatura<sup>22, 23</sup>. La siguiente Figura 15 presenta las doctrinas éticas fundamentales y los aforismos que las describen sucintamente

---

<sup>22</sup> Gonzalez, A.J., 2011. *The ethical basis of the international principles of radiation protection* (in Spanish). Radioprotección. No.69. Vol.XIX, 2011.

<sup>23</sup> Gonzalez, A.J., 2011. The Argentine Approach to Radiation Safety: Its Ethical Basis. Science and Technology of Nuclear Installations. Volume 2011 Hindawi Publishing Corporation, Article ID 910718, doi:10.1155/2011/910718



Figura 15: las doctrinas éticas fundamentales y los aforismos que las describen

La Figura 16 presenta como los principios del paradigma de protección se identifican con las doctrinas éticas fundamentales



Figura 16: Los principios del paradigma de protección y las doctrinas éticas fundamentales

Solo recientemente la ICRP se ha hecho eco de la necesidad de describir las bases éticas<sup>24</sup>, pero lamentablemente esta publicación se centra en ‘valores’ y solo refiere a las doctrinas éticas en un apéndice incompleto.

#### **IV. CONSOLIDACIÓN**

Al final de esta historia se debe concluir que se ha consolidado un sistema internacional e intergubernamental de protección de los trabajadores contra la radiación que es realmente único en el campo laboral.

A continuación se describe resumidamente este exitoso régimen internacional de protección radiológica ocupacional

Este resumido en la figura siguiente:

- El UNSCEAR proporciona un consenso global sobre los niveles de la exposición ocupacional a la radiación y sobre los efectos en la salud atribuibles a esa exposición.
- La ICRP recomienda un paradigma para la protección radiológica ocupacional.
- La OIT armoniza los intereses de los gobiernos, los trabajadores y los empleadores y opera los convenios internacionales de protección y seguridad en el trabajo.
- El OIEA y la OIT, copatrocinadamente, establecen normas internacionales e intergubernamentales para la protección radiológica ocupacional.
- Los profesionales de la protección radiológica, reunidos en la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA), aseguran la implementación de la normativa con sólidos mecanismos internacionales de fomento de su aplicación.

La Figura 17 resume el sistema:

---

<sup>24</sup> ICRP, 2018. Ethical foundations of the system of radiological protection. ICRP Publication 138. Ann. ICRP 47(1).



Figura 17: Representación del sistema internacional de protección radiológica ocupacional

Las funciones estatutarias del OIEA, las que se resumen en la Figura 18, han ayudado a consolidar el sistema-

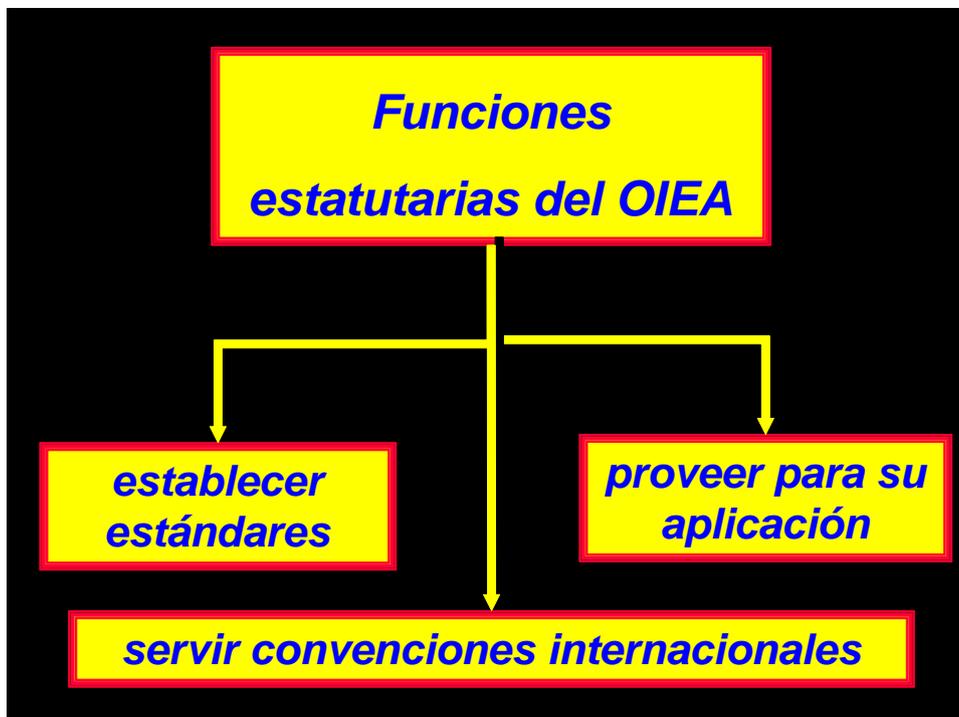


Figura 18: Las funciones estatutarias del OIEA

Los mecanismos de fomento de la aplicación de la normativa, los que son operados fundamentalmente por el OIEA, se describen en la Figura 19



Figura 19: Provisiones para la aplicación de los estándares

El régimen normativo es muy completo y se compone de un corpus conteniendo centenares de normas organizadas jerárquicamente en fundamentos, requerimientos mandatorios y guías como se presenta en la Figura 20 y de manera mas detallada en la Figura 21. Los *fundamentos* presentan los objetivos y principios fundamentales de protección y seguridad, y constituyen la base de los requisitos o *requerimientos* de seguridad. Estos son conjunto integrado y coherente de requisitos de seguridad que se han de cumplir para garantizar la protección de las personas y el medio ambiente, tanto en el presente como en el futuro. Los *requerimientos* se rigen por los objetivos y principios de los *fundamentos*. Si los *requerimientos* no se cumplen, deben adoptarse medidas para alcanzar o restablecer el grado de seguridad requerido. El formato y el estilo de los *requerimientos* facilitan su uso para establecer, de forma armonizada, un marco de regulatorios. En los *requerimientos* se emplean formas verbales imperativas, junto con las condiciones conexas que deben cumplirse. Muchos de los *requerimientos* no se dirigen a una parte en particular, por ejemplo a los empleadores, a los trabajadores o a las autoridades gubernamentales, lo que significa que incumbe cumplirlos a las partes que corresponda. Mientras que las *guías* de seguridad ofrecen recomendaciones y orientación sobre cómo cumplir los *requerimientos* de seguridad, lo que indica un consenso internacional en el sentido de que es

necesario adoptar las medidas recomendadas (u otras medidas equivalentes). Las *guías* de seguridad contienen ejemplos de buenas prácticas internacionales y dan cuenta cada vez más de las mejores prácticas que existen para ayudar a los usuarios que tratan de alcanzar altos grados de seguridad. En la formulación de las recomendaciones de las *guías* de seguridad se emplean formas verbales condicionales.

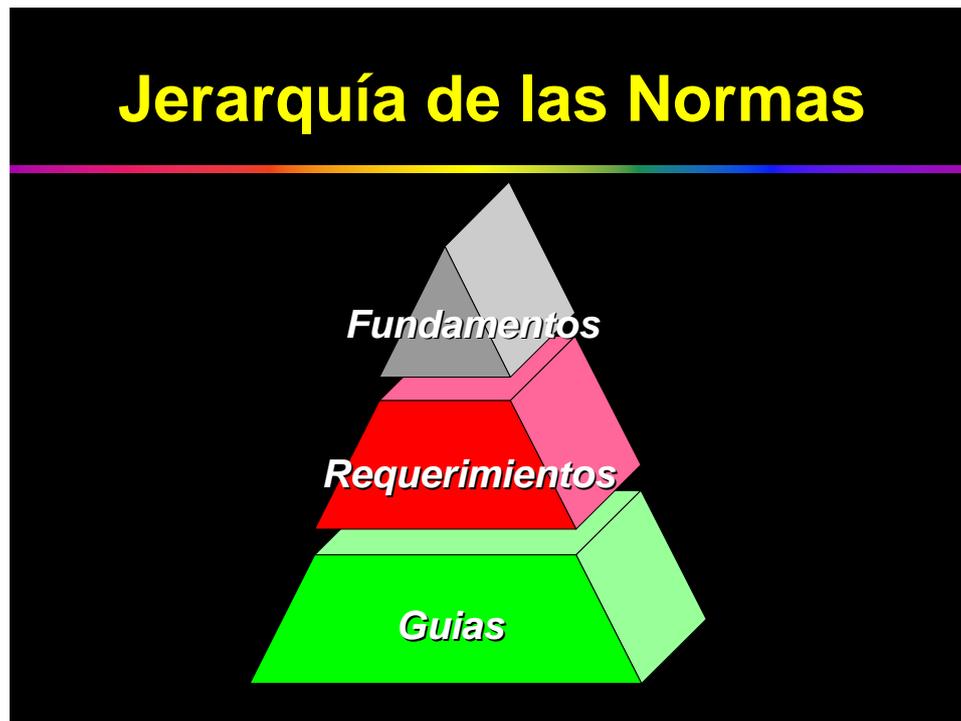
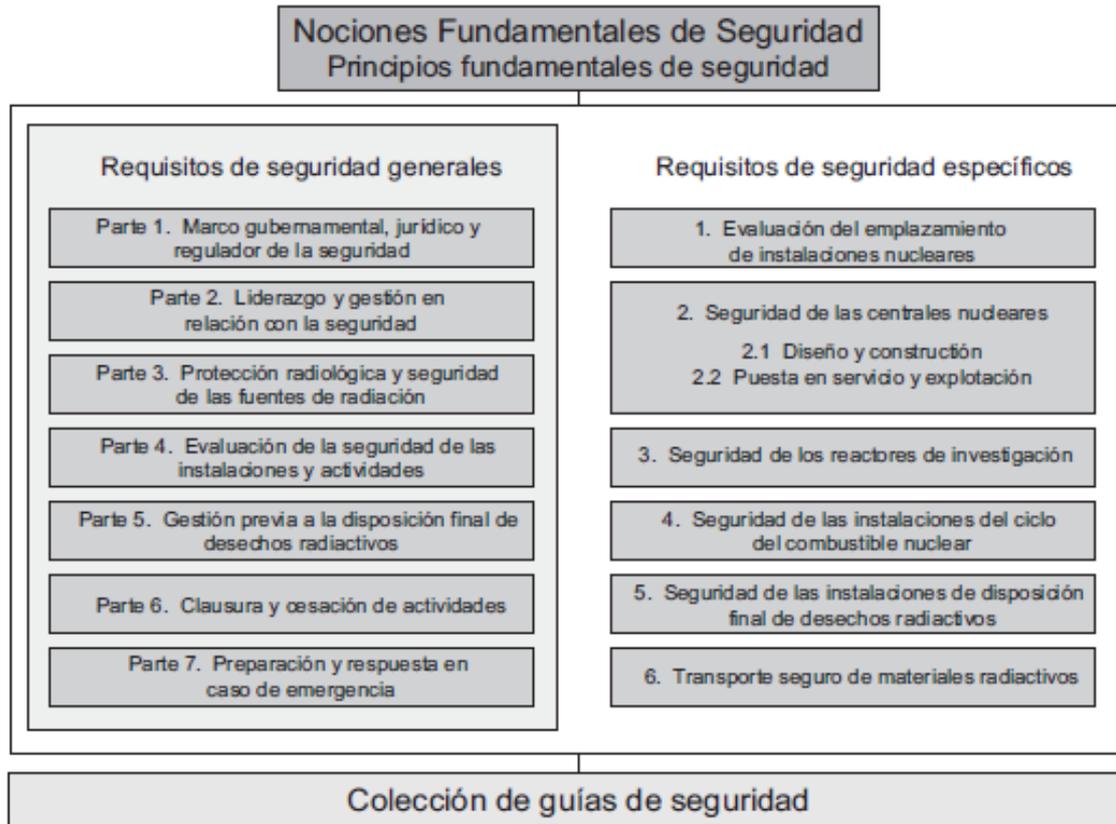


Figura 20: Jerarquía del sistema normativo



**Figura 21: Descripción detallada del sistema normativo**

Se debe destacar que el sistema nació y se consolidó como un sistema de protección ***ocupacional***, basado en tres elementos básicos: (i) designar como objetivo la protección de los trabajadores, inicialmente radiólogos y luego extendido a otras ocupaciones; (ii) considerar solo situaciones planificadas (las que fueron inicialmente denominadas ‘prácticas’; y (iii) implementar límites de dosis y satisfacerse con su cumplimiento. Los problemas de protección resolvían mediante la confluencia de estas tres consideraciones, representadas en la figura en un cubo de tres caras (ver Figura 22).



**Figura 22: Los tres elementos básicos del sistema de protección ocupacional original**

El paradigma se complicó muchísimo, cuando ese cubo original se fue transformando en un cubo similar al de Rubik<sup>25</sup>, un verdadero rompecabezas tridimensional. En primer lugar al objetivo de la protección de los trabajadores se agregaron, en primer lugar, la protección de los miembros del público y, recientemente<sup>26</sup>, la protección de los pacientes; en segundo lugar a los límites de dosis se agregaron la justificación de las acciones y la optimización de la protección; y, finalmente, a las exposiciones planificadas se agregaron las emergentes y las existentes. (ver Figura 23)<sup>27</sup>

---

<sup>25</sup> Ernő Rubik 1981. *A bűvös kocka* ("The Magic Cube"), Műszaki Kiadó, Budapest, 1981.

<sup>26</sup> IAEA, 2001. Radiological protection of patients in diagnostic and interventional radiology, nuclear medicine and radiotherapy. Proceedings of an international conference held in Malaga, Spain, 26–30 March 2001 / organized by the...[et al.]. Proceedings series, ISSN 0074–1884. STI/PUB/1113. ISBN 92–0–101401–5. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.

<sup>27</sup> IAEA, 1998. Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control. Proceedings of an International Conference on Low Doses of Ionizing Radiation: Biological Effects and Regulatory Control / jointly organized by the International Atomic Energy Agency and the World Health Organization, in co-operation with the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation and held in Seville, Spain, 17–21 November 1997. Proceedings series, ISSN 0074–1884. STI/PUB/1030. ISBN 92–0–102698–6. International Atomic Energy Agency, Vienna 1998.

