

RADIOPROTECCION

La radioprotección (RP) concierne a la protección de los individuos y su descendencia de los efectos deletéreos de las distintas formas de radiación. Nos referiremos a la RP en medicina, en el área del radiodiagnóstico (RD).

Las técnicas de RD constituyen la principal fuente (90%) de irradiación artificial de la población debido al alto número de instalaciones y exploraciones realizadas y al gran número de profesionales expuestos.

El concepto de RP implica el aprovechamiento de los beneficios de la utilización de radiaciones ionizantes (RI) con el menor riesgo posible para las personas expuestas.

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) evalúa los riesgos y fija los límites máximos de exposición a RI permitidos para los trabajadores de la salud y la población general, los que son revisados periódicamente. En Uruguay, la Dirección Nacional de Tecnología Nuclear (DINATEN) supervisa estas normas e inspecciona salas y aparatos de RD. Está encargada de la formulación de las normas básicas de protección radiológica.

Fuentes de radiación

Fuentes naturales: incluyen los rayos cósmicos, la radiación terrestre y la radiación interna debida a radionúclidos inhalados o ingeridos.

Fuentes artificiales:

Las de origen médico son debidas a técnicas de RD, radioterapia y medicina nuclear; las ocupacionales se ven en las áreas médica, industrial y de energía atómica. Otras fuentes son la accidentales y misceláneas de diverso origen doméstico.

Propiedades de los rayos X y sus magnitudes

Los rayos X (RX) forman parte del espectro de radiaciones electromagnéticas, con diferente energía según su longitud de onda. En RD, los más utilizados son los de energía entre 30 y 125 KeV (Kilo-electrón-volt).

Es una forma de radiación ionizante (RI), ya que al interactuar con la materia produce la separación de electrones del átomo. Esto provoca un efecto biológico sobre los tejidos.

En RP existen magnitudes y conceptos de primordial interés, que detallaremos:

La dosis absorbida (D) es la energía impartida por las RI por unidad de masa de material irradiado. En el sistema internacional su unidad es el gray (Gy). Anteriormente se utilizaba el rad, equivalente a 0.01 Gy.

Se define una nueva magnitud, dosis equivalente (H), ya que dosis absorbidas iguales de radiaciones de diferente calidad provocan efectos biológicos diferentes. La dosis equivalente se calcula como el producto de la D por un factor de calidad (Q) que depende del tipo de radiación y por un factor N que depende de la tasa de absorción y el fraccionamiento de la dosis ($H=DxQxN$). En RX, N y Q valen 1 y son adimensionales, por lo cual la dosis absorbida coincide con la dosis equivalente. La unidad es el Sievert (Sv). Anteriormente se utilizaba el rem, que equivale a 0.01 Sv.

La dosis equivalente ponderada para cada órgano o tejido (HT) se obtiene multiplicando la H por w, factor que depende de la radiosensibilidad del órgano. La suma de estos productos es la dosis

efectiva (HE), que es un indicador del riesgo al que está sometida la persona irradiada considerada globalmente. Su unidad es el Sievert (Sv).

La dosis equivalente colectiva efectiva (SE) es el producto del número de individuos expuestos por el promedio de la HE. Esto tiene interés en la optimización de la evaluación de medidas de RP.

Los factores ponderales wT recomendados por la ICRP son de – 0.20

para gónadas, - 0.12 para médula ósea, pulmón, estómago, colon, y valores menores para otros órganos.

La exposición (X) a un haz de RX está relacionada con el cociente entre la carga total de iones producidos en una cierta masa de aire y el valor de la masa considerada. La unidad es el Röntgen (R), y en el sistema internacional es el Coulomb/kg.

El kerma (k) es la energía cinética liberada por las partículas ionizadas por unidad de masa del material especificado.

Efectos biológicos

Las RI producen separación de electrones de los núcleos atómicos de las moléculas orgánicas, lo que desencadena una serie de reacciones físico-químicas en las cuales se producen radicales libres, que son moléculas inestables y altamente reactivas (p.ej. H₂O₂). Las RI actúan directamente y a través de los radicales libres sobre las macromoléculas biológicas, sobre todo ácidos nucleicos, enzimas y membranas.

A nivel de los ácidos nucleicos producen cambios o pérdida de bases, ruptura de puentes de H⁺, ruptura de hélices y de puentes cruzados con otras moléculas. Existen procesos de reparación del ADN a nivel celular; si éstos son superados llevan a la aparición de mutaciones.

