

DIRECCIÓN EJECUTIVA

CCHEN (O) N° 29/053/

ANT.: Solicitud N°AU003T0000105-
de fecha 14 de julio de 2017

Santiago, 1 de agosto de 2017

Señor

Presente

De mi consideración:

En el marco de la Ley N° 20.285 sobre Acceso a la Información Pública, informo a usted que la Comisión Chilena de Energía Nuclear, CCHEN, recibió la solicitud AU003T0000105, de fecha 14 de julio de 2017, presentada por usted, a través del Portal de Transparencia, requiriendo la siguiente información :

*"El suscrito firmante [redacted] funcionario hospitalario, solicito de vuestra consideración enviarme información a lo que refiere a efectos biológicos producidos por las radiaciones ionizantes y posibles consecuencias o trastornos por la acción de las radiaciones ionizantes sobre los tejidos de los organismos vivos en este caso a trabajadores de la salud ocupacionalmente expuesto a este riesgo, efectos a corto plazo y a largo plazo.
De acuerdo a la Ley transparencia y esperando respuesta se agradece.*

En respuesta a su consulta, adjunto a esta carta, sírvase encontrar el documento "Efectos de las Radiaciones Ionizantes en el ser humano", elaborado por esta Comisión, y que es una recopilación muy completa, ampliamente revisada y elaborada por profesionales de vasta experiencia y trayectoria en esta institución.

Saluda atentamente a usted,



[Handwritten signature]
PATRICIO AGUILERA POBLETE
Director Ejecutivo
Comisión Chilena de Energía Nuclear

RMQ/MLV/dbs

**COMISION CHILENA DE ENERGIA NUCLEAR
DEPARTAMENTO DE PROTECCION RADIOLOGICA Y AMBIENTAL**

INFORME

EFFECTOS DE LAS RADIACIONES IONIZANTES EN EL SER HUMANO

COMPILADO POR:

**SR. LUIS VIVALLO, SEPRO,
SRA. LORETO VILLANUEVA, DPRA
DRA. SYLVIA SANHUEZA, RADIOMEDICINA**

VERSION REVISADA: MAYO 2010

INDICE

RESUMEN EJECUTIVO

1.- INTRODUCCION

2.- INTERACCION DE LAS RADIACIONES CON LA CELULA

3.- CLASIFICACIÓN DE EFECTOS BIOLÓGICOS

3.1.- SEGÚN LA RELACION CAUSA-EFECTO

3.2.- SEGÚN LA RELACION TEMPORAL

3.3.- SEGÚN LOS TEJIDOS IRRADIADOS

4.- COMPARACION DE DOSIS Y SUS EFECTOS EN EL SER HUMANO

5.- MECANISMOS DEL DAÑO CELULAR POR EFECTO DE RADIACIONES IONIZANTES

6.- DESCRIPCION DE LOS PRINCIPALES EFECTOS

6.1.- EFECTOS DETERMINISTAS O DETERMINÍSTICOS

6.1.1.- FACTORES DE LOS CUALES DEPENDE EL EFECTO BIOLÓGICO DE LAS RADIACIONES

6.1.2.- SÍNDROME AGUDO DE RADIACIÓN, SAR

6.1.3.- EFECTOS DETERMINÍSTICOS EN DIVERSOS ORGANOS

6.2.- EFECTOS ESTOCÁSTICOS (O PROBABILÍSTICOS)

6.2.1.- CÁNCER

6.2.2.- EFECTOS HEREDITARIOS

6.2.3.- INDUCCIÓN DE OTRAS ENFERMEDADES DIFERENTES AL CÁNCER

7.- EXPOSICION DEL FETO

8.- RESUMEN DE LOS EFECTOS DE LA RADIACION IONIZANTE SOBRE EL SER HUMANO

ANEXO 1: ORIGEN Y PRINCIPIOS DE LA PROTECCION RADIOLOGICA

ANEXO 2 : EFECTOS HEMATOPOYETICOS ASOCIADOS A SAR

ANEXO 3: DEFINICION DE ALGUNAS MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLOGICAS

ANEXO 4: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

RESUMEN EJECUTIVO

Los efectos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos, esto es, los llamados efectos biológicos, pueden clasificarse y describirse desde varios puntos de vista:

- según la relación causa-efecto entre la radiación recibida y los efectos producidos por ella, se dividen en deterministas y estocásticos
- según el tiempo transcurrido entre la exposición a la radiación y la manifestación de sus efectos, se clasifican en inmediatos o tempranos y retardados o tardíos,
- según aparezcan los efectos en los individuos expuestos a la radiación o en sus descendientes, se clasifican en somáticos o genéticos

Los estudios hechos por la CIPR (Comisión Internacional de Protección Radiológica) y el UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), como también los estudios que hace el OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica) con la participación de especialistas de los estados miembros, demuestran que la radiación ionizante puede dar como resultado en su interacción con los seres vivos y el hombre, efectos adversos para la salud, en particular, efectos deterministas y efectos estocásticos.

Los efectos deterministas se caracterizan por requerir una dosis umbral para su aparición, es decir, sólo se producen por encima de un valor determinado de dosis y a partir de éste, su severidad aumenta con la dosis recibida. Son ejemplos de efectos deterministas a altas dosis: eritema, cataratas, síndrome de irradiación aguda, etc.

Los efectos estocásticos son aquéllos que aparecen aleatoriamente o debido al azar. Para estos efectos, la comunidad científica ha adoptado una actitud conservadora asumiéndose la hipótesis de que no hay dosis umbral establecida y su probabilidad de aparición aumenta con la dosis recibida.

Como consecuencia del estado actual de conocimientos de los efectos biológicos de la radiación, la CIPR considera que el objetivo principal de la protección radiológica es evitar la aparición de efectos biológicos deterministas y limitar al máximo la probabilidad de aparición de los estocásticos.

La prevención de los efectos deterministas queda garantizada estableciendo unos límites de dosis por debajo de la dosis umbral. Para los efectos estocásticos, al asumir la hipótesis de que no existe dosis umbral conocida, estamos obligados a mantener los niveles de dosis tan bajos como razonablemente sea posible, con la finalidad de reducir la probabilidad de su inducción. Los efectos estocásticos que puede inducir la radiación ionizante no se diferencian de los producidos por causas naturales u otros factores.

1.- INTRODUCCION

Toda práctica o actividad que involucre el empleo de materiales radiactivos y/o equipos generadores de radiaciones ionizantes, que corresponden a la llamada radiactividad artificial o antropogénica, conlleva un riesgo.

Se denomina radiación ionizante a aquel tipo de radiación con energía suficiente para romper enlaces químicos y producir iones (átomos cargados eléctricamente). Son ejemplos de radiaciones ionizantes las partículas alfa, partículas beta, rayos gamma, rayos x y neutrones. La medida de la energía depositada en el medio, es la dosis. Para efectos prácticos se definen dos magnitudes básicas:

Dosis absorbida: mide la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de material irradiado. Se mide en Gray, Gy (1 J/ kg). (Antiguamente se medía en Rad).

Dosis equivalente: mide el daño biológico producido por la radiación en un tejido, por tanto depende del tipo de radiación. Es igual a la dosis absorbida multiplicada por el factor de ponderación que es diferente según el tipo de radiación. Se mide en Sievert, Sv. (1 J/kg, para factor ponderación = 1). (Antiguamente se medía en rem)

Para los fines de analizar los efectos biológicos de la radiación a altas dosis, la dosis se expresa en Gray o Rad y no en términos de dosis equivalente (Sv o Rem).

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes sobre los seres vivos se han estudiado por más de 70 años y en la actualidad puede decirse que son bien conocidos, en particular para las dosis moderadas y altas (sobre 100 mSv) debido a la experiencia acumulada en el seguimiento de los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki, (el que ofrece información sobre una población de más de 90.000 personas que han sido seguidas desde 1950, con individuos de todas las edades, considerándose que la totalidad del organismo fue expuesto a la radiación, Ref. (1)), el seguimiento a los afectados en Chernobyl y más recientemente los estudios de efectos del uso terapéutico de altas dosis de radiación, los estudios por uso diagnóstico de radiaciones y los estudios en algunos grupos de trabajadores ocupacionalmente expuestos, lo que permite disponer de una base de datos bien contrastada. Las Naciones Unidas constituyeron en 1955 un Comité científico especial sobre los efectos de la radiación atómica, UNSCEAR, que es junto a la CIPR (Comisión Internacional de Protección Radiológica), los máximos referentes a nivel mundial para la consideración y evaluación de los efectos biológicos de las radiaciones sobre el ser humano, y cuyas publicaciones, Refs. (2), (3) y (4) constituyen los fundamentos de la protección radiológica que se utiliza a escala mundial. Sin embargo, para los efectos a bajas dosis (inferiores a 100 mSv) existen opiniones contradictorias entre los expertos, y en esta área está

centrada gran parte de la investigación actual, existiendo preocupación a nivel mundial, Ref. (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12) y (13) especialmente debido a la irradiación poblacional asociada a la medicina. Pese a ello se ha avanzado sustantivamente en esta área al integrar información biológica experimental (que ha experimentado un nuevo desarrollo con la incorporación de las nuevas técnicas de biología molecular) con la información epidemiológica y la validación de los modelos probabilísticos que permiten una mejor evaluación de los riesgos asociados a estos niveles de radiación cuantificando el error y conociendo los límites de confianza, Ref. (5) y (6).

La protección radiológica es la principal disciplina técnica desarrollada para prevenir o contrarrestar los efectos adversos de la radiación ionizante sobre las personas y sus principios son los siguientes:

Justificación: Cualquier exposición a las radiaciones ionizantes debe estar justificada, de modo que los beneficios de dichas radiaciones sean mayores que sus riesgos;

Optimización: Basada en el criterio ALARA es decir, la exposición a la radiación debe ser tan baja como sea razonablemente posible; (as low as reasonably achievable)

Limitación de Dosis: la dosis recibida no debe superar los límites recomendados por la CIPR (Comisión Internacional de Protección Radiológica).

(Para mayores detalles sobre los Principios de Protección Radiológica, ver Anexo 1).