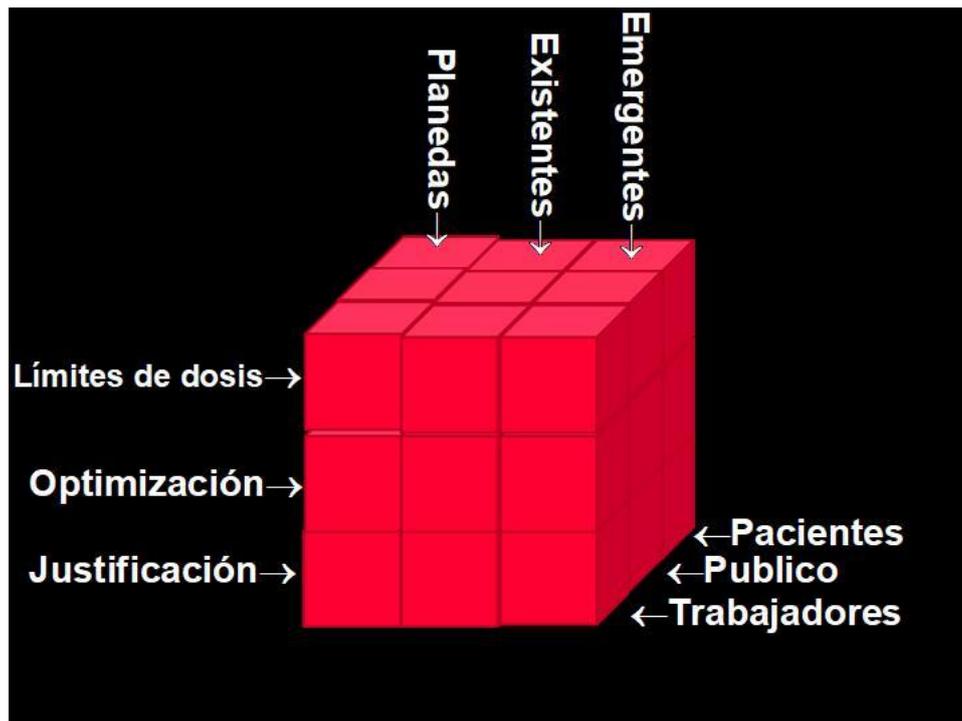


Figura 23: Elementos del paradigma actual

## V. DESAFIOS

La expansión del paradigma y del sistema que genera de los trabajadores al público y los pacientes, de la prácticas a las situaciones emergentes y a las existentes, y de los límites de dosis a la justificación y la optimización, ha dado lugar a numerosos problemas de aplicabilidad y a los consecuentes desafíos para la consolidación futura del sistema. Algunos de esos desafíos para la protección radiológica ocupacional se discutirán a continuación.

### La definición de exposición ocupacional

Aunque pueda parecer curioso el primer desafío futuro es la clarificación de lo que se denota con el término exposición ocupacional.

La introducción en el paradigma de las situaciones de exposición existentes, tales como la exposición a la radiación natural, y la protección de los miembros del público, ha generado dudas sobre lo que se entiende como exposición ocupacional. Las definiciones existentes varían muchísimo y no existe un claro consenso internacional sobre una definición precisa de este concepto fundamental para la protección radiológica ocupacional.

La Convención de la OIT establece que *‘este Convenio se aplica a todas las actividades que impliquen la exposición de los trabajadores a radiaciones ionizantes en el curso de su trabajo’*.

Coherentemente con la definición de la Convención de la OIT, las normas internacionales definen exposición ocupacional como *exposición sufrida por los trabajadores en el curso de su trabajo, donde un trabajador es definido como toda persona que trabaja, ya sea en jornada completa, jornada parcial o temporalmente, por cuenta de un empleador y que tiene derechos y deberes reconocidos en lo que atañe a la protección radiológica ocupacional.*<sup>28</sup>

Estas definiciones podrían entenderse como que todos los trabajadores del mundo están sujetos a la Convención de la OIT y a la normativa internacional porque todos están expuestos a la radiación natural.

Sin embargo el Glosario internacional publicado bajo la égida del OIEA define exposición ocupacional como *toda exposición sufrida por los trabajadores en el curso de su trabajo, con la excepción de las exposiciones excluidas y las exposiciones debidas a prácticas o fuentes exentas*<sup>29</sup>.

Mientras tanto la ICRP define en su paradigma la exposición ocupacional como que *se refiere a todas las exposiciones incurridas por trabajadores en su trabajo, con excepción de 1) las exposiciones debidas a actividades exentas que involucran niveles de radiación o fuentes exentas; 2) las exposiciones médicas; y 3) las debidas al fondo local de origen natural.*<sup>30</sup>

---

<sup>28</sup> OIEA, 2016. *Protección Radiológica Y Seguridad De Las Fuentes De Radiación: Normas Básicas Internacionales De Seguridad. DEFINICIONES.* STI/PUB/1578 ISBN 978-92-0-307915-0 ISSN 1020-5837. OIEA, VIENA, 2016

<sup>29</sup> IAEA, 2007. IAEA safety glossary: Terminology used in nuclear safety and radiation protection: 2007 edition. STI/PUB/1290 ISBN 92-0-100707-8 International Atomic Energy Agency, Vienna 2007.

<sup>30</sup> ICRP, 2003 Publicación 103 ICRP. *Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica.* Traducción oficial al español de la Publicación ICRP nº 103. Llevada a cabo por la Sociedad Española de Protección Radiológica y la Asociación de Profesionales de la Comisión Nacional de Energía Atómica y la Actividad Nuclear de Argentina, con la autorización de la International Commission on Radiological Protection (ICRP). **Página 24.** Sociedad Española de Protección Radiológica. ISBN: 978-84-691-5410-G. Depósito Legal: M-39224-2008 Edita: Senda Editorial S.A.. Imprime: Imgraf S.L. Madrid.

Dadas estas diferencias el desafío inmediato es responder a simple preguntas como estas:

- ¿Se encuentra comprendido bajo la Convención de la OIT y de la normativa internacional, un trabajador vive en un área de bajo nivel de radiación natural de fondo pero está empleado en un lugar de trabajo con alto nivel de radiación natural de fondo que puede ser disminuido por el empleador?. Esta situación puede ser muy común y afectar a millones de trabajadores.
- ¿Aplica el sistema internacional a las tripulaciones aéreas? Estas tripulaciones están sujetas a altos niveles de radiación cósmica. Los niveles de esta radiación han sido estimados por UNSCEAR y resumidos por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ver Figura 24)

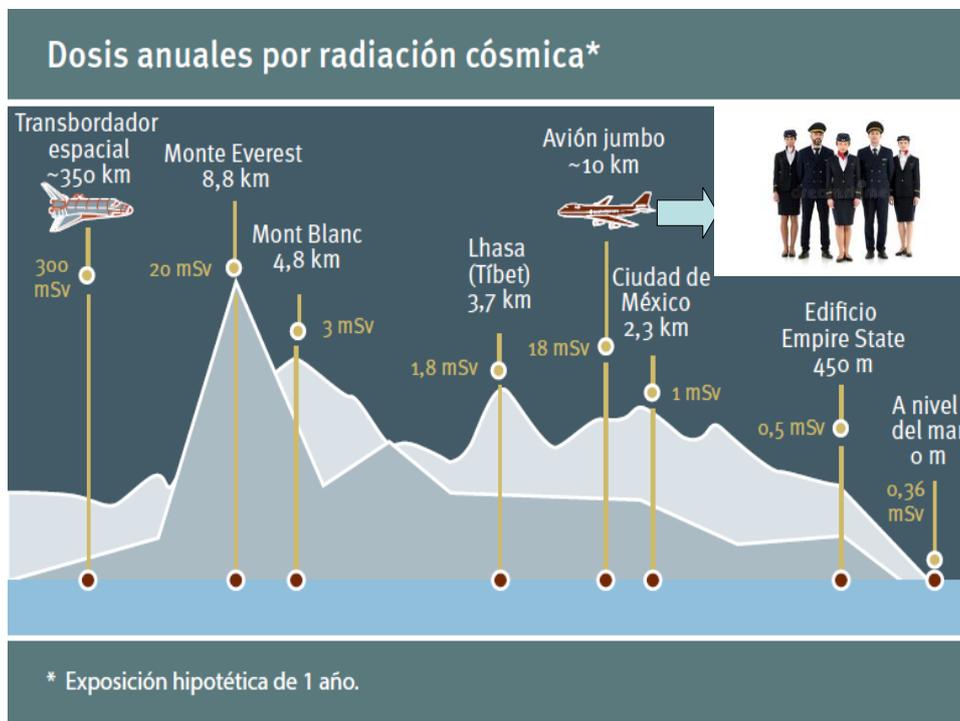


Figura 24: Las dosis anuales de radiación cósmica de las tripulaciones de aviones son muy superiores a las de los trabajadores empleados en lugares a nivel del mar

La radiación cósmica es variable para distintas rutas y por lo tanto controlable por los empleadores variando la ruta de las tripulaciones,

- ¿Aplica el sistema internacional a los trabajadores en lugares subterráneos tales como minas distintas a las minas de uranio, ‘spas’, túneles, etc? Se debe destacar que UNSCEAR ha determinado que los trabajadores mas expuestos son los que se exponen a la radiación natural.

**Atribución al trabajo de efectos en la salud versus inferencia de riesgos**

Un desafío importante para la protección radiológica ocupacional es poder responder inequívocamente a la siguiente pregunta:

- ¿Deberían equipararse las posibilidades comprobadas de trabajadores que se exponen a significativas dosis de radiación, de sufrir efectos de radiación para la salud, con conjeturas que infieren riesgos de efectos potenciales a bajas dosis?

Para analizar este problema es necesario referir a las bases del paradigma recomendado por la ICRP e incorporando en la normativa internacional de protección radiológica ocupacional. El paradigma implica una suposición conservadora: que el riesgo comprobado de la radiación en dosis altas también se puede conjeturar para dosis bajas, a pesar de la falta de evidencia directa que respalde tal conjetura. Como se verá más adelante UNSCEAR ha indicado que no se puede atribuir efectos en la salud a dosis bajas de radiación aún cuando se puede conjeturar una inferencia de riesgos.

Un área que ha recibido poca atención es la influencia en los riesgos atribuibles a la exposición ocupacional a la radiación, tanto de la tasa de dosis, como de la tasa de cambio de la tasa de dosis, es decir, de la primera y la segunda derivada temporal de la dosis. La tasa de dosis parece ser ciertamente relevante y la tasa de cambio de la tasa de dosis también puede serlo, pero la información disponible sobre esta última es mínima, aunque existe alguna evidencia experimental sobre su influencia<sup>31</sup>. Es de hacer notar que gran parte de la evidencia de los efectos dañinos de la radiación proviene de la cohorte de pobladores expuestos a la exposición a la radiación originada por las explosiones atómicas de Hiroshima y Nagasaki en Japón, y está muy claro que no solo la dosis, sino también la tasa de dosis y la tasa de cambio de la tasa de dosis para esas situaciones fue enorme. Sin embargo, en la mayoría de las situaciones de exposición ocupacional a la radiación, la dosis y las tasas de dosis son bajas, y la variación de la tasa de dosis es baja y, por lo tanto, la tasa de cambio de la tasa de dosis es básicamente cero. La siguiente Figura 25 ilustra estas importantes diferencias.

---

<sup>31</sup> Karl Brehwens, Elina Staaf, Siamak Haghdoost, Abel J. González and Andrzej Wojcik, 2010. Cytogenetic Damage in Cells Exposed to Ionizing Radiation under Conditions of a Changing Dose Rate. RADIATION RESEARCH 173, 283–289 (2010) 0033-7587/10

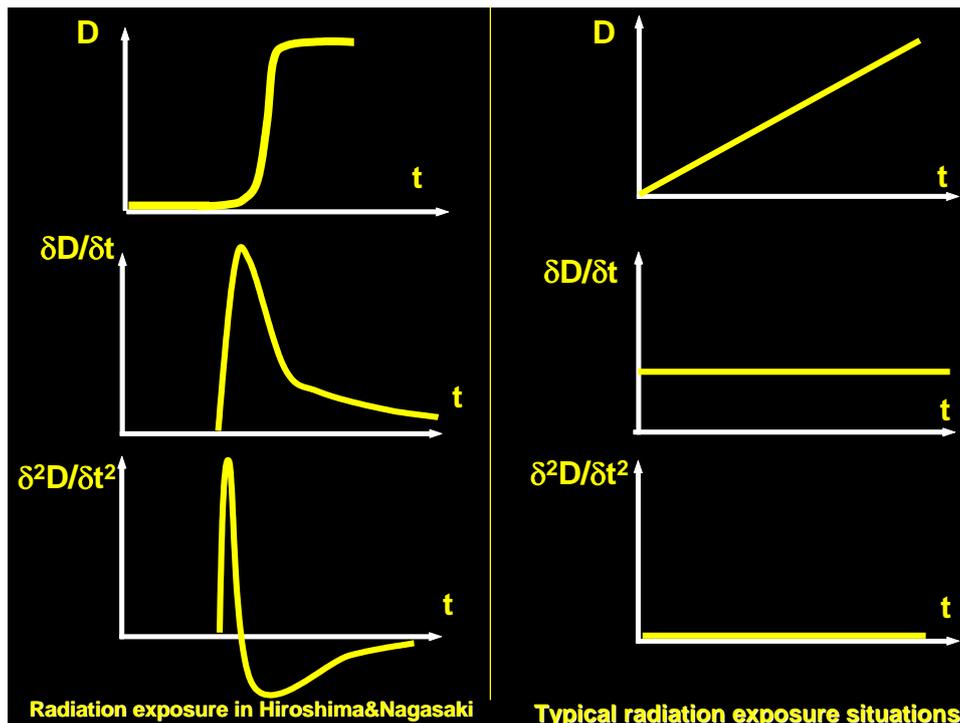


Figura 25: Diferencias en la dosis, la tasa de dosis y el cambio en la tasa de dosis entre la cohorte de Hiroshima & Nagasaki y la de trabajadores en situaciones típicas.

A la izquierda, la figura presenta la idolatrada variación temporal de dosis ( $D$ ), tasa de dosis ( $\delta D/\delta t$ ) y cambio de tasa de dosis ( $\delta^2 D/\delta t^2$ ) causada por las explosiones en Hiroshima y Nagasaki; a la derecha se presentan las mismas variables para una situación típica de exposición ocupacional a la radiación.

Una de las pocas situaciones de exposición ocupacional que presenta cambios en la tasa de dosis es la exposición de tripulantes de aviones a los rayos cósmicos durante algunos minutos después de la salida y antes del aterrizaje, donde varían tanto la tasa de dosis como la tasa de cambio de la tasa de dosis. Pero el cambio es protractado en el tiempo y, además, los datos epidemiológicos disponibles para estas cohortes son mínimos para estimar los efectos en la salud.

