



RADIACIONES IONIZANTES

1 Origen

1.1 Radiación natural

El hombre ha estado siempre expuesto a fuentes naturales de radiaciones ionizantes: rayos cósmicos (de origen extraterrestre); materiales radiactivos que se hallan en la corteza terrestre, muchos de los cuales están incorporados a materiales de construcción, al aire y a los alimentos, e incluso sustancias radiactivas que se encuentran en el interior del organismo humano (potasio 40 (^{40}K), carbono 14 (^{14}C), etc.).

El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) estima regularmente las dosis debidas a las fuentes naturales, y da un valor mundial medio de 2,4 mSv para un habitante adulto y repartido según muestra la tabla 1

Tabla 1
Dosis debida a fuentes naturales

Dosis debida a fuentes naturales de radiación		
Fuente	Dosis media mundial Dosis efectiva (mSv/año)	Rango típico Dosis efectiva (mSv/año)
Exposición externa		
Rayos cósmicos	0,4	0,3 – 1,0
Rayos gamma terrestres	0,5	0,3 – 0,6
Exposición interna		
Inhalación	1,2	0,2 – 10
Ingestión	0,3	0,2 – 0,8
Total	2,4	1 - 10

Datos procedentes del informe UNSCEAR-2000

A estas radiaciones se las denomina radiación de fondo o radiación natural y forman parte del medio ambiente. La dosis debida a fuentes naturales es variable y depende de diversos factores como:

- La altura sobre el nivel del mar, ya que la radiación es retenida en parte por la atmósfera. La gente que vive en las grandes alturas recibe dosis mucho más elevadas de radiación externa y en algunos casos puede ser de hasta un 50% superior a la media.
- Contenido de material radiactivo en el suelo o materiales de construcción utilizados. Existen zonas, por ejemplo graníticas, cuyo contenido en material radiactivo es elevado y por tanto contribuyen a una mayor dosis en la población residente en ella.
- La evolución tecnológica modifica la exposición del hombre a las radiaciones. Por ejemplo en la combustión del carbón se liberan a la atmósfera trazas de material radiactivo natural, el uso de fertilizantes fosfatados aumenta la irradiación debido a los radionucleidos naturales que contienen, etc.

1.2 Radiación artificial

Además de la radiación de fondo natural, el hombre está expuesto a fuentes de radiaciones generadas de modo artificial: exposición a los rayos X con fines diagnósticos, aplicaciones de radionucleidos en medicina, industria e investigación, producción de energía eléctrica, ensayos nucleares realizados en la atmósfera y todos los materiales residuales que estas actividades comportan.

Estas fuentes de radiación provocan un aumento en la dosis a la que está sometida la población. Las evaluaciones del UNSCEAR-2000 sobre las dosis individuales “per cápita” en la actualidad muestran que la mayor proporción la representan la utilización de los rayos X en el diagnóstico médico. En la tabla 2 se indica los valores medios de la dosis efectiva anual, diferenciando 4 niveles de implantación de la sanidad: en el caso de países considerados desarrollados desde el punto de vista sanitario, se consideran del nivel I, contando con más de un médico por cada 1000 habitantes; mientras que en el otro extremo se encontrarían los países subdesarrollados desde el punto de vista sanitario, contando con menos de 1 médico por cada 10.000 habitantes.

Tabla 2

Exposición a la radiación en calidad de paciente en radiodiagnóstico

Nivel de sanidad	Habitantes por médico	Cantidad anual de exploraciones por cada 1000 habitantes	Valor medio de la dosis efectiva anual de la población (mSv)
I	< 1.000	920	1,2
II	1.000 - 3.000	150	0,14
III	3.000 - 10.000	20	0,02
IV	> 10.000	<20	<0.02
Media mundial		330	0,4

Con fines diagnósticos también se puede administrar material radiactivo al paciente, seguido de la posterior detección de la distribución corporal de dicho material. Se trata de las aplicaciones in vivo propias de la especialidad de medicina nuclear. Para este caso, el número de exploraciones por cada 1.000 habitantes es aproximadamente la centésima parte de la indicada para el radiodiagnóstico. En cuanto a la dosis media por habitante también es del orden de la centésima parte de la indicada en radiodiagnóstico, por lo que no influye de forma significativa a la dosis efectiva media debida al diagnóstico.

La contribución, al valor medio de la dosis efectiva, debida a los efluentes evacuados y a los residuos radiactivos de baja y media actividad del ciclo del combustible nuclear, resulta notablemente inferior a la contribución debida al fondo natural. En la tabla 3 se indican dichos valores, además de la contribución correspondiente tanto al accidente de Chernobyl como también la debida a las pruebas de explosiones nucleares llevada a cabo en la atmósfera entre los años 1945 y 1980.

Fuente	Media anual de la dosis efectiva "per capita" (mSv)	Rango y/o tendencia en la exposición
Fondo natural	2,4	Rangos típicos de 1 mSv a 10 mSv, dependiendo de las características del lugar. En algunos

		emplazamientos articulares puede llegar a un rango entre 10 mSv y 20 mSv.
Diagnóstico médico	0,4	Rango entre 0,04 mSv y 1,0 mSv, dependiendo del nivel de sanidad.
Pruebas con explosiones nucleares en la atmósfera	0,005	Ha decrecido desde un máximo anual de 0,15 mSv que se alcanzó en 1963. En el hemisferio norte es superior que el hemisferio sur.
Accidente de Chernobyl	0,002	Ha decrecido desde un máximo de 0,04 mSv en 1986 (promedio en el hemisferio norte). Superior en los emplazamientos próximos a la zona del accidente.
Producción de energía nuclear	0,0002	Con los años ha aumentado con el incremento del número de centrales nucleares, pero ha disminuido si se refiere a la dosis efectiva media por energía producida.