El consenso científico y técnico en materia de protección radiológica ha llevado al establecimiento de un Régimen Internacional de Seguridad Nuclear y Radiológica, que el cual ha sido impulsado a nivel mundial por el Organismo Internacional de Energía Atómica, OIEA, basándose en las recomendaciones de los órganos técnicos especializados en la materia y de amplio reconocimiento científico, como la CIPR y el UNSCEAR. Este régimen internacional involucra su regulación, evaluación, fiscalización y control por parte de Autoridades Competentes, del cual nuestro país es parte a través de la suscripción de Convenciones, Tratados y del establecimiento de Leyes, Reglamentos y Normativa.

2.- INTERACCIÓN DE LAS RADIACIONES CON LA CÉLULA

La interacción de la radiación con las células produce alteraciones en las moléculas de ADN, ARN y otros componentes biológicos, formando pares de iones y radicales libres que pueden dañar las estructuras celulares.

Según la intensidad de la radiación, los daños causados pueden producir retrasos y alteraciones en la reproducción o muerte celular. Muchas veces hay recuperación celular y recombinación de los iones producidos previamente.

La respuesta celular a la radiación no es igual para todas las células, ya que su radiosensibilidad es muy diferente. Así, la respuesta a la radiación de los diferentes órganos, depende de los tejidos que los componen y de sus poblaciones celulares, así como de las características físicas de la radiación. Aquellos órganos que se ven más afectados por la radiación y dan lugar a consecuencias más graves para el organismo son denominados Organos Críticos. Los principales son la médula ósea, donde se producen las células sanguíneas, el intestino delgado, en que se realiza la digestión y la absorción de alimentos, y las gónadas, donde se producen y maduran las células germinales. Ref. (14 y 15).

3.- CLASIFICACIÓN DE LOS EFECTOS BIOLÓGICOS

Existen varias formas de estudiar los efectos biológicos, atendiendo a diversos criterios, siendo el más relevante, la clasificación según la relación causa-efecto, que se explica a continuación :

3.1.- Según la relación causa-efecto, Refs. (15 y 16):

Atendiendo a la relación causa-efecto, los efectos biológicos se clasifican en:

- Efectos determinísticos (o no estocásticos, causales) cuya severidad depende de la dosis recibida, siendo las lesiones más severas a mayor dosis recibida llegando a provocar incluso la muerte. Pero por debajo de una dosis mínima no tienen lugar. En general, se producen cuando altas dosis de radiación afectan diversos tejidos y órganos como la médula ósea, el aparato digestivo, la piel, los testículos y los ovarios, entre otros
- Efectos estocásticos o aleatorios, en ellos la gravedad no depende de la dosis, y el daño a la salud de las personas involucradas ocurre a través de un fenómeno de naturaleza probabilística. En caso de producirse los efectos, son siempre graves y comprenden la aparición de cáncer y las alteraciones genéticas que dan lugar a las anomalías hereditarias.

Otros criterios de clasificación se relacionan con la variable temporal y con las células del cuerpo que reciben la irradiación, lo que se explica a continuación:

3.2.- Según la Relación Temporal, Refs . (15) y (16):

Atendiendo a la relación temporal, entre el momento que tiene lugar la irradiación y el tiempo que transcurre hasta que se manifiestan las lesiones, los efectos biológicos se clasifican en:

- Efectos inmediatos o tempranos: se manifiestan al cabo de horas o semanas, llegando a causar la muerte cuando los niveles de radiación recibida por todo el cuerpo son elevados, o causando un simple enrojecimiento de la piel, cuando las dosis elevadas de radiación son

- Efectos retardados o tardíos: se manifiestan cuando el cuerpo humano es sometido a bajas dosis de radiación, pero recibida a lo largo de un gran periodo de tiempo. Suelen provocar la aparición de cáncer o enfermedades congénitas.

3.3.- Según los tejidos irradiados, Refs . (15) y (16)

Según la irradiación afecte las células somáticas o bien las germinales de un individuo, los efectos se clasifican en:

- Somáticos: aparecen cuando los daños se manifiestan durante la vida del individuo irradiado, por irradiación de sus células somáticas. A su vez se dividen en inmediatos o retardados, en función del tiempo transcurrido desde su irradiación.
 - ✓ Somáticos inmediatos: aparecen en el individuo irradiado en un intervalo de tiempo que puede ir desde unos días hasta semanas después de la exposición. Se estima que existe en cierta medida, un proceso de recuperación celular como por ejemplo, ocurre en el caso de una fibrosis pulmonar causada por una dosis excesiva de radiación, o los eritemas de la piel.
 - ✓ Somáticos retardados: ocurren al azar dentro de una población de individuos irradiados. La relación entre la inducción de una enfermedad (leucemia, tumor sólido, etc.) y la dosis, sólo puede establecerse sobre grandes grupos de población irradiada. De acuerdo a los estudios conducidos con los supervivientes de las bombas atómicas, dichos efectos se manifiestan entre 2 y 30 años después de la exposición.
- Genéticos o Hereditarios: Aquellos en que los daños se manifestarían en la descendencia del individuo irradiado, ya que la radiación ha producido lesiones en sus células germinales o reproductoras. No deben confundirse estos efectos genéticos o hereditarios causados por la irradiación de células germinales, con la irradiación de las gónadas, que pueden degenerar en esterilidad y cuya magnitud depende de la intensidad de la dosis.

Pueden aparecer en primera generación o más frecuentemente en los individuos de las generaciones sucesivas, como enfermedades hereditarias, defectos mentales, anomalías óseas, etc. Son efectos estocásticos, ya que dependen de que una célula germinal con una mutación relevante tome parte o

no en la reproducción, pero a la fecha no se han observado en humanos sino sólo en animales, Ref. (14).

4.- COMPARACION DE DOSIS Y SUS EFECTOS EN EL SER HUMANO

Con el fin de comparar los efectos sobre la salud se presenta en la siguiente Tabla Valores Comparativos de Dosis, en las cuales se incurre en la vida cotidiana y aquellas provocadas por un accidente.

Tabla 1: Valores comparativos de dosis de radiación, Ref. (16 y 17)

DOSIS (mSv)	DOSIS DE RADIACION, Valores Comparativos (EFECTOS SOBRE LA SALUD)
10.000	Dosis que origina muerte en días o semanas (100 % de los casos)
4.000	Dosis que origina muerte en días o semanas (50 % de los casos)
250	Dosis que no produce efectos observables de tipo inmediato
100	Dosis para la cual no hay evidencia de efectos sanitarios en seres humanos
3.5	Dosis media anual por persona en España
3.0	Dosis por una exploración radiográfica de aparato digestivo o de un escáner (tomografía axial computarizada, TAC) de cabeza
2.5	Dosis media anual por persona en el mundo, por radiación natural
0.4	Dosis originada por una radiografía de tórax
0.02	Dosis originada por Viaje de 3 horas en avión
0.005	Dosis media anual debida a la industria nuclear

La tabla anterior deja de manifiesto que la radiactividad o emisión de radiación ionizante está siempre presente en la naturaleza a través de la **radiactividad natural**, producto de la interacción de la radiación cósmica con la materia y de los materiales radiactivos naturales presentes en el cuerpo humano, en las aguas, suelos y rocas, y no puede ser evitada ni controlada. Internacionalmente se ha establecido que la mayor fuente de exposición a radiaciones en el ser humano proviene de la radiactividad natural y de las prácticas médicas que involucran radiación ionizante (siendo las radiografías la más extendida y común).

5.- MECANISMOS DEL DAÑO CELULAR POR EFECTO DE RADIACIONES IONIZANTES

La Radiobiología es la disciplina que estudia los fenómenos que suceden una vez que un tejido vivo ha absorbido la energía depositada por las radiaciones ionizantes, esto es, las lesiones que se producen y los mecanismos que tiene el organismo para reparar dichas lesiones.

Las características generales de los efectos biológicos de las radiaciones son las siguientes:

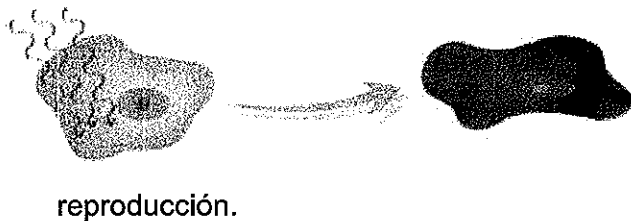
- **Aleatoriedad:** la interacción de la radiación con las células es una función de probabilidad y tiene lugar al azar. Un fotón o partícula puede alcanzar a una célula o a otra, dañarla o no dañarla y si la daña puede ser en el núcleo o en el citoplasma.
- **Rápido depósito de energía:** El depósito de energía a la célula ocurre en un tiempo muy corto, en fracciones de millonésimas de segundo.
- **No Selectividad:** La radiación externa no muestra predilección por ninguna parte o biomolécula, es decir, interacción no es selectiva.
- **Inespecificidad lesiva:** Las lesiones de las radiaciones ionizantes son siempre inespecíficas o lo que es lo mismo, esas lesiones pueden ser producidas por otras causas físicas.
- **Latencia:** las alteraciones biológicas en una célula que resultan por la radiación no son inmediatas, tardan tiempo en hacerse visibles lo cual se llama periodo de latencia, y puede ser desde unos pocos minutos o hasta muchos años, dependiendo de la dosis y tiempo de exposición.

La radiación ionizante puede producir daños en el material biológico que constituye el organismo humano. Este daño será resultado de la transferencia de energía de las radiaciones a la molécula de esas estructuras. Todas las moléculas pueden ser dañadas; pero son especialmente significativos los daños a las moléculas tales como el ADN - portador de la información para el control fisiológico - bioquímico del organismo y para la reproducción y conservación de la calidad genética de la especie. Sin embargo, debe también considerarse que en el material biológico existe un enorme potencial de reparación y de reproducción a nivel somático y genético, y por tanto también es posible revertir el daño producido, por mecanismos de reparación y/o recuperación, Ref. (16 y 17).