La ICRP ha informado que es consciente de que existen excepciones reconocidas a la suposición de una relación lineal entre probabilidad de efectos y dosis, independientemente de la tasa de dosis y de los cambios en la tasa de dosis. Pero aún juzga que, a los efectos de la protección radiológica, en el rango de dosis por debajo de aproximadamente 100 mSv, es plausible suponer que la incidencia de efectos perjudiciales puede aumentar en forma proporcional directa a un aumento de la dosis en los órganos y tejidos pertinentes, independientemente de la tasa de dosis y de

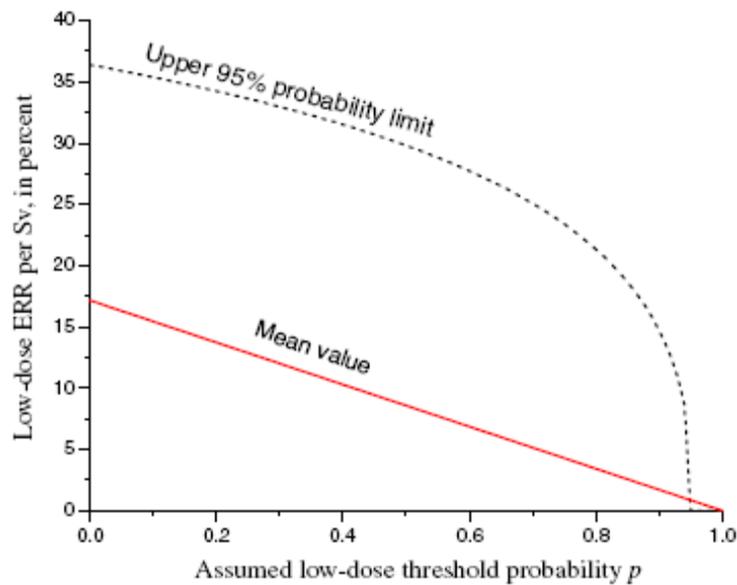
su posibles cambios. Por lo tanto, el paradigma recomendado por la ICRP se basa en la suposición de que a cualquier dosis, incluidas las dosis inferiores a unos 100 mSv, un incremento dado en la dosis producirá un incremento directamente proporcional en el riesgo (es decir, la probabilidad) de sufrir efectos atribuibles a la radiación. Las bases de la posición LNT de la ICRP se basa fundamentalmente en la asunción que el hecho de que los efectos sobre la salud no puedan atribuirse a dosis bajas de radiación no significa que el riesgo de radiación no pueda inferirse prospectivamente con fines de protección radiológica en situaciones de exposición planificada a dosis bajas. Estas dos premisas no son contradictorias, pero deben explicarse claramente para evitar que esta última pueda utilizarse como desencadenante de una sobreprotección contra la radiación que puede causar mas daño que beneficio a los trabajadores expuestos.

ICRP analizó profundamente el tema del riesgo de radiación en niveles bajos<sup>32</sup>, y concluyó que si bien observa que la existencia de un umbral de riesgo de dosis baja no parece improbable para los cánceres de ciertos tejidos relacionados con la radiación, la evidencia no favorece la existencia de un umbral de riesgo universal. Sobre la base de estudios de incertidumbre, extrapolación de dosis bajas y la hipótesis de la existencia de un umbral, y utilizando técnicas de incertidumbre cuantitativa, la ICRP analizó las consecuencias de permitir la posibilidad incierta de un umbral de riesgo.

Mediante el uso del enfoque de *reductio ad absurdum*, la ICRP concluyó que la posibilidad incierta de un umbral no reduce drásticamente las estimaciones centrales ni los límites superiores de probabilidad para el riesgo de dosis baja en comparación con los obtenidos utilizando un modelo sin umbral, a menos que la posibilidad de un umbral sea muy alta. Se llegó a esta importante conclusión analizando las implicaciones de un umbral de dosis baja posible, pero incierto, que se resumen en la dependencia del valor medio y el límite de probabilidad superior del 95 % del valor de probabilidad del umbral supuesto. La Figura 26 ilustra (en idioma inglés) la media y el límite superior de probabilidad del 95 % para el exceso de riesgo relativo (ERR) por unidad de dosis (en Gray) como funciones del umbral de probabilidad,  $p$ , dada (en ausencia de un umbral) una distribución de incertidumbre log-normal, con una media de 0,17 y un límite superior 95% límite de 0,36.

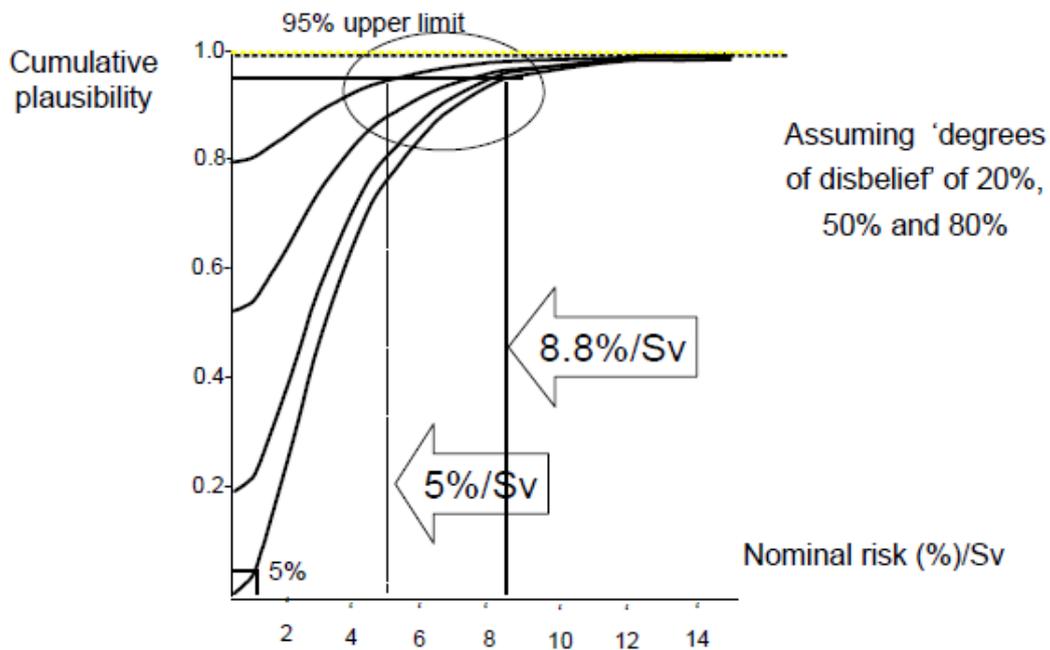
---

<sup>32</sup> ICRP, 2005. Low-dosis Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. Publicación ICRP 99. Ann. ICRP 35 (4)



**Figura 26: Media y el límite superior de probabilidad del 95 % para el exceso de riesgo relativo (ERR) por unidad de dosis (en Gray) como funciones del umbral de probabilidad,  $p$ ,**

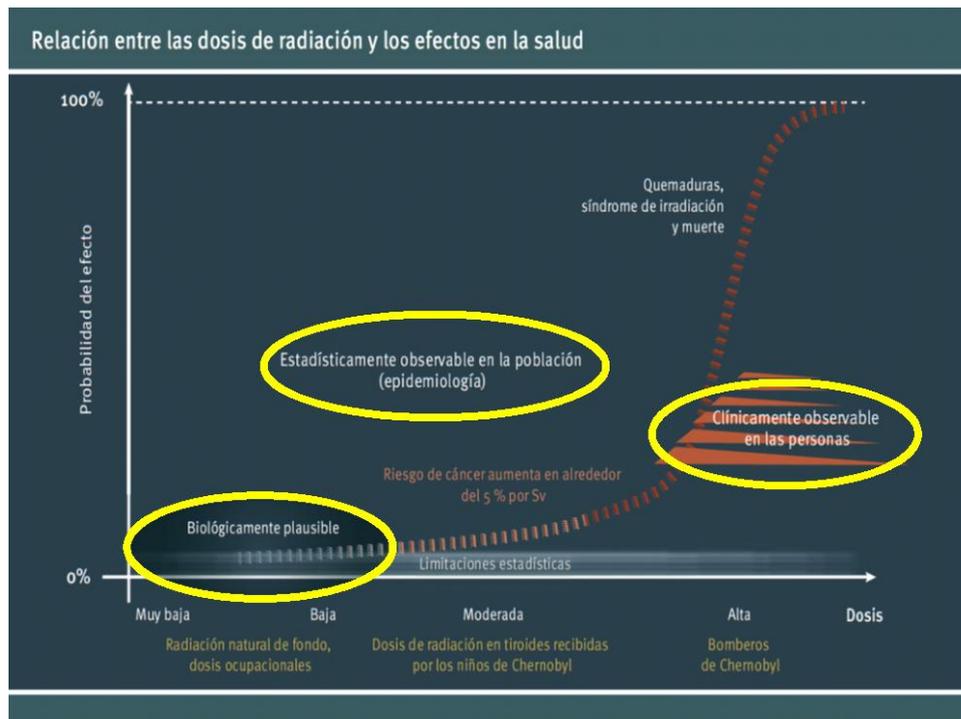
El valor medio de la ERR estimada por Gy es proporcional a  $(1 - p)$  para un umbral de probabilidad  $p$  conocido y proporcional a  $(1 - E(p))$  para un umbral de probabilidad incierto  $p$  con un valor esperado  $E(p)$ . El efecto sobre el límite superior de probabilidad del 95 % es menos drástico, a menos que la probabilidad supuesta de un umbral sea alta. Como se muestra en la Figura 26, el límite superior disminuye con el aumento de  $P$ , pero no tan abruptamente como la media hasta que  $p$  se acerca al nivel de probabilidad del límite superior, por ejemplo alrededor de 0,85 en el caso de un límite del 95 %. Obviamente, el límite inferior del 95% (el percentil 5 de la distribución) es cero para  $p \geq 0,05$ . La Figura 27 ilustra (en idioma inglés) diferentes “grados de creencia (o incredulidad)” sobre un umbral de riesgo aplicado a la distribución acumulativa de probabilidad, convirtiéndolo en una distribución acumulativa de plausibilidad. Puede verse que el límite superior plausible para el umbral, de 8%/Sv, cambia muy poco a medida que aumenta la incredulidad. Para una gran incredulidad, tan alta como el 80 %, el límite superior es 5 %/Sv, es decir, igual al coeficiente de riesgo nominal utilizado en las normas internacionales de protección radiológica.



**Figura 27: Diferentes “grados de creencia (o incredulidad)” sobre un umbral de riesgo aplicado a la distribución acumulativa de probabilidad, convirtiéndolo en una distribución acumulativa de plausibilidad**

El razonamiento tiene, sin embargo, una laguna: se basa en la presunción de linealidad, que es al final lo que intenta demostrar. Es decir, hay una retroalimentación epistemológica en el razonamiento. Pero esta es la base para el uso de un coeficiente de riesgo nominal de alrededor del 5% por Sv como una consideración prudente para fines de protección radiológica. En efecto, sobre esa base, la ICRP desarrolló la denominada “probabilidad nominal ajustada por daño” por coeficiente de dosis unitaria, cuyo valor es de alrededor del 5 % por Sievert [Sv] de dosis. Las restricciones de dosis con fines de protección radiológica actualmente se recomiendan implícitamente sobre la base de un factor de riesgo de 0,005 % por milésima de Sievert [una milésima de Sievert se denomina miliSievert o mSv]. Cabe señalar que, si bien el coeficiente de 5% por Sievert es matemáticamente equivalente al de 0,005% por mSv, estos dos factores son epistemológicamente muy diferentes. El primero se basa en datos medidos y el segundo en juicios de expertos conjeturales.

Para comprender mejor esta diferenciación epistemológica es conveniente repasar la relación dosis-respuesta teórica que se derivaría del paradigma. La misma ha sido sintetizada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) como se muestra en la Figura 28.



**Figura 28: Relación dosis-respuesta simplificada**

Las dosis se expresan como:

- 'altas dosis' (alrededor de un Sv o miles de mSv) de dosis efectiva;
- 'dosis moderadas' (alrededor de cien mSv);
- 'dosis bajas' (alrededor de diez mSv); o,
- 'dosis muy bajas' (alrededor de un mSv).

Cabe recordar que la dosis de fondo natural promedio mundial es de 2,4 mSv por año. Los valores de fondo altos típicos podrían rondar los 10 mSv por año, y se han encontrado valores de fondo naturales muy altos en algunas áreas del mundo donde están incluso por encima de 100 mSv por año.

Las probabilidades se expresan en porcentajes entre 0% y 100%, donde:

- 100%, corresponde a la certeza de que el efecto ocurrirá; y,
- 0%, corresponde a la certeza de que el efecto no ocurrirá

Cabe señalar que las probabilidades son de dos tipos distinguibles:

- probabilidades frecuentistas, que están en el área de dosis alta, basadas en evidencia; es decir, sobre la existencia veraz y comprobable de los efectos de las radiaciones en la salud, y se definen como el límite de la

frecuencia relativa de incidencia del efecto en una serie de estudios epidemiológicos certificables; y,

- probabilidades subjetivas (a veces también denominadas confusamente "bayesianas"), que se encuentran en el área de dosis baja, expresadas como una posible expectativa de que pueden ocurrir efectos de la radiación en la salud, y se cuantifican mediante una creencia personal o el juicio de un experto; es decir, no justificado por la frecuencia o la propensión a que los efectos ocurran realmente a tales niveles de dosis.

Tanto las probabilidades frecuentistas como las subjetivas son matemáticamente compatibles pero epistemológicamente muy diferentes: la primera se basa en evidencia fáctica; el segundo se basa en conjeturas subjetivas.

También hay que destacar la importancia de distinguir entre:

- observaciones diagnosticadas y verificadas de efectos en la salud de trabajadores individuales y estimaciones de efectos en cohortes de trabajadores expuestos, que permitan que se atestigüe su ocurrencia por profesionales calificados y, por lo tanto, que permita atribuir dichos efectos sin ambigüedades a las situaciones de exposición que los generaron y;
- proyecciones teóricas de efectos en la salud, cuya ocurrencia es factible pero no verificable, es decir, aquellas proyecciones que solo permiten alguna inferencia conjetural de riesgos.

Dado el estado actual del conocimiento, los efectos de la radiación en la salud de trabajadores expuestas a la radiación solo se pueden atribuir con confianza si fueron diagnosticados y atestiguados por un especialista en radiopatología. Estos efectos '*deterministas*' suelen ser agudos y ocurren temprano en individuos expuestos a altas dosis de radiación. Pueden ocurrir si la dosis excede un cierto valor de umbral que normalmente es en dosis altas.

En la región de las dosis bajas y medias, actualmente no existe una forma objetiva de determinar los efectos en la salud de trabajadores individuales que sean atribuibles a la radiación, porque por el momento no hay biomarcadores que permitan esa determinación. Colectivamente, los aumentos en la incidencia de fondo de los efectos sobre la salud asociados con la exposición a la radiación pueden determinarse como resultado de estudios epidemiológicos en una cohorte de trabajadores expuestos.. Pero, las incertidumbres estadísticas y epistémicas hacen que cualquier determinación fáctica de tal daño sea inviable cuando las dosis son bajas.

De la discusión anterior, se puede concluir que actualmente hay dos dominios en la relación dosis-efecto; a saber,

- 1) un dominio por encima de un cierto rango de dosis, en el área de dosis moderada y alta, donde se puede reunir suficiente diagnóstico patológico o evidencia epidemiológica para atribuir a la radiación efectos deterministas en trabajadores individuales o efectos estocásticos en cohortes de trabajadores expuestos, respectivamente; y,
- 2) un dominio por debajo de este rango donde hay información biológica que sugiere la posibilidad de efectos en la salud que solo pueden conjeturarse en un riesgo inferido subjetivamente, por ejemplo, con fines regulatorios. En este dominio de dosis bajas y muy bajas, los riesgos solo se infieren por juicios expertos pero subjetivo de los profesionales radioproteccionistas.