A nivel subcelular se observan daños en la membrana celular (cambios en la permeabilidad), núcleo (cromosomas con adherencias entre sí, defectos en la formación del huso, inhibición de la mitosis).

A nivel celular aparecen transformaciones malignas, muerte celular e inhibición de la división, y cambios genéticos debidos a mutaciones.

Factores físicos, químicos y biológicos pueden alterar la magnitud de los daños inducidos por las RI.

Los físicos dependen: de las características de la radiación: tasa de dosis (dosis absorbida en función del tiempo), fraccionamiento, calidad de la radiación; del tiempo de exposición (a mayor tiempo, mayor dosis, siendo el efecto acumulativo); de la distancia a la fuente (la dosis absorbida es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia) y del área irradiada (en áreas mayores, los efectos son mayores con menor dosis).

Los factores químicos pueden ser subdivididos en dos grupos, los sensibilizantes y los protectores. Dentro de los primeros se encuentra el oxígeno, razón por la cual los tejidos más vascularizados son los más radiosensibles. El O₂ se une a radicales libres formando radicales peróxido. Dentro de los factores protectores se incluyen la cisteína y el glutatión, que contienen al grupo sulfhidrilo.

Dentro de los factores biológicos:

La radiosensibilidad depende del período celular, siendo la etapa crítica la previa a la duplicación del ADN. Es directamente proporcional al índice mitogénica e inversamente proporcional a grado de diferenciación (ley de Bergonie-Tribondeau). Los tejidos con mayor radiosensibilidad son la médula ósea, el tubo digestivo, las gónadas. El más resistente es el tejido nervioso.

Dentro de los factores del individuo se incluyen los genéticos y el balance hormonal.

Los efectos biológicos se pueden clasificar según dos criterios:

- hereditarios (transmitidos a generaciones futuras) y somáticos (que afectan al individuo irradiado),
- estocásticos (o probabilísticos) y no estocásticos.

Los estocásticos son aquellos en los que existe una determinada probabilidad de que ocurran. La gravedad del efecto no es proporcional a la dosis; sí lo es la probabilidad de ocurrencia. Por lo tanto, no existe umbral de dosis para los mismos. Habitualmente se presentan luego de un período de latencia prolongado. Este tipo de efectos es difícil de evaluar. Generalmente sólo tenemos información acerca de los efectos nocivos a dosis elevadas; es difícil extraer conclusiones sobre lo que ocurre a dosis menores partiendo de dichos datos. Los modelos matemáticos de relación dosis-incidencia de cáncer se elaboran en base a experimentación animal e información epidemiológica humana.

Los efectos no estocásticos son dependientes de un umbral de dosis, por encima de la cual ocurre en todos los individuos expuestos. En este caso, la intensidad del efecto es proporcional a la dosis.

Efectos estocásticos

Los dividiremos en hereditarios, carcinogénicos y teratogénicos.

- Hereditarios: son los que repercutirán sobre generaciones futuras. Se producen por irradiación gonadal. Incluyen las alteraciones en el ADN de los gametos ya mencionadas, lo que puede significar desde alteraciones fenotípicas leves hasta otras incompatibles con la vida. Es por esta razón que la protección gonadal deberá tenerse en cuenta siempre en pacientes en edad reproductiva.
- Carcinogénicos: se ha comprobado experimentalmente y luego de la exposición sufrida durante la segunda guerra mundial, que las radiaciones aumentan la frecuencia de aparición de tumores malignos. Asienta más frecuentemente a nivel del sistema hematopoyético (leucemia, linfoma), tiroides, mama y piel. Son efectos de aparición tardía, con latencia de años. La protección se centrará por tanto en estas áreas.
- Teratogénicos: se refiere al efecto estocástico ocurrido durante el desarrollo (vida intrauterina). Este depende de la dosis de irradiación y de la edad gestacional. Cuando es muy precoz puede producir aborto espontáneo. Los efectos son más críticos durante el primer trimestre. Pueden ocurrir desde malformaciones leves hasta mayores, incompatibles con la vida. Por tanto, antes de someter a una mujer en edad reproductiva a un examen radiológico se deberá descartar el embarazo, y en caso de que éste exista, reconsiderar la indicación del mismo. Si el beneficio es mayor que el riesgo que implica, se hará con protección extra.

Efectos no estocásticos

Dependen de la dosis de radiación, por lo que se establecerá un límite de exposición para cada órgano.