Si las células no se reparan, los daños causados por la radiación pueden ser permanentes y pueden provocar cambios en tejidos y en órganos. Estos cambios, que pueden manifestarse como síntomas médicos, se clasifican como **efectos deterministas y efectos estocásticos**. Estos efectos tienen especial importancia cuando se dan durante el desarrollo del feto.

La acción de la radiación sobre un material biológico se dice que puede ser directa (si provoca la rotura de un enlace o molécula clave como puede ser el ADN) o

indirecta (si afecta al medio en que se desarrollan las funciones celulares provocando iones o radicales libres que afectan la química de los procesos celulares. El ejemplo más importante de acción indirecta es el de la hidrólisis del agua.



Para altos niveles de radiación, el daño celular puede conducir finalmente a la muerte de la célula afectada o a su inhabilitación para la



A bajos niveles de radiación, tales como los que existen como consecuencia de la radiación normal que existe como fondo natural, la célula

puede, habitualmente, recuperarse de los daños recibidos (superar la irradiación por un proceso de reparación celular), (Ref. 14 y 15).

6.- DESCRIPCION DE LOS PRINCIPALES EFECTOS

A altas dosis, prevalecen los efectos deterministas, en los cuales normalmente se produce la muerte celular.

A bajas dosis, prevalecen los efectos estocásticos, que son de naturaleza probabilista, que normalmente involucran la modificación celular. Por ello, la protección radiológica en el rango de bajas dosis se preocupa principalmente de la protección contra el cáncer inducido por radiación y las enfermedades heredables. Se asume que cualquier exposición es capaz de causar algún efecto sin que exista umbral. En consecuencia, no es posible evitar los riesgos estocásticos y los límites de dosis se establecen para limitar su incidencia y por lo tanto prevenir niveles de riesgo inaceptables.

A continuación se describen en mayor detalle los principales efectos y sus implicancias sobre la salud del ser humano.

6.1.- Efectos Determinísticos o Deterministas

Los efectos determinísticos o no estocásticos se caracterizan por:

- 1) La relación entre la magnitud del daño y la gravedad de la enfermedad en un individuo y la dosis es directa

- 2) Los efectos se producen en un plazo relativamente breve (días).
- 3) Se caracterizan por tener una **dosis umbral** (nivel por debajo del cual no hay efectos detectables), seguidos por una respuesta en la que se incrementa la **intensidad** del efecto a medida que aumenta la dosis de radiación, Ref. (3). (Ver figura 1).

Los efectos citados no son específicos de la radiación ionizante en el hombre, de hecho, son producidos también por otros agentes sin que sea fácil hacer un diagnóstico etiológico. Estos daños originan la disfunción de un órgano determinado.

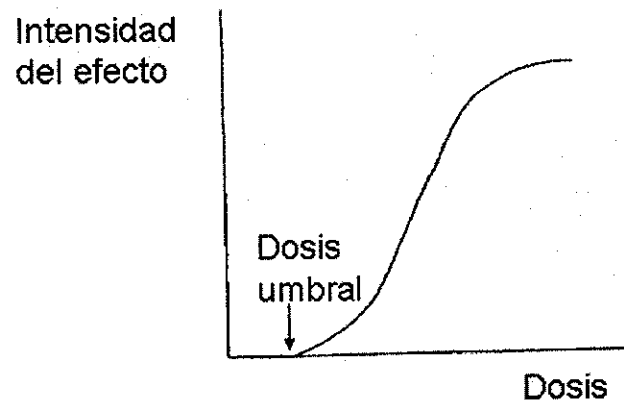


Figura 1: Curva que muestra la respuesta a la dosis determinista

En la Tabla 2 se presenta un resumen de efectos biológicos deterministas a diferentes niveles de dosis. Se considera que una dosis de **10 rem o 0,1 Sv es la dosis umbral** para efectos deterministas.

La existencia de una dosis umbral no significa que por debajo de ese valor de dosis no ocurran efectos biológicos. Simplemente ocurren efectos que no implican una condición patológica, son efectos sub-clínicos.

Tabla N° 2
Clasificación de efectos biológicos deterministas en función de la Dosis Absorbida, Ref. (4)

DOSIS ABSORBIDA	EFECTO
< 0.1 Sv (< 10 rem)	No hay efectos fácilmente detectables.
0.1 - 0.25 Sv (10 - 25 rem)	Daños detectables por medios especializados de laboratorios espermiograma, hematológicos, análisis cromosómico.
0.25 – 1 Sv (25 -100 rem)	Signos y síntomas clínicos en porcentaje creciente con dosis en todos los irradiados, baja posibilidad de muerte. Esterilidad temporal o recuperable.
< 2 Sv (< 200 rem)	Baja probabilidad de lesiones permanentes y de muerte.
> 2 Sv (> 200 rem)	Probabilidad de lesiones permanentes que aumentan con la dosis. La probabilidad de muerte es función de dosis. La muerte es segura sobre 10 Sv (1000 rem) .

Más adelante se aborda en mayor detalle los tipos de efectos deterministas de acuerdo a sus dosis umbrales (Tablas 3, 4, 5, 6 y 7).

6.1.1.- Factores de los cuales depende el efecto biológico de las radiaciones

Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes en el ser humano dependen de factores físicos propios de la radiación ionizante misma y de factores biológicos propios del individuo.

Los factores físicos que influyen son dosis, tasa de dosis, fraccionamiento, calidad de la radiación (alta LET – Baja LET):

A menor dosis y tasa de dosis, menos deletéreo es el efecto, puesto que existe mayor probabilidad de reparación del daño celular.

El efecto biológico es mayor cuando una determinada dosis se entrega en una única fracción que si esa misma dosis se entrega en varias fracciones separadas por un intervalo de tiempo, lo que permite la regeneración celular.

El factor que establece calidad de radiaciones, LET es definido por la Comisión Internacional de Unidades y Medidas Radiológicas (ICRU) de la siguiente manera: "La transferencia Lineal de Energía, LET, de partículas cargadas en un medio es

el cociente de dE/dl , donde dE es la energía media impartida localmente al medio por una partícula cargada de energía específica al atravesar una distancia de dl .

Los rayos X y gamma se consideran de baja LET (ligeramente ionizante), mientras que los neutrones energéticos, protones y partículas cargadas pesadas son de alta LET (densamente ionizantes). El umbral entre baja y alta LET está a unos 10 keV/ μ m.

Las radiaciones con alta tasa de transferencia lineal de energía, esto es alta LET, tales como la radiación alfa tienen un efecto localizado y muy significativo en los tejidos inmediatamente adyacentes a la fuente de radiación. Su efecto es más deletéreo en caso de incorporación.

En cambio radiaciones de baja LET, es decir, de baja transferencia lineal de energía, pero de alta penetración, tales como radiación beta, y por extensión los rayos X y gamma, su efecto es más deletéreo en caso de exposición externa.

Los efectos biológicos dependen también de los factores propios del individuo expuesto tales como la edad, sexo, estado de salud, tejido irradiado, etc.

Respecto de la edad mientras más joven es el individuo mayor es el efecto deletéreo, debido a que sus células tienen tasa de reproducción más alta. Respecto del sexo, la mujer es más radiosensible dado que, a diferencia del hombre sus células germinales no se renuevan durante su vida y un daño en éstas tiene más probabilidades de repercutir en su progenie. Asimismo durante el embarazo el feto es extremadamente sensible a las radiaciones debido a que sus células son indiferenciadas y están en constante reproducción.

Por eso, en cualquier población hay un rango de **sensibilidad a la radiación**. De aquí que, la dosis umbral de un tejido puede ser alcanzada a dosis inferiores en individuos más sensibles. Según se vaya aumentando la dosis, un mayor número de individuos se verán afectados, hasta llegar a un nivel en el que todos los expuestos observarán los efectos.

La dosis umbral se define como la dosis de radiación necesaria para provocar un efecto dado en por lo menos el 5% de los individuos expuestos. A medida que la dosis se incrementa el efecto se manifiesta en un porcentaje mayor de individuos hasta llegar a un nivel de dosis tal, que el efecto resulta evidente en el 100 % de los individuos expuestos.

Los efectos determinísticos son más visibles en aquellos casos donde se está expuesto a dosis altas durante un corto periodo de tiempo (casos de exposición aguda). Las dosis altas no son habituales en el lugar de trabajo, y a no ser por exposiciones médicas controladas, sólo se producen en los accidentes.



Los efectos determinísticos no se producen de forma rutinaria en el lugar de trabajo sino como resultado de un accidente.

La tabla N° 3, muestra algunos ejemplos de efectos determinísticos en órganos específicos debido a una exposición aguda. Las dosis se dan en milisievert (mSv).

Tabla N° 3: Efectos de la exposición aguda en órganos específicos, Ref. (3)

Dosis (mSv)	Órgano	Efecto
3 500	Testículos	Esterilidad permanente
3 500	Ojos	Formación de cataratas
3 000	Ovarios	Esterilidad
2 500+	Piel	Enrojecimiento de la piel (eritema) y posible pérdida permanente del pelo
500	Médula	Formación reducida de glóbulos rojos
150+	Testículos	Esterilidad Temporal
60	Feto	Posibles malformaciones

La mayor parte de los efectos que aparecen en la tabla 3, se consideran **efectos tempranos** ya que se observan tras unos días o semanas de exposición. La formación de cataratas tras la irradiación en los ojos sería una excepción. Ésta tardaría muchos años en desarrollarse y por eso se le clasifica como **efectos tardíos**. Se le considera efecto determinista porque existe un dosis umbral inferior en la que no se producen.

La intensidad de los efectos deterministas depende de la cantidad de dosis y el periodo durante el que se reciba. En realidad, si la dosis se recibe durante varias semanas en lugar de todo de una vez, la dosis umbral en la que se produce un efecto se incrementará considerablemente, normalmente un 100%.

El síndrome de irradiación, (nauseas, vómitos, diarrea) es un efecto determinista temprano, producido por un exposición aguda cuya dosis es alta en todo el cuerpo. En la tabla 4 se muestran otros de los efectos resultantes de la exposición aguda.