La epistemología en torno a la atribución de efectos fácticos a la exposición a la radiación frente a la inferencia de riesgo conjetural es crucial para el debate laboral sobre la percepción de bajas dosis de radiación, entre otras cosas porque no se ha explicado explícitamente a los trabajadores y sus representantes. Los límites epistemológicos en torno a las ciencias de la radiación, que esclarecen el paradigma de la protección

radiológica, ha sido ampliamente debatido en la literatura<sup>33, 34, 35, 36, 37</sup> y recientemente ha sido abordado por el OIEA<sup>38</sup>.

Esta situación ha resultado en un dilema para los reguladores. La naturaleza aleatoria de los efectos estocásticos de la radiación, junto con el paradigma recomendado por la ICRP y establecido en las normas de seguridad internacionales e intergubernamentales, hacen imposible derivar una distinción clara entre "seguro" y "peligroso". Esto ha creado dificultades para explicar el control de los riesgos de radiación, por pequeños que sean, y ha sido una de las principales causas de preocupaciones por la exposición de los trabajadores a la radiación. La principal implicación del paradigma de la ICRP y de las normas de seguridad internacionales e intergubernamentales consiguientes es que se asume cierto riesgo, a pesar de que no se haya probado en los trabajadores ningún efecto real sobre la salud de los niveles bajos de dosis de radiación regulados por la normativa internacional.

### **El significado de la expresión ‘*lineal sin umbral*’ (LNT)**

---

<sup>33</sup> González, A.J., 2011. Epistemology on the attribution of radiation risks and effects to low radiation dose exposure situations. *Int. J. Low Radiation*, Vol. 8, No. 3, 2011.

<sup>34</sup> González A. J., 2014. Clarifying the Paradigm on Radiation Effects & Safety Management: UNSCEAR Report on Attribution of Effects and Inference of Risks. *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.46, No.4, pp 467-474, August, 2014.

<sup>35</sup> González A. J., 2014. Clarifying the Paradigm For Protection Against Low Radiation Doses: Retrospective Attribution of Effects vis-à-vis Prospective Inference of Risk. *Radiation Protection in Australasia* Vol. 31, No. 2, pp. 2-12, 2014.

<sup>36</sup> Patricia Wieland, P. and González, A. J. , 2018. Protection against Exposure to Low-dose Radiation: An Evolving Paradigm Sustaining Regulatory Decisions. In the Scientific Conference on “Applicability of Radiation Response-Models to Low Dose Protection Standards,” Cosponsored by the American Nuclear Society and Health Physics Society, Pasco, Washington State, USA; September 30-October 3, 2018.

<sup>37</sup> Gonzalez, A.J., 2017. Attributions of health effects to radiation vis-à-vis inference of radiation risk: ICRP recommendations and UNSCEAR reporting. In A International Joint Conference RADIO 2017. V Congresso Brasileiro de Proteção Radiológica, VI Congresso de Proteção Contra Radiações de Países de Língua Portuguesa e VII Congresso Internacional de Radioproteção Industrial. Organizado pela Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica em cooperação com a Agência Internacional de Energia Atômica, Sociedade Portuguesa de Proteção contra Radiação e ABENDI. Cidade de Goiânia; 25 - 29 September 2017.

<sup>38</sup> IAEA, 2022. Attribution of Radiation Health Effects and Inference of Radiation Risks: Consideration for Application of the IAEA. Safety Standards Series [IAEA Preprint] International Atomic Energy Agency, Vienna, 2022.

Un desafío para el futuro es clarificar la expresión que se ha utilizado, y se sigue utilizando, para describir el paradigma supuesto según las discusiones previas. Esta suposición ha pasado a conocerse como **LNT** (acrónimo de la expresión ‘*lineal sin umbral*’ en el idioma inglés), un acrónimo que ha sido interpretado de diversa manera por los profesionales involucrados en la protección radiológica ocupacional como se discutirá más adelante. Quizás debiera destacarse que el paradigma LNT se desarrolló inicialmente para ser adecuado a la protección operativa práctica para situaciones de exposición ocupacional donde pueden estar involucradas obligaciones laborales internacionales legalmente vinculantes.

Pero el origen intelectual de LNT quizás deba ser buscado en los influyentes trabajos realizados por H. J. Muller<sup>39, 40</sup> en los años 20-30’s, quien, mediante experimentos de irradiación de moscas de la fruta, concluyó que la relación entre dosis y daño era lineal, sin umbral. Por sus conclusiones se le otorgó un Premio Nobel<sup>41</sup>, lo que le proporcionó una gran notoriedad, y un respaldo de seguimiento a su modelo lineal por parte de la mayoría de los primeros profesionales radioproteccionistas y aun de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América a mediados de la década de 1950<sup>42</sup>. Aunque puede haber habido otros factores además del trabajo inicial de Muller que entraron en juego, su trabajo condujo directamente a la aceptación del modelo LNT (lineal sin umbral) por la naciente radiobiología. Por lo tanto, a pesar de las muchas advertencias en las recomendaciones de ICRP, LNT se ha adoptado en los estándares de seguridad internacionales y se ha utilizado casi universalmente dentro de la comunidad internacional de protección radiológica como una herramienta práctica para regular la exposición a la radiación.

Pero se está generando una gran controversia dentro de la comunidad de protección radiológica. Algunas investigaciones<sup>43</sup> junto con material de

---

<sup>39</sup> H.J. Muller, 1927. *Artificial transmutation of the gene*, Science 66 (1927) 84–87.

<sup>40</sup> H.J. Muller, 1930. *Radiation and genetics*, Am. Nat. 64 (1930) 220–251.

<sup>41</sup> H.J. Muller, 1946. *The Production of Mutations*, Nobel Lecture, 1946, 1946, Nobleprize.org, <http://www.nobelprize.org/nobel-prizes/medicine/laureates/1946>.

<sup>42</sup> National Academy of Sciences (NAS)/National Research Council (NRC), 1956. *The Biological Effects of Atomic Radiation (BEAR) A Report to the Public*, NAS/NRC, Washington, DC, 1956.

<sup>43</sup> Calabrese, E.J., 2022. *Linear non-threshold (LNT) fails numerous toxicological stress tests: Implications for continued policy use*. Chemico-Biological Interactions. 365 (2022)

información iniciado por la Health Physics Society<sup>44</sup>, brindan un apoyo considerable a la hipótesis que un engaño profesional puede haberse infiltrado en la adopción de la premisa LNT original de Muller.

Dado este trasfondo confuso, no es de extrañar que el significado del acrónimo LNT sea múltiple e impreciso. Pretende significar "*una relación dosis-respuesta lineal sin umbral de dosis*", pero existe ambigüedad en su comprensión precisa, con interpretaciones que incluyen lo siguiente:

- para algunos es una *premisa*; a saber, una suposición subyacente de que la radiación genera efectos en la salud en cualquier nivel de dosis en proporción a la dosis;
- para otros es una *hipótesis conjetural*; a saber, una suposición o propuesta de explicación de la relación entre los efectos sobre la salud y la dosis de radiación incurrida, que se hace sobre la base de pruebas limitadas como punto de partida para futuras investigaciones; y,
- para otros es un *modelo práctico*; es decir, una descripción simplificada de un fenómeno complejo, la que es útil solo para fines operativos prácticos.

Estas diversas concepciones de la LNT han calado en las diferentes comunidades profesionales involucradas en el tema. Las comunidades profesionales relevantes han utilizado LNT con diferentes denotaciones y esta ha generado mucha confusión entre las partes afectadas por la exposición ocupacional, trabajadores en primer lugar, pero también empleadores y responsables gubernamentales.

:

Hay cuatro especialidades profesionales principales centradas en el estudio de los efectos de la radiación en la salud de los trabajadores y en su protección, a saber: la *radiobiología*, la *radiopatología*, la *radioepidemiología* y la *radioprotección*. LNT es visto por estas diversas comunidades profesionales con denotaciones muy diversas

### *Radiobiología*

Los radiobiólogos son expertos cuyos estudios se centran en los mecanismos que generan cambios biológicos atribuibles a la exposición a la radiación (p. ej., evaluación de la progresión de cambios moleculares causados por la radiación a través de las células, tejidos y órganos de los trabajadores expuestos). Los radiobiólogos, entonces, pueden proporcionar

---

<sup>44</sup> Health Physic Society, 2022. *The History of the Linear No-Threshold (LNT) Model Episode Guide*. <http://hps.org/hpspublications/historylnt/episodeguide.html>

información científica sobre los mecanismos de inducción de los efectos de la radiación en la salud y, mas aun, pueden dar fe de la exposición a la radiación en trabajadores mediante el uso de indicadores biológicos (lo que se denomina dosimetría biológica). Pero no pueden atestiguar la ocurrencia de efectos finales en la salud ni de trabajadores individuales expuestos ni en la de cohortes de trabajadores expuestos.

Para los radiobiólogos, LNT nació, y en muchos se mantiene, como una premisa que postula que, a exposiciones a cualquier nivel de dosis, un incremento dado en la dosis producirá un incremento directamente proporcional en la probabilidad de incurrir efectos celulares que evolucionarían hacia tumores malignos o efectos hereditarios atribuibles a la exposición a la radiación. .

La primera suposición radiobiológica fue que las principales interacciones de la radiación con la materia viva eran efectos de interacción directos e indirectos "dirigidos" al ADN del núcleo celular, y que causaba mutaciones que podrían evolucionar hacia efectos perjudiciales asociados, tales como tumores malignos cuando la mutación original ocurría en células somáticas o efectos hereditarios cuando ocurrían en células germinales.

Sin embargo, la investigación biológica en las últimas décadas ha incrementado la comprensión de cómo la radiación interactúa con complejidades no lineales del tejido vivo. En consecuencia, es importante profundizar un poco más en los aspectos biológicos de la exposición a la radiación a niveles bajos, ya que el desarrollo de una premisa con base científica para actualizar/reemplazar la premisa LNT solo puede lograrse y aceptarse por la amplia comunidad de profesionales de la salud radiológica cuando se comprendan profundamente los procesos biológicos detallados.

La investigación detallada de la biología de la radiación en las últimas décadas ha revelado muchos efectos secundarios, incluidos los siguientes:

- *Inestabilidad genómica* inducida por radiación, en la que si una sola célula es irradiada y sobrevive, puede producir células hijas que, a lo largo de generaciones, tienen un número creciente de alteraciones en sus genomas, aunque las propias células hijas no hayan sido irradiadas;
- *Respuesta adaptativa*, o la capacidad comprobada de células, tejidos o incluso un organismo completo para resistir mejor el daño por estrés causados por la exposición a la radiación, si ha habido una exposición previa a una menor cantidad de estrés. Este fenómeno se

observa en todos los organismos en respuesta a varios agentes citotóxicos diferentes, incluida la exposición a la radiación;

- *Efectos de vecindad*, a saber, la capacidad de células irradiadas de transmitir manifestaciones de daño a células vecinas no irradiadas;
- *Efectos abscopales*, que se dice que ocurren si hay una respuesta significativa en un tejido que está físicamente separado de la región del cuerpo expuesta a la radiación;
- *Factores clastogénicos* inducidos, que resultan de una gran cantidad de evidencia de que el plasma sanguíneo de animales y humanos irradiados puede contener "factores clastogénicos" capaces de inducir daño cromosómico en células no expuestas.

En los orígenes de la radiobiología, existía una preocupación por los efectos hereditarios, es decir, los efectos que podrían observarse en la descendencia nacida después de que uno o ambos padres hubiesen sido irradiados antes de la concepción, y el tema fue estudiado en profundidad. Tales efectos hereditarios se han observado en algunas especies de la fauna pero no se han visto en humanos.

### Radiopatología

Los ***radiopatólogos*** son expertos que pueden diagnosticar y atestiguar la atribución a situaciones de exposición ocupacional el resultado final de enfermedades inducidas por la radiación en trabajadores expuestos. Estos expertos diagnostican sobre la base de su experiencia profesional y también utilizando muestras de laboratorio de tejido corporal con fines diagnósticos o forenses. Su campo de competencia y posibilidad de diagnóstico, atestación y atribución se limita a los efectos deterministas, y por tanto sólo a situaciones que conlleven a dosis elevadas.

Para los radiopatólogos, el modelo LNT no es ni aparente ni necesaria, ni como premisa, ni como hipótesis, ni como conjetura, ni como modelo. Los radiopatólogos buscan efectos diagnosticables en trabajadores individuales que hayan estado expuestos a dosis de radiación de nivel suficiente como para que esos efectos se hagan evidentes para el diagnóstico. La relación dosis-respuesta es una empuñada curva sigmoidea que presenta un umbral *de facto* de dosis debajo del cual los efectos no se manifiestan.

Para un radiopatólogo, por debajo del umbral de dosis los efectos de la radiación, no son ni diagnosticables, ni atestables, ni atribuibles.

Se reitera, sin embargo, que los radiopatólogos pueden utilizar muestras de bioensayos especializados (tales como muestras hematológicas

y citogenéticas) como indicadores biológicos de que ha ocurrido una exposición a la radiación, incluso a dosis por debajo del umbral. No obstante, la presencia de tales indicadores biológicos no significa necesariamente que el expuesto experimentará efectos en la salud debido a la exposición.

### Radioepidemiología

Los *radioepidemiólogos* son expertos que usan estadísticas médicas (específicamente las estadísticas de epidemias) para estimar la prevalencia de efectos en la salud que podrían estar asociados con la radiación en cohortes de trabajadores expuestos (no analizan individuos sino cohortes de individuos expuestos).

La incidencia de fondo de los efectos estocásticos esperados de la exposición a la radiación suele ser relativamente alta (Cerca de un cuarto de la población experimentará una malignidad 'natural' en su vida). Es por ello que los radioepidemiólogos aspiran a cuantificar aumentos de dicha incidencia en una cohorte después de su exposición a la radiación. Pero esta cuantificación tiene limitaciones estadísticas obvias y también epistémicas. Esta limitación restringe las posibilidades de estimaciones epidemiológicas de los efectos estocásticos de la radiación después que una cohorte es expuesta a radiación. Es por ello que la competencia de los radioepidemiólogos para la estimación y certificación de la ocurrencia de efectos estocásticos en una cohorte debería, en principio, estar restringida a situaciones en las que se verifica una clara epidemia en esa cohorte, es decir, donde los cambios en la incidencia de los efectos pueden observarse y medirse (como fue el caso en la cohorte de Hiroshima y Nagasaki). Sin embargo, muchos radioepidemiólogos han extendido sus estimaciones a la región de dosis bajas conjeturando que las epidemias que podrían cuantificar en dosis altas también ocurren en dosis bajas, a pesar de que tal epidemia no se puede observar y probar sino solo conjeturar. UNSCEAR ha estado evaluando estudios epidemiológicos de cáncer y enfermedades cardiovasculares durante años<sup>45</sup>. y así bien ha reconocido estas limitaciones de la radioepidemiología ha utilizado datos de estudios en los que no se ha constatado una epidemia. En los últimos años, UNSCEAR realizó una

---

<sup>45</sup> UNSCEAR, 2006. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. 'Effects of Ionizing radiations' . Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer and Annex B: Epidemiological evaluation of cardiovascular disease and other non-cancer diseases following radiation exposure. Sales No. E.08.IX.6,n ISBN: 978-92-1-142263-4. UN, New York, 2006

reevaluación para inferir el riesgo de cáncer a la exposición a tasas de dosis bajas de fuentes ambientales<sup>46</sup>.