Piel: dado que es el órgano de impacto de las radiaciones su afectación es frecuente si no se respetan los límites determinados. Incluyen edema y descamación leve, radiodermatitis caracterizada por esclerosis, manchas de hiper- o depigmentación, alteraciones ungueales, caída del pelo, etc. La aparición de cáncer es tardía y de tipo estocástico.

Cristalino: es un órgano frecuentemente afectado con la producción de cataratas, que se consideran una patología ocupacional. Se previene con protección adecuada.

Pulmón: provoca fibrosis pulmonar.

Sistema hematopoyético: su alteración puede afectar a las tres series, blanca, roja y plaquetaria. La más precozmente afectada es la serie blanca, con linfopenia. La serie roja se afecta más tardíamente. Son signos de alarma la leucocitosis (mayor de 15.000), la leucopenia (menor a 4000), la reticulocitosis mayor al 2%, la poliglobulia y la macrocitosis. Se ve con dosis menores a 1200 rads.

A nivel del tubo digestivo produce diarrea, vómitos y deshidratación. Se ve a dosis entre 1300 y 2000 rads.

Gónadas: La dosis requerida para producir esterilidad permanente es de 600 rads en hombres y 800 rads en mujeres; dosis menores pueden alterar transitoriamente la fertilidad.

Huesos: dosis de 100 rads interrumpen los mecanismos de osificación en individuos en crecimiento.

Riñones: 700 a 800 rads provocan alteraciones funcionales pasajeras. Grandes exposiciones pueden provocar nefroesclerosis.

La irradiación corporal total produce el síndrome agudo de irradiación, que aparece a partir de los 100 a 150 rads y lleva al coma y muerte con dosis entre 1500 y 2000 rads (20 Gy).

NORMATIZACIÓN

Principios de la radioprotección

La ICRP recomienda un sistema de limitación de dosis basado en tres principios:

- Principio de justificación (en ningún caso se debe adoptar una práctica si su introducción no produce un beneficio neto). Es imperativa la realización de un análisis costo-beneficio en cada caso con participación de médico y paciente.

- Principio de optimización de la protección radiológica: todas las exposiciones deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, teniendo en cuenta factores económicos y sociales – concepto de A.L.A.R.A., As Low As Reasonably Achievable-. Debe establecerse un equilibrio entre el costo de las medidas de radioprotección y el daño producido por las radiaciones.

-Principio de límite de dosis: deben establecerse para trabajadores, miembros del público y pacientes que participan en proyectos de investigación. Cualquiera sea el resultado del análisis antedicho, los límites de dosis establecidos por autoridades nacionales e internacionales deben ser respetados. Éstos deben ser establecidos para evitar los efectos deterministas y mantener la probabilidad de los estocásticos dentro de un margen aceptable.

Para las exposiciones ocupacionales y para los pacientes se recomiendan límites anuales de dosis efectiva que serían numéricamente iguales a una dosis de cuerpo entero recibida uniformemente y límites anuales específicos de dosis equivalentes para algunos órganos tejidos, como piel y cristalino. Se establecen límites especiales para las mujeres con capacidad de procrear, embarazadas y personas entre 16 y 18 años. Los límites anuales (LA) de dosis efectiva recomendados son de 5 mSv para los miembros del público y 50 mSv para el personal: estas cifras son revisadas continuamente y se tiende a su disminución. En trabajadores, el límite para la piel se ha fijado en 500 mSv por año y 150 mSv para el cristalino.

Radioprotección operacional

Es la que se refiere a los procedimientos que se deben aplicar en las instalaciones para cumplir los tres criterios generales. Las zonas con riesgo radiológico deben estar señalizadas y se definen cuatro tipos:

- zona vigilada (trébol gris), donde la dosis recibida se encuentra entre 1/10 y 3/10 del LA.
- zona controlada (trébol verde); es probable recibir más de 3/10 del LA.
- zona de permanencia limitada (trébol amarillo): riesgo de recibir dosis superiores al LA.
- zona de acceso prohibido (trébol rojo): riesgo de recibir en una exposición única una dosis superior al LA.

La ICRP recomienda para los equipos fijos de RX la clasificación de zona controlada. En estos lugares es importante señalar cuando el equipo está funcionando y en esos momentos cerrar las puertas y evitar el acceso durante la exploración. El uso de dosímetro individual es obligatorio para el personal de radiodiagnóstico. Los resultados permiten aplicar y hacer un seguimiento de parte de los programas de optimización. Los valores anormales y sus posibles causas deben ser analizados de inmediato para detectar fallas operacionales o en los equipos.