Tabla 4: Efectos de la exposición aguda en todo el cuerpo, Ref. (3)

Dosis (mSv)	Efectos
> 50.000	Daños graves en el sistema nervioso central - rápidamente letal.
8.000 - 50.000	Destrucción de la superficie intestinal y los glóbulos blancos - muerte en dos semanas.
4.000	La mitad de los casos mueren en 60 días si no reciben tratamiento médico (Dosis letal 50/ 60)
2.000 – 8.000	Daños en los glóbulos blancos y en el intestino. La muerte se produce por infecciones secundarias, pero en muchos casos se puede evitar con un tratamiento médico
1.000 – 2.000	Síndrome de irradiación – náuseas, vómitos, diarrea - no es letal. Requiere tratamiento.

6.1. 2.- Síndrome Agudo de Radiación, SAR

Es el conjunto de síntomas y signos consecutivos a la irradiación aguda en todo el cuerpo, cuya severidad depende de la magnitud de la dosis de radiación y su distribución temporo-espacial. Se manifiesta en tres formas:

Forma hematopoyética: 1-10 Gy

Forma gastrointestinal: 10-20 Gy

Forma neurovascular: > 20 Gy (incluso algunos autores distinguen cardiovascular (20-50 Gy) y neurológica (> 50 Gy). (Ref. 18 y 19).

En la Tabla Nº 5 se muestra los efectos de dosis creciente de radiación ionizante, para el Síndrome Agudo de Radiación (SAR).

Tabla Nº 5 : Efectos vs. Dosis Absorbida, en caso de SAR (Ref. 15, 16 y 17).

Dosis Absorbida	Efectos
Mayor a 100 Gy	Muerte del individuo en un breve lapso de tiempo, entre algunas horas y unos días, ya que se producen lesiones en el Sistema Nervioso Central
10- 50 Gy	Muerte entre una y dos semanas después de la irradiación, debido a lesiones gastrointestinales
5 – 10 Gy	Inflamación, eritemas y descamación seca o húmeda de la piel
3 - 5 Gy	Muerte de la mitad de las personas irradiadas en un plazo de uno a dos meses, ya que se afecta la médula ósea, productora de células sanguíneas
Menos de 3 Gy	Alteraciones en diversos órganos y tejidos, que van seguidas de reparación y cicatrización, lo que puede dar lugar a su recuperación total o parcial. Debe mencionarse que en el caso de los testículos, con una dosis de 2 Gy puede producirse una esterilidad definitiva, en tanto que a 0.1 Gy se produce esterilidad temporal.

Los efectos específicos de una alta dosis se muestran en la tabla 6, y se manifiestan en, Ref. (18) y (19):

- a) El tejido hematopoyético y la sangre, con las alteraciones que se muestran en los gráficos del Anexo 2 (2.1, 2.2 y 2.3). Sus consecuencias principales son infecciones y hemorragias con posibles muertes por falla circulatoria.
- b) Los tejidos en activa reproducción como el intestino delgado, en especial en las vellosidades de su mucosa, las gónadas, en especial las masculinas y los endotelios de los vasos capilares. En general, serán afectadas todas las mucosas y también la piel.
- c) Finalmente con dosis superiores a los 6 Gy, será fuertemente afectado el Sistema Nervioso Central con síntomas de pérdidas o disminución de conciencia y de coordinación neuromuscular y motora y pérdida o disminución de las funciones de control de los diferentes sistemas.

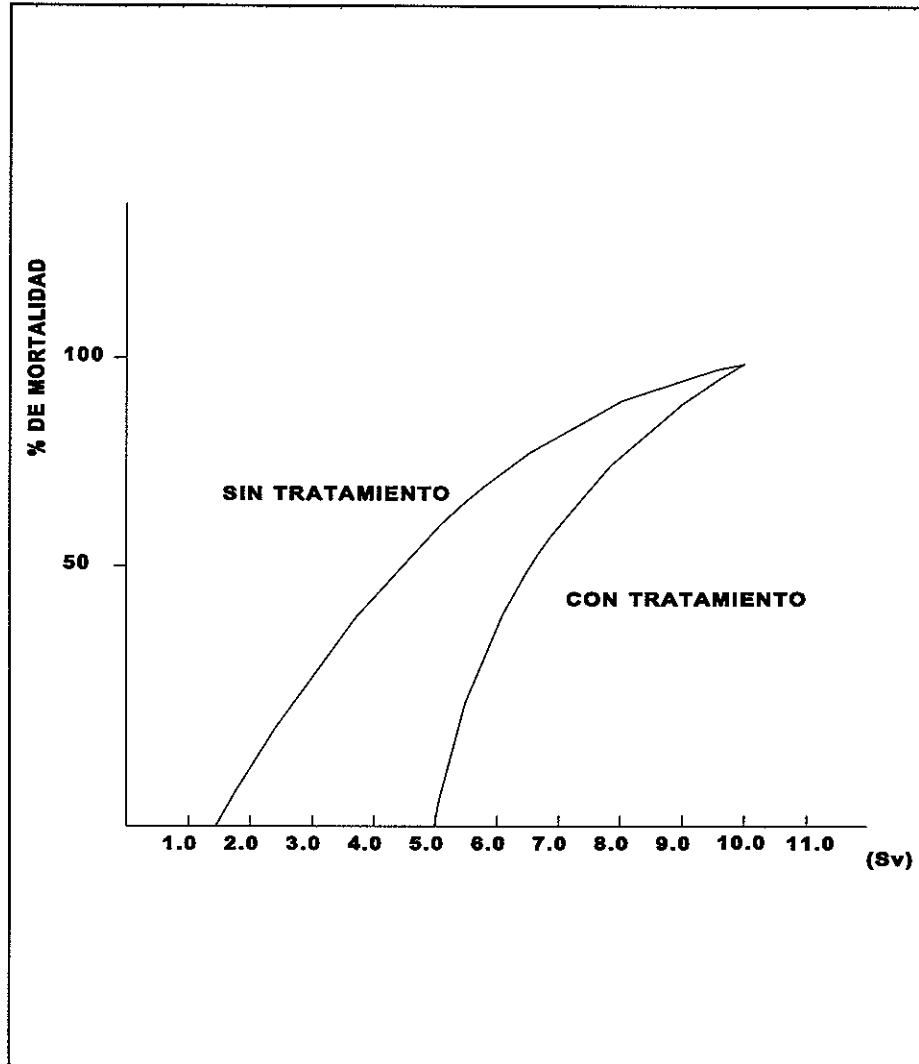
Tabla N°. 6

Características del Síndrome Agudo de Radiación Aguda (SAR)
(Refs. 18 y 19)

	Efectos Cerebrales	Gastro Intestinales	Hematológicos
Organo Afectado	Sistema Nervioso Central (SNC)	Intestino Delgado (ID)	Médula Osea (MO)
Promedio de Dosis (Gy)	20	5	1
Período de latencia	1/2 - 3 horas	3 - 5 días	3 semanas
Signos y síntomas principales	Letargia convulsiones, ataxia	Diarrea, vómito, fiebre, alteración balance electrolítico.	Leucopenia púrpura infección
Patología Base	Inflamación S.N.C.	Denudación de mucosa del I.D.	Atrofia Aplasia M.O.
Tiempo en que ocurre la muerte (si es que ocurre)	2 días	2 semanas	2 días
Causa de muerte	Paro Cardio-respiratorio	Colapso circulatorio	Hemorragia infección
Pronóstico Gravedad	Letal	Grave	Media

La fig. 2, Ref. (18) y (19) muestra la relación entre dosis y porcentaje de muerte en personas irradiadas con o sin tratamiento.

Figura 2 : MORTALIDAD EN EL SAR



6.1.3.- Efectos determinísticos en diversos órganos

En la Tabla N° 7 se resumen una serie de efectos determinísticos, por irradiación localizada sobre diversos órganos, y se los relaciona con la dosis umbral que los origina.

Tabla N° 7
Efectos determinísticos por irradiación localizada sobre diversos
 órganos, Ref. (19)

ORGANO	EFEECTO /Observaciones	DOSIS UMBRAL
Cristalino (estructura más radiosensible del ojo)	- catarata estacionaria - catarata progresiva hasta ceguera	1 Gy (agudo) o 4 Gy Fraccionada > 4 Gy
Ovario	Esterilidad temporal Esterilidad permanente	2 – 6 Gy (agudo) 3 – 10 Gy (agudo)
Testículo (Estructura más radionsensible del cuerpo)	Esterilidad temporal Esterilidad permanente	0,15 Gy (agudo) 6 Gy (agudo)
Pulmón	Dosis Letal 50 DL50 (*) por irradiación aguda Neumonitis aguda intersticial > puede evolucionar hacia fibrosis pulmonar (insuficiencia respiratoria)	8- 10 Gy
Riñón	Dosis de tolerancia	25-30 Gy fraccionada
Sistema Nervioso cerebro	Alteraciones al trazado de EEG e inducción de trastornos funcionales. Necrosis, alteración de la memoria y aprendizaje	1 - 2 Gy > 55 Gy (fraccionados)
Médula espinal	Dosis de tolerancia (mielitis transversa)	40 Gy (fraccionada) muy dependiente del volumen irradiado
Sistema Cardiovascular: Corazón	Derrame pericárdico y pericarditis constrictiva	Dosis agudas > 20 Gy o dosis fraccionadas > 60Gy
Sistema cardiovascular: Endotelio de vasos sanguíneos	Endarteritis obliterante	Injuria tardía radioinducida en órganos

Intestino delgado	Erosiones, úlceras alteración de la absorción, diarrea	Efectos temprano 2,5 – 3,5 Gy
	Fístulas, obstrucciones	Efectos tardíos
Hígado	Dosis de tolerancia	30 Gy fraccionada
Hueso y cartílago	En niños, más radiosensibles, inducción de retardo del crecimiento	> 20 Gy
	En adultos, inducción osteonecrosis	Dosis fraccionada > 65 Gy
	Susceptibilidad al trauma e infección y retardo en la consolidación de fracturas	< 65 Gy
Piel	Depilación temporal	3-5 Gy
	Depilación permanente	> 7 Gy
	Eritema	3-10 Gy
	Radiodermatitis seca	10-15 Gy
	Radiodermatitis exudativa	15- 25 Gy
	Necrosis	> 25 Gy
Sistema hematopoyético	Depresión de la hematopoyesis	0.4 Sv/año (exposición crónica)
	Aplasia medular	1 Sv/ año (exposición crónica)

6.2.- Efectos Estocásticos (o probabilísticos)

Son aquellos efectos de las radiaciones que son tanto más probables cuanto mayor es la cantidad de radiación recibida, esto es, el riesgo de producirse depende de la cantidad de radiación recibida, pero cuya intensidad una vez producido el efecto no depende de esa cantidad de radiación. Para los efectos estocásticos se acepta, aún sin tener la certeza absoluta, que por muy pequeña que sea la cantidad de radiación recibida puede ocurrir algún tipo de efecto, el cual, una vez que ocurre, es siempre grave. Ejemplos de este tipo de efectos es la aparición de cánceres o los efectos genéticos.