Para los radioepidemiólogos, entonces, LNT es una hipótesis, una conjetura epidemiológica, por la cual los cambios en la incidencia de fondo de los efectos nocivos asociados con la radiación, tales como las neoplasias malignas, que se han observado y cuantificado en situaciones de exposición a la radiación a dosis relativamente altas administradas a tasas de dosis relativamente altas y con cambios sustanciales en la tasa de dosis, se presume que ocurren igualmente en situaciones de exposición a la radiación que involucran dosis bajas y tasas de dosis baja y con pocos cambios en la tasa de dosis.

Esta suposición se hace a pesar de que no se pueden obtener pruebas epidemiológicas en tales situaciones debido a limitaciones estadísticas intrínsecas y también epistémicas.

En resumen, para la radioepidemiología, LNT significa que la incidencia de efectos en altas dosis, tasa de dosis, y cambio de tasa de dosis, que está respaldada con evidencia epidemiológica, sigue siendo la misma en situaciones de bajas dosis, tasa de dosis y cambios en la tasa de dosis, a pesar de la ausencia de evidencia epidemiológica para estas situaciones de exposición.

### *Radioprotección*

Los *radioproteccionistas* brindan orientación para la protección de los trabajadores frente a la exposición a la radiación sobre la base de atestaciones de los radiopatólogos y conjeturas e inferencias sobre riesgos de radiación sobre la base de la información proporcionada fundamentalmente por radioepidemiólogos y también por radiobiólogos..

Para los radioproteccionistas, LNT representa un modelo, es decir, una descripción simplificada de la realidad, que es práctico para gestionar la protección radiológica ocupacional operativa. Entre otras virtudes operacionales, permite ejercer la protección contra dosis adicionales independientemente del nivel de dosis acumulada.

---

<sup>46</sup> UNSCEAR, 2017. UNSCEAR 2017 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Annex B: Epidemiological studies of cancer risk due to low-dose-rate radiation from environmental sources. Sales No. E.18.IX.1, ISBN: 978-92-1-142322-8,. e-ISBN: 978-92-1-362680-1. UN, New York, 2017

Es decir que para los radioproteccionistas, el modelo LNT, proporciona un enfoque de protección radiológica ocupacional operativa viable. Si este modelo no se utilizara para la protección de los trabajadores, conllevaría a asignar diferentes protecciones para un mismo aumento de dosis, dependiendo de la dosis acumulada. Esto inevitablemente podría generar discriminación entre los trabajadores, lo cual está impedido por la legislación laboral internacional vigente.

## **La clarificación del concepto de riesgo de la radiación**

Una vez aclarada la conclusión existente sobre el LNT, un desafío remanente para el futuro es clarificar a los trabajadores que quieren decir los científicos cuando utilizan el término ‘riesgo’, en particular cuando se refieren al ‘riesgo de la radiación’.

La palabra "riesgo" puede significar muchas cosas diferentes para el público en general y para los trabajadores en particular, incluidos los profesionales.

A continuación se presenta una breve descripción de este concepto en relación con la radiación, el que ha sido ampliamente discutido a nivel internacional<sup>47</sup>.

Para la comunidad profesional, el riesgo se define formalmente en las normas de seguridad como<sup>48</sup>:

- la probabilidad de que ocurra un efecto específico en la salud de una persona o grupo como resultado de la exposición a la radiación, o
- la media matemática (valor esperado) de una medida apropiada de una consecuencia específica (generalmente no deseada), o
- una magnitud de atributos múltiples que expresa riesgo, peligro o posibilidad de consecuencias dañinas o perjudiciales asociadas con exposiciones reales o potenciales.

---

<sup>47</sup> González, A.J., 2019. The Concept of Radiation Risk. Prepared at the request of the NEA(OECD)'s Committee on Radiological Protection and Public Health. Presented at the 2nd NEA Workshop on Stakeholder Involvement: Risk Communication; Session on “Risk Communication: What and Why”; at the OECD Conference Centre, Paris, France, 24-26 September 2019 (with the title: Communicating the Concept of Radiation Risk: The Challenge of Separating Facts from Conjectures, Attribution from Inference).

<sup>48</sup> IAEA, 2007. IAEA safety glossary : terminology used in nuclear safety and radiation protection. 2007 Edition. STI/PUB/1290. ISBN 92-0-100707-8; International Atomic Energy, Vienna, Agency, 2007.

Estos son conceptos muy diferentes y el uso de todos ellos por parte de los profesionales ciertamente no ha ayudado a facilitar la comprensión de los trabajadores del riesgo en dosis bajas.

Mas aun para los trabajadores no especializados el significado de riesgo puede ser muy diferente. El público en general a menudo asocia el riesgo con una variedad de connotaciones que incluyen: oportunidad, plausibilidad, probabilidad, prospecto, peligro, azar, apuesta, aventurar, amenaza, miedo, etc.

Históricamente, la cuantificación del “riesgo” se formó sobre un análisis retrospectivo de la experiencia real sobre frecuencias fácticas de ocurrencias pasadas y se cuantificó con una probabilidad “frecuentista”; es decir, una probabilidad calculada a partir de las frecuencias de ocurrencia real del evento riesgoso. Sin embargo, con el tiempo, el concepto de “riesgo” evolucionó, en particular para la protección radiológica, y ahora también se suele denominar probabilidad subjetiva de ocurrencia de eventos “riesgosos”, que es el resultado de un juicio de expertos, a veces basado en estimaciones de probabilidades frecuentistas pero de diferentes situaciones. Debido en gran parte a la falta de datos fácticos sobre los efectos en la salud de dosis bajas, se hacen conjeturas extrapolando estimaciones de situaciones de exposición a dosis altas de radiación a situaciones de dosis bajas.

El concepto de probabilidad frecuentista fue y sigue siendo la base para las estimaciones epidemiológicas y debería proporcionar la base científica fundamental para la protección radiológica a dosis inferiores a los umbrales de dosis de los efectos deterministas. Inicialmente, las estimaciones radioepidemiológicas generalmente se realizaban utilizando datos sobre las frecuencias de los efectos reales en la salud ocurridos de hecho como consecuencia de situaciones pasadas de exposición a la radiación. Tales eventos generalmente involucraron dosis relativamente altas y tasas de dosis altas y muy cambiantes, como las que afectaron a la cohorte de sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki. Desafortunadamente, esta práctica radioepidemiológica frecuentista se extendió a situaciones de exposición a dosis bajas de radiación en las que no se puede identificar una prevalencia de enfermedad radioinducida, es decir, cuando no existen frecuencias que proporcionen una base para la asignación de probabilidades frecuentistas. Estas situaciones normalmente se considerarían epistemológicamente fuera del dominio de la radioepidemiología. Sin embargo, se han utilizado extrapolaciones de la experiencia frecuentista para proporcionar estimaciones y, con la ayuda de juicios subjetivos de expertos, los riesgos de radiación teóricos se han inferido como una

probabilidad subjetiva que cuantifica el incremento potencial sobre la prevalencia de fondo de los efectos.

Sobre esta base, los riesgos radiológicos conjeturales se expresan en radioepidemiología como exceso de riesgo absoluto, es decir, la tasa de enfermedad en una población expuesta menos la tasa de enfermedad en una población no expuesta; también se expresan como exceso de riesgo relativo, es decir, la tasa de enfermedad en una población expuesta dividida por la tasa de enfermedad en una población no expuesta menos uno. Además de estas dos denominaciones principales, una gran cantidad de terminología relacionada con el riesgo conjetural se usa de alguna manera confusa en radioepidemiología.

La confusión provocada por las diferentes connotaciones de la palabra “riesgo” ha calado en el campo de la protección radiológica. Las recomendaciones de la ICRP utilizan la palabra riesgo de manera prolífica y de formas disímiles, sin describir específicamente el significado del término cada vez que se utiliza. En particular, las recomendaciones definen un riesgo ajustado por detrimento conjetural como la probabilidad de ocurrencia de un efecto estocástico en la salud, modificado para permitir los diferentes componentes del detrimento a fin de expresar la gravedad de la(s) consecuencia(s). El detrimento es un concepto teórico multidimensional que incluye los siguientes componentes estocásticos: probabilidad de cáncer fatal atribuible, probabilidad ponderada de cáncer no fatal atribuible, probabilidad ponderada de efectos hereditarios graves y duración de la vida perdida si ocurre el daño.

El paradigma entonces se basa en un modelo de dosis de riesgo ponderado por radiación estimado por extrapolación de datos de dosis alta, sin un umbral de dosis. Como se detallo anteriormente a ICRP utilizó un análisis de incertidumbre cuantitativa formal para combinar los componentes inciertos de la estimación de de incurrir en cánceres relacionados con la radiación con y sin permitir la posibilidad incierta de un umbral de dosis baja universal. Si bien la ICRP no considera improbable la existencia de dicho umbral de dosis baja en la relación riesgo-dosis, el paradigma actualmente concluye que los datos epidemiológicos disponibles no favorecen un umbral universal para inferir prospectivamente riesgos a dosis bajas.

En un Anexo a su publicación 60, la ICRP llevo a cabo un análisis sofisticado del concepto de riesgo<sup>49</sup>, pero lamentablemente ese análisis no

---

<sup>49</sup> ICRP, 1991. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annex C. Ann. ICRP 21 (1-3).

incluyó la distinción crucial entre probabilidades frecuentistas y subjetivas. Esas recomendaciones incluyeron la formulación de cantidades precisas que definen el riesgo, incluida la probabilidad total de muerte (utilizada como referencia) y las tasas de probabilidad de muerte condicional e incondicional. Estas cantidades eventualmente se convertirían en varios tipos de estimaciones que se pueden usar para calcular el riesgo de por vida, es decir, la probabilidad de que las personas desarrollen o mueran a causa de una enfermedad específica causada por una exposición a la radiación. Estas estimaciones incluyen: el exceso de riesgo de por vida, que es la diferencia entre la proporción de personas que desarrollan o mueren a causa de la enfermedad en una población expuesta y la proporción correspondiente en una población similar sin exposición; el riesgo de muerte inducida por exposición, que se define como la diferencia en una tasa de muerte por causa específica para las poblaciones expuestas y no expuestas de una condición dada y una edad dada en el momento de la exposición, como una causa adicional de muerte introducida en una población; el riesgo de pérdida de esperanza de vida, que describe la disminución de la esperanza de vida debido a la exposición de interés; y el riesgo atribuible a lo largo de la vida, que es una aproximación del riesgo de muerte inducida por la exposición y describe el exceso de muertes (o casos de enfermedad) durante un período de seguimiento con tasas de fondo de población determinadas por la experiencia de individuos no expuestos. El riesgo atribuible a lo largo de la vida es utilizado por la ICRP para estimar los riesgos a lo largo de la vida y para establecer restricciones de dosis, pero lamentablemente no se indica claramente la entidad conjetural absoluta de tal cantidad.

Debe enfatizarse que el carácter distintivo de la interpretación frecuentista del riesgo, frente a las interpretaciones subjetivas, no se reconoce específicamente en el paradigma ICRP. Las probabilidades frecuentistas que surgen de los estudios epidemiológicos de cohortes expuestas a dosis, tasas de dosis y cambios de tasa relativamente altos se utilizan para calcular estimaciones subjetivas del riesgo de radiación para situaciones de exposición a dosis y tasas de dosis bajas y constantes, y no se hace una distinción específica entre estas dos probabilidades. .

En resumen: el riesgo demostrable derivado de la exposición a la radiación para los individuos ocurre solo por la exposición a dosis altas de radiación (el dominio determinista de dosis mas alto que el umbral para efectos determinísticos) y para las poblaciones a dosis altas y medias (el dominio epidemiológico).

## **La imputación legal de daño ocupacional por radiación**

Otro desafío importante para el futuro es resolver el conundrum creado con la imputación legal de daño ocupacional por situaciones de exposición de trabajadores.

Por imputación entendemos las acciones fundadas en la ley para la asignación de daño por radiación a los empleadores responsables de situaciones de exposición a la radiación. La imputación es precursora de los conceptos derivados de acusación, demanda, enjuiciamiento y juzgamiento.

La figura 29 resume la situación posible

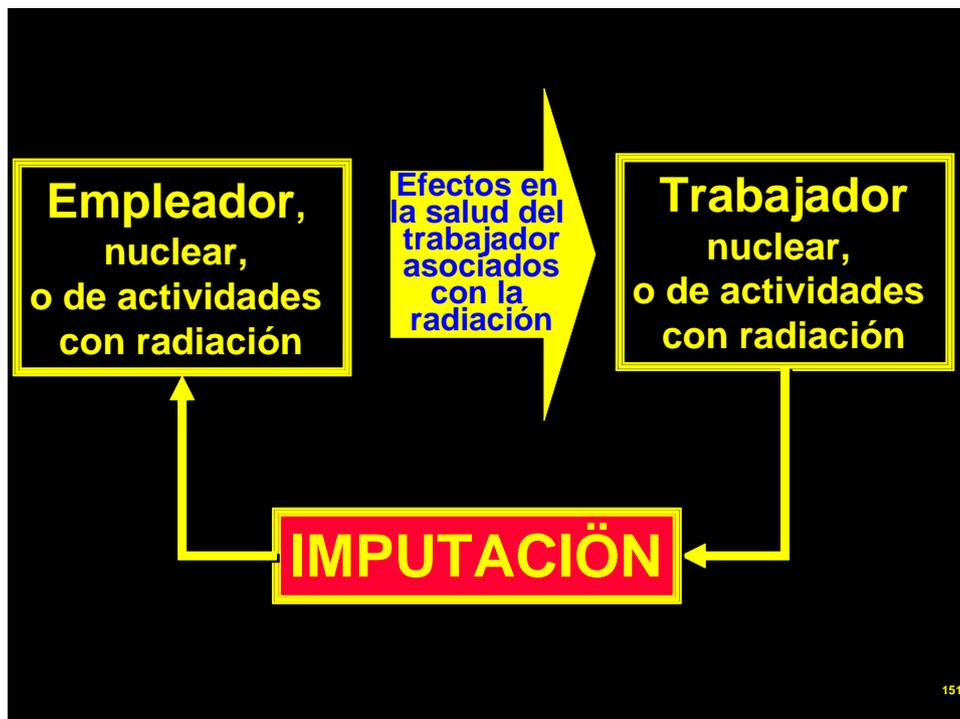


Figura 29: Imputación de daño ocupacional por exposición a la radiación

Las actividades que involucran el uso de la energía nuclear y de sus subproductos, tales como las sustancias radioactivas y las radiaciones ionizantes (o radiación en general) han generado desafíos legales complejos. Una verdadera disciplina, el derecho nuclear, fue creada de facto y ha evolucionado en el tiempo para abordar problemas jurídicos complicados que no tienen antecedentes históricos. El derecho nuclear es un campo en constante evolución, un cuerpo de leyes altamente especializado que impregna toda la industria nuclear, permitiendo el uso seguro, protegido y pacífico de la tecnología nuclear.