Radioprotección en radiodiagnóstico

Está enfocada a la protección radiológica aplicada al diseño de la instalación, al equipo y su funcionamiento.

Los equipos deben instalarse en locales adecuados que hayan sido previamente preparados para este fin. La sala debe tener paredes blindadas con plomo. El espesor del blindaje tiene que ser calculado de acuerdo al uso de las habitaciones contiguas. La ventilación debe ser adecuada y en lo posible se ubican los comandos fuera de la sala, con ventana de vidrio plomado que permita ver al paciente y medios de comunicación con el mismo. Las puertas también deben estar blindadas. La dosis de radiación en el exterior de la sala debe ser prácticamente despreciable, aplicando el criterio de optimización.

Los equipos deben ser fabricados con criterios de calidad mínimos que disminuyen los riesgos (sin radiación de fuga, para lo cual el tubo de RX se envuelve en una coraza; filtración adecuada; dispositivos automáticos de colimación; cortinillas plomadas alrededor del intensificador), basándose en normas internacionales que señalan los requisitos mínimos para la fabricación de equipos de RX.

Las posiciones habituales de los operadores dentro de las salas deben estar correctamente protegidas por mamparas para que detrás de las barreras las dosis sean mínimas.

Radioprotección en radiología diagnóstica

En la consola del equipo debe señalarse el potencial y la corriente del tubo de RX, así como el tiempo de exposición.

El haz de rayos debe ser lo más delimitado y monocromático posible. Esto implica eliminar la radiación blanda (de mayor λ) que no aporta al diagnóstico. Por ello se agregan filtros a la salida de la ventana de cobre o aluminio, de 1.5 mm de espesor como mínimo.

La colimación del haz reduce el área de irradiación y la radiación secundaria. Esto se realiza mediante conos de cobre o aluminio, y en los equipos más modernos con diafragmas plomados. Es importante el conocimiento de estos sistemas para disminuir al mínimo la irradiación. Como vimos, el aire también tiene función de filtro, siendo la dosis inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. La distancia mínima entre la fuente y el paciente es de 45 cm.

Técnicamente se ha logrado mejorar la imagen disminuyendo la radiación: las hojas de refuerzo de tierras raras permiten reducir las dosis. La utilización de chasis especiales (sobre todo neumáticos) asegura la adaptación íntima entre película y pantallas y mejora la definición de las hojas de

refuerzo. El intensificador de imágenes ha logrado disminuir hasta en un 75% las dosis. Los exposímetros automáticos que controlan la calidad de las radiografías también disminuyen la dosis al evitar la realización de radiografías innecesarias. Las rejillas antidifusoras permiten pasar los RX en dirección perpendicular a la película, lo que disminuye la radiación dispersa.

En radiografía la zona de mayor dosis de irradiación es la piel, donde incide directamente el haz. Según el estudio, se puede calcular el grado de irradiación de cada órgano crítico, por ejemplo la mayor irradiación de la tiroides se produce en radiografías de columna cervical y cráneo, mamas en mamografía, útero y ovarios en colon por enema, placas de columna lumbar y urografía intravenosa .

Radioprotección en radioscopia

El operados que debe permanecer cerca del paciente deberá usar delantal, guantes y lentes plomados, con un equivalente de plomo de 0.25 mm, y evitar el contacto don el haz primario. Estos equipos deben poseer interruptores, temporizadores y señal acústica una vez que se supere cierto tiempo (máx 10 min) . Siempre que sea posible debe utilizarse intensificador de imágenes.

Es fundamental la existencia de un vidrio plomado que cubra la pantalla. Estos procedimientos deben utilizarse solamente en aquellos casos en que es importante la visualización de procesos dinámicos. El uso de la radioscopia pulsada permite disminuir la dosis y obtener una imagen que reproduce con bastante fidelidad el movimiento.

Radioprotección en equipos portátiles y cirugía

Dado que se utilizan en áreas no blindadas, debe protegerse con equipo de plomo y evitar que el haz directo incida en otros paciente o personal. Los equipos de protección radiológica utilizados en cateterismo cardíaco y cirugía no deben obstruir el trabajo del cirujano y su equipo.

Radioprotección en tomografía

La dosis de irradiación depende del grosor de los cortes, número de los mismos y grados de superposición. La TAC de alta resolución tiene dosis de irradiación similar a la angiografía. Se debe recordar que el campo de irradiación tiene forma de reloj de arena por el blindado del gantry, lo que se considerará en caso de tener que permanecer en la sala.

Radioprotección en radiología pediátrica

La mayor esperanza de vida de los niños da lugar a una mayor manifestación potencial de efectos tardíos. Los niños son más sensibles a la carcinogénesis; sin embargo, las dosis requeridas para obtener imágenes en niños son menores a las del adulto. Además, el movimiento en los niños es otro problema que lleva a repetir los exámenes.

Principio de justificación: El estudio debe ser justificado. Siempre debemos buscar alternativas de estudio que permitan llegar al diagnóstico deseado y no requieran irradiación.

Principio de optimización: Utilizar el diafragmado del haz de Rayos X para irradiar únicamente el área de interés. En radioscopia minimizar el tiempo de exposición al mínimo necesario para obtener un estudio de calidad diagnóstica. Ajustar las dosis al tamaño del niño. Hacer uso de inmovilizadores y/o establecer una buena comunicación con el niño para evitar la repetición del estudio. Siempre que sea posible utilizar protectores gonadales.

Considerar también la radioprotección del acompañante del niño y del personal de enfermería que asiste en el estudio. En estudios de radioscopia, de preferencia será el acompañante del niño quien nos asista. Si es mujer, recordar descartar la posibilidad de embarazo. Utilizar los delantales plomados, collarete y lentes plomados.

Protección individual

Para el paciente se aplicarán los criterios generales ya mencionados. En la práctica se utilizarán protectores gonadales en niños y personas en edad reproductiva. En el caso de requerirse un acompañante en el estudio puede ser un familiar, que también debe estar protegido. En mujeres en edad reproductiva, se deberá descartar embarazo. En embarazadas se reconsiderará la realización del estudio, prefiriendo ultrasonográficos. Si es imprescindible el estudio se utilizarán protectores plomados que rodeen al feto por delante y detrás. Si se realiza TC, se hará con el menor número de cortes posible.

Para el personal se utilizarán delantal, guantes, lentes y collares plomados (para protección de tiroides).

Monitoreo de dosis de exposición

Se debe realizar un monitoreo de la exposición ambiental e individual.

La ambiental se realiza en base a la propiedad de ionización del aire, que se mide con el contador de Geiger-Müller.

El individual se realiza a través de dosímetros personales. Existen de dos tipos: los films dosimétricos, que están constituidos por un film radiosensible cubierto en distintos sectores por varios tipos de filtro (cobre, aluminio), para evaluar en forma continua la irradiación y sus características. Otro tipo de dosímetro personal son los termoluminiscentes (anillo o lapicera). Estos son mucho más sensibles, captando del orden de las centésimas de mGray, pero más costosos.

La norma del ICRP establece distintos grupos de individuos para la determinación de la dosis de exposición máxima, que se define en el período de un año. En estos grupos se consideran a trabajadores, pacientes y población general. Los límites para trabajadores son actualmente de 20 mSivert al año, considerando períodos de 5 años. Para la población general se establece en 1 mSivert al año.

Los trabajadores se pueden dividir en dos categorías, A y B. Los del grupo A son aquellos en los que existe la posibilidad de que la dosis sobrepase los 3/10 de la dosis máxima. Estos deben ser sujetos a monitoreo individual.

Los del grupo B son aquellos en que es muy improbable que lleguen a los 3/10 de la dosis, por lo que generalmente no se les realiza monitoreo individual. La experiencia ha demostrado que la mayoría del personal que trabaja en aplicaciones médicas se puede incluir en la categoría B, por lo que no es necesaria la vigilancia individual; se puede efectuar a veces como método para confirmar que las condiciones son satisfactorias.

Otro elemento que se considera es la vigilancia médica. Esto implica la realización de un valoración clínica (antecedentes familiares, mapeo genético, antecedentes personales) y paraclínica previo al ingreso al trabajo, así como un control periódico, en períodos no mayores a 6 meses, clínico y paraclínico (hematológico, citológico, oftalmológico, etc.). En nuestro medio esto no se lleva a cabo sistemáticamente.

Debe existir un organismo que efectúe la vigilancia a través de la medición de la exposición ambiental y de los trabajadores.

Conciencia radiosanitaria

Implica la correcta formación e información de todas las personas involucradas en el manejo de fuentes de radiación , en cuanto a los efectos deletéreos y los mecanismos de radioprotección, así como la información del público (realización de estudios a pedido de los pacientes).