

ARTÍCULO ORIGINAL / ORIGINAL ARTICLE

**Protección contra la exposición a bajas dosis de radiación ionizante:  
Un paradigma en evolución. (Una aproximación a qué y cuánto es una dosis baja)**

**Protection against to low doses exposure of ionizing radiation:  
An evolving paradigm. (An approximation to what and how much is a low dose)**

Abel Julio González<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina. Buenos Aires, Argentina.

Autor de correspondencia: [abel\\_j\\_gonzalez@yahoo.com](mailto:abel_j_gonzalez@yahoo.com)

DOI: <https://doi.org/10.32480/rscp.2018-23-2.175-198>

Recibido: 03/10/2018. Aceptado: 18/11/2018.

**Resumen:** El objetivo es abordar la protección contra las situaciones de exposición a la radiación ionizante a dosis bajas y su dilema aparentemente irresoluble: ¿deberían las personas estar protegidas contra las situaciones de exposición a la radiación a dosis bajas ?, o, a la inversa, ¿deberían estas situaciones de exposición ser ignoradas o incluso bienvenidas?

Se describe el status actual de la protección radiológica para situaciones que involucren bajas dosis de radiación. El enfoque incluye: (i) un resumen de las respuestas científicas (principalmente de la radiobiología, la radioepidemiología y la radiopatología), así como de las recomendaciones y estándares de organismos internacionales; y (ii) una descripción del paradigma actual de protección radiológica que explora diversas interpretaciones, especialmente aquellas que han generado temor público de bajas dosis de radiación y sanciones injustificadas para la sociedad.

Se presentan nuevos desarrollos sugeridos actualmente para resolver el dilema, haciendo especial hincapié en un consenso internacional que se haya logrado en el más alto nivel científico dentro del sistema de las Naciones Unidas, el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR). El nuevo consenso distingue la atribución objetiva de los efectos en la salud a situaciones de exposición retrospectiva, versus la inferencia subjetiva del riesgo potencial de radiación de las situaciones de exposición prospectiva, y concluye que los incrementos en la incidencia de los efectos en la salud de las poblaciones no se pueden atribuir de manera confiable a situaciones de exposición a dosis bajas. Es así que la atribución objetiva de los efectos en la salud a las situaciones de exposición a dosis bajas (ya sean efectos negativos, positivos o neutros) cae fuera del alcance de las ciencias relevantes debido a las limitaciones epistemológicas. Para esas situaciones, la ciencia puede ayudar a proporcionar robustez para inferencias subjetivas de resultados probables, pero no para atribuir efectos.

Se concluye que los estándares de protección de dosis bajas deben basarse en decisiones legislativas y reglamentarias en lugar de en modelos científicos de respuesta a la radiación. Un paradigma internacional evolutivo de protección radiológica, basado en el consenso de la ONU, podría proporcionar una base para resolver el enigma de las dosis bajas y apoyar esas decisiones. La responsabilidad recae en los legisladores y reguladores más que en los científicos. El momento parece estar maduro: para que (i) los legisladores utilicen el concepto legal bien establecido de “de minimis non curat lex” y excluyan de la ley las situaciones de exposición a dosis bajas que no puedan ser reguladas, y (ii) los reguladores utilicen el viejo concepto de “minimis non curat prætor”



y eximan de las regulaciones las dosis derivadas de situaciones de exposición a dosis bajas que no justifiquen su control.

**Palabras clave:** radiación ionizante, dosis bajas, efectos estocásticos, estándares.

**Abstract:** The objective is to address the issue of protecting against situations of exposure to ionizing radiation at low doses and its seemingly intractable dilemma: should people be protected against situations of radiation exposure at low doses?, or conversely, should these exposure situations be ignored or even welcomed?

The current status of radiation protection is described for situations involving low radiation doses. The approach includes: (i) a summary of the scientific responses (mainly from radiobiology, radioepidemiology and radiopathology), as well as the recommendations and standards from international organizations; and (ii) a description of the current radiological protection paradigm that explores diverse interpretations, especially those that have generated public fear of low doses of radiation and unjustified sanctions for society.

New developments currently suggested to solve the dilemma are presented, with special emphasis on an international consensus that has been achieved at the highest scientific level within the United Nations system, the United Nations Scientific Committee for the Study of Atomic Radiation (UNSCEAR). The new consensus distinguishes the objective attribution of health effects to situations of retrospective exposure, versus the subjective inference of the potential radiation risk of prospective situations of exposure, and concludes that the increases in the incidence of health effects of populations can not be reliably attributed to low doses exposure situations. Thus, the objective attribution of health effects to low doses exposure situations (whether negative, positive or neutral) falls outside the scope of the relevant sciences due to epistemological limitations. For those situations, science can help providing robustness for subjective inferences of likely outcomes but not for attributing effects.

It is concluded that low dose protection standards should be based on legislative and regulatory decisions rather than on scientific models of radiation response. The evolving international paradigm of radiation protection, based on UN consensus, could provide a basis for solving the enigma of low doses and supporting those decisions. The responsibility rests with legislators and regulators rather than scientists. The moment seems to be ripe: for (i) legislators to use the well-established legal concept of "de minimis non curat lex" and to exclude from the law situations of exposure to low doses that can not be regulated, and (ii) regulators to use the old concept of "minimis non curat praetor" and exempt from regulations the doses from low-dose exposure situations that do not justify their control.

**Key words:** ionizing radiation, low doses, stochastic effects, standards.

## 1.- INTRODUCCIÓN

La protección contra la radiación ionizante en situaciones de exposición a dosis bajas parece haberse transformado en un dilema de difícil solución. Por un parte el paradigma internacional de protección radiológica se basa en la premisa que todas las personas deben estar protegidas contra la radiación, aun cuando las dosis sean bajas. Por otra parte, existe un creciente número de científicos que, a la inversa, sostiene que la protección a dosis bajas es innecesaria, que ha causado mucho daño colateral y que en definitiva las dosis bajas deberían ignorarse; incluso, algunos pregonan un efecto hermético, es decir beneficioso que se derivaría de la exposición a bajas dosis y por lo tanto sostienen que las dosis bajas deben ser bienvenidas.

El público y sus representantes políticos observa escéptico esta discusión. Mientras tanto la controversia ha causado ya mucho daño. Por un lado, se han abandonado prácticas beneficiosas para la humanidad por el hecho que podrían causar exposiciones a la radiación de bajo nivel; por el otro, se han implementado medidas de protección que han causado más daño que el se pretendía prevenir.

El objetivo de este trabajo es abordar este dilema. Se analizará el status de la situación y su evolución actual y se sugerirán soluciones.