En protección radiológica se asume que la probabilidad de que se produzca el efecto estocástico aumenta de forma lineal, cuando incrementa la dosis y no hay

dosis umbral (Ver figura 3). Si no hay dosis umbral cualquier dosis de radiación podría desarrollar un cáncer.

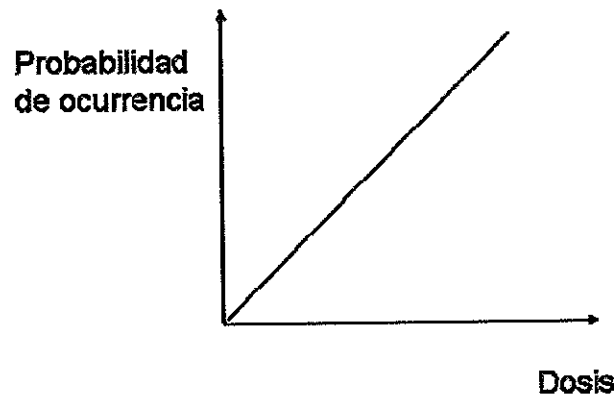
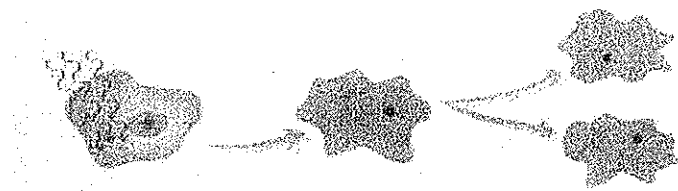


Figura 3 : La curva de la dosis estocástica, Ref. (3)



Una pequeña parte de los cambios en el ADN son capaces de reproducirse. Los cambios resultantes (o mutaciones) pueden ser desde indetectable hasta amenazadores para la vida. Estas mutaciones sí se transmitirán a las futuras generaciones de células existiendo la posibilidad de aparición de cánceres, Ref. (14).

Los efectos estocásticos son los únicos que se pueden dar a dosis bajas y por eso el primer objetivo de la protección radiológica es prevenir y reducir las posibilidades de que se produzcan.

Los efectos estocásticos se caracterizan porque:

- 1) Son menos frecuentes.
- 2) Aparecen al azar sólo en algunos individuos (aún cuando la dosis haya sido alta).
- 3) Su severidad o intensidad no tiene relación con la dosis, pero a dosis mayores aumenta la probabilidad que ocurran.
- 4) Estadísticamente no existe umbral de dosis o estos son muy difíciles de establecer.

Es muy importante tener en cuenta que estos efectos estocásticos no son (al igual que los no estocásticos) específicos de la radiación y siempre existe una frecuencia natural de ellos en una comunidad. Esto obliga a efectuar por técnicas epidemiológicas complejas, investigaciones para determinar si existe o no una relación entre el exceso sobre la frecuencia " natural " de un determinado efecto y la dosis de radiación ionizante (individual o colectiva). En general, los estudios de tales efectos " aleatorios " de la radiación son los que orientan las normas de radioprotección, Ref. (18) y (19).

6.2.1.- Cáncer

La carcinogénesis es la sucesión de eventos que conducen al desarrollo de un cáncer. Bajo la denominación de cáncer se incluye a un conjunto de condiciones patológicas que tienen como elemento común el crecimiento celular ilimitado, invasivo, potencialmente letal.

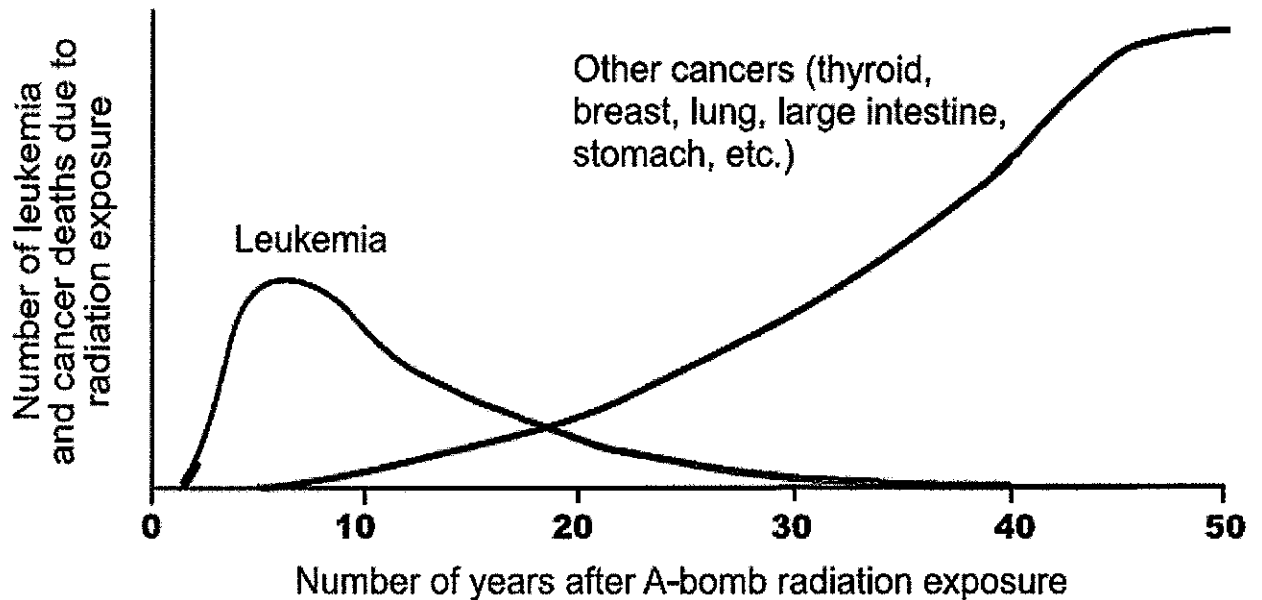
Se puede interpretar como falla en los mecanismos de reparación del ADN, falla en el control de la proliferación (ciclo celular), ó falla en la regulación de la muerte celular por apoptosis.

Algunas veces, la radiación no mata a la célula pero la altera de alguna forma. Normalmente, esta alteración no afecta a la célula de forma significativa por eso no hay efectos observables. Sin embargo, es posible que el daño afecte al sistema de control celular, lo que provoca que la división sea más rápida de lo normal y que aumente el número de células-hija anormales. Si estas células anormales denominadas células malignas invaden el tejido causarán cáncer.

El tipo de cáncer dependerá del tipo de células que haya sido alterada. El cáncer no aparece inmediatamente después de la exposición a la radiación, sino tras un periodo de latencia durante el que no se observa ningún síntoma. Este periodo dependerá del tipo de cáncer y puede durar entre dos años para la leucemia hasta 30 años o más para tumores sólidos. Esto se aprecia con claridad en la Figura siguiente, Ref. (20). Por eso, al cáncer se le clasifica como un efecto tardío.

A pesar de las investigaciones la información relativa al cáncer radioinducido es todavía limitada.

Figure 6. The number of excess cases of leukemia and cancer due to radiation exposure (by number of years after A-bomb radiation exposure)



Al contrario que en los efectos deterministas, la cantidad de exposición a la radiación no varía la intensidad del cáncer pero altera las probabilidades de tenerlo. En otras palabras, la exposición a dosis altas incrementa el riesgo de que se desarrolle un cáncer, pero si éste se desarrollara, la intensidad de él será la misma.

Si bien es conocido desde hace varias décadas, que las radiaciones constituyen un agente potencialmente carcinógeno, no obstante, se considera carcinógeno débil en relación a otros de naturaleza química, tal como lo evidencia la Tabla N°8, que compara un parámetro objetivo, a saber, el número de lesiones por célula atribuibles a diversos agentes:

Tabla N° 8
Intensidad de Agentes Carcinógenos, Ref. (18) y (19)

Agente	Tipo de lesión	Nº lesiones por célula
Exposición al sol	Dímeros de timina	60.000 a 80.000
Cigarrillo (20 al día)	alteraciones ADN	1.000 a 2.000
Trabajo en hornos de carbón	alteraciones ADN	400 a 70.000
Radiación natural (2mSv/año)	Rupturas simples ADN	2

Desde el punto de vista biológico, el cáncer inducido por radiación (radio-inducido) no presenta diferencias respecto del que aparece espontáneamente en una población.

Es por eso que se recurre a los estudios que se denominan “estudios epidemiológicos analíticos” que comparan riesgos en poblaciones expuestas y no expuestas a radiaciones. Estos son estudios estadísticos que requieren un gran número de personas expuestas para poder sacar conclusiones válidas.

Los estudios epidemiológicos de grupos e individuos expuestos a radiaciones ionizantes versus individuos no expuestos revelan que el riesgo debido a la exposición a la radiación ionizante es menor que el debido a otros factores ambientales y marginal con respecto a la incidencia natural de estas enfermedades. Esto se visualiza a continuación con las cifras de incidencia de cáncer de ocurrencia natural y en el caso de exposición a radiación ionizante superior al background natural, extraídos de publicación de USA, Ref. (21).

Línea base de cáncer: Número de cánceres esperables que ocurran en el periodo de toda una vida en una población (masculina más femenina) de 1 millón de personas: 420.000. Esto equivale a una probabilidad de cáncer de 1 en 2.4.