2 Efectos biológicos de las radiaciones

2.1 Introducción

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos han sido conocidos y estudiados con detalle desde hace muchos años. Fueron observados por primera vez en 1896 en algunos de los primeros usuarios de los rayos X. Estos notaron una caída del cabello en aquellas áreas que habían sido expuestas, la piel se volvió roja, y si recibía grandes cantidades de radiación se ulceraba. Además encontraron que a menudo se desarrollaba, años más tarde, cáncer de piel sobre las áreas que habían sido expuestas. Después del descubrimiento del radio en 1898, se observaron efectos similares producidos por la radiactividad concentrada.

2.2 Mecanismos de acción biológica de las radiaciones ionizantes

Para comprender el efecto biológico de las radiaciones ionizantes, se han invocado dos teorías que lejos de ser contradictorias, se complementan perfectamente.

- Teoría de Acción Directa o Teoría del Blanco. Vincula el efecto biológico y la importancia del mismo con la responsabilidad biológica del blanco (diana) alcanzado y del número de dianas impactadas. Si tenemos en cuenta que en cualquier modelo biológico y, más concretamente, en las células humanas la posibilidad de reproducción de las mismas y el adecuado cumplimiento del código genético está vinculado al genoma, es decir, a los cromosomas del núcleo celular, o lo que es lo mismo a la integridad del ácido desoxirribonucleico (ADN), el daño celular será proporcional a la lesión inducida en el ADN.

Si esta lesión es irreversible y por tanto no reparable, la consecuencia será la muerte reproductiva de la célula alcanzada. Si por el contrario la lesión radioinducida es reparada, tendremos un ADN capacitado para ir hacia mitosis sucesivas, pero con la posibilidad de transmitir alteraciones en la línea genética, mutaciones sumadas a las propias de la generación en la que le corresponda actuar como gen dominante.

Esta teoría explica el efecto biológico que se produce en el momento y en el lugar de la cesión de energía con capacidad ionizante y los efectos tanto somáticos como genéticos.

- Teoría de Acción Indirecta o Teoría de los Radicales libres. Se complementa con la anterior, puesto que explica la serie de fenómenos biológicos que se producen incluso fuera del momento y del lugar del depósito de energía ionizante.

Es bien conocido el componente de volumen agua en las células del ser humano normalmente hidratado, estimado en un 70%. El efecto de la ionización en las moléculas de agua es lo que se conoce como “radiólisis del agua”. Se produce una ruptura de la molécula con la liberación de los radicales que la componen, H^+ y OH^- . Estos radicales adquieren una rápida tendencia a recombinarse pudiendo dar lugar a la formación de nuevas moléculas de agua o, lo que es más frecuente, a agua oxigenada que presenta una elevada toxicidad para el medio biológico en donde se forma.

Se consigue por tanto intoxicar el medio biológico, intra y extracelular, lo que complica la vida del mismo.

2.3 Clasificación de los efectos producidos por las radiaciones ionizantes

Son muchas las posibles clasificaciones que se podrían realizar sobre los efectos de las radiaciones ionizantes. Sin embargo, nos vamos a referir aquí a aquella que más frecuentemente se utiliza en protección radiológica y que hace referencia a la transmisión celular de los efectos y a su relación con la dosis.

En primer lugar, los efectos pueden clasificarse en:

Somáticos y genéticos, en función de si son inducidos sobre las células de la línea somática o germinal. El daño somático se manifiesta durante la vida del individuo irradiado, mientras que los efectos genéticos son inducidos sobre su descendencia. Los efectos somáticos se dividen a su vez en **inmediatos y tardíos**, en función del tiempo transcurrido desde su irradiación.

A su vez y en función de la incidencia que tiene la radiación sobre los efectos, éstos se clasifican en **deterministas y en estocásticos**.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica, [ICRP](#), publicación 60, 1990, define los efectos estocásticos como aquéllos para los cuales la probabilidad de que un efecto ocurra, más que su severidad, es función de la dosis, sin umbral. Los efectos

deterministas son aquéllos para los cuales la severidad del efecto varía con la dosis, siendo necesario un valor umbral).

Los efectos estocásticos se pueden presentar tanto en el individuo expuesto (efectos estocásticos somáticos, como sería en caso de la carcinogénesis), como también en la descendencia (efectos estocásticos hereditarios).

Al igual que en la irradiación de células no germinales, las células germinales irradiadas pueden experimentar efectos deterministas (esterilidad); efectos que evidentemente no son hereditarios y por lo tanto no hemos de identificar los efectos producidos por la irradiación de las gónadas con los efectos genéticos.

En la [tabla 3](#) se presenta un esquema aclaratorio de estos conceptos.

Tabla 3

Clasificación de los tipos de efectos biológicos estocásticos/deterministas y somáticos/genéticos

	Efecto estocástico (la gravedad dependen de la dosis. Se relaciona con las mutaciones)	Efecto determinista (la gravedad depende de la dosis. Se relaciona con la letalidad)
Efectos hereditarios	Ejemplo: Anormalidades hereditarias	
Efectos somáticos	Ejemplo: Carcinogénesis	Ejemplo: Anemias, caída de cabello, esterilidad

Los efectos somáticos inmediatos aparecen en la persona irradiada en un margen de tiempo que va desde unos días hasta unas pocas semanas después de la exposición. Se trata de efectos deterministas y se pueden manifestar en un tejido concreto o sobre el cuerpo considerado como un todo, bajo un síndrome de denominación específica (por ejemplo, síndrome hematológico, gastrointestinal, etc.), y su severidad varía considerablemente con la dosis, tipo de energía de la radiación, así como la parte del cuerpo irradiada. Para estos efectos somáticos inmediatos, se supone que existe en cierta medida, un proceso de recuperación celular como, por ejemplo, en el caso de la fibrosis pulmonar debida a una dosis excesiva de radiación o los eritemas de la piel.

Los efectos somáticos tardíos son aquéllos que ocurren al azar dentro de una población de individuos irradiados. Son, por tanto, estocásticos, no siendo posible en ningún caso, establecer para ellos una relación dosis-efecto individual. La relación entre la inducción de una malignidad (leucemia, tumor, etc.) y la dosis, sólo podemos establecerla sobre grandes grupos de población irradiada, como un incremento en la probabilidad de que ocurra una enfermedad determinada por encima de su incidencia natural.