### Status

#### *Desafíos de la protección contra la radiación a bajas dosis*

El desafío mayor de la protección contra la radiación a bajas dosis se relaciona con la comprensión de los efectos en la salud generalmente asociados a las exposiciones a dosis bajas. Estos efectos generalmente se conocen como efectos estocásticos y se identifican como enfermedades malignas tardías y efectos hereditarios generados por la exposición a la radiación, en los que la probabilidad de que se produzca un efecto, pero no su gravedad, se considera una función de la dosis de radiación que se incurre. La controversia principal radica en si existe o no una dosis umbral para la inducción de esos efectos.

Ha habido y continúa habiendo una controversia prolongada sobre los efectos estocásticos entre los científicos (ver por ejemplo (1)). Hay desacuerdos entre los radiobiólogos, es decir, entre los científicos que estudian los efectos de la radiación en los organismos vivos. Hay argumentos entre los radioepidemiólogos, es decir, entre los científicos que estudian la incidencia y la distribución de enfermedades asociadas a la radiación entre las poblaciones expuestas. Los radiopatólogos, es decir, aquellos

científicos que estudian y diagnostican los efectos de la radiación en individuos expuestos a la radiación, se limita a diagnosticar en individuos los llamados efectos deterministas (también llamados reacciones tisulares). Estos efectos se generan a partir una mortandad excesiva en las poblaciones de células de órganos y tejidos expuestas a la radiación, y se caracterizan por presentar una dosis umbral para su ocurrencia y un aumento en la gravedad de la reacción a medida que aumenta la dosis.

Ha quedado claro entonces que los efectos estocásticos cae fuera del alcance científico de la radiopatología. Si bien los radiopatólogos obviamente pueden diagnosticar enfermedades malignas y efectos hereditarios en un individuo expuesta, NO PUEDEN atribuir los efectos diagnosticados de manera inequívoca a la exposición a la radiación, ya que estos efectos podrían haberse originado en una miríada de otras causas. Las mutaciones celulares, que se supone que son las causas iniciales de efectos estocásticos, pueden ocurrir debido a varios insultos, siendo la radiación solo uno de ellos. Actualmente, no se dispone de marcadores biológicos ni de patologías celulares para el diagnóstico de enfermedades malignas ni de efectos hereditarios causados por la radiación en un individuo determinado. Además, incluso si esos biomarcadores específicos o indicadores celulares estuvieran disponibles en el futuro, probablemente no podrían distinguir los efectos de las situaciones específicas de exposición a la radiación de los causados por la radiación de fondo prevaleciente en el hábitat del individuo.

El argumento que los efectos estocásticos no pueden ser atribuidos de manera individual sino solamente colectiva es un tema importante que generalmente se pasa por alto. Los efectos estocásticos no son diagnosticables en individuos, es decir que no son individualmente atribuibles. Los efectos estocásticos son un problema sanitario colectivo, no individual; solo se pueden estimar colectivamente estudiando el aumento de su incidencia normal en grandes poblaciones expuestas a la radiación.

### *Grupos Científicos en Pugna*

Existe un acuerdo universal de que la exposición de individuos a dosis por debajo de los niveles de umbral para la reacción tisular no causará efectos en la salud que puedan diagnosticarse en esos individuos. Existen sin embargo biomarcadores, tales como aberraciones cromosómicas, los que por encima de ciertos niveles medio de radiación pueden identificar la ocurrencia de la exposición en los individuos pero no efectos en su salud.

Sobre la existencia de efectos estocásticos atribuibles a dosis bajas de radiación en las poblaciones ha habido (y sigue habiendo) una disputa. Los radiobiólogos y hasta cierto

punto los radioepidemiólogos parecen estar divididos en dos grupos aparentemente irreconciliables, los que sostienen argumentos similares a los siguientes:

*El grupo que sostiene que toda exposición a la radiación, aun la muy pequeña es detrimental*

- El mayor número de científicos en este grupo considera que existen evidencias radioepidemiológicas incuestionables que muestran aumentos en la incidencia de neoplasias malignas a medida que aumenta la dosis en poblaciones. Si bien estas evidencias se manifiestan en poblaciones que han estado expuestas a dosis relativamente altas, generalmente a tasas de dosis comparativamente altas y a altos cambios en la tasa de dosis (como la cohorte de sobrevivientes del bombardeo de Hiroshima y Nagasaki (2, 3)), estiman que estos efectos son extrapolables proporcionalmente a situaciones de exposición a dosis y tasas de dosis bajas y quasi constantes. Consideran además que algunos estudios epidemiológicos que involucran dosis de radiación y tasas de dosis más moderadas y tasas de dosis más constantes (como por ejemplo la cohorte del río Techa (4- 6)) son coherentes y consistentes con el primero.
- También señalan que existe evidencia radiobiológica incontrovertible sobre los efectos mutagénicos de la exposición a la radiación en las células, y que ciertas mutaciones causadas por la interacción de la radiación con el ADN celular se asocia con la mayoría de las enfermedades malignas y también con efectos hereditarios en animales. Si bien reconocen que se han observado otros efectos celulares, incluidos efectos no dirigidos tales como efectos 'vecindad' (o 'by-standard'), efectos abscopales, efectos clastogénicos en el plasma inestabilidad genómica y respuestas adaptativa a la radiación, consideran que estos efectos no han demostrado ser modificadores de la evidencia epidemiológica disponible, la que presenta a la exposición la radiación como un fenómeno perjudicial para la salud (4).
- Por lo tanto, los científicos de este grupo concluyen que es prudente suponer que la información epidemiológica disponible en situaciones de dosis y tasas de dosis altas puede extrapolarse a situaciones de exposición prospectiva que involucran dosis bajas y tasas de dosis bajas y generalmente constantes, como para inferir y asignar riesgos de radiación a estas situaciones. La mayoría de ellos reconoce que dicha asignación es de naturaleza subjetiva y se realiza principalmente con fines de protección radiológica.
- Muchas academias y organizaciones reputadas se inscriben, mutatis-mutandi, en la opinión generalizada de este grupo, incluyendo el Comité sobre los Efectos

Biológicos de la Radiación Ionizante del Consejo Nacional de Investigaciones de los EE. UU, más conocido por su acrónimo inglés BEIR (7), el Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas, más conocido por su acrónimo inglés, UNSCEAR (9,10), la Comisión Internacional de Protección Radiológica, más conocida por su acrónimo inglés ICRP (10, 11), el Consejo Nacional de Protección y Medición de la Radiación de los EEUU, más conocido por su acrónimo inglés NCRP (12) y otros.