Tabla N° 9: Posible aumento en el cáncer causado por exposición a radiaciones superiores al background natural

Dosis (**) Sv / rem	No. Cánceres esperables si un millón de personas recibe dosis (**)	Probabilidad combinada de cáncer (incidencia natural más riesgo por dosis (**)) (Adaptado de Ref. (2))
10 mSv (1 rem)	421.700	1 en 2.4
100 mSv (10 rem)	437.000	1 en 2.3
1000 mSv (100 rem)	590.000	1 en 1.7
10 Sv (1000 rem)	La persona muere antes de desarrollar cáncer	

6.2.2.- Efectos Hereditarios

La irradiación de las gónadas, puede originar que una de las células reproductivas o germinales (esperma u óvulo) se dañe a causa de la radiación ionizante, lo cual puede producir mutaciones las que pueden ser transmitidas a los descendientes de los individuos irradiados. En los descendientes pueden aparecer anomalías de todo tipo en los órganos y tejidos, Ref. (14).

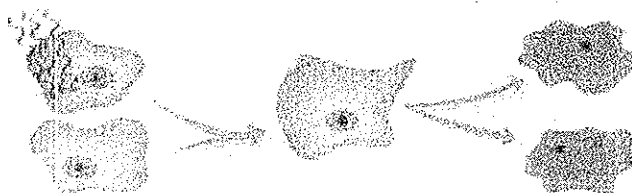
Por eso a este tipo de efecto se le denomina efecto hereditario. Este efecto depende del azar, es estocástico. Sin embargo, el riesgo de un efecto hereditario es inferior al riesgo de desarrollar cáncer.

Estudios experimentales en plantas y animales, han demostrado que los efectos hereditarios se producen tras la exposición a grandes cantidades de radiación. **Hasta la fecha no existe evidencia científica alguno de efectos hereditarios en el hombre a ningún nivel de dosis.** Todos los valores que se encuentran en la literatura son extrapolaciones al caso del hombre, de los resultados en animales de experimentación.

Una generación en el hombre dura técnicamente 30 años. Sólo después de 150 años podría, mejorándose las técnicas epidemiológicas y de cálculos de dosis colectiva significativas, estimarse si existen efectos hereditarios en el hombre y en especial a dosis tan bajas como 0,05 Gy (5 Rem), en 30 años.

Debido finalmente a que la incidencia "natural" de desórdenes hereditarios es del orden de 50.000 por millón de nacidos vivos (5%), cualquier exceso como el estimado por los Organismos Internacionales de Radioprotección (alrededor de 25 casos más por millón y Rem), (0,3%) es actualmente improbable que pueda ser detectado y tratado estadísticamente para los trabajadores.

Resumiendo:



Algunos cambios en el ADN pueden transmitirse a las siguientes generaciones cuando las células afectadas por la radiación son las células reproductoras o germinales.

A la fecha, no ha habido evidencia científica de efectos hereditarios en humanos tras la exposición a la radiación ionizante.

6.2.3.- Inducción de otras enfermedades diferentes al cáncer

Desde 1990 se ha acumulado evidencia de que ha aumentado la frecuencia de enfermedades diferentes al cáncer en algunas poblaciones irradiadas. La evidencia estadística más fuerte sobre la inducción de estos efectos no cancerosos a dosis efectivas de 1 Sv deriva del análisis más reciente de la mortandad de los supervivientes japoneses de las bombas atómicas, de los que se ha hecho un seguimiento desde 1968. Este estudio ha fortalecido la evidencia estadística de una asociación con la dosis- particularmente para enfermedades de corazón, infarto, desórdenes digestivos y enfermedad respiratoria. Hay evidencia

suplementaria de efectos no cancerosos de la radiación, aunque a dosis elevadas, que proviene de estudios de pacientes de cáncer tratados con radioterapia, pero estos datos no clarifican la cuestión de un posible umbral de dosis. Tampoco está claro que mecanismos celulares y tisulares podrían estar implicados en dicho grupo heterogéneo de desórdenes no cancerosos, Ref.(2).

7.- EXPOSICIÓN DEL FETO

En un feto o un nonato, Ref. (18) y (19) el número de células es menor que en un adulto y éstas se dividen más rápidamente. Como los daños de la radiación son mayores en la división celular, el feto es particularmente sensible a los efectos de la radiación, pudiendo sufrir tanto los efectos determinísticos como los efectos estocásticos. Entre los efectos deterministas se cuentan malformaciones, daños al sistema nervioso central, cataratas, retraso en el crecimiento, desórdenes de conducta o incluso la muerte, si estuviera expuesto a altas dosis. Entre los efectos estocásticos se encuentran los cánceres y leucemias en el niño o adolescente debido a la irradiación durante el embarazo. Por estas razones se deben tomar medidas de protección especiales frente a la radiación para proteger al feto.

Las investigaciones sobre los efectos biológicos de la radiación ionizante durante el desarrollo del feto se han concentrado en las víctimas de las bombas nucleares de Hiroshima y Nagasaki y en las del accidente de Chernobyl en 1986.

La descripción que sigue a continuación está extractada de la publicación ICRP-84, Referida a Embarazo e Irradiación médica, Ref. (22).

Los efectos de la exposición a las radiaciones sobre el embrión o el feto dependen del momento del embarazo en que ocurre la exposición así como de la dosis absorbida. Cuando el número de células del embrión es pequeño y su naturaleza aún no está especializada, el efecto más probable en esas células es un error en la implantación o la muerte no detectable del embrión, las malformaciones son improbables o muy raras. Durante el resto del periodo de mayor organogénesis (considerado convencionalmente a partir de la tercera semana después de la concepción) las malformaciones pueden ser causadas especialmente en los órganos que se estuvieran desarrollando en el momento que ocurre la exposición a radiaciones. Los efectos mencionados tienen un umbral de dosis de 100 a 200 mGy .

Durante el periodo comprendido entre las semanas 8^a y 25^a post-concepción el sistema nervioso central (SNC) es particularmente sensible a la radiación. Dosis fetales mayores que 100 mGy pueden dar como resultado una disminución medible del coeficiente de inteligencia, (CI). Durante ese periodo, dosis fetales de alrededor de 1000 mGy (1 Gy) tienen como resultado una alta probabilidad de retraso mental grave. La sensibilidad es más elevada entre las semanas 8^a y 15^a post.-concepción. El SNC es menos sensible a estos efectos entre las semanas 16^o y 25^o de edad gestacional y es bastante resistente a partir de entonces. Cabe mencionar que todas las observaciones clínicas sobre reducciones significativas de CI y retraso mental severo están relacionadas con dosis fetales de 500 mGy y superiores, producidas a altas tasas de dosis.

La incidencia espontánea de cáncer infantil y leucemia en el periodo de edades entre 0 y 15 años, sin exposición adicional a la radiación natural de fondo, es aproximadamente del 2-3 por 1000. La magnitud del riesgo debido a una exposición a bajas dosis de radiación y la posibilidad que el riesgo varíe a lo largo del embarazo han sido temas de muchas publicaciones, pese a lo cual la interpretación de los datos continúa abierta al debate.

A bajas dosis, el bajo riesgo asociado es difícil de detectar claramente en estudios sobre seres humanos. Un tipo de estudio epidemiológico (el de caso-control) ha mostrado riesgos incrementados de cáncer infantil y leucemia asociados a exámenes obstétricos en rayos X en mujeres embarazadas. No se han encontrado resultados similares en estudios de cohorte, otro tipo de estudio epidemiológico.

Existe cierta evidencia de un posible incremento en la tasa de leucemia entre los sobrevivientes de las bombas atómicas que fueron irradiados en útero (en un estudio de cohorte con dosis promedio más altas que las debidas a estudios obstétricos con rayos X), si bien no se encontró una tendencia incrementada en la tasa de leucemia con la dosis y además, los casos de leucemia no ocurrieron en la infancia. Un análisis reciente de muchos de los estudios epidemiológicos realizados sobre exposiciones prenatales a los rayos X y cáncer infantil es consistente con un riesgo relativo de 1,4 (es decir, un incremento del 40% sobre el riesgo natural), para una dosis fetal de alrededor de 10 mGy. Sin embargo, los mejores estudios metodológicos sugieren que probablemente el riesgo sea menor. Aún si el riesgo relativo fuera tan alto como 1,4; la probabilidad individual de cáncer infantil debida a una irradiación en útero sería muy baja (alrededor de 0.3-0.4 %) ya que la incidencia natural de cáncer infantil es del mismo orden (alrededor de 0.2 - 0.3%)

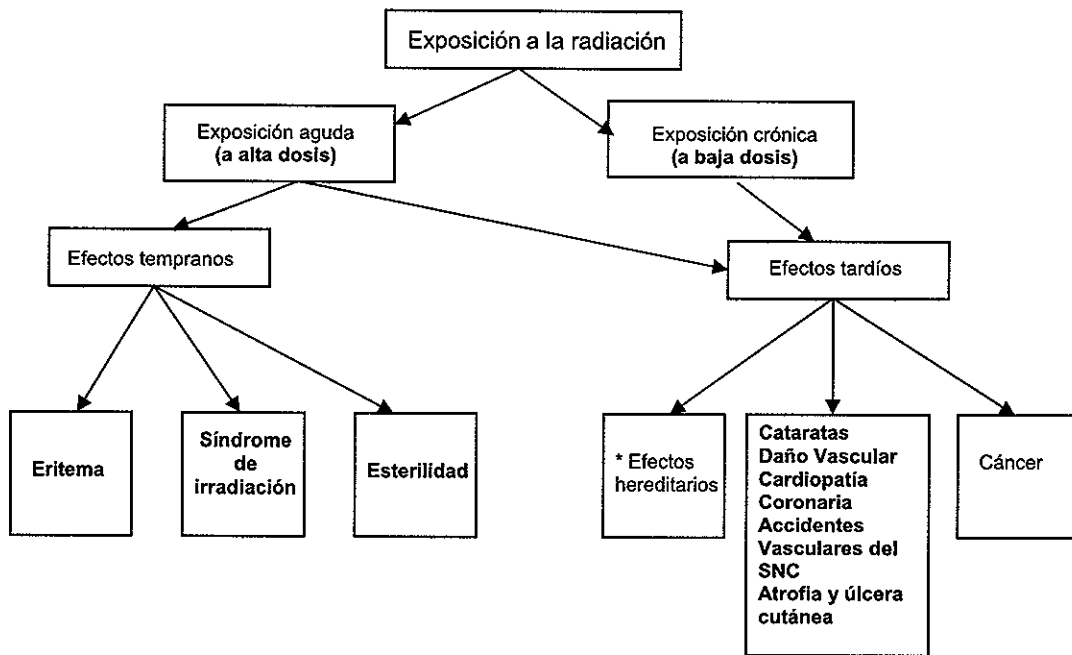
Estimaciones recientes de riesgo absoluto de cáncer, en edades comprendidas entre 0 y 15 años, debido a la irradiación en útero parecen estar en el rango de 600 por cada 10.000 personas expuestas a 1.000 mGy (o sea 0.06 % para 10 mGy). Este valor es esencialmente equivalente al riesgo de una muerte por cáncer por cada 1.700 niños expuestos en útero a 10 mGy.