Decimos que son tardíos cuando el efecto se manifiesta entre 10 y 40 años después de la exposición. Por ejemplo, es frecuente encontrar períodos de latencia de 20-26 años para cánceres inducidos por radiación y de 10-15 años en el caso de leucemias.

Los efectos genéticos afectan a la descendencia. Pueden aparecer en la primera generación, en cuyo caso el daño se dice que es dominante. Más frecuentemente el efecto se manifiesta en individuos de las generaciones sucesivas (enfermedades hereditarias, defectos mentales, anormalidades del esqueleto, etc.). Son efectos estocásticos, puesto que dependen de la probabilidad de que una célula germinal con una mutación relevante, tome parte en la reproducción.

2.4 Respuesta sistémica a la radiación

a) Efectos deterministas

Al hablar de la respuesta sistémica a la radiación nos referimos a la respuesta de un sistema que dependerá de la respuesta de los órganos que lo constituya, de la de sus tejidos, así como de la respuesta de las poblaciones celulares de estos tejidos.

El orden de magnitud que se suele emplear al referirse a las diferentes dosis es:

- dosis baja : hasta 1 Gy
- dosis media : entre 1 Gy y 10 Gy
- dosis alta : superior a 10 Gy

suponiendo que estas dosis se reciban en un sólo órgano.

Los límites de dosis para personal profesionalmente expuesto y público en general están por debajo de estos órdenes de magnitud, con lo que se garantiza que no se presentarán efectos de tipo determinista.

Sensibilidad de los tejidos. La respuesta de un tejido u órgano a una dosis de radiación depende primariamente de dos factores: la sensibilidad inherente de las células, consideradas individualmente, y la cinética de la población, considerando al conjunto de sus células.

Desde 1906, es decir, sólo diez años después de los primeros datos respecto a fuentes de radiación rayos X y elementos radiactivos naturales, dos autores franceses, Bergonie y Tribondeau, emitieron sus enunciados respecto a las diferente radiosensibilidad de las células y tejidos vivos. De manera prácticamente exclusiva vinculan la rápida e intensa respuesta de los tejidos a la capacidad reproductora de las células que los componen, es decir, de forma directamente proporcional al índice de mitosis. Por otra parte ya era sabida la individualización, no sólo de cada tejido respecto a las mitosis presentes en el mismo (índice mitótico), sino también la situación individual de cada célula en el seno del tejido en diferente momento de su vida (asincronía celular). El efecto biológico dependerá por tanto, no sólo del elevado número de mitosis, sino también del momento de su ciclo vital en que se encuentre cada célula. En el caso del ser humano podríamos poner dos ejemplos ilustrativos; uno en cada extremo, es decir, máxima frente a mínima radiosensibilidad. El tejido cuya reproducción es necesariamente elevada es aquel donde se encuentran los precursores de las células de la sangre. Es el tejido hematopoyético, presente en la médula ósea, considerado como el más radiosensible y el más crítico frente a la radiaciones. En el otro extremo, baja radiosensibilidad, se encuentra el tejido humano más especializado, con bajísima capacidad reproductiva y con predominio de células adultas, maduras, es el tejido nervioso.

Hay otros factores que también influyen en la radiosensibilidad de los tejidos, unos dependientes de la propia radiación, como es la densidad de ionizaciones que deja en su trayectoria (transferencia lineal de energía), y otros dependientes de la distribución de la dosis en el tiempo. Desde el punto de vista biológico se ha demostrado también que la presencia de oxígeno aumenta la radiosensibilidad.

Descripción de las alteraciones sistémicas

Sistema hematopoyético

Como consecuencia de la elevada radiosensibilidad de los precursores hematopoyéticos, dosis moderadas de radiaciones ionizantes pueden provocar una disminución

proliferativa de las células, lo que se traduce al cabo de un corto período de tiempo en un descenso del número de células funcionales de la sangre. La pérdida de leucocitos conduce, tras la irradiación, a una disminución o falta de resistencia ante los procesos infecciosos. Por otra parte, la disminución del número de plaquetas indispensables para la coagulación sanguínea provoca una marcada tendencia a las hemorragias, que sumado a la falta de producción de nuevos elementos sanguíneos de la serie roja, puede provocar una grave anemia.

Sistema digestivo

El intestino delgado es la parte más radiosensible del tubo digestivo. Está constituido por un revestimiento formado por células que no se dividen, sino

que se desescaman diariamente hacia la luz del tubo y son sustituidas por nuevas células. Al igual que ocurre en la médula ósea, en esta región existe un compartimento de células cepa, que se dividen activamente, y que tienen una elevada sensibilidad.

La radiación puede llegar a inhibir la proliferación celular y, por tanto, el revestimiento puede quedar altamente lesionado, teniendo lugar una disminución o supresión de secreciones, pérdida de elevadas cantidades de líquidos y electrolitos.

Piel

Después de aplicar dosis de radiación moderadas o altas, se producen reacciones tales como inflamación, eritema y descamación seca o húmeda de la piel.

Testículo

Como consecuencia de la irradiación de los testículos se puede producir la despoblación de las espermatogonias, lo que se traduce en la disminución de nuevos espermatozoides, aunque la fertilidad puede mantenerse durante un período variable atribuible a los radorresistentes espermatozoides maduros. A este período le sigue, finalmente, otro de esterilidad temporal o permanente según la dosis recibida.

Ovario

Después de irradiar los ovarios con dosis moderadas, existe un período de fertilidad debido a los relativamente radorresistentes folículos maduros, que pueden liberar un óvulo. A este período fértil le puede seguir otro de esterilidad temporal o permanente, como consecuencia de las lesiones en los folículos intermedios al impedirse la

maduración y expulsión del óvulo. Posteriormente, puede existir un nuevo período de fertilidad como consecuencia de la maduración de los óvulos, que se encuentran en los folículos pequeños y radiorresistentes.