Entre los muchos problemas jurídicos que ha abordado el derecho nuclear, la imputación legal del daño por radiación a situaciones de

exposición a la radiación es uno de los más complejos, y pese a que se ha discutido en numerosos foros internacional su solución aun presenta aspectos controversiales.

Uno de las primeras acometidas para resolver el problema ocurrió en el Simposio sobre accidentes nucleares, responsabilidades y garantías organizado por la Agencia de la Energía Nuclear de la OECD en Helsinki, Finlandia, del 31 de agosto al 3 de septiembre de 1992, es decir hace más de un cuarto de siglo<sup>50</sup>. Allí se abordó el tema del dilema de la causalidad de las consecuencias radiológicas para la salud inculpadas al accidente Chernobyl<sup>51</sup>. Desde ese momento se hicieron muchos esfuerzos para lograr cierto consenso sobre el problema pero con resultados esquivos.

El Organismo Internacional de Energía Atómica acaba de publicar un libro de libre acceso acerca del debate mundial sobre derecho nuclear<sup>52</sup>, en el que discutimos en detalle el problema y su posible solución<sup>53</sup>.

Las acciones judiciales factibles derivadas de situaciones de exposición a radiaciones, es decir los procedimientos o demandas legales, basadas en daños por radiación, generalmente requieren dos elementos para tener éxito; atribución e imputación, a saber:

- En primer lugar, se debe establecer un vínculo causal; un determinado efecto sobre la salud debe atribuirse a una determinada exposición a la radiación utilizando pruebas fácticas objetivas.

---

\*Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina; Académico titular de las Academias Nacional de Ciencias de Buenos Aires, Argentina de Ciencias del Medioambiente, Argentina del Mar, e Internacional de la Energía Nuclear; Miembro del Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de la Radiación Ionizante; Miembro de la Comisión de Estándares de Seguridad del Organismo Internacional de Energía Atómica.

<sup>50</sup> Nuclear Energy Agency (1993). *Nuclear Accidents-Liabilities and Guarantees (Accidents Nucleaires- Responsabilites Et Garanties)*. Proceedings of the Helsinki Symposium (Compte rendu du Symposium d'Helsinki) 31 August - 3 September 1992 Organised jointly by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-Operation and Development; Paris, 1993.

<sup>51</sup> González, A.J. (1993). *The Radiological Health Consequences of Chernobyl: The Dilemma of Causation*. Op cit.<sup>1</sup>; pp 25-55.

<sup>52</sup> Internacional Atomic Energy Agency (2022). *Nuclear Law - The Global Debate*. Published by t.m.c. asser press, The Hague, The Netherlands. Produced and distributed for t.m.c. asser press by Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Editor: International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2022. ISBN 978-94-6265-494-5 ISBN 978-94-6265-495-2 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-94-6265-495-2>

<sup>53</sup> Gonzalez, A:J: (2022). *Legal Imputation of Radiation Harm to Radiation Exposure Situations*. Op.cit.<sup>3</sup>. Chapter 7.

- En segundo lugar, debe haber una imputación, lo que significa que debe determinarse la responsabilidad de alguien por el daño de la radiación.

En un contexto legal, la imputación significa responsabilizar por el daño físico (efectos nocivos reales o potenciales) atribuibles a la exposición a la radiación a otra persona (física o jurídica), por ejemplo un trabajador expuesto a la radiación a su empleador o un miembro del público a un operador responsable de una instalación nuclear.

Si bien la 'atribución', que significa establecer el vínculo fáctico entre un incidente nuclear y un efecto sobre la salud, y la 'imputación', que significa atribuir responsabilidad por el daño por radiación, están estrechamente relacionadas en el sentido de que ambos intentan establecer un vínculo causal, a menudo se han utilizado como sinónimos, causando confusión.

Cuando se establece la atribución entre la exposición y el efecto, la imputación es crucial para permitir acciones legales posteriores, tales como la acusación, la acusación y el enjuiciamiento, si se trata de un elemento criminal, o simplemente iniciar una acción civil si se puede demostrar otra forma de negligencia. El objetivo final para el demandante es obtener la reparación de los daños sufridos.

Tanto la atribución como la imputación generan controversia y dos desafíos básicos dominan el tema, a saber:.

- El primer desafío es la atribución de efectos específicos para la salud a una situación específica de exposición a la radiación, lo que requiere que expertos calificados demuestren que una ocurrencia fáctica puede vincularse causalmente, es decir, sin lugar a dudas, con el daño por radiación.
- El segundo desafío es de carácter más formal; cómo proceder con acciones legales relevantes consistentes con la práctica legal en la jurisdicción o sistema legal aplicable.

En incidentes de alta exposición con efectos dañinos obvios, resolver estos desafíos es relativamente sencillo. Por otro lado, surge un desafío en situaciones que involucran dosis de radiación bajas o muy bajas. Este tema está ampliamente discutido en la literatura, pero aún no se ha encontrado una solución clara, y mucho menos un consenso entre expertos.

Como se discutió anteriormente, la atribución de efectos sobre la salud a la radiación no significa más que relacionar de hecho los efectos

sobre la salud de las exposiciones a la radiación con pruebas objetivas e indiscutibles de cualquier situación de exposición a la radiación dada. Al establecer la atribución, generalmente no puede haber duda razonable entre la causa y el efecto en la salud. Al alejarse de un escenario de dosis alta y alta probabilidad, hacia los casos en que se trata de dosis bajas o más bajas, las líneas se vuelven borrosas y la atribución directa, como se viò, puede ser problemática. Tal como se demostró anteriormente, en escenarios de dosis bajas, a menudo se debe *inferir* el vínculo causal conjetural, lo que significa que se debe llegar a una conclusión razonable sobre la base de la evidencia y la experiencia. A diferencia de la atribución, la inferencia implica el proceso de sacar conclusiones de conjeturas subjetivas que implican conclusiones indirectas basadas en observaciones y razonamientos sobre riesgos de radiación, al tiempo que permiten un elemento de incertidumbre.

La atribución del daño por radiación es un componente esencial de cualquier acción legal. Un perito calificado profesionalmente debe proporcionar evidencia clara ante los tribunales sobre la ocurrencia de efectos de radiación, causados por un incidente de radiación, declarando formalmente que existe un efecto causal.

Evidentemente, no es necesario que un experto haya presenciado de primera mano el incidente que dio origen a un juicio relacionado con las radiaciones para que sea aceptable su peritaje, pero sí que sea un especialista en efectos de las radiaciones y capaz de ofrecer, sin duda razonable, una opinión pericial después de considerando la cronología de los hechos y la ocurrencia fáctica de las causas y los efectos.

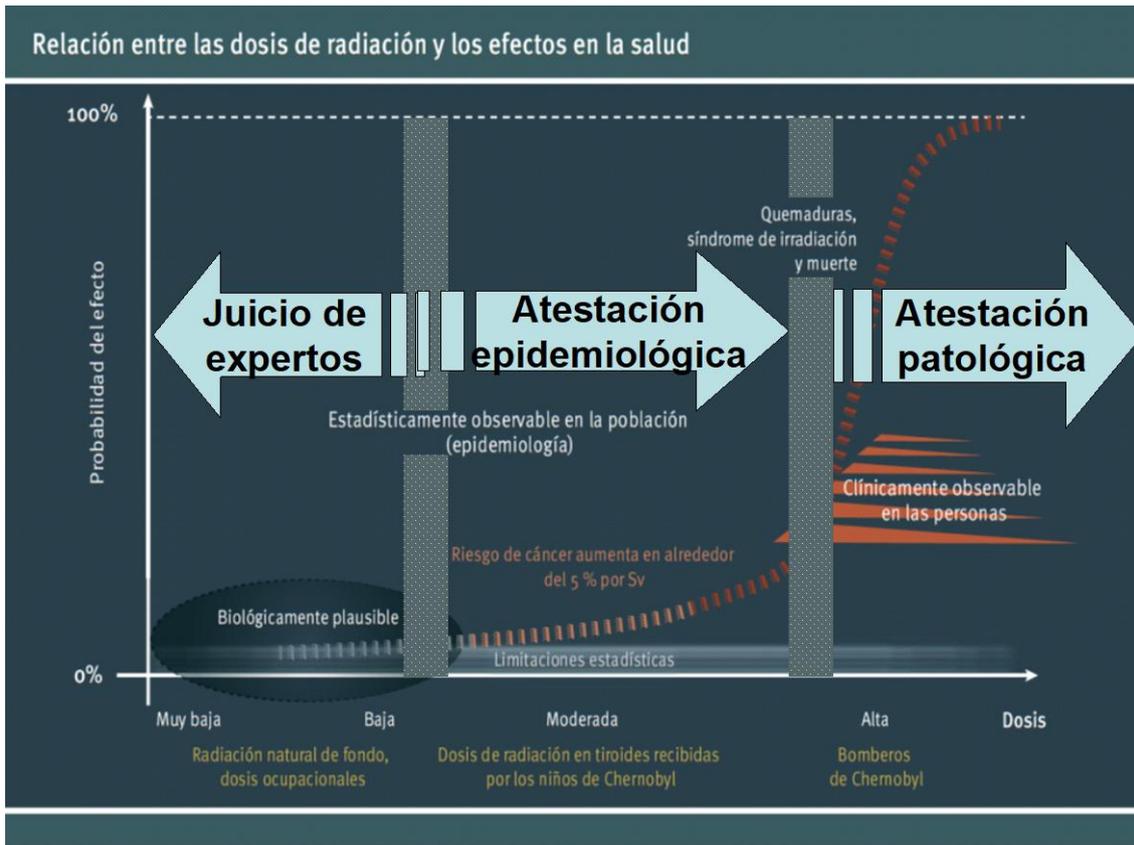
Fundamentalmente, el tipo de experto en el que confiaría un demandante para presentar pruebas en el caso está relacionado con la dosis y la tasa de dosis, o más precisamente, la relación dosis-respuesta relacionada con el incidente. Por supuesto, el peritaje está relacionado con la observabilidad de los hechos y, por lo tanto, con la verificación científica de los efectos, que van desde la atribución hasta la inferencia.

En un escenario de dosis alta, lo más probable es que los efectos sean clínicamente observables y diagnosticables en individuos expuestos y, por lo tanto, fácilmente atribuibles por un radiopatólogo experto calificado. En la región de dosis moderadas, los efectos no son directamente atribuibles a los individuos porque pueden ocurrir efectos similares debido a otras causas, pero son estadísticamente consistentes con la incidencia de fondo del efecto que se ha estudiado en ciertas poblaciones. Esta incidencia se

puede cuantificar matemáticamente como una probabilidad frecuentista puede ser y atestiguada por un perito radioepidemiólogo.

Los radiopatólogos pueden atestar la ocurrencia de efectos basándose en diagnósticos individuales de efectos resultantes de la exposición a altas dosis. Los radioepidemiólogos se basan en probabilidades frecuentistas de la ocurrencia de efectos en cohortes de poblaciones expuestas a dosis medianas y altas, las que se pueden determinar con cierto grado de certeza. En el rango de dosis bajas a muy bajas, la mayoría de los efectos no son observables ni atribuibles y, por lo tanto, su ocurrencia no se puede comprobar con certeza razonable. Sin embargo, se puede argumentar que los efectos de un incidente de dosis baja pueden ser biológicamente plausibles y, por lo tanto, se podría inferir un riesgo y un posible daño por radiación a través del juicio personal de expertos en radio-protección, o radioproteccionistas, mediante la asignación de probabilidades subjetivas. Las probabilidades ofrecidas por los radioproteccionistas en estos casos de dosis bajas no son objetivas como las probabilidades frecuentistas demostradas por los radioepidemiólogos, ya que están sesgadas hacia la opinión de expertos basada en la experiencia en lugar de hechos científicos indiscutibles.

La Figura 30 describe como radiopatólogos, radioepidemiólogos y radioproteccionistas pueden ejercer peritaje como expertos calificados en el contexto de una acción legal: los primeros atestiguando la ocurrencia real de efectos en la salud que se pueden diagnosticar en individuos; los segundos atestiguando la ocurrencia real de efectos en la salud de la radiación que se pueden estimar en cohortes de población utilizando estadísticas sobre la incidencia y distribución de enfermedades asociadas con la exposición a la radiación; y, los terceros infiriendo los riesgos de radiación a partir de la teoría y no de los hechos.



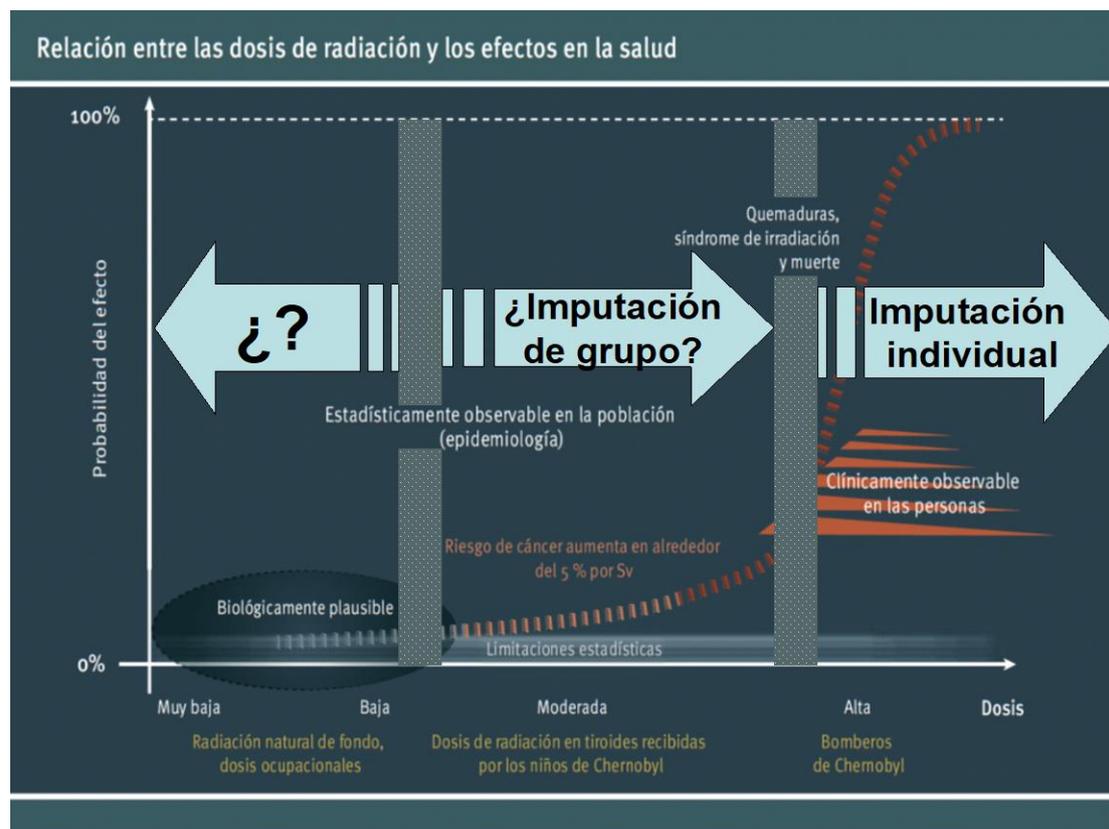
**Figura 30: Atestación profesional de los efectos de la radiación**

La capacidad de atribuir efectos en la salud a situaciones de exposición específicas y de atestiguar su ocurrencia por medio de peritos expertos calificados tiene una influencia directa en las posibilidades de éxito del litigio, es decir, si el daño por radiación se puede atribuir claramente a un incidente, imputar a las personas responsables y posteriormente indemnizar a las víctimas por un tribunal de justicia. Las lesiones físicas y los efectos nocivos infligidos por quienes han causado la exposición, si se prueban, permiten a los trabajadores expuestos a la radiación, o al público en general, entablar demandas contra los empleadores, los operadores de las instalaciones nucleares o incluso contra las autoridades reguladoras en caso de falta de supervisión o falta de eficacia en el control.

El campo legal, sin embargo, no es del todo homogéneo. Los marcos legislativos y reglamentarios que se ocupan de la atribución de los efectos de la radiación en la salud son heterogéneos, a veces incoherentes e inconsistentes entre países e incluso dentro de los países. Existe una línea divisoria importante entre los sistemas jurídicos basados en la legislación jurisprudencial y los que se basan en una legislación codificada detallada. Una comparación de la jurisprudencia excede el alcance de esta memoria, pero, a riesgo de ser demasiado simple, podríamos afirmar que los sistemas

legales jurisprudenciales que emplean un enfoque caso por caso son generalmente más flexibles y brindan un mayor grado de seguridad jurídica para el demandante. Las jurisdicciones que se basan en una legislación codificada no están sujetas a precedentes legales, lo que otorga un alto grado de autonomía al tribunal en la aplicación del estado de derecho, lo que puede conducir a resultados menos predecibles.

La Figura 31 intenta definir de manera genérica lo que sería factible al litigar daños imputados a situaciones de exposición a diferentes dosis de radiación teniendo en cuenta las diferentes posibilidades de atestación.



**Figura 31: Posibilidades de imputación**

En la región de dosis alta, los efectos sobre la salud individual son clínicamente atribuibles y verificables y, por lo tanto, la imputación del daño sufrido por el individuo afectado es relativamente sencilla. La atribución es clara; la imputación a menudo vincula directamente al individuo que sufre el daño por radiación con la persona responsable y una demanda clásica, es decir una acción legal civil de una persona o entidad contra otra persona o entidad, tiene una alta probabilidad de éxito.

En la región de dosis moderada, el aumento de la incidencia de efectos nocivos en grupos de población es epidemiológicamente atribuible

y verificable y, por lo tanto, es factible la imputación a la persona responsable. Cuando se trata de estos efectos de dosis moderadas, es más lógica una imputación colectiva o de grupo, a través de una demanda colectiva donde los demandantes son un grupo de personas que presentan un reclamo colectivo.

En la región de dosis bajas, el daño por radiación no es atribuible ni comprobable a nivel individual o colectivo, pero se puede inferir cierto riesgo de radiación. Desde una perspectiva legal, las afirmaciones basadas en la exposición a dosis bajas o tasas de dosis bajas son inciertas. Dado que es posible que el daño por radiación aún no se haya presentado o, si está presente, podría eliminarse con el tiempo de la supuesta situación de exposición, un tribunal podría tener dificultades para establecer, más allá de toda duda razonable, un vínculo causal entre la situación de exposición y cualquier efecto en la salud supuestamente sufrido por el demandante. El problema que aquí se presenta es de objetividad. No se puede atestiguar la causa, el resultado nocivo sólo se infiere considerando un riesgo teórico y quizás la probabilidad de ocurrencia y cualquier juicio basado en estos hechos ambiguos tendrían un alto grado de subjetividad.

El consenso científico sobre los efectos en la salud atribuibles a la exposición a la radiación, consenso que en sí mismo no es del todo uniforme y, francamente, sigue evolucionando, debería servir de base para el desarrollo de instrumentos legales a fin de tener un tratamiento más uniforme de las acciones legales.

En particular, la cuestión de la imputación legal cuando se consideran tasas de dosis bajas debe considerarse cuidadosamente. Este tema aún no ha cristalizado en ningún tipo de enfoque universal, en gran parte dadas las diferencias fundamentales entre los sistemas legales basados en casos y los codificados. La comunidad científica está ansiosa por brindar a los expertos legales orientación basada en la comprensión progresiva de la atribución de los efectos de la radiación después de situaciones de exposición a la radiación.

Dadas las diferencias culturales, normativas y legislativas entre países, se destacan dos objetivos fundamentales. Primero, parece imperativo fomentar un entendimiento legal común de causa y efecto cuando se trata de situaciones de daño por radiación asociado a una situación de exposición a la radiación. Desde una perspectiva científica, esto parece factible y, si la comunidad jurídica lo adopta, mejoraría en gran medida la seguridad jurídica. En segundo lugar, y quizás aún más optimista, el establecimiento de un consenso científico y legal universal para dirigir la

aplicación de la ley en cualquier situación reduciría aún más la incertidumbre e incluso podría beneficiar el desarrollo y la armonización de diferentes legislaciones nacionales. En realidad, sin embargo, 'la ley' no es un concepto uniforme y las naciones, los tribunales y los jueces, los fiscales y los abogados siempre querrán analizar los hechos de cualquier caso individual, evaluar las diferencias y las excepciones a las reglas si las hay y , en general, afirman su razonamiento independiente.

## **Magnitudes y Unidades**

Otro desafío importante para el futuro es clarificar una serie de temas asociados a las magnitudes y unidades que se utilizan para controlar la exposición de los trabajadores a la radiación.

Existen al momento innumerables magnitudes para controlar la exposición ocupacional. Hay magnitudes: físicas (actividad, dosis absorbida); para la protección (dosis equivalente, dosis efectiva); operacionales (equivalente de dosis); extensivas, como la energía (la dosis colectiva); e, intensivas, como la temperatura (la dosis). Consecuentemente, también existen un gran número de unidades: becquerelios y curies; grays y rads; sieverts y rems; personas.grays y personas.rads; personas.sieverts y personas.rems.

Este complejo sistema de magnitudes y unidades ha generado problemas y merece ser revisado en el futuro. Se ha presentado un diagnóstico de las posibles dificultades con el sistema internacional de magnitudes y unidades de protección y se han descrito posibles desafíos para abordar las posibles dificultades con el sistema<sup>54</sup>, el que también resume las críticas al sistema, incluidas las lecciones recopiladas después del accidente de Fukushima<sup>55</sup> y las reflexiones sobre el sistema de la metrología<sup>56, 57, 58</sup>.

---

<sup>54</sup> González, A.J., 2021. *Emerging challenges for the International System of Quantities and Units for Radiation Protection*. In IRPA15 - 15th International Congress of the International Radiation Protection Association. Enhanced Topic Session-ET2-Units and Measurement Quantities: Implications of Recommendations by ICRP and ICRU. Seoul, Korea; January 18-22, 2021.

<sup>55</sup> A. J. González, M. Akashi, J. D. Boice Jr, M. Chino, T. Homma, N. Ishigure, M. Kai, S. Kusumi, J. K. Lee, H. G. Menzel, O. Niwa, K. Sakai, W. Weiss, S. Yamashita and Y. Yonekura, 2013. Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident. *J. Radiol. Prot.* 33 [2013] 497–571.

<sup>56</sup> Peixoto, J. G. P.; Potiens M. P; McEwen, M.; Cunha, P. G.; González, A.J.; de Almeida, C. E. V.; Spano, F.; Pereira, W. W; Leite, S. P.; Delgado, J.U.; Costa, P. R.; Nersissian, D. Y.; and Salata, C. with J. G. Pereira Peixoto (Editor), 2016. *Ionizing Radiation Metrology*. ISBN: 978-

La Comisión Internacional de Unidades y Medidas de Radiación (ICRU) ha reaccionado para abordar esos desafíos<sup>59, 60</sup>. La ICRU informa que las magnitudes operativas y medibles para la protección contra la radiación externa complementan las magnitudes de protección, que, por su naturaleza, no son medibles. Las magnitudes operativas se utilizan para evaluaciones prospectivas y retrospectivas de campos de radiación, mediante medición o cálculo. Los dosímetros personales y los instrumentos para el monitoreo de áreas están diseñados para indicar las magnitudes operativas y se calibran de manera rutinaria con campos de radiación estándar que pueden relacionarse con las magnitudes operativas.

Las definiciones de las magnitudes operativas para la dosis equivalente personal y ambiental fueron definidas en los Informes 39 (1985), 43 (1988) y 51 (1993) de la ICRU y, para fotones en el rango de energía de 70 keV a 3 MeV, dan estimaciones aceptables de la magnitud de protección dosis efectiva definida por la ICRP y establecida en estándares internacionales. A energías de fotones más bajas y más altas, las magnitudes operativas definidas en los Informes ICRU 39 - 51 muestran, respectivamente, sobreestimaciones y subestimaciones significativas de las magnitudes de protección. Además, los coeficientes de conversión dados para las magnitudes operativas se han calculado solo para un subconjunto limitado de partículas: fotones, electrones y neutrones.

El nuevo informe de la ICRU recomienda definiciones alternativas de las magnitudes operativas que son mejores estimadores de las magnitudes de protección que las dadas anteriormente. Los coeficientes de conversión de las magnitudes del campo físico (fluencia y, para fotones, kerma en aire) se dan para las siguiente partículas en amplios rangos de energía: fotones, electrones, neutrones, protones, muones, piones e iones de

---

85-921219-0-7. Departamento de Metrologia, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear; Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

<sup>57</sup> A. J. González, C. E. Veloso de Almeida, and F. Spano, 2016. *Radiation Protection Quantities and Units: Desirable Improvements*. In *Op. cit.* Peixoto et al, 2016; Chapter V.

<sup>58</sup> A. J. González, 2020. *Análises sobre o sistema internacional de grandezas e unidades de proteção contra radiação* (in Portuguese). At the VII Congresso Brasileiro de Metrologia das Radiações Ionizantes – CBMRI 2020. Virtual Format, 23 - 25 November, 2020 (in press).

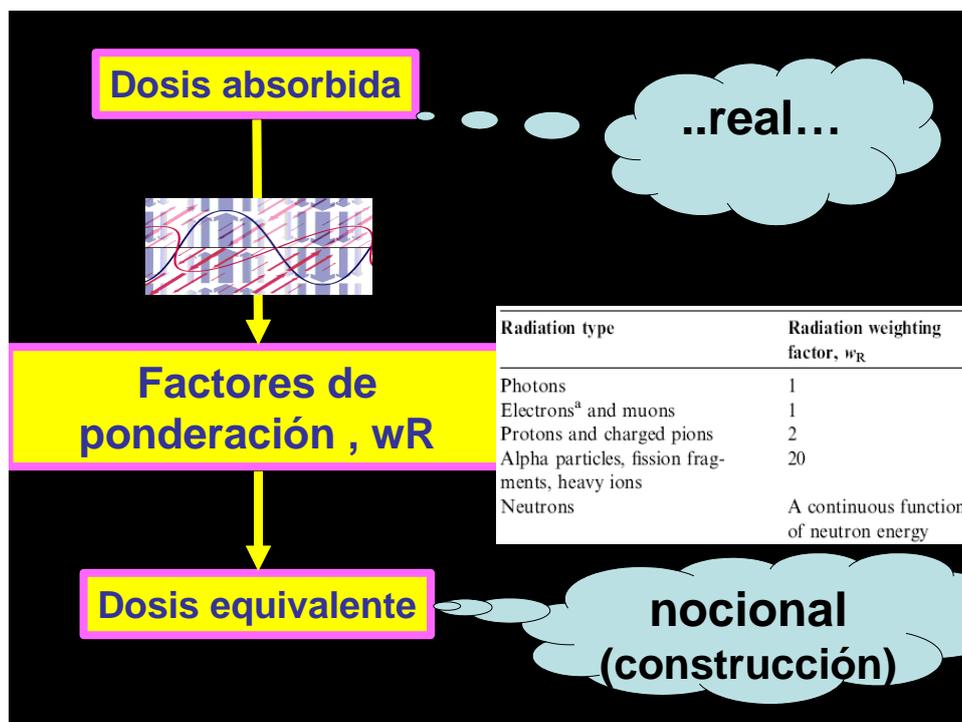
<sup>59</sup> ICRU Report 95, 2021. *Operational quantities for external radiation exposure*. J ICRU 2020;20:7

<sup>60</sup> H. G.Menzel, 2021. New Definitions of ICRU and ICRP Operational Quantities for External Radiation: Concept and Practical Implications. *Op-cit.* Enhanced Topic Session IRPA15.

helio. El informe recomienda que los fabricantes y desarrolladores de instrumentos trabajen para desarrollar dosímetros e instrumentos revisados que proporcionen mediciones precisas que cumplan con las nuevas recomendaciones. Y también recomienda que las autoridades internacionales y nacionales reconozcan la necesidad de un período de adopción gradual y prudente para equilibrar los costos de implementación con el beneficio de un sistema más coherente de magnitudes operativas, que representan la magnitud de protección en la medición.

Estas revisiones propuestas y publicadas por la ICRU y la ICRP, son bienvenidas, pero podrían ser insuficientes. Es que el sistema parece presentar algunos desafíos epistemológicos que también deben abordarse. Estos incluyen el uso de magnitudes y unidades comunes para: cuantificaciones distintas, por ejemplo la cuantificación de efectos de la radiación clínicamente observables, ó estadísticamente observables, ó biológicamente plausibles, tal como ha indicado UNSCEAR. Estos son diferentes conceptos, que podrían meritir una cuantificación con magnitudes y unidades distintas.

Este importante problema epistemológico se puede resumir en la Figura 32 compuesta de dos representaciones, las que detallan el desarrollo de las magnitudes que se utilizan actualmente en protección radiología, las que evolucionan desde una magnitud física real hasta una magnitud nocial parta finalizar en una magnitud conjetural..



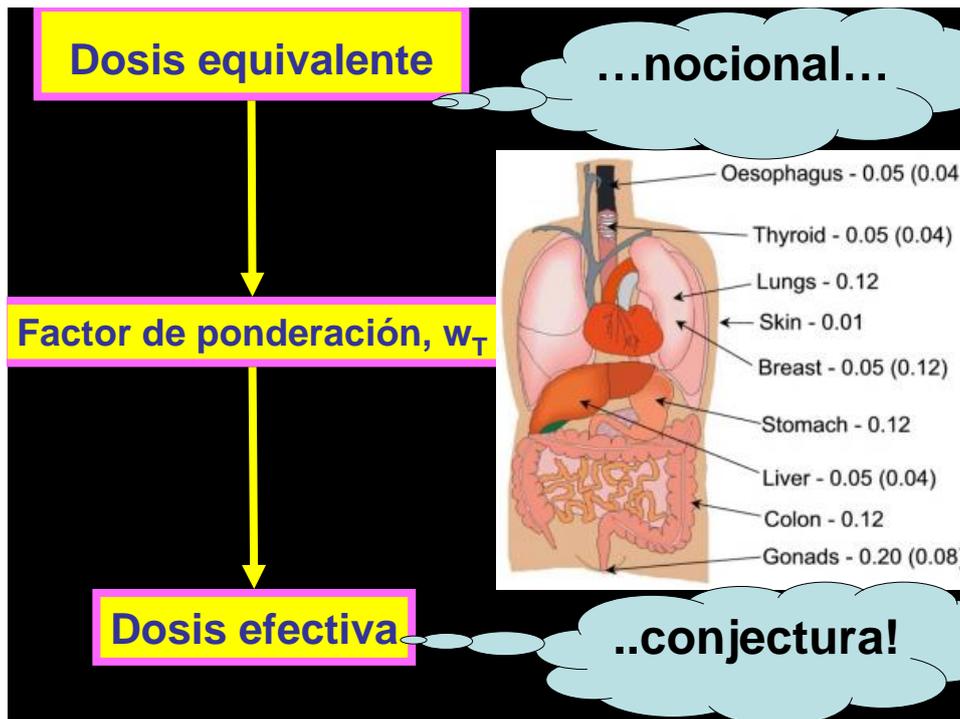


Figura 32: La epistemología de las magnitudes utilizadas en protección radiológica

Otro problema epistemológico es que la misma familia de magnitudes dosimétricas (sin salvedades) se utilizan como: magnitudes intensivas (por ejemplo la dosis) y magnitudes extensivas por ejemplo la dosis colectiva). Esto no sucede en otras áreas de la ciencia que requieren mensurabilidad y ha generado una gran confusión.

Finalmente, se debería abordar y corregir una deficiencia importante del sistema actual: las magnitudes y unidades actuales parecen ser ineficientes para la información y comunicación pública. Fallan en transmitir, de una manera completa, fácilmente comprensible y creíble, los efectos y riesgos de la radiación, y facilitan la generación efectos psicológicos asociados a la mala comprensión de la radiación.

En resumen se alienta a que las organizaciones internacionales e intergubernamentales relevantes consideren mejorar el actual sistema internacional de magnitudes y unidades no solo en sus evidentes deficiencias técnicas sino también en sus deficiencias epistemológicas y sus debilidades comunicacionales.

## La producción de energía eléctrica

Otro desafío muy importante es que se está generando un nuevo paradigma para la protección de los trabajadores dedicados a la producción de energía eléctrica.

Por iniciativa Argentina el UNSCEAR llevó a cabo un informe de las Naciones Unidas sobre la exposición a la radiación, especialmente la ocupacional, de las diferentes fuentes de energía eléctrica<sup>61</sup>. Si bien la exposición a la radiación a la que están sometidos los trabajadores debida a la producción de electricidad a partir de la energía nuclear ha suscitado interés desde que empezó a utilizarse esa tecnología, la exposición a la radiación derivada del empleo de otras tecnologías de generación de electricidad no había sido objeto de estudios tan exhaustivos. En su nuevo informe UNSCEAR llevó a cabo un análisis de las exposiciones incurridas por los trabajadores involucrados en distintas tecnologías de producción eléctrica tales como la energía nuclear; la combustión de carbón, gas natural, petróleo y biocombustibles; y la energía geotérmica, eólica y solar

UNSCEAR evaluó la exposición ocupacional ocasionada por los así llamados ‘ciclos de vida’ de cada fuente de energía. Por ejemplo, para la energía nuclear se incluyeron en el ciclo la extracción de uranio, el molido y los residuos de fábrica, el funcionamiento de las centrales nucleares y las actividades de reprocesamiento; en cuanto al ciclo de vida asociado a la combustión de carbón, se incluyeron la extracción de carbón, el funcionamiento de las centrales eléctricas de carbón (tanto modernas como convencionales) y los depósitos de las cenizas de carbón.

Con el fin de comparar los niveles de exposición, el UNSCEAR se centró en dos mediciones. En primer lugar, se midieron las dosis incurridas derivadas de la generación de electricidad a lo largo de un año a nivel mundial. La segunda medición se halló dividiendo las dosis pertinentes entre la cantidad de electricidad producida por cada tecnología.

UNSCEAR analizó la exposición debida a las diversas actividades en el ciclo necesario para *generar* energía eléctrica desde una fuente y, separadamente, las del ciclo necesario para *instalar potencia* eléctrica de una fuente.

Las conclusiones fueron sorprendentes. Para la generación de electricidad, UNSCEAR concluyó que el ciclo de carbón (de plantas de carbón modernas) contribuía en más de la mitad a la dosis. Por otro lado, el

---

<sup>61</sup> UNSCEAR, 2016. The UNSCEAR 2016 Report UN General Assembly (A/71/46 and Corr.1) and four scientific annexes. Annex B: Radiation exposures from electricity generation. UN, New York, 2016.

ciclo del combustible nuclear representó menos de la quinta parte. La contribución del ciclo del carbón procede de radionúclidos naturales (principalmente, radio, radón y sus descendientes radiactivos) derivados de la extracción de carbón, la combustión de carbón en las centrales eléctricas y los depósitos de cenizas de carbón. Del mismo modo, prácticamente la mitad de la exposición recibida por la población mundial asociada al ciclo del combustible nuclear procede de las emisiones de radionúclidos naturales derivadas de la extracción de uranio y las actividades de tratamiento. En cuanto al resto de las tecnologías, las siguientes que más contribuyeron a la exposición fueron la energía geotérmica y la combustión de gas natural. La Figura 33 presenta los valores numéricos comparativos entre la generación de electricidad por la combustión de carbón y por energía nuclear.

CARBÓN			NUCLEAR		
Fuente	Dosis colectiva [sievert persona]	Dosis colectiva normalizada [sievert persona/GWañño]	Fuente	Dosis colectiva [sievert persona]	Dosis colectiva normalizada [sievert persona/GWañño]
Extracción del carbón	<b>370</b>	<b>0.4</b>	Extracción del uranio	<b>53</b>	<b>0.2</b>
Operación de plantas viejas	<b>780</b>	<b>0.8</b>	Operación de Centrales Nucleares	<b>68</b>	<b>0.2</b>
Operación de plantas nuevas	<b>60</b>	<b>0.1</b>			
Depósitos de cenizas	<b>240</b>	<b>0.2</b>	Reproceso miento	<b>7.6</b>	<b>0.03</b>

**Figura 33: Valores numéricos comparativos de dosis entre la generación de electricidad por la combustión de carbón y por energía nuclear**

Pero la mayor sorpresa derivada del estudio de UNSCEA provino de la evaluación de las dosis debidas a la instalacion de potencia electrica. Esta evaluación concluyó que. Las mayores dosis recibidas por los trabajadores por unidad de electricidad potencial generada procede, con diferencia, del ciclo de la energía solar, seguida del ciclo de la energía eólica. Ello se debe a que esas tecnologías requieren grandes cantidades de metales del grupo de las tierras raras y a que la extracción de minerales de baja ley expone a los trabajadores a radionúclidos naturales durante el laboreo. Por ejemplo: los paneles solares utilizan telurio y el telurio es tres veces más raro que el

oro; y, el neodimio un elemento extremadamente raro en la naturaleza se utiliza para las instalaciones de energía eólica que emplea el polvo magnético de neodimio-hierro-boro [NdFeB] para fabricar los imanes permanentes para turbinas eólicas. La Figura 34 presenta la comparación de dosis causadas por la construcción de plantas generadoras de electricidad, normalizada por unidad de electricidad generada.

<b>Dosis colectiva causada por la construcción de plantas generadoras de electricidad</b> (normalizada por unidad de electricidad generada)	
<b>Tecnología</b>	<b>Dose colectiva normalizada causada por la extracción y procesamiento de minerales necesarios para la construcción (Sv persona/GW a)</b>
Solar (PV)	0.8
Eólica	0.1
Gas natural	0.01
Nuclear	0.02
Carbón	0.01
Biomasa	0.01

**Figura 34: Comparación de dosis causadas por la construcción de plantas generadoras de electricidad, normalizada por unidad de electricidad generada.**

¿Cuáles son entonces los nuevos desafíos presentados por estas estimaciones noveles?: En primer lugar, los profesionales de la protección radiológica deberían informar debidamente a las autoridades laborales sobre el impacto radiológico ocupacional de las diferentes fuentes de energía para producir electricidad; en segundo lugar, deberían demandar la regulación de la exposición a la radiación de todas las fuentes de energía eléctrica y no solo de la nuclear.

Se debería reconocer que existe un limbo legal en esta materia. El sistema legal de protección laboral que cubre la radiación de fuentes no nucleares de electricidad es o más débil que el régimen regulador nuclear o inexistente. No existe un régimen internacional que cubra estas exposiciones a la radiación. La mayoría de las autoridades reguladoras nucleares nacionales simplemente carecen de un mandato legal para regular estas actividades

En resumen, el informe de UNSCEAR debería generar un gran cambio en el paradigma de la protección radiológica ocupacional de los trabajadores involucrados en la producción de energía. Hasta ahora el foco ha estado puesto en los trabajadores de las centrales nucleares. Pero debería reenfocarse a los trabajadores de las otras industrias, especialmente a los mineros del carbón y de la producción de tierras raras. Muchos de estos trabajadores no disponen de medidas de protección.

### **Desafío concluyente**

El desafío concluyente es que se debería cambiar el foco de la protección radiológica ocupacional y centrarla en la protección de los trabajadores expuestos a la radiación natural. Las conclusiones de UNSCEAR al respecto son definitivas: las mayores dosis de radiación incurridas por los trabajadores son debidas a actividades que involucran la exposición a la radiación natural.

La estimación que había hecho el UNSCEAR hace algunos años era que el número total de los trabajadores monitoreados en su exposición a la radiación era de aproximadamente 23 millones en todo el mundo, de los cuales alrededor de 10 millones estaban expuestos a las fuentes artificiales. Un número muy grande pero desconocido de trabajadores estaba expuesto a la radiación natural a causa de sus trabajos. Tres de cada cuatro trabajadores expuestos a las fuentes artificiales trabajaban en el sector médico. La evaluación de las tendencias de las dosis incurridas efectiva muestra un aumento en la exposición por fuentes naturales, debido principalmente a la minería, y una disminución en la exposición por fuentes artificiales, debida principalmente a la adecuada implantación de medidas de protección radiológica. La Figura 35 resume la situación.

Tendencias mundiales de la exposición a radiación en el trabajo (en mSv)*				
Años	1970	1980	1990	2000
<b>Fuentes naturales</b>				
Tripulaciones de aeronaves	—	3.0	3.0	3.0
Miñeros del carbón	—	0.9	0.7	2.4
Otros miñeros**	—	1.0	2.7	3.0
Trabajadores de diversos sectores	—	6.0	4.8	4.8
<b>Total</b>	—	<b>1.7</b>	<b>1.8</b>	<b>2.9</b>
<b>Fuentes artificiales</b>				
Trabajadores en el ámbito de la medicina	0.8	0.6	0.3	0.5
Trabajadores de la industria nuclear	4.4	3.7	1.8	1.0
Trabajadores de otras industrias	1.6	1.4	0.5	0.3
Trabajadores de diversos sectores	1.1	0.6	0.2	0.1
<b>Total</b>	<b>1.7</b>	<b>1.4</b>	<b>0.6</b>	<b>0.5</b>
* Estimaciones de la dosis efectiva media que recibe un trabajador en 1 año.				
** Los miñeros que extraen uranio se incluyen entre los trabajadores de la industria nuclear.				

Figura 35; Tendencias en las dosis incurridas por los trabajadores

## EPILOGO

La protección radiológica ocupacional ha sido sin duda uno de los mayores sucesos en el campo de la protección de los trabajadores. Sin embargo aun presenta algunos desafíos para resolver

Corresponde sugerir propuestas para hacer frente a estos desafíos, A nivel internacional el OIEA y la OIT, en cooperación con los trabajadores, los empleadores y los representantes gubernamentales, podrían considerar emprender algunas acciones. Por ejemplo, se sugieren las siguientes alternativas:

- la OIT, en cooperación con el OIEA podría considerar iniciar un proceso para revisar y adaptar la Convención 115 a los nuevos desafíos;
- dado que la revisión de Convenciones adoptadas por los cuerpos legislativos de los países es a veces muy complicado, alternativamente, la OIT y el OIEA podrían considerar iniciar un proceso conjunto para convocar una Conferencia Diplomática para adoptar una Declaración sobre Protección Radiológica Ocupacional que aborde los problemas pendientes; y, finalmente, si ninguna de las alternativas anteriores es factible,
- el OIEA, en copatrocinio con OIT, podría considerar desarrollar y establecer un Código de Conducta sobre Protección radiológica Ocupacional que aborde esos problemas.

Finalmente debemos reiterar que el sistema internacional e intergubernamental vigente para la protección radiológica ocupacional es excelente y que todo cambio para mejorarlo debe hacerse con mucho cuidado.

El mejor ejemplo de esta excelencia es la comparación de lo que ocurre con la radiación no-ionizante.

Existe una gran dicotomía entre la protección contra las radiaciones ionizantes (IR) y la protección contra las radiaciones no ionizantes (NIR). Tal como hemos visto, el sistema de protección radiológica internacional e intergubernamental para las IR es: universal y consensuado; fundado en la ciencia aceptada internacionalmente acordada en el UNSCEAR; basado en un paradigma universalmente aceptado desarrollado a lo largo de los años por la ICRP; resuelto en un régimen intergubernamental de normas copatrocinado por todos los organismos internacionales pertinentes bajo los auspicios de la OIT y el OIEA; aplicado por obligaciones contraídas por los Estados; e, incluyendo disposiciones para aplicaciones prácticas apoyadas por todas las agencias internacionales relevantes. Para la protección contra NIR, solo existe un 'proxi' la Comisión Internacional de Protección contra la Radiación No Ionizante (ICNIRP), creada por IRPA en 1992. Después de 30 años, su trabajo no ha podido reemplazar el esfuerzo combinado de UNSCEAR, ICRP y las agencias intergubernamentales. Tales diferencias en los enfoques de protección entre IR y NIR van en contra de las bases éticas fundamentales de la profesión de los radioproteccionistas. El interés de las sociedades profesionales especializadas y de sus miles de miembros, es resolver esta brecha. Se necesitan respuestas claras a preguntas tan básicas como: ¿Cuál es la ciencia consensual respaldada internacionalmente sobre NIR? ¿Cuál es la base ética del paradigma de protección y los principios de

protección fácticos que se utilizan para NIR? ¿Cuál es el régimen intergubernamental de normas y obligaciones de seguridad para NIR? ¿Cuáles son las disposiciones para la aplicación global de dichas normas?

Parece haber llegado el momento de consolidar el sistema internacional e intergubernamental vigente para la protección radiológica ocupacional contra las radiaciones ionizantes y cerrar la brecha existente entre la protección contra IR y la protección contra NIR.