8.- RESUMEN DE LOS EFECTOS DE LA RADIACIÓN IONIZANTE SOBRE EL SER HUMANO

Para agrupar y ordenar de manera más clara los efectos de la radiación sobre el ser humano, se debe hacer la distinción entre exposición aguda a las radiaciones (accidente o radioterapia) y las exposiciones crónicas a bajas dosis (radiación natural, trabajadores ocupacionalmente expuestos a radiaciones, diagnóstico médico, público en general).

Las exposiciones agudas podrían provocar efectos tempranos o tardíos, que pueden ser estocásticos o deterministas. Una exposición crónica podría resultar en efectos tardíos tanto deterministas como estocásticos. En la figura siguiente los efectos estocásticos aparecen en letra normal y los deterministas en **negrita**.

Figura 3: Resumen principales efectos biológicos de la radiación ionizante



* Nunca observados en humanos

ANEXO 1

Origen y Principios de la Protección Radiológica, Ref. (14)

Tanto las radiaciones ionizantes como los materiales radiactivos han formado siempre parte de nuestro entorno; no obstante dada la ausencia en el ser humano de un mecanismo capaz de poner en evidencia su presencia, su descubrimiento no se produjo hasta finales del siglo XIX, época en la que comienza a disponerse de sistemas capaces de detectar su presencia aprovechando el conocimiento de algunas propiedades.

A las fuentes de radiaciones ionizantes como los rayos cósmicos, materiales radiactivos que están en la corteza terrestre, en el aire o incorporados a los alimentos, e incluso sustancias radiactivas que se encuentran en el interior del organismo humano (K40, C14, etc), se las denomina radiaciones de fondo o naturales.

Además de estar el ser humano expuesto a la radiación de fondo natural, también está expuesto a fuentes de radiaciones artificiales.

La utilización de fuentes de radiaciones ionizantes, aparatos de rayos X, sustancias radiactivas naturales o radioisótopos producidos artificialmente, en actividades de la medicina, la industria, la agricultura o la investigación, han reportado muchos beneficios a la humanidad, pero también ciertos riesgos que no quedan limitados a un pequeño grupo de personas, sino que inciden sobre grupos de trabajadores y sobre la población en su conjunto.

La protección radiológica tiene por finalidad la protección de los individuos, de sus descendientes y de la humanidad en su conjunto, de los riesgos derivados de aquellas actividades que debido a los equipos o materiales que utilizan suponen la presencia de radiaciones ionizantes.

Es este sentido, ya al inicio del siglo XX se publican las primeras recomendaciones y regulaciones referentes a la protección contra el uso de las radiaciones y se crean las primeras organizaciones para la protección radiológica.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR), reconstituida con este nombre en 1950 sobre la base de una comisión análoga fundada en 1928, surge con el objetivo de establecer la filosofía de la protección radiológica fundamentada en los conocimientos científicos sobre los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. Sus conclusiones, que se dan a conocer a través de recomendaciones, proporcionan asesoramiento sobre los principios fundamentales que sirven de base al establecimiento de un sistema de protección radiológica adecuado, y han constituido una base sólida para las normas reguladoras de los distintos países de acuerdo con sus prácticas y políticas habituales.

En 1987, la CIPR hace pública su recomendación N° 26 en la que se establece un sistema de protección radiológica basado en tres principios básicos: **Justificación, Optimización y Limitación de dosis**. Este sistema de protección radiológica fue refrendado y reforzado en las nuevas recomendaciones de la CIPR, emitidas en 1990, a través de su publicación n° 60., Ref. (3).

Estos principios se describen a continuación:

1. Justificación

No debe adoptarse ninguna práctica que signifique exposición a la radiación si su introducción no produce un beneficio neto positivo. Naturalmente, la práctica que implique la exposición a las radiaciones debe suponer un beneficio para la sociedad. Deben considerarse los efectos negativos y las alternativas posibles. Esto significa, por supuesto, profundas cuestiones que requieren ser resueltas por los correspondientes gobiernos.

2. ALARA

Siglas inglesas de la expresión "Tan bajo como sea razonablemente alcanzable". Todas las exposiciones a la radiación deben ser mantenidas a niveles tan bajos como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores sociales y económicos. Toda dosis de radiación implica algún tipo de riesgo; por ello no es suficiente cumplir con los límites de dosis que están fijados. Las dosis deben reducirse aún más. No obstante, la reducción de dosis no puede llevarse a cabo indefinidamente, sino que se deben considerar los costes asociados.

3. Límites de dosis

Las dosis de radiación recibidas por las personas no deben superar los límites recomendados para cada circunstancia por la Comisión. Las personas no deben ser expuestas a un nivel de riesgo inaceptable, por lo que la legislación española establece unos límites de dosis. Estos han de ser respetados siempre sin tener en cuenta consideraciones económicas.

En la aplicación de los tres principios del sistema de protección radiológica para la protección de los trabajadores, adquiere una especial relevancia el principio de optimización.

Mientras que el establecimiento de unos límites de dosis a los trabajadores asegura la protección frente a exposiciones intolerables, la aplicación del principio de optimización reduce tanto las exposiciones como el número de trabajadores expuestos a un valor tan bajo como sea razonablemente alcanzable, lo que supone la reducción de los riesgos a valores aceptables después de realizar una valoración frente a los beneficios obtenidos.

Su puesta en práctica supone el establecimiento de medidas de control y vigilancia para la prevención de la exposición de los trabajadores expuestos, tales como: la clasificación de los lugares de trabajo y de los trabajadores en función de los riesgos, la vigilancia radiológica tanto de los lugares como de los trabajadores, los métodos para la determinación de las dosis, y los controles de las dosis recibidas en la realización de los distintos trabajos.

Para la adecuada consecución de un nivel óptimo de protección radiológica es necesario, además, el establecimiento de una organización y estructuras que permitan, dentro de la instalación, el cumplimiento de las normas recogidas en la legislación, contando para ello con medios adecuados y estableciendo responsabilidades a distintos niveles.

La trascendencia práctica a nivel mundial de las funciones que relacionan dosis con efectos, fue percibida por la Asamblea General de las Naciones Unidas que decidió en 1955 crear el **Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR)**, Ref. (4). Este comité considera la información científica disponible y apoyada en las conclusiones de revisiones y congresos de organismos y comités nacionales e internacionales relacionados, confecciona y presenta a la asamblea general un análisis exhaustivo que contiene, entre otras cosas, las relaciones dosis-efecto que son la base de la limitación de dosis y riesgos. Estas evaluaciones de UNSCEAR contribuyen esencialmente al trabajo de la Comisión Internacional de Protección Radiológica (CIPR).

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) tiene como misión el desarrollo de normas y guías que, conteniendo esencialmente las recomendaciones de la CIPR, hayan alcanzado un consenso internacional. Este consenso no es sólo entre países, sino también con otras organizaciones de Naciones Unidas, como la Organización Mundial de la Salud o la Organización Internacional del Trabajo.

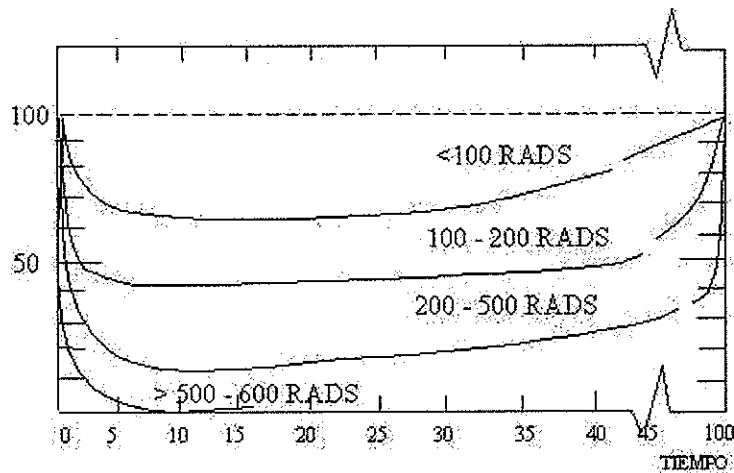
El marco básico de la Protección Radiológica necesariamente tiene que incluir valoraciones tanto de tipo social como científicas, porque la finalidad principal es proporcionar un nivel apropiado de protección para el hombre, sin limitar indebidamente las prácticas beneficiosas que dan lugar a la exposición de la radiación. Además, se debe suponer que incluso dosis pequeñas de radiación pueden producir algún efecto perjudicial. Dado que existen umbrales para los efectos deterministas, es posible evitar dichos efectos restringiendo las dosis recibidas por las personas. No es posible, sin embargo, evitar del todo los efectos estocásticos porque no existe evidencia científica de un umbral para ellos. **Como consecuencia del estado actual de conocimientos de los efectos biológicos de la radiación, la CIPR considera que el objetivo principal de la protección radiológica es evitar la aparición de efectos biológicos deterministas y limitar al máximo la probabilidad de aparición de los estocásticos.**

ANEXO 2

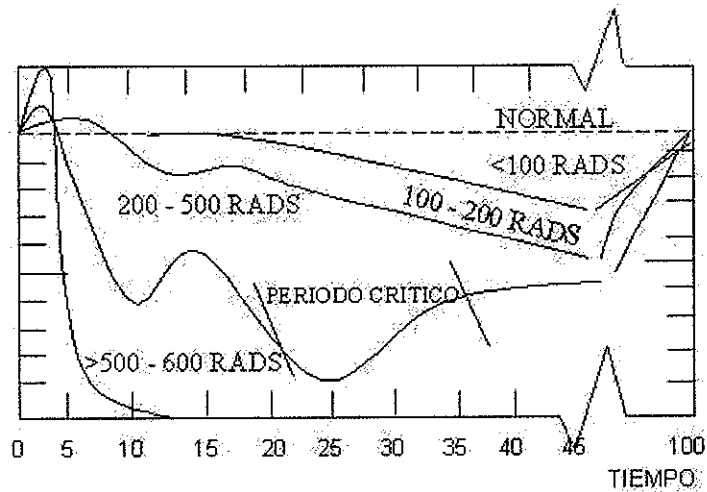
DAÑO HEMATOLÓGICO EN EL SÍNDROME AGUDO DE RADIACIÓN (Ref. 18 y 19)

EL Daño HEMATOLÓGICO en el Síndrome Agudo de Radiación se presenta en los gráficos 2.1, 2.2, y 2.3, a saber, linfocitos, neutrófilos y plaquetas respectivamente.