Las dosis necesarias para producir esterilización varían en función de la edad, dado que a medida que se aproxima la edad de la menopausia el número de ovocitos primarios disminuye y, por tanto, la dosis esterilizante

es más baja.

b) Efectos estocásticos

La mayor parte de los efectos tardíos se producen como consecuencia de la alteración del material genético de aquellas células que sobreviven a la radiación, exceptuando las distintas etapas de afectación de órganos, tales como fibrosis o ulceraciones, que se pueden presentar tardíamente y que son efectos no estocásticos.

Para este tipo de efectos no puede hablarse de una dosis umbral, dado que bastaría una interacción, simbólicamente hablando, para que se produjeran.

Otra característica, es que al aumentar la dosis aumenta la probabilidad de que tengan lugar estos efectos, aunque no la de que sean más graves. Ocasionalmente, por alguna razón desconocida, los genes y el ADN cambian espontáneamente, produciendo lo que se denominan mutaciones espontáneas, que se caracterizan por ser permanentes y por mantenerse en las sucesivas generaciones de células formadas a partir de la división de una célula mutada. Si las células mutadas son células germinales, existe la posibilidad de que la descendencia del individuo irradiado exprese los efectos originados por la mutación; por el contrario si las células mutadas no son células germinales tan sólo en el individuo irradiado existe la posibilidad de que se manifiesten los efectos.

De acuerdo con estos criterios podemos hacer una clasificación de los efectos estocásticos en los siguientes puntos:

a) **Somáticos**: afectan a la salud del individuo, que ha recibido la irradiación.

b) **Genéticos**: afectan a la salud de los descendientes del individuo irradiado.

2.5 Respuesta orgánica total a la radiación

La respuesta orgánica total viene determinada por la respuesta combinada de todos los sistemas orgánicos a la radiación. La respuesta de un organismo adulto a una exposición aguda (en un tiempo corto, del orden de minutos), de radiación penetrante (rayos X, gamma o neutrones), que provenga de una fuente externa y que afecte a todo el organismo, se conoce como síndrome de irradiación.

La respuesta que se presenta a una dosis de irradiación corporal y total se puede dividir en tres etapas:

- **Prodrómica.** Se caracteriza por náuseas, vómitos y diarreas. Puede durar desde algunos minutos hasta varias horas.
- **Latente.** Ausencia de síntomas. Varía desde minutos hasta semanas.
- **De enfermedad manifiesta.** Aparecen los síntomas concretos de los sistemas lesionados. El individuo se recupera o muere como consecuencia de las radiolesiones. Varía desde minutos hasta semanas.

3 Evaluación/cuantificación del riesgo de las radiaciones

La evaluación del riesgo de las radiaciones se basa en la probabilidad de sufrir los efectos mencionados anteriormente, y en la severidad de éstos.

Varios organismos internacionales publican los resultados de los estudios llevados a cabo en este sentido sobre amplios grupos de población. Entre ellos figuran la ICRP (anexo B de la ICRP-60, año 1990) y el volumen II del UNSCEAR-2000. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) establece que las estimaciones de riesgo asumidas, lo son únicamente con fines de protección y están ajustadas de forma tal que sean aplicables en la región de bajas dosis. Sus valores están en buen acuerdo con aquellos publicados por el UNSCEAR.

3.1 Límites de dosis

De lo visto hasta ahora se puede sacar en conclusión que es muy difícil establecer una cantidad de radiación que sea segura para el público en general. Teniendo en cuenta la utilidad real de las radiaciones en la práctica médica, el problema estriba en valorar apropiadamente el riesgo-beneficio al que se hallan sometidos ambos: personal que trabaja con radiaciones y público en general. Se trata en primer lugar, de evitar totalmente los efectos somáticos deterministas sobre el personal profesionalmente expuesto, y en segundo lugar reducir el riesgo de los efectos estocásticos a niveles aceptables, es decir: no mayores que los que conocen individuos con otras profesiones. En el año 1925 fue propuesto por primera vez un sistema de limitación de dosis. Estos límites, cuya denominación inicial fue “dosis de tolerancia” evolucionó hacia el concepto de "dosis máxima permisible" (DMP), acompañado de una reducción constantemente hasta nuestros días, fruto tanto de un mayor conocimiento de los efectos como de una mayor exigencia en la limitación de los riesgos. En la [tabla 4](#) se puede apreciar la evolución histórica sufrida por los límites de dosis dados por la ICRP:

Tabla 4

Evolución de los límites de dosis

Año	Exposición o dosis
Personal profesionalmente expuesto	
1925	0,1 dosis eritema/año (equivale a 69 R/año para rayos X moderadamente duros - aproximadamente son 662 mSv/año (1))
1928	100 R/año (equivale a unos 960 mSv/año)
1934	60 R/año (equivalentes a unos 576 mSv/año)
1949	0,3 rem/semana o 15 rem/año (equivale a 3 mSv/semana o 150 mSv/año)
1956	0,1 rem/semana o 5 rem/año (equivale a 1 mSv/semana o 50 mSv/año)
1977	50 mSv/año
1990	100 mSv/5 años y 50 mSv/año
Público en general	
1952	0,03 rem/semana (equivale a 0,3 mSv/semana)
1958	50 mSv/30 años
1977	5 mSv/año

1990	1 mSv/año
------	-----------

(1) $D_{\text{tejido}} (\text{rad}) = 0,96 \cdot X (\text{R})$

El concepto de dosis máxima permisible introducido en 1950 por la ICRP, se basa en el hecho fundamental de que, aunque no existan dosis de radiación seguras, existe una dosis por debajo de la cual se supone que el riesgo biológico para las personas expuestas profesionalmente y para la población en general es pequeño.

Los valores indicados para el año 1990 son los indicados en la recomendaciones del año 1990 (ICRP-60); siendo los valores utilizados en la Directiva Comunitaria 96/29 por la que se establecen las normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos que resultan de las radiaciones ionizantes. Además, esta directiva ha sido traspuesta a la legislación de los diferentes países comunitarios. Para el caso de España, dicha transposición se ha efectuado fundamentalmente a través del Real Decreto 783/2001 por el que se aprueba el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes. Los detalles sobre los límites actuales se abordan en el siguiente capítulo, dedicado a la protección radiológica. Su contenido se basa en lo establecido en los artículos 9 a 13 del citado Real Decreto, desglosándose en los siguientes apartados:

- Límites de dosis para los trabajadores profesionalmente expuestos (artículo 9)
- Protección especial durante el embarazo y la lactancia (artículo 10)
- Límites de dosis para personas en formación y estudiantes (artículo 11)
- Exposición especialmente autorizada (artículo 12)
- Límites de dosis para los miembros del público (artículo 13)

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

1 Protección radiológica. Criterios generales

1.1 Introducción

La protección radiológica es una disciplina científico-técnica que tiene como finalidad la protección de las personas y del medio ambiente frente a los riesgos derivados de la utilización de las radiaciones naturales, ya sean procedentes de fuentes radiactivas o bien de generadores de radiaciones ionizantes.

El uso de las radiaciones ionizantes reporta importantes beneficios a la Humanidad, pero también comporta ciertos riesgos, que comenzaron a ponerse de manifiesto pocos años después del descubrimiento de los rayos X, a finales del siglo XIX.

Las primeras normativas sobre protección radiológica datan de 1928 y fueron elaboradas por un organismo internacional independiente de cualquier autoridad nacional o supranacional, denominado entonces "Comisión Internacional de Protección contra los Rayos X y el Radio", fundado en base a una decisión adoptada en el segundo Congreso Internacional de Radiología. El año 1950 se reestructuró esta Comisión y pasó a denominarse "Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)", nombre con el que se la conoce en la actualidad. Con el paso de los años, esta Comisión ha ido ampliando su campo de interés a fin de tener en cuenta el creciente uso de las radiaciones ionizantes y también de las prácticas que comportan la generación de radiaciones ionizantes y de materiales radiactivos.

Durante los inicios de la Comisión, a pesar de sus recomendaciones, muy pocos países emprendieron una acción legislativa en este campo. No es hasta después de la II Guerra Mundial, cuando después de las investigaciones de la energía atómica con fines bélicos, se empieza a barajar la posibilidad de utilizar la energía nuclear en diversos fines pacíficos, por lo que se impone la regulación y el control de las sustancias radiactivas naturales y artificiales y la implantación de las primeras normas legales de protección radiológica.

Actualmente está generalizada la existencia de normas de protección radiológica en la mayoría de los países, basándose en las recomendaciones dictadas por la ICRP. Ello permite un elevado nivel de homogeneidad en los criterios de protección radiológica reflejados en la legislación de la mayoría de países.

1.2 Sistema de protección radiológica. Principios fundamentales

El objetivo fundamental del sistema de protección radiológica recomendado por la ICRP es el de garantizar un nivel elevado de protección, sin limitar indebidamente la obtención de los beneficios que se

derivan del uso de radiaciones ionizantes. Se considera, que una práctica (uso de radiaciones ionizantes) está **justificada** cuando el beneficio que comporta (obtención de energía eléctrica, información diagnóstica,...) compense el daño ocasionado como consecuencia de la exposición a la radiación. Además, el asumir un modelo lineal y sin umbral para los efectos de tipo estocástico, obliga a que las dosis se mantengan tan bajas como sea razonablemente alcanzable, teniendo presente factores económicos y sociales. Ello comporta un proceso de **optimización**, de modo que en las prácticas se han de adoptar mejoras hasta que se alcance un punto donde el coste de estas mejoras no se vea compensado por la disminución del coste asociado al "detrimento radiológico".

En el presente caso la disminución del detrimento radiológico viene dado por la disminución de dosis que comporta la mejora. Si se asigna un coste económico a la unidad de dosis recibida, la disminución del detrimento radiológico expresado en unidades monetarias vendrá dado por: disminución de la dosis a consecuencia de la mejora (Sv) x coste por unidad de dosis (€/Sv).

Además, a fin de garantizar un adecuado grado de protección individual, también se impone unos **límites individuales de dosis**. Adicionalmente a estos límites que protegen al individuo, cada día es más usual el uso de las denominadas **restricciones de dosis asociado a una práctica**. Estas pueden expresarse en forma de dosis individual máxima asociada a una práctica determinada y también como dosis colectiva (suma de todas las dosis individuales) máxima asociada a dicha práctica.

Resumiendo, el sistema de protección radiológica actualmente recomendado por la ICRP está basado en tres principios fundamentales:

- Justificación
- Optimización
- Limitación de dosis

a los que se ha a añadir las restricciones de dosis asociadas a la práctica.

1.2.1 Justificación

Toda exposición a radiación ionizante debe estar justificada. Tal como ya se ha adelantado, el beneficio que nos aporte tiene que ser superior al riesgo de exponerse a ella.

1.2.2 Optimización

Se sigue el criterio “ALARA” (As Low As Reasonably Achievable), según el cual todas las exposiciones a las radiaciones ionizantes deben ser mantenidas tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta los citados factores económicos y sociales.

1.2.3 Limitación de dosis

En todo caso, la dosis de radiación que puede recibir cualquier individuo no debe superar unos valores establecidos como límites legales, lo que garantiza la protección del público en general y del personal profesionalmente expuesto.

La limitación de los efectos derivados de las radiaciones ionizantes se consigue evitando las exposiciones no justificadas y manteniendo tan bajas como sea posible las justificadas. La aplicación de estos principios constituye la base para establecer unas medidas de protección que deben asegurar un riesgo individual justificado por el beneficio obtenido y suficientemente bajo, y adicionalmente mantener unos niveles totales de exposición a las radiaciones lo más bajos posibles. La dosis de radiación recibida por un individuo al permanecer en las proximidades de un emisor o generador de radiaciones ionizantes, depende de tres factores:

- El tiempo de permanencia
- La distancia entre la fuente y el individuo

- La materia interpuesta entre uno y otro

El sistema de protección radiológica establecido en la actualidad en España, fundamentalmente se encuentra recogido en el [Real Decreto 783/2001](#) por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes, en cual se basa en la [Directiva 96/29/EURATOM](#) de 13 de mayo de 1996 sobre normas básicas de radioprotección, la cual a su vez se basa en las recomendaciones de la

Comisión Internacional de Protección Radiológica ([ICRP](#)), dadas en su publicación número 60 (ICRP-60, 1990).

1.3 Límites de dosis para el personal profesionalmente expuesto y para los miembros del público

De la trasposición de lo indicado en el artículo 9 de la [Directiva 96/29 de EURATOM](#), resultan los límites de dosis para los **trabajadores profesionalmente expuestos**, detallados en el [artículo 9 del Real Decreto 783/2001](#). Resulta un límite de dosis efectiva de 100 mSv durante todo periodo de cinco años oficiales (de enero a diciembre), sujeto además a una dosis efectiva máxima de 50 mSv en cualquier año oficial. Además, también se imponen limitaciones específicas a tres órganos o zonas de cuerpo:

- El cristalino: límite de dosis equivalente de 150 mSv por año oficial.
- La piel: límite de dosis equivalente de 500 mSv por año oficial. Dicho límite se aplicará a la dosis promediada sobre cualquier superficie de 1 cm², con independencia de la zona expuesta.
- Las manos, antebrazos, pies y tobillos: 500 mSv por año oficial.

Tabla 1

Límites de dosis para el personal profesionalmente expuesto

Límites de dosis para el personal profesionalmente expuesto	
Límite de dosis efectiva	100 mSv durante todo periodo de 5 años oficiales y 50 mSv en un año oficial
Límite de dosis equivalente al cristalino	150 mSv
Límite de dosis equivalente a la piel	500 mSv en un año oficial (1)

Límite de dosis en extremidades	500 mSv en un año oficial
---------------------------------	---------------------------

(1) Valor promediado sobre cualquier superficie cutánea de 1 cm², con independencia de la superficie expuesta

En cuanto a los límites para los **miembros del público**, se detallan en el [artículo 13 del Real Decreto 783/2001](#), siendo de 1 mSv por año oficial.

Además se ha previsto que en circunstancias especiales, puede permitirse un valor de dosis efectiva más elevado en un único año, siempre que el promedio durante cinco años consecutivos no sobrepase 1 mSv por año. También se establecen límites específicos para el cristalino y para la piel, siendo del 10% de los límites indicados para el personal profesionalmente expuesto, por lo que resulta:

- El cristalino: límite de dosis equivalente de 15 mSv por año oficial.
- La piel: límite de dosis equivalente de 50 mSv por año oficial. Dicho límite se aplicará a la dosis promediada sobre cualquier superficie de 1 cm², con independencia de la zona expuesta.

Tabla 2

Límites de dosis para los miembros del público

Límites de dosis para los miembros del público	
Límite de dosis efectiva	1 mSv por año oficial. En circunstancias especiales puede ser superior en un único año oficial (1), siempre y cuando no se supere 5 mSv en 5 años oficiales consecutivos.
Límite de dosis equivalente al cristalino	15 mSv
Límite de dosis equivalente a la piel	50 mSv en un año oficial (2)

(1) Previa autorización por parte del CSN

(2) Valor promediado sobre sobre cualquier superficie cutánea de 1 cm², con independencia de la superficie expuesta

En el [artículo 10 del Real Decreto 783/2001](#) se aborda la protección especial que se ha de aplicar durante el **embarazo y la lactancia**. En el caso de mujeres embarazadas, la protección del feto ha de ser comparable a la de los miembros del público, es decir, que la dosis al feto desde el diagnóstico del embarazo hasta el final de la gestación, no excederá de 1 mSv. Para el caso específico de la lactancia, se indica que a dicha mujer no se le asignarán trabajos que supongan un riesgo significativo de contaminación radiactiva.

Los límites de dosis para las **personas en formación y estudiantes** se aborda en el [artículo 11 del Real Decreto 783/2001](#). Para el caso de mayores de 18 años que durante sus estudios tengan que utilizar fuentes, el límite de dosis será el mismo que el de los trabajadores expuestos. El límite de dosis efectiva para personas en formación y estudiantes con edades comprendidas entre 16 años y 18 años, que durante sus estudios tengan que utilizar fuentes, es de 6 mSv por año oficial.

2 Legislación y reglamentación

El Tratado EURATOM prevé el establecimiento en la Unión Europea de normas básicas uniformes dirigidas a la **protección radiológica de la población y de los trabajadores** frente a los riesgos que resulten de las radiaciones ionizantes. Las normas básicas de protección radiológica se establecieron por primera vez en 1959 en una Directiva del Consejo y han sido modificadas en repetidas ocasiones para tener en cuenta el progreso de los conocimientos científicos en materia de protección radiológica.

La norma actual se recoge, como se ha indicado, en la [Directiva EURATOM 96/29](#). En cuanto a la **protección radiológica del paciente**, dentro de los usos en el ámbito sanitario de las radiaciones ionizantes, se cuenta con una regulación específica, destacando la [Directiva EURATOM 97/43](#) relativa a la protección de la salud frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes en exposiciones médicas.

2.1 Los inicios de la legislación nuclear española

A medianos del siglo XX los estudios y conocimientos adquiridos en física nuclear y en ingeniería, mostraban que la energía nuclear podría participar, con una importancia creciente, en el abastecimiento energético. Dentro de este contexto, y sin descartar

posibles intereses militares, en España se creó por Decreto Ley, de 22 de octubre de 1951, la Junta de Energía Nuclear (JEN).

Desde su creación, ésta proyectó su actuación como Centro Nacional de Investigación, como organismo asesor del Gobierno encargado de los problemas de seguridad y de protección contra las radiaciones ionizantes y como impulsora del desarrollo industrial.

Pirámide legislativa

En lo concerniente a la utilización pacífica de la energía nuclear y las radiaciones ionizantes, la pirámide legislativa española parte de dos leyes básicas: la [Ley 25 del año 1964](#) sobre Energía Nuclear y la [Ley 15 de 1980](#) de creación del Consejo de Seguridad Nuclear. La primera de dichas leyes instituye a la JEN, actualmente Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas ([CIEMAT](#)), como organismo oficial encargado de realizar, fomentar y coordinar investigaciones estudios y trabajos conducentes al desarrollo de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear y a la promoción de una industria nacional de materiales y equipos nucleares.

La segunda de dichas leyes deroga parte de la primera y crea el Consejo de Seguridad Nuclear ([CSN](#)), al que transfiere buena parte de las misiones anteriormente encomendadas a la JEN.

Aparte de estas dos leyes básicas, se han venido desarrollando nuevas leyes para regular el uso el uso pacífico de las radiaciones ionizantes y de la energía nuclear: la [Ley 54/1997](#), de 27 de noviembre, del Sector Eléctrico, que modifica algunos artículos de la Ley de Energía Nuclear y establece el Fondo para la financiación del segundo ciclo del combustible nuclear; y la [Ley 14/1999](#), de 4 de mayo, de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el Consejo de Seguridad Nuclear.

Para el desarrollo de estas leyes se han dictado decretos que aprueban y dan carácter de obligado cumplimiento a los correspondientes reglamentos:

el [Decreto 1891/1991](#) sobre instalación y utilización de aparatos de rayos X con fines de diagnóstico médico, el [Real Decreto 1836/1999](#) por el que se aprueba el Reglamento sobre Instalaciones Nucleares y Radiactivas y el ya citado [Real Decreto 783/2001](#) por el que se aprueba el Reglamento sobre Protección

Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.

Para el caso específico de la **protección del paciente** expuesto a las radiaciones ionizantes, de un modo generalista se cuenta con el [Real Decreto 1132/1990](#) por el que se establecen medidas fundamentales

de protección radiológica de las personas sometidas a exámenes y tratamientos médicos y el [Real Decreto 815/2001](#) sobre justificación del uso de las radiaciones ionizantes para la protección radiológica de las personas con ocasión de exposiciones médicas; contando además con una reglamentación específica para cada una de las principales áreas sanitarias donde se utilizan radiaciones ionizantes:

Radioterapia: [Real Decreto 1566/1998](#) por el que se establecen los criterios de calidad en radioterapia

Medicina Nuclear: [Real Decreto 1841/1997](#) por el que se establecen los criterios de calidad en medicina nuclear

Radiodiagnóstico: [Real Decreto 1976/1999](#) por el que se establecen los criterios de calidad en radiodiagnóstico.

La gestión de los residuos radiactivos recibe un tratamiento específico a través del [Real Decreto 1522/1984](#), por el que se autoriza la constitución de la "Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. ([ENRESA](#)).

A continuación se describen los aspectos fundamentales de las citadas leyes y de los reglamentos que las desarrollan.

2.2 Ley sobre la Energía Nuclear

Publicada en el BOE de 4 de mayo de 1964, recoge los principios fundamentales sobre el desarrollo de la energía nuclear y sobre la protección frente al riesgo de las radiaciones ionizantes. El primero de sus capítulos define los propósitos de la Ley:

- Fomentar el desarrollo de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear y regular su puesta en práctica dentro del territorio nacional

- Proteger vida, salud y medio ambiente, frente a los peligros de la energía nuclear y los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes
- Regular la aplicación de los compromisos internacionales suscritos por España sobre energía nuclear y radiaciones ionizantes.

2.3 Ley de creación del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)

En el mes de abril de 1980, las Cortes Generales aprobaron la creación del Consejo de Seguridad Nuclear, que fue sancionado por el Rey como Ley 15/1980. Esta ley deroga y modifica algunas disposiciones de la ley anterior, segregando de la Junta de Energía Nuclear, las misiones que tenía encomendadas en relación con la seguridad de las instalaciones nucleares y radiactivas, misiones que se encomiendan al nuevo ente. Éste se constituye como organismo independiente de la Administración del Estado, debiendo informar de sus actividades y decisiones al Ministerio competente del Gobierno y, periódicamente, al Congreso y al Senado.

El [CSN](#) deberá realizar las inspecciones y auditorías que estime necesarias para el cumplimiento de su misión y se le autoriza a delegar algunas de sus funciones en las Comunidades Autónomas. La Ley atribuye al CSN la tramitación de expedientes para la concesión de autorizaciones de las instalaciones nucleares y radiactivas que, en caso favorable, deberán ser propuestas al Ministerio competente del Gobierno, o a la del Gobierno Autónomo cuando tenga transferida esta competencia. Las tasas y precios están regulados a través de la [Ley 14/1999](#) de Tasas y Precios Públicos por servicios prestados por el CSN. Finalmente, referido a la organización interna, en la actualidad se basa en el [Real Decreto 469/2000](#) por el que se modifica la estructura orgánica básica del CSN.

2.4 Reglamento sobre instalaciones nucleares y radiactivas

Aprobado por [Decreto 1836/1999](#) y publicado en el BOE de 6 de diciembre, desarrolla los principios contenidos en la ley sobre Energía Nuclear y establece la debida regulación del régimen de autorizaciones administrativas, pruebas, puesta en marcha y operación de las instalaciones, personal y documentación de las mismas, inspección y cuanto se refiere a la fabricación de equipos para la producción, manipulación de isótopos radiactivos y para la generación de radiaciones ionizantes.

Autorizaciones

En el [artículo 11](#) clasifica y define las instalaciones nucleares, mientras que a través del [artículo 34](#) se hace lo propio para las instalaciones radiactivas. Se dispone que tanto las instalaciones nucleares como las radiactivas requieren de un proceso administrativo de autorización por parte del Ministerio competente del Gobierno, previo informe favorable del CSN

Licencias de personal

El [título V](#), está dedicado al personal de las instalaciones nucleares y radiactivas. El personal que opere en dichas instalaciones o que dirija su operación deberá estar provisto de una licencia específica

del CSN. Existen dos clases de licencias:

- Licencia de Operador, que capacita, bajo la inmediata dirección de un supervisor, para el manejo de los dispositivos de control de la instalación o la manipulación ordinaria de las sustancias radiactivas autorizadas.
- Licencia de Supervisor, que capacita para dirigir el funcionamiento de una instalación y las actividades de sus operadores.

Las licencias de Operador y Supervisor serán personales e intransferibles y están sometidas a un proceso de renovación. En ellas se incluirán las condiciones limitativas, que se estimen adecuadas en cada caso.

El Reglamento señala cómo, antes de la puesta en marcha y en base a la documentación presentada por el titular de la autorización, el CSN especificará el número mínimo de empleados con licencia de Operador y Supervisor afectos a la instalación; y podrá exigirse, además, la designación de un Jefe de Servicio de Protección contra las Radiaciones en las instalaciones, que por su importancia lo requieran.

Funcionamiento de las instalaciones

El titular de la autorización viene obligado a llevar un [Diario de Operación](#), donde se refleje de forma clara y concreta toda la información referente a la operación de la instalación, incidencias de cualquier tipo, comprobaciones, niveles de radiación, operaciones de mantenimiento, modificaciones, almacenamiento de residuos radiactivos, descarga de los mismos al exterior, etc. Deberá figurar el nombre y firma del supervisor de servicio, anotando los correspondientes relevos y sustituciones.

El titular de la autorización de una instalación radiactiva está obligado a presentar a los órganos competentes del Gobierno y al [CSN](#), dentro del primer trimestre de cada año, un [Informe Anual](#) en el que se resume la actividad de la instalación en el año anterior y las incidencias que en ella hayan ocurrido.

2.5 Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes

Mediante el Reglamento sobre protección sanitaria contra radiaciones ionizantes, aprobado por el Real Decreto 783/2001, se establecen los criterios objetivos que deben fundamentar la protección radiológica, basándose en las normas dictadas por los organismos internacionales competentes. Dichos criterios señalan:

- Que el número de personas expuestas a las radiaciones ionizantes deberá ser el menor posible.
- Que las dosis recibidas, tanto por dichas personas como por el público en general, deberán ser tan pequeñas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores sociales y económicos
- Que las dosis personales sean inferiores a los límites que fijan las citadas normas y que recoge este reglamento.

Se establecen en él las [categorías del personal profesionalmente expuesto](#), la [clasificación de las zonas de trabajo](#) en zonas vigiladas y controladas, así como la señalización de las mismas, los límites anuales de dosis tanto para las personas profesionalmente expuestas, como para miembros del público en general, los límites especiales para estudiantes mayores de 16 años y menores de 18 años y para mujeres en tanto en periodo de gestación como de lactancia. En la verificación del cumplimiento de los límites de dosis, no se incluirán las dosis recibidas en calidad de paciente tanto en exámenes como en tratamientos médicos.

Para el caso de la contaminación interna, se ha de tener presente la dosis total que se recibirá en tanto se sea portador del material radiactivo incorporado, dando lugar a la denominada **dosis equivalente comprometida**, siendo la dosis total que se recibirá consecuencia de una incorporación. Desde el punto de vista matemático se define como la integral respecto al tiempo de la tasa de dosis equivalente que recibirá un individuo como consecuencia de una incorporación. De modo genérico, el tiempo de integración se hace en el transcurso de los 50 años que siguen a la incorporación, salvo para el caso de los niños donde se puede aplicar un tiempo máximo de integración de 70 años.

[En el anexo III](#) del Real Decreto 783/2001 se indica como se ha de llevar a cabo la determinación de la dosis debida a la exposición interna indicándose para cada radionucleido los correspondientes coeficientes de dosis por ingesta y por inhalación, diferenciado entre el colectivo del personal profesionalmente expuesto y los miembros del público en general. Dichos coeficientes se expresan en unidades de dosis efectiva comprometida (expresada en Sv) por unidad de actividad incorporada (expresada en Bq).

Según se especifica en su [artículo 2](#), este reglamento es aplicable a todas las prácticas que impliquen un riesgo derivado de las radiaciones ionizantes que procedan de una fuente artificial, o bien, de una fuente natural de radiación cuando los radionucleidos naturales son o han sido procesados por sus propiedades radiactivas, fisionables o fértiles. Cabe indicar que en dicho tipo de prácticas se encuentra incluidas las instalaciones nucleares, las instalaciones radiactivas y las instalaciones de radiodiagnóstico.

2.6 Real Decreto de constitución de [ENRESA](#)

Mediante el [Real Decreto 1522/84](#) de 4 de julio, el Gobierno autoriza la creación de la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A. (ENRESA), una empresa pública e independiente de los productores de residuos, cuyas misiones básicas consisten en gestionar todo tipo de residuos radiactivos y realizar el desmantelamiento de instalaciones nucleares.

En base a lo indicado en el artículo 2 del citado Real Decreto 1522/84, son cometidos de [ENRESA](#):

- a) Tratar y acondicionar los residuos radiactivos.
- b) Buscar emplazamientos, concebir, construir y operar los centros para el almacenamiento de residuos de baja, media y alta actividad.
- c) Gestionar las operaciones derivadas de la clausura de las instalaciones nucleares y radiactivas.
- d) Establecer sistemas para la recogida, transferencia y transporte de los residuos radiactivos.

- e) Actuar en caso de emergencias nucleares, como apoyo a los servicios de Protección Civil.
- f) Acondicionar de forma definitiva y segura los estériles originados en la minería y en la fabricación de concentrados.
- g) Asegurar la gestión a largo plazo de toda instalación que sirva como almacenamiento de residuos.
- h) Efectuar los estudios técnicos y económico-financieros necesarios que tengan en cuenta los costos diferidos derivados de la gestión de los residuos radiactivos, al objeto de establecer la política económica adecuada.
- i) Cualquier otra actividad necesaria para el desempeño de su objeto social.

Los aspectos de sus actividades que tengan relación con la seguridad nuclear o protección radiológica son supervisados y controlados por el CSN.

El fin último de esta gestión es proteger a las personas y al medio ambiente de las radiaciones que emitan los radionucleidos contenidos en los residuos radiactivos, minimizando tanto sus potenciales efectos como los costes de esa protección a las generaciones futuras.