*El grupo que sostiene que no hay evidencia concluyente que la radiación a bajas dosis es detrimental*

- Además del grupo aparentemente dominante descrito precedentemente, hay un número significativo de científicos que, aunque no difieren en las premisas descritas anteriormente, consideran que la evidencia radioepidemiológica disponible no debe extrapolarse directamente a las situaciones de exposición a dosis y tasas de dosis bajas. Afirman que ciertos efectos biológicos específicos observados, como los efectos no dirigidos, indican que los fenómenos radiobiológicos en tales situaciones de exposición son diferentes de aquellos para los que se dispone de datos epidemiológicos.
- Algunos de los científicos en este grupo incluso consideran que la exposición a la radiación a dosis y tasas de dosis bajas puede ser beneficiosa; a saber, que la exposición a la radiación muestra, de hecho, hormesis, un fenómeno bien conocido en toxicología, que involucra procesos en una célula u organismo que presenta una respuesta bifásica a la exposición a cantidades crecientes de un insulto, de tal manera que, dentro de la zona hormética, generalmente hay una respuesta biológica favorable a niveles bajos de exposición a factores estresantes como la radiación.
- En resumen, para los científicos de este grupo los efectos de la radiación pueden ser beneficiosos en lugar de perjudiciales y sugieren que el detrimento impuesto por las medidas de protección radiológica haría que la protección contra la radiación a niveles bajos de dosis y tasas de dosis de hecho sea perjudicial para la sociedad.

Esta es, por supuesto, una sinopsis más que sucinta de una controversia mucho más complicada y sofisticada, pero intenta ser un resumen simplificado pero realista de la situación actual. La existencia efectiva de estos dos grupos es, de hecho, la génesis del dilema actual respecto a las dosis bajas de radiación.

## 2.-PARADIGMA ACTUAL DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

El paradigma para proteger a las personas y su hábitat contra la exposición a la radiación de baja intensidad ha evolucionado en el tiempo y los avances parecen estar acelerándose en los últimos años. La evolución de la protección radiológica está muy enredada en la historia de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP). El paradigma actual de protección radiológica fue desarrollado por la ICRP principalmente en el último cuarto del siglo pasado bajo la denominación 'Sistema de Protección Radiológica de la ICRP'. Dicho sistema fue recomendado en los años 90 por la ICRP (13) y la ICRP lo confirmó posteriormente a comienzos del siglo actual (7). El paradigma sido adoptado por los estándares internacionales de protección radiológica que se desarrollan bajo los auspicios del Organismo Internacional de Energía Atómica (14) con el patrocinio de todas las organizaciones intergubernamentales relevantes y de allí por la mayoría de las regulaciones nacionales.

En resumen, el paradigma se basa en un sistema de magnitudes universales que incluye dos magnitudes físicas, las denominadas

- actividad (o cantidad de radioactividad, el fenómeno físico por el cual los núcleos de algunos elementos químicos emiten radiaciones) y
- dosis, que es la cantidad de energía de la radiación absorbida por los tejidos, y magnitudes de protección que resultan de la ponderación de la dosis por factores de ponderación de la eficiencia de la radiación y de la sensibilidad tisular, lo que da como resultado las denominadas
- dosis equivalente en órganos y
- dosis efectiva en todo el cuerpo.

Se recomiendan tres principios fundamentales de protección, a saber, la justificación de acciones que alteren la situación de exposición a la radiación, la optimización de la protección contra la radiación y la restricción de las dosis individuales.

Para situaciones de exposición a dosis bajas, la dosis se controla mediante un sistema de restricción de dosis sobre la base de esos tres principios, que en última instancia se basa en estimaciones de factores de riesgo ajustados al detrimento.

El paradigma evolucionó durante este siglo. A partir de un enfoque de protección basado en procesos, el que se basó en prácticas (como la radiología médica) e intervenciones (como las que se producen después de una emergencia) y se trasladó a un enfoque basado en la situación de la exposición., reconociendo situaciones de

exposición planificada, situaciones de exposición de emergencia y situaciones de exposición existentes, y aplicando los principios fundamentales a todas estas situaciones.

El paradigma asume un modelo de dosis-respuesta que se se conoce generalmente con la confusa denominación "modelo sin umbral" o por su acrónimo inglés 'LNT'. Este supuesto central es, de hecho, más sutil que una relación lineal entre la dosis y la respuesta. La hipótesis postulada es que a dosis inferiores a unos 100 mSv, un incremento de la dosis sobre el inevitable fondo de dosis del habitat podría implicar un incremento directamente proporcional en la probabilidad subjetiva de incurrir efectos estocásticos atribuibles a la radiación. El modelo asumido representaría un detrimento combinado debido al exceso de cáncer y efectos hereditarios de alrededor del 5% por sievert de dosis efectiva (se debe tener en cuenta la sutileza que la ICRP presenta este valor "per sievert" que es una dosis muy alta en lugar de una dosis bajas, por ejemplo, "0.005% per milisievert").

Cuando se analiza y discute el modelo LNT, los argumentos suele ser "científicos", pero por lo general no se tiene en cuenta que este modelo proporciona la base para poder sumar las dosis de fuentes externas de radiación y de la ingesta de radionúclidos y también las dosis incurridas en varios efectos de exposición. Sin este enfoque práctico, la protección radiológica sería muy engorrosa. El uso de este modelo fue (y sigue siendo) considerado por la ICRP como el mejor enfoque práctico para manejar el riesgo de la exposición a la radiación. Además, se considera que es acorde con el "principio de precaución" (15) y, por lo tanto, es una base 'prudente para la protección radiológica a dosis bajas y tasas de dosis bajas' (16).



### Problemas con el modelo LNT

Durante el último medio siglo, la comunidad de protección radiológica ha estado sumergida bajo un problema aparentemente irresoluble que se resume en la siguiente pregunta: ¿Se pueden usar los factores de riesgo nominales recomendados por la ICRP para la protección radiológica prospectiva para atribuir retrospectivamente efectos de salud perjudiciales a situaciones de exposición a la radiación en dosis bajas?

Un elemento que alimenta la confusión ha sido el concepto de dosis colectiva. Con el propósito de optimizar la protección radiológica, predominantemente en el contexto de la exposición ocupacional, la ICRP introdujo la magnitud dosis colectiva (11, 13). La dosis efectiva colectiva debida a valores de dosis efectivas individuales entre dos valores,  $E_1$  y  $E_2$ , de una fuente específica dentro de un período de tiempo específico  $\Delta T$  se define como:

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \left[ \frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} dE$$

a saber, se calcula como la suma de todas las dosis individuales durante el período de tiempo de exposición considerado. Se pretendía que esta magnitud cuantificara la exposición de todos los individuos en un grupo durante un período de tiempo determinado (por ejemplo, durante una operación determinada ejecutada por un grupo de individuos expuestos en áreas designadas de niveles radiación). En el proceso de optimización, se puede utilizar la dosis colectiva para comparar diferentes medidas de protección radiológica y los escenarios operativos resultantes con sus respectivas dosis colectivas esperadas. La dosis colectiva es una magnitud extensiva y necesariamente se basa en los supuestos del modelo LNT, porque solo sobre la base de ese modelo es posible considerar las dosis como aditivas.

En resumen, la dosis colectiva se introdujo solo como un instrumento cuantitativo para facilitar la optimización de la protección, es decir, para comparar diversas opciones de protección teniendo en cuenta sus aspectos positivos en términos de reducción de las dosis colectivas y negativos en términos de incremento en los esfuerzos y consecuencias detrimentales asociadas a la protección. Sin embargo, la dosis colectiva fue utilizada de manera inapropiada por muchos como una herramienta para cuantificar resultados supuestos de estudios epidemiológicos teóricos. Se lo hizo de la manera más burda posible: multiplicando la dosis colectiva por el factor de riesgo utilizado en el paradigma de protección radiológica e igualando el resultado a números de muertos

derivados de la situación de exposición.

Pero el supuesto del modelo LNT, que está implícito en el cálculo de la dosis colectiva, no es aplicable a estos malabarismos teóricos que pretenden ser asociados a la epidemiología. El modelo oculta grandes incertidumbres biológicas y estadísticas. Específicamente, el cálculo de las muertes por cáncer basadas en dosis colectivas que involucran exposiciones triviales a grandes poblaciones no es razonable.

Sin embargo, la combinación de dosis colectivas y LNT fue utilizada por instituciones científicas para atribuir efectos de la radiación a situaciones de exposición a la radiación. Probablemente el más infame de estos estudios fue en el publicado por la acreditada Academia de Ciencias de Nueva York, el que atribuyó casi un millón de muertos al accidente de Chernobyl (17).

La cuestión de si se pueden atribuir cadáveres a las situaciones de exposición retrospectiva en dosis bajas utilizando la dosis colectiva se ha discutido "ad nauseam": La ICRP abogó enérgicamente por evitar que se llevaran a cabo estos cálculos basados en la dosis colectiva, los que nunca fueron concebidos por la ICRP. Sin embargo, los cálculos de hicieron y el tema se discutió en una gran cantidad de reuniones, simposios, conferencias y reuniones científicas similares, sin que se hubiese podido resolver el enigma de una manera que satisfaga a todos. De hecho, después de cada reunión, la confusión sobre el tema parecía aumentar en lugar de disminuir.

#### *La inferencia prospectiva de riesgos de radiación.*

Si bien la ICRP indicó en varias oportunidades que los efectos en la salud no pueden atribuirse a dosis bajas de radiación y que el concepto de dosis colectiva no debe utilizarse para este propósito, sin embargo, para la ICRP, esto no significa que el riesgo de radiación no pueda ni deba inferirse prospectivamente. La inferencia es, por definición, de naturaleza subjetiva, pero basadas en información disponible de la experiencia pasada, por ejemplo:

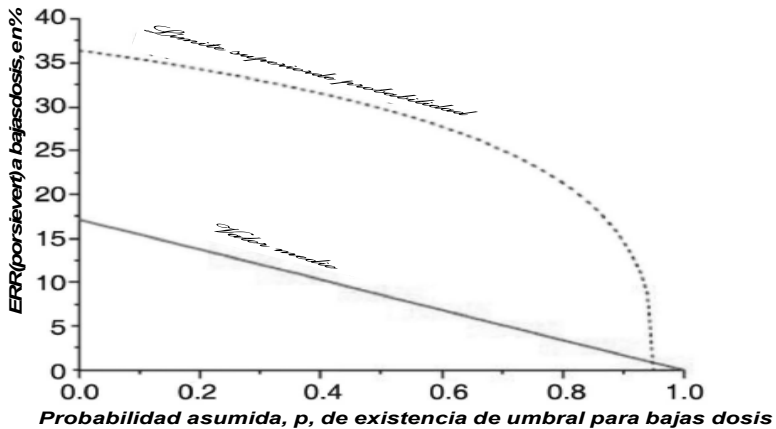
- Existe una gran experiencia radio-patológica sobre los efectos de la radiación que han experimentado personas que incurrieron en altas dosis por encima de algunos niveles de umbral. Por lo tanto, se puede inferir con un alto grado de objetividad que se producirán reacciones en los tejidos si se espera que los individuos incurran en dosis por encima de los niveles de umbral para esos efectos.

- Existe una experiencia radio-epidemiológica significativa sobre el aumento de la incidencia de tumores malignos en grupos de poblaciones que fueron sometidos a exposición a la radiación a dosis altas y niveles de tasa de dosis también relativamente altas. Por lo tanto, se puede inferir con un alto grado de objetividad que un aumento en la incidencia de tumores malignos puede ocurrir en poblaciones que estarán sujetas al mismo nivel de exposición.

Pero para exposiciones fuera de estas condiciones, la inferencia de los efectos resultantes de las situaciones de exposición prospectiva resulta totalmente subjetiva y resulta ser más un ‘grado de creencia’ que una estimación científica.

Sin embargo, sobre la base de estudios de incertidumbre, extrapolación de dosis bajas y la consideración de hipótesis de umbral de dosis, y mediante el uso de técnicas de incertidumbre cuantitativa, la ICRP ha analizado las consecuencias de permitir la posibilidad incierta de un umbral de riesgo (16). Mediante el conocido enfoque de reducción ad absurdum, se concluyó que la posibilidad incierta de un umbral no reduce drásticamente las estimaciones centrales o los límites de probabilidad superior para el riesgo de dosis baja en comparación con los obtenidos utilizando el modelo LNT, a menos que la posibilidad de un umbral sea muy alta.

Se llegó a esta importante conclusión al analizar las implicaciones de un posible, pero incierto, umbral de dosis bajas, que se resumen por la dependencia del valor medio y el límite superior de probabilidad del 95% sobre el valor de probabilidad de umbral presumido. La Figura 1 ilustra el problema en términos del exceso relativo de riesgo (ERR, por su acrónimo en inglés). El ERR es el aumento proporcional del riesgo sobre el riesgo absoluto de fondo (en ausencia de exposición) y se calcula como la tasa de efectos en una población expuesta dividida por la tasa de efectos en una población no expuesta menos 1.0. La Figura presenta como función del ERR la media y el límite de probabilidad superior del 95% para por gray de dosis absorbida, como funciones de probabilidad de umbral,  $p$ , dada (en ausencia de un umbral) una distribución de incertidumbre log-normal con una media de 0.17 y una superior de 95 % límite de 0,36.

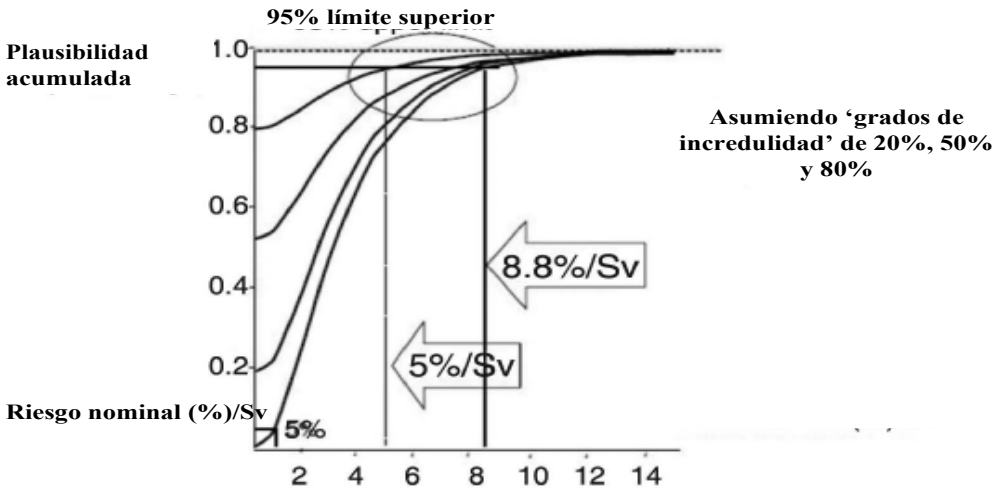


**Figura 1:** Límite de probabilidad media y superior del 95% para el riesgo relativo excesivo (ERR) por Gy como funciones de probabilidad de umbral, p.

El valor medio de la ERR estimada por Gy es proporcional a  $(1 - P)$  para la probabilidad de umbral conocida, p, y es proporcional a  $(1 - E(p))$  para una probabilidad de umbral incierta con el valor esperado  $E(p)$ . El efecto sobre el límite de probabilidad superior del 95% es menos drástico, a menos que la probabilidad supuesta de un umbral sea alta.

Como se muestra en la figura anterior, el límite superior disminuye al aumentar p, pero no tanto como la media hasta que p se acerca al nivel de probabilidad del límite superior: por ejemplo, de aproximadamente 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 2 ilustra diferentes "grados de creencia (o incredulidad)" en un umbral de riesgo aplicado a la distribución acumulativa de la probabilidad, convirtiéndola en una distribución acumulativa de plausibilidad.



**Figura 2:** Grados de creencia (o incredulidad) en un umbral de riesgo

Se puede ver que el límite superior de plausibilidad para un umbral del 8% / Sv cambia muy poco a medida que aumenta la incredulidad. Para una gran incredulidad, tan alta como 80%, el límite superior es 5% / Sv, es decir, igual al coeficiente de riesgo nominal usado en las normas internacionales de protección radiológica.

En resumen, teniendo en cuenta la evidencia objetiva disponible, un coeficiente de riesgo nominal de alrededor del 5% por Sv es una consideración inevitablemente prudente para fines de protección radiológica. Otros calificativos subjetivos llevarán a la misma conclusión; estos incluyen la consideración de la verosimilitud, la credibilidad, la lógica, la admisibilidad, la fidelidad y la integridad, y el concepto relacionado de falsabilidad.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que este análisis de la ICRP se ha realizado con los datos epidemiológicos disponibles, que son datos a dosis altas y a tasas de dosis altas, lo que implica una extrapolación de los fenómenos a dosis bajas y a tasas de dosis bajas.

Científicamente, este enfoque podría argumentarse como un círculo en probando, es decir, una falacia lógica en la que el razonamiento comienza con lo que intentan terminar, donde se presume que el argumento es lógicamente válido porque si las premisas son verdaderas, la conclusión debe ser cierta.

Pero este apotegma ha sido internacionalmente aceptado. Es decir, los riesgos de radiación son inferibles para las posibles situaciones de exposición a bajas dosis de radiación, por pequeñas que sean las dosis esperadas, y, por lo tanto, es necesario atribuir riesgos de radiación nominal a situaciones de exposición planificadas a bajas dosis, para fines de protección radiológica por razones de deber, responsabilidad, prudencia y precaución. Sin embargo, la atribución prospectiva del riesgo de radiación no implica que los efectos reales puedan atribuirse retrospectivamente a situaciones de exposición a dosis bajas.

## **Evolución**

Se están produciendo desarrollos significativos en la epistemología relacionada con las ciencias que tratan los efectos que la exposición a la radiación podría causar, es decir, en las teorías que sustentan nuestro conocimiento sobre los efectos de la radiación, especialmente con respecto a sus métodos, validez y alcance. Estos desarrollos han tenido lugar bajo la guía del reputado UNSCEAR, y son complementarios en lugar de contradictorios con el paradigma de la ICRP. Su objetivo es resolver el enigma de los efectos de la radiación y el riesgo a bajas dosis de radiación.

Como resultado de estos desarrollos, la epistemología de las teorías de los efectos de la radiación se entiende mucho mejor hoy que en los momentos en que se desarrolló el paradigma actual y se ha descrito ampliamente en la literatura (18). Este gran paso adelante se resume a continuación.

### **Atribución (retrospectiva) de los efectos de la radiación frente a la inferencia (prospectiva) del riesgo de radiación**

La epistemología de la atribución de los efectos de la radiación frente a la inferencia del riesgo de radiación se debe asociar, respectivamente, con los conceptos de provabilidad y probabilidad.

[Nota del autor: Se hará uso de la licencia gramatical de utilizar la palabra provabilidad, con ‘v’, para referirme al concepto que en inglés se denomina provability (a diferencia de probability) – el que errónea y simplificada se traduce al castellano como demostrabilidad– porque en castellano existe una sola palabra, probabilidad, para denotar provability y probability, lo que genera una gran confusión conceptual].

Desafortunadamente estos conceptos tan diferentes se expresan en muchos idiomas con estos términos casi homónimos que pueden causar muchos malentendidos. Se derivan de una raíz común, el latín *probare*, que significa por una parte "demostrar formalmente" y por la otra "ensayar, examinar posibilidades plausibles". Esta terminología similar ha sido una receta para la confusión, y por lo tanto requiere una semántica adecuada,

### *Provabilidad vis-à-vis probabilidad*

La *provabilidad* describe la capacidad de *provar*, es decir demostrar con evidencia formal la verdad y existencia, la autenticidad y validez. Incluye análisis contra-fáctica y, finalmente, capacidad de atestar, es decir proporcionar certeza formal y declarar que algo existe. Es decir que en el caso de efectos de la radiación la provabilidad tiene como objetivo demostrar la autenticidad y validez de la causalidad de tales efectos, y por lo tanto es una condición previa para certificar la existencia de los efectos de manera inequívoca y sin ambigüedades. Si los efectos de la radiación fueran probables retrospectivamente, y se ha manifestado su ocurrencia, entonces puede atribuirse efectos reales a la situación pasada de exposición a la radiación. En síntesis, la provabilidad es el medio para revelar retrospectivamente la ocurrencia efectiva de efectos luego de una situación de exposición a la radiación.

Por el contrario, la *probabilidad* es la capacidad de *probar*, es decir explorar y examinar la ocurrencia plausible de sucesos determinando la calidad o estado de ser posible y se cuantifica como la medida en que algo que es plausible pueda suceder. En el caso de la exposición a la radiación, la probabilidad describe cuán plausible sería que una situación prospectiva de exposición planificada produzca efectos. De hecho, la probabilidad resultaría ser la media para cuantificar la inferencia prospectiva de tales efectos. Si se dispone de información estadística previa sobre la ocurrencia del efecto, como ocurre en situaciones de dosis altas, y tasas de dosis altas, entonces tal probabilidad se puede derivar de la frecuencia de ocurrencia, es decir, como el límite de la frecuencia relativa de ocurrencia del efecto en un gran número de casos, y se la suele denominar probabilidad frecuentista o frecuentística. Si solo se dispone de información indirecta sobre la plausibilidad de la ocurrencia del efecto, la probabilidad aún puede estimarse como una inferencia a través del juicio subjetivo de expertos calificados y se la suele denominar probabilidad subjetiva o "Bayesiana" (como una derivada del teorema de Bayes). Este suele ser el caso de las situaciones prospectivas de exposición planificadas a dosis bajas, para las cuales no existen datos de frecuencias de casos.

**En resumen:**

- La exposición a dosis bajas requiere un proceso de provabilidad que permita atestar que realmente se han incurrido efectos deletéreos retrospectivamente. De hecho, la atribución se refiere al conocimiento requerido para asignar resultados de salud a situaciones pasadas de exposición a la radiación, es decir, para conectar los efectos de la radiación a situaciones de exposición a la radiación precedentes y, por lo tanto, asignarlos de forma inequívoca a la situación (no es factible atribuir sin ambigüedad a situaciones futuras).

- Pero la aptitud para atribuir es diferente a la aptitud para inferir efectos de la radiación plausibles (aunque no certeros) a situaciones de exposición futuras y planificadas. La inferencia es una noción prospectiva, que está asociada con el concepto de probabilidad. La probabilidad puede basarse en las frecuencias en que el fenómeno ha ocurrido en el pasado, pero en muchos casos (por ejemplo, en situaciones de exposición a bajas dosis, la evidencia de frecuencia de casos no existe. Por lo tanto, en estos casos, la probabilidad de trata de una probabilidad subjetiva o Bayesiana que cuantifica las estimaciones personales de situaciones de exposición prospectiva sobre la base del conocimiento personal general. Dichos conocimientos pueden proporcionarse (entre otros) mediante información radiobiológica y experiencia epidemiológica, como los resultados en dosis altas los que generalmente se expresan como una probabilidad frecuentística.

- En suma, el principal desafío al paradigma actual es si tal probabilidad extrapolada y subjetivamente estimada puede usarse para calcular efectos de salud fácticos atribuibles a dosis bajas. Las evaluaciones teóricas de los efectos basadas en dicha afirmación han sido ampliamente realizadas por científicos y academias. Esto fue un error epistemológico ampliamente discutido en la literatura. Tal error causó mucho daño y ha provocado llamados a la acción para corregirlo

Cabe señalar, por sorprendente que sea, que para los procesos de provabilidad no se han desarrollado la cualidad cuantificable que caracterizan a los procesos de probabilidad para los cuales se han desarrollado herramientas matemáticas muy sofisticadas. Parafraseando un viejo pensamiento en esta área de la epistemología, nada de lo demostrable debe tomarse como un sinónimo de verdadero, ni como un sinónimo de falso; más bien, la provabilidad debe tomarse como un medio para permitir que profesionales calificados certifiquen efectos revelados con un alto grado de confianza (19).



## Imputación

Una aclaración importante es que la atribución no debe considerarse como un sinónimo del término legal imputación, que está principalmente vinculado al concepto nemotécnico de causalidad, como sigue:

- Atribuir refiere a que se atribuya a algo (p. ej., exposición a la radiación) la causa de algo (p. ej., efectos en la salud).
- Imputar refiere que se acuse a alguien (p. ej., un empleador nuclear) de ser la causa de un daño personal (p. ej., efectos de radiación a un trabajador expuesto ocupacionalmente).

La imputación se relaciona principalmente con reclamos de compensación laboral, por ejemplo, como parte de una prueba de múltiples etapas para la responsabilidad legal asociada con la relación causal entre la conducta de los empleadores de trabajadores expuestos ocupacionalmente y el daño laboral que esos trabajadores pueden haber sufrido. Estas cuestiones legales no se tratarán en este TRABAJO, pero han sido consideradas internacionalmente (20).

## Novedades de UNSCEAR

UNSCEAR, fue establecido por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 1955. Su mandato en el sistema de las Naciones Unidas es evaluar e informar los niveles y los efectos de la exposición a la radiación ionizante. Los gobiernos y las organizaciones de todo el mundo confían en las estimaciones del Comité como base científica para evaluar los efectos de la radiación atribuibles a situaciones de exposición retrospectiva a la radiación. Las organizaciones de protección, como la ICRP y las agencias reguladoras también han utilizado los resultados de UNSCEAR para estimar el riesgo de radiación que podrían ser causados por situaciones prospectivas de exposición a la radiación y para establecer medidas de protección.

Recientemente, ha habido un desarrollo espectacular en UNSCEAR que podría cuestionar el uso de las estimaciones de UNSCEAR tanto para atribuir los efectos a las situaciones de exposición retrospectiva para inferir el riesgo a situaciones prospectivas, al menos sin calificaciones.

A raíz de una solicitud del gobierno argentino, la Asamblea General de las Naciones Unidas (AGNU) decidió abordar el complicado enigma epistemológico de atribuir efectos fácticos a la salud a situaciones retrospectivas de exposición a la radiación, y de inferir posibles efectos de la radiación que podrían derivarse de situaciones prospectivas de exposición planificada. Esto se hizo siguiendo una serie de pasos burocráticos (21). En su resolución 62/100 de 17 de diciembre de 2007, UNGA recordó su intención de UNSCEAR "para aclarar aún más la evaluación del daño potencial debido a las exposiciones crónicas de bajo nivel entre poblaciones grandes y también la atribuibilidad de los efectos sobre la salud" y alentó a UNSCEAR "a presentar un informe sobre ese tema lo antes posible". Además, UNGA respaldó el objetivo estratégico de UNSCEAR "para aumentar la conciencia y profundizar el entendimiento entre las autoridades, la comunidad científica y la sociedad civil con respecto a los niveles de radiación ionizante y los efectos relacionados con la salud y el medio ambiente como una base sólida para la toma de decisiones informada sobre problemas relacionados con la radiación".

Dicho objetivo estratégico destacó la necesidad de que UNSCEAR proporcione información sobre las fortalezas y limitaciones de sus evaluaciones, que a menudo no se aprecian por completo. Esto implicaría evitar asociaciones causales injustificadas (falsos positivos), así como el rechazo injustificado de efectos de salud reales (falsos negativos). Específicamente, era necesario aclarar el grado en que los efectos en la salud podrían atribuirse a la exposición a la radiación. Además, la Asamblea General de las Naciones Unidas, en su resolución 66/70, instó a la UNSCEAR a presentar a la Asamblea General de las Naciones Unidas en su sexagésimo séptimo período de sesiones el informe solicitado por la Asamblea sobre la atribuibilidad de los efectos de la exposición a la radiación en la salud. El informe de UNSCEAR se publicó finalmente en 2015 (17).

El nuevo consenso internacional logrado por UNSCEAR se puede resumir (en palabras del autor) de la siguiente manera:

- Los efectos deterministas sobre la salud son atribuibles individualmente a situaciones de exposición que involucran altas dosis, a través del diagnóstico clínico y la certificación de un radio-patólogo calificado.
- Los efectos estocásticos de los cánceres inducidos por radiación se pueden atribuir colectivamente (no individualmente), y solo en el caso de que las dosis de radiación sean lo suficientemente altas como para permitir el discernimiento estadístico en estudios epidemiológicos de las cohortes expuestas, y luego de la certificación de un radio-epidemiólogo calificado.

Los efectos estocásticos de los cánceres inducidos por radiación no son atribuibles a dosis de radiación similares o menores a los niveles globales promedio del fondo típico de radiación.

- Los efectos estocásticos hereditarios en poblaciones humanas no son atribuibles a ninguna situación de exposición a la radiación.
- Los cálculos teóricos prospectivos de los efectos de la radiación, que resultan de multiplicar las dosis colectivas por los factores de riesgo nominales son epistemológicamente erróneos.

### **3.-DISCUSIÓN**

Los reguladores que se ocupan de la exposición a la radiación parecen estar indiferentes a todos los desarrollos descritos anteriormente. Las normas internacionales también han ignorado hasta ahora estos desarrollos. En los estándares nacionales e internacionales de protección contra la radiación, el concepto de atribución e inferencia no aparece en absoluto; la normativa no diferencia entre la protección contra efectos atribuibles y la protección contra riesgos inferibles.

La respuesta regulatoria ha sido hasta ahora de una aprobación pasiva de lo que se considera el enfoque más 'conservador', a saber, la aceptación de que realmente existen efectos atribuibles a la radiación a dosis bajas y tasas de dosis bajas y la implicación de que se deben implementar medidas de protección radiológica para en cualquier situación de exposición a la radiación, por pequeñas que sean las dosis. La diferencia importante entre atribución de efectos e inferencia de riesgos, introducida por UNSCEAR, es básicamente ignorada por todas las regulaciones.

En una carta conjunta de un grupo de colegas, hemos advertido sobre dos problemas críticos de preocupación internacional: (1) el temor a las bajas dosis de radiación ionizante y (2) el precio muy alto que la sociedad paga por ese temor (22). Enfatizamos que el temor público a la radiación de bajo nivel ha tenido un impacto significativo en nuestra calidad de vida, poniendo en peligro muchos desarrollos beneficiosos que usan radiación, como el diagnóstico médico y la producción de energía.

Siguiendo estas y otras palabras de advertencia similares, las estimaciones definitivas de UNSCEAR y su respaldo político por nada menos que la AGNU, donde todos los gobiernos del mundo están representados, se esperaba una respuesta reguladora. Las autoridades regulatorias nacionales y las organizaciones como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que tiene la función estatutaria de establecer bajo su égida estándares internacionales de seguridad contra la radiación y también para proporcionar la aplicación de estos estándares, deberían haber reaccionado y buscar una solución al problema. Esto no sucedió hasta el momento (aunque la situación está cambiado al nivel del OIEA).

Esto no es sorprendente. Es posible que hayan caído en la misma trampa de creer que una comprensión más completa de la biología y la epidemiología relacionada con las dosis bajas es una condición necesaria para enfrentar los desafíos críticos de los enfoques para las exposiciones a dosis bajas. De hecho, como intentamos demostrar en este documento, existen límites epistemológicos para obtener una respuesta a través de la biología o la epidemiología; La solución del problema solo puede ser reguladora. Debemos reconocer que la ciencia no nos permite determinar si hay efectos negativos o positivos o ningún efecto después de la exposición a dosis bajas. Lo que sabemos es que, si existieren tales efectos, son tan pequeños que quedan fuera de los límites de nuestras ciencias.

Por lo tanto, la decisión de proteger a las personas contra los posibles riesgos de radiación de posibles situaciones de exposición a dosis bajas, es decir, contra una probabilidad subjetiva de efectos nocivos derivados de estas situaciones, tiene que ser una decisión regulatoria en ausencia de respuestas científicas definitivas. Los reguladores tienen la responsabilidad ética de evaluar el problema y decidir su resolución; no pueden esperar que la biología y la epidemiología les proporcionen una respuesta indiscutible. En resumen, el problema de la protección a bajas dosis se puede resolver con un sentido común regulador en lugar de mediante conjeturas biológicas y epidemiológicas

El autor recuerda un solo evento internacional importante en el que se manifestó este enfoque fue diferente. Este fue la Conferencia Internacional sobre "Dosis bajas de radiación ionizante: efectos biológicos y control reglamentario", que tuvo lugar en Sevilla, España, en noviembre de 1997, es decir, ¡hace casi un cuarto de siglo! (23). Este evento reconoció en su título que el problema de la protección a dosis bajas tiene dos caras, que están relacionadas entre sí, pero que mantienen una diferencia fundamental entre sí, a saber: los efectos biológicos de la exposición a la radiación a dosis bajas vis-à-vis el control regulatorio de la exposición a la radiación a dosis bajas. En ese evento notable, más de 500 participantes y 25 observadores de 65 países

discutieron estos dos temas por separado, pero de manera coordinada. En palabras del entonces Director General del OIEA, el Dr. Hans Blix: ha habido "mucha confusión sobre el tema de la regulación de las dosis bajas, principalmente pero no exclusivamente por parte del público: también hay declaraciones muy confusas sobre el tema entre los especialistas" (24).

Muchos años después de ese evento, la situación no ha cambiado fundamentalmente. Los desarrollos en la biología molecular han sido inmensos y el mapeo del genoma humano se ha completado básicamente, pero la regulación sensata de las dosis bajas continúa en el limbo, y persisten declaraciones muy confusas y contradictorias entre los especialistas.

El momento parece maduro para que todas las partes responsables se pregunten qué está mal. Este documento sugiere que fue y sigue siendo incorrecto pretender que el problema de las dosis bajas será resuelto por la radio-biología y la radio-epidemiología. Como ya se sugirió hace un cuarto de siglo, la solución debería ser regulatoria.

#### **4.-CONCLUSIÓN**

En resumen, la evolución del paradigma de la protección a bajas dosis refleja un nuevo consenso internacional alcanzado en el más alto nivel científico dentro del sistema de las Naciones Unidas, este consenso distingue:

- la atribución objetiva de los efectos en la salud a las situaciones de exposición retrospectiva, vis-à-vis
- la inferencia subjetiva de los riesgos potenciales de las situaciones de exposición prospectiva.

Esta nueva visión concluye que los efectos en la salud no pueden atribuirse objetivamente a dosis bajas, pero un riesgo subjetivo de situaciones planificadas puede inferirse prospectivamente solo para fines de protección radiológica y asignación de recursos. La atribución objetiva de los efectos en la salud a dosis bajas (ya sean efectos negativos, positivos o neutros) cae fuera del alcance de las ciencias relevantes, la radio-biología y la radio-epidemiología, debido a limitaciones epistemológicas. Estas ciencias pueden proporcionar robustez para inferencias subjetivas de resultados probables pero no pueden probar la ocurrencia de efectos a bajas dosis y por lo tanto no pueden atribuir efectos a situaciones de exposición a bajas dosis.

El problema de las dosis bajas requiere soluciones reglamentarias en lugar de científicas. Las normas de protección de dosis bajas deben basarse en decisiones legislativas y reglamentarias en lugar de en modelos científicos de respuesta a la radiación. La responsabilidad de decidir sobre el alcance reglamentario a las dosis bajas está en los legisladores y reguladores en lugar de en conjeturas científicas.

En conclusión, el tiempo parece estar maduro para que:

- los legisladores utilicen el concepto legal bien establecido de “de minimis non curat lex” y excluyan de la ley las situaciones de exposición a dosis bajas que no se puedan regular, y
- los reguladores utilicen el antiguo concepto de "de minimis no curat prætor" y eximen de regulaciones a las situaciones de exposición a baja dosis que no justifiquen su control.

Los legisladores y reguladores deben convertir el nuevo paradigma de consenso internacional en instrumentos acordes para regular las situaciones de exposición a la radiación a dosis bajas.

En suma: el dilema de dosis bajas se puede resolver sobre la base del sentido común, sea legislativo o normativo, en lugar de con modelos científicos de respuesta a la radiación basados en conjeturas biológicas y epidemiológicas que no pueden ser probadas.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Scientific Conference on Applicability of Radiation Response-Models to Low Dose Protection Standard Cosponsored by the American Nuclear Society and Health Physics Society; Pasco, Washington State, USA; 2018.
2. Preston DL, Shimizu Y, Pierce DA, et al. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and non-cancer disease mortality 1950-1997. *Radiat. Res.* 2003;160: 381-407.
3. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat. Res.* 2007;168:1-64.
4. AFRR. Analysis of chronic radiation sickness cases in the population of the Southern Urals. Bethesda, Maryland, USA: AFRR; 1994.
5. AFRR. Chronic radiation sickness among Techa Riverside Residents. Bethesda, Maryland, USA: AFRR; 1998.

6. Akleyev AV, Kisselyov MF, editores. Medical-biological and ecological impacts of radioactive contamination of the Techa river. Fregat, Chelyabinsk; 2002.
7. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation: BEIR Board on Radiation Effects Research. National Research Council of the National Academies, Washington, D.C.; 2006.
8. United Nations. Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York, NY: United Nations; 2008.
9. United Nations. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II: Effects. New York, NY: United Nations 2000.
10. United Nations. Hereditary Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York, NY: United Nations; 2001.
11. ICRP. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. Annals of the ICRP. 2007;37(2-4).
12. ICRP Evaluation of the Linear-Non threshold Dose-Response Model for Ionizing Radiation. NCRP Report No. 136. National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda MD.; 2001. 13- 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Ann. ICRP. 1990;21(1-3).
13. International Atomic Energy Agency. Radiation protection and safety of radiation sources: International basic safety standards: general safety requirements. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2011.
14. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. The Precautionary Principle. Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization; 2005.
15. ICRP. Low dose extrapolation of radiation-related cancer risk. Annals of the ICRP. 2001;35(4).
16. The New York Academy of Sciences. Chernobyl Consequences of the Catastrophe for People and the Environment. Annals of the New York Academy of Sciences. 2009;1181(1):7-16.
17. González AJ. Epistemology on the attribution of radiation risks and effects to low radiation dose exposure situations. Int. J. Low Radiation.

- 2011;8(3):2011.
18. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der principia mathematica und verwandter systeme I. Monatshefte für Mathematik und Physik. 1931;38:173-198.
  19. International Atomic Energy Agency (IAEA), World Health Organization (WHO). Approaches to attribution of detrimental health effects to occupational ionizing radiation exposure and their application in compensation programmes for cancer, jointly published by the International Labour Organization (ILO). Publication ILO-OSH 73. Geneva; 2010.
  20. Official Records of the General Assembly, Sixty first Session. Supplement No. 46 and corrigendum (A/61 /46 and Corr.1), para. 5, 2007.
  21. Official Records of the General Assembly, Sixty seventh Session. Supplement No. 46 (A/67/46), chap. III, sect. 1; 2007.
  22. Official Records of the General Assembly, Sixtythird Session. Supplement No. 46 (A/63/46), para. 8; 2010.
  23. Official Records of the General Assembly. Resolution 66/70; 2011.
  24. Waltar AE, Brooks AL, Cuttler JM, Feinendegen LE, González AJ, Morgan WF. The high price of public fear of low-dose radiation. J. Radiol. Prot. 2016;36(387).