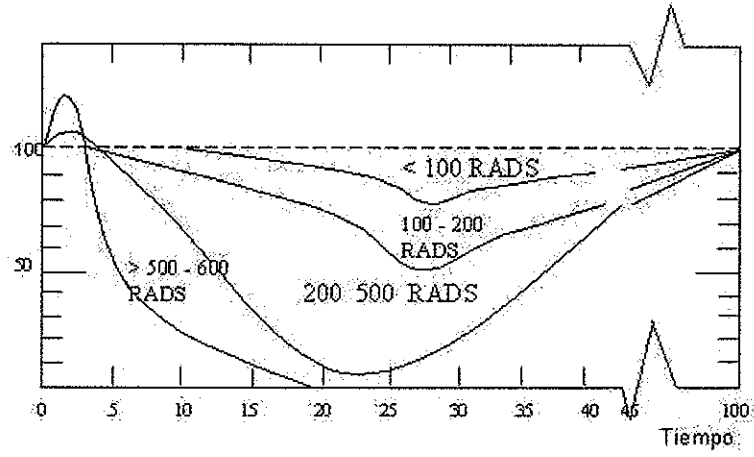
LINFOCITOS GRAFICO 2.1



NEUTROFILOS GRAFICO 2.2



PLAQUETAS GRAFICO 2.3



ANEXO 3

DEFINICION DE ALGUNAS MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLOGICAS

(Ref. 16)

Las magnitudes radiológicas más importantes son las siguientes:

Exposición: mide la cantidad de radiación necesaria para ionizar el aire. se mide en coulombio / kilogramo (C/ kg).

Dosis absorbida: mide la cantidad de energía absorbida por unidad de masa de material irradiado. Se mide en Gray, Gy (1 J/ kg). (Antiguamente se medía en Rad).

Dosis equivalente: mide el daño biológico producido por la radiación en un tejido. depende del tipo de radiación. se mide en Sievert, Sv. (1 J/kg, con factor = 1). (Antiguamente se medía en rem)

LIMITES ANUALES DE DOSIS PARA LOS TRABAJADORES OCUPACIONALMENTE EXPUESTOS

Tipo de exposición	Reglamento Protección Radiológica, Ref. (23).	CIRP 60 (Ref.3) IAEA 115, (Ref. 24)
Cuerpo entero	50 mSv/ año	100 mSv en 5 años consecutivos, 50 mSv/año, 20 mSv promedio anual.
Cristalino	300	150
Cualquier otro órgano individual	500	500

LIMITES ANUALES DE DOSIS PARA MIEMBROS DEL PUBLICO

Tipo De Exposición	Reglamento Protección Radiológica, Ref. (23)	CIPR 60, Ref. (3) OIEA N°115 , Ref. (24)
Cuerpo entero	5 mSv/ año	1 mSv/ año
Cristalino	30	15
Otros Organos	50	50

Para fines normativos hay que considerar

- a) Que todos los seres humanos han vivido y se ha reproducido bajo la acción de la radiación ionizante del ambiente, que a lo menos representa una dosis de 2.4 mSv año, promedio de dosis población

mundial.(Ref. 4), existiendo amplias poblaciones sometidas hasta diez veces este valor sin que hasta ahora se haya detectado ningún efecto indeseado en tales personas.(Kerala en la India)

ANEXO 4

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Comisión de Salud pública, Consejo Interterritorial del Sistema Nacional de Salud, Protocolos de Vigilancia Sanitaria Específica; Radiaciones Ionizantes, España, 2002.
- 2) CIPR; Comisión Internacional Protección Radiológica, Publicación N° 103: Recomendaciones 2007 de la CIPR (Traducción oficial al español de la Publicación ICRP N°103, editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica, con autorización de la ICRP). ISBN 978-84-691-5410-G, Madrid.
- 3) CIPR; Comisión Internacional Protección Radiológica, Publicación N° 60: Recomendaciones 1990 de la CIPR (Traducción oficial al español de la Publicación ICRP N° 60, editada por la Sociedad Española de Protección Radiológica, con autorización de la ICRP). ISBN 84-87450-67-9, Madrid.
- 4) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2006, Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes. ISBN 978-92-1-142263-4.
- 5) National Research Council, USA: BEIR VII-Phase 2: Health risks from exposure to low levels of ionising radiation. Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low levels of Ionising Radiation, USA, 2006. ISBN: 0-309-53040-7.
- 6) ICRP; Annals of the ICRP, ICRP Publication 99, Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk. Vol 35, N°4, 2005. ISBN 008-0449581.
- 7) International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health 2009;22(1): 27-33, "Low dose ionizing radiation exposure and cardiovascular disease mortality: Cohort study based on Canadian National Dose Registry of Radiation Workers", Jan M. Zielinski, Patrick J. Ashmore; Pierre R. Band, HUIxia Jiang, Natalia Shilnikova, Valerie K. Tait and Daniel Krewski.
- 8) The New England Journal of Medicine, August 27, 2009. Vol 361, N°9 : Exposure to Low-Dose Ionizing Radiation from Medical Imaging Procedures, Reza Fazel, Harlan Krumholz, Yongfei Wang, Joseph Ross, Jersey Chen, Henry Ting, Nilay Shah, Kurram Nasir, Andrew Einstein and Brahmajee Nallamothu.
- 9) Arch. Intern Medicine 2009; 169 (22): 2078-2086, Radiation Dose Associated with Common Computed Tomography Examinations and the Associated Lifetime Attributable Risk of Cancer, Rebeca Smith- Bindan, Jafi

Lipson, Ralph Marcus, Kwang-Pyo Kim, Mahadevappa Mahesh, Robert Gold, Amy Berrington de González, Diana Miglioretti.

- 10) Arch. Intern Medicine 2009, 169 (22): 2071-2077: Projected Cancer Risks from Computed Tomographic Scans Performed in the United States in 2007. Amy Berrington de González, Mahadevappa Mahesh, Kwang-Pyo Kim, Mythreyi Bhargavan, Rebeca Lewis , Fred Mettler and Charles Land.
- 11) Arch. Intern Medicine, Vol 169, Nº 22, 2049- 2050, Cancer Risks and Radiation Exposure from Computed Tomographic Scans, How can we be sure that the Benefits Outweigh the Risks ? Editorial.
- 12) Circulation, Journal of the American Heart Association, 2009; 119; 1056-1065,
- 13) Ionizing Radiation in Cardiac Imaging: a Science Advisory from the American Heart Association Committee on Cardiac Imaging of the Council on Clinical Cardiology and Committee on Cardiovascular Imaging and Intervention of the council on Cardiovascular Radiology and Intervention. Thomas Gerber, Jeffrey Carr, Andrew Arai, Robert Dixon, Victor Ferrari, Antoinette Gomes, Gary Heller, Cynthia Mc Collough, Michael McNitt-Gray, Fred Mettler, Jennifer Mieres, Richard Morin and Michael Yester. <http://circ.ahajournals.org/cgi/content/full/119/7/1056>.
- 14) Consejo de Seguridad Nuclear, España, CSN 1994: Radiaciones ionizantes y no ionizantes, ISBN 84-87275-57-5.
- 15) Sitio web CSN (Consejo de Seguridad Nuclear) <http://www.csn.es/>
- 16) Foro Nuclear y Universidad de Salamanca, Fundación general: Manual de Tecnología Nuclear para periodistas, España, 2004.
- 17) Sitio web FORO NUCLEAR (Foro de la Industria Nuclear Española): <http://www.foronuclear.org/>
- 18) Apuntes de clases de Protección Radiológica Operacional, dadas por CCHEN.
- 19) Material de divulgación de clases del OIEA, Apuntes Dra. Rosario Pérez.
- 20) DEVCAN: Probability of developing or dying of cancer Software, Version 6.1.1, Statistical Research and Applications Branch, National Cancer Institute, U.S.A, 2006. (Clase del OIEA del Dr. Albert Wiley, Viena, Octubre 2009, Late Effects of Exposure to Ionizing Radiations) En: <http://srab.cancer.gov/DevCan>
- 21) Sitio web: <http://radiationanswers.org/radiation-and-me/radiation-cancer/odds-of-cancer.html>

- 22) Publicación ICRP-84, Comisión Internacional de Protección Radiológica: Embarazo e Irradiación médica. Edición de la Sociedad Española de Protección Radiológica y Sociedad Argentina de Radioprotección. 1999.
- 23) Decreto Supremo no.3 : "Aprueba Reglamento de Protección Radiológica de instalaciones radiactivas, 3 de enero de 1985, Ministerio de Salud, Chile.
- 24) OIEA; Colección Seguridad N° 115: Normas básicas internacionales de seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación.