

Libros de **Cátedra**

Protección radiológica en medicina

Apuntes para estudiantes de física médica

Gustavo D. Sánchez
(coordinador)

FACULTAD DE
CIENCIAS EXACTAS

e
exactas


EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN MEDICINA

APUNTES PARA ESTUDIANTES DE FÍSICA MÉDICA

Gustavo D. Sánchez

(coordinador)

Facultad de Ciencias Exactas



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA


EDITORIAL DE LA UNLP

Al Ing. Onofre Ricardo Moll, pionero de la Física Médica en Argentina y Maestro de Maestros.

Agradecimientos

A César Arias y Alberto García, porque me enseñaron protección radiológica desde la academia el primero y desde lo cotidiano el segundo. Gracias a César di mis primeros pasos como Profesor en diversos países de América dentro del marco del proyecto ARCAL VII. El “Petiso García” me enseñó entre otras muchas cosas a buscar fuentes radiactivas perdidas y a tomar mate. Muchos acudían a pedir consejo a esta especie de “Viejo Vizcacha” de la protección radiológica, entre ellos un tal Dan Beninson.

A las muchas personas de las que aprendí en mi paso por la Gerencia de Protección Radiológica de la Comisión Nacional de Energía Atómica; la lista sería demasiado larga para incluirla aquí.

A Cristina Caracoche, gracias a cuyo esfuerzo y tesón existe la Licenciatura en Física Médica de la Universidad Nacional de La Plata, en cuyo marco se publica este libro.

A quienes me enseñaron cómo convertir “apuntes de clase” en un “libro sobre apuntes de clase”. Son expresiones similares pero la palabra “libro” hace una gran diferencia. Gracias a la Dra. María Soledad Funes y a la Prof. Lic. Laura Sánchez (orgullosamente: mi hija).

A los amigos y colegas que generosamente leyeron los borradores y los enriquecieron con su crítica constructiva, sus opiniones y sugerencias. Una mención particular a la Dra. Alba Güerci y al Dr. Carlos Einisman.

A mis colaboradores de ayer y de hoy en las cátedras de Protección Radiológica. Todos me ayudan día a día a ser mejor docente, tarea inacabable. Por orden de aparición: Paola Álvarez, Alejandro Pérez de la Hoz, Belén Moglia, Daiana Figueroa, Vanesa Sanz, Diego Puntigliano y Santiago Girola.

A mi amigo y colega Mg. Daniel Andisco quien aportó el material sobre el Instituto Nacional del Cáncer y su rol en la promoción de la Física Médica y el referente a los “Estándares de Calidad Diagnóstico y Tratamiento por Imágenes” vigente desde diciembre de 2021 y del cual fue uno de los redactores.

Y a mi esposa Nelly, que no solo aportó su experiencia como docente: soportó mi mal humor cuando quería abandonar, me alentó a continuar y me acompañó en las largas horas de trabajo. Con la experiencia adquirida te aseguro que cuando escriba mi próximo libro no te voy a hacer sufrir tanto...

Índice

Introducción _____ 7

CAPÍTULO 1

Efectos biológicos de las radiaciones _____ 9

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 2

Magnitudes y unidades radiológicas _____ 28

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 3

Instituciones y publicaciones relacionadas con la protección radiológica.

Marco regulatorio argentino _____ 35

Gustavo Sánchez y Daniel Andisco

CAPÍTULO 4

Criterios de protección radiológica _____ 51

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 5

Dosimetría de la radiación externa e interna _____ 72

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 6

Implementación práctica de la protección radiológica _____ 83

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 7

Monitoreo individual y de áreas _____ 98

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 8

Protección radiológica del paciente _____ 104

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 9

Protección radiológica en radiología _____ 113

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 10

Protección Radiológica en Medicina Nuclear (I) _____ 139

Gustavo Sánchez

CAPÍTULO 11

Protección Radiológica en Medicina Nuclear (II) _____ 150

Carlos Einisman

CAPÍTULO 12

Protección radiológica en radioterapia _____ 182

Gustavo Sánchez y Santiago Girola

Los autores _____ 217

Introducción

Gustavo Sánchez

El presente libro está basado en los apuntes de la materia Física de la Salud (Protección Radiológica) de la Licenciatura en Física Médica de la Universidad Nacional de La Plata y de otras carreras donde el autor también es docente.

La primera parte de la obra resume el marco conceptual de la protección radiológica, desde la presentación de los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes (CAPÍTULO 1: “Efectos biológicos de las radiaciones”) y las magnitudes radiológicas (CAPÍTULO 2: “Magnitudes y Unidades Radiológicas”) hasta la descripción detallada de la filosofía de la radioprotección (CAPÍTULO 4: “Criterios de Protección Radiológica”) y los lineamientos básicos para su implementación práctica (CAPÍTULOS 5: “Dosimetría de la Radiación Interna y Externa”; 6: “Implementación Práctica de la Protección Radiológica” y 7: “Monitoreo Individual y de Áreas”) en el marco de las Recomendaciones, Normas y Regulaciones argentinas (CAPÍTULO 3: “Instituciones y publicaciones relacionadas con la protección radiológica. Marco regulatorio argentino”).

Los siguientes capítulos tratan sobre la protección radiológica de los pacientes (CAPÍTULO 8: “Protección radiológica del paciente”) y la aplicación de los criterios a prácticas específicas como la radiología (CAPÍTULO 9) la medicina nuclear (CAPÍTULOS 10 y 11) y la radioterapia (CAPÍTULO 12)

Por una cuestión de extensión, la obra no incluye la protección contra radiaciones no ionizantes, ampliamente utilizadas en medicina en prácticas tales como resonancia magnética, laser y ultrasonido. Estos temas serán objeto de una futura publicación.

El libro incluye aspectos de diversas disciplinas: biología, tecnología, física, aspectos legales y hasta filosofía y economía. Estos aspectos, por ser tan amplios, se presentan de manera introductoria, con la profundidad necesaria y suficiente para dar una continuidad y coherencia a la obra dentro de los alcances de la materia. Se espera que el lector pueda acceder a bibliografía complementaria y recursos informáticos y tecnológicos para seguir profundizando sobre los diferentes temas y solucionar problemas específicos.

Las fuentes principales de la obra son las publicaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica y el programa de entrenamiento para profesionales de la salud de la Agencia Internacional de Energía Atómica.

Finalmente, cabe aclarar que los temas vinculados a la protección radiológica son de carácter dinámico, se actualizan en forma permanente. Cada día hay nuevas evidencias que ponen en duda los paradigmas vigentes sobre efectos biológicos, fundamentalmente en bajas dosis de radiación; las normas y regulaciones se revisan y actualizan frecuentemente, la

innovación de los recursos tecnológicos para diagnóstico y tratamiento plantean nuevos desafíos. Incluso la base misma de la filosofía de la protección radiológica está siendo revisada y es muy probable que en pocos años la publicación 103 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica sea revisada y resulte obsoleta. En ese sentido esperamos que este libro brinde a los físicos médicos herramientas útiles para su profesión y los motive para buscar la actualización constante.

CAPÍTULO 1

Efectos biológicos de las radiaciones

Gustavo Sánchez

Introducción

Entender los efectos biológicos de las radiaciones es de fundamental importancia en todas las prácticas médicas que las involucran. El fraccionamiento en radioterapia, el paso de la braquiterapia de baja tasa de dosis (LDR) a la de alta tasa de dosis (HDR), la terapia metabólica con fuentes abiertas, entre otras, existen merced al conocimiento de los fenómenos radiobiológicos asociados y han significado un importante avance en el tratamiento de diversas patologías.

Existen situaciones motivadas por un profundo desconocimiento del tema, algunas de ellas disparatadas, como por ejemplo entregar diariamente una copa de leche a los radiólogos para – supuestamente – “protegerlos de las radiaciones”. Esto sería solo una curiosidad si no tuviera otras consecuencias, pero creer que existe un “antídoto” contra las radiaciones puede hacer que los trabajadores no utilicen las medidas de protección adecuadas. Otro concepto erróneo muy generalizado es suponer que no existe ningún riesgo si no excedemos cierta “dosis máxima permisible”.

Uno de los efectos de la exposición a las radiaciones es la generación de lesiones en los tejidos. Este es el fundamento de la terapia con radiaciones: maximizar estos efectos en los tejidos enfermos y minimizarlos en los tejidos sanos que inevitablemente recibirán también radiación. En el caso de los trabajadores y el público, la aparición de estas lesiones – efectos determinísticos – estará siempre asociada a situaciones anormales y en principio no deberían ocurrir nunca. También serán consecuencia de accidentes o mala práctica la sobreexposición de pacientes en procedimientos terapéuticos, diagnósticos o intervencionistas, e incluso la subexposición en el caso de radioterapia.

Además, existen los “efectos estocásticos”. Estos efectos pueden producirse aun con dosis muy bajas de radiación y como todo fenómeno estocástico, requiere de herramientas estadísticas para ser analizado. Por este motivo, el estudio de estos efectos tiene asociadas grandes incertezas, condicionadas por el número de casos disponibles, el método de análisis y las especulaciones que en muchos casos es necesario hacer para relacionar las causas con los efectos. Pero a pesar de esas incertezas y los justificados cuestionamientos a los criterios de análisis, el estudio de los efectos estocásticos sienta las bases para establecer los criterios básicos de la protección radiológica, que trataremos más adelante.

En el presente Capítulo, describiremos someramente los efectos determinísticos y estocásticos, incluyendo los efectos por exposición prenatal y el Síndrome de Irradiación Aguda. Se sugiere la lectura de la bibliografía recomendada para estudiar el tema en profundidad.

Mecanismos de los efectos biológicos

La mayoría de los efectos adversos para la salud por exposición a la radiación pueden agruparse en dos categorías generales:

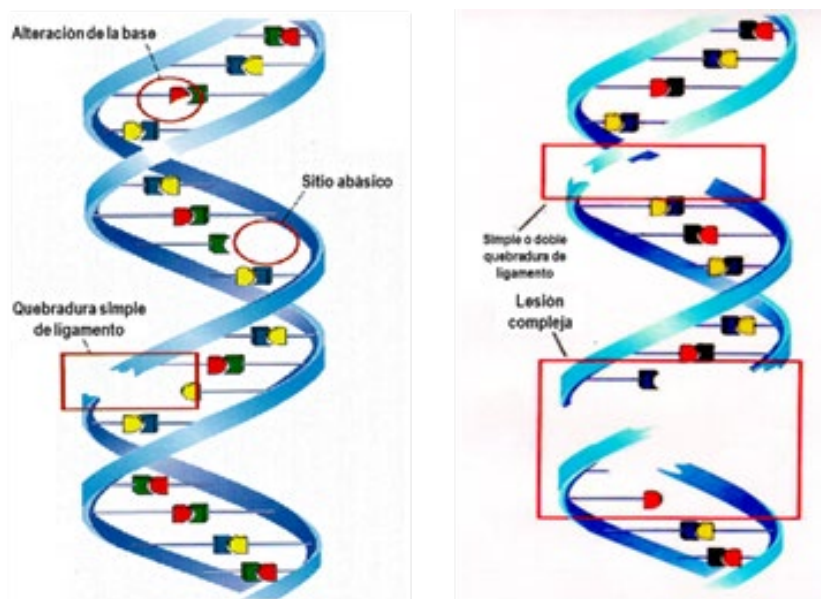
- efectos deterministas (reacciones tisulares nocivas) debidos principalmente a la muerte/celular tras dosis elevadas; y
- efectos estocásticos, tales como el cáncer y efectos heredables debidos a mutaciones de células somáticas o germinales, respectivamente. (ICRP, 2007, p. 45)

La interacción de la radiación con los tejidos se produce por diversos mecanismos. Esa interacción da lugar a modificaciones químicas que en definitiva serán las iniciadoras de los procesos que podrían finalizar (o no) con la manifestación de los efectos mencionados. Los daños van a ser debidos a alteraciones o muerte de esas células y luego de un cierto tiempo -corto o largo según el caso- se evidenciarán los efectos.

Esos procesos iniciales pueden producirse por acción directa o indirecta de la radiación con los blancos. Cuando la radiación causa excitación o ionización en un sistema biológico, en particular en el nivel de moléculas críticas, la modificación de ese sistema es por acción directa de la energía entregada (*efecto directo*). Pero hay que considerar que las células son básicamente agua, de modo que la energía absorbida en ese volumen generará moléculas intermediarias con gran reactividad química (radicales libres: ROS), dando lugar a los mecanismos secundarios de daño (*efectos indirectos*), predominantes en las exposiciones a radiación de baja Transferencia Lineal de Energía (LET). En el caso de radiación de Alto LET predominan los mecanismos directos.

A nivel del ADN, la radiación genera cambios químicos que pueden producir alteraciones más o menos complejas (Ruptura de cadenas, Alteración de bases, Alteración de los azúcares, puentes entre las cadenas -*cross links*- o formación de dímeros). Esas alteraciones varían desde lesiones muy simples como un cambio o pérdida de una base o rupturas de hebra simple hasta lesiones mucho más complejas como rupturas de doble hebra o la pérdida de sectores completos (Figura 1.1).

Figura 1.1. Lesiones en el ADN (ejemplos).



Nota. Izquierda: alteraciones simples más “fáciles” de reparar (alteraciones de una base, quebradura simple de ligamento, sitio abásico, Derecha: Lesiones Complejas, más “difíciles” de reparar. Fuente: IAEA (2017)

Inmediatamente luego de producidas esas lesiones se ponen en marcha mecanismos de reparación mediante la acción de enzimas específicas. Ejemplos: escisión y resíntesis (mecanismo principal en moléculas de ADN que no están en fase de replicación. La lesión es reconocida y escindida. El nuevo fragmento es re-sintetizado tomando como modelo la cadena complementaria con participación de enzimas reparadoras); la reparación post replicativa (se observa en células en vías de replicación -fase de Síntesis-) y otros como transquilación: fotorestauración: y mecanismos reparadores de rupturas dobles.

Si bien estos mecanismos son altamente eficaces, la probabilidad de que la reparación sea exitosa depende de varios factores, como la cantidad de lesiones producidas y su complejidad. A su vez, la cantidad de lesiones depende de la dosis mientras que la complejidad, como se dijo antes, dependerá tanto de la dosis como de la LET de la radiación. Los procesos de reparación se extienden por algunas horas, luego de las cuales finalizará -la mayoría de las veces con éxito- retro trayendo todo al estado anterior a la alteración. Es muy importante mencionar que este tipo de alteraciones no son causadas sólo por las radiaciones ionizantes, sino también por agentes químicos, ambientales, etc.

La reparación puede ser exitosa o no. Si no lo es, la secuencia genética quedará alterada. Eso podría llegar a afectar, llegado el momento, la reproducción celular. Si a pesar de todo la célula logra dividirse, las células hijas y toda su descendencia tendrán parte de su información genética modificada. Esta situación podría ser relevante o no. Por razones de espacio y para mayor simplicidad, nos limitaremos a dos posibilidades: que la información genética alterada tenga o no la capacidad de iniciar o promover procesos oncogénicos.

Para que un proceso oncogénico, iniciado o promovido por los genes mutados, llegue a manifestarse o ser detectable clínicamente, debe pasar por una serie de “filtros” biológicos, cuya eficacia depende en gran medida del sistema inmunológico del individuo.

En los párrafos anteriores abundan los condicionales, el efecto final (como la manifestación clínica de un cáncer) ocurrirá:

- **Si** la reparación de las lesiones en el ADN no es exitosa.
- **Si** a pesar de que la reparación falla la célula logra dividirse.
- **Si** las células hijas logran proliferar generando un clon de células mutadas.
- **Si** esas mutaciones pueden iniciar o promover un proceso oncogénico.
- **Si** fallan todos los otros mecanismos con que cuenta el organismo para neutralizar ese proceso oncogénico.

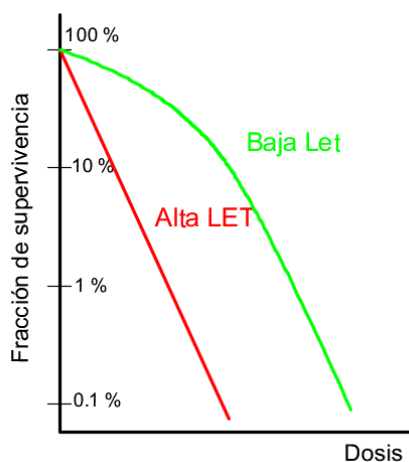
Esta breve enumeración pone de manifiesto la naturaleza estocástica del proceso.

Es evidente además que desde las interacciones iniciales hasta la manifestación clínica de los efectos transcurrirá mucho tiempo, de hecho, pueden pasar años, como se observa en la Figura 1.4.

El valor de dosis que lleva a la muerte celular es función de varios factores como la LET de la radiación, el fraccionamiento, la radiosensibilidad intrínseca del tejido, el ciclo celular y otros factores que afectan la radiosensibilidad, como la concentración de oxígeno.

- LET de la radiación: a mayor LET, más complejas son las lesiones que se producen y menos efectivos son los mecanismos de reparación. Así, una cierta dosis de partículas alfa o neutrones producirán un efecto mayor que la misma dosis de, por ejemplo, rayos x o electrones (Figura 1.2).

Figura 1.2. Efecto de la transferencia lineal de energía sobre la supervivencia celular.

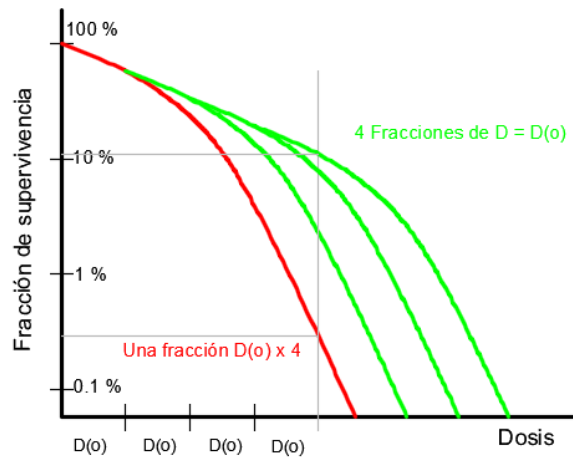


Nota. Curva de supervivencia por irradiación in vitro (fracción única) de una población celular con radiaciones de distinta LET. La LET alta produce una mortalidad mucho mayor que la de baja LET; se observa además que la respuesta es exponencial (lineal en escala semilogarítmica), mientras que en baja LET se observa una fracción de letalidad menor y un comportamiento que responde a un modelo lineal – cuadrático. Fuente: Elaboración propia

- Fraccionamiento: la exposición de una población celular a una cierta dosis de radiación producirá la muerte de un determinado porcentaje de células. Se inicia luego la reparación del daño subletal, que se completa luego de cierto tiempo, diferente para cada tejido.

Si ahora entregamos la misma dosis a las células restantes nuevamente sobrevivirá el mismo porcentaje que antes. Pero si la segunda dosis se entrega antes de que se complete la reparación del daño subletal, la letalidad será mayor (o lo que es lo mismo: la fracción de supervivencia S será menor). Por tanto, la letalidad será inversamente proporcional al fraccionamiento: una dosis única producirá más daño que la misma dosis en forma fraccionada. (Figura 1.3).

Figura 1.3. Efecto del fraccionamiento sobre la supervivencia celular.



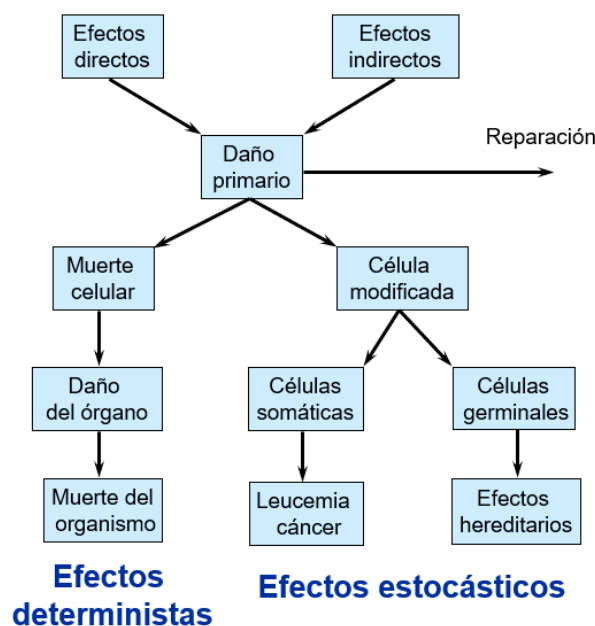
Nota. Curva de supervivencia por irradiación *in vitro* de una población celular. Se observa que la fracción de letalidad es mucho menor si la misma dosis se entrega en cuatro fracciones (suficientemente espaciadas como para permitir cierto grado de reparación del daño subletal) en función del tipo de tejido y la LET de la radiación. Fuente: Elaboración propia.

- Radiosensibilidad: en términos muy generales, un tejido será más susceptible a sufrir un daño cuando las células que lo forman sean indiferenciadas y con alta actividad mitótica. Cuanto más se duplique un tejido mayor serán los momentos en los que es susceptible de sufrir un daño. Cuanto más específicas sean las células tanto menor será la capacidad de duplicarse y por lo tanto serán más radioresistente. Esto fue planteado a principios del Siglo XX por Bergonieu y Tribondeau. Así tenemos tejidos altamente sensibles, como médula ósea, bazo, timo, nodos linfáticos, gónadas, lente cristalino, linfocitos; de sensibilidad media como piel y órganos del mesodermo (hígado, corazón, pulmones) y de baja sensibilidad (músculo, hueso, sistema nervioso).
- Momento del ciclo celular: Las células pasan su vida funcional en un estado denominado G_0 . Cuando abandonan este estado es para duplicarse (mitosis) o para morir apoptosis (muerte celular programada). Una célula en mitosis está en plena duplicación de su material genético, por lo que ese momento es el de mayor susceptibilidad al daño, es decir, es el momento en el que se encuentra más radiosensible. El oxígeno (O_2) tiene un importante efecto potenciador sobre la acción biológica de las radiaciones ionizantes, en particular con radiaciones de bajo LET. El efecto oxígeno se cuantifica mediante un coeficiente no dimensional denominado *Oxygen Enhancement Ratio* (OER). Es decir que el

oxígeno opera como un radiosensibilizador. En anoxia, con radiación de bajo LET es necesario multiplicar la dosis (D) por un factor 2,5-3 para obtener el mismo efecto que en condiciones de normoxia. Esto es útil en irradiaciones programadas como es el caso de la radioterapia, pero no es útil en la exposición ocupacional. Sin embargo, se sigue trabajando en el desarrollo de radioprotectores que, entre otros usos, podrían utilizarse en largos viajes espaciales, donde los astronautas se exponen a altas dosis de radiación durante tiempos prolongados.

Lo descrito hasta aquí se puede sintetizar en la Figura 1.4:

Figura 1.4. Esquema de la génesis de los efectos estocásticos y determinísticos.



Fuente: IAEA (2017).

Efectos deterministas

Los efectos deterministas se producen como consecuencia de la muerte de una gran cantidad de células.

Los mecanismos de muerte celular se denominan necrosis y apoptosis¹. La radiación es uno de entre varios agentes que pueden generar estos procesos. En los tejidos formados por células indiferenciadas, los cambios en las células del parénquima² se producen a dosis más bajas que

¹ Necrosis: proceso de muerte como consecuencia de una lesión celular masiva; Apoptosis: muerte celular programada. Involucra complejos mecanismos bioquímicos y consumo de energía.

² Perénquima: es el tejido característico, fundamental o funcional de un órgano; Estroma: es la parte que brinda soporte y sostén; está constituida por el tejido conectivo.

los cambios en las células del estroma. Sin embargo, las células del estroma de los órganos radioresistentes son más sensibles a la radiación que las del parénquima del órgano. Los daños en estos órganos se producen indirectamente a través de la lesión de las células del estroma vascular.

Si la mortalidad no es suficientemente alta no habrá manifestación clínica. Esto significa que existe un **UMBRAL** para que ocurran estos efectos. La probabilidad de que ocurra el efecto es “0” para dosis inferiores al umbral y “1” para valores superiores. El valor de la Dosis Umbral es función de los factores indicados anteriormente: LET, fraccionamiento y radiosensibilidad.

Para dosis superiores al umbral y dentro de ciertos márgenes la gravedad del efecto es proporcional a la dosis. La relación dosis versus gravedad del efecto también está condicionada a los factores indicados. De lo expuesto queda claro que a una cierta causa (la dosis) le corresponderá un efecto (gravedad de la lesión) el que estará determinado unívocamente por la causa, lo que justifica el nombre que les damos a estos efectos. Por otro lado, existirá una dosis que producirá el efecto más grave posible para ese tejido; por encima de esa dosis no es posible producir un efecto más grave (por ejemplo: una vez que el tejido se necrosa, aunque se aumente la dosis, no se puede agravar el efecto; dicho de otra manera: si el tejido “se muere” no estará “más muerto” si aumentamos la dosis).

Estos efectos se producen en los tejidos expuestos, aunque existe evidencia de que los tejidos muy próximos también manifiestan algún tipo de daño.

Respecto de los tiempos de aparición de los síntomas, podemos decir que son **tempranos** aunque hay mucha variabilidad entre diferentes tejidos, principalmente si los efectos iniciales se producen en el parénquima o en el estroma.

En resumen, las características de los Efectos Deterministas son las siguientes:

- No ocurren si la dosis no supera un cierto valor **umbral**
- Superado el umbral, la **gravedad** del efecto es proporcional a la dosis que recibe el tejido expuesto a la radiación, hasta llegar al efecto más grave posible para el tejido expuesto.
- Tanto el valor del umbral como la relación entre la dosis y la gravedad del efecto dependen del tipo de radiación, la sensibilidad del tejido expuesto y el fraccionamiento.
- Son tempranos: ocurren poco tiempo después de recibida la dosis, dependiendo de la respuesta de los tejidos involucrados (algunos de respuesta más temprana que otros).
- Se manifestarán en los tejidos expuestos y obviamente en el cuerpo de la persona expuesta, no son “contagiosos” ni “hereditarios”. En la bibliografía se los clasifica como “Somáticos”.

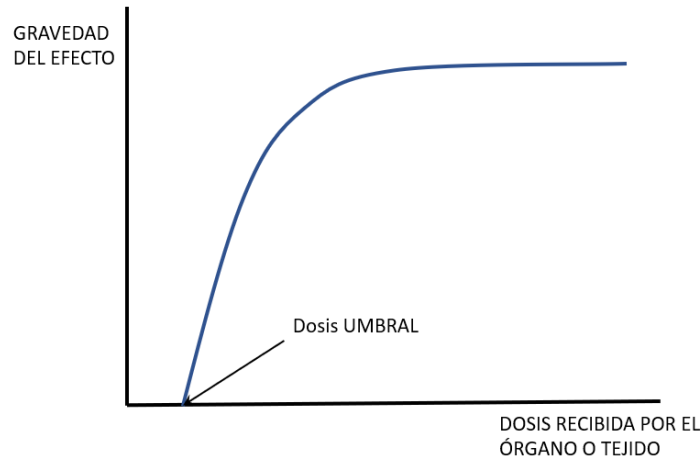
La Figura 1.5 muestra la relación entre la dosis y la gravedad de la lesión para este tipo de efectos. La curva muestra claramente tres zonas: si la dosis es menor a la dosis umbral no se desarrollan efectos; luego el daño guarda una cierta proporcionalidad con la dosis (como se muestra en la Tabla 1.1 para exposición aguda de la piel) y finalmente, cuando la dosis alcanza un valor que produce el máximo daño posible, incrementar la dosis no genera daño adicional.

Tanto el valor de la dosis umbral como las características y gravedad de las lesiones son función de tres factores:

- El tipo de radiación, fundamentalmente la Transferencia Lineal de Energía (LET)

- La respuesta específica de los órganos o tejidos que reciben la dosis (sensibilidad intrínseca)
- El fraccionamiento, es decir: si la dosis se entrega una fracción única -exposición aguda- o en varias, así como el intervalo de tiempo entre las mismas. Principalmente en radiaciones de baja LET la exposición fraccionada genera menos mortalidad celular que la exposición aguda

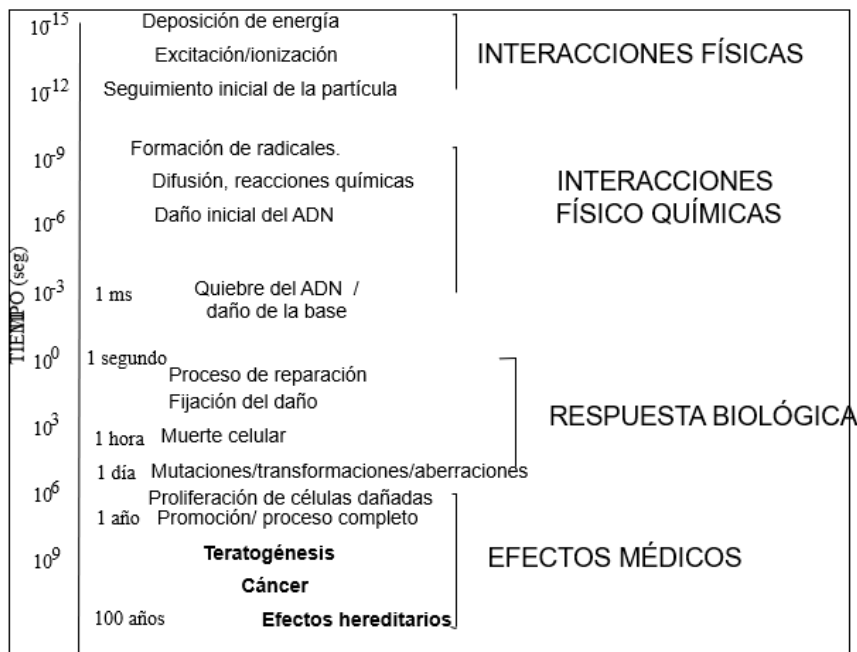
Figura 1.5. Relación Gravedad vs Dosis para Efectos Determinísticos.



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 1.6 se muestran los lapsos de tiempo en los que ocurren los procesos relacionados tanto con los efectos estocásticos como con los determinísticos.

Figura 1.6. Escala de tiempo de los procesos biológicos.



Fuente: IAEA (2010).

Efectos deterministas localizados

Los efectos deterministas se pueden producir como consecuencia de una exposición accidental a la radiación, como resultado de una práctica médica realizada de manera incorrecta o como un costo aceptable para lograr un beneficio mayor, generalmente en un procedimiento terapéutico.

A continuación, se dan ejemplos de algunos de los efectos que por uno u otro motivo pueden ocurrir por el uso de fuentes de radiación.

Piel y tejidos subyacentes

En la Tabla 1.1 se dan valores umbrales para diferentes efectos que se producen por la exposición de la piel con dosis agudas.

Tabla 1.1. Dosis umbrales para efectos por exposición aguda de la piel.

Efecto	Umbral de dosis en la piel (Sv)	Semanas para la aparición
Eritema temprano transitorio	2	<1
Epilación temporaria	3	3
Eritema principal	6	1.5
Epilación permanente	7	3
Descamación seca	10	4
Fibrosis invasiva	10	
Atrofia dérmica	11	>14
Teleangiectasia	12	>52
Descamación húmeda	15	4
Eritema tardío	15	6-10
Necrosis dérmica	18	>10
Ulceración secundaria	20	>6

Fuente: IAEA (2017).

A continuación, a modo de ejemplo se describen algunas lesiones producidas por sobreexposición a la radiación.

Sobreexposición accidental con un equipo de cobaltoterapia

El accidente ocurrió en la unidad de radioterapia Alcyon II del departamento de radioterapia del Hospital San Juan de Dios en San José (Costa Rica). La unidad tiene instalada una fuente de ^{60}Co . El accidente se produjo luego de cambiar la fuente radiactiva de la unidad el 22 de agosto de 1996. Al calibrar la nueva fuente se cometió un error de cálculo en la tasa de la dosis. Después del cambio de la fuente, la unidad volvió a entrar en funcionamiento para el tratamiento de pacientes el 26 de agosto de 1996. Como consecuencia del error de cálculo, se administró a los pacientes una cantidad de radiación muy superior a la prescrita, lo que produjo graves lesiones, algunas con consecuencias mortales: epilación permanente en calota craneana con riesgo elevado de necrosis cerebral tardía, lesiones en la columna vertebral, fibrosis cutánea, atrofia y pigmentación graves sobre el sacro. La piel se resquebraja al menor trauma y no cura con facilidad. (IAEA 1999)

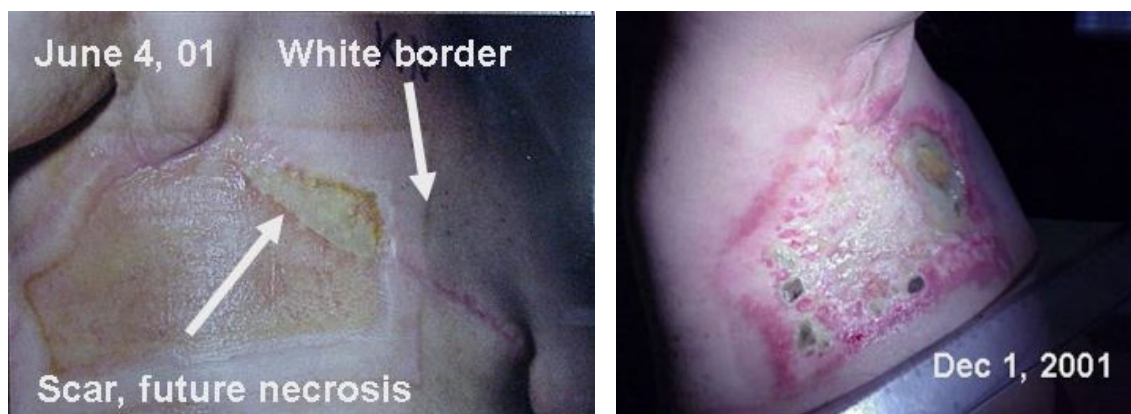
Accidente radiológico en radiografía industrial

El accidente ocurrió el 20 de febrero de 1999 en la central hidroeléctrica Yanango, 300 km al este de Lima, capital de Perú. La fuente radiactiva de 1.37 TBq de ^{192}Ir se desprendió del equipo sin que el radiólogo lo notara y fue levantada por un soldador que desconocía la naturaleza radiactiva del objeto. La persona tuvo contacto durante algunas horas con la fuente. Se produjeron graves lesiones en las manos. Como el trabajador se colocó la fuente en el bolsillo derecho de su pantalón, la lesión en esta pierna comenzó con una ampolla rodeada de un gran halo inflamatorio, proceso que derivó en una úlcera sobreinfectada, lo que varios meses después derivó en la amputación de su pierna derecha y gravísimas lesiones en el periné. (IAEA 2000).

Accidente con un acelerador lineal en Bialistok, Polonia, 2001

El 27 de febrero de 2001 ocurrió una falla en un acelerador lineal en un Centro de Radioterapia de la ciudad de Bialystok, Polonia. La falla se produjo después de un corte repentino de energía generando dosis muy superiores a lo normal. Varios pacientes resultaron sobreexpuestos (Figura 1.7).

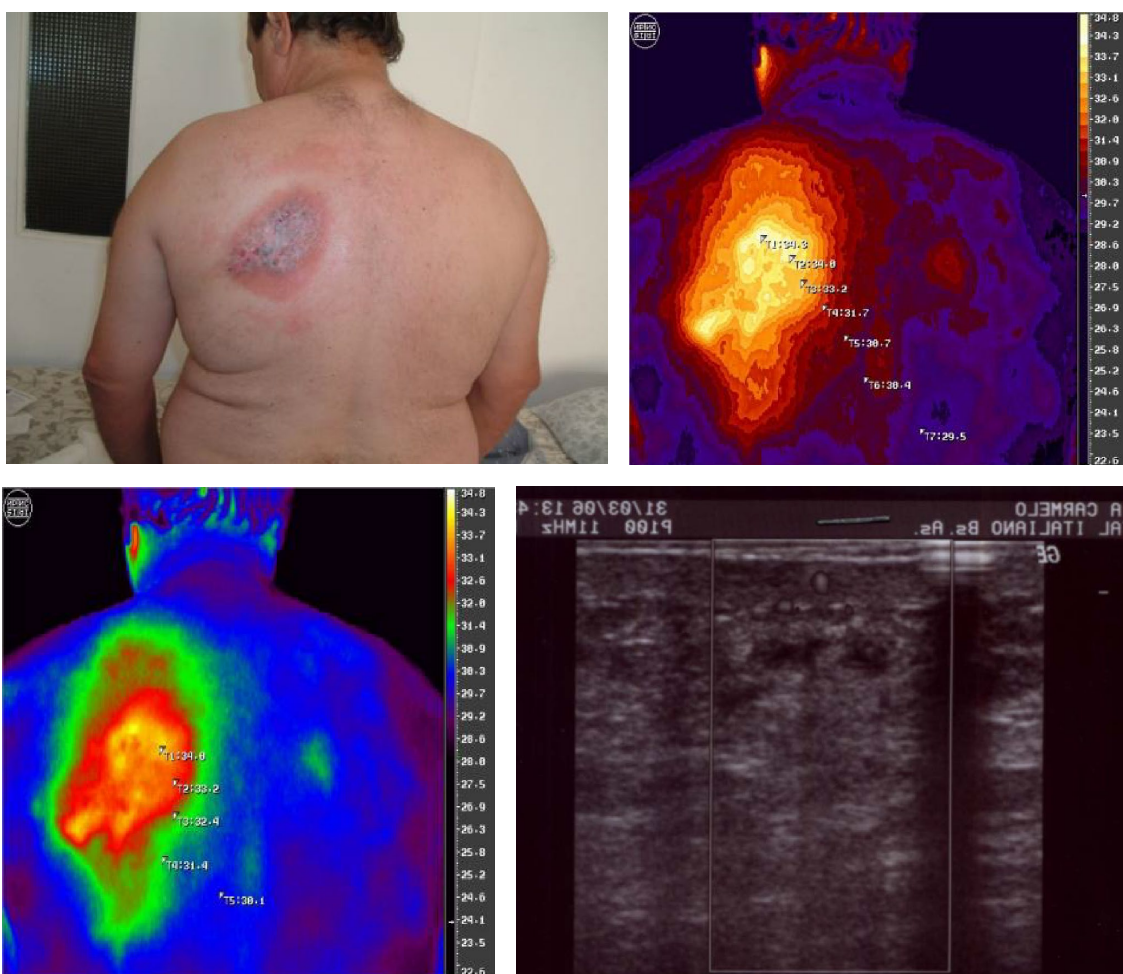
Figura 1.7. Efectos del Accidente Bialistok.



Pacientes sometidos a tratamientos intervencionistas

El uso de imágenes radiológicas en procedimientos intervencionistas sin tomar las medidas apropiadas para la protección del paciente ha generado lesiones en piel y tejidos cicundantes en numerosos pacientes; en la Imagen 2 se describe uno de estos casos. Profundizaremos sobre este tema en el Capítulo 9.

Figura 1.8. Paciente masculino sometido a una angioplastia, con exposición radiológica durante 5 horas (año 2002).



Nota. Lesión necrótica en espalda. Síntoma predominante: dolor. Estudio topográfico de radioquemaduras y estudio de ultrasonido como parte del protocolo del tratamiento de radiolesiones del Hospital de Quemados de la ciudad de Buenos Aires. Aplicación del protocolo de tratamiento Hospital Percy y el Hospital Marie Curie, Paris, Francia, basado en la etiopatogenia y fisiopatología del Síndrome Cutáneo Radioinducido. Fuente: Gentileza de la Dra. Mercedes Portas.

Otros tejidos

Otro órgano relevante en la protección radiológica ocupacional es el ojo, siendo el cristalino la parte más sensible. El umbral de dosis está en el orden de 0.5 Gy aunque hay evidencia de que podría ser menor. El límite de dosis para el cristalino es de 20 mSv/año, lo que ofrece un margen de seguridad adecuado para evitar estos efectos. Hasta el año 2012, este límite era de 150 mSv/año, pero diversos estudios evidenciaron una alta incidencia de cataratas entre médicos, técnicos y auxiliares en prácticas como la radiología intervencionista.

Los efectos sobre otros tejidos u órganos (aparatos respiratorio, digestivo, cardiovascular, neurológico, etc.) están ampliamente estudiados y son relevantes para pacientes sometidos a tratamientos de radioterapia. Los efectos y sus umbrales se describen mayoritariamente para los rangos de dosis y fraccionamientos empleados en éstas prácticas médicas.

Resumen de los efectos determinísticos localizados

En condiciones controladas, los efectos determinísticos localizados son habituales -y hasta cierta medida aceptables- en los pacientes sometidos a tratamientos médicos. En los Capítulos 8 y 11 describiremos los criterios para reducir estos efectos a un nivel razonable sin afectar la calidad de los tratamientos. Esto es competencia de los profesionales médicos y físicos médicos involucrados.

En el caso de los trabajadores expuestos ocupacionalmente, podrían producirse efectos determinísticos en piel y cristalino sólo si no se implementaran las medidas de protección apropiadas.

Además de los efectos secundarios en los tejidos normales de los pacientes y la exposición de la piel y/o cristalino de los trabajadores debido a medidas de protección insuficientes, la producción de efectos determinísticos en pacientes, trabajadores o el público en general sólo se producirá como consecuencia de un accidente o un acto malévolo.

Síndrome de irradiación aguda (SAR)

La exposición de la mayor parte del cuerpo a dosis altas de radiación en un tiempo suficientemente breve produce lo que se denomina Síndrome de Irradiación Aguda (SAR).

Tipos de SAR

Síndrome de la Médula Ósea o Hematopoyético: a partir de una dosis de entre 0.5 y 1 Gy se afecta el funcionamiento de la médula ósea. La médula ósea es un tejido esponjoso que se encuentra en el interior de algunos de los huesos del cuerpo como las crestas ilíacas, el esternón o los huesos del cráneo. Es el lugar donde se produce la sangre (hematopoyesis), porque contiene las células madre que originan los tres tipos de células sanguíneas, que son los leucocitos, hematíes y plaquetas. La exposición a la radiación afectará la hematopoyesis provocando diversos síntomas, cuya gravedad será proporcional a la dosis.

Determinadas dosis de algunos Gy pueden llevar a la muerte de la persona expuesta. Entre 3 y 4Gy (estos valores varían según los autores) el riesgo de muerte es del 50% dentro de los 30 días posteriores a la exposición. Por eso a esta dosis se la denomina Dosis Letal 50/30 ($DL_{50/30}$). El riesgo de muerte aumenta hasta el 100% con una dosis de 10Gy.

Síndrome Gastrointestinal: con dosis superiores a alrededor de 10Gy se ve afectado el tracto gastrointestinal lo que, sumado a los efectos descritos anteriormente, hace no sólo

que la probabilidad de supervivencia sea nula, sino que el tiempo de sobrevida se reduce drásticamente. La mortalidad en estos casos está dada por la asociación entre la grave insuficiencia hematopoyética y lesiones en otros órganos, tales como el tracto gastrointestinal y los pulmones.

Síndrome del Sistema Nervioso: Con dosis aún mayores (50Gy aprox) se agregan a todo lo anterior los efectos en el sistema nervioso, con lo que el tiempo de sobrevida es aún menor.

Con dosis altas también se afecta el sistema cardiovascular y respiratorio. La $DL_{50/30}$ por neumonitis actínica es de 8 a 10 Gy, aunque la exposición sea localizada en los pulmones y no se vea afectado el sistema hematopoyético.

Tabla 1.2. Resumen del SAR.

RESUMEN SÍNDROME AGUDO DE RADIACIÓN			
Dosis absorbida (Gy)	Terapia	Prognosis	Letalidad
1-10	Transfusión sintomática de Leucocitos y plaquetas Transplante de médula ósea Factores estimuladores del crecimiento	De excelente a incierto	0-90%
10-50	Paliativo	Muy pobre	90-100%
>50	Sintomático	Sin esperanza	100%

Fuente: IAEA (2017).

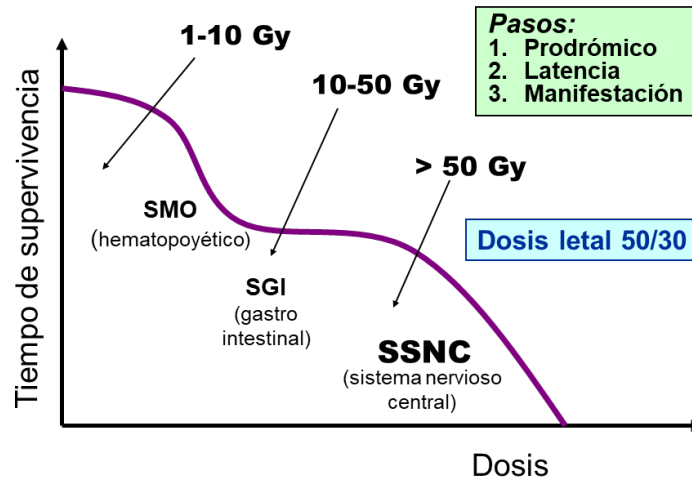
Etapas del SAR

Independientemente del tipo de síndrome, las etapas del SAR son las siguientes

- Etapa prodrómica: etapa temprana, no letal. Dura desde algunas horas hasta algunos días y suele manifestarse con diarrea, náuseas, vómitos, anorexia (falta de apetito) y eritema.
- Etapa de latencia: es un período de aparente curación que dura de unas cuantas horas a varias semanas.
- Enfermedad manifiesta o fase aguda
- Recuperación o muerte

La duración de estas etapas es inversamente proporcional a la dosis (Figura 1.9):

Figura 1.9. Tiempos de supervivencia en función de la dosis en SAR.



Fuente: IAEA (2017).

Efectos estocásticos

Los Efectos Estocásticos son los descritos anteriormente como originados por la interacción de la radiación con el ADN, los que inician un largo y complejo proceso que puede concluir en la manifestación clínica de una patología oncológica (cáncer sólido o leucemia). También se incluyen entre los EE a los efectos hereditarios que se podrían originar cuando las células expuestas son células germinales.

Los procesos que se inician inmediatamente luego de la interacción de la radiación están muy bien estudiados por la radiobiología y la biología molecular. Se han desarrollado modelos que utilizan herramientas estadísticas para predecir la probabilidad de que ocurra un determinado efecto:

- **Modelo aditivo:** postula que luego de un cierto *período de latencia*, la radiación induce un número constante de casos adicionales de cáncer por encima de la tasa espontánea.
- **Modelo multiplicativo:** plantea que, pasado el período de latencia, la radiación aumenta de manera multiplicativa la tasa espontánea de cáncer, como si se multiplicara la línea de base por un dado factor.

El modelo aditivo de predicción del riesgo funciona mejor para leucemia y el multiplicativo para cáncer sólido. Sin embargo, el estudio de todo lo que ocurre entre los procesos iniciales y la ocurrencia o no de un cierto efecto está afectado de importantes incertezas.

La probabilidad de ocurrencia de los EE se asume que es directamente proporcional a la dosis, aunque esto es una simplificación.

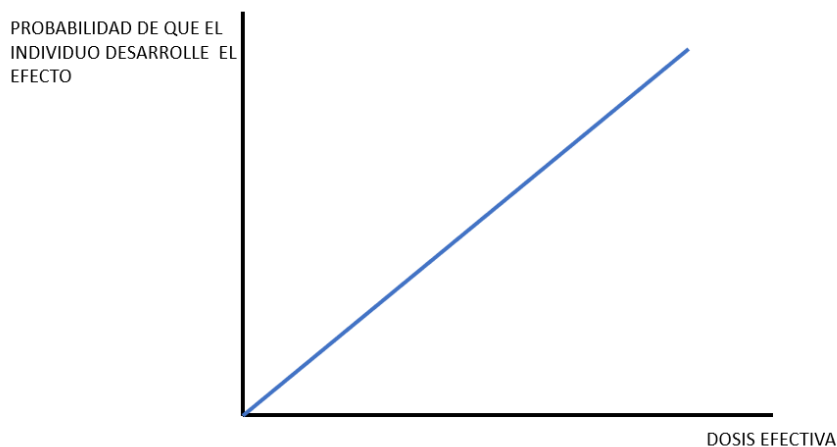
La relación entre dosis y riesgo se basa en los estudios que involucran un gran número de personas expuestas a altas dosis de radiación, siendo el más importante el estudio de cohorte de los sobrevivientes de Hiroshima y Nagasaki y otros como Chernobyl, Río Checa (Rusia) y

Nevada (Estados Unidos), entre varios más. Pero estos estudios están basados en exposiciones de altas dosis en poco tiempo (altas tasas de dosis), mientras que lo que sería útil conocer es lo que sucede con dosis bajas y tasas de dosis bajas por ser esa situación a la que están expuestos habitualmente los trabajadores y el público en general. Esa extrapolación de dosis y tasas de dosis altas a bajas se hizo aceptando suposiciones no suficientemente probadas.

La Figura 1.11 muestra la relación entre la dosis y la probabilidad – riesgo- de que se desarrollen este tipo de efectos. La curva muestra los dos postulados actualmente aceptados para los efectos estocásticos: la relación es lineal y sin umbral. Esta relación es función del tipo de radiación y de la sensibilidad de los órganos, pero **no** del fraccionamiento ya que la inducción de EE depende de que se dé una secuencia de eventos a partir de una interacción (o unas pocas) y no intervienen en este caso mecanismos de reparación del daño subletal, la probabilidad de que ocurran es independiente de la tasa de dosis y se manifiestan tardíamente.

Ambos factores están incluidos en la magnitud “Dosis Efectiva” que se tratará en el Capítulo 2. La unidad de Dosis Efectiva es el Sievert (abreviatura Sv). El gráfico describe la relación entre la Dosis Efectiva y la probabilidad de que el individuo desarrolle un dado efecto; la probabilidad de que ese efecto lleve a la muerte de la persona depende de otros factores, tales como el tipo de cáncer, la agresividad del mismo, la edad a la que se produce la exposición y varios más. Como el efecto final (muerte) es directamente proporcional a la probabilidad de que el individuo desarrolle el efecto el eje de ordenadas bien podría ser la “probabilidad de muerte”.

Figura 1.10. Resumen de los efectos estocásticos.

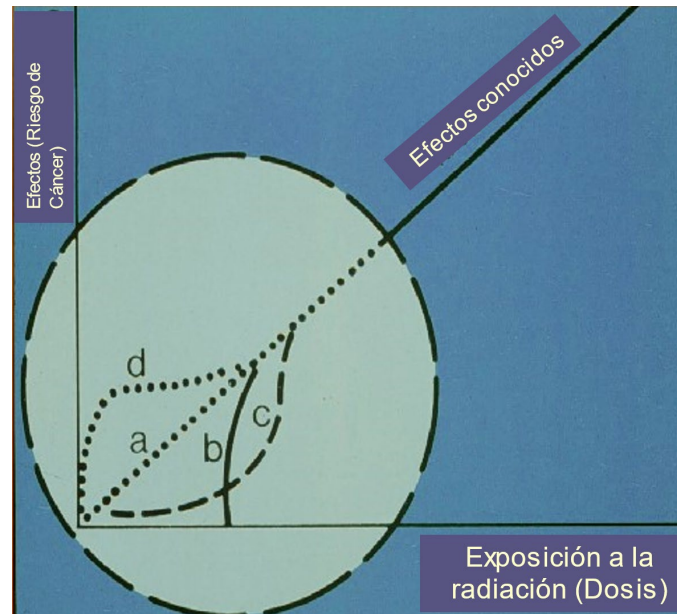


Fuente: elaboración propia.

La pendiente de la curva (riesgo de muerte por cáncer radioinducido por unidad de dosis efectiva) se estableció en $4 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$ que es un promedio para ambos sexos y edades entre 18 y 65 años (el rango de edades de los trabajadores) y de $5 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$ entre 0 y 90 años (rango de edades del público en general). Esta conjetura es válida entre 0 y 100mSv. Aunque no hay certezas respecto de la situación a dosis cercanas a 0: si sigue la misma pendiente, si es mayor para dosis bajas, si es menor o si realmente hay un umbral, actualmente desconocido; e incluso hay quienes postulan que a dosis muy bajas el riesgo es negativo lo que significaría que dosis

bajas de radiación disminuyen el riesgo de cáncer, la (ya desacreditada) teoría de la hormesis (Figura 1.10) Por simplicidad, se acepta la relación lineal sin umbral.

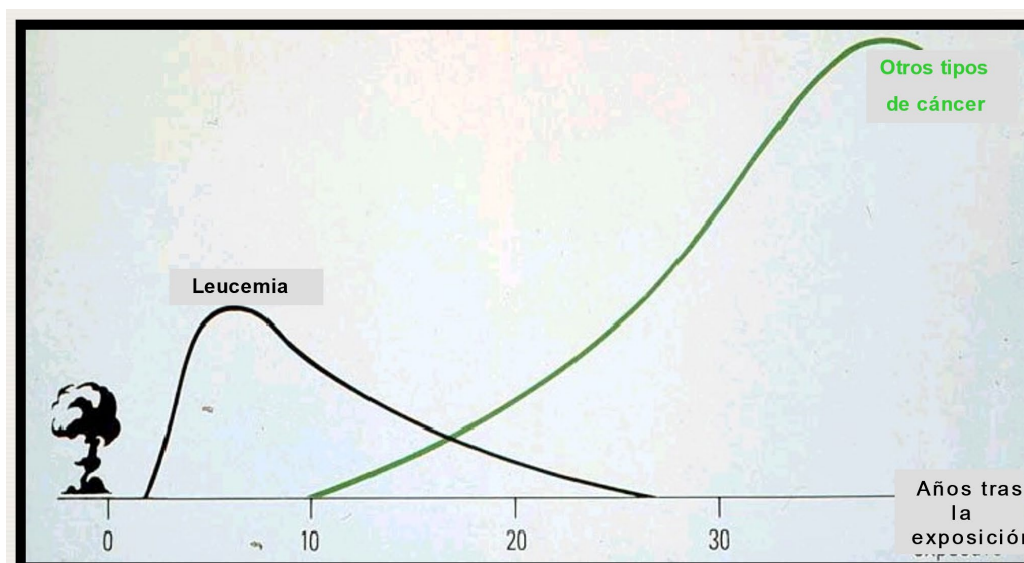
Figura 1.11. Distintas posibilidades para la relación dosis-riesgo en dosis bajas.



Nota. a) Extrapolación Lineal. b) Existe un umbral de dosis. c) El riesgo por unidad de dosis es menor a dosis bajas. d) El riesgo por unidad de dosis es mayor para dosis bajas. Fuente: IAEA (2017)

En los estudios de cohorte de Hiroshima y Nagasaki se advirtió un incremento de la tasa de leucemia atribuible a la radiación a partir de los dos años de la exposición siendo el período de latencia de 10 años para los otros tipos de cáncer (Figura 1.12). Luego del accidente de Chernobyl hay más evidencias de que existe un período de latencia menor para el cáncer de tiroides.

Figura 1.12. Variación de los casos de cáncer y leucemia luego de los bombardeos atómicos sobre Japón en 1945.



Fuente: IAEA (2017).

Un caso especial son los efectos hereditarios: la estimación del riesgo acarrea considerables incertezas y aproximaciones, debido principalmente a la falta de evidencia directa en el hombre, por lo cual los datos en animales, especialmente los estudios en ratón, proveen la base para la estimación del riesgo genético en humanos. Hasta aproximadamente el año 2000 se consideraba que los efectos hereditarios podían manifestarse en cualquier generación posterior a la de la persona expuesta, luego (ICRP, 2007) se consideró que esto se basaba en hipótesis demasiado conservativas, por lo que se redujo a las dos generaciones siguientes y actualmente se está evaluando la conveniencia o no de tenerlos en cuenta.

Consecuencias sobre la exposición ocupacional, médica y del público

El promedio de dosis efectiva anual entre los trabajadores monitoreados que trabajan en radiología diagnóstica se redujo de 1mSv en el período 1975/79 a 0.5 mSv en el período 1990/94; Radioterapia de 2.2mSv a 0.6 mSv y en el promedio de todos los usos médicos de las radiaciones de 0.8mSv a 0.3 mSv entre los mismos períodos. (Ref 6, informe UNSCEAR, 2000). Estos valores no consideran las exposiciones accidentales, pero permiten afirmar que las dosis ocupacionales tienden a ser cada vez menores y, en condiciones normales, el riesgo de efectos estocásticos es apenas superior al fondo natural de radiación (2mS/año en promedio). Además, son muy inferiores a los límites de dosis (20mS/año para la dosis efectiva) que trataremos en el Capítulo 4.

En el caso de la exposición médica de los pacientes, reducir el riesgo de efectos estocásticos -sin afectar la eficacia del tratamiento- es parte del acto médico y responsabilidad de los profesionales intervinientes (médicos, físicos médicos, etc.).

Finalmente, si las prácticas se desarrollan según los criterios y normas aplicables, el incremento del riesgo para los miembros del público (individuos que no son ni trabajadores ni pacientes) es mucho menor que el que genera la inevitable radiación natural –cósmica y terrestre.

Efectos por exposición prenatal

Los efectos prenatales son consecuencia de irradiaciones durante la vida intrauterina. Los sistemas en desarrollo son cualitativamente diferentes de los sistemas “adultos”. En primer lugar son, durante buena parte del desarrollo, sistemas muy indiferenciados, con un índice mitótico alto y una alta capacidad de proliferación. Por lo tanto, en principio estamos en presencia de un sistema muy radiosensible.

Los efectos de la exposición a las radiaciones sobre el embrión o el feto dependen del momento del embarazo (Edad Gestacional) en que ocurre la exposición, así como de la dosis absorbida. Son mayormente de naturaleza determinista.

La descripción de los efectos y los criterios de protección tanto para las pacientes como para las trabajadoras embarazadas se detallan en ICRP (2000).

Falla de implantación: ocurre en la primera semana de edad gestacional y podemos decir que es un evento de “todo o nada”: si no se produce la implantación se interrumpe la gestación; caso contrario continúa sin otros efectos. El umbral es 100 mGy.

Malformaciones: el riesgo de malformaciones existe si la exposición tiene lugar durante el período de organogénesis, entre la 3^a y 8^a semana de edad gestacional. El efecto dependerá de qué tejido u órgano se estaba formando en el momento de la irradiación. El umbral es también 100 mGy

Retraso mental: En el período de 8-25 semanas tras la concepción, el SNC es particularmente sensible a la radiación, dosis fetales en exceso de 100 mGy pueden resultar en alguna reducción del Coeficiente Intelectual (CI).

Carcinogénesis radioinducida: se asume que el embrión o el feto tienen aproximadamente el mismo riesgo de efectos carcinogénicos radioinducidos potenciales que los niños. Dada la naturaleza estocástica de este tipo de efectos son los únicos que deberían ser considerados al someter a una embarazada a un estudio radiológico ya que los mismos entregan dosis muy inferiores a los 100 mGy que es el umbral para los efectos antes mencionados. Por otro lado, la irradiación, previa a la concepción, de las gónadas de cualquiera de los padres no ha mostrado originar un incremento de cáncer o de malformaciones en los hijos. La publicación ICRP (2000) desarrolla en detalle estos conceptos, así como las recomendaciones para la protección de las pacientes y trabajadoras. En tanto que la publicación ICRP (2003) realiza una revisión crítica de la publicación anterior, basada en nuevos datos sobre efectos biológicos y evaluaciones de estudios en animales y seres humanos después de la radiación.

Referencias

- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2007). Efectos biológicos de la radiación. En *Curso de protección radiológica. Nivel técnico*. Buenos Aires: ARN. Copia mimeografiada.
- IAEA (2000). *The radiological accident in Yanango*. Viena: STI/PUB/1101.
- IAEA (2004). Accidental overexposure of radiotherapy patients in Bialystok. Viena: STI/PUB/1180.
- IAEA (2017). *Protección Radiológica en Radiodiagnóstico y en Radiología Intervencionista*. Disponible en <https://www.iaea.org/file/2017/>
- ICRP (2000). Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures. *ICRP Publication 85. Ann. ICRP 30 (2)*
- ICRP (2000). Pregnancy and Medical Radiation. *ICRP Publication 84. Ann. ICRP 30 (1)*.
- ICRP (2003). Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus). *90. Ann. ICRP 33 (1-2)*.
- ICRP (2007). *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación 103. [Traducción oficial al español de la Sociedad Española de Protección Radiológica]

Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (1999). *Sobreexposición accidental de pacientes de radioterapia en San José (Costa Rica)*. Viena: STI/PUB/1027.

UNSCEAR (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. II: Effects. New York, NY: United Nations.

CAPÍTULO 2

Magnitudes y unidades radiológicas

Gustavo Sánchez

Convención sobre términos

Magnitud: Cuando hablamos de Magnitud nos referimos a la **definición** de la misma; por ejemplo, la Dosis Absorbida en un punto es la derivada de la energía absorbida en ese punto. **Símbolo** es la abreviatura de la magnitud, por ejemplo, el símbolo de Dosis Absorbida en un punto es Da.

Unidad: Es la unidad de medida de esta magnitud. Por ejemplo, la unidad de Dosis Absorbida es el Gray, cuya abreviatura es Gy. Las unidades de las magnitudes radiológicas se derivan de las unidades de las magnitudes a partir de las que se definen. Por ejemplo, la unidad de Dosis Absorbida (energía / masa) es Joule (unidad de energía) sobre kilogramo (unidad de masa). La unidad de dosis absorbida Gray equivale a 1 Joule/kg.

“Tasa de” Es la variación de la magnitud por unidad de tiempo. Su símbolo es el mismo de la magnitud con un punto encima del mismo. Por ejemplo la tasa de dosis absorbida se expresa como \dot{D} a y su unidad será “Gray/h” o sea Joule/(kg.hora)

Tabla 2.1. Múltiplos y submúltiplos.

SUBMÚLTIPLOS	Símbolo	Valor
femto	f	10^{-15}
pico	p	10^{-12}
nano	n	10^{-9}
Micro	μ	10^{-6}
Mili	m	10^{-3}
MÚLTIPLOS		
Kilo	K	10^3
Mega	M	10^6
Giga	G	10^9
Tera	T	10^{12}

Fuente: elaboración propia.

Magnitudes específicas para protección radiológica

Magnitudes básicas

Las magnitudes básicas se utilizan para

- estimar los riesgos de efectos estocásticos de los individuos y grupos de individuos expuestos a la radiación,
- a partir de lo anterior, poder establecer medidas de protección radiológica (por ejemplo, establecer Límites de Dosis) (ICRP, 2007),
- predecir la ocurrencia o no de efectos deterministas y su gravedad.

Dosis absorbida en un punto

Energía por unidad de masa absorbida en un punto de cualquier medio material. Se define como el cociente entre $d\varepsilon$ y dm , donde $d\varepsilon$ es la energía impartida media por la radiación ionizante a una masa dm . Símbolo: D_a ; Unidad Gray. $1\text{Gy}=1\text{Joule/kg}$. Es proporcional a la Tasa de Fluencia de energía en ese punto, siendo el factor de proporcionalidad el coeficiente másico de absorción μ_{en}/ρ el que a su vez depende de la energía de la radiación y del número atómico del material (Ejemplos: dosis en un punto de la piel del paciente, dosis a una determinada profundidad de agua,).

Dosis absorbida media en un órgano o tejido

Energía total recibida por un órgano o tejido, promediada en toda la masa de un órgano. A diferencia de D_a , que se define para un punto en cualquier medio material, la Dosis Absorbida Media en un órgano se define para un órgano o tejido. Es el cociente entre ε_T y m_T , donde ε_T es la energía total impartida a un tejido u órgano de masa m_T . Símbolo D_T . Unidad Gray. $1\text{Gy}=1\text{Joule/kg}$. Nótese que la unidad es la misma que para D_a , pero la definición es distinta.

Dosis equivalente en un órgano

Tiene en cuenta la dosis que entrega al órgano o tejido cada tipo de radiación ponderada por un factor que tiene en cuenta la “calidad de la radiación” entendiendo por calidad a la capacidad de producir daño biológico, en particular la capacidad de producir lesiones complejas y por lo tanto difíciles de reparar. El riesgo de que se produzcan efectos estocásticos en un órgano o tejido es proporcional a la Dosis Equivalente en ese órgano o tejido. Se define como $H_T = \sum D_{TR} W_R$, donde D_{TR} es la dosis absorbida media en un órgano o tejido “T” debido a la radiación “R” y W_R es el Factor de Ponderación de la Radiación “R”. Los valores de W_R se muestran en la Tabla 2. Se puede interpretar a W_R como un factor que indica cuánto más “dañina” es un tipo de radiación con respecto a otra que se tome arbitrariamente como referencia, en este caso la radiación fotónica X o γ ; Símbolo H_T . Unidad Sievert $1\text{Sv}=1\text{Joule/kg}$. Nótese que sigue teniendo unidad de energía/masa, pero cambia el nombre.

Dosis efectiva

Es la más abarcativa de la Magnitudes Básicas, ya que tiene en cuenta la Dosis Absorbida, el Tipo de Radiación y la sensibilidad relativa de los órganos o tejidos expuestos. El riesgo de efectos estocásticos para el individuo es proporcional a la Dosis Efectiva. Se define como $E = \sum H_T W_T$, donde H_T es la Dosis Equivalente en cada órgano o tejido expuesto a la radiación y W_T es el denominado “Factor de Ponderación del Tejido”. Está relacionado con la radiosensibilidad de los tejidos: los más radiosensibles tienen W_T más alto y viceversa. Se puede interpretar como la fracción del riesgo total que le corresponde a ese órgano o tejido, ya que $\sum H_T W_T = 1$. Los valores de W_T se muestran en la Tabla 3. Su símbolo es E y su Unidad Sievert $1\text{Sv}=1\text{Joule/kg}$, al igual que la dosis equivalente en un órgano. Pero la Dosis Efectiva expresa el riesgo de efectos estocásticos al que está expuesto EL INDIVIDUO, no ya el riesgo para un órgano determinado.

Tabla 2.2. Factores de Ponderación de la Radiación.

Tipo de radiación	W_R
Fotones	1
Electrones y muones	1
Protones y piones cargados	2
Partículas alfa, Fragmentos de fisión, Iones pesados	20
Neutrones	Entre 2.5 y 20 según la energía

Fuente: elaboración propia basado en ICRP (2007)

Tabla 2.3. Factores de ponderación de los Tejidos (W_T).

Tejido	W_T	$\sum W_T$
Medula ósea, colon, pulmón, estómago, mama, resto de los tejidos (*)	0,12	0,72
Gónadas	0,08	0,08
Vejiga, esófago, hígado, tiroides	0,04	0,16
Superficie del hueso, cerebro, glándulas salivales, piel	0,01	0,04
TOTAL		1

Nota. (*) Resto de los Tejidos: adrenales, región extra torácica (ET), vesícula, corazón, riñones, nódulos linfáticos, músculo, mucosa oral, páncreas, próstata, intestino delgado, bazo, timo, útero/cérvix. Fuente: elaboración propia basado en ICRP (2007)

Nótese que si la exposición a la radiación es uniforme en todo el cuerpo, todos los órganos recibirán la misma HT, por lo que la expresión WT queda $E = HT \sum WT$ ya que HT sale como factor común. Pero como $\sum WT = 1$ resulta que $E = HT$.

Dosis efectiva comprometida

El individuo que incorporó material radiactivo, ya sea por ingestión, inhalación o a través de la piel, seguirá recibiendo dosis después de ocurrido el evento que originó la incorporación. La dosis total integrada a lo largo de un determinado período de tiempo depende de varios factores, como la actividad incorporada, la vida media del nucleido, su forma física, la vía de incorporación, el metabolismo, el comportamiento radioquímico, etc.

Conceptualmente, la Dosis Efectiva Comprometida $E(\tau)$ se define como la Suma de los productos de las dosis equivalentes comprometidas en órganos y tejidos y de los factores de ponderación de tejido correspondientes (W_T): $E(\tau) = \sum H_T(\tau) W_T$ donde τ es el tiempo de integración, en años, después de la incorporación. La Dosis Equivalente Comprometida $H_T(\tau)$ es la integral en el tiempo de la tasa de dosis equivalente en un órgano o tejido particular a consecuencia de la incorporación de material radiactivo en el cuerpo, donde τ es el tiempo de integración expresado en años. El periodo de compromiso se toma como 50 años para adultos y hasta la edad de 70 años para niños.

Como el Riesgo de Efectos Estocásticos por Irradiación es proporcional a la Dosis Efectiva E, para incorporación es proporcional a la Dosis Efectiva Comprometida $E(\tau)$.

Dosis efectiva colectiva

En protección radiológica se deben tomar medidas para limitar los riesgos individuales al que está expuesta cada persona por el hecho de recibir una dosis de radiación. El riesgo individual es proporcional a la Dosis Efectiva E. Pero también algunas decisiones se deben tomar teniendo en cuenta el riesgo colectivo; el riesgo de efectos estocásticos para una población, es decir el número de personas que podrían desarrollarlos, dependerá tanto de las dosis individuales como de la cantidad de individuos expuestos. El riesgo colectivo será proporcional a una magnitud que incluya ambas variables: la Dosis Colectiva.

La dosis efectiva colectiva debida a valores de dosis efectivas individuales entre E_1 y E_2 , debidas a una fuente especificada en un periodo de tiempo ΔT se define como

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

Para aclarar el concepto: asumiendo que el riesgo de muerte atribuible a la radiación para un rango de edades de entre 0 y 65 años es $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ si una persona recibe una dosis de 1 mSv su riesgo individual será $4 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1} \times 1 \times 10^{-3} \text{ Sv} = 4 \times 10^{-5}$ (4 en cien mil). Ahora, si esa misma dosis la reciben 1000 personas, el riesgo de que alguna de esas mil personas muera por cáncer inducido por la radiación es el riesgo individual multiplicado por el número de personas: $4 \times 10^{-5} \times 1 \times 10^3 = 4 \times 10^{-2}$ (o sea: existe una esperanza matemática igual a "1" de que 4 personas de ese grupo mueran de cáncer radioducido, aunque es imposible identificar a esos individuos). En

este ejemplo E_1 y E_2 son iguales (1mSv) por lo que la integral queda la expresión de S queda $S = E \times N$ y el riesgo es directamente proporcional a S .

Las magnitudes básicas son muy importantes, pero tienen un grave problema: **no se pueden medir** (salvo la dosis absorbida en un punto). Sólo se pueden estimar a partir de **magnitudes operacionales**, las que sí se pueden medir.

Magnitudes operacionales

Dosis equivalente individual

(O Dosis Equivalente Personal) es la que se utiliza para vigilancia radiológica ocupacional de la exposición externa (dosimetría personal). Es la que miden los dosímetros personales, que, bien utilizados, permiten ESTIMAR la Dosis Efectiva o la Dosis Equivalente (según corresponda) con una razonable exactitud. A partir de una evaluación periódica, habitualmente mensual, se pueden evaluar las condiciones de trabajo y eventualmente tomar medidas correctivas antes de que la dosis acumulada sea muy alta. Se usa también para evaluar el cumplimiento de los límites y restricciones de dosis, siempre hablando de la exposición a la radiación externa. La dosis equivalente personal, $H_p(d)$ se define en el tejido (blando) ICRU a una profundidad apropiada, d , debajo de un punto especificado en el cuerpo humano. Habitualmente el punto especificado es aquel donde es usado el dosímetro individual. Para la evaluación de la dosis efectiva, se elige $H_p(10)$ a una profundidad $d = 10$ mm. Para la evaluación de la dosis a la piel y a las manos/ pies se usa el equivalente de dosis personal, $H_p(0,07)$, a una profundidad $d = 0,07$ mm. No ha sido definida ninguna magnitud operacional para proveer una evaluación de la dosis equivalente o la dosis efectiva para la dosimetría interna.

Dosis equivalente ambiental $h^*(10)$

Se utiliza para medir la tasa de dosis en los lugares de trabajo y sus alrededores (monitoreo áreas). Permite tomar medidas para reducir la exposición a la radiación externa durante y aun antes de comenzar a trabajar para, por ejemplo, evaluar la eficacia de los blindajes. Por eso decimos que son magnitudes PROSPECTIVAS. Esta dosis se realiza utilizando algún equipo de medición calibrado (Geiger Müller, Cámaras de Ionización, Contadores proporcionales, etc.). Se define como la dosis en un punto de un campo de radiación que se produciría por el correspondiente campo alineado y expandido en la esfera ICRU a una profundidad de 10 mm y sobre el radio opuesto a la dirección del campo alineado. La unidad del equivalente de dosis equivalente ambiental es el J kg⁻¹ y su nombre especial es sievert (Sv).

Otras magnitudes de utilidad en protección radiológica

Exposición: es una magnitud sólo definida para campos de radiación X o γ . El uso de esta magnitud está desaconsejado por el ICRP y el ICRU. La mencionamos porque hay equipos aún en uso calibrados en términos de tasa de exposición.

Kerma: en protección radiológica, principalmente para la protección radiológica del paciente, se emplea para caracterizar la intensidad de un campo de radiación en un punto del espacio. Su definición es muy parecida a la de Dosis Absorbida: *“Es el cociente entre la suma de las energías cinéticas, Etr de todas las partículas cargadas liberadas por las partículas no cargadas en una masa dm de materia y la masa dm de esa materia”*.

Flujo de energía: es el cociente de dR por dt, donde dR es la variación de la energía radiante en un tiempo dt

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt}$$

unidad: J.s-1 = W

En una fuente radiactiva el Flujo de Energía depende de la Actividad de la fuente (desintegraciones por unidad de tiempo) y del espectro de energía de la radiación. Es básicamente la “potencia” de la fuente. En un generador de Rx dependerá de la corriente del tubo, la diferencia de potencial y otros factores que determinarán el espectro de energía del haz.

Tasa de fluencia de energía: es la variación de la energía incidente sobre un elemento diferencial de área por unidad de tiempo. Es directamente proporcional al flujo de energía (la “potencia” de la fuente) e inversamente proporcional, para una emisión isotrópica, de la superficie de una esfera centrada en la fuente. Esta área a su vez es πr^2 , siendo r el radio de la esfera, es decir: la distancia entre la fuente y el punto donde estamos definiendo la tasa de fluencia.

$$= \frac{dR}{dt} \frac{dR}{dA}$$

a unidad es [J·m⁻²·s⁻¹], o W.m⁻²

Coefficiente másico de absorción μ_{en}/ρ : es el factor de proporcionalidad entre la tasa de fluencia en un punto y la energía que será absorbida por un material ubicado en ese punto. Es función del número atómico del material y de la energía de la radiación. Usaremos este coeficiente cuando tratemos la dosimetría de fuentes gamma.

Coefficiente másico de atenuación μ/ρ : es el factor de proporcionalidad entre la tasa de fluencia en un punto y la energía TOTAL que la radiación pierde al interactuar con un material ubicado en ese punto, sumando absorción, dispersión y energía de la radiación de frenado. Es función del número atómico del material y de la energía de la radiación. Volveremos sobre este coeficiente en el Capítulo de Blindajes.

Magnitudes para estimación de dosis al paciente

Son magnitudes que PUEDEN SER MEDIDAS mediante instrumentos o dosímetros colocados sobre el paciente, dentro del equipo (por ejemplo, Arco en C en intervencionismo) o en el ambiente, que permiten estimar la dosis que recibe el paciente. Esto permitirá evaluar si nuestro equipo y/o nuestras técnicas de trabajo son las más apropiadas para cada técnica. El objeto es OPTIMIZAR los valores de dosis y mantenerlos en valores similares a los VALORES DE REFERENCIA (tema que desarrollaremos en el Capítulo 4).

Hay tres formas de medir o estimar la dosis que recibe el paciente:

- Colocando dosímetros directamente sobre el paciente; esto se hace sólo en investigaciones de laboratorio o cuando se calibran dosímetros.
- Mediante medidores, que pueden estar colocados en el propio equipo o ser externos; la dosis que se entrega al paciente se calcula en forma manual o automática a partir de estas mediciones.
- Mediante la medición de parámetros propios de la técnica (kV, mA, tiempo, frames por segundo, distancias, tamaños de campo, etc). En los equipos actuales estos parámetros y las dosis estimadas se registran en formato digital (DICOM) para cada estudio.

Describiremos estos sistemas en el Capítulo 9, dedicado a Radiología.

Referencias

ICRP (2007). *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación 103. [Traducción oficial al español de la Sociedad Española de Protección Radiológica]

CAPÍTULO 3

Instituciones y publicaciones relacionadas con la protección radiológica.

Marco regulatorio argentino

Gustavo Sánchez y Daniel Andisco

La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP)

La protección radiológica no es una ciencia exacta. Está relacionada con la Física y la Biología –que en mayor o menor medida sí lo son- pero también con la Economía, la Teoría de las Decisiones, las ciencias Sociales, las Jurídicas e incluso la Filosofía.

El enfoque del problema sería sencillo si los efectos biológicos fueran de naturaleza exclusivamente determinística: alcanzaría con que ningún individuo exceda las dosis que originan esos efectos, utilizando elementos tecnológicos, procedimientos y cumpliendo con un marco regulatorio muy sencillo. Pero la existencia de efectos sin umbral hizo necesario contar con un marco conceptual mucho más complejo para afrontar los diversos aspectos de esta problemática.

Esta tarea es llevada a cabo por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP por sus siglas en inglés). Fue creada con el nombre de Comité Internacional de Protección de los Rayos X y del Radio, satisfaciendo una decisión del Segundo Congreso Internacional de Radiología en 1928. Una de sus primeras medidas fue limitar la cantidad de horas de trabajo de los radiólogos. Al ponerse en práctica estas recomendaciones se redujeron notablemente la cantidad de lesiones radioinducidas; en términos de dosis esa medida puede interpretarse como un límite anual de 1000 mSv (el valor actual de ese límite es de 20mSv/año!).

En 1950, el Comité Internacional de Protección de los Rayos X y del Radio fue reestructurado y rebautizado con el nombre actual. Desde 1959, la ICRP publica informes periódicos sobre el tema (Annals of ICRP), algunos de carácter general y otros específicos sobre temas concretos.

La ICRP es un organismo no gubernamental. Elabora recomendaciones que no tienen carácter prescriptivo: su redacción abunda en términos tales como “es opinión de esta Comisión...”, “sugerimos que...”; “recomendamos...”, etc. Son recomendaciones que pueden o no adoptarse, lo que en última instancia depende de las personas físicas o jurídicas involucradas. Sin embargo, muchas de estas recomendaciones ya han sido incorporadas en las regulaciones de diversos países, por lo que son mandatorias dentro de su ámbito de aplicación.

Las organizaciones internacionales y las autoridades nacionales responsables de la protección radiológica toman las recomendaciones del ICRP para establecer las normas, regulaciones

y códigos de práctica. Actualmente las regulaciones de la mayoría de los países y los estándares internacionales se basan en estas recomendaciones.

Algunas de las recomendaciones del ICRP son de carácter general – las “Recomendaciones Básicas de la ICRP”- mientras que otras tratan sobre temas particulares. Además de un Comité General, la ICRP tiene Comités dedicados a temas específicos; el Comité 3 es el de Protección Radiológica en Medicina.

Las recomendaciones generales establecen los criterios básicos de la protección radiológica. Estas sugerencias han ido evolucionando en función del conocimiento de los efectos de la radiación, basados principalmente -aunque no exclusivamente- en los informes periódicos del Comité Científico de las Naciones Unidas Sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR, 2008). En muchos casos el nivel de evidencia es insuficiente, lo que provoca que la Protección Radiológica constituya una ciencia con grandes incertezas. Por ejemplo: la relación entre la dosis de radiación que recibe un individuo y el riesgo de que esa dosis induzca un cáncer se basa en observar situaciones de exposición a dosis altas y tasas de dosis altas – principalmente los bombardeos atómicos de Hiroshima y Nagasaki en 1945- Sin embargo, ¿se pueden usar los resultados de esos estudios para estimar el riesgo al que está expuesto un trabajador que, por la naturaleza de su trabajo estará expuesto a DOSIS BAJAS y TASA DE DOSIS BAJAS? El ICRP lo hizo, pero reconociendo importantes incertezas, como veremos más adelante.

Otro motivo para afirmar que la Radioprotección no es una ciencia exacta es la valoración subjetiva de los propios miembros de la Comisión sobre diferentes aspectos. Uno de ellos es el concepto de “detrimento” en el que se pretenden incluir – y cuantificar – los atributos negativos de la exposición a la radiación: riesgo de muerte por cáncer atribuible a la radiación, ponderación de efectos no letales, disminución de la expectativa de vida, incluso algunos sobre los que no existe suficiente evidencia como los efectos hereditarios, etc.

A continuación, se presenta en la Tabla 1 el listado de publicaciones de la ICRP relacionadas con la Protección Radiológica en Medicina y las recomendaciones generales.

Tabla 3.1. *Publicaciones de la ICRP relacionadas con la Protección Radiológica en Medicina y recomendaciones generales (ICRP 60 .1990 e ICRP 103 .2007). Listadas a partir de ICRP 60 (1990)*

Publicación	Título
ICRP Publication 140	Radiological Protection in Therapy with Radiopharmaceuticals
ICRP Publication 139	Occupational Radiological Protection in Interventional Procedures
ICRP Publication 135	Diagnostic Reference Levels in Medical Imaging
ICRP Publication 129	Radiological Protection in Cone Beam Computed Tomography (CBCT)
ICRP Publication 128	Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances
ICRP Publication 127	Radiological Protection in Ion Beam Radiotherapy
ICRP Publication 121	Radiological Protection in Paediatric Diagnostic and Interventional Radiology

ICRP Publication 120	Radiological Protection in Cardiology
ICRP Publication 117	Radiological Protection in Fluoroscopically Guided Procedures outside the Imaging Department
ICRP Publication 113	Education and Training in Radiological Protection for Diagnostic and Interventional Procedures
ICRP Publication 112	Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies
ICRP Publication 106	Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals – Addendum 3 to ICRP Publication 53
ICRP Publication 105	Radiological Protection in Medicine
ICRP Publication 103 (Users Edition)	2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition)
ICRP Publication 103	The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
ICRP Publication 102	Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT)
ICRP Publication 98	Radiation Safety Aspects of Brachytherapy for Prostate Cancer using Permanently Implanted Sources
ICRP Publication 97	Prevention of High-dose-rate Brachytherapy Accidents
ICRP CD3	Database for Dose Coefficients: Doses to Infants from Mothers' Milk
ICRP Publication 95	Doses to Infants from Ingestion of Radionuclides in Mothers' Milk
ICRP Publication 94	Release of Patients after Therapy with Unsealed Radionuclides
ICRP Publication 93	Managing Patient Dose in Digital Radiology
ICRP Publication 90	Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Fetus)
ICRP Supporting Guidance 2	Radiation and your patient – A Guide for Medical Practitioners
ICRP Publication 88	Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother
ICRP Publication 87	Managing Patient Dose in Computed Tomography
ICRP Publication 86	Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy
ICRP Publication 85	Avoidance of Radiation Injuries from Medical Interventional Procedures
ICRP Publication 84	Pregnancy and Medical Radiation
ICRP Publication 75	1997 General Principles for the Radiation Protection of Workers
ICRP Publication 73	Radiological Protection and Safety in Medicine
ICRP Publication 60 (Users Edition)	1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition)
ICRP Publication 60	1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection

Fuente: <https://www.icrp.org/>

La Organización Internacional de Energía Atómica y las normas básicas de seguridad

La Organización Internacional de Energía Atómica (IAEA) es un Organismo intergubernamental independiente dentro de la familia de organismos de Naciones Unidas, que sirve como foco mundial para la cooperación nuclear. Fue creada en 1957 como respuesta a los profundos temores y las expectativas que infundían los descubrimientos y variados usos de la tecnología nuclear.

Entre las actividades que desarrolla la IAEA dentro del marco de su estatuto, se encuentran: Programas de Cooperación Técnica, Investigación, Asistencia legislativa a los Estados Miembros, Programas de salud humana, Auditorías, Misiones de Examen y Servicio de Asesoramiento, Servicios de Laboratorio, Calibración y Verificación dosimétrica, Comparaciones entre laboratorios, Cursos de capacitación y Aprendizaje en línea, entre muchos otros.

Publica Informes Técnicos, de Seguridad, Protocolos, Manuales, Publicaciones educativas. Entre estos documentos se destacan las Normas Básicas Internacionales de Seguridad del OIEA (BSS por sus siglas en inglés) (OIEA, 2016), que enuncian los principios, requisitos y recomendaciones fundamentales para garantizar la seguridad radiológica y nuclear. Son una referencia mundial para la protección de las personas y del medio ambiente. Estas normas se publicaron por primera vez en 1997, se actualizaron en 2012 y se promulgaron en 2014. Las BSS son auspiciadas por otras instituciones como la Organización Mundial de la Salud, la Organización Panamericana de la Salud y la Organización Internacional del Trabajo, por lo que constituyen un documento de referencia. Su aplicación es obligatoria en todas las actividades realizadas por las organizaciones patrocinantes o en donde ellas tengan alguna intervención y los Estados las utilizan como referencia al momento de establecer las regulaciones nacionales. LA 28.a CONFERENCIA SANITARIA PANAMERICANA, celebrada en Washington del 17 al 21 de septiembre de 2012, respalda las nuevas BSS e insta a los Estados Miembros a que se apoyen en las BSS cuando establezcan o actualicen las normativas o los reglamentos nacionales y los criterios de funcionamiento en el ámbito de la seguridad radiológica. Es decir: sirven de fundamento para la elaboración de las regulaciones nacionales, no son las regulaciones en sí.

En la Tabla 3.2, se listan las publicaciones de la IAEA relacionadas con la Protección Radiológica y la Física médica.

Tabla 3.2. *Publicaciones de la IAEA relacionadas con la protección Radiológica y la Física médica.*

Publicación	Título
Safety Reports Series No. 71	Radiation Protection in Paediatric Radiology
Safety Reports Series No. 63	Release of Patients After Radionuclide Therapy
Proceedings Series	Radiation Protection in Medicine: Setting the Scene for the Next Decade Proceedings of an International Conference Held in Bonn, Germany, 3–7 December 2012

Safety Standards Series	Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation
Safety Reports Series No. 101	Medical Management of Radiation Injuries
Safety Reports Series No. 60	Radiation Protection in Newer Medical Imaging Techniques: Cardiac CT
Safety Reports Series No. 61	Radiation Protection in Newer Medical Imaging Techniques: CT Colonography
Specific Safety Guide	Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation
Safety Reports Series No. 58	Radiation Protection in Newer Medical Imaging Techniques: PET/CT
Safety Reports Series No. 39	Applying Radiation Safety Standards in Diagnostic Radiology and Interventional Procedures Using X Rays
Safety Reports Series No. 47	Radiation Protection in the Design of Radiotherapy Facilities
Safety Reports Series No. 38	Applying Radiation Safety Standards in Radiotherapy
Safety Reports Series No. 40	Applying Radiation Safety Standards in Nuclear Medicine
Safety Reports Series No. 17	Lessons Learned from Accidental Exposures in Radiotherapy
Human Health Series N° 17	SPECT/CT Atlas of Quality Control and Image Artefacts
Human Health Series N° 31	Accuracy Requirements and Uncertainties in Radiotherapy
Human Health Series N° 23	Nuclear Cardiology: Guidance on the Implementation of SPECT Myocardial Perfusion Imaging
Human Health Series N° 34	Atlas of Skeletal SPECT/CT Clinical Images
Human Health Series N° 33	Quality Management Audits in Nuclear Medicine Practices
Human Health Series N° 32	Clinical PET/CT Atlas: A Casebook of Imaging in Oncology
Human Health Series N° 25	Roles and Responsibilities, and Education and Training Requirements for Clinically Qualified Medical Physicists
Technical Report Series 483	Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy
Technical Reports Series No. 470	Therapeutic Radionuclide Generators: 90Sr/90Y and 188W/188Re Generators
Technical Reports Series No. 469	Calibration of Reference Dosimeters for External Beam Radiotherapy
Technical Reports Series No. 461	Relative Biological Effectiveness in Ion Beam Therapy
IAEA Safety Standards Series No. SSG-46	Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation
Specific Safety Requirements SSR-6	Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material
General Safety Requirements (GSR)	Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards
Technical Reports Series No. 398	Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water

Fuente: IAEA (s/f)

Otras organizaciones relacionadas

El ya mencionado Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR, *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* en inglés), creado por la Asamblea General de la ONU en 1955, para evaluar las dosis, efectos y riesgos de la radiación a escala mundial, que agrupa a eminentes científicos de 20 países y es uno de los organismos del mundo con mayor autoridad en la materia. No establece, ni siquiera recomienda, normas de seguridad; en cambio, proporciona información relativa a la radiación que permite que organismos como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) y las autoridades nacionales respectivas se encarguen de ello.

La Organización Internacional del Trabajo (OIT), creada en 1919 como parte del Tratado de Versalles que terminó con la Primera Guerra Mundial, siendo la única agencia ‘tripartita’ de la ONU, que reúne a gobiernos, empleadores y trabajadores de 187 Estados miembros a fin de establecer las normas del trabajo, formular políticas y elaborar programas promoviendo el trabajo decente de todos, mujeres y hombres

La Organización Mundial de la Salud (OMS) con Sede en Ginebra, iniciada en 1945 y constituida formalmente en el año 1948, que agrupa a 150 oficinas de país y seis oficinas regionales. Entre sus importantes y muy diversas actividades, colabora con las instancias normativas. Es uno de los promotores de las Normas Básicas Internacionales de Seguridad.

La *International Radiation Protection Association* (IRPA): es una asociación de profesionales de la protección radiológica que se unen a través de sociedades nacionales y regionales. El socio argentino es la SAR (Sociedad Argentina de Radioprotección). Entre las muchas actividades de la SAR, se cuenta la traducción de publicaciones de la IRCP.

El *National Council on Radiation Protection & Measurements* (NCRP) de Estados Unidos tiene publicaciones útiles para la protección radiológica en medicina, que pueden consultarse en NCRP (2004 y 2006).

No podemos dejar de mencionar el importante rol que cumplen Asociaciones Profesionales y educativas, nacionales e internacionales, en la elaboración de guías, protocolos, códigos de práctica, como la *International Organization for Medical Physics* (IOMP), *American Association of Physicists in Medicine* (AAPM), Asociación Española de Física Médica (AEFM), entre otras.

Legislación argentina

La legislación argentina establece que solo se pueden realizar actividades con generadores o fuentes de radiación si se cuenta con una Habilitación de instalaciones, Responsabilidad, Autorización Individual, Licencia o Permiso individual para dicho uso, aplicación o manipulación, otorgado por la Autoridad Reguladora competente según lo establecido por las Leyes.

Existen dos Leyes Nacionales: la conocida como “Ley de Rayos X”, Ley N° 17.557 (1967) y la “Ley de Nacional de Actividad Nuclear” Ley N° 24.804 (1997)) que establecen respectivamente

- que la regulación del uso de equipos y generadores de Rayos X corresponde al Ministerio de Salud de la correspondiente jurisdicción.
- que el uso de equipos y fuentes radiactivas selladas y no selladas sujetas a regulación (en nuestro caso: medicina nuclear y radioterapia) corresponde a la Autoridad Regulatoria Nuclear. Como esta última depende directamente de Presidencia de la Nación, en materia nuclear, es el Estado Nacional quién fija la política y ejerce las funciones de investigación, desarrollo, regulación y fiscalización en todo el país.

En algunos casos de Medicina Nuclear y Radioterapia las Autoridades de Aplicación son ambas y comparten competencias de habilitación, responsabilidad de uso, licencias de operación, permisos individuales. Cálculos de blindajes y memorias de cálculo, y personal técnico profesional habilitado (como por ejemplo en PET CT en MN y Aceleradores lineales de uso médico).

Asimismo, existe la Ley Nacional 24557 (1995) de Riesgos del Trabajo, que crea a la Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT), como Organismo de control, fiscalización y regulación del Sistema de Riesgos del Trabajo y de aplicación de la Ley Nacional N° 19587 (1972) de Seguridad e Higiene.

Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN)

Es una entidad autárquica en jurisdicción de la Presidencia de la Nación, creada en 1997 mediante la Ley Nacional N° 24.804 de la Actividad Nuclear. La ARN es sucesora del Ente Nacional Regulador Nuclear (1994-1997), que a su vez fue continuador de la rama regulatoria de la Comisión Nacional de Energía Atómica (1950-1994).

La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), creada el 31 de mayo de 1950 por el Decreto N° 10936/50, nació con las funciones ejecutivas de coordinar y estimular las investigaciones atómicas y de controlar las actividades atómicas oficiales y privadas que se llevaran a cabo en el país.

Cerca del año 1956 (Decreto N° 22498/56, ratificado por la Ley N° 14467), las funciones de la CNEA se reformularon ligeramente, aclarando sus funciones reguladoras:

- a) promover y realizar estudios y aplicaciones científicas e industriales de transmutaciones y reacciones nucleares;
- b) controlar las aplicaciones científicas e industriales de las transmutaciones y reacciones nucleares, por razones de utilidad pública y prevenir los daños que pudieran ocasionar.

La función reguladora de CNEA era ejercida en aquel entonces por una rama regulatoria bajo la misma administración, que mantuvo los requisitos de independencia desde su inicio, ya que la

rama reguladora de la CNEA recibió la autoridad, competencia funcional, recursos financieros y humanos adecuados para cumplir con las responsabilidades asignadas, separadas de la promoción o utilización de la energía nuclear.

El 30 de agosto de 1994 se creó el Ente Nacional Regulador Nuclear (ENREN), a través del Decreto N° 1540/94 como entidad autárquica en jurisdicción de la Presidencia de la Nación, el cual cumplirá las funciones de fiscalización y de regulación de la actividad nuclear que se encontraban a cargo de la CNEA. En abril de 1997, el Congreso argentino aprobó la Ley Nacional N° 24.804 estableciendo la actual Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN). Las funciones de la autoridad reguladora se fijaron más claramente en los ámbitos de la protección física, las salvaguardias y la no proliferación. El 27 de noviembre de 1998, la Ley N° 24.804 de creación de la ARN quedó reglamentada por el Decreto N° 1390/98.

La ARN dicta normas regulatorias y realiza inspecciones y evaluaciones regulatorias en las instalaciones sujetas a su competencia. Las normas establecen los requisitos para las instalaciones y prácticas, y para el personal que opera las instalaciones o realiza las prácticas mencionadas. Asimismo, tiene la facultad de aplicar sanciones, que deberán graduarse según la gravedad de la falta (apercibimiento, multa que deberá ser aplicada en forma proporcional a la severidad de la infracción y en función de la potencialidad del daño, suspensión de una licencia, permiso o autorización o su revocación).

El cumplimiento de las normas regulatorias complementa a otras regulaciones aplicables, esto es, no las reemplaza. La ARN tiene la facultad (y la obligación) de promover acciones civiles o penales cuando debido a un mal uso de las fuentes de radiación surja la violación de alguna ley o regulación.

La ARN también elabora guías regulatorias complementarias, de carácter orientativo y de referencia, que contienen recomendaciones para cumplir con los requisitos de las normas.

La Norma Básica de Seguridad Radiológica (AR 10.1.1.) detalla los criterios de radioprotección que utiliza de ARN. Esta norma clasifica a las instalaciones y prácticas reguladas en tres tipos.

- Clase I (o Instalaciones Relevantes) como las Centrales Nucleares.
- Clase II, que incluye a la mayoría de las instalaciones médicas como radioterapia, medicina nuclear, radiofarmacia.
- Clase III, instalaciones de muy bajo riesgo, como Radioinmunoanálisis y fuentes para calibración y docencia.

Los requerimientos para que la ARN autorice el funcionamiento de las instalaciones son diferentes para cada una de las Clases. Los requisitos para obtener una licencia o permiso individual se basan en la evaluación de la formación básica, la formación especializada y la formación práctica. Dichos requisitos se detallan en las normas específica correspondientes.

Normas de la ARN relacionadas con las prácticas médicas

- Uso de fuentes selladas en braquiterapia Revisión 0 AR 8.2.1
- Operación de aceleradores lineales de uso médico Revisión 1AR 8.2.2.

- Operación de instalaciones de telecobaltoterapia Revisión 3 . AR 8.2.3.
- Uso de fuentes radiactivas no selladas en instalaciones de medicina nuclear Revisión 1 AR 8.2.4.
- Permisos individuales para el empleo de material radiactivo o radiaciones ionizantes en seres humanos Revisión 2 AR 8.11.1.
- Requisitos mínimos de formación clínica activa para la obtención de permisos individuales con fines médicos Revisión 0 AR 8.11.2.
- Permisos individuales para especialistas y técnicos en física de la radioterapia Revisión 0 AR 8.11.3.
- Norma Básica de Seguridad Radiológica Revisión 4 AR 10.1.1.
- Gestión de residuos radiactivos Revisión 3 . AR 10.12.1
- Norma de seguridad física de fuentes selladas Revisión 0 AR 10.13.2.
- Garantías de no desviación de materiales nucleares y de materiales, instalaciones y equipos de interés nuclear Revisión 0 AR 10.14.1.
- Transporte de materiales radiactivos Revisión 3 AR 10.16.1.

Requisitos y recomendaciones de la ARN para aplicaciones médicas (guías regulatorias)

La ARN también publica documentos llamados “Guías Regulatorias” que, si bien no son de carácter obligatorio, orientan a los usuarios a cumplir con las Normas Regulatorias. Estas guías se actualizan en forma continua (ARN, 2019). A modo de ejemplo:

- Requisitos a cumplir por entidades para utilizar fuentes abiertas en Medicina nuclear en seres humanos
- Requisitos para la memoria de cálculo para un servicio de radioterapia
- Recomendaciones y requisitos mínimos necesarios para la evaluación del blindaje de un servicio de braquiterapia de baja tasa
- Recomendaciones y requisitos mínimos necesarios para la evaluación del blindaje de instalaciones PET
- Requisitos a cumplir por entidades para utilizar fuentes abiertas en PET en seres humanos
- Metodología de evaluación de una memoria de cálculo de un centro PET

Regulación del funcionamiento de equipos de Rx relacionados con las prácticas médicas

El funcionamiento de las instalaciones que utilicen rayos X está regulado por el Ministerio de Salud de cada provincia, específicamente el sector de Radiofísica Sanitaria.

- Las Leyes y Decretos aplicables son:
- Ley N° 17.557. Normas para la instalación y utilización de equipos de rayos X.
- Decreto 6320/1968. Reglamentación de la ley 17557
- Decreto 1648/1970. Condiciones exigidas para el uso de equipos generadores de rayos X.
- Resolución 2680/1968. Normas Básicas de Seguridad Radiosanitaria.
- Resolución 3301/1980. Normas para Asesores en Protección Radiológica y Cálculo de Blindaje.
- Resolución 273/1986. Modificación de la Resolución 2680/98.
- Disposición 30/1991 Modificación Res. 273/86. Dosis máximas permisibles
- Resolución 631/1990 “Normas referentes a la prestación del Servicio de Dosimetría Personal por película para personal ocupacionalmente expuesto a Rayos X”.
- Disposición 560/1991. Condiciones para los estudios mamográficos.
- Disposición (SS) N° 259/1991. Censo Nacional de Equipos Generadores de Radiación X y personas afectadas a su utilización.
- Resolución 427/2001. Unidades móviles con equipamiento radiológico instalado y de traslado de equipamiento radiológico portátil.
- Resolución 610/2004. Norma de Organización y Funcionamiento de Servicios de Diagnóstico y Tratamiento por Imágenes en Establecimientos con Internación.
- Resolución 1722/2015. Clasificación de Infracciones, emergentes de la trasgresión a las Leyes N° 17.132, 17.565, 11.843, 17.557, sus modificatorias, complementarias y reglamentarias.
- Resolución 1184/18 Directrices de organización y funcionamiento de hemodinamia en áreas de diagnóstico y terapéutica endovascular por cateterismo, cirugía endovascular y radiología intervencionista.
- Resolución 3590/21 Estándares de Calidad, Legislación, Protección Radiológica, etc., Anexos I – VI

Superintendencia de Riesgos del Trabajo

La Superintendencia de Riesgos de Trabajo (SRT) es una entidad autárquica en jurisdicción del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social de la Nación, creada por la denominada Ley Sobre Riesgos de Trabajo (Ley N° 24.557, de octubre de 1995). La prevención de los riesgos y la reparación de los daños derivados del trabajo se regirán por esta LRT y sus normas reglamentarias.

Su objetivo primordial es garantizar el efectivo cumplimiento del derecho a la salud y seguridad de la población cuando trabaja.

El Artículo 2 de esta Ley establece que:

Son objetivos de la Ley sobre Riesgos del Trabajo (LRT):

- a) Reducir la siniestralidad laboral a través de la prevención de los riesgos derivados del trabajo;
- b) Reparar los daños derivados de accidentes de trabajo y de enfermedades profesionales, incluyendo la rehabilitación del trabajador damnificado;
- c) Promover la recalificación y la recolocación de los trabajadores damnificados;
- d) Promover la negociación colectiva laboral para la mejora de las medidas de prevención y de las prestaciones reparadoras.

Sus funciones principales emanan de su artículo 36 y son, entre otras:

- Controlar el funcionamiento de las Aseguradoras de Riesgos del Trabajo (ART) y Empleadores Autoasegurados (EA).
- Garantizar que las ART y los EA otorguen las prestaciones médico-asistenciales y dinerarias en caso de accidentes de trabajo o enfermedades profesionales.
- Promover la prevención para conseguir ambientes laborales sanos y seguros.
- Imponer las sanciones previstas en la Ley N° 24.557.
- Mantener el Registro Nacional de Incapacidades Laborales en el cual se registran los datos del damnificado y su empresa, fecha del accidente o enfermedad, prestaciones abonadas, incapacidades reclamadas.
- Elaborar estadísticas sobre accidentabilidad laboral y cobertura del sistema de riesgos del trabajo.
- Supervisar y fiscalizar a las empresas autoaseguradas y su cumplimiento de las normas de Salud y Seguridad en el Trabajo.
- Controlar el cumplimiento de las normas legales vigentes sobre Salud y Seguridad en el Trabajo en los territorios de jurisdicción federal.

Aseguradoras de Riesgos del Trabajo

Las Aseguradoras de Riesgos del Trabajo (ART) son empresas privadas contratadas por los empleadores para asesorarlos en las medidas de prevención y para reparar los daños en casos de accidentes de trabajo o enfermedades profesionales.

Están autorizadas para funcionar por la Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT) y por la Superintendencia de Seguros de la Nación (Ley Z-092). Ambos son organismos que verifican el cumplimiento de los requisitos de solvencia financiera y capacidad de gestión.

Las ART tienen como obligación:

- Brindar todas las prestaciones que fija la ley, tanto preventivas como dinerarias, sociales y de salud.
- Evaluar la verosimilitud de los riesgos que declare el empleador.

- Realizar la evaluación periódica de los riesgos existentes en las empresas afiliadas y su evolución.
- Efectuar los exámenes médicos periódicos para vigilar la salud de los trabajadores expuestos a riesgo.
- Visitar periódicamente a los empleadores para controlar el cumplimiento de las normas de prevención de riesgos del trabajo.
- Promover la prevención, informando a la SRT acerca de los planes y programas exigidos a las empresas.
- Mantener un registro de siniestralidad por establecimiento.
- Informar a los interesados acerca de la composición de la entidad, de sus balances y de su régimen de alícuotas.
- Controlar la ejecución del Plan de Acción de los empleadores y denunciar ante la Superintendencia de Riesgos del Trabajo los incumplimientos.
- Brindar asesoramiento y asistencia técnica a los empleadores y a sus trabajadores en materia de prevención de riesgos del trabajo.
- Denunciar los incumplimientos de los empleadores a la Superintendencia de Riesgos del Trabajo.

Otras normativas, convenios y acuerdos entre partes

Finalmente hay que remarcar que las normas que sugieren los organismos regulatorios internacionales **no tienen aplicación ni reemplazan** a ninguna otra norma o regulación jurídica vigente de un país soberano si no están sancionadas mediante normativa jurídica nacional que las consagre (leyes, decretos, resoluciones, disposiciones del Sistema Jurídico Argentino), como pueden ser -entre otras tantas- las Leyes de Generadores de Rx (17557), Actividad Nuclear (24804), de Higiene y Seguridad (19587), de Riesgos del Trabajo (24557), de Contrato de Trabajo (20744), de Jornada Laboral (11544), de la Seguridad Social, etc., o de Carreras Profesionales, Escalafonarias estatales de cualquier jurisdiccional nacional o provincial en la materia, como así tampoco a ninguna Convención Colectiva de Trabajo (CCT) homologada y vigente. Respecto de estas últimos, hay que tener en claro y recordar que una Convención Colectiva de Trabajo es un acuerdo de partes logrados a través de una instancia paritaria de Negociación Colectiva (Representaciones Sindicales y Cámaras Empresariales) homologada por el Ministerio de Trabajo de la jurisdicción correspondiente a la ejecución, aplicación, universo, actividad, lugar y alcance del acuerdo logrado por la mencionada Convención Colectiva.

Generalmente no hay discrepancias entre Regulaciones, Normas y Convenios. Cuando las hubiera, tiene preponderancia aquella que se encuentre legalmente vigente. Por ejemplo, las Normas Básicas Internacionales (IAEA, Organización Mundial de la Salud, Organización Internacional del Trabajo) establecen que “no deberán otorgarse compensaciones especiales tales

como horario reducido de tareas, licencias adicionales, jubilación anticipada o protección especial por un seguro en reemplazo de las medidas de seguridad apropiadas para las personas que trabajan con radiaciones”. Sin embargo, la CONVENCIÓN COLECTIVA DE TRABAJO N° 108/75 (2019) acordada entre la Federación de Asociaciones de Trabajadores de la Sanidad Argentina (FATSA) y cámaras empresariales de diagnóstico médico (CADIME y CEDIM) homologado por el Ministerio de Producción y Trabajo (2019) establece que:

ARTÍCULO 19: [...] El personal técnico radiólogo y ayudante de radiología de primera categoría que realice: a) toma de radiografías o de revelado dentro del área de influencia de los rayos. B) aplicación de radioterapia superficial y profunda de rayos ‘X’. c) aplicación y/o manipulación de elementos radioactivos, tales como radium, cobalto e isótopos radioactivos, tendrá una jornada de trabajo de cuatro horas diarias y veinticuatro semanales. [...]

ARTÍCULO 28º: LICENCIA POR ÍNDOLE DE LA TAREA: [...] Por la índole de las tareas se acordará la siguiente licencia especial: 1: El personal de radiología y radioterapia a que refiere el artículo 19º (apartado 1) gozará de una licencia especial de quince días cualquiera sea su antigüedad todos los años, que no podrá acumularse a la anual, debiendo mediar entre una y otra, un lapso no inferior a los cinco meses. Mientras el trabajador goza de la licencia especial, no podrá ocuparse en tareas similares. [...]

ARTÍCULO 44º: [...] SUMINISTRO DE LECHE: Será obligatorio por parte de los empleadores el suministro de leche, en cantidad de un litro diario por persona, a aquellos que trabajen en calidad de pintores, pulidores y anexos, personal que éste afectado al trabajo de pintura o soplete, trabajo de caldera, rayos ‘X’, laboratorios de análisis, anatomía patológica y en ambientes donde el medio esté afectado por emanaciones que perjudican la respiración. (Ministerio de Producción y Trabajo, 2019, pp. 5, 7 y 8)

En ese caso, tiene prevalencia EL CONVENIO COLECTIVO por sobre las Normas Internacionales ya que éstas no son de aplicación obligatoria. Algunas Leyes provinciales, como la Ley N° 4.327 de la provincia de Jujuy establecen disposiciones similares.

Estándares de Calidad en Diagnóstico (MSAL)

A fines del año 2021, fue aprobado y promulgado el documento denominado: “Estándares de Calidad Diagnóstico y Tratamiento por Imágenes (DTI)”. Este documento creado por el Ministerio de Salud de la Nación (MSAL), con el aporte de los físicos médicos del Instituto Nacional del Cáncer, surge como idea de poner a disposición criterios para la organización y gestión en Diagnóstico y Tratamiento por Imágenes (DTI), intentando contribuir a la mejora en las condiciones de calidad de la actividad que allí se realicen, incluyendo temas como:

- La seguridad radiológica de todas las personas implicadas en el proceso.

- La bioseguridad de todas las personas que participan en el proceso.
- El acceso, la oportunidad, la eficacia, la eficiencia, la adecuación al paciente y la aceptabilidad en la prestación de los servicios.
- Normalización, protocolización y estandarización de procesos.
- Criterios de diseño y equipamiento.

Intervinieron en la creación de este documento, las siguientes áreas:

- Dirección Nacional de Calidad en Servicios de Salud y Regulación Sanitaria
- Dirección Nacional de Habilitación, Fiscalización y Sanidad de Fronteras / Área Técnica de Radiofísica
- Dirección Nacional de Recursos Físicos
- Instituto Nacional del Cáncer – Área de Calidad y Seguridad

Dentro de los objetivos específicos, se incluye la propuesta de que los centros de DTI:

- Implementen un Sistema de Gestión de la Calidad, con procedimientos e instrucciones claras de trabajo documentadas.
- Trabajen bajo protocolos para la prescripción, realización del estudio e informe médico que utilicen radiación ionizante que aseguren el cumplimiento de los principios de Justificación, Limitación de dosis y Optimización de la práctica.
- Incorporen a los equipos de radiodiagnóstico bajo un programa formal de control de calidad.
- Incorporen Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) a los servicios de radiodiagnóstico para mejorar la seguridad y protección radiológica.

El documento trata sobre aspectos a tenerse en cuenta a la hora de implementar un Sistema de Gestión de la Calidad (gestión de pacientes, turnos, derechos del paciente, consentimiento informado, informes médicos, etc), e incluye además aspectos de bioseguridad de pacientes, familiares, público en general y profesionales de la salud en todos sus aspectos, pero en particular en aquellos relacionados con las radiaciones ionizantes.

Asimismo, se incorpora por primera vez en la Argentina, la figura del Oficial de Protección Radiológica (OPR), profesional responsable de la vigilancia de las dosis que recibe el personal ocupacionalmente expuesto, de las dosis que reciben los pacientes en estudios y tratamientos con radiaciones ionizantes y de la seguridad radiológica del público.

El documento además, promueve la realización periódica de pruebas de control de calidad en todo tipo de equipos que participan en la práctica médica, tanto en aquellos destinados a la generación de Bioimágenes (radiología, mamografía, RMN, CT, angiógrafos, etc), como también en aquellos que intervienen en tratamientos (Medicina Nuclear, Radioterapia).

Instituto Nacional del Cáncer

El Instituto Nacional del Cáncer de la Argentina (INC) es un ente dependiente del Ministerio de Salud de la Nación, autárquico, creado el 9 de septiembre de 2010 por Decreto Presidencial 1286. Es el responsable del desarrollo e implementación de políticas de salud, así como de la coordinación de acciones integradas para la prevención y control del cáncer.

Su principal objetivo es disminuir la incidencia y mortalidad por cáncer en Argentina, a la vez que mejorar la calidad de vida de las personas afectadas.

Entre sus funciones, el INC es el encargado de coordinar acciones de promoción y prevención, detección temprana, tratamiento y rehabilitación, así como también la investigación del cáncer en Argentina y la formación de recursos humanos.

Desde el Área de Gestión de Calidad y Seguridad del Paciente, se desprende la posibilidad de la acreditación de procesos que resultan de alto interés en la lucha contra el cáncer; en efecto, junto al Programa Nacional de Prevención del Cáncer de Mama, se realiza desde hace varios años, la Acreditación de Centros de Mamografía con el fin de distinguir a todas aquellas instituciones y centros que brindan servicios de mamografía y que mantienen un Sistema de Gestión de la Calidad que cumple con la Norma propuesta por el INC. Estas directrices promueven las buenas prácticas en mamografía, la realización de Controles de Calidad en mamógrafos y la evaluación de las dosis que se aplican en las pacientes, fundamentalmente en la realización de estudios de tamizaje, es decir, de estudios en pacientes asintomáticas, destinadas a la detección precoz del cáncer de mama.

Gracias a esta idea, muchos servicios de mamografía han establecido metodologías que permiten la realización de controles de calidad que incluyen el control de las dosis, la justificación de estudios y la optimización, aplicando el principio de ALARA anteriormente visto.

Gracias a este ejemplo, otras entidades como la Sociedad Argentina de Radiología (SAR) y otras asociaciones (como la FAARDIT, por ejemplo), han tomado esta idea de generar hábitos de calidad y seguridad al paciente, en base a la acreditación de centros de diagnóstico por imágenes.

Referencias

- ICRP (2007). *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación 103. [Traducción oficial al español de la Sociedad Española de Protección Radiológica]
- National Committee on Radiation Protection (NCRP). (2004). *Structural shielding design for medical x-ray imaging facilities*. Report No. 147.
- National Committee on Radiation Protection (NCRP). (2006). *Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities*. Report No. 151.
- International Commission on Radiological Protection (ICRP) (Consulta dic 2021) Lista de *Annals of the ICRP*. Disponible en <https://www.icrp.org/page.asp?id=5>

- International Atomic Energy Agency (IAEA) (s/f). Lista de publicaciones de la International Atomic Energy Agency (IAEA). Disponible en <https://www.iaea.org/publications> Fecha de consulta: diciembre de 2021.
- Ley Nacional N° 17.557 (1967). “Disposiciones para la instalacion y utilizacion de equipos específicamente destinados a la generacion de “rayos x” y normas complementarias. *Boletín Nacional* del 5 de diciembre de 1967. Disponible en www.argentina.gob.ar
- Ley Nacional N° 24.557 (1995) “Ley Sobre Riesgos de Trabajo” Disponible en www.argentina.gob.ar
- Ley Nacional N° 24.804 (1997). “Ley Nacional de la Actividad Nuclear” y normas complementarias. *Boletín Nacional* del 25 de abril de 1997. Disponible en www.argentina.gob.ar
- 1) Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2019). *Normas Regulatorias, Guías Regulatorias, y Régimen de Sanciones*. Disponible en
- 2) https://www.argentina.gob.ar/arn/instalaciones_practicas-y-personal-regulado/marco-regulatorio. (Fecha de consulta: diciembre de 2021).
- Ministerio de Salud de la Nación (2021). “Estándares de Calidad en Diagnóstico y Tratamiento por Imágenes”. Resolución 3590/2021. República Argentina.
- Ministerio Nacional de Trabajo (2019). *Convención Colectiva de Trabajo 108/75 entre la Federación de Asociaciones de Trabajadores de la Sanidad Argentina c/ Asociación de Institutos y Organizaciones Médicas sin Internación y Colmegna S. A. C. y F.* Homologado por RESOL-2019-928-APN-SECT#MPYT. (23 de julio de 2019). Disponible en <https://www.trabajo.gba.gov.ar/documentos/convenios/c108-75.pdf>
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (2016). *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad*. Viena: OIEA. Disponible en https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/78828/B131_11-sp.pdf
- UNSCEAR (2008). *Effects of Ionizing Radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations.
- Honorable Congreso de la Nación Argentina. (13 de septiembre de 1995). HCNA Ley 24557 - B.O. 04/10/1995. LEY DE RIESGOS DEL TRABAJO - LRT - REGIMEN LEGAL. B.O. 04/10/95. (InfoLEG, Ed.) CABA, CABA, Argentina: InfoLEG - Información Legislativa y Documental. Recuperado el 04 de abril de 2022, de <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInter/net/anexos/25000-29999/27971/texact.htm>

CAPÍTULO 4

Criterios de protección radiológica

Gustavo Sánchez

Introducción

El objetivo de la protección radiológica es **evitar** los efectos determinísticos y **acotar**, dentro de valores aceptables, la probabilidad de ocurrencia de efectos estocásticos.

Este planteo es claro y sencillo, pero cuando queremos avanzar para llevarlo a la práctica se presentan algunas dificultades, como por ejemplo:

¿Qué criterios utilizamos para determinar si un riesgo es o no “aceptable”? Estos criterios, ¿son universales? es decir: lo que es aceptable o inaceptable en un caso, ¿lo es en todos los casos? ¿O existen matices? ¿Es igualmente aceptable el riesgo al que se expone un paciente expuesto a radiaciones con fines médicos que el que recibe el trabajador que realiza la práctica? ¿Podemos aceptar en ciertas circunstancias –por ejemplo, para paliar las consecuencias de un accidente- riesgos que serían inaceptables en otras –por ejemplo, en la práctica “normal”?

¿Podemos realmente limitar los riesgos derivados de la exposición a la radiación? ¿Sobre qué podemos actuar? Por ejemplo: desde siempre existe radiación de origen natural, ¿podemos hacer algo para reducir los riesgos que ella genera? ¿Cuándo son más eficaces las medidas de protección? ¿Cuándo las aplicamos sobre los individuos, sobre las fuentes o sobre el ambiente?

Si cualquier fuente de radiación genera dosis, y cualquier dosis tiene asociado un riesgo, podríamos concluir que no se deberían utilizar fuentes de radiación en ningún caso. Sin embargo, no utilizarlas también genera riesgos y perjuicios ya que existen usos beneficiosos de las radiaciones, tanto en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades como en la industria; por ejemplo, la integridad de un puente, del casco de un barco o de una aeronave se controlan con técnicas radiográficas (gammagrafía).

Finalmente, y sin pretender agotar los problemas conceptuales a resolver: ¿podemos asegurar que nunca ocurrirá un accidente radiológico? Obviamente la respuesta es no. No podemos asegurarlo, como tampoco podemos evitar los accidentes de tránsito, en el trabajo, etc. Sin embargo, estos riesgos están incorporados a nuestra vida cotidiana y los aceptamos, ¿podemos hacer lo mismo con el riesgo de accidentes radiológicos?

La complejidad de estos problemas hizo necesario generar un marco conceptual que considerara, entre otras, estas cuestiones, para a partir de él tomar medidas concretas en el diseño y operación de instalaciones que emplean fuentes de radiación.

Esta tarea la realiza la Comisión Internacional de Protección Radiológica de la que ya se habló en el capítulo 2. Las organizaciones internacionales y las autoridades nacionales responsables de la protección radiológica, así como los usuarios, han tomado las recomendaciones del ICRP para establecer las normas, regulaciones y códigos de práctica. Actualmente la mayoría de las regulaciones nacionales y los estándares internacionales se basan en estas recomendaciones.

Las recomendaciones de carácter general establecen los criterios básicos de la protección radiológica. Estas sugerencias fueron evolucionando en función del conocimiento de los efectos de la radiación, siendo la principal fuente de información los informes periódicos del Comité Científico de las Naciones Unidas sobre los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR, por sus siglas en inglés); también fueron cambiando conceptos subjetivos como el de “detrimento” en el que se pretenden incluir, y cuantificar, los atributos negativos de la exposición a la radiación: riesgo de muerte por cáncer atribuible a la radiación, ponderación de efectos no letales, disminución de la expectativa de vida, efectos hereditarios, etc.

A continuación, se resume la historia de estas recomendaciones básicas:

- 1928 INTERNATIONAL X RAY AND RADIUM COMMITTEE: Restricción de horas de trabajo equivalente a 1000 mSv/año. EVITAR EFECTOS DETERMINÍSTICOS
- 1951: DMP 3 mSv /semana
- 1954: DMP 50 mSv/año para trabajadores; 5 mSv/año público. CONSIDERA EFECTOS ESTOCÁSTICOS
- 1959: Inicio de Publicaciones periódicas. Recomendaciones básicas.
 - 1959 ICRP #1 “As Low As Practicable”
 - 1964 ICRP #6 “As Low As Readily Achievable (ALARA)” (Nótese cómo fue cambiando el concepto al que alude la letra “R”)
 - 1966 ICRP #9 “As Low As Reasonably Achievable (ALARA)”
 - 1976: ICRP #26 “As Low As Reasonably Achievable (ALARA)” considerando factores económico y sociales
 - 1978: Límite para el Público 1 mSv/año
 - 1991: ICRP #60
 - 2007: ICRP#103 “Las Recomendaciones 2007 de la Comisión Internacional de Protección Radiológica”.

En el presente capítulo desarrollaremos el marco conceptual de la protección radiológica de acuerdo con las recomendaciones del ICRP (2007); sólo se hará referencia a publicaciones anteriores cuando pudiera generarse alguna duda respecto de la aplicación de la normativa vigente.

A continuación, se expone en forma resumida, el Sistema de Protección Radiológica en Seres Humanos del ICRP (2007). Para profundizar sobre el tema deberemos referirnos a dicha publicación y la bibliografía allí citada.

Consideraciones preliminares

El sistema de protección radiológica tiene por objeto establecer las bases para las normas y criterios que sean aplicables. Por lo tanto, si bien los efectos biológicos son independientes de la circunstancia en la que ocurre la exposición, a los fines regulatorios no se sumarán las dosis que un mismo individuo reciba debido a fuentes no reguladas, o a fuentes reguladas en condiciones diferentes a la que se está considerando. Por ejemplo: para cuantificar el riesgo al que está expuesto un trabajador con radiaciones no se tendrá en cuenta la dosis que ese trabajador reciba por la exposición a fuentes naturales, como paciente o por fuentes diferentes a las que utiliza en su trabajo.

Por otro lado, debe hacerse una distinción entre las **consideraciones relativas a la fuente** y las **relativas al individuo**. Aunque dentro de cada categoría los individuos pueden exponerse a varias fuentes, para los propósitos de la protección radiológica, cada fuente, o grupo de fuentes, puede tratarse separadamente. Es entonces necesario considerar la exposición de todos los individuos que podrían estar expuestos a dicha fuente o grupo de fuentes. Este procedimiento se denomina “evaluación relativa a la fuente”:

El término “fuente” se emplea para indicar cualquier entidad física o procedimiento que da lugar a dosis de radiación potencialmente cuantificables en una persona o grupo de personas. Puede consistir en una fuente física (por ejemplo, material radiactivo o un equipo de rayos X), una instalación (como un hospital o una central nuclear), o procedimientos o grupos de fuentes físicas que tienen características similares (por ejemplo, procedimientos de medicina nuclear, radiación ambiental o de fondo). Si desde una instalación se liberan sustancias radiactivas al medio ambiente, la instalación en conjunto puede considerarse como una fuente. (ICRP, 2007, p. 72)

Situaciones en las que se produce la exposición

Exposiciones planificadas

Según la ICRP, las exposiciones planificadas:

Son situaciones que implican la deliberada introducción y operación de fuentes. Las situaciones planificadas pueden conducir tanto a exposiciones que se prevé que habrán de ocurrir (**exposiciones normales**) como a exposiciones que no puede anticiparse que ocurrirán (**exposiciones potenciales**). (ICRP, 2007, p. 91)

Más adelante, agregan:

En las situaciones de exposición planificada, razonablemente se espera que ocurra una exposición de un nivel determinado. Sin embargo, pueden producirse exposiciones superiores como consecuencia de desviaciones de los procedimientos planificados de operación, de accidentes incluyendo la pérdida del control de las fuentes de radiación y de hechos malévolos. Aunque no se pueden predecir en detalle, tanto las desviaciones de los procedimientos planificados de operación como los accidentes, a menudo pueden preverse estimando su probabilidad de ocurrencia. (ICRP, 2007, p. 91)

Además de las exposiciones normales, existen las exposiciones potenciales, que la ICRP define como sigue:

Las exposiciones potenciales deben ser consideradas en la etapa de programación de la introducción de una situación de exposición planificada. Debería reconocerse que la potencialidad de exposición puede conducir a acciones tanto para reducir la probabilidad de incidencia de tales sucesos como para limitar y reducir la exposición (mitigación) si llegara a ocurrir. (ICRP, 2007, p. 91)

Exposiciones de emergencia

Son situaciones que pueden ocurrir durante la operación de una situación planificada, o como consecuencia de un acto malévolo, o cualquier otra situación inesperada, y requieren la adopción de acciones urgentes a fin de evitar o reducir las consecuencias no deseadas.

Exposiciones existentes

Son situaciones de exposición que ya existen cuando debe tomarse una decisión sobre su control, incluyendo las situaciones de exposición prolongadas después de emergencias.

Los principios de protección para situaciones planificadas también se aplican a la exposición ocupacional en relación con situaciones de exposición de emergencia y existentes, aunque con un enfoque diferente.

Las exposiciones médicas de pacientes también son situaciones de exposición planificada, pero debido a sus características especiales tales exposiciones son tratadas separadamente.

Categorías de exposición

Exposición ocupacional

La exposición ocupacional es

(...) toda exposición a radiaciones de los trabajadores ocurrida como resultado de su trabajo. (...) La definición convencional de exposición ocupacional a cualquier agente peligroso incluye todas las exposiciones en el trabajo, sin tener en cuenta su fuente. Sin embargo, debido a la ubicuidad de la radiación, la aplicación directa de esta definición a la radiación significaría que todos los trabajadores deberían estar sujetos a un régimen de protección radiológica (ICRP, 2007, p. 73).

Sería el caso, por ejemplo, de los empleados de una farmacia ubicada dentro de un hospital, adyacente a una sala de rayos X. Estas personas deben considerarse “miembros del público” y ser protegidos como tales. Por eso es que el término “exposiciones ocupacionales” se limita a las exposiciones a radiación producidas en el trabajo como resultado de situaciones que pueden razonablemente atribuirse a la responsabilidad del nivel gerencial superior de la organización (empleador) bajo cuya responsabilidad se encuentre la “fuente”. (ICRP, 2007, p. 73)

Casos especiales de exposición ocupacional

Sobre la situación de las trabajadoras embarazadas, la ICRP advierte:

En lo relativo a la exposición ocupacional no existe razón alguna para distinguir entre los dos sexos. Sin embargo, si una trabajadora ha declarado (es decir, ha notificado a su empleador) que está embarazada, deben realizarse controles adicionales para proteger al embrión o feto. Se acepta que los métodos de protección para mujeres embarazadas en el trabajo deberían proporcionar una protección al embrión/feto semejante a la que se proporciona a los miembros del público. Dicha política estará apropiadamente implementada si la madre ha estado expuesta a radiación de conformidad con el sistema de protección apropiado antes de su declaración de gravidez. Una vez que el empleador ha sido notificado de un embarazo, debería considerar una protección adicional al embrión/feto. Las condiciones de trabajo de una trabajadora encinta, después de la declaración de embarazo, deberían ser las adecuadas para garantizar que la dosis suplementaria al embrión/feto no exceda alrededor de 1 mSv durante el resto de la gestación. (ICRP, 2007, p. 74)

Más adelante, añade:

La restricción de dosis al embrión/feto no significa que es necesario que las mujeres grávidas se abstengan completamente de trabajar con radiación o materiales radiactivos, o que se deba impedir que entren o trabajen en zonas clasificadas radiológicamente. Significa, sin embargo, que el empleador debería revisar cuidadosamente las condiciones de exposición de las mujeres embarazadas. En particular, si es necesario, deben cambiarse sus condiciones de trabajo de modo que, durante la gestación, la probabilidad de dosis e incorporación de radionucleidos accidental sea extremadamente baja. (ICRP, 2007, p. 74)

Finalmente, dan las siguientes especificaciones respecto de las trabajadoras embarazadas y las que están en período de lactancia:

En las Publicaciones 84 y 88 (ICRP, 2000a, 2001a) se proveen recomendaciones específicas sobre el control de la exposición de las trabajadoras embarazadas. En la Publicación 95 (ICRP, 2004c), la Comisión también ha publicado información que permite el cálculo de dosis en los hijos como consecuencia de incorporaciones por parte de madres que los amamantan.

Las mujeres que han comunicado que están embarazadas o están amamantando no deberían estar involucradas en operaciones de emergencia que impliquen dosis de radiación altas (ICRP, 2005a).

En la Publicación 88 (ICRP, 2001a), la Comisión proporcionó coeficientes para el cálculo de dosis en el embrión, feto, y el niño recién nacido, debidas a la incorporación de radionucleidos por parte de la madre antes o durante la gestación (ICRP, 2007, p. 74)

Si bien no está relacionado con la exposición en medicina, es interesante mencionar otro caso especial como es el de las tripulaciones de líneas aéreas: la operación de aeronaves a reacción comerciales y en los vuelos espaciales es parte de la exposición ocupacional; en este caso las únicas medidas reguladoras prácticas consisten en el control de la exposición individual mediante el control de las horas de vuelo y la selección de las rutas. Los casos excepcionales de exposición a rayos cósmicos, como la exposición durante viajes espaciales en los que las dosis pueden ser significativas y puede garantizarse algún tipo de control, deberán ser tratados separadamente teniendo en cuenta las situaciones especiales que pueden dar lugar a ese tipo de exposición.

Exposición del público

Comprende todas las exposiciones que no sean exposiciones ocupacionales ni exposiciones médicas de pacientes. Se produce como resultado de un conjunto de fuentes de radiación. La componente de la exposición del público atribuible a fuentes naturales es de lejos la más grande,

pero como se dijo anteriormente no se debe considerar a efectos de control de las fuentes artificiales de radiación. Las exposiciones del embrión o feto en los casos de trabajadoras embarazadas se consideran y están reglamentadas como exposiciones del público. Según la ICRP:

En general, sobre todo en la exposición del público, cada fuente causará una distribución de dosis sobre muchos individuos; por este motivo se utiliza el concepto de la Persona Representativa para representar a los individuos más expuestos (ICRP, 2006a). Cuando más adelante nos ocupemos de las restricciones de dosis, en el caso de la exposición del público estas se aplicarán a la “Persona Representativa” (ICRP, 2007, p. 90)

Exposición médica

La exposición a la radiación de **pacientes** ocurre en procedimientos diagnósticos, intervencionistas y terapéuticos. Existen varios aspectos de las prácticas radiológicas en medicina que requieren un enfoque de la protección radiológica diferente al que se aplica en otras situaciones de exposición planificada. La exposición es intencional y para el beneficio directo del paciente. Es la única situación en la que una reducción de dosis puede resultar desfavorable. Particularmente en radioterapia, los efectos biológicos de altas dosis de radiación, como por ejemplo la muerte celular, se utilizan en beneficio del paciente para el tratamiento del cáncer y otras enfermedades.

También se incluyen dentro de la exposición médica a las **personas que confortan y cuidan a los pacientes** y a los **voluntarios en investigación**.

Un individuo dado puede exponerse como trabajador, y/o como miembro del público, y/o como paciente, pero las medidas aplicables de protección radiológica serán diferentes en cada caso.

Niveles de protección radiológica

Como asumimos que la relación dosis-probabilidad de efectos estocásticos es lineal, podemos considerar que si no se superan los umbrales para efectos determinísticos cada fuente contribuye a una parte del riesgo al que expone a un individuo dado. Esto nos permite evaluar por un lado el riesgo total al que está expuesto dicho individuo, y por otro, el riesgo que genera una fuente dada sobre él.

Teniendo en cuenta esto, a fin de fijar los niveles de protección radiológica se utilizan dos enfoques: uno relativo a la fuente y otro relativo al individuo a proteger.

En situaciones de exposición planificada, se denomina restricción de dosis a la limitación de las dosis que los individuos puedan recibir provenientes de una fuente. En situaciones de

exposición de emergencia y existente, la restricción relativa a la fuente se denomina “nivel de referencia”.

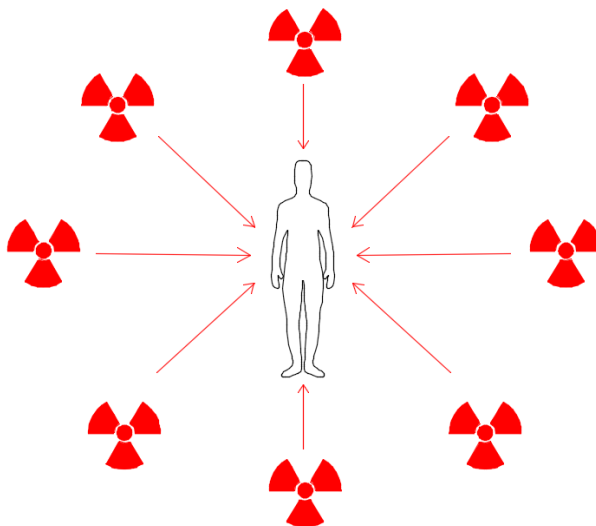
Podría argumentarse que la restricción relativa a la fuente no proveería suficiente protección cuando existen múltiples fuentes. Sin embargo, habrá en general una fuente predominante y la selección del nivel de referencia o restricción apropiado asegura un adecuado nivel de protección.

En el caso específico de situaciones de exposición planificada se requieren restricciones separadas para las sumas de dosis ocupacionales y para las sumas de dosis en el público. Estas restricciones relativas a los individuos se denominan **límites de dosis**.

Como en general no es posible evaluar la exposición total de un individuo debida a todas las fuentes es necesario hacer aproximaciones de la dosis a comparar con el límite cuantitativo, sobre todo en el caso de la exposición del público. Para las exposiciones ocupacionales, es más probable que las aproximaciones sean precisas porque los empleadores tienen acceso a la información necesaria para identificar y controlar las dosis provenientes de todas las fuentes relevantes.

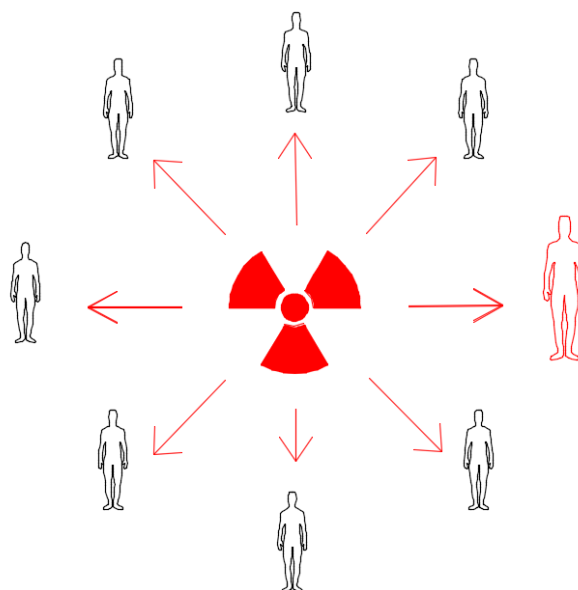
La Imagen 1 ilustra las diferencias de concepto entre el uso de límites de dosis individual en situaciones planificadas y el uso de restricciones o niveles de referencia con fines de protección respecto de una fuente en todas las situaciones.

Figura 4.1. Límites de dosis.



*Nota. La dosis total que recibe un trabajador o la persona representativa de la exposición del público debido a la exposición a fuentes reguladas en condiciones de exposición planificada, no debe superar los **límites de dosis**. Según esta definición, quedan excluidas las exposiciones médicas, las recibidas en situaciones de emergencia y la debida a fuentes naturales. Fuente: ICRP (2007)*

Figura 4.2. Restricciones de dosis.



*Nota. Las **restricciones** se aplican a las dosis que una fuente regulada entrega a un trabajador o a la persona representativa de los miembros del público en condiciones de exposición planificada y son prescriptivos. Los **niveles de referencia**: Se aplican a la dosis que una fuente entrega a un trabajador o a la persona representativa de los miembros del público en condiciones de exposiciones de emergencia o existentes. No son prescriptivos. Los **niveles de referencia para la exposición médica** Tampoco son prescriptivos y se aplican, como indica su nombre a la exposición médica de los pacientes, a la exposición de confortadores o cuidadores y a la exposición de voluntarios en investigaciones médicas. Fuente: ICRP (2007).*

Principios de protección radiológica

Principio de justificación

La ICRP define el principio de justificación como

Cualquier decisión que altere la situación de exposición a radiación debería producir más beneficio que daño. Esto significa que toda decisión en virtud de la cual se introduzca una nueva fuente de radiación, se reduzca una exposición existente, o se reduzca el riesgo potencial de exposición, debería producir suficiente beneficio individual o social como para compensar el detrimento que causa dicha decisión. Se resume en **que el beneficio debe superar al perjuicio**. Este criterio se aplica de forma diferente según el caso (ICRP, 2007, p. 77)

Justificación de las exposiciones planificadas

Cuando se introducen nuevas actividades humanas (“prácticas”) **la protección radiológica se planifica por adelantado** y se pueden tomar las acciones necesarias sobre la fuente. La aplicación del principio de justificación a estas situaciones implica que no debería introducirse

una situación de exposición planificada a menos que produzca el suficiente beneficio neto a los individuos expuestos o a la sociedad para compensar el detrimento radiológico que causa. Puede ser necesario reexaminar si resulta justificable continuar algunos casos particulares de situaciones planificadas a medida que se dispone de nueva información o tecnología.

Los siguientes son ejemplos de exposiciones a la radiación que el ICRP considera explícitamente como injustificadas:

- Aumento de radiactividad en productos tales como comida, bebidas, cosméticos, juguetes, joyas o adornos personales por añadir o activar de forma intencionada de sustancias radiactivas.
- Exámenes radiológicos con propósitos laborales, legales o relacionados con seguros de vida, realizados sin referencia a indicaciones clínicas, a menos que se espere que el examen provea información útil sobre la salud del individuo examinado o se realice en sustento de una investigación criminal importante. Esto significa, casi siempre, que debe llevarse a cabo una evaluación clínica de la imagen obtenida, en caso contrario la exposición no estaría justificada.
- Estudios médicos para cribado (“*screening*”) de grupos de población asintomáticos que impliquen exposición a radiación, a menos que las ventajas esperadas para los individuos examinados o para la población en su conjunto sean suficientes como para compensar los costes económicos y sociales, incluyendo el detrimento de la radiación. Debería tenerse en cuenta el potencial del procedimiento de cribado (*screening*) para detectar una enfermedad, la posibilidad de un tratamiento eficaz de los casos detectados y, para ciertas afecciones, las ventajas para la comunidad del control de la enfermedad.

Justificación en situaciones de emergencia y existentes

En estos casos las exposiciones pueden ser controladas principalmente a través de la modificación de las vías de exposición y no actuando directamente sobre la fuente. La aplicación del principio de justificación consiste en analizar la conveniencia de adoptar una acción para evitar una exposición adicional. Toda decisión tomada para reducir dosis, lo que siempre implica algunas desventajas, debería justificarse en el sentido de que debería producir más beneficio que daño: es mejor tomar las acciones para reducir la dosis que dejar que el proceso ya iniciado siga su curso natural.

Justificación de las exposiciones médicas

La exposición médica de pacientes requiere un enfoque diferente y más detallado del proceso de justificación. El objetivo principal de las exposiciones médicas es beneficiar al paciente, teniendo en debida cuenta el detrimento radiológico asociado a la exposición del personal de radiología y de otros individuos. La Justificación de las exposiciones médicas se aplica en tres niveles:

- a) Nivel general: justificación una determinada práctica, técnica o metodología de diagnóstico o tratamiento (radiología, medicina nuclear, radioterapia, etc). Normalmente no existe un formalismo o procedimiento específico para esto.
- b) Nivel específico orientado a grupos de pacientes: determinados estudios o procedimientos radiológicos tienen utilidad clínica (ya sea obtención de información diagnóstica o beneficio terapéutico) en ciertos casos, pero no en otros, generando en estos un riesgo que no está acompañado de un beneficio para el paciente. Existen recomendaciones para orientar a los médicos prescriptores para correcta indicación de estudios o procedimientos terapéuticos.
- c) Nivel específico orientado a pacientes individuales: la responsabilidad por la justificación del uso de un procedimiento en particular recae en los facultativos médicos pertinentes, quienes necesitan tener conocimientos para juzgar cuáles serán los beneficios y los riesgos que dicho procedimiento le generará al paciente.

Principio de optimización de la protección

Es el proceso relacionado con la fuente que tiene por finalidad mantener “tan bajas como sea razonablemente posible” (As Low As Reasonably Achievable)

- a probabilidad de que ocurran exposiciones (cuando no es seguro que habrán de ocurrir),
- el número de personas expuestas, y
- la magnitud de las dosis individuales, teniendo en cuenta factores económicos y sociales.

Existen diferentes técnicas de ayuda para la toma de decisiones que son aún esenciales para encontrar de manera objetiva una solución óptima en protección radiológica; dichas técnicas incluyen métodos de optimización cuantitativa como los análisis de costo-beneficio. Según la ICRP:

La optimización está siempre orientada a lograr el mejor nivel de protección a través de un proceso iterativo continuo que involucra:

- la evaluación de la situación de exposición, incluyendo toda exposición potencial.
- la selección de un valor apropiado para la restricción o nivel de referencia;
- la identificación de las posibles opciones de protección;
- la selección de la mejor opción en las circunstancias prevalecientes y
- la implementación de la opción seleccionada (ICRP, 2007, p. 79)

Luego, agregan:

La optimización de la protección es un proceso iterativo orientado a prevenir o reducir exposiciones en el futuro. Tiene en cuenta tanto la evolución técnica como la socioeconómica, y requiere estimaciones cualitativas y cuantitativas. La optimización es una actitud mental, siempre cuestionando si se ha hecho lo

mejor en las circunstancias prevalecientes y si se ha hecho todo lo razonable para reducir las dosis. (ICRP, 2007, p. 80)

La optimización de la protección no es la minimización de dosis. Se suele considerar al criterio ALARA (reducción de las dosis tanto como sea razonable) como sinónimo de Optimización, lo que es un error. La mejor opción no es necesariamente aquella que da lugar a la dosis más baja. Además de la reducción de la magnitud de las exposiciones individuales, también debe considerarse la reducción del número de individuos expuestos. La dosis efectiva colectiva ha sido y continúa siendo un parámetro clave en la optimización de la protección de los trabajadores.

Restricciones de dosis y niveles de referencia³

Los conceptos de restricción de dosis y niveles de referencia se emplean juntamente con la optimización de la protección para restringir las dosis individuales. Es necesario que exista un nivel de dosis individual definido ya sea como restricción de dosis o como nivel de referencia.

La expresión ‘restricción de dosis’ se aplica en situaciones de exposición planificada (con excepción de la exposición médica de pacientes). Según la ICRP, se define como

Una restricción anticipada y relacionada a la fuente en la dosis individual debida a una fuente, que proporciona un nivel básico de protección para los individuos más expuestos a una fuente, y sirve como límite superior de la dosis en la optimización de la protección para esa fuente. (ICRP, 2007, p. 30)

Para las situaciones de **exposición existente y exposición de emergencia** estos niveles de dosis se denominan ‘**niveles de referencia**’. La diferencia en la terminología entre las situaciones de exposición planificada y otras situaciones de exposición (existente y de emergencia) sirve para expresar el hecho de que en las situaciones planificadas, la limitación a las dosis individuales puede aplicarse en la etapa de planificación previendo que las dosis no habrán de exceder la restricción. En las otras situaciones puede existir una gama más amplia de exposiciones, y el proceso de optimización puede aplicarse a dosis individuales cuyos niveles iniciales estén por encima del nivel de referencia. En otras palabras: las restricciones de dosis (para las exposiciones planificadas) y los niveles de referencia (en exposiciones existentes y de emergencia) funcionan como una cota para las opciones de optimización, que se aplica en forma diferente en cada caso.

³ Tomado de ICRP (2007, §5.9).

Se emplean **niveles de referencia para diagnóstico médico** (es decir en situaciones de exposición planificada) para indicar si en condiciones rutinarias, los niveles de dosis en el paciente o actividad administrada en un procedimiento de diagnóstico por imágenes específico, son inusualmente altos o bajos para ese procedimiento. En ese caso, debería emprenderse una revisión local para determinar si se ha optimizado adecuadamente la protección o si es necesaria una acción correctiva.

El valor escogido para una restricción o un nivel de referencia dependerá de las circunstancias de la exposición en consideración. También debe comprenderse que ni las restricciones de dosis y riesgo ni los niveles de referencia representan una demarcación entre ‘seguro’ y ‘peligroso’ o reflejan un cambio abrupto en el riesgo asociado para la salud de los individuos.

Límites de dosis

En situaciones de exposición planificada para fuentes reguladas que no consistan en exposiciones médicas de pacientes, la dosis total de cualquier individuo no debería exceder los límites aplicables. De esto se deduce que los límites individuales de dosis no se aplican a la radiación natural, a las exposiciones médicas ni a las exposiciones en situaciones de emergencia.

Los límites de dosis reglamentarios son decididos por la autoridad reguladora teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales, y se aplican a trabajadores y miembros del público en situaciones de exposición planificada.

Los valores de los límites de dosis se adoptan con el criterio de evitar que ocurran efectos determinísticos y acotar el riesgo de efectos estocásticos a valores “tolerables”. No constituyen umbrales de seguridad, sino que definen un nivel fronterizo entre un detrimento aceptable (para las condiciones indicadas) y una situación intolerable en contexto de exposición normal, habitual y prolongada en el tiempo. Dado que los términos “tolerable” y “aceptable” tienen un componente fuertemente subjetivo, los valores recomendados por la ICRP surgen de la evaluación crítica y el juicio de sus integrantes; sin embargo, han sido volcados sin modificación a las regulaciones nacionales de la mayoría de los países.

Como lo que se busca es limitar el detrimento debido a efectos estocásticos a valores “tolerables”, ya sea para trabajadores o miembros del público, es natural que se expresen en términos de “Dosis Efectiva”. Pero el sólo cumplimiento de los límites de dosis también implica no superar los umbrales para efectos determinísticos, lo cual depende no sólo de la dosis sino de los órganos expuestos y el período de tiempo durante el cual se produce la exposición; en condiciones de exposición localizada en órganos poco susceptibles de inducción de efectos estocásticos (wt bajos) éstos podrían recibir dosis superiores al umbral, sin excederse el límite de dosis efectiva. Por este motivo se hace necesario establecer límites de dosis equivalente en órganos donde podría eventualmente producirse esta situación, a saber, la piel, el cristalino del ojo y las extremidades.

Los límites de dosis recomendados por la ICRP y adoptados por las regulaciones argentinas son:

Para Exposición Ocupacional⁴

- Límite de Dosis Efectiva (**E**): 20 mSv/año (Formalmente el LÍMITE DE DOSIS para exposición ocupacional es “100 mSv/5 años, sin superar 50mSv en un año calendario” Para los trabajadores en medicina esto es irrelevante, ya que los valores habituales están muy por debajo de los 20mSv)
- Límite de dosis Equivalente (**H_T**)
 - Piel y extremidades: 500 mSv/año
 - Cristalino: 20 mSv/año ⁵

Para Exposición del Público

- Límite de Dosis Efectiva (**E**): 1 mSv/año
- Límite de dosis Equivalente (**H_T**)
 - Piel y extremidades: 50 mSv/año
 - Cristalino: 15 mSv/año

Tabla 4.1. Criterios de aplicación de Límites y Restricciones de dosis y Niveles de Referencia.

	Exposición OCUPACIONAL	Exposición del PUBLICO	Exposición MÉDICA
Exposición PLANIFICADA	LÍMITES de dosis RESTRICCIONES de dosis	LÍMITES de dosis RESTRICCIONES de dosis	NIVELES DE REFERENCIA (de la exposición médica)
Exposición de EMERGENCIA	NIVELES DE REFERENCIA	NIVELES DE REFERENCIA	No se aplica
Exposición EXISTENTE	No se aplica	NIVELES DE REFERENCIA	No se aplica

Nota. (ICRP, 2007)

Implementación de las recomendaciones

A continuación, haremos un resumen de las diferentes situaciones que se pueden plantear en las instalaciones médicas. A fin de enfocarnos en la protección radiológica en medicina, excluirémos las situaciones de emergencia que involucren a un gran número de miembros del público y la exposición a fuentes naturales de radiación.

⁴ Valores recogidos de la Tabla 6, en ICRP (2007, p. 86).

⁵ El límite de dosis en cristalino se modificó en base a lo establecido en “Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Standard Series N°. GSR Part 3, 2014”. En Argentina este cambio se hizo efectivo a partir del 29 de abril de 2016, con la publicación en el Boletín Oficial N° 33.368 de la Resolución 230/16 del Directorio de la ARN. En el ICRP 103 (ICRP, 2007) el valor era de 150 mSv/año.

Según la etapa

Durante el diseño de una instalación: al diseñar las medidas de protección de una instalación aún no construida se hacen estimaciones previas de las variables involucradas, sin tener la certeza de cómo esas variables se comportarán en el futuro, y en el caso de variables numéricas los valores que tomarán; algunos ejemplos: carga de trabajo (¿cuántos pacientes se atenderán en un determinado período de tiempo, por ejemplo pacientes/semana? ¿Cuánta dosis de radiación se usará por estudio/tratamiento? ¿Cuánta actividad habrá en un instante dado dentro de un servicio?), probabilidad de ocupación de los locales adyacentes, etc. Si se toman valores muy bajos, lo que generaría un bajo riesgo, los resultados podrían dar una protección insuficiente o no quedaría margen para aumentar, por ejemplo, el número de pacientes que se atiendan semanalmente una vez que el servicio esté operativo. Si, por el contrario, las consideraciones de diseño son demasiado conservativas, el costo de la protección sería innecesariamente elevado, no cumpliéndose el principio de optimización. Existen protocolos de diseño para instalaciones específicas (NCRP, 2004; NCRP, 2006; AAPM TG, 2005; etc.) donde se establecen parámetros específicos, no como valores inamovibles sino como rangos sugeridos, por lo que siempre el diseñador tendrá un margen para aplicar su criterio personal. Es en la etapa de diseño donde se aplican las Restricciones de Dosis, concepto explícitamente definido como prospectivo. Una restricción de dosis como límite superior de las dosis previstas en los análisis de optimización.

Durante la operación: una vez que la instalación está operativa, el objetivo es, tomando como base las consideraciones de diseño, vigilar las condiciones de exposición para detectar desviaciones o nuevas fuentes de riesgo. El circuito consiste en evaluar las condiciones de exposición, compararlas con las de diseño y tomar medidas ya sea para reducir las dosis individuales, el número de individuos expuestos o para reducir el riesgo de exposiciones potenciales, utilizando a tal fin sistemas de seguridad o procedimientos operativos y finalmente evaluar la eficacia de estas medidas. Un ejemplo sería el control de la contaminación en un cuarto caliente donde se trabaja con fuentes abiertas: se definen valores de contaminación por encima de los cuales es necesario descontaminar, se debe contar con el equipamiento adecuado operativo que será utilizado por trabajadores que conozcan el procedimiento de medición y la interpretación de los resultados, si estos resultados ameritan tomar acciones para descontaminar, conocer el procedimiento, contar con los elementos para llevarlo a cabo y finalmente medir nuevamente para determinar si las acciones tomadas fueron eficaces. Las restricciones de dosis pierden entidad en esta etapa: sí es útil establecer criterios de evaluación (que incluyen la vigilancia radiológica individual y de áreas) para la mejora continua de la seguridad e higiene radiológica. La clasificación de áreas (controladas y supervisadas) y la reevaluación periódica de dicha clasificación es una herramienta importante para limitar las dosis colectivas.

En una situación de emergencia: lo más importante para solucionar o paliar las consecuencias de una situación de emergencia es reconocer que tal emergencia existe. Cuando ocurre una situación anormal, esta situación comienza con un evento iniciador y las consecuencias de esta situación serán tanto más graves cuanto más se tarde en detectar el problema. Está documen-

tada una gran cantidad de accidentes radiológicos graves en los que no se reconoció rápidamente el problema. Por lo tanto, es necesario contar con procedimientos y sistemas que permitan reconocer rápidamente que algún parámetro, variable o situación está fuera de lo que consideramos “normal”, y también saber cómo actuar ante una situación anormal y disponer de los elementos necesarios (equipos, herramientas, sistemas de medición, etc). Una cuestión muy importante: la dosis que se recibe en una emergencia NO debe computarse para evaluar el cumplimiento de los límites de dosis, ya que su valor se estableció para limitar el riesgo durante exposiciones planificadas. Como ya se indicó oportunamente, sí se aplican los criterios de Justificación y Optimización como así también se pueden definir niveles de referencia como guía para situaciones específicas.

Según la forma de exposición

Irradiación: las herramientas que se utilizan para reducir las dosis por irradiación son el tiempo de exposición (como tiempo “real” que el individuo está expuesto a la radiación, lo que es diferente al tiempo de trabajo en un servicio donde se emplean radiaciones), la distancia entre la fuente de radiación y la persona o la parte del cuerpo a proteger y el uso de blindajes. La forma de utilizar estas “herramientas” dependerá de cada situación.

Contaminación: una contaminación sólo puede ocurrir cuando se trabaja con fuentes radiactivas abiertas, o con fuentes radiactivas selladas cuyo encapsulado se ha deteriorado como consecuencia de una situación anormal. Las medidas de protección contra la contaminación consisten simplemente en establecer barreras protectoras que separen la fuente del individuo. Estas medidas se pueden aplicar en tres niveles diferentes: sobre la fuente (cápsula, contenedor primario), sobre el ambiente (campanas, filtros en los sistemas de ventilación, cajas de guantes) o sobre el individuo (máscaras, filtros, ropa protectora). La eficacia de estas barreras es tanto menor cuanto más cerca del individuo se aplican. Hay que tener en cuenta tanto la eficacia de cada elemento (por ejemplo, un filtro retiene menos del 100% de las partículas que lo atraviesan), las condiciones de mantenimiento y la duración.

Según las personas a proteger

Trabajadores: la protección de los trabajadores se implementa tanto en la etapa de diseño como durante la operación. Los trabajadores están sujetos a vigilancia radiológica individual y las instalaciones a vigilancia radiológica del lugar de trabajo (monitoreo de áreas). Esto permite una reevaluación continua de la higiene radiológica.

Público: los miembros del público no están sujetos a vigilancia radiológica, por lo que la protección se basa en un correcto diseño a partir de la elección de restricciones adecuadas y la evaluación, en la etapa operativa, de la integridad de los elementos de protección mientras se mantenga el resto de las condiciones de diseño (por ejemplo, la carga de trabajo). El diseño debe asegurar que la “persona representativa” de los miembros del público no supere las restricciones aplicables.

Pacientes, confortadores o participantes en programas de investigación: la exposición médica se tratará por separado en otro capítulo, pero recordamos que se aplican los criterios de justificación (a nivel general y particular), de optimización y niveles de referencia que no son valores restrictivos sino una guía para la optimización; no se aplican los límites de dosis. Cómo aplicar estos conceptos depende fuertemente de la práctica médica particular.

Según la probabilidad de exposición:

Exposiciones planificadas: en las exposiciones planificadas existe un 100% de probabilidad de que una o más personas reciban dosis de radiación. En estas circunstancias las variables a controlar para reducir el riesgo debido a estas exposiciones que con certeza ocurrirán son las dosis individuales y el número de individuos expuestos.

Exposiciones potenciales: en este caso la probabilidad de ocurrencia de dosis es inferior al 100%. Por lo tanto, el riesgo asociado a las exposiciones potenciales será proporcional a dos variables: el riesgo de que ocurra y la dosis (individual y/o colectiva) en caso de esto suceda. Una consideración muy es que las medidas que se tomen tanto para prevenirlas (reducción del riesgo de ocurrencia) como para reducir la dosis una vez ocurrida la situación deben establecerse durante la etapa de diseño de la instalación, y estarán sujetas a evaluación continua para mejorar su eficacia y eficiencia.

Cómo limitar las dosis individuales

Hay dos y solo dos mecanismos por los que la radiación puede exponer a los individuos: externa (irradiación) e interna (incorporación por contaminación).

Irradiación: las herramientas de que disponemos para reducir la dosis por irradiación son

- Limitar el **tiempo** de exposición.
- Aumentar la **distancia** a la fuente.
- Interponer **blindajes** entre las fuentes y las personas a proteger.

Contaminación: las herramientas para limitar la dosis por incorporación consisten en barreras que se interponen entre las fuentes y las personas a proteger. Por una cuestión práctica vamos a clasificar también esas **barreras** en

- Confinamiento de las fuentes dentro de cápsulas o recipientes que impiden su contacto con el ambiente exterior.
- Dispositivos de control ambiental, como por ejemplo campanas de extracción o campanas de flujo laminar, cajas de guantes, sistemas de filtrado, etc.
- Elementos de protección personal (Guantes, máscaras, guardapolvos, cubrezapatos, cofias, etc).

Cada uno de estos temas se desarrollará en los capítulos siguientes.

Qué hacer respecto de las exposiciones potenciales

No es suficiente con tomar medidas para prevenir accidentes, sino que también hay que estar preparados para minimizar las consecuencias en caso de que ocurran. Por eso las medidas a tomar tienen como objetivos:

Prevenir: es decir, tomar las medidas necesarias para evitar que ocurran los accidentes sabiendo que **no es posible una prevención del 100%** Por completas y eficaces que sean las medidas que tomemos no podemos confiar en que sean totalmente efectivas.

Detectar: la mayoría de los accidentes con consecuencias graves, muchas veces mortales, se produjeron porque no se advirtió rápidamente que algo estaba andando mal. En el Gráfico 1 (véase al final del Capítulo) hay un ΔT entre el momento que se inicia el accidente y el momento en que se detecta el problema. Muchas veces se tardó tanto en detectar que algo andaba mal que un problema que se hubiera solucionado en forma relativamente sencilla terminó causando una o más muertes. Por lo tanto, es necesario que ΔT sea lo más bajo

Solucionar: lo que significa tomar las medidas necesarias para minimizar las consecuencias del accidente. El objetivo de máxima es que se restauren las condiciones previas al accidente, lo que no siempre es posible. Aquí hay que hacer una observación importante: mientras que la detección del incidente debe ser lo más temprana posible (ΔT lo más bajo posible) en este caso se debe priorizar tomar las acciones correctas, no necesariamente las más rápidas. Como en una emergencia es difícil actuar racionalmente y pensar con tranquilidad, es necesario que los procedimientos de emergencia se preparen y ensayen previamente, si es necesario realizando simulacros. Estos procedimientos deben tener claramente identificada la siguiente secuencia: **qué** hacer, **quién** debe hacerlo, **cómo** debe hacerlo, **cuándo** debe hacerlo y **con qué** elementos debe hacerlo. Y esos elementos deben estar disponibles y en buen estado **en todo momento**.

Restauración y Evaluación: una vez realizadas las acciones correctivas hay que evaluar las causas del incidente y las acciones correctivas que se hubieran tomado. En base a estos resultados puede ser necesario modificar tanto los procedimientos normales de trabajo como los propios procedimientos de emergencia.

Las acciones para **prevenir** y **detectar** los accidentes, así como las medidas correctivas son de dos tipos.

- a) Procedimientos: son acciones que realizan las personas para obtener un resultado. Puede ser necesario que utilicen equipos o herramientas, por lo que deben estar entrenados para su uso correcto.
- b) Sistemas de seguridad: son elementos de detección, alarma o acción automática. Es necesario verificar periódicamente su funcionamiento y realizar las reparaciones necesarias en caso de falla, además de tener un mantenimiento preventivo.

Cultura de la seguridad

La Cultura de la Seguridad es el conjunto de características y actitudes de las organizaciones y personas que establece, como prioridad absoluta, que las cuestiones relativas a la protección y la seguridad reciban la atención que merecen por su importancia (IRPA, 2014).

Las preocupaciones por la seguridad han vivido diversas fases de desarrollo cronológico en las que cada dimensión se ha ido sumando a las precedentes para mejorar los resultados:

- En primer lugar, están las acciones técnicas: integridad de las instalaciones, redundancias, detectores de deficiencias, automatismos de protección
- Luego está el desarrollo de sistemas de gestión de la seguridad (SGS): formalización del conjunto de los procesos, procedimientos y normas implantados para mejorar la seguridad.
- Por último, y más recientemente, el reconocimiento de la importancia de los factores humanos y organizativos (FHO), es decir, la identificación y toma en consideración de los factores que condicionan una actividad humana eficiente y segura.

La Cultura de la Seguridad (CdS) está más relacionada con los hábitos y actitudes de los individuos y las políticas de las organizaciones que con el conocimiento y la disponibilidad de medios físicos.

Todas las acciones relevantes para la seguridad deben llevarse a cabo correctamente, en forma reflexiva (no “automática” o “por costumbre”) con un cabal conocimiento de las tareas desarrolladas (lo que implica tanto formación como entrenamiento práctico) con espíritu crítico y sentido de responsabilidad. Uno de los errores más graves - y por lo tanto una “falta de CdS”- es considerar que la seguridad es responsabilidad exclusiva o primordial de un grupo en particular (oficiales de protección radiológica, físico médico) cuando en realidad es responsabilidad de todos.

Defensa en profundidad

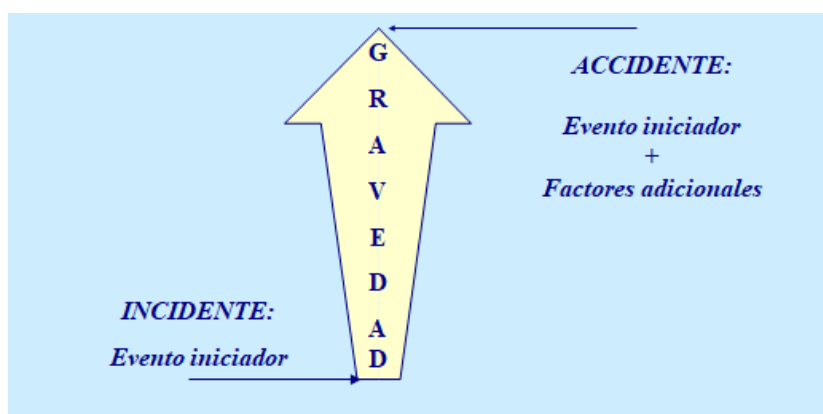
Un concepto asociado al de CdS, de particular relevancia en las aplicaciones médicas, principalmente en radioterapia es el de “Defensa en Profundidad”, término militar en su origen: el enemigo debe incursionar profundamente en nuestro territorio y vencer las sucesivas barreras de contención -trincheras, casamatas, campos minados, etc - para lograr hacernos daño. Este concepto fue introducido en la actividad nuclear siendo fundamental en el diseño de centrales nucleares: se interponen varias “barreras” sucesivas para prevenir la ocurrencia de accidentes y otras diferentes para mitigar las consecuencias para el caso en que, a pesar de las medidas de prevención, los accidentes finalmente ocurran. Cuanto más grave sea un determinado escenario accidental más “barreras” se deben implementar para disminuir la probabilidad de llegar a ese escenario. Los parámetros para cuantificar la gravedad de un accidente son básicamente: a) la gravedad de las consecuencias que sufran las personas involucradas y b) la cantidad de individuos involucrados. En el Capítulo 11, sobre radioterapia, retomaremos este tema.

Resumen

El resumen de lo expuesto en el presente Capítulo se presenta en la Figura 4.4.

- a) En condiciones de **Exposición Planificada** se aplican los criterios básicos de Justificación, Optimización y Limitación de las dosis individuales. Además, se deben seguir procedimientos y utilizar sistemas de seguridad para prevenir la ocurrencia de **Exposiciones Potenciales**, para poder detectarlas rápidamente si estas ocurrieran y poder realizar en forma eficaz y eficiente las acciones correctivas.
- b) Cuando más se tarde en detectar un problema más grave pueden ser las consecuencias. Por lo tanto, debe minimizarse tanto como sea posible el intervalo de tiempo ΔT_1 , desde que ocurre el evento iniciador hasta que el mismo es detectado

Figura 4.3. Factores que determinan la gravedad de un accidente.



Fuente: elaboración propia

- c) Una vez detectada la situación anormal la respuesta debe ser acorde al riesgo que se pretende evitar, minimizando tanto como sea razonablemente posible los riesgos que provocará la propia intervención. (Justificación y Optimización de la intervención). Como se dijo anteriormente en este capítulo, la mayoría de estos procedimientos y los sistemas de seguridad y protección necesarios deberán estar disponibles en todo momento.
- d) Deberán evaluarse las causas y consecuencias de toda situación anormal ocurrida para mejorar las medidas, y de este modo evitar que se repitan así como mejorar los procedimientos y sistemas de seguridad, de acuerdo a las lecciones que surjan del evento.

La Prevención, Detección e Intervención se basan en

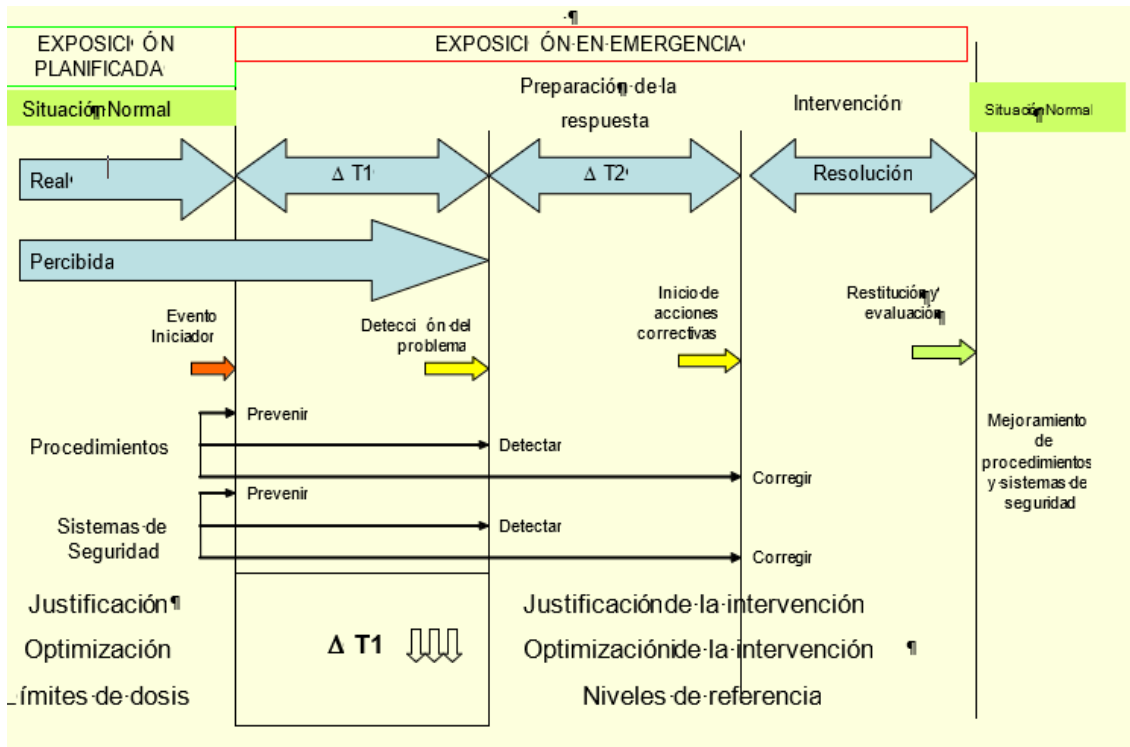
Procedimientos, que deben ser previstos, redactados previamente a la operación como así también ensayados por el personal involucrado. Los procedimientos deben establecer claramente, para una dada situación:

- **Qué** hay que hacer.
- **Quién** debe hacerlo

- **Cómo** debe hacerlo
- **Cuando** debe hacerlo
- **Con qué herramientas** debe hacerlo

Sistemas de seguridad que intervienen automáticamente cuando se detecta que algo falla. (Debe hacer **procedimientos** para evaluar el correcto funcionamiento de los sistemas de seguridad).

Figura 4.4. Resumen de criterios Exposiciones Planificadas y Emergencias.



Fuente: elaboración propia

Referencias

- AAPM (2005). AAPM Task Group 108: PET and PET/CT shielding requirements. *Medical physics*, 33(1), 4-15.
- ICRP (2007). *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, ICRP 103.
- International Radiation Protection Association (IRPA) (2014). *RPA Guiding Principles for Establishing a Radiation Protection Culture*. Disponible en <https://www.irpa.net/>
- National Committee on Radiation Protection (NCRP). (2004). *Structural shielding design for medical x-ray imaging facilities*. Report No. 147.
- National Committee on Radiation Protection (NCRP). (2006). *Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities*. Report No. 151.

CAPÍTULO 5

Dosimetría de la radiación externa e interna

Gustavo Sánchez

Introducción

El objetivo final de la protección radiológica es EVITAR los efectos determinísticos y ACOTAR, dentro de valores aceptables, la probabilidad de ocurrencia de efectos estocásticos.

Para diseñar una instalación o elaborar los procedimientos operativos es necesario hacer el cálculo preliminar de las dosis que generarán las fuentes de radiación involucrada. Más adelante esos cálculos serán corroborados o rectificadas por mediciones.

Esos cálculos pueden ser muy complejos y engorrosos, según el nivel de exactitud requerido y el valor predictivo que pretendemos que tengan. En prácticas médicas donde se requieran cálculos precisos del valor de la dosis y de su distribución en el cuerpo del paciente se deberán emplear modelos matemáticos muy elaborados y programas de cálculo *ad hoc*, como los que se utilizan en radioterapia y dosimetría interna para medicina nuclear.

Para la exposición ocupacional y del público son aceptables cálculos más sencillos, los que desarrollaremos en el presente Capítulo (sobre la base de ARN, 2007), siempre que tengamos presentes ciertas simplificaciones y aproximaciones.

Por ejemplo, en el procedimiento de cálculo de dosis externa por fuentes radiactivas se asume que las fuentes: a) son puntuales; b) son isotrópicas; c) no tienen autoabsorción. También asumimos que las fuentes están en el vacío, ya que no consideraremos la interacción de la radiación con el aire ni con otros elementos como las paredes, el paciente, etc. En los capítulos 9 (Radiología), 10 (Medicina Nuclear) y 11 (Radioterapia) se describirán someramente procedimientos de cálculo particulares que sí tienen en cuenta algunos de estos factores.

El cálculo de la distribución de dosis en el organismo debido a la incorporación de material radiactivo involucra una gran cantidad de variables que hacen imposible un cálculo aproximado, como sí era el caso en exposición externa. En el presente capítulo describiremos someramente los procesos involucrados que nos permitirán calcular la Dosis Efectiva Comprometida a partir de la actividad incorporada, la vía de incorporación y otros factores. Luego definiremos magnitudes de utilidad práctica en protección radiológica de fuentes internas para la exposición ocupacional y del público.

Las definiciones de las magnitudes y sus unidades se basan en ICRU 33 (1980) e ICRU 39 (1985)

Dosimetría de la exposición externa

A continuación, deduciremos la expresión para calcular la dosis generada por una fuente radiactiva emisora de radiación gamma de actividad “A” en un punto ubicado a una distancia “d” de dicha fuente.

Para Rayos X el concepto es el mismo, pero hay más variables. Ampliaremos esto al final del capítulo.

Luego describiremos la metodología para estimar la dosis por radiación externa a partir de magnitudes operacionales.

Cálculo de la tasa de dosis absorbida en punto

Flujo de energía

Es el cociente de dR por dt, donde dR es la variación de la energía radiante en un tiempo t

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt}$$

unidad: J.s-1 = W

En una fuente radiactiva el Flujo de Energía depende de la Actividad de la fuente (desintegraciones por unidad de tiempo) y del espectro de energía de la radiación. Es básicamente la “potencia” de la fuente. En un generador de Rx dependerá de la corriente del tubo, la diferencia de potencial y otros factores que determinarán el espectro de energía del haz.

Sea una fuente radiactiva de Actividad A expresada en Becquerel (Bq) o Curies (Ci), siendo

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración /1segundo}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Para el interés de este Capítulo consideraremos sólo la radiación γ , descartando otras (α , β , etc). La energía de los fotones γ emitidos es propia de cada radionucleido. Por ejemplo, cada vez que se desintegra un átomo de ^{60}Co (Cobalto 60) emite DOS fotones, uno de 1.17 MeV (Mega electrón volt ⁶) y otro de 1.33 MeV, o sea que por cada desintegración el núcleo emite una energía de 2.5 MeV.

⁶ 1 electrón Volt es la energía que toma un electrón cuando es acelerado por un potencial de 1 Volt. Equivale a 1.60218e-19 Joules. Un MeV es entonces 1.60218e-13 Joules.

Una fuente de 500MBq (13.5mCi) de ^{60}Co emite una energía por unidad de tiempo (potencia) de

$$W = A \cdot \varepsilon$$

Donde

- W: energía emitida por unidad de tiempo (potencia) en eV/s
- A: Actividad de la fuente en Bq
- ε : energía emitida en cada desintegración(eV/des)

$$W = 500 \cdot 10^6 \text{ desintegraciones/segundo} \cdot 2.5 \cdot 10^6 \text{ eV/desintegración} \\ = 1.25 \cdot 10^{15} \text{ eV/segundo} = 0.2 \text{ mW}$$

Calculemos la potencia que emite una fuente de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ de la misma actividad (Actividad usual en un Centellograma Óseo con $^{99\text{m}}\text{Tc}$). Este nucleido emite radiación γ de 140keV en el 90% de las desintegraciones, el 10% restante son partículas β . Ahora

$$W = A \cdot \varepsilon \cdot p$$

Donde p es la probabilidad de que la desintegración se produzca emitiendo un fotón γ de energía ε , en este caso $p = 0.9$

$$W = 500 \cdot 10^6 \text{ des/segundo} \cdot 0.14 \cdot 10^6 \text{ eV/des} \cdot 0.9 = 6.3 \cdot 10^{13} \text{ eV/segundo} \cong 0.01 \text{ mW}.$$

Como último ejemplo haremos el mismo cálculo para una fuente de Iodo 131 (^{131}I), otra fuente utilizada en medicina nuclear, de la misma actividad. El ^{131}I emite

- radiación γ_1 de $\varepsilon = 637\text{KeV}$ con una probabilidad $p_1 = 0.717$
- radiación γ_2 de $\varepsilon = 365\text{KeV}$ con una probabilidad $p_2 = 0.817$

Entonces

$$W = 500 \cdot 10^6 \text{ des/s} \cdot (637 \cdot 10^6 \text{ eV/des} \cdot 0.717 + 365 \cdot 10^6 \text{ eV/des} \cdot 0.818) = 37 \cdot 10^{13} \text{ eV/s} \cong 0.03 \text{ mW}$$

En resumen:

- la energía TOTAL emitida por una fuente es función del radionucleido (ε y p) y de la actividad de la fuente (A). En los tres ejemplos la actividad es la misma, por lo que la diferencia en la potencia depende sólo del espectro de radiación del nucleido.
- La expresión de cálculo de la ENERGÍA TOTAL es $W = A \cdot \sum (\varepsilon_i \cdot p_i)$

Tasa de fluencia de energía

También llamado intensidad, es la variación de la energía incidente sobre un elemento diferencial de área por unidad de tiempo. Es directamente proporcional al flujo de energía (la “potencia” de la fuente) e inversamente proporcional, para una emisión isotrópica, a la superficie de una

esfera centrada en la fuente. Esta área a su vez es πr^2 , siendo r el radio de la esfera, es decir: la distancia entre la fuente y el punto donde estamos definiendo la tasa de fluencia.

$$\psi = \frac{dR}{dt} \frac{dR}{dA}$$

la unidad es $[J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ o W/m^2

Considerando una fuente puntual isotrópica (que emite su energía en forma uniforme en todas direcciones) podemos decir que la tasa de fluencia de energía a una distancia r de la fuente es la ENERGÍA TOTAL emitida por la fuente dividida por el área de una esfera de radio r :

$$\dot{\psi} = \frac{W}{4 \pi r^2}$$

$$\dot{\psi} = \frac{A \sum(\epsilon p)}{4 \pi r^2}$$

La Tasa de Dosis absorbida \dot{D} en un punto es proporcional a la TASA DE FLUENCIA DE ENERGÍA en ese punto. El COEFICIENTE MÁSCICO DE ABSORCIÓN ($\mu_{en}\rho$) es el factor de proporcionalidad entre la tasa de fluencia en un punto y la energía que será absorbida por un material ubicado en ese punto. Es función del número atómico del material y de la energía de la radiación:

$$\dot{D} = \dot{\psi} (\mu_{en}/\rho)$$

Para una fuente polienergética:

$$\dot{D} = \sum_{\epsilon=1}^{\epsilon=n} \dot{\psi} (\mu_{en}/\rho)$$

$$\dot{D} = A \sum_{\epsilon=1}^{\epsilon=n} \frac{(\epsilon p)_{\epsilon} (\mu_{en}/\rho)_{\epsilon}}{4 \pi r^2}$$

Los términos 4 ; π ; ϵ , p y (μ_{en}/ρ) son constantes para un determinado radionucleido, por lo que se puede definir una “CONSTANTE ESPECÍFICA DE LA RADIACIÓN GAMMA”:

$$\Gamma = \sum_{\epsilon=1}^{\epsilon=n} \frac{(\epsilon p)_{\epsilon} (\mu_{en}/\rho)_{\epsilon}}{4 \pi}$$

Por lo tanto

$$\dot{D} = \frac{A \Gamma}{d^2}$$

Donde por comodidad se ha reemplazado “r” de Radio por “d” de distancia, que es la distancia entre la fuente y el punto de cálculo. De donde surge la llamada “Ley de Inversa de Cuadrados”:

$$\frac{\dot{D}_1}{\dot{D}_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

En las dos primeras columnas de la Tabla 1 se muestran los valores de la constante Γ para algunos radionucleidos utilizados en medicina nuclear. La dosis integrada es directamente el producto de la tasa de dosis por el tiempo. Las tres últimas columnas corresponden a nucleidos usados en PET. Como estos decaen rápidamente los datos de la última columna indican la dosis integrada en una hora.

Al realizar el cálculo hay que tener mucho cuidado con utilizar las unidades correctas

Tabla 5.1. Constantes específicas de la radiación para algunos nucleidos utilizados en Medicina.

Radionucleido	Constante Γ [$\mu\text{Gy m/h MBq}$]	Radionucleido	Constante Γ [$\mu\text{Gy m}^2/\text{h MBq}$]
Co-57	0.016	11C	148
Ga-67	0.022	13N	0.148
Se-75	0.056	15O	0.148
Tc-99m	0.017	18F	0.143
In-111	0.084	64Cu	0.029
I-125	0.034	68Ga	0.134
I-131	0.057	82Rb	0.159
Tl-201	0.012	124I	0.185

Basada en IAEA (2010)

Rayos X

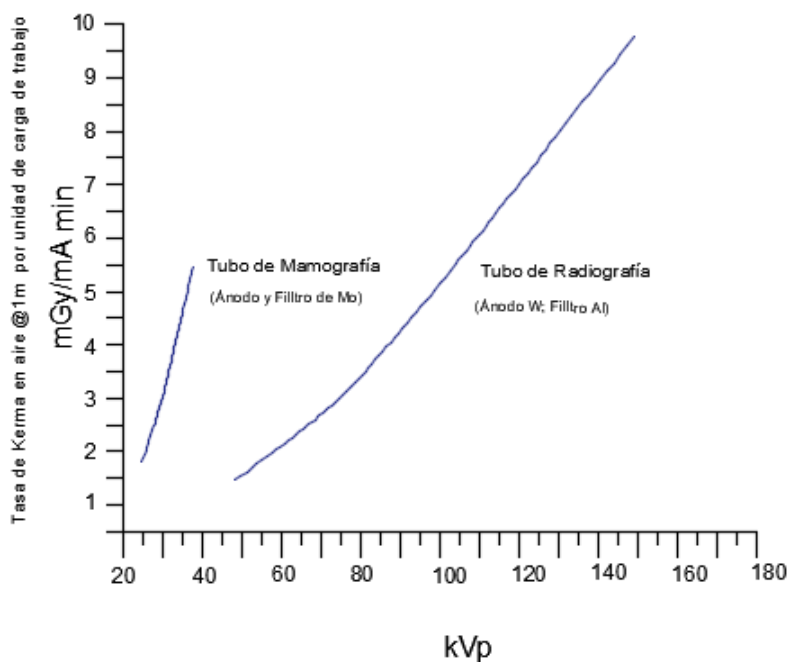
Los conceptos desarrollados previamente son válidos para rayos X (Rx). Sin embargo, hay ciertos factores que hacen imposible utilizar una expresión única:

- a) En una fuente radiactiva la energía está definida por el radionucleido, mientras que en Rx es variable, principalmente con el kilovoltaje y el filtrado.
- b) En una fuente radiactiva la cantidad de fotones está definida por la Actividad de la fuente, mientras que en Rx la definen el miliamperaje y la potencia.
- c) Las fuentes radiactivas generalmente son isotrópicas, mientras que los tubos de Rx no lo son.

Además, para una técnica dada (kV, mA, mAs), la dosis que emite el equipo es diferente para cada marca y modelo, y aun para equipos diferentes de la misma marca y modelo. Por lo tanto, retomaremos este tema en el capítulo 9 Protección radiológica en radiología.

A modo de ejemplo, las curvas siguientes indican la tasa de kerma en aire para la radiación primaria de un tubo de Rayos X y un mamógrafo en función del kV, mA y mAs (Gráfico 1):

Figura 5.1. Tasa de Kerma en aire por unidad de carga de trabajo en mA min a una distancia de 1m. para dos equipos tubos de Rx (mamografía y radiografía).



Nota. Estos valores se dan a modo de ejemplo y no deberían usarse en el diseño de instalaciones. Fuente: NCRP (2004, tomado de Archer, 1994)

Estimación de la dosis por exposición externa

Como se dijo anteriormente las magnitudes a evaluar son la Dosis Efectiva E y la Dosis Equivalente H_T . Al tratarse de Magnitudes Básicas no pueden medirse y sólo pueden ser estimadas a partir de Magnitudes Operacionales: la Dosis Equivalente Personal $H_p(d)$ para monitoreo individual y la Dosis Equivalente Ambiental $H^*(d)$ para monitoreo de áreas.

Esa estimación se hace a partir de instrumentos calibrados en esas magnitudes. Como todas las magnitudes operacionales, indican la dosis en un punto a una profundidad “d” en tejido.

La relación entre la magnitud que se quiere estimar y la que se mide depende de muchos factores, principalmente cómo incide la radiación sobre el cuerpo. Si el dosímetro se ubica en el punto más expuesto, la dosis medida (en este caso $H_p(d)$) será siempre menor que E, en algunos casos mucho menor. Eso nos ubica del lado de la seguridad, ya que estamos sobreestimando la Dosis Efectiva. La misma situación se da en el monitoreo de áreas con $H'(d)$ (CADIME 1999).

Por los motivos expuestos, las autoridades reguladoras aceptan los resultados de la dosimetría personal en términos de $H_p(d)$ integrada en un año para acreditar el cumplimiento de los límites de dosis:

Para piel y extremidades

$$\frac{H_p(0,07)}{500 \text{ mSv}} < 1$$

Para cristalino

$$\frac{H_p(3)}{20 \text{ mSv}} < 1$$

Para Dosis Efectiva (excluyendo incorporación)

$$\frac{H_p(10)}{20 \text{ mSv}} < 1$$

En algunas prácticas en que la exposición a la radiación es muy inhomogénea puede ser necesario usar más de un dosímetro, como es el caso de Radiología Intervencionista.

Elementos de dosimetría interna

Introducción

El cálculo de la distribución de dosis en el organismo debido a la incorporación de material radiactivo involucra una gran cantidad de variables que hacen imposible un cálculo aproximado como el que hicimos en exposición externa. En el presente apartado, describiremos someramente los procesos involucrados que nos permitirán calcular las magnitudes relevantes para la protección ocupacional y del público.

Dosimetría

La incorporación de material radiactivo en el organismo provoca una exposición inhomogénea de los tejidos, ya que el material se metabolizará en función de sus características. El individuo que incorporó material radiactivo, ya sea por ingestión, inhalación o a través de la piel, seguirá recibiendo dosis después de ocurrido el evento que originó la incorporación. La dosis total integrada a lo largo de un determinado período de tiempo depende de varios factores, como la actividad incorporada, la vida media del nucleido, su forma física, la vía de incorporación, el metabolismo, el comportamiento radioquímico, etc.

Conceptualmente, la Dosis Efectiva Comprometida $E(\tau)$ se define como la Suma de los productos de las dosis equivalentes comprometidas en órganos y tejidos y de los factores de ponderación de tejido correspondientes (W_T): $E(\tau) = \sum H_T(\tau) W_T$ donde τ es el tiempo de integración, medido en años, después de la incorporación. La Dosis Equivalente Comprometida $H_T(\tau)$ es la integral en el tiempo de la tasa de dosis equivalente en un órgano o tejido particular como consecuencia de la incorporación de material radiactivo en el cuerpo de la persona de referencia, donde τ es el tiempo de integración expresado en años. El periodo de compromiso se toma como 50 años para adultos y hasta la edad de 70 años para niños.

Así como el Riesgo de Efectos Estocásticos por Irradiación es proporcional a la Dosis Efectiva E , para incorporación es proporcional a la Dosis Efectiva Comprometida $E(\tau)$.

La Dosis Efectiva Comprometida $E(\tau)$ al igual que la Dosis Efectiva E es una Magnitud Básica y como tal no puede ser medida directamente. $E(\tau)$ es directamente proporcional a la Actividad Incorporada (I) del nucleido en cuestión (J), la identificaremos como I_j . El factor de proporcionalidad es el Factor Dosimétrico $e(\tau)$, por lo que $E(\tau) = I_j e(\tau)$. En el caso de incorporación de radionucleidos y vías de incorporación diferentes esta expresión se convierte en

$$E(\tau) = \sum_j I_j e(\tau)_j$$

La Guía ARN 1 “Factores dosimétricos para irradiación externa y contaminación interna, y niveles de intervención para alimentos” de la Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina (2003) contiene las tablas para determinar $e(\tau)$ a partir de los siguientes parámetros:

- Si se trata de público o personal ocupacionalmente expuesto.
- Para miembros del público: la edad.
- Si la vía de incorporación es Ingestión o Inhalación.
- Cuál es el radionucleido.
- f_1 : Fracción del material que desde el tracto gastrointestinal pasa a los fluidos del cuerpo en el caso de ingestión.
- La velocidad de depuración del tracto respiratorio para el caso de inhalación (Rápido, Medio o Lento).
- El Diámetro aerodinámico medio de actividad (AMAD, $1\mu\text{m}$ o $5\mu\text{m}$).

Monitoreo de la contaminación interna

Definición y objetivos

En el control de la contaminación interna, el monitoreo individual comprende las determinaciones de la actividad retenida en todo el cuerpo o en órganos específicos y la presencia en excretas y en materiales biológicos en general. En el monitoreo de áreas se determina principalmente concentración de radionucleídos en el aire y actividad en superficies del lugar de trabajo.

El término monitoreo se refiere al conjunto de las mediciones, junto con su interpretación, llevadas a cabo con el fin de demostrar que la exposición de los trabajadores ha sido optimizada y que no se han superado los límites fijados por la autoridad.

Un plan de monitoreo será exclusivo para un lugar de trabajo determinado y en su redacción deben aparecer los objetivos claramente definidos. Debe incluir las bases para interpretar los resultados de las mediciones en términos de incorporación de radionucleidos y guías para la conservación o destrucción de registros. Será revisado periódicamente y siempre que se produzcan cambios significativos en la operación de la instalación o en las recomendaciones de la autoridad.

El monitoreo debe ser visto como una herramienta de la protección radiológica y no como un fin en sí mismo.

Monitoreo personal de la contaminación interna

Método directo

La cuantificación del material retenido en todo el cuerpo o en órganos particulares por medio de un Contador de Todo el Cuerpo (CTC), constituye las mediciones *in vivo* o métodos directos.

Método indirecto

El análisis de excretas (orina, heces) o de materiales biológicos en general (sangre, soplido nasal, expectoración), llamados mediciones *in vitro*, son considerados métodos indirectos, lo mismo que los muestreadores personales de aire.

La elección de uno u otro método dependerá del tipo de emisión y del metabolismo del contaminante y de la sensibilidad, disponibilidad y conveniencia de los sistemas de detección.

Las mediciones directas están indicadas en el caso de emisores gamma y X de suficiente energía y rendimiento, como para ser detectadas sobre el fondo. Por su parte, los emisores alfa o beta se determinan principalmente en muestras biológicas.

Límite anual de incorporación

Se denomina Límite Anual de Incorporación (ALI) a la actividad incorporada "I" de un nucleido dado "j" que, incorporada a lo largo de un año calendario, generará una Dosis Efectiva

Colectiva E(τ) igual al límite de dosis (20mSv). Por lo tanto, si e(τ)_j = 20 mSv, entonces I_j al que ahora llamaremos

$$IL_J = 20\text{mSv} / e(\tau)_j.$$

Concentración derivada en aire (DAC)

Un límite derivado de uso corriente es el Límite Derivado de Concentración en Aire (DAC, en inglés). Este límite se define como la concentración de radionucleido en el aire de un ambiente de trabajo, en el que, si un trabajador permanece 2000 horas al año, incorporaría un ALI. El DAC Se expresa numéricamente como

$$DAC = \frac{IL_J}{2400} \left[\frac{Bq}{m^3} \right]$$

Monitoreo de áreas

El monitoreo rutinario de áreas incluye mediciones de aire, superficie del lugar de trabajo, herramienta, prendas, etc. La contaminación superficial no está directamente relacionada con la exposición individual, pero puede ser un indicador de un incremento de la probabilidad de incorporación. En la práctica se establecen valores que, de ser superados, requerirán medidas para eliminar o reducir los niveles de contaminación.

El monitoreo continuo de los aerosoles es importante porque la inhalación es la principal ruta de incorporación para los trabajadores. Mediante un muestreo de aire en el lugar de trabajo se puede determinar la concentración de actividad en Bq/m³ y compararla con la Concentración Derivada en Aire).

Verificación del cumplimiento de los límites de dosis

Ahora podemos actualizar la forma de verificar el cumplimiento de los límites de dosis considerando la exposición externa y la interna:

Para piel y extremidades

$$\frac{Hp(0,07)}{500 \text{ mSv}} < 1$$

Para cristalino

$$\frac{Hp(3)}{20 \text{ mSv}} < 1$$

Para Dosis Efectiva (incluyendo incorporación)

$$\frac{Hp(10)}{20 \text{ mSv}} + \sum_j \frac{I_j}{IL_j} < 1$$

Donde I_j e IL_j son respectivamente la actividad incorporada del nucleido “j” en un año y el Límite Anual de Incorporación para ese nucleido.

Referencias

- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2007). Radiosimetría. En *Curso de protección radiológica. Nivel técnico*. Buenos Aires: ARN. Copia mimeografiada, pp. 27-44.
- CADIME Manual de Radioprotección de la Cámara de Instituciones de Diagnóstico Médico (CADIME), Buenos Aires (1999).
- NCRP (2004). *Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities*. Report No. 147.
- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2019). *Norma Básica de Seguridad Radiológica*. AR 10.1.1. Revisión 4. Buenos Aires, ARN.
- Autoridad Regulatoria Nuclear (2003). *Guía Regulatoria A.R.1. Factores dosimétricos para irradiación externa y contaminación interna, y niveles de intervención para alimentos*. Rev 1.
- International Commission On Radiation Units And Measurements (1980). *Radiation Quantities and Units*. ICRU Report N° 33. Bethesda, Maryland, USA, ICRU.
- International Commission On Radiation Units And Measurements (1985). *Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources*. ICRU Report N° 39. Bethesda, Maryland, USA, ICRU.

CAPÍTULO 6

Implementación práctica de la protección radiológica

Gustavo Sánchez

Introducción

En el presente Capítulo, expondremos algunas herramientas para llevar a la práctica los criterios detallados en el Capítulo 4. El Capítulo incluye: a) Clasificación de áreas de trabajo para racionalizar los recursos destinados a la protección de los trabajadores y el público; b) El tiempo, la distancia a la fuente de radiación y la utilización de blindajes para reducir las dosis por irradiación externa, tanto para fuentes radiactivas como rayos X; y, por último, c) la descripción de los elementos para evitar la contaminación con fuentes radiactivas abiertas.

Clasificación de áreas

Resumen

En un servicio donde se emplean radiaciones ionizantes hay tres tipos de áreas o zonas de trabajo:

Zonas de libre acceso, como por ejemplo la recepción y la sala de espera.

Zonas supervisadas, como por ejemplo consultorios, oficinas, etc; lugares en los que no se trabaja con radiaciones, pero en donde las personas que trabajan en ella pueden estar expuestos a la radiación que se origina en fuentes o equipos empleados en OTROS locales. No es necesario que las personas que trabajan en las zonas supervisadas empleen dosímetros o sigan procedimientos especiales de seguridad. Sin embargo, si por ejemplo hay un blindaje que separa la sala de rayos de una oficina hay que verificar que ese blindaje sea adecuado.

Zonas controladas: son los lugares donde efectivamente se trabaja con radiaciones. Sólo pueden acceder a ella las personas autorizadas, entrenadas en los procedimientos de seguridad y que cuenten (y sepan usar) los elementos de protección necesarios.

A continuación, se ofrece una explicación más formal de acuerdo con lo expresado en las Normas Básicas Internacionales de Seguridad (OIEA, 2016).

Áreas controladas

Se define como *área controlada* toda zona en la que se prescriban o pudieran prescribirse medidas protectoras o disposiciones de seguridad específicas para:

- a) controlar las exposiciones normales o impedir la dispersión de la contaminación en condiciones normales de trabajo;
- b) prevenir las exposiciones potenciales o limitar su magnitud.

Al determinar los límites de toda zona controlada se deberá tener en cuenta la magnitud de las exposiciones normales previstas, la probabilidad y magnitud de las exposiciones potenciales, y la naturaleza y alcance de los procedimientos de protección y seguridad requeridos.

Características de las áreas controladas

- a) Deben estar delimitadas por medios físicos o, cuando esto no sea razonablemente factible, por otros medios adecuados;
 - b) Se deberá delimitar una zona controlada por medios idóneos cuando una fuente se ponga en funcionamiento o sea energizada solo intermitentemente,
 - c) Deben estar señalizadas con
 - a. un símbolo normalizado de advertencia tal como el recomendado por la Organización Internacional de Normalización (ISO)12,
 - b. las instrucciones apropiadas en los puntos de acceso (Recuadro a la derecha de la banda Blanca o Amarilla en la Figura 6.1-La banda Amarilla en el cartel indica “Área Controlada”) y otros lugares adecuados del interior de las zonas controladas, como por ejemplo las que muestra la Figura 6.2)
 - d) Deben contar con medidas de protección y seguridad ocupacional para el personal que trabaje en ellas. Eso incluye contar con procedimientos locales apropiados.
 - e) Se debe restringir el acceso a las zonas controladas por medio de procedimientos administrativos, tales como el uso de permisos de trabajo, y mediante barreras físicas, que podrían incluir dispositivos de cierre o enclavamiento, siendo el grado de restricción proporcionado a la magnitud y probabilidad de las exposiciones previstas;
 - f) El personal deberá disponer en los puntos de entrada, según proceda:
 - a. ropa y equipo de protección;
 - b. equipo de vigilancia radiológica (dosimetría personal)
 - c. un lugar adecuado para guardar la ropa personal
 - d. equipo de vigilancia radiológica de la contaminación de la piel y la ropa (*)
 - e. equipo de vigilancia radiológica de la contaminación de todo objeto o substancia que se saque de la zona (*)
 - f. instalaciones de lavado o ducha (*)
 - g. un lugar adecuado para guardar la ropa y el equipo de protección contaminados (*)
- (*) Cuando sea necesario por el tipo de fuentes y actividades que se realizan.

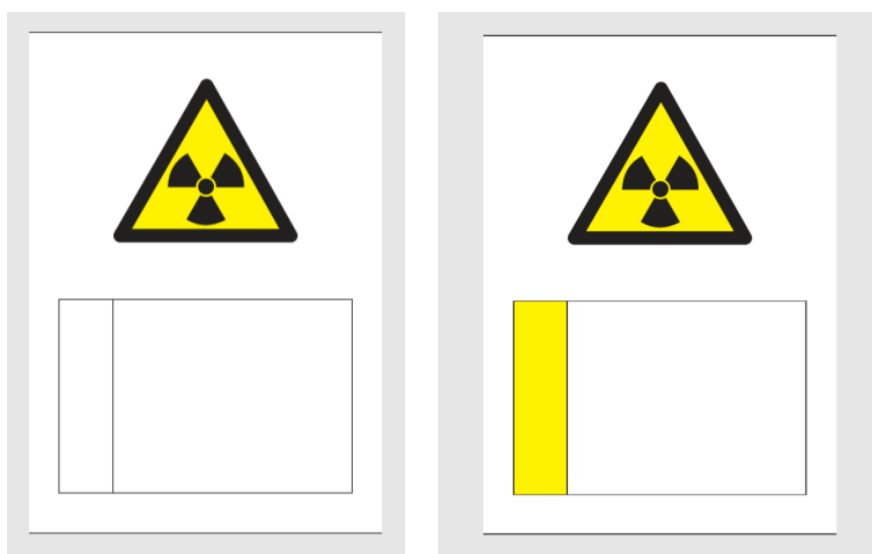
- g) Se deberán examinar periódicamente las condiciones para determinar la posible necesidad de revisar las medidas de protección o las disposiciones de seguridad, o bien los límites de las zonas controladas.

Áreas supervisadas

Características de las áreas supervisadas

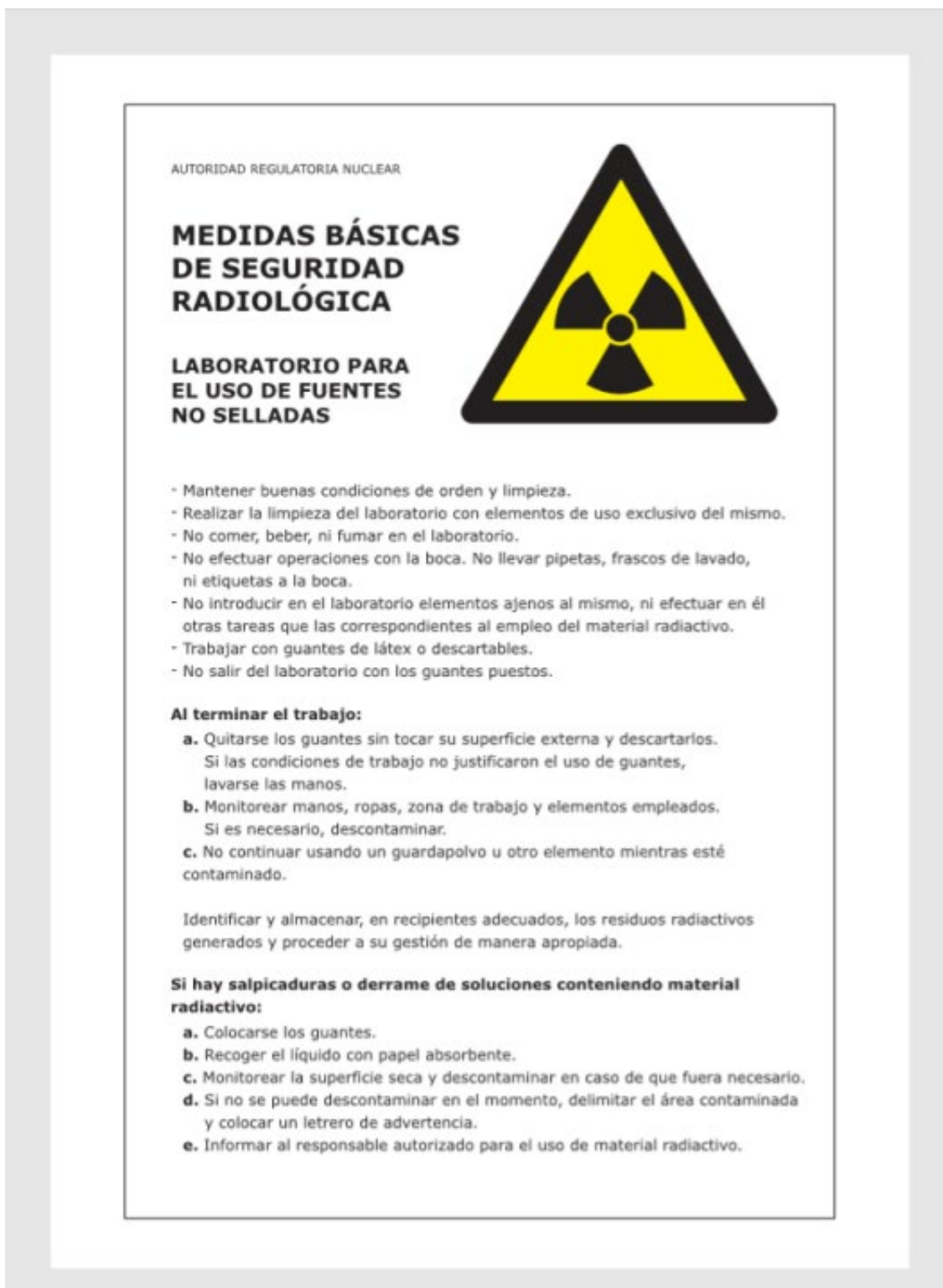
- a) Deben estar delimitadas por medios físicos o, cuando esto no sea razonablemente factible, por otros medios adecuados.
- b) Deben estar señalizadas con
 - a. un símbolo normalizado de advertencia tal como el recomendado por la Organización Internacional de Normalización (ISO)12,
 - b. las instrucciones apropiadas en los puntos de acceso (Recuadro a la derecha de la banda Blanca o Amarilla en el Cuadro 1 -La banda blanca en el cartel indica “Área Supervisada”). Se deberán examinar periódicamente las condiciones para determinar toda necesidad de medidas protectoras y disposiciones de seguridad, o de modificación de los límites de las zonas supervisadas.

Figura 6.1. Carteles Normalizados para acceso a zonas reglamentadas.



Nota. Izquierda: ÁREA SUPERVISADA. Derecha: ÁREA CONTROLADA. Fuente: ARN (2022)

Figura 6.2. *Ejemplo Cartel Medidas Básicas de Seguridad a colocar dentro del Área Controlada.*



Fuente: ARN (2022).

Elementos para reducción de dosis

Irradiación

El tiempo

La Tasa de Dosis es la Dosis por Unidad de Tiempo. Por lo tanto, la dosis en un punto es directamente proporcional al tiempo. Esta es la primera herramienta para reducir la dosis: reducir el tiempo de exposición a la radiación

La distancia

Como se puede ver de la expresión general, la Dosis en un punto es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Esto es lo que se llama “Ley de Inversa del Cuadrado de las distancias”. Por caso, si estamos a un metro de una fuente y nos alejamos para estar a dos metros, estaremos reduciendo la dosis a la cuarta parte. En la práctica esta “Ley” es válida cuando se dan ciertas condiciones: la fuente es puntual (no extensa), es isotrópica y se puede despreciar la radiación secundaria. Volveremos sobre este tema más adelante.

Los blindajes

Blindar una fuente de radiación es interponer un material de características adecuadas para atenuar la dosis que se recibe en determinado punto.

La expresión básica que describe la atenuación de un blindaje es

$$B = I_b/I_0 = e^{-\mu \cdot x}$$

Donde

- B: *transmisión* del blindaje, que se define como el cociente entre la intensidad⁷ de la radiación en un punto determinado con blindaje (I_b) y la intensidad de la radiación en el mismo punto sin blindaje (I_0). Siempre es >1
- e: base de los logaritmos naturales (2.71)
- μ : coeficiente de atenuación lineal para
 - el material del blindaje (plomo, hierro, etc)
 - la energía de la radiación que se quiere atenuar
- x: espesor del blindaje.

⁷ Entendemos por INTENSIDAD a una magnitud radiológica dada, como Tasa de Fluencia, Tasa de Dosis, etc.

Esto último pone de manifiesto que la atenuación de un blindaje no es una constante, sino que depende de la energía de la radiación. Por ejemplo: un delantal plomado diseñado para uso en radiología (0.5 / 1 mm de Plomo transmite menos del 1%) prácticamente no brinda ninguna protección si trabajamos en PET (transmite más del 90%).

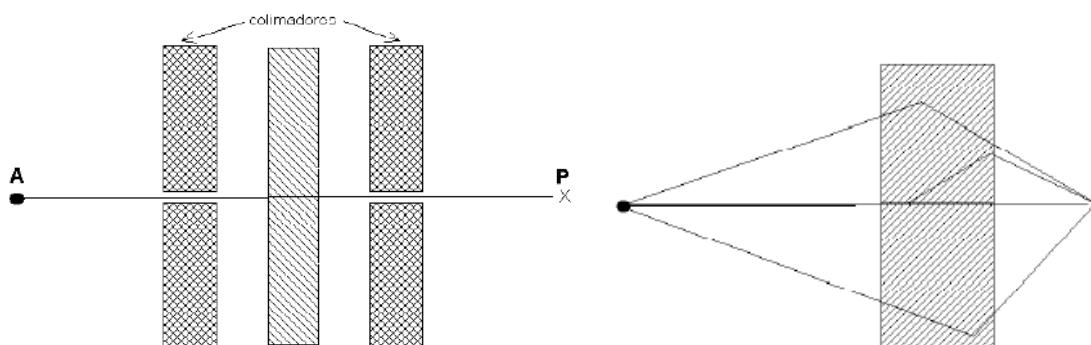
La gráfica es una exponencial decreciente en escala lineal y es una recta en escala semi logarítmica.

Esto hace que sea muy fácil calcular la atenuación conociendo X y μ , o calcular el espesor necesario para obtener una atenuación B , conociendo μ .

Sin embargo, la expresión anterior tiene una validez muy limitada, sirve solo para:

- Fuentes puntuales (no extensas). Si las fuentes no son lo suficientemente pequeñas para que puedan considerarse puntuales es necesario realizar cálculos complejos o utilizar modelos matemáticos que estén suficientemente validados. Esto escapa al alcance del presente Capítulo.
- Condiciones de “Haz Estrecho” (véase el Gráfico 1).

Figura 6.3. Condiciones de Haces.



Nota. Izquierda: condición de haz estrecho (sólo llegan al punto P los fotones que salen de la fuente A en la dirección indicada). Derecha: condición de haz ancho (a los anteriores se suman los que luego de interactuar con el blindaje se reenfocan en el punto). Fuente: ARN (2007)

La presencia del blindaje hace que parte de la radiación que antes de colocar el blindaje no llegaba al punto a proteger ahora se reenfoca sobre el mismo, aumentando la dosis y por lo tanto aumentando la transmisión (o lo que es lo mismo: disminuyendo la Atenuación). El incremento se cuantifica con un **factor de reenfoco** o **factor de build up**, que es mayor que UNO. Igualmente, la transmisión B seguirá siendo <1 . El cálculo analítico se complejiza mucho en esta condición. Afortunadamente estos cálculos ya fueron hechos y existen curvas de transmisión que lo tienen en cuenta. La forma de verificarlos es que en la descripción de las curvas debe decir “Haz Ancho” o, en inglés, *broad beam*. Mirando estas curvas ya se observa que se alejan de la situación ideal (recta en gráfica semilogarítmica).

- Haz monoenergético: Salvo en el caso de algunas pocas fuentes radiactivas esta condición no se da nunca. Por ejemplo, los Rayos X (Radiología) tienen un espectro amplio (como veremos oportunamente), con una importante componente de bajas energías. Por eso la primera parte del blindaje atenúa más que las siguientes, ya que esa primera parte

atenúa fuertemente las energías más bajas del espectro. El resultado es que la curva de transmisión tiene una pendiente más pronunciada que el resto.

La simple expresión de más arriba se convierte en

$$B = \left[\left(1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma x} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}},$$

Y el cálculo del espesor X para lograr una atenuación dada

$$x = \frac{1}{\alpha \gamma} \ln \left(\frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right).$$

Donde en vez de un único coeficiente de atenuación μ tenemos ahora tres α , β y γ , que tiene diferentes valores según la energía y el material del blindaje.

Por eso para los cálculos se utilizan curvas para diferentes materiales: en el eje de abscisas se presenta el espesor y en el de ordenadas, la transmisión. Cada curva expresa una energía diferente. Cada familia de curvas, un material de blindaje.

Como la radiación secundaria tiene una energía menor, las curvas se agrupan también en Curvas para radiación primaria y Curvas para radiación secundaria.

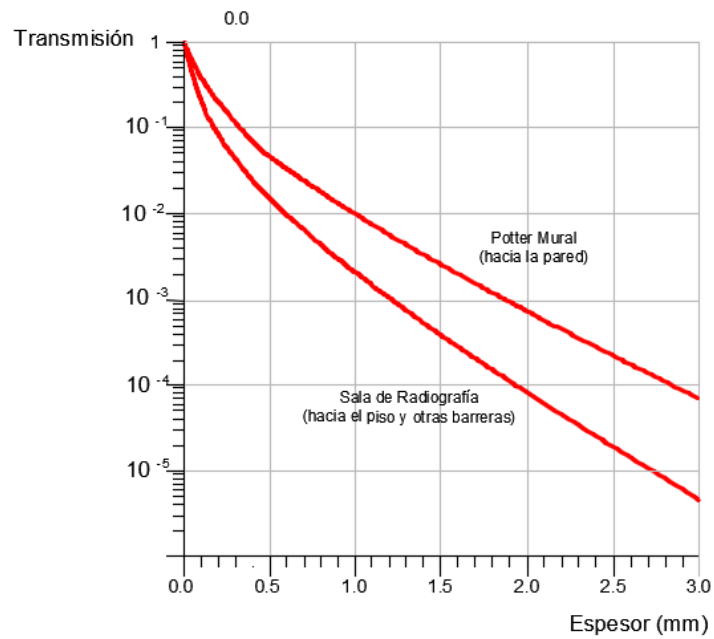
Radiación Primaria: es aquella que llega a la barrera que queremos calcular sin interactuar desde que sale de la fuente (haz útil). Por ejemplo, la pared hacia la que está dirigida el tubo de Rx.

Radiación Secundaria: Es la que llega a la barrera que queremos calcular después de haber tenido alguna interacción. Tienen dos orígenes diferentes:

- Radiación de *fuga*. es la que tiene una dirección diferente al haz útil, por ejemplo, la que transmite el blindaje de la calota en un tubo de Rx.
- Radiación *dispersa*: es la que se produce por interacción por efecto Compton cuando la radiación primaria interactúa con algún medio dispersor, principalmente el paciente. Esta radiación tiene una energía menor que la primaria. Una conclusión muy importante de esto último es que los profesionales que realizan los exámenes nunca deberían estar expuestos a la radiación primaria, ya que los delantales plomados están diseñados para protegerlos solamente de la radiación secundaria. La protección que brindan para radiación primaria es mucho menor.

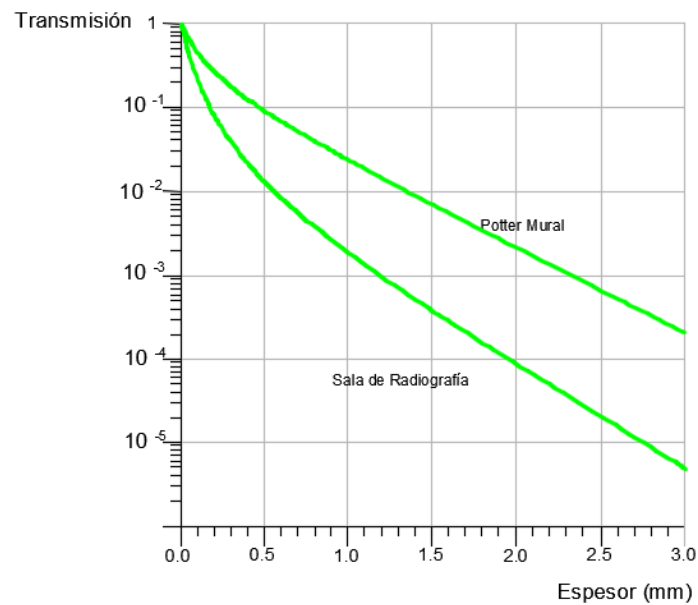
A modo de ejemplo veamos una curva de la transmisión de plomo para barreras primarias y una para barreras secundarias (NCRP, 2004) sobre Diseño de Blindajes Estructurales en Salas de Imágenes Médicas con Rayos X. Cada uno de los gráficos que figuran a continuación (Gráficos 2 y 3) es una familia de curvas, en la que cada curva es para un tipo de estudio diferente (radiografía, fluoroscopia, mamografía, angiografía, etc.). Las curvas corresponden a condición de haz ancho (*Broad Beam*).

Figura 6.4. Familias de curvas de transmisión para **barreras primarias** en Plomo.



Nota. El espectro de energía de los Rx es diferente para cada uno de los usos indicados. Fuente: NCRP (2004)

Figura 6.5. Familias de curvas de transmisión para **barreras secundarias** en Plomo.



Fuente: NCRP (2004).

Método de cálculo aproximado

Cuando no se requiere hacer un cálculo tan preciso de la atenuación de un blindaje, o del espesor necesario para tener una determinada atenuación, se puede utilizar el método de los **hemiespesores** (HVL por sus siglas en inglés).

Así

$$B = I_b/I_0 = 2^{-(x/HVL)}$$

Donde HVL es el espesor de un material dado que reduce a la mitad la intensidad de la radiación de para una determinada energía.

Si el espesor X es igual a un HVL, la transmisión será de 1/2, si X= 2HVL será de 1/4, si X=3HVL B=1/8 y así sucesivamente.

Algunos HVL para plomo: se muestran en la Tabla 6.1:

Tabla 6.1. *Hemiespesores de plomo para diferentes calidades de radiación.*

Rx 50 kVp (Radiología)	0.06 mm
Rx 70 kVp (Radiología)	0.17 mm
^{99m} Tc (Medicina Nuclear)	0.3 mm
511 KeV (PET)	9 mm
⁶⁰ Co (Radioterapia)	10 mm

Fuente: elaboración propia.

Blindajes localizados y estructurales

Blindajes Localizados

Son los que se utilizan para guardar fuentes radiactivas (contenedores, ladrillos de plomo, cajas blindadas, etc.) y para proteger a la persona que realiza una operación determinada. Se trata de pantallas plomadas y delantales plomados, por ejemplo.

Este tipo de blindajes se diseñan balanceando comodidad y protección. Normalmente no es necesario hacer un cálculo de blindaje para determinar el espesor salvo, en algunos casos, en el diseño de biombos plomados (por ejemplo, en salas de angiografía).

Blindajes Estructurales

Son blindajes fijos que forman parte la estructura de una sala o recinto de irradiación: paredes, pisos, techos, la pared de la sala de comando de un equipo, etc.

En este caso Sí es necesario calcular el espesor de las protecciones. Describiremos someramente el proceso de cálculo. Los procedimientos detallados se encuentran en la bibliografía y son más o menos complejos según el tipo de instalación.

El procedimiento es el siguiente:

1. Determinar cuáles son las barreras primarias y cuáles las secundarias.
2. Determinar, para cada barrera, si la persona a proteger es Trabajador o Miembro del Público. Con eso se establece cuál es la **restricción de dosis** aplicable según la normativa correspondiente.
3. Calcular la **carga de trabajo** (W), que es un parámetro que indica cuánta radiación y de qué energía se va a generar dentro de la sala. Teniendo en cuenta las diferentes barreras se calculará una carga de trabajo para la radiación primaria (o “útil”) W_U y otra para la radiación secundaria (W_L para Fuga –“Leakage”- y W_S para dispersa –“Scatter”).
4. Se tienen en cuenta otros factores, como el “Factor de Uso” U (la fracción del tiempo total que la radiación incide sobre la barrera que estamos calculando) y el “Factor de Ocupación” T (la fracción de tiempo que estará ocupado el local donde está ubicado el punto de cálculo).
5. Finalmente, se determina la distancia entre la fuente o foco del equipo y el punto de cálculo.

Con todos estos datos, se calcula el factor de transmisión del blindaje:

$$B = (P \cdot d^2) / W \cdot U \cdot T$$

Donde

- P: restricción de dosis aplicable
- d: distancia entre la fuente y el punto de cálculo
- W: carga de trabajo
- U: factor de uso
- T: factor de ocupación del local a proteger

Finalmente, se determina (analíticamente o utilizando las curvas de transmisión) el espesor de blindaje del material seleccionado (plomo, hierro, hormigón, vidrio, etc.) que satisface el factor de transmisión B para la energía correspondiente.

Contaminación

Introducción

La contaminación es la situación que produce la incorporación involuntaria de material radiactivo. Cabe aclarar que la administración de un radiofármaco al paciente para un estudio de medicina nuclear para diagnóstico o tratamiento no se considera contaminación.

Una contaminación puede producirse como consecuencia de un accidente. Pero cuando trabajamos con fuentes abiertas siempre es posible, aun trabajando con cuidado, que una parte del material radiactivo se deposite en las superficies del lugar de trabajo y pase al aire que respiramos.

En algunas actividades, como la minería del uranio, la incorporación de pequeñas cantidades de material radiactivo es inevitable. **En la práctica médica no es así:** el objetivo es evitar toda incorporación de material radiactivo al organismo. Esto solo puede ocurrir en Servicios de Medicina Nuclear y laboratorios de producción y fraccionamiento de radiofármacos. En radiología el único riesgo es el de Irradiación. También en Radioterapia, aunque en este caso hay que tener la precaución, cuando se trabaje con fuentes radiactivas, de controlar que las fuentes selladas no presenten pérdida de su contenido.

Las medidas para evitar la incorporación por contaminación se basan en:

- El adecuado diseño de las instalaciones.
- Procedimientos de trabajo adecuado por parte de personal entrenado.
- Monitoreo del lugar de trabajo para detectar contaminación en el aire y las superficies de trabajo.
- Descontaminar las áreas de trabajo que resultaren contaminadas.

En este apartado se describen someramente los elementos tecnológicos para diseñar las instalaciones y para la protección personal.

Los procedimientos específicos, diseño de instalaciones y procedimientos de descontaminación en Medicina Nuclear se tratarán en el Capítulo 10, sobre protección radiológica en Medicina Nuclear.

Criterios generales

Las medidas para **evitar** la contaminación son variantes de un solo criterio: **establecer barreras** entre los elementos contaminantes y las personas a proteger. Idealmente esas barreras deberían ser capaces de detener totalmente el paso de los elementos contaminantes, pero a veces no es posible, como en el caso de los gases.

Por razones de practicidad vamos a dividir esas barreras en tres tipos: las que se colocan sobre la fuente, las que se colocan en el ambiente y las protecciones personales.

Barreras sobre la fuente

Las fuentes radiactivas pueden estar dentro de una cápsula metálica que las aísla del ambiente exterior y que nunca se abre. En este caso hay que realizar controles periódicos para verificar que se mantiene la hermeticidad. Es el caso de fuentes que se usan en radioterapia y fuentes de calibración en medicina nuclear.

Las fuentes líquidas o gaseosas pueden estar contenidas en recipientes de vidrio u otro material que las aíslan del ambiente, pero no le brindan protección contra golpes o derrames. En

medicina nuclear las fuentes serán luego extraídas de estos recipientes para fraccionar, dosificar y administrar al paciente. Por lo tanto, es necesario tomar otras medidas para:

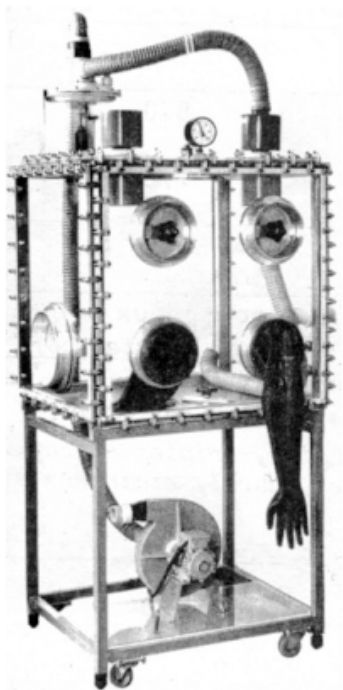
- Minimizar la contaminación de superficies, instrumentos, etc, siguiendo los procedimientos apropiados y **empleando barreras ambientales**.
- Controlar periódicamente los elementos, superficies, partes del cuerpo, etc., para determinar si están contaminados y proceder en consecuencia.

Barreras ambientales

A continuación, enumeraremos algunos elementos de protección que actúan en el ambiente.⁸

- Cajas de guantes: son cajas de acrílico aisladas del ambiente exterior (véase la Figura 6.6). En el interior está el material radiactivo que se manipula a través de guantes incorporados a la caja.

Figura 6.6. Caja de Guantes.



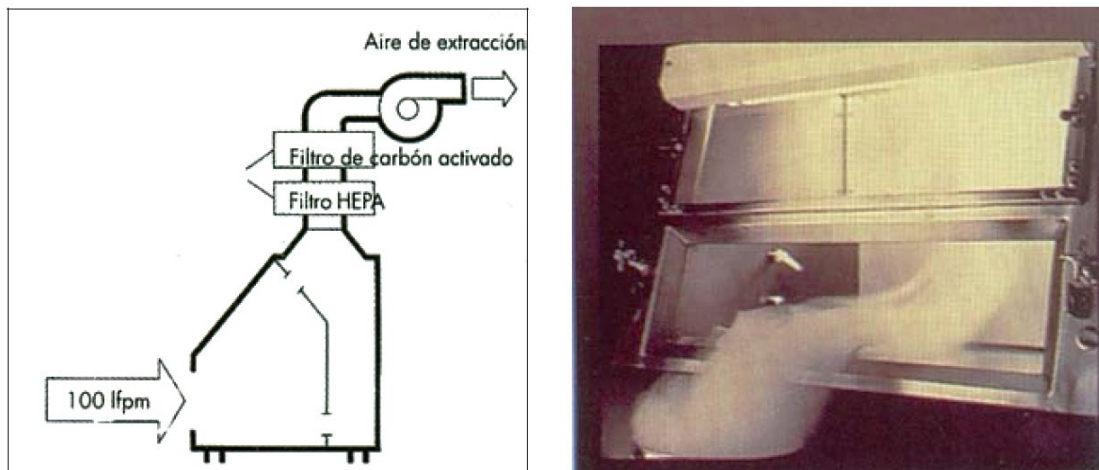
Fuente: ARN (2007).

- Campanas: tienen como función reducir la presión del aire en su interior (donde están las fuentes radiactivas abiertas). De esa manera, como la presión interna es menor que la externa (donde está el aire que respira el operador), el aire potencialmente contaminado queda debajo de la campana. Como hay un flujo de aire desde el exterior hacia el interior de la campana, hay que evitar que se produzcan turbulencias (“remolinos de

⁸ Para mayor información sobre este tema, véase la bibliografía del presente Capítulo.

aires” que podrían arrastrar partículas o gases desde el interior hacia el exterior). Por eso es muy importante que la campana esté correctamente diseñada. Existen campanas especiales llamadas Campanas de Flujo Laminar, que eliminan totalmente el flujo turbulento (véase la Figura 6.7).

Figura 6.7. Campana de flujo laminar.



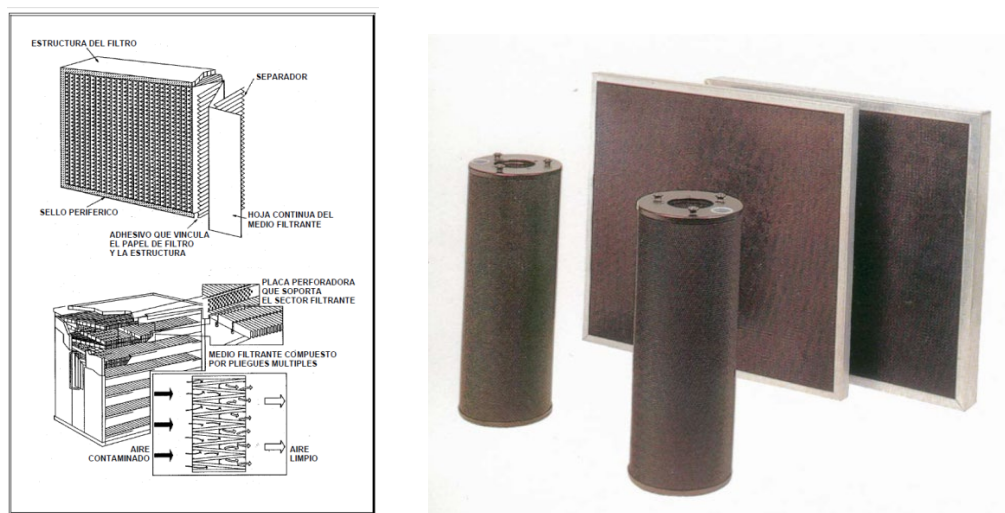
Fuente: ARN (2007).

- Filtros: el filtro tiene como función retener los elementos contaminantes que pasan a través de él. Eso implica que debe estar en el camino de un flujo de aire, como un ducto de descarga de una campana o una máscara. Hay diferentes tipos de filtro de acuerdo al tipo de contaminante a filtrar. Genéricamente los podemos dividir en:
 - Filtros absolutos (HEPA): se utilizan para filtrar polvo o aerosoles.⁹ Su principio de operación es exclusivamente mecánico: tienen un entramado de un tamaño MENOR que las partículas a filtrar, las que quedan retenidas en el filtro.
 - Filtros de carbón activado: se utilizan para filtrar gases, ya que estos no pueden quedar retenidos en un filtro absoluto. Su principio de funcionamiento se basa en el fenómeno de Adsorción¹⁰ (diferenciar de Absorción). Son muy utilizados para filtrar gases de ¹³¹I (iodo 131).

⁹ Los Aerosoles son SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN en un gas.

¹⁰ La adsorción es el fenómeno en el que una sustancia A presente en una fase fluida (líquido o gas) queda adherida a la superficie de una sustancia B en fase sólida). No hay transferencia de masa entre las fases (como sucede en la

Figura 6.8. Izquierda FILTRO ABSOLUTO (HEPA); derecha: FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO.



Fuente: ARN (2007).

En ambos tipos de filtros la sustancia radiactiva que se está filtrando queda retenida en el filtro, lo que termina limitando la capacidad de retención del filtro y que, en los filtros absolutos, afecta la circulación del aire lo que fuerza el motor del extractor y puede producir recirculación. Cuando se cambian los filtros, los que se retiran deben ser tratados como residuos radiactivo.

Protecciones personales

En algunos casos puede no estar indicado el uso de los elementos anteriores o bien no brindar una protección 100% efectiva. Se hace necesario entonces utilizar elementos de protección personal. Estos van desde guardapolvos y guantes hasta otros más complejos, como:

- Ambos descartables, cubre zapatos, cofia, barbijo.
- Antiparras en caso de que pueda haber salpicaduras.
- Máscaras (cubren boca, nariz y ojos) y semimáscaras (cubren boca y nariz). Deben tener los filtros que correspondan al tipo de contaminante (polvo, aerosol, gas) y en buen estado operativo (sin roturas y no saturados).

Figura 6.9. Protecciones personales.



Fuente: IAEA (2007).

Figura 6.10. Protecciones respiratorias.



Nota. Izquierda: semimáscara con detalle del filtro y porta filtro; derecha: Máscara Completa

Referencias

- ARN (2022) *Instructivo para carteles de señalización*. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/arn/instalaciones-practicas-y-personal-regulado/requisitos-y-recomendaciones>
- ARN (2007). Recursos tecnológicos para reducir la incorporación de radionucleidos (Sistemas de Protección Contra la Contaminación). En *Curso de protección radiológica. Nivel técnico*. Buenos Aires: ARN. Copia mimeografiada, pp. 177-215.
- IAEA (2007). *Radiological Protection of Patients*. Disponible en <https://www.iaea.org/resources/rpop>; <https://www.iaea.org/file/2017/training-radiologyalllecturesspzip> RPNM-Parte 05-Trabajadores-WEB
- NCRP (2004). *Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities*. Report No. 147.
- OIEA (2016). *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad*, Viena: OIEA.

CAPÍTULO 7

Monitoreo individual y de áreas

Gustavo Sánchez

Introducción

Sabemos que **medir** es utilizar algún dispositivo para conocer el valor de una magnitud, pero, ¿con qué objetivo? Podemos ampliar la definición y decir que medir es *determinar el valor de una magnitud con el suficiente grado de certeza como para poder tomar una decisión*.

Medimos la **radiación ambiental** para decidir si es necesario agregar algún blindaje, o determinar la posición más segura para realizar una tarea, estimar el tiempo que podemos quedarnos en un lugar, tomar la decisión de alejarnos, etc.

Medimos los **niveles de contaminación** en una superficie, instrumento o en el cuerpo para decidir si es necesario o no efectuar un procedimiento de descontaminación.

Suele pensarse erróneamente que el monitoreo individual tiene como único propósito verificar si cumplimos o no el límite de dosis. Es mucho más que eso: medimos las **dosis individuales** para decidir si es necesario modificar las condiciones o los procedimientos de trabajo.

En este Capítulo:

- se describen algunos de los instrumentos que se emplean en el monitoreo de la radiación (sólo los que son de uso habitual en prácticas médicas)
- se discute la forma de utilizar los dosímetros personales.
- se dan ejemplos de cómo interpretar el resultado de las mediciones.
- se dan algunas guías para la toma de decisiones.

Clasificación de los instrumentos de medición

De lectura directa y diferidos

Los instrumentos de lectura directa o inmediatos dan una información inmediata (por ejemplo: monitores de área, dosímetros personales electrónicos de lectura directa); los instrumentos de lectura diferida o retardados requieren un proceso de evaluación posterior (por ejemplo: dosímetros personales tipo film o TLD).

Activos y pasivos

Los instrumentos activos requieren una fuente de alimentación o batería para funcionar; los instrumentos pasivos, no.

Cuantitativos y alarmas

Los cuantitativos indican el valor de la magnitud que miden (Tasa de dosis equivalente ambiental, Dosis equivalente individual, etc). Las alarmas dan una indicación lumínica y/o sonora cuando se supera algún nivel preseteado de tasa de dosis o dosis acumulada. Pueden darse todo tipo de combinaciones entre cuantitativos, alarmas, dosis acumulada y tasa de dosis. Algunos medidores de tasa de dosis tienen además una señal sonora cuyo volumen o frecuencia es proporcional a la intensidad de la radiación.

Por su principio de funcionamiento

Los más utilizados para monitoreo ambiental en prácticas que empleen radiaciones ionizantes en medicina son los detectores gaseosos (Geiger Müller, Cámaras de Ionización, Contadores Proporcionales); hay detectores que emplean otros principios que no trataremos en este capítulo (Semiconductores, Centelladores y otros); estos se emplean para prácticas especiales, laboratorio y producción de imágenes médicas.

Para vigilancia radiológica individual se emplean fundamentalmente detectores pasivos de lectura diferida: Film Monitores, Termoluminiscentes (TLD), Ópticamente Estimulados (OSL); también se emplean instrumentos electrónicos de lectura directa con diferentes tipos de detectores. Estos instrumentos, si bien tienen la ventaja de que la información se obtiene inmediatamente, tienen una característica que los hace no aptos para el registro de dosis que exigen las normas: pueden ser reseteados y puestos a cero por el usuario.

Tipo de radiaciones que pueden medir

Hay detectores específicos para todo tipo de radiaciones (Rayos X, Rayos γ , partículas α y β , neutrones, etc). Nos limitaremos a las situaciones que se pueden dar en radiología, medicina nuclear y radioterapia: Radiación electromagnética (Rx y γ) y partículas β . Las partículas α no llegan a ser localizadas por el detector interno del instrumento, ya que son frenadas totalmente (o casi) por la carcasa del aparato. Por eso es necesario que los instrumentos tengan lo que se denomina “ventana fina”, esto es una ventana que permita el paso de las partículas β hacia el detector. La ventana fina debe ser de un material que permita el paso de las partículas pero que al mismo tiempo brinde suficiente protección al detector. Estas ventanas pueden estar en el propio instrumento o en una sonda externa.

Tipos de monitoreo

Medición de contaminación en superficies

¿Qué es la contaminación como magnitud a medir? Es la actividad por unidad de superficie (Bq/cm^2 , $\mu\text{Ci}/\text{cm}^2$, etc).

Para qué la medimos

Para determinar si es necesario o no descontaminar la superficie, fijando niveles de acción de acuerdo al tipo de nucleído, forma física y tipo de instalación (área controlada o supervisada) o elemento (superficies de trabajo, ropa, herramientas, la piel).

Cómo medimos

Consideraremos dos métodos:

- 1) Método de frotis: Consiste en utilizar un papel de características determinadas (básicamente debemos poder estimar qué fracción de material depositado sobre la superficie es realmente arrastrado por el papel). Arrastramos ese papel sobre un área determinada, por ejemplo: 30×30 cm. Luego, medimos la actividad arrastrada por el papel mediante algún procedimiento estandarizado y en base a esa medición calculamos la actividad por unidad de superficie (Ej. Bq/cm^2).
- 2) Un método más simple consiste en utilizar un monitor Geiger con sonda de ventana fina calibrada en $\text{Bq}/(\text{cm}^2 \cdot \text{CPM})$ ¹¹. Acercamos la sonda a la superficie cuidando de no tocarla y medimos las Cuentas Por Minuto en la escala del instrumento. El Geiger-Müller es el único instrumento que puede medir en unidades de Tasa de Dosis con un detector interno y Cuentas Por Minuto. La actividad por unidad de superficie surge de multiplicar la Lectura en CPM por el factor de calibración de la sonda en $\text{Bq}/(\text{cm}^2 \cdot \text{CPM})$.

Medición de concentración de actividad en aire

Es la actividad por unidad de volumen en un área controlada donde puede haber gases o aerosoles (Bq/cm^3 , $\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$, etc). Para limitar la incorporación por inhalación puede ser necesario utilizar elementos de protección personal, elementos tecnológicos como campanas o sistemas de ventilación especiales, etc.

¹¹ CPM: Cuentas Por Minuto.

La medición se hace de manera indirecta: se hace circular aire a través de un filtro de características conocidas, midiendo el caudal de aire ($\text{cm}^3/\text{minuto}$) y el tiempo de muestreo (minutos). Luego se mide la actividad absorbida por el filtro (Bq), teniendo en cuenta el factor de retención del filtro.

Monitoreo de efluentes

En instalaciones que emplean fuentes abiertas donde está autorizado el vertido de cierta cantidad de efluentes, es necesario medir la actividad eliminada en un determinado período de tiempo, considerando otros factores tales como la identificación de los nucleidos, la dilución, etc. Estos sistemas son complejos y sólo serán necesarios en instalaciones complejas como laboratorios de radiofarmacia o plantas de producción de fuentes abiertas para medicina nuclear.

Monitoreo de áreas

Qué medimos

Medimos la Tasa de Dosis Equivalente Ambiental (u otra magnitud equivalente¹²) en un punto. En ese punto está calibrado el detector y está indicado en el exterior del equipo. Podemos interpretarlo como la dosis que se acumulará en un elemento de masa ubicado en ese punto durante un tiempo "T". O, más sencillo: la dosis que recibiremos en la parte de nuestro cuerpo que está en ese punto si nos quedamos ese tiempo T.

Para qué medimos

Para evaluar la dosis que recibiremos si nos posicionamos en ese punto durante un determinado período de tiempo. Interpretando estos resultados podemos tomar decisiones sobre, por ejemplo, la necesidad de adicionar blindajes, optimizar tiempos de operación, modificar la ubicación donde trabajaremos o evaluar si es adecuado o no un blindaje estructural.

Con qué medimos

Con instrumentos (Geiger, Cámara de Ionización, Contador Proporcional, Monitor de Centelleo, etc.) adecuados para la magnitud a medir: Tipo y energía de la radiación, Rango de medición, etc.

¹² Tasa de Exposición, Tasa de Kerma y otras. Por ejemplo, la antigua magnitud EXPOSICIÓN (X) se mide en –Roentgens (R). $1 \text{ Roengen} \cong 0.01 \text{ Gy}$.

Cómo lo medimos

Ubicando el detector (el punto de calibración del detector) en la posición donde nos interesa conocer el valor de la tasa de dosis.

Volveremos sobre estos temas cuando nos ocupemos de prácticas específicas: radiología (Capítulo 9), medicina nuclear (Capítulos 10 y 11) y radioterapia (capítulo 12).

Monitoreo individual

Qué medimos

La dosis equivalente individual que recibimos *en un punto* de nuestro cuerpo. Ese punto está definido a una cierta profundidad en tejido. ¡Lo que indica el dosímetro *no* es la dosis que recibe el dosímetro! El dosímetro que colocamos a la altura del tórax mide $H_{P(10)}$, que es la dosis equivalente individual, en mSv; en un punto ubicado a 10mm de profundidad en tejido, debajo el dosímetro.

Para qué medimos

Para varias cosas. Las lecturas se hacen en forma rutinaria una vez al mes (salvo casos especiales, por ejemplo, algún accidente o situación anormal que haga prever una sobredosis). Entre otros propósitos, medimos:

- Para evaluar las dosis que recibe un trabajador mes a mes: esto es, si los valores son razonablemente constantes o si se detecta una tendencia creciente. Esto nos permitiría investigar los motivos de esa dosis creciente y hacer las correcciones necesarias *antes* de que la dosis acumulada sea innecesariamente alta.
- Para comparar la dosis que reciben distintos trabajadores que efectúan la misma tarea. Eso nos permite detectar si alguno de ellos está recibiendo una dosis innecesariamente alta, y tomar las medidas correctivas pertinentes.¹³
- Para verificar si se cumplen los límites y restricciones de dosis aplicables. Comparado con los objetivos anteriores, este es el menos relevante, ya que en radiología, medicina nuclear, intervencionismo y radioterapia puede ser necesario reducir las dosis, aunque estemos muy por debajo de los límites de dosis. Además, hay que tener en cuenta que los límites de dosis están expresados en términos de *dosis equivalente* (en un órgano) o *dosis efectiva* (promediada en todo el cuerpo) y lo que medimos con un dosímetro es la dosis en un punto.

¹³ Al respecto, véase el siguiente caso real: en un servicio de medicina nuclear se detectó que una técnica registraba dosis mensuales superiores a las de sus dos compañeras. Evaluada la situación, se comprobó que como esa técnica era de baja estatura, no podía utilizar correctamente la pantalla plomada. La acción correctiva fue darle a esta técnica una tarima. Luego de esta acción, los registros de dosis volvieron a valores normales.

Con qué medimos

Con un dosímetro personal. El dosímetro que se utilice debe ser adecuado al tipo y energía de la radiación, y el rango de medición debe ser acorde con la tarea a realizar. Además, debería estar calibrado para la magnitud a evaluar. Por ejemplo:

- Para estimar dosis efectiva E el dosímetro debe estar calibrado para $H_{P(10)}$, (dosis equivalente individual en un punto a 10mm de profundidad en tejido)
- Para estimar dosis equivalente en piel H_T (PIEL) el dosímetro debe estar calibrado para $H_{P(0.07)}$, (dosis equivalente individual en un punto a 0.07mm de profundidad en tejido)
- Para estimar dosis equivalente en cristalino H_T (CRISTALINO) el dosímetro debe estar calibrado para $H_{P(3)}$, (dosis equivalente individual en un punto a 3mm de profundidad en tejido)

Cómo medimos

Colocando el dosímetro enfrente a la radiación (¡no en el cinturón!) en el punto que recibirá la dosis más alta. Cuando queremos estimar la *dosis efectiva* generalmente usamos el dosímetro a la altura del tórax. Cuando queremos estimar la dosis en mano hay que usar dosímetro de mano, anillo o muñeca. Cuando queremos estimar la dosis en cristalino no podemos tapar el ojo con un dosímetro, de modo que se puede colocar el dosímetro cerca, por ejemplo, a la altura del cuello, aunque también hay dosímetros suficientemente pequeños como para colocarlos, por ejemplo, en la patilla de un antejo.

Como interpretamos los resultados

Es necesario remarcar que mientras la *dosis equivalente* se define para un órgano o tejido y la *dosis efectiva* es un promedio ponderado en todo el cuerpo, un simple dosímetro mide la dosis en un punto. Por lo tanto, el dosímetro se ubica en el punto más expuesto del órgano en cuestión o del cuerpo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que siempre estaremos sobre estimando la dosis equivalente o efectiva. Por lo que, si el dosímetro nos indica una dosis suficientemente baja podemos estar seguros de que la dosis que queremos estimar (*equivalente o efectiva*) será todavía más baja. Por el contrario, cuando la dosis que mide el dosímetro está cerca del límite y la distribución de dosis en el cuerpo es heterogénea (no uniforme), será necesario ajustar la medición, por ejemplo, usando dos dosímetros. retomaremos este tema cuando veamos protección en radiología intervencionista en el capítulo 9.

Como comentario final, cabe mencionar que hay opiniones contrapuestas en lo referente a dónde colocar el dosímetro cuando usamos un chaleco plomado: si por encima del chaleco o cubierto por el este. En el primer caso, la *dosis efectiva* estará sobreestimada (ya que el promedio en todo el cuerpo será muy inferior a lo que indica el dosímetro,) mientras que si lo colocamos por debajo habrá una parte del cuerpo que recibirá una dosis mayor, por lo que la estimación de *dosis efectiva* estará levemente subestimada. El consenso mayoritario es que el dosímetro se utilice debajo del delantal plomado, excepto en situaciones como el intervencionismo, en las que la exposición del trabajador pueda ser importante.

CAPÍTULO 8

Protección radiológica del paciente

Gustavo Sánchez

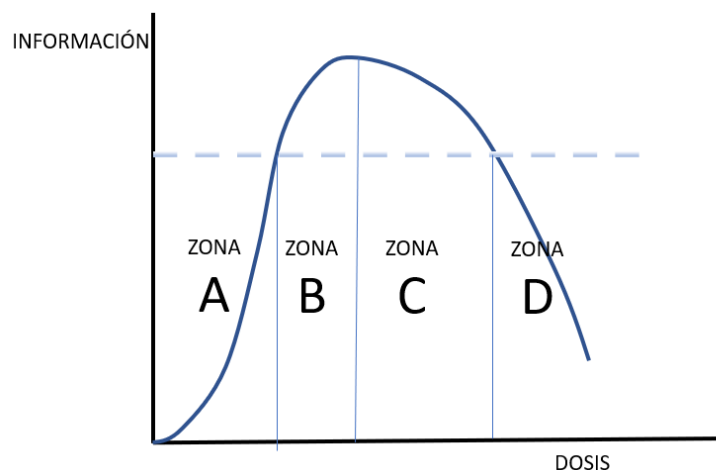
Introducción

Los criterios para la exposición de los trabajadores y del público requieren que las dosis individuales sean tan bajas como sea razonable, respetando los límites y restricciones de dosis aplicables.

En el caso de la exposición médica de los pacientes esto no es así: este es el único caso en que el beneficio de usar la radiación y conjunto de efectos negativos que esta produce (detrimento) recaen en el mismo individuo. De esta manera, si reducimos mucho la dosis, estaremos afectando el resultado buscado, ya sea una información con valor diagnóstico o un efecto terapéutico.

En la Figura 8.1, se muestra la relación entre la dosis que recibe el paciente y la información de valor diagnóstico que se obtiene en consecuencia. Será necesaria cierta dosis para lograr una información útil. Luego, los sistemas van saturando, por lo que la información se reduce con el aumento de la dosis. Se observa claramente que existe un rango de dosis ÓPTIMO, que es el que ofrece la mejor relación entre la información que proveerá el estudio y dosis requerida para ello.

Figura 8.1. Forma general de la relación entre la Información Diagnóstica y la dosis en radiodiagnóstico.



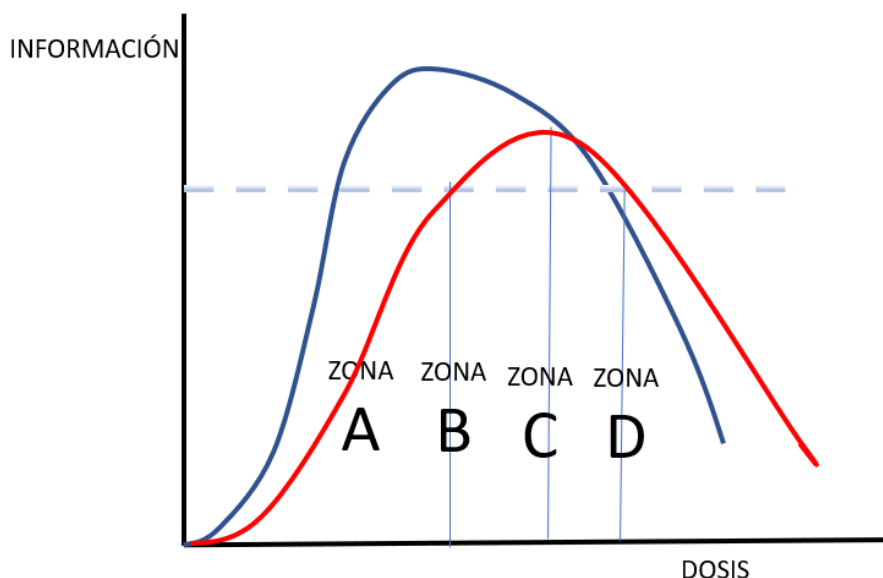
Nota. La altura de la línea de trazos indica la información mínima que debe brindar el estudio para lograr un diagnóstico. Este valor depende no sólo del equipo sino de la capacidad del observador. Fuente: elaboración propia

En la Figura 8.1 observamos las siguientes zonas:

- Zona A: la información no es suficiente. La práctica **no está justificada** porque el beneficio es **cero**.
- Zona B: es la **óptima**, ya que se obtiene una información de valor diagnóstico con la menor dosis “útil”.
- Zona C: es **sub óptima**, ya que si bien la información es suficiente la dosis requerida es innecesariamente alta.
- Zona D: es **la peor situación**, pues no brinda información útil y la dosis es MUY alta.

En un equipo más antiguo, con un mantenimiento defectuoso o mal calibrado, la curva se achata (menor información) y se desplaza a la derecha (se necesita más dosis), tal como se muestra en la Figura 8.2.

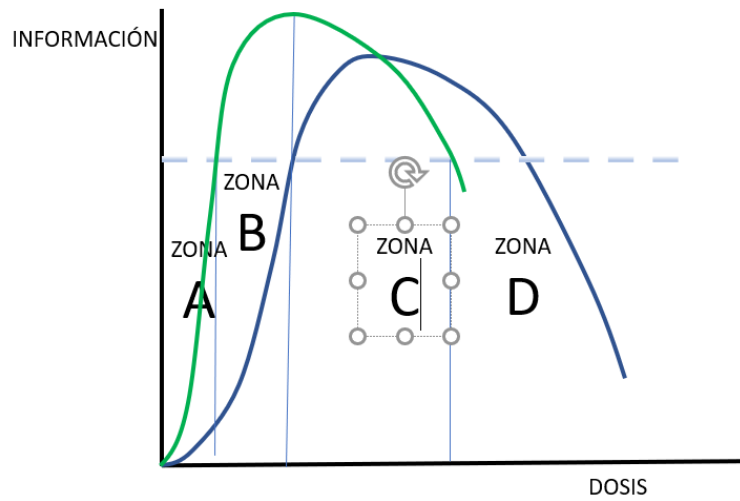
Figura 8.2. Relación entre la Información Diagnóstica y la dosis en un Sistema de diagnóstico deficiente.



Nota. La curva roja describe qué ocurre con un sistema deficiente, ya sea por obsolescencia, mal mantenimiento o uso incorrecto: la información que brinda el estudio es menor y se requieren dosis mayores. Fuente: elaboración propia

Asimismo, en un sistema de diagnóstico mejorado (equipo moderno, bien mantenido y calibrado) ocurre lo contrario: se obtiene más información con menor dosis. (Véase la Figura 8.3)

Figura 8.3. Relación entre la Información Diagnóstica y la dosis en un Sistema de diagnóstico mejorado.

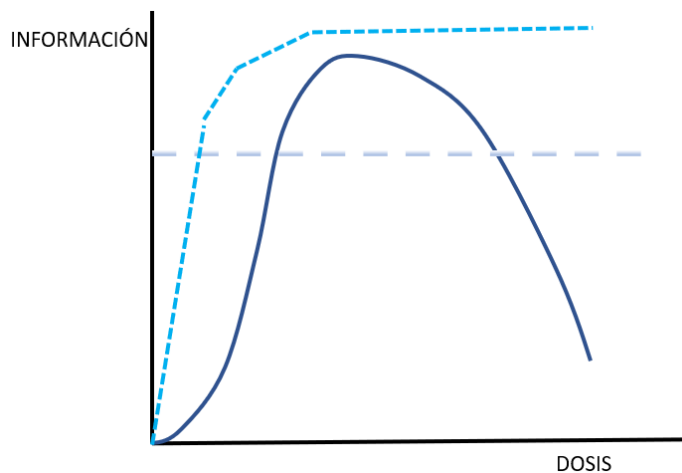


Nota. En un sistema de diagnóstico mejorado (curva verde) se obtiene más información con menos dosis. Fuente: elaboración propia.

La aparición de los equipos digitales trajo grandes beneficios, pero también algunos problemas nuevos. Efectivamente, con estos equipos se obtiene mucha información con dosis menores que en los equipos analógicos, pero hay dos aspectos a considerar que pueden llevar a una situación sub óptima: la calidad de las imágenes sigue siendo buena aun con dosis muy superiores a las mínimas necesarias (se alarga la ZONA III) y además es fácil y relativamente económico tomar más imágenes que las necesarias.

Esto requiere contar con protocolos específicos, que pueden incluir sistemas de monitoreo de dosis (*software* y *hardware*), con personal capacitado y entrenado e implementando adecuadamente la cultura de la protección radiológica, como se observa en el Figura 8.4:

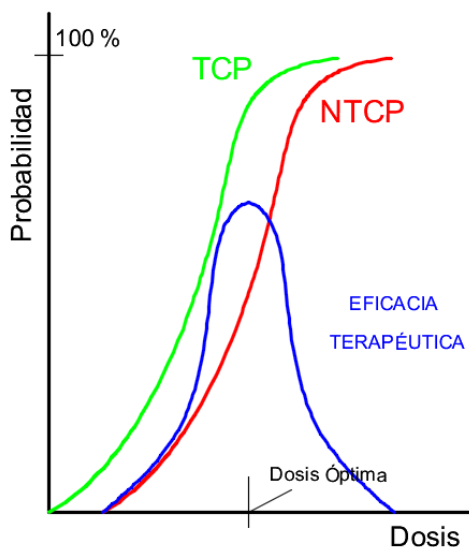
Figura 8.4. Información Diagnóstica vs Dosis en Radiología digital.



Nota. El gráfico muestra que la radiología digital (curva de trazos celeste) brinda mucha información con poca dosis. Pero como contrapartida, la imagen será buena aun con una dosis innecesariamente alta (Se extiende la ZONA "C") Fuente: elaboración propia

Algo similar ocurre en radioterapia, donde una dosis por debajo de la ÓPTIMA reduce el efecto terapéutico, mientras que, si la dosis es superior, puede generar efectos secundarios inaceptables (véase la Figura 8.5):

Figura 8.5. Relación entre Probabilidad de Control Tumoral TCP (“Beneficio”) y Probabilidad de Control de los Tejidos Normales NTCP (“Costo”) en función de la dosis en Radioterapia.



Fuente: Elaboración propia basado en Hall (2000).

Como se advierte, tanto para diagnóstico como para terapia, el criterio más importante es el de **optimización**, aunque en este caso la dosis entregada no debe ser la menor razonablemente posible sino la más adecuada para obtener el objetivo deseado (diagnóstico o terapéutico). Pero, ante todo, cualquier práctica médica que implique la exposición de un paciente debe estar justificada.

Aspectos particulares de la protección radiológica en medicina

La protección radiológica del paciente tiene algunos aspectos particulares que no se aplican en la exposición ocupacional ni del público. Se detallan en el Capítulo 6 de ICRP (2011), “Protección Radiológica en Medicina” y los resumimos a continuación:

- Exposición deliberada: el beneficio diagnóstico o terapéutico se obtiene merced a la exposición del paciente.
- Exposición voluntaria: el ICRP propone que siempre que se expone a un paciente se necesita **algún grado de consentimiento**, que puede ir desde un simple acuerdo verbal hasta un consentimiento escrito formal (necesario para todas las prácticas de radioterapia, donde casi siempre se producirán efectos secundarios aceptables).
- Cribado (*screening*) médico de pacientes asintomáticos: sobre la base de un **beneficio colectivo** puede ser aceptable exponer a pacientes asintomáticos a ciertos estudios con

radiación. El mejor ejemplo es la *mamografía*: eligiendo cuidadosamente la población a examinar (por ejemplo: mujeres a partir de cierta edad) es mayor el beneficio en término de vidas salvadas por detección temprana que el número de neoplasias que podría generar la práctica (detrimento).

- Terapia con radiación: a diferencia del radiodiagnóstico, donde la dosis que se entrega al paciente debe ser la menor posible para obtener la información necesaria, en terapia con radiación el objetivo terapéutico se obtiene como consecuencia directa de exponer al paciente a la radiación.
- Manejo de la dosis de radiación: parte de la optimización de las prácticas diagnósticas, terapéuticas e intervencionistas consiste en medir, registrar y evaluar ciertas magnitudes relacionadas con la exposición del paciente.
- Datos demográficos de la población de pacientes: En capítulos anteriores dijimos que el riesgo de efectos estocásticos es proporcional a la Dosis Efectiva; también que el ICRP calculó el riesgo por unidad de Dosis Efectivas promediado para distintos grupos de edades (0 a 90 años para el Público, 18 a 65 años para los trabajadores). Estos factores no se aplican a los pacientes, ya que la distribución de edades (datos demográficos) es distinta. Conclusión: **no es posible estimar el riesgo para un paciente a partir del conocimiento de la dosis efectiva.**
- Rango de detrimentos por la utilización de la radiación en medicina: el rango de detrimentos para la salud del paciente es muy amplia siendo mínimo para, por ejemplo, una radiografía de tórax y muy alto para ciertos procedimientos terapéuticos o intervencionistas. El manejo de este problema es parte fundamental del trabajo de los profesionales intervinientes (médicos, técnicos, ingenieros, etc.).

Justificación de la protección radiológica en medicina

El criterio de JUSTIFICACIÓN de una práctica médica se aplica en tres niveles, descriptos en el Capítulo 8 de ICRP (2007):

- En el primer y más general de los niveles, el uso apropiado de la radiación en medicina es aceptado ya que es más beneficioso que dañino para la sociedad. Este nivel general de la justificación actualmente es dado por sentado y no se tratará más de aquí en adelante.
- En el segundo nivel, un procedimiento específico con un objetivo concreto es definido y justificado (p. ej. radiografía de tórax para los pacientes que muestran síntomas pertinentes o un grupo de individuos en riesgo debido a una condición que puede ser detectada y tratada). El objetivo del segundo nivel de justificación es juzgar si el procedimiento radiológico mejorará el

diagnóstico o el tratamiento, o proporcionará la información necesaria acerca de los individuos expuestos.

- En el tercer nivel, la aplicación del procedimiento a un paciente individual debería estar justificada (es decir, debería dictaminarse que la aplicación particular es más beneficiosa que dañina para el paciente individual). En consecuencia, todas las exposiciones médicas individuales deberían ser justificadas por adelantado, teniendo en cuenta los objetivos específicos de la exposición y las características del individuo involucrado. (ICRP, 2007, p. 33)

Guía para médicos prescriptores

Sin embargo, existe una innegable complicación en la justificación de estas prácticas médicas: el médico que prescribe un estudio no es casi nunca un profesional con conocimientos de protección radiológica. Por lo tanto, no está capacitado para evaluar la justificación o no de la práctica que prescribe. Por ese motivo, el ICRP elaboró una “Guía de Apoyo para Médicos Prescriptores” (ICRP 2001) donde en forma sencilla da algunas pautas para ayudar a la correcta indicación de los estudios radiológicos. Esta Guía fue traducida y publicada conjuntamente por la Sociedad Argentina de Radiología y la Sociedad Argentina de Radioprotección bajo el título “Guía de Recomendaciones para la correcta solicitud de pruebas de diagnóstico por imagen” (SAR, s/f).

En dicha Guía, se ofrecen algunas recomendaciones generales en un lenguaje sencillo tanto para profesionales como para pacientes. A modo de ejemplo, veamos algunas preguntas concretas que facilitan la comprensión: ¿A cuántas radiografías de tórax equivale el estudio que se va a realizar? O ¿A cuántos días de exposición a la radiación natural? Luego se clasifican los estudios diagnósticos en cinco rangos de dosis, comenzando con las que no utilizan radiación ionizante (NIVEL 0: ecografía, RMN) hasta las que generan una dosis efectiva mayor a 10 mSv (NIVEL IV, como algunos estudios PET). El resto del documento (páginas 16 a 133) indica para cada problema clínico cuáles son los estudios recomendados y su correspondiente nivel de dosis.

Prevención de accidentes

Existe una amplia casuística de eventos ocurridos en actividades médicas con fuentes de radiación que tuvieron consecuencias muy diversas sobre los profesionales, pero fundamentalmente sobre los pacientes.

Errores, administración equivocada de dosis (sobredosis y sub dosis), eventos anormales, mala praxis, discrepancias, eventos adversos, incidentes y accidentes son aspectos diferentes de los EVENTOS NO DESEADOS que pueden ocurrir. Trataremos este tema en un capítulo 11

(Radioterapia), analizando eventos ocurridos, sus causas y consecuencias, así como las diferentes estrategias para afrontar este tema crítico.

En este apartado, vale simplemente recordar la “Curva Resumen” del Capítulo 4 “Implementación práctica de los criterios básicos”:

- Siempre hay que tener presentes las medidas para prevenir, detectar y corregir situaciones anormales.
- Esas medidas se basan en Procedimientos Operativos y Sistemas de Seguridad.
- Es FUNDAMENTAL que exista un programa de calidad que incluya:
 - Control de funcionamiento y correcto mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento médico y de protección radiológica.
 - Entrenamiento y reentrenamiento del personal crítico (Médicos, Técnicos, etc.).
 - Ensayo y revisión de los procedimientos operativos.

Llamado De Bonn A La Acción

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) celebró la “Conferencia Internacional de Protección Radiológica en Medicina: Estableciendo el Escenario para la Próxima Década” en Bonn, Alemania, en diciembre de 2012, con el propósito específico de identificar y destacar temas surgidos de la protección radiológica en medicina. La conferencia fue copatrocinada por la Organización Mundial de la Salud (OMS); el anfitrión fue el Gobierno de Alemania a través del Ministerio de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear. Concurrieron 536 participantes y observadores de 77 países y 16 organizaciones. Un importante logro de la conferencia fue la identificación de responsabilidades y una propuesta de prioridades en la protección radiológica en medicina para la década siguiente, destinada a las partes interesadas (*stakeholders*): personas, instituciones o empresas que tienen alguna incumbencia en la protección radiológica de los pacientes. Entidades médicas (Hospitales, Clínicas, Sanatorios), Profesionales de la Salud, Organismos Reguladores, Asociaciones Profesionales, Fabricantes de Equipos, Ingenieros y empresas de mantenimiento, etc. Este resultado específico es el Llamado de Bonn a la Acción:

No hay duda de que la aplicación de la radiación ionizante y del material radiactivo en procedimientos de diagnóstico, intervencionismo y terapéuticos en medicina es beneficioso para millones de personas cada año. Sin embargo, el empleo de la radiación en medicina tiene que involucrar un cuidadoso equilibrio entre los beneficios de mejorar la salud humana y el bienestar, y los riesgos relacionados con la exposición de las personas a la radiación. Existe la necesidad de un enfoque holístico que incluya la colaboración de los gobiernos nacionales, la sociedad civil, los organismos internacionales, los investigadores,

los educadores, y las asociaciones e instituciones profesionales a fin de identificar, proponer e implementar soluciones para abordar los desafíos existentes y emergentes; y el liderazgo, la armonización y coordinación de actividades y procedimientos a nivel internacional (SAR, 2016).

Los objetivos del Llamado de Bonn a la Acción son:

- a) reforzar la protección radiológica de todos los pacientes y trabajadores de la salud;
- b) lograr el mayor beneficio con el menor riesgo posible para todos los pacientes mediante el uso apropiado y seguro de la radiación ionizante en medicina;
- c) colaborar a la plena integración de la protección radiológica dentro del sistema de asistencia sanitaria;
- d) ayudar a mejorar el diálogo beneficio/riesgo con los pacientes y el público; y
- e) mejorar la seguridad y calidad de los procedimientos radiológicos en medicina.

El Llamado de Bonn a la Acción resalta diez acciones principales, y las sub acciones relacionadas, que fueron identificadas como esenciales para fortalecer la protección radiológica en medicina en la próxima década. Se trata de las siguientes:

Acciones

- Acción 1: Mejorar la implementación del principio de justificación
- Acción 2: Mejorar la implementación del principio de optimización de la protección y la seguridad
- Acción 3: Fortalecer el papel de los fabricantes en contribuir al régimen global de seguridad
- Acción 4: Fortalecer la formación y capacitación de los profesionales de la salud en materia de protección radiológica
- Acción 5: Determinar y promover una agenda de investigación estratégica para la protección radiológica en medicina
- Acción 6: Aumentar la disponibilidad de información mundial mejorada sobre exposiciones médicas y sobre exposición ocupacional en medicina
- Acción 7: Mejorar la prevención de los incidentes y accidentes en los usos médicos de la radiación
- Acción 8: Fortalecer la cultura de la seguridad radiológica en la asistencia sanitaria
- Acción 9: Propiciar un mejor diálogo sobre el riesgo / beneficio de la radiación
- Acción 10: Fortalecer la implementación de requisitos de seguridad a nivel mundial

En años posteriores se realizaron reuniones, simposios y eventos y se llevaron a cabo trabajos de diversa índole para realizar el seguimiento de las pautas recomendadas. Al momento de la edición del presente libro se está preparando el evento SIPRAME 3 a llevarse a cabo en Santiago de Chile durante el año 2022 en el marco del 12 Congreso de Latinoamericano de la IRPA (International Radiological Protection Association).

Referencias

- HALL, E.J., (2000) *Radiobiology for the Radiologist*, Lippincott, Philadelphia, PA (2000).
- ICRP (2011). *Protección radiológica en medicina*, coordinado por Beatriz Gregori, 105.
- Sociedad Argentina de Radiología (SAR) (s/f). *Guía de recomendaciones para la correcta solicitud de pruebas de diagnóstico por imagen. Preparada por expertos argentinos en diagnóstico por imágenes en base a documentos utilizados por países de la Comunidad Europea*. Disponible en http://www.neumo-argentina.org/images/guias_consensos/guia_prp.pdf
- ICRP (2001). *Radiation and your patient - A Guide for Medical Practitioners*. ICRP Supporting Guidance 2. Ann. ICRP 31 (4).
- ICRP (2007). *Recomendaciones de la Comisión Internacional de Protección Radiológica*, Publicación 103. [Traducción oficial al español de la Sociedad Española de Protección Radiológica]
- Directiva 97/43/Euratom del Consejo de 30 de junio de 1997 relativa a la protección de la salud frente a los riesgos derivados de las radiaciones ionizantes en exposiciones médicas, por la que se deroga la Directiva 84/466/Euratom. (1997). *Official Journal*, L 180, 22-27. CELEX
- Sociedad Argentina de Radioprotección (2016). *10 Acciones para Mejorar la Protección Radiológica en la Próxima Década, Llamado de Bonn a la Acción*. Disponible en https://radioproteccionsar.org.ar/downloads/publicaciones/Llamado_de_BONN.pdf Fecha de consulta: febrero de 2022.

CAPÍTULO 9

Protección radiológica en radiología

Gustavo Sánchez

Introducción

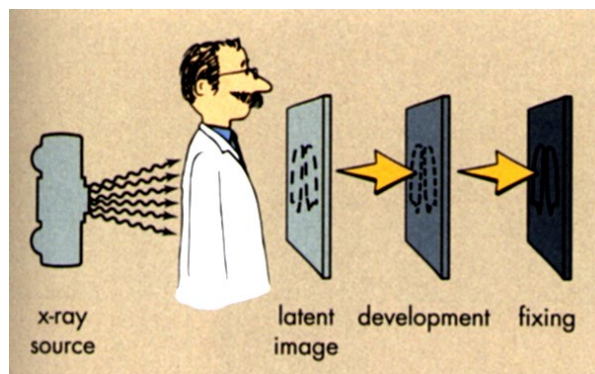
En el presente Capítulo, aplicaremos los temas explicados previamente a la protección radiológica en radiología.

La radiología es un campo muy amplio, que incluye diferentes tipos de técnicas y equipos de diagnóstico. El principio de producción de Rayos X, las características de los equipos y su modo de uso exceden el ámbito de esta materia, por lo que nos limitaremos a una muy somera descripción de las técnicas.

Radiografía

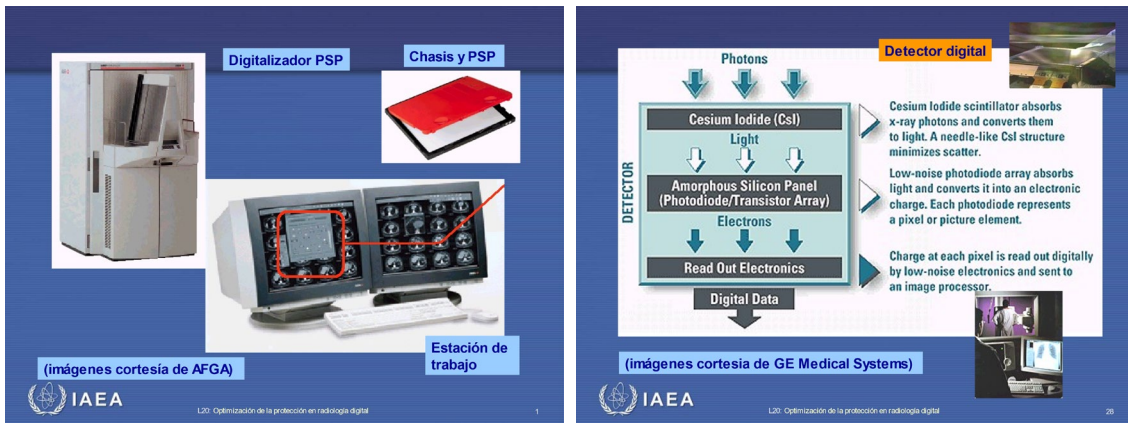
Consiste en obtener una imagen estática de una región anatómica que sirva para realizar, confirmar o especificar un diagnóstico. La imagen se obtiene eligiendo el kV, mA, tiempo de irradiación y otros parámetros adecuados (lo que en la jerga se denomina “la técnica”); el kilovoltaje va desde 50 kV hasta 120 kV aproximadamente. La imagen se genera sobre una placa que tendrá que ser procesada (revelado, lavado intermedio, fijado y secado) (véase la Figura 9.1). En radiología digital el revelado se reemplaza por un procesamiento digital (véase la Figura 9.2). La calidad de la imagen (y por ende su valor diagnóstico) está determinada por muchos factores. La Figura 9.3 muestra el efecto de uno de ellos: la tensión aplicada (kV).

Figura 9.1. Esquema de Radiografía Analógica.



Fuente: IAEA (2007).

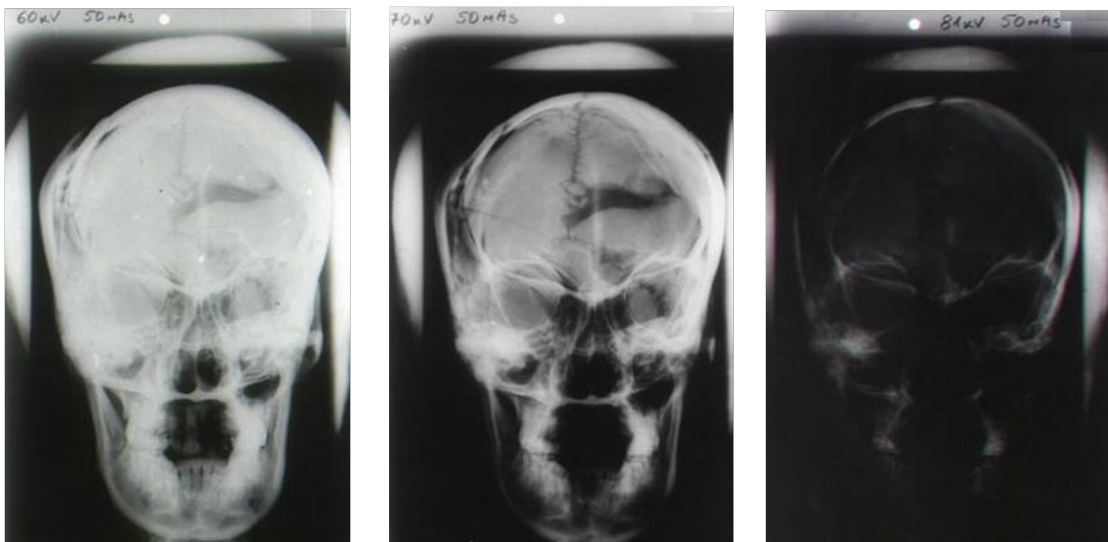
Figura 9.2. Radiografía digital.



Nota. Izquierda: digital indirecto. Derecha: digital directo. Fuente: IAEA (2007).

Figura 9.3. Efecto de la tensión entre ánodo y cátodo (kilovoltaje) sobre la imagen, manteniendo constante la carga sobre el tubo (producto de la intensidad de corriente y el tiempo de exposición).

60 kV, 50 mAs 70 kV, 50 mAs 80 kV, 50 mAs

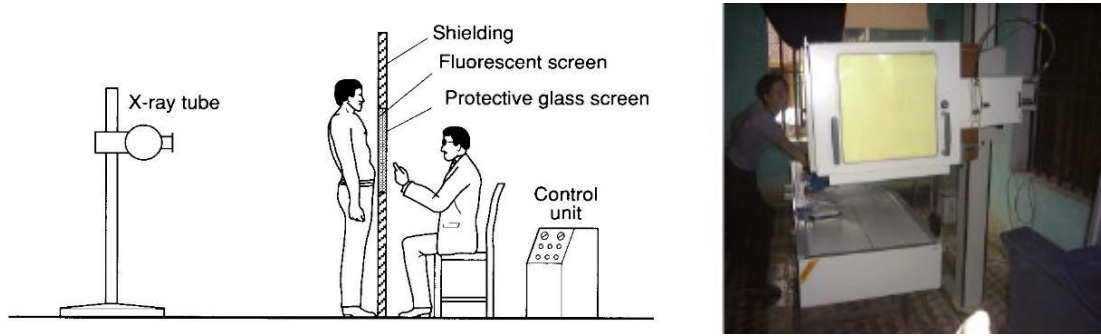


Nota. Al aumentar el kV sin cambiar el producto mAs, decrece significativamente el contraste de la imagen y su calidad va empeorando. Fuente: IAEA (2007)

Fluoroscopia

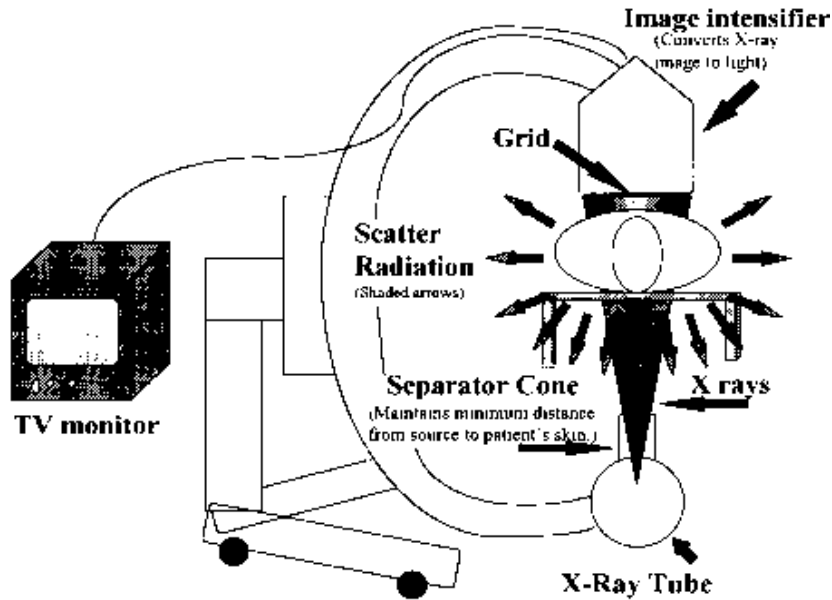
En este caso la imagen es dinámica, es decir: se observa el movimiento de los órganos o tejidos objeto de estudio, o de la manera en que circula un líquido de contraste. En los inicios, la observación se hacía directamente sobre la pantalla fluoroscópica donde se generaba la imagen, lo que generaba una alta dosis de radiación al personal interviniente. Hoy la radiación interactúa con un dispositivo que a su vez genera una señal que se procesa y permite ubicar los monitores en lugares más adecuados. El tiempo no se programa, sino que el equipo seguirá irradiando mientras el operador presione un pedal o pulsador (véanse las Figuras 9.4 y 9.5).

Figura 9.4. Fluoroscopia directa.



Nota. Izquierda: esquema. Derecha: pantalla fuoroscópica actual. Fuente: IAEA (2007)

Figura 9.5. Esquema de un equipo Arco en “C” con intensificador y visualización por monitor.



Fuente: IAEA (2007).

Intervencionismo

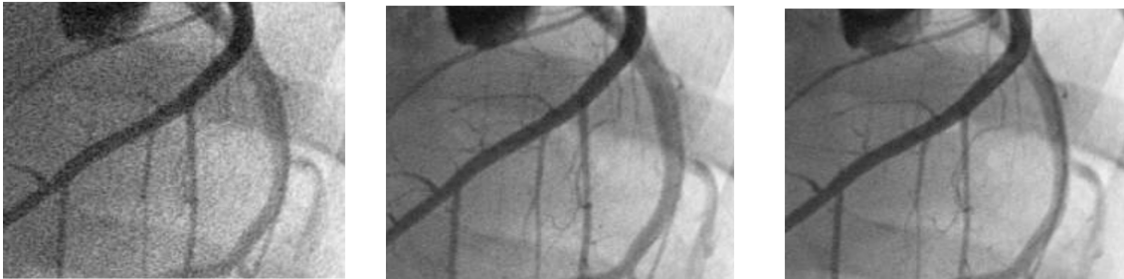
Consiste en la adquisición de imágenes fluoroscópicas para guiar un procedimiento quirúrgico mínimamente invasivo (angiografía, embolización, reemplazos valvulares, Bloqueo Raíces Nerviosas, Biopsias Estereotáxicas, etc.). Las imágenes deben tener una calidad suficiente para, por ejemplo, guiar un catéter desde donde se lo introduce hasta el punto donde se debe colocar un stent. La resolución de las imágenes es menor que la requerida para diagnóstico (véanse las Figuras 9.6 y 9.7).

Figura 9.6. Equipos “Arco en C” para intervencionismo.



Nota. Izquierda: con Intensificador de Imágenes. Derecha: con detector tipo “Flat Panel”. Fuente: IAEA (2007)

Figura 9.7. Imágenes coronarias en intervencionismo.

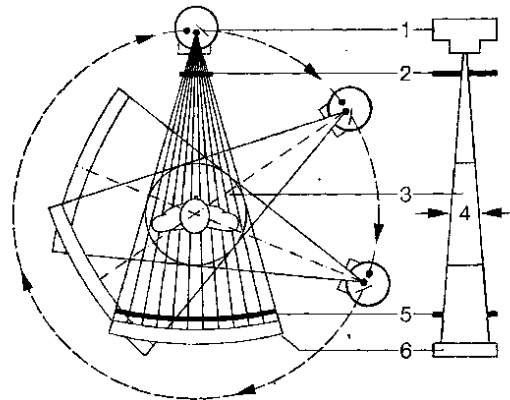


Nota. La imagen de la izquierda se genera con una dosis de 20 nGy/frame y es muy ruidosa. En la segunda la dosis es 150 nGy/frame y el ruido es mucho menor, la información es suficiente para el propósito de la práctica. La imagen de la derecha tiene una calidad innecesariamente buena a un “costo” de 240 nGy/frame. Fuente: IAEA (2007)

Tomografía

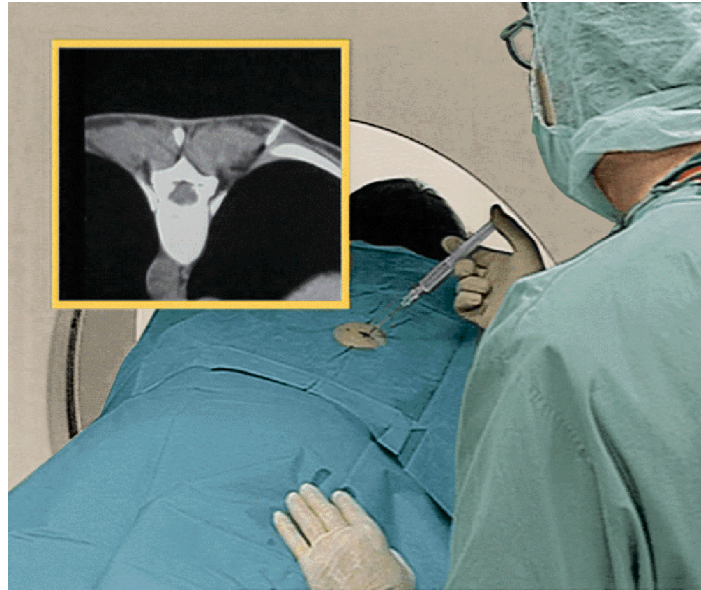
Las imágenes se generan procesando señales que se producen en detectores situados en oposición al tubo de rayos X (Figura 9.8). También se pueden realizar procedimientos intervencionistas guiados por tomografía (Figura 9.9).

Figura 9.8. Tomografía Computada.



Nota. Izquierda: fotografía del interior de un tomógrafo; Derecha: esquema de funcionamiento. El conjunto “tubo de Rx (1) – Detector (6)” gira alrededor del paciente; el haz de radiación está limitado por el colimador (2) proyectando un haz de unos pocos mm en un plano perpendicular a la figura y de ancho creciente desde el tubo, colimador (2), plano del paciente (4) y altura del detector (5). Forma lo que se denomina “fan beam”, que se podría traducir como “aspas de molino”. Fuente: IAEA (2007)

Figura 9.9. Procedimiento intervencionista guiado por tomografía.

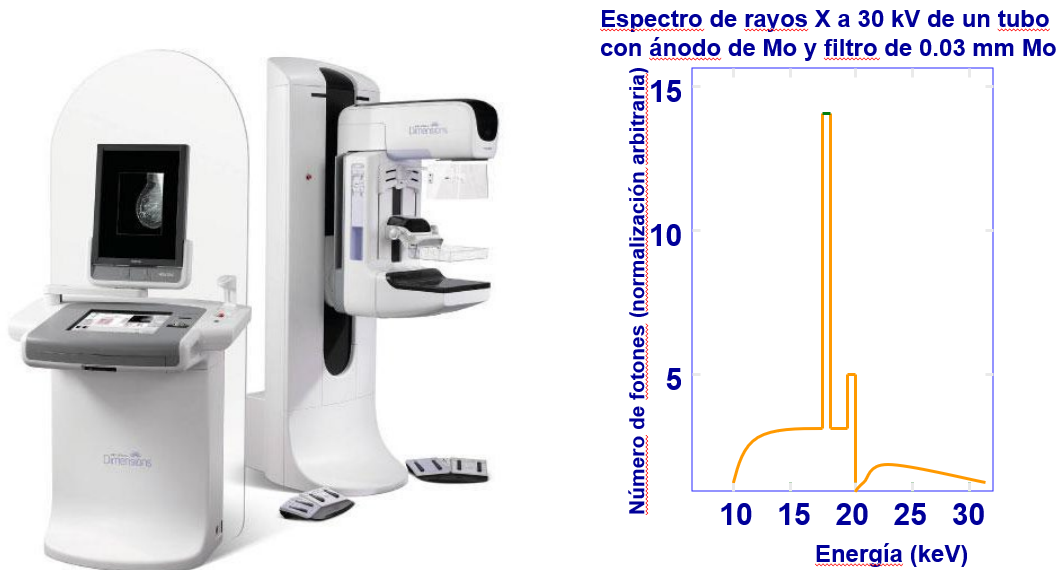


Nota. El profesional debe utilizar protecciones plomadas, ya que, a diferencia de lo que ocurre en los procedimientos diagnósticos, debe permanecer en la sala durante la intervención. Fuente: IAEA (2007).

Mamografía

La obtención de imágenes con rayos X se basa en la diferente atenuación que brindan los distintos tejidos. En la mamografía, los tejidos involucrados tienen densidades similares y además se requiere una alta resolución espacial. Por tanto, los ánodos de los equipos de mamografía deben generar fotones de muy baja energía (entre 20 y 40 Kev) y tener una muy baja contribución de fotones de menor energía. (Figura 9.10)

Figura 9.10. Mamografía.



Nota. Izquierda: fotografía de un mamógrafo con su comando (véase la pantalla blindada, que según la instalación, puede ser el único blindaje de la instalación). Derecha: Espectro de Rx de un tubo de de 30 kV y ánodo de Molibdeno. Nótese la altura de los picos de radiación característica y la baja componente de radiación de frenado. Fuente: IAEA (2007)

Figura 9.11. *Imagen mamográfica.*



Nota. Nótese el alto contraste, que no se podría lograr con radiación de mayor energía. IAEA (2007).

Odontología

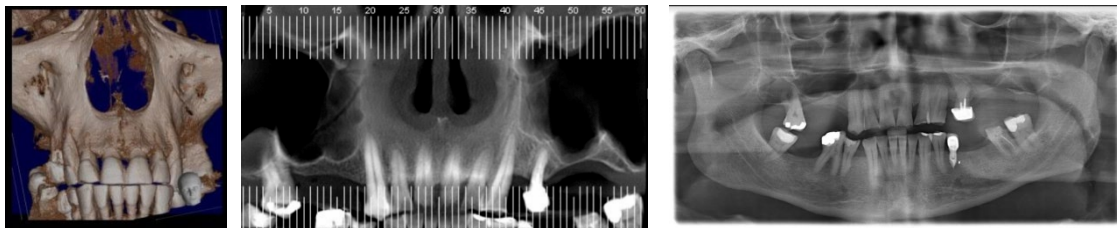
En odontología se emplean diferentes procedimientos radiológicos. El más común es la obtención de radiografías periapicales. También tenemos radiografías panorámicas, tomografías (en modo *Cone Beam*) y cefalometría (véanse la Figura 9.12 y Figura 9.13).

Figura 9.12. *Equipos de Rx en odontología.*



Nota. Izquierda: Equipo para placas odontológicas periapicales. Centro: Equipo para tomografías odontológicas. Derecha: Equipo para panorámicas. Fuente: Gentileza del Instituto Radiológico Dental Dr. Hugo Dagum.

Figura 9.13. Radiología odontológica.



Nota. Izquierda: Reconstrucción 3D a partir de una tomografía. Centro: Reconstrucción panorámica a partir de la TAC ("panorex de la TAC"). Derecha: Panorámicas. Fuente: propiedad del autor

Densitometría

La *densitometría* ósea es una prueba de diagnóstico por imágenes que mide el calcio y otros minerales en los huesos. Utiliza haces de radiación muy pequeños. La imagen se acompaña de una información cuantitativa de los parámetros bajo estudio.

Diseño de salas de rayos X

Radiología y radioscopía

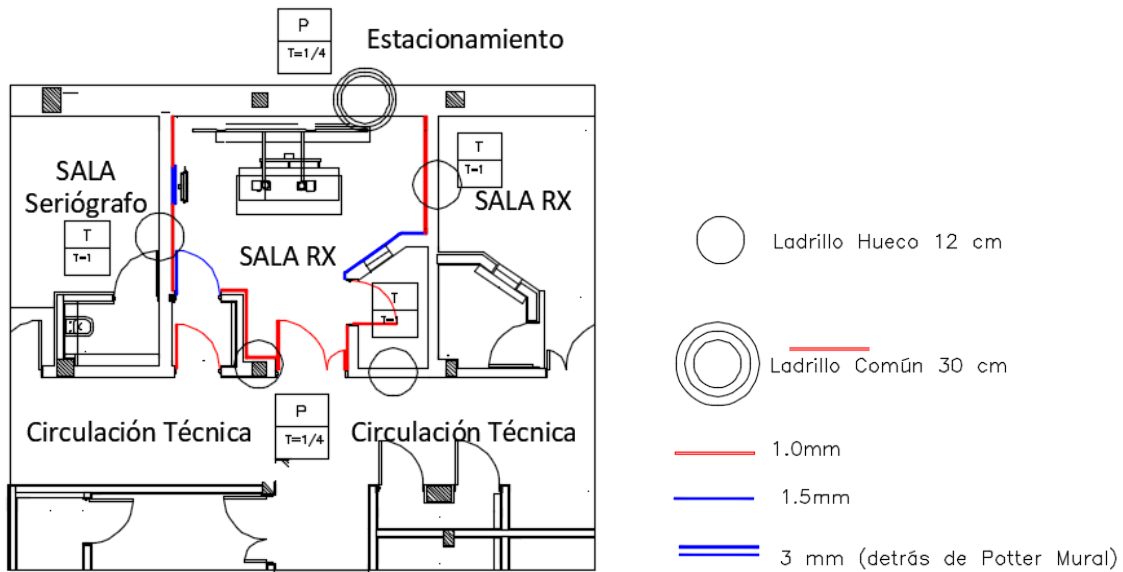
Procedimiento general

El diseño de las salas de radiología comienza por saber qué equipo funcionará en ella y qué tipo de estudios se van a realizar, no a la inversa. Parece algo obvio, pero más de una vez se han construido salas que después fue necesario modificar porque el equipo no podía operar o directamente no cabía en la sala.

Una vez conocida la disposición del equipo y elementos auxiliares, las dimensiones de la sala, la disposición y destinos de los locales adyacentes (en el mismo piso, el superior y el inferior) se realiza el cálculo de los **blindajes estructurales** necesarios. Repasando lo visto en los capítulos previos, el procedimiento es el siguiente:

1. Se determinan las restricciones de dosis aplicables a cada local. Recordar que todos los locales que no forman parte de la sala se deben considerar ocupados por miembros del público, mientras que sólo se aplicará la restricción para exposición ocupacional al blindaje estructural del comando.
2. Se identifican las **barreras primarias** y las **barreras secundarias**. Las barreras primarias son las que reciben radiación que emana directamente del equipo, aun la que atraviesa el paciente (Piso bajo camilla, Potter Mural, parte de la pared si el tubo incide lateralmente, etc.), mientras que la radiación secundaria, como ya dijimos, está formada por la radiación de fuga más la dispersa.
3. De acuerdo con las características constructivas del equipo, se estima la carga de trabajo W .
4. Se calcula la distancia desde el foco del equipo (para radiación directa y fuga) o desde el paciente (para dispersa) hasta el punto de cálculo.

Figura 9.14. Ejemplo de distribución de una sala con tubo sobre camilla y Potter Mural.



Nota. T es el factor de ocupación del local y P la restricción aplicable.

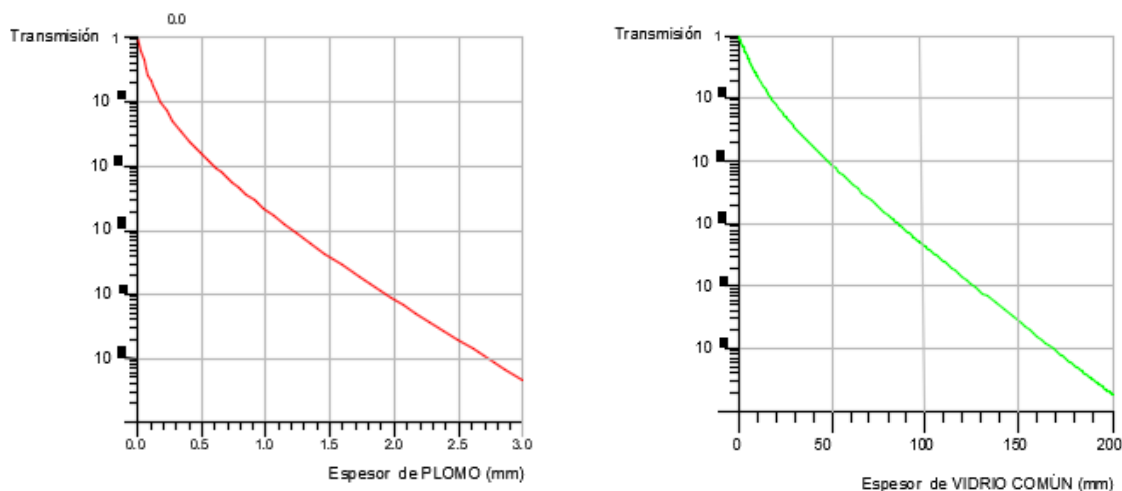
5. Se calcula la transmisión máxima (Atenuación mínima) que debe tener la barrera, usando la expresión (ya explicada)

$$B = \frac{P \cdot d^2}{W \cdot U \cdot T}$$

6. Se elige la curva de transmisión que corresponde a) Al tipo de barrera (Primaria o Secundaria). b) A la energía de la radiación, de acuerdo con el uso (mamografía, radiografía, radioscopia, etc) y c) Al material de la barrera existente (por ejemplo: mampostería, hormigón, etc). Conociendo el espesor de cada barrera se calcula la transmisión de la barrera existente. Luego se elige el material del blindaje (generalmente, pero no exclusivamente, Plomo) y mediante el procedimiento inverso se calcula el espesor de blindaje a agregar (véanse las Figuras 9.15 y 9.16).

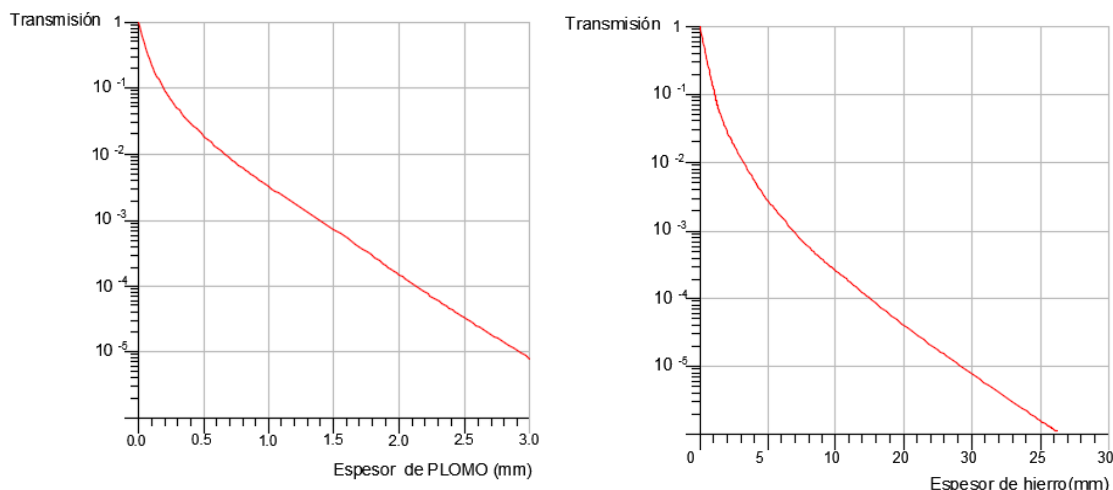
- Comentario: Si las paredes son de ladrillo es necesario agregar menos plomo que si las paredes fueran de placas de yeso. Sin embargo, en centros hospitalarios de cierta complejidad es habitual cambiar los equipos con cierta frecuencia, por lo que las paredes se construyen con placas de yeso, que son más fáciles de mover. En este caso el aumento del costo del plomado se compensa con la disminución de costos al cambiar el tamaño de la sala moviendo las placas de yeso.

Figura 9.15. Curvas para TRANSMISIÓN PRIMARIA en Plomo y Vidrio



Nota. Izquierda: transmisión vs espesor de plomo para espectro de radiación primaria de un equipo de radiografía. Derecha: transmisión vs espesor de vidrio en las mismas condiciones. Se puede observar que, por ejemplo, para lograr una transmisión de 10^{-4} se requieren aproximadamente 2mm de Plomo y 130 mm de vidrio (En condiciones de haz ancho). Fuente: NCRP (2004)

Figura 9.16. Curvas para TRANSMISIÓN SECUNDARIA en Plomo y Hierro.

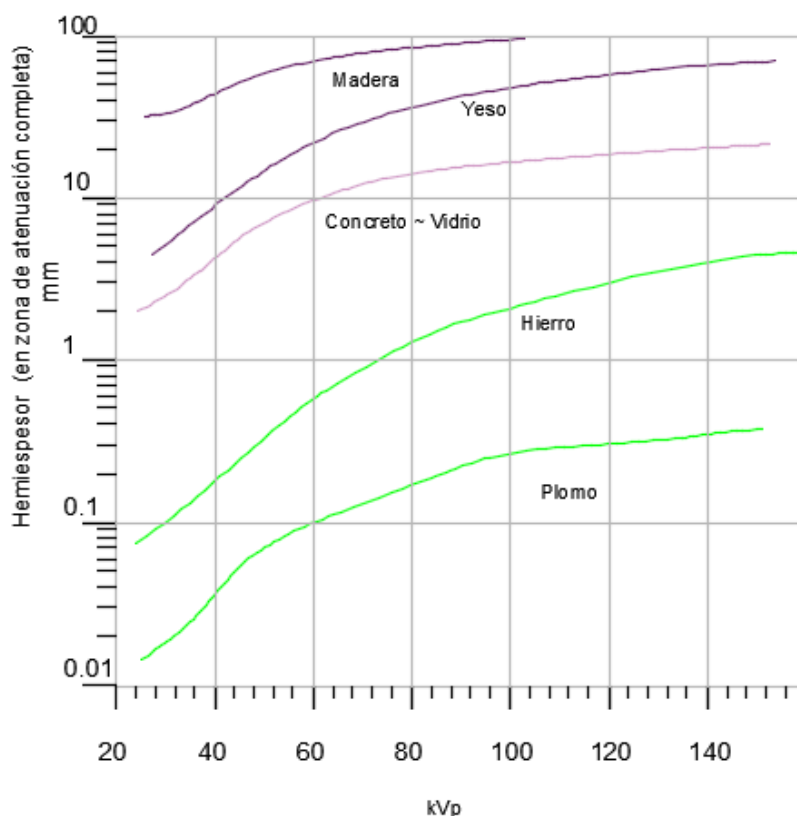


Nota. Izquierda: transmisión vs espesor de plomo para espectro de radiación secundaria de un equipo de radiografía (Rad Room – Floor and Other Barriers). Derecha: transmisión vs espesor de hierro en las mismas condiciones. Se puede observar que, por ejemplo, para lograr una transmisión de 10^{-4} se requieren aproximadamente 2.1 mm de Plomo y 15 mm de hierro (En condiciones de haz ancho). Fuente: NCRP (2004)

Observar que:

- Se requiere menos espesor para radiación secundaria que para radiación primaria.
- No hay curva para radiación directa en Mamografía, simplemente debido a que por diseño la radiación directa incide sobre un detector que brinda suficiente atenuación.
- No hay un único material útil para blindajes estructurales. El plomo es el más utilizado por tener una buena relación costo-eficiencia. En la curva siguiente (Figura 9.17) se observa la relación entre hemiespesores (HVL) de distintos materiales.
- El vidrio tiene una capacidad de atenuación muy parecida a la del concreto.

Figura 9.17. Comparación de Hemiespesores para diferentes materiales y energías.



Fuente: NCRP (2004).

Procedimiento particular en salas de tomografía

Los tomógrafos están diseñados de tal manera que el conjunto detector tiene un blindaje propio, de modo que no hay radiación primaria, todas las barreras son secundarias.

Es muy importante ubicar el comando en la zona de menor dosis, ya que así se necesitará menos blindaje.

Cuando sea necesario que algún profesional deba estar al lado del paciente, la zona de menor dosis es al lado del gantry.

La ventana del comando suele ser grande (Figura 9.18). Un visor de vidrio plomado de ese tamaño suele ser extremadamente caro, por lo que generalmente se contruye con varias capas de vidrio común (espesor total de entre 10 y 14 cm). Visualizar al paciente mediante un circuito cerrado de TV disminuiría los costos sin afectar la seguridad; es una opción que se utiliza cada vez con más frecuencia.

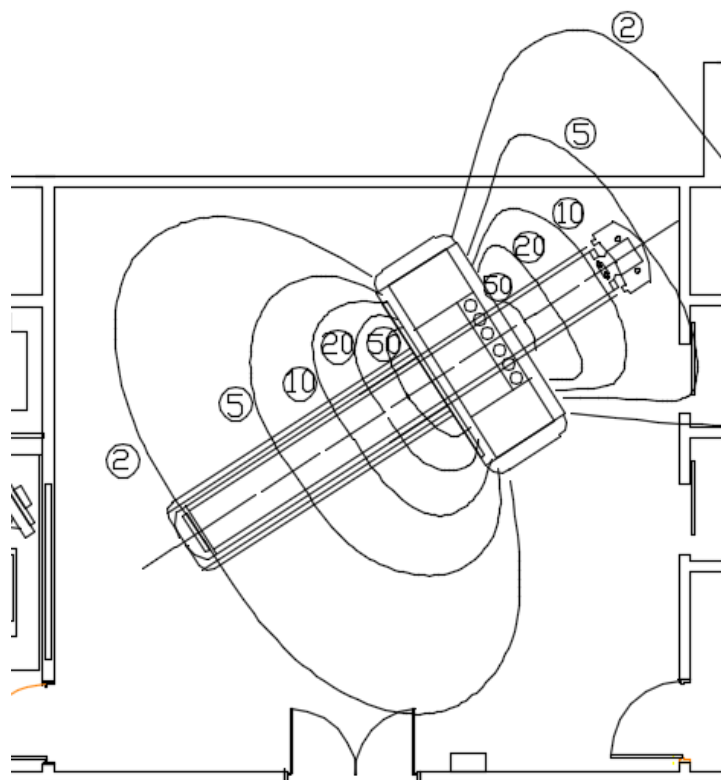
Figura 9.18. Montaje del visor de una sala de tomografía.



Fuente: IAEA (2007).

Además, a diferencia de los equipos de radiografía (donde la distribución de dosis se considera isotrópica), en las tomografías computadas (TC), las curvas de isodosis tienen una forma de “reloj de arena”, como se observa en la imagen siguiente (Figura 9.19):

Figura 9.19. Curvas de isodosis de un tomógrafo (planta).

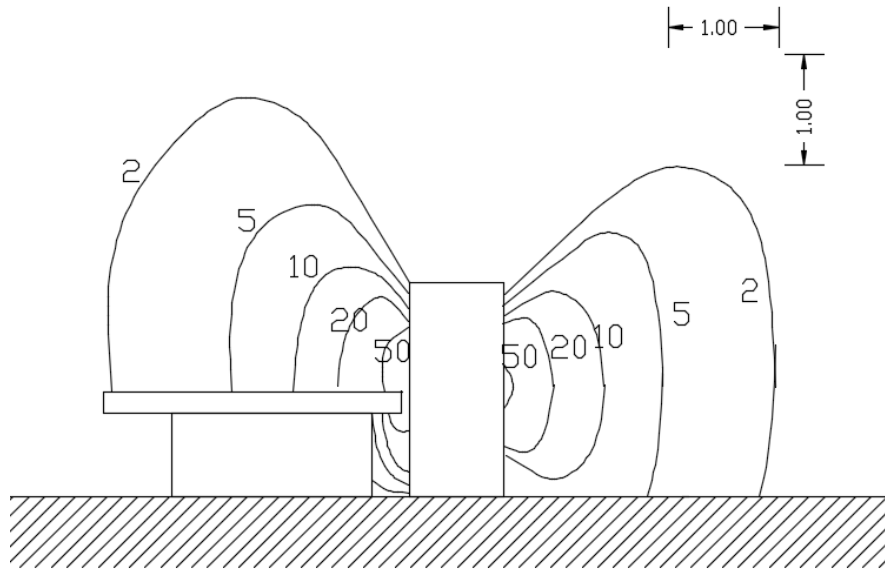


Nota. Los valores son válidos exclusivamente para un determinado modelo de equipo y condiciones de irradiación. Para la figura: Toshiba Aquilion 135KV/100mA/1-S SCAN/SCAN/CAMPO L/1.0mmX40 fantoma de diametro 320MM PMMA; UNIDAD . microGy. Nótese la importancia que tiene para el diseño la precisión en la ubicación del equipo.

Para determinar la dosis en los puntos de cálculo en ausencia de blindajes se utilizan dos métodos:

Método de las curvas de isodosis: el fabricante suministra las curvas de distribución de dosis para una exploración determinada (cabeza o abdomen, espesor de corte, mA, etc.). La carga de trabajo K_s se estima ponderando la cantidad de estudios de cada tipo que es razonable que se vayan a realizar. Una limitación de este método es que hay muchos factores que pueden modificar los valores graficados. Un factor de sobreestimación razonable, es asumir que todas las tomografías que serán de abdomen.

Figura 9.20. Curvas de isodosis de un tomógrafo (elevación).



Nota. Los valores son válidos exclusivamente para un determinado modelo de equipo y condiciones de irradiación. Para la figura: Toshiba Aquilion 135KV/100mA/1-S SCAN/SCAN/CAMPO L/1.0mmX40/fantoma de diametro 320mm PMMA; unidad: microGy

Método analítico: se calcula K_s a partir del Índice de Dosis en TC (CTDI); la Longitud del paciente escaneado “L” y el Pitch “P”, y una constante κ ($9 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ para cabeza y $9 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ para *body*) que es la relación entre la dosis que recibe el paciente (estrictamente la Dose Line Integral DLI) y la tasa de Kerma a una distancia unitaria. Al ser K_s un valor semanal es proporcional también a la cantidad de estudios que en promedio se realizan en ese período de tiempo de cada tipo de estudio (simplificando: cabeza y cuerpo).

En la Tabla 9.1 se muestra un ejemplo de cálculo a partir de valores de una instalación real y otros tomados de NCRP (2004).

$$K_{\text{sec}} = \kappa \times N_R \times T_b \times mA_s \times nCTDI_{100}$$

Tabla 9.1. Valores de los parámetros para el cálculo del Kerma semanal en aire que genera un tomógrafo (normalizado a 1m del isocentro)

Pacientes por semana	N	100 pacientes/sem (60 cuerpo/40 cabeza)
Fracción de dispersión	K	Cabeza 9.0×10^{-5} 1/cm Cuerpo 30.0×10^{-5} 1/cm
Longitud	L	Cabeza 20 cm Cuerpo 50 cm
Pitch	P	Cabeza 1.00 Cuerpo 1.35
Número de rotaciones (L/P)	N _R	Cabeza 20 Cuerpo 37
Índice de Dosis en Tomografía Computada	nCTDI ₁₀₀	Cabeza 0.223 mGy/mAs Cuerpo 0.138 mGy/mAs
Tasa de Kerma en aire por radiación secundaria por paciente	K^1_{sec}	Cabeza 0.12 mGy/paciente Cuerpo 0.38 mGy/paciente
TASA DE KERMA EN AIRE A UN METRO, TOTAL SEMANAL	K_{sec}	$\cong 30$ mGy/sem@1m

Fuente: NCRP (2004).

Mamografía, odontología y densitometría

En mamografía, densitometría y Rx odontológico para placas periapicales solo se tiene en cuenta la radiación secundaria. Sólo se consideran barreras primarias en radiografías panorámicas, tele radiografía y tomografías odontológicas. El método de cálculo es el mismo que para Rx convencional.

En la mayoría de las salas de mamografía, si las paredes son de mampostería no es necesario adicionar blindajes, excepto en las puertas que estén cerca del equipo. Si las paredes son de yeso suele ser suficiente 0.5 mm de Pb. Para la protección del operador el propio equipo tiene pantallas de vidrio o vidrio plomado especialmente diseñadas.

En consultorios odontológicos que sólo empleen equipos para radiografías periapicales los requerimientos son mínimos. Suele ser suficiente con blindar la puerta o colocar una mampara de 0.5mm de plomo, mientras que las paredes de mampostería ofrecen blindaje suficiente. Todas las barreras están sometidas exclusivamente a radiación dispersa o fuga.

Para la toma de placas panorámicas o tomografías odontológicas, los requerimientos son similares a los de la radiografía convencional. Generalmente son recintos pequeños y el comando se coloca por fuera de la sala.

Otra práctica médica con Rx es la densitometría ósea, donde se emplean campos muy pequeños y bajo kV, por lo que la radiación dispersa es de muy baja intensidad y muy baja energía. Suele ser suficiente colocar una pantalla de 0.5 mm al lado del operador. Muy rara vez es necesario blindaje estructural.

Protección radiológica ocupacional

Generalidades

Dado que en este caso, la única fuente de exposición es la radiación X proveniente de los tubos de RX se utilizan las tres herramientas para protección contra la radiación: Tiempo, Distancia y Blindaje.

El uso del **tiempo** como herramienta de protección es muy importante cuando utilizamos técnicas fluoroscópicas, ya sea para diagnóstico o intervencionismo. Para esto es imprescindible el uso de técnicas adecuadas, con personal suficientemente entrenado. En las radiografías o tomografías una correcta elección de las técnicas y ejecución del procedimiento evitará repeticiones de estudios con una doble exposición tanto para el personal como para el paciente.

La **distancia** es una herramienta útil cuando sea necesaria la presencia de personal dentro de la sala. En ese caso, es necesario maximizar la distancia entre XX y el paciente tanto como sea razonable sin afectar la eficacia del estudio o práctica, por ejemplo usando tubos de extensión para inyectar líquidos de contraste o colocar catéteres.

Blindajes localizados

- Pantallas fijas y rodantes, biombos plomados.
- Blindajes propios de los equipos: pantallas de techo, polleras plomadas.
- Chalecos y delantales plomados. Deben cubrir desde debajo de la rodilla hasta el cuello. Si el trabajador debe moverse dentro de la sala durante el procedimiento, es necesario que cubra también la espalda.
- Protector tiroideo.
- Anteojos plomados para protección del cristalino.
- Véanse las Figuras 9.21 y 9.22 para ejemplos de blindajes localizados.

Figura 9.21. *Blindajes localizados en radiología: Pantalla plomada colgante; protector tiroideo.*



Fuente: IAEA (2007).

Figura 9.22. Protecciones de un “Arco en C” en una sala de intervencionismo.



Nota. Pantalla rodante, pantalla colgante, blindaje lateral de camilla Fuente: IAEA (2007)

Los blindajes localizados tienen espesores normalizados (desde 0,25 a 1 mm de Plomo equivalente). Están diseñados para proteger de la radiación secundaria, que es de más baja energía y por lo tanto menor penetración que la *radiación primaria*. Ninguna parte del cuerpo debería exponerse a la *radiación primaria*, aunque en algunos casos (intervencionismo) puede ser inevitable que parte de las manos del médico queden dentro del haz útil. No han demostrado ser de mucha utilidad los guantes o mitones plomados.

Es fundamental el mantenimiento y buen uso de los delantales plomados: si se doblan o arrugan pierden eficacia (véase la Figura 9.23). Un tema controversial respecto de los delantales plomados es la fecha de vencimiento; erróneamente se suele pensar que los deteriora la radiación. En realidad, el motivo del deterioro es que al tratarse de goma plomada, con el uso, por efecto de la gravedad, el plomo fluye y la atenuación deja de ser uniforme.

Figura 9.23. Ejemplos de mal almacenamiento de delantales plomados.



Fuente: IAEA (2007).

Otra cuestión a tener en cuenta es que, siempre que sea posible, hay que usar pantallas (fijas o móviles) en forma complementaria al uso de delantal plomado.

Finalmente, cuando se maneja el equipo desde una sala blindada no es necesario el delantal plomado. Si la puerta de la sala está plomada, hay que operar con la puerta cerrada.

Dosimetría personal

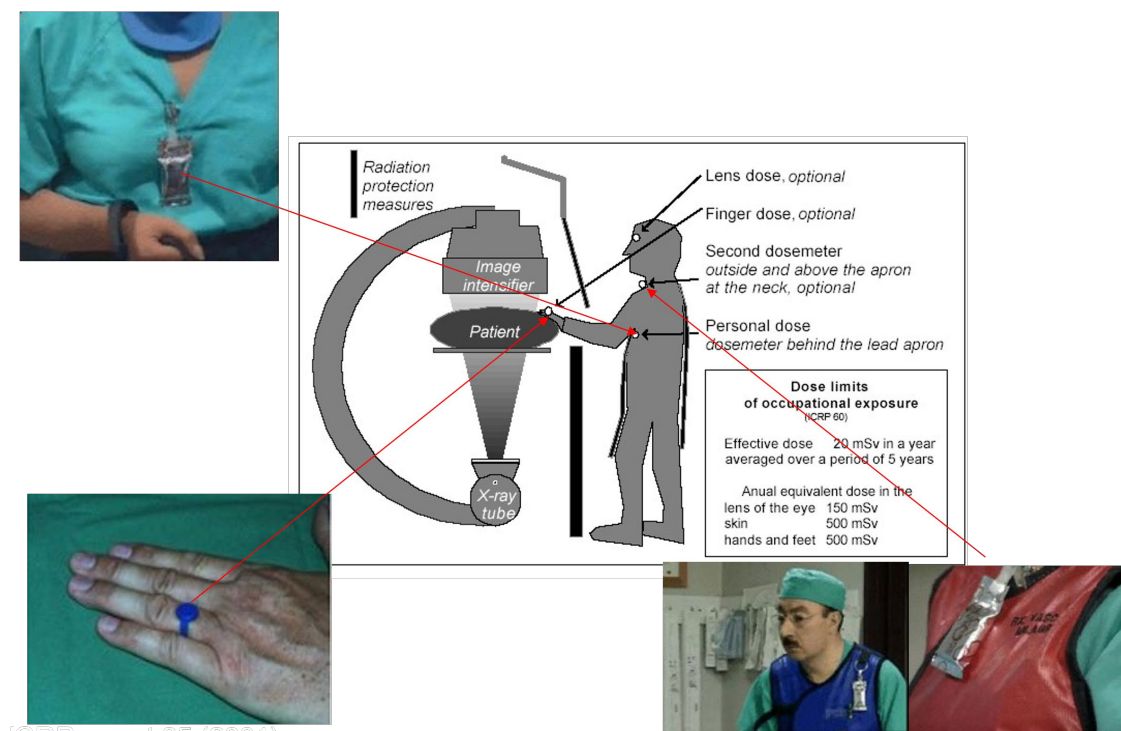
Excepto cuando se utilizan técnicas fluoroscópicas en las que uno o más trabajadores están cerca del equipo, es suficiente usar **un solo dosímetro**. Si no usamos delantal plomado, dicho dosímetro debe colocarse a la altura del tórax, ya que normalmente esa es la parte del cuerpo más expuesta. Al colocar un delantal plomado tenemos una disyuntiva: como mencionamos en el Capítulo 2, “magnitudes radiológicas”, la dosis que quisiéramos conocer es la Dosis Efectiva, que es la dosis promediada en todo el cuerpo, pero lo que realmente medimos es la dosis equivalente individual, con un dosímetro que indica la dosis en un punto. De esta manera, si colocamos el dosímetro debajo del delantal plomado estaremos subestimando levemente la Dosis Efectiva, ya que hay una parte del cuerpo no protegida. En cambio, si lo colocamos por encima del delantal plomado estaremos sobreestimando mucho, ya que la mayoría de los órganos con Wt más alto están cubiertos. En resumen: si lo colocamos encima sobreestimamos mucho, pero si lo colocamos debajo, subestimamos un poco. ¿Qué hacemos, entonces? El consenso es que si las dosis son habitualmente y consistentemente bajas se use debajo del delantal plomado (aunque el consenso no es unánime).

Cuando se emplean equipos de Arco en C en intervencionismo, generando dosis altas (como por ejemplo en hemodinamia), es necesario usar más de un dosímetro: uno por encima y otro por debajo del delantal plomado. La dosis efectiva E se calcula haciendo un promedio ponderado entre ambos empleando la siguiente expresión:

$$E = 0.5 H_w + 0.025 H_n$$

donde: H_w es la dosis al nivel de la cintura bajo el delantal y H_h la dosis registrada por un dosímetro colocado al nivel del cuello, encima del delantal.

Figura 9.24. Sistema de dosimetría para monitoreo individual en intervencionismo.



Fuente: IAEA (2007).

En intervencionismo también es necesario monitorear la dosis en manos y en cristalino. Se debe monitorear la dosis en mano en términos de $H_{p(0.07)}$. Para estimar dosis en cristalino puede usarse un dosímetro apropiado (pequeño, colocado en la parte interna del antepejo), calibrado en términos de $H_{p(0.3)}$, aunque se suele usar, con reservas, la lectura del dosímetro externo a la altura del cuello.

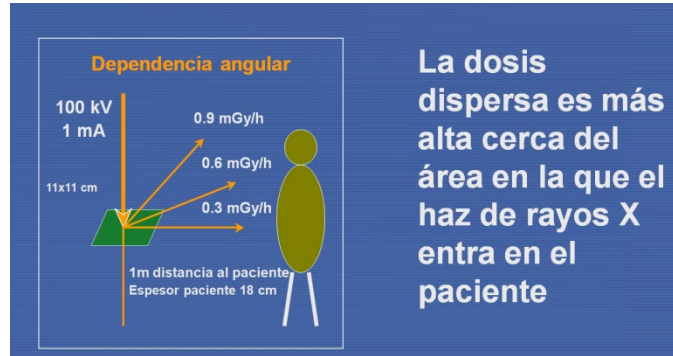
Recordemos que a fines legales hay que utilizar un sistema de lectura diferida (Filmo, TLD, OSL) realizado por una empresa autorizada para tal fin. Los dosímetros electrónicos de lectura directa son muy útiles pero complementan, no reemplazan el uso del sistema autorizado.

Las dosis en radiología son muy inferiores a los límites, según muestran estudios sobre un gran número de trabajadores monitoreados (UNSCEAR, 2008). Es necesario aclarar que todos los sistemas de dosimetría tienen un nivel mínimo de dosis registrable: si no se supera ese valor, la dosis se informa como cero. Dado que este es el caso de la inmensa mayoría de los radiólogos, el promedio es muy bajo. Una situación, lamentablemente muy frecuente, es la de los trabajadores ocupacionalmente expuestos, quienes desconfían de los sistemas de monitoreo creyendo erróneamente que un resultado negativo significa que no recibieron ninguna dosis en absoluto.

Distribución de dosis en equipos Arco en C en Intervencionismo

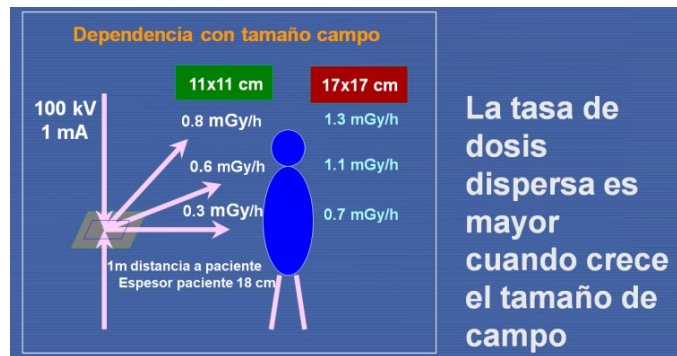
Como se observa en las Imágenes 9.25 a 9.29, la tasa de dosis depende de múltiples factores: la ubicación del operador, el kV y los mA, el tamaño de campo, la distancia, la ubicación del tubo, entre otros.

Figura 9.25. Influencia de la posición.



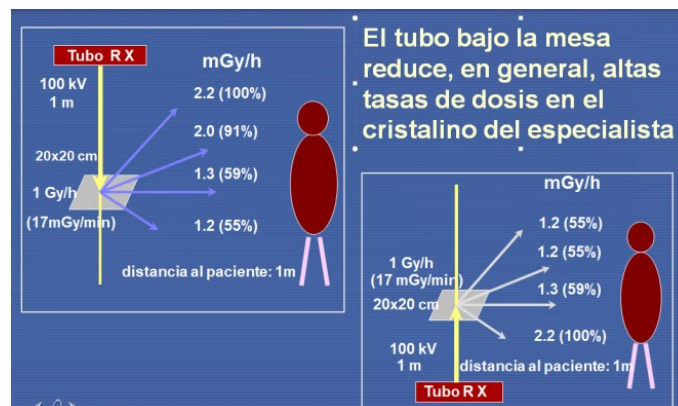
Fuente: IAEA (2007).

Figura 9.26. Influencia del tamaño de campo.



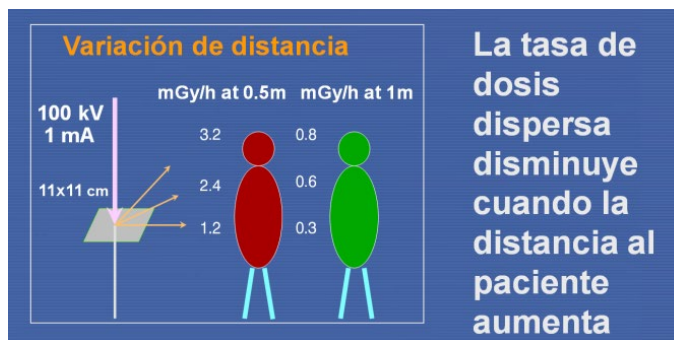
Fuente: IAEA (2007).

Figura 9.27. Influencia de la ubicación del tubo.



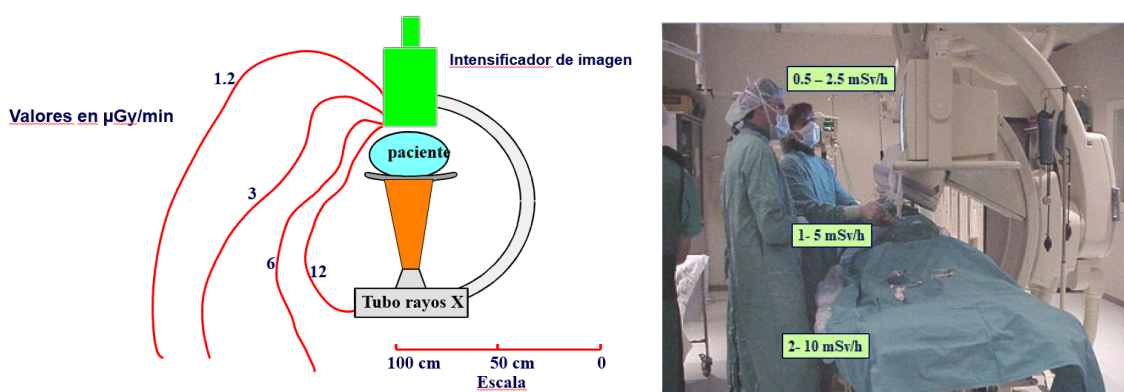
Fuente: IAEA (2007).

Figura 9.28. Influencia de la distancia al paciente.



Fuente: IAEA (2007).

Figura 9.29. Tasa de dosis alrededor de un “Arco en C”.



Fuente: IAEA (2007).

La dosis que recibe el personal está directamente relacionada con la del paciente, por lo que los factores que veremos a continuación afectan las dosis de ambos, ya que cuanto mayor sea la dosis que reciba el paciente, mayor dosis recibirá el personal ocupacionalmente expuesto.

Exposición del paciente

Repasemos algunos conceptos

- No se aplican los límites de dosis en la exposición médica.
- El cálculo de la Dosis Efectiva sólo se realiza en estudios científicos.
- Se aplican **niveles de referencia**. Estos niveles de referencia son diferentes para cada técnica y siempre se pueden medir o estimar, por ejemplo:
 - Para radiografía: dosis en la piel en mGy
 - Para radioscopia (fluoroscopia): tasa de dosis en piel en mGy/min
 - Para mamografía: Dosis Glandular Media en mGy
 - Para tomografía: Dosis Promedio en Cortes Múltiples en mGy
 - Para medicina nuclear: Actividad Administrada en mCi o TBq

- La dosis óptima depende de diversos factores, fundamentalmente de cuán moderno es el equipo, sus características, mantenimiento y control de calidad. (ZONA II de la curva).

Conclusión: hay que optimizar la dosis.

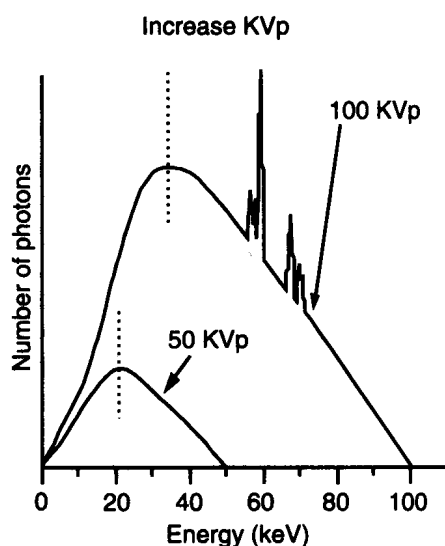
- Se han registrados varios casos de sobredosis en pacientes sometidos a prácticas intervencionistas (veáse el capítulo 1). **Conclusión: hay que prevenir accidentes, incidentes o sobreexposiciones.**

Factores que influyen en la dosis sobre la piel (radiología, radioscopia)

Diferencia de potencial eléctrico (Kilovoltaje)

El aumento de la tensión aplicada al tubo o “kilovoltaje pico” (kVp) aumenta tanto la energía (penetración) como la cantidad de radiación (Figura 9.30):

Figura 9.30. Influencia del kilovoltaje.



Nota. Cambio de cantidad y calidad. A mayor potencial, las curvas se desplazan hacia la derecha, tanto la energía máxima (que numéricamente es igual al kilovoltaje pico expresada en KeV) como el valor más probable. Obsérvese la aparición de los picos de radiación característica. El área bajo la curva representa la energía total emitida. Fuente: IAEA (2007)

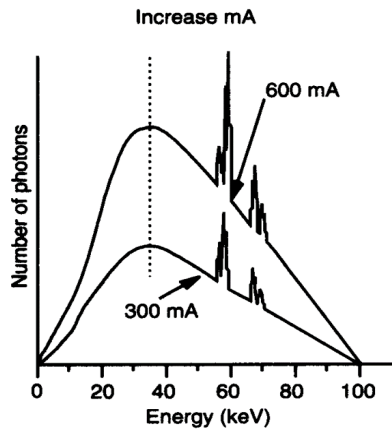
Carga total

Determina la cantidad de fotones emitidos durante una exposición radiográfica. La unidad de Carga es el Coulomb (Amper x segundo) o, más habitualmente el miliCoulomb (mAs). La DOSIS que recibe el paciente es directamente proporcional a la carga total (mAs).

Miliamperaje

Determina la cantidad de fotones emitidos por unidad de tiempo (mA) (Figura 9.31).

Figura 9.31. Influencia del miliamperaje.



Nota. Al variar el miliamperaje, cambia la cantidad de fotones y por ende la energía emitida. La distribución espectral no varía. Podemos decir que se modifica la cantidad, no la calidad. Fuente: IAEA (2007)

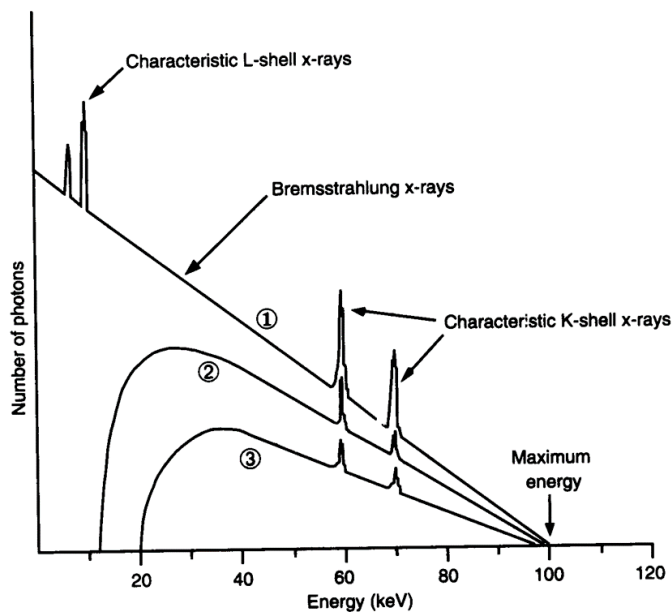
Tiempo

En una radiografía, una vez ajustados los mA, se ajustan el tiempo (s) para lograr la carga (mAs) correspondiente a la técnica a aplicar. Otra posibilidad es especificar los mAs y el tiempo, con lo cual la corriente se ajusta automáticamente.

Filtrado

El filtrado aumenta la energía media del espectro de radiación y por lo tanto aumenta también la penetración. Elimina los fotones de baja energía, que son los que producen la mayor dosis en piel sin contribuir a la calidad de la imagen (Figura 9.32).

Figura 9.32. Distribución espectral de la radiación para kV y mA fijos.



Nota. 1) a la salida del ánodo; 2) a la salida del tubo (filtración inherente); 3) luego de pasar por la filtración adicional. Nótese que los filtros atenúan más los componentes de baja energía desplazando todo el espectro hacia la derecha y al mismo tiempo se reduce la cantidad total de energía emitida. El objetivo es reducir tanto como sea posible precisamente las componentes de baja energía que generan dosis en piel, pero no contribuyen a la producción de la imagen. Fuente: IAEA (2007)

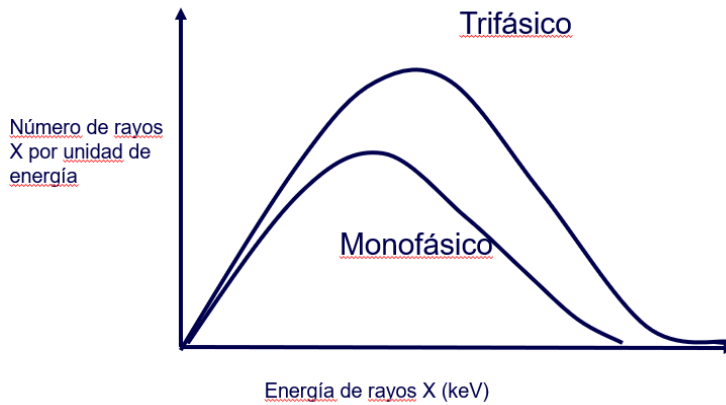
Distancia Foco-Piel

Aumentar la distancia foco-piel reduce la dosis en el paciente, debido a la “Ley de inversa de cuadrados”. Este parámetro lo determina la técnica radiográfica, no la optimización de la dosis.

Forma de onda

Cuanto menor es el “riple” o “rizado” de la onda de alta tensión, más cercano al kilovoltaje pico es el kilovoltaje medio y por ende mayor la energía, penetración y cantidad de radiación (Figura 9.33).

Figura 9.33. Comparación entre la distribución espectral para dos tipos de rectificación.

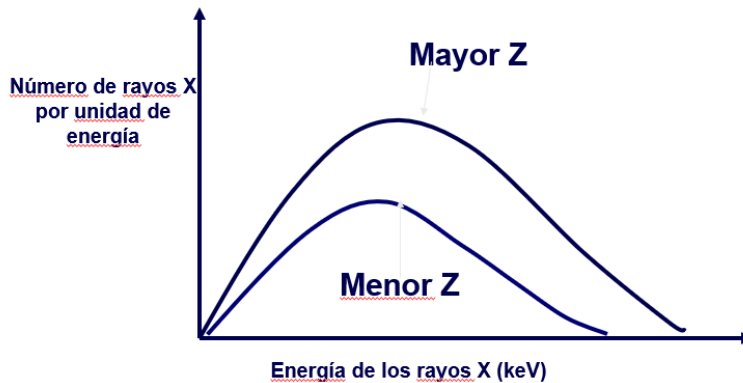


Nota. No cambia ningún otro parámetro (kV, mA, filtrado, etc.). Fuente: IAEA (2007).

Número atómico del material

El Z del material del ánodo también influye en la penetración y cantidad de los fotones, aunque obviamente tampoco puede ser elegido por el operador (Figura 9.34).

Figura 9.34. Influencia del número atómico del blanco en el espectro.



Nota. A mayor Z se generan más fotones de mayor energía. Fuente: IAEA (2007)

Caso específico 1: radiología digital

La problemática relacionada con este tema está ampliamente desarrollada en ICRP (2014). Entre sus ventajas podemos decir que permite obtener mejores imágenes con menor dosis y mejorarlas aún más mediante el post procesamiento. Estas ventajas obligan a aplicar procedimientos y programas incorporados a los equipos que permiten estimar y optimizar la dosis. Algunos sistemas digitales informan al usuario del llamado índice de “**nivel de exposición**”, que expresa el nivel de dosis recibido en el detector digital y orienta al operador sobre la bondad de la técnica radiográfica usada. La relación entre dosis y nivel de exposición es usualmente logarítmica: duplicar la dosis al detector aumentará el “nivel de exposición” un factor de $0.3 = \log(2)$.

Sin embargo, si el operador no está bien capacitado y entrenado, es probable que entregue una dosis superior a la que sería necesaria, ya sea repitiendo imágenes o empleando una técnica subóptima al no producirse efectos de saturación, pues las imágenes aparentemente “siempre salen bien”.

Caso específico 2: intervencionismo

Las dosis en radiología intervencionista pueden ser muy elevadas. Se han registrado efectos, algunos muy graves, entre los pacientes (Tabla 9.2).

Tabla 9.2. Clasificación de radiotoxicidades.

Evaluación de Radiotoxicidad-Piel EORTC/TOG		
Grado	RADIOTOXICIDAD AGUDA : < 90 días	RADIOTOXICIDAD TARDIA: > 90 días
1	Eritema folicular leve difuso Depilación Prurito Descamación seca	Atrofia leve difusa Cambios pigmentarios Pérdida parcial del vello
2	Eritema marcado Descamación húmeda en focos circunscriptos Edema moderado	Focos de atrofia moderada Telangiectasias Pérdida total del vello
3	Descamación húmeda confluyente Edema severo	Áreas confluentes de atrofia marcada Telangiectasias
4	Hemorragias Ulceración Necrosis	Ulceración Hemorragias

Nota. Fuente: Gentileza de la Dra. Mercedes Portas, Hospital del Quemado, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Tomado de Cox et al (1995)

También existe numerosa casuística entre el personal de operación, mayoritariamente médicos. Asimismo, se encuentra el Programa de Evaluación Retrospectiva de las Lesiones del Cristalino y de las Dosis (RELID, por sus siglas en inglés) en cuyo marco se realizaron numerosas actividades, por ejemplo en Buenos Aires (Papp et al, 2014) pusieron en evidencia un aumento de los casos de cataratas entre los médicos intervencionistas, aun a nivel subclínico. Una de las consecuencias de esta situación fue la modificación de los límites de dosis en cristalino, que pasaron de 150 a 20 mSv/año en el año 2012.

Dejando de lado casos excepcionales, esta mayor incidencia de cataratas no fue causada por accidentes o mal funcionamiento de los equipos sino por procedimientos orientados exclusivamente al objetivo del procedimiento en sí mismo, sin considerar la posibilidad de eventuales efectos no deseados. Una evidente falta de *cultura de la seguridad*, uno de cuyos componentes principales es una insuficiente formación en protección radiológica. En ese sentido, en la Argentina existe un sistema de entrenamiento y acreditación formal desde 1990, ofrecido por la Facultad de Medicina de la Universidad de Buenos Aires (UBA) y el Colegio Argentino de Cardioangiólogos Intervencionistas (CACI), que es la Carrera de Médico Especialista Universitario en Hemodinamia, Angiografía General y Cardioangiología Intervencionista de 3 años de duración (CACI, 2018).

Los pacientes sometidos a estas prácticas deben tener un seguimiento que permita un tratamiento temprano, ya que muchas lesiones fueron tratadas en forma incorrecta por no haber sido identificadas oportunamente como lesiones radioinducidas.

Los factores que afectan la dosis del paciente se pueden dividir en

- Relacionados con el paciente, como su peso y sus hábitos (por ejemplo, si es fumador)
- Relacionados con el equipo, además de los ya mencionados (kV, mA, filtrado, etc.):
 - Rango de movimientos del Arco en C
 - Tipo de receptor de imágenes
 - Campo de visión
 - Frecuencia de pulsos y dosis por pulso
 - Modo de operación (Cine, fluoroscopia “alta”, fluoroscopia “baja”)
 - Control automático de exposición
 - *Software* de procesamiento y filtros digitales
 - Estado de control y mantenimiento del equipo
- Relacionados con el procedimiento, por ejemplo:
 - Posicionamiento del receptor y el equipo de imágenes con respecto al paciente
 - Orientación del haz
 - Colimación
 - Tiempo total con cada modo de operación

Caso específico 3: mamografía

Es un ejemplo de práctica médica en que el beneficio debe evaluarse desde una perspectiva colectiva y no individual, ya que el objetivo suele ser la detección temprana de patologías mamarias en pacientes asintomáticas. Por lo tanto, este estudio estará justificado en grupos de pacientes en que el beneficio (potencialidad de vidas salvadas por el diagnóstico temprano) sea superior al detrimento. Esta decisión debe ser tomada por especialistas considerando los diferentes factores de riesgo, fundamentalmente la edad.

Se ha instalado una discusión respecto de si es útil el empleo de protección tiroidea. La reducción de la dosis en tiroides, que ya de por sí es baja aun sin collar tiroideo, no reduce sustancialmente la dosis efectiva y por otro lado puede degradar la calidad de la imagen. Además, como los equipos modernos tienen control automático de brillo, la sombra que genera el collar podría generar un aumento de la dosis glandular. En conclusión: no se recomienda el uso de collar tiroideo en mamografía.

Comentarios finales: mantenimiento, QA, rol del físico médico

El mantenimiento preventivo y correctivo, así como la implementación de un programa de Aseguramiento de la Calidad (QA: *Quality Assurance*) son fundamentales para maximizar los beneficios entregando al paciente una dosis razonable. Excepto que ocurra una falla severa y evidente o un evento disruptivo, el deterioro en la calidad de las imágenes suele ser progresivo y difícil de apreciar si no se hacen los controles necesarios con una frecuencia adecuada. Eso ha llevado muchas veces a que los operadores hagan ajustes mínimos para mejorar el resultado a costa de un aumento de la dosis.

Las regulaciones sanitarias (Ministerio de Salud Argentina 1997) exigen la implementación de los programas de mantenimiento y QA.

Los controles deben estar protocolizados y ser efectuados por personal calificado con el equipamiento correspondiente. Cuando se usen equipos de medición, estos deberán estar calibrados. Los controles podrán ser efectuados por profesionales o técnicos capacitados, pero en el análisis de los resultados y las decisiones respecto de las acciones a tomar deberían participar profesionales especializados, típicamente Físicos Médicos.

Luego de cualquier reparación se deberán controlar los parámetros de funcionamiento que eventualmente podrían haber resultado afectados por la reparación.

Referencias

Cox, J. D; Stetz, J. y Pajak, T. (1995). Toxicity criteria of the Radiation Therapy Oncology Group (RTOG) and the European Organization for Research and Treatment of Cancer (EORTC). *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 30;31(5):1341-6.

- Colegio Argentino de Cardioangiólogos Intervencionistas (CACI) (2018). *Hemodinamia y Cardioangiología Intervencionista – Tomo I Protección Radiológica*. Buenos Aires: CACI.
- ICRP (2014). *Gestión de la dosis al paciente en radiología digital* / Anónimo; Coordinado por Beatriz Gregori, 93. Buenos Aires: Sociedad Argentina de Radioprotección
- NCRP (2004). *Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities*. Report No. 147.
- Papp, C., Romano-Miller, M., Descalzo, A., Michelin, S., Molinari, A., Rossini, A., y Touzet, R. (2014). Estudio RELID 2014 en Buenos Aires–Argentina. *Revista de la Comisión Nacional de Energía Atómica*, 14 (57/58), 37-44.
- Programa Nacional de Garantía de Calidad de la Atención Médica (PNGCAM) (1997). Resolución Secretarial Ministerio de Salud N° 432 del año 1992 y refrendado por el Decreto N° 1424 del año 1997.
- UNSCEAR (2008). *Effects of Ionizing Radiation*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations.

CAPÍTULO 10

Protección Radiológica en Medicina Nuclear (I)

Gustavo Sánchez

Introducción

Dentro de las prácticas médicas que emplean radiaciones ionizantes, la Medicina Nuclear (MN) es la única donde la Protección Radiológica debe considerar tanto la exposición a la radiación externa como los riesgos de incorporación. Además la evolución de esta especialidad evoluciona y se diversifica en forma continua.

En razón de esta complejidad es que dedicaremos dos capítulos a este tema: en el presente capítulo se hace una breve descripción de la problemática de la protección radiológica en medicina nuclear, mientras que en el capítulo siguiente (11) se desarrollan en profundidad la mayor parte de estos temas, haciendo foco principalmente en la protección radiológica ocupacional.

El Apéndice al final de este capítulo detalla la normativa vigente al momento de la edición del presente libro.

Enfoque de la Protección Radiológica en Medicina Nuclear

La optimización de la protección radiológica en Medicina Nuclear se basa en

- el adecuado diseño de las instalaciones,
- contar con procedimientos de trabajo específicos y optimizados para cada tarea (incluyendo procedimientos de emergencia),
- contar con las herramientas, el instrumental y los elementos de protección personal necesarios para cumplir esos procedimientos,
- que el personal que trabaja en el servicio, principalmente en las áreas controladas, esté suficientemente formado, capacitado y entrenado.

Es importante remarcar que los procedimientos no son solo de protección radiológica sino que incluyen la protección radiológica. Este concepto es la base de la *cultura de la protección radiológica y de la seguridad*. Los procedimientos deben elaborarse con la participación de todos

los actores, deben ser ensayados y el personal debe contar en todo momento con los elementos para ejecutarlos en forma eficiente y segura.

Debido a las características específicas de la medicina nuclear, las medidas de protección deben adecuarse a cada etapa u operación, lo que requerirá un análisis general y particular de cada una de ellas: la obtención de radionucleidos, preparación y fraccionamiento, administración al paciente, realización del estudio, etc.

Para todas las operaciones deben existir procedimientos escritos en el Manual del Sistema de Calidad del Servicio de MN.

Exposición ocupacional

Respecto de la exposición ocupacional, el riesgo de sobredosis accidental en MN es muy bajo si se cumplen los supuestos mencionados. Salvo en casos excepcionales, como laboratorios de radiofarmacia, no es necesario el monitoreo de la dosis por incorporación (dosis comprometida), la cual no se debe a la exposición crónica sino a las exposiciones potenciales. Por lo tanto, el diseño de las instalaciones y los procedimientos operativos estarán orientados a prevenir y detectar rápidamente cualquier contaminación así como a contenerla y eliminarla. Este tema se desarrolla en el capítulo siguiente (11).

Otra medida fundamental es el correcto monitoreo de la dosis de radiación externa (dosis equivalente personal), que para ciertas operaciones debe complementarse con monitoreo de dosis en manos y cristalino.

Exposición del público

La exposición del público se produce por:

- 1) la exposición externa originada en las fuentes dentro de las instalaciones. La protección se basa los blindajes de las instalaciones, aunque solo en unos pocos casos (PET) se requerirá el cálculo y diseño de blindajes estructurales.
- 2) la eliminación de efluentes al ambiente, los que, a diferencia de los residuos radiactivos, no son sometidos a ningún proceso posterior al salir de la instalación. Esto requerirá el buen diseño de los sistemas de desagüe y ventilación, incluyendo en algunos casos la colocación de sistemas de filtrado.
- 3) Situaciones que se pueden dar durante el transporte, tanto normales como accidentales. El personal del servicio de medicina nuclear interviene en la recepción del material y en la preparación de las remesas para transporte, principalmente contenedores decaídos.

Estos tres puntos se profundizan en el capítulo siguiente (11).

Exposición del paciente

Como ya dijimos, los límites de dosis no se aplican en la exposición médica. Se deben tener en cuenta los Niveles de Referencia (no prescriptivos) que son de naturaleza dinámica y son de carácter regional.

La estimación de la Dosis Efectiva recibida por el paciente solo se usa para estudios científicos. Los niveles de referencia en Medicina Nuclear se expresan generalmente en términos de Actividad Administrada para una práctica determinada.

En terapia hay una tendencia a la dosimetría preterapéutica. Es necesario entonces contar con herramientas para una adecuada dosimetría del paciente, lo que requiere contar con modelos que permitan predecir correctamente la distribución de dosis; el más difundido es la metodología MIRD (Medical Internal Radiation Dose). El sistema MIRD fue establecido por la Sociedad de Medicina Nuclear de USA en 1960 para asistir a la comunidad médica en las estimaciones de dosis a órganos y tejidos debido a la incorporación de material radiactivo. Desde entonces se publicaron *Mird Dose Estimate Report* (del 1 al 12 y *Pamphlets*) de gran utilidad para el cálculo de dosis.

Tanto para diagnóstico como para tratamiento la protección del paciente se basa en dos aspectos: la optimización de la dosis y la prevención de exposiciones potenciales. La optimización de las dosis involucra muy diversos aspectos y factores, cuyo desarrollo excede el alcance de esta publicación, como ser:

- El equipo de diagnóstico: cuanto más moderno mejor imagen con menos dosis, siempre y cuando se haga un control de calidad adecuado y se cuente con un adecuado programa de mantenimiento preventivo y correctivo.
- El calibrador de actividad (también: control de calidad).
- La calidad de los radiofármacos.
- La cualificación, idoneidad y entrenamiento del personal.

Diseño de instalaciones

El diseño de las instalaciones de un servicio de medicina nuclear contempla dos aspectos: uno general y uno específico para cada local.

Aspectos generales

Se deben distribuir los locales de tal manera que los de mayor riesgo se encuentren alejados del acceso de los pacientes. Se debe OPTIMIZAR la circulación de **personal** en áreas controladas y supervisadas como así también el movimiento de **fuentes**. Por ejemplo: la sala de administración debe estar lo más cerca posible de donde se prepara y mide la actividad a administrar.

Del mismo modo, la circulación del paciente debe también minimizarse: del inyectorio a la sala de espera (que en PET es un mismo local), de esta al local donde se realizará el estudio, mientras que la salida debería ser lo más directa posible.

En centros grandes, con varios equipos de diagnóstico, diferentes modalidades y gran caudal de pacientes, es muy importante evitar que haya concentración de personas en los locales y circulación en los pasillos. Puede ser necesario establecer horarios diferenciados para las diferentes prácticas (SPECT, PET, etc.)

Categorización del riesgo

A fin de establecer los requerimientos constructivos de cada local, la IAEA recomienda utilizar un procedimiento sencillo para categorizar los locales en tres categorías: **riesgo elevado, medio y bajo**.

En base a los resultados se fijan pautas generales sobre aspectos constructivos como: características y materiales de las superficies de trabajo, necesidad de blindajes estructurales, sistemas de ventilación, desagües, etc., como veremos a continuación.

En los locales donde hay riesgo cierto de contaminación accidental deben cumplirse dos premisas:

- La contaminación debe quedar confinada dentro del local donde se produjo el accidente. Eso incluye facilidades para descontaminación de las personas antes de que se retiren del local: como mínimo una “pileta fría”¹⁴, pero dependiendo de la magnitud del riesgo, también se necesitan kit de descontaminación, ducha, lava ojos, cambio de ropas, etc.
- El diseño debe contemplar que cualquier derrame o contaminación sea fácil de remover.
- La medición del riesgo está basada en el cálculo de la ponderación de la actividad usando factores de ponderación de acuerdo a los radionucleidos usados y el tipo de operación llevada a cabo:

Actividad ponderada	Categoría
< 50 MBq	Peligro bajo
50 – 50,000 MBq	Peligro medio
> 50,000 MBq	Peligro alto

La ACTIVIDAD PONDERADA se determina como

$$A_{\text{ponderada}} = A_{\text{máx}} \times W_{\text{radionucleido}} \times W_{\text{local}}$$

Donde

- $A_{\text{máx}}$ es la máxima Actividad que en algún momento puede haber en el local.
- $W_{\text{radionucleido}}$ es un factor que pondera la radiotoxicidad del nucleído

¹⁴ Pileta Fría: pileta que habitualmente está destinada al lavado de elementos no contaminados, a diferencia de la Pileta Caliente, que es donde se lavan los elementos contaminados.

Tabla 10.1. Factores de ponderación por radiotoxicidad del nucleido.

Clase	Radionucleido	Factor de ponderación
A	Se-75, Sr-89, I-125, I-131	100
B	C-11, N-13, O-15, F-18, Cr-51, Ga-67, Tc-99m, In-111, In-113m, I-123, Tl-201	1.00
C	H-3, C-14, Kr-81m, Xe-127, Xe-133	0.01

- W_{local} es un factor que pondera el cuan riesgosa es la tarea que se realiza en el local.

Tabla 10.2. Factores de ponderación por tipo de actividad que se realiza en el local.

Tipo de operación o zona	Factor de ponderación
Almacenamiento	0.01
Manejo de desechos, sala de imágenes (no iny.), área de espera, área de pacientes (diagnóstico)	0.10
Locales de distribución, suministro de radionucleidos, sala de imágenes (iny.), preparación simple, área de internación del paciente (terapia)	1.00
Preparación compleja	10.0

Ejemplos

Ejemplo 1: Examen del paciente, 400 MBq Tc-99m

$$A_{ponderada} = A_{m\acute{a}x} \times W_{radionucleido} \times W_{local} = 400MBq \times 1 \times 1 = \mathbf{400\ mBq} \Rightarrow \mathbf{PELIGRO\ MEDIO}$$

Ejemplo 2: Sala de espera de Pacientes, 8 pacientes en espera, 400 MBq Tc-99m por paciente

$$A_{ponderada} = A_{m\acute{a}x} \times W_{radionucleido} \times W_{local} = 3200Bq \times 1 \times 0.1 = \mathbf{320\ mBq} \Rightarrow \mathbf{PELIGRO\ MEDIO}$$

Ejemplo 3: Administración de 11 GBq I-131 (Terapia)

$$A_{ponderada} = A_{m\acute{a}x} \times W_{radionucleido} \times W_{local} = 11000MBq \times 100 \times 1 = \mathbf{1100\ GBq} \Rightarrow \mathbf{PELIGRO\ ALTO}$$

Resultados típicos

Peligro Alto: Sala de preparación y administración de radiofármacos. Almacenamiento temporal de desechos. Sala de administración de radiofármacos. Sala de examen. Sala de aislamiento.

Peligro Medio: Sala de almacenamiento de radionucleidos. Sala de espera. Sanitarios para pacientes.

Peligro bajo: Sala para medición de muestras. Laboratorio de RIA. Oficinas. Recepción.

Recomendaciones de diseño basadas en la categoría del riesgo

La Tabla 10.3 muestra recomendaciones, que deben ser consideradas y ajustadas en el contexto del lugar de trabajo. Esta guía no tiene carácter prescriptivo.

Tabla 10.3. Recomendaciones constructivas en función del nivel de peligro del local.

Categoría del Peligro	Bajo	Medio	Alto
Campana Extractora	No	No	Según la tarea
Ventilación	Normal	Buena	Puede necesitar Ventilación forzada
Cañería	Estándar	Estándar	Especial
Acciones ante contaminación	Lavado de superficies	Lavado de superficies y kit de descontaminación	Lavado de superficies y kit de descontaminación
Blindaje estructural	NO	Posible (PET)	Posible (PET)
Pisos	Lavable	Revestimiento continuo	Revestimiento continuo de una pieza doblada en las paredes

Nota. El detalle de estas recomendaciones se desarrolla en el capítulo 11.

Situaciones anormales en Medicina Nuclear

Las situaciones anormales que potencialmente pueden ocurrir son de índole muy diversa y las medidas para prevenir, detectar y solucionar los problemas deberán adaptarse a cada caso particular. A continuación, se da una somera enumeración de algunas de estas situaciones. En el capítulo 11 se desarrollará *in extenso* el tema de la contaminación.

Relacionadas con el paciente

- Solicitud incorrecta del procedimiento, por ejemplo a partir de datos clínicos de otro paciente.
- Identificación incorrecta del paciente al efectuar el estudio o administrar la dosis.
- Incompleta información al abrir la historia clínica, por ejemplo, que una paciente esté embarazada o amamantando.
- Error en la identificación o dosificación del radiofármaco.

- Contaminación del paciente en alguno de los procesos, como la administración o durante la espera para realizar el estudio.

Relacionadas con la fuente o el trabajador

- Accidentes durante el transporte por la vía pública de fuentes remitidas por o hacia el centro, incluyendo accidentes con daño al embalaje o robo. Pérdida del envío.
- Daño al embalaje durante la recepción y control.
- Identificación incorrecta de las fuentes previa al almacenamiento, tanto fuentes nuevas como residuos radiactivos para almacenamiento transitorio.
- Dosis alta al trabajador o contaminación durante la preparación y administración de fármacos.
- Contaminación por excretas del paciente. Si luego de la administración el paciente sufre una emergencia médica o muere deben tomarse las previsiones para evitar que se contaminen otras personas (trabajadores y público).

Relacionadas con el público

- Accidentes que puedan ocurrir durante el transporte que tengan como consecuencia la diseminación de fuentes radiactivas o el deterioro de los blindajes.
- Extravío de fuentes radiactivas que pueden ser llevadas fuera del servicio.
- Diseminación de una contaminación fuera del servicio.

Apéndice

Normativa de la Autoridad Regulatoria Nuclear aplicable a MN

AR 10.1.1. Norma básica de seguridad radiológica: Esta norma establece los criterios básicos para lograr un nivel apropiado de protección de la salud de las personas contra los efectos nocivos de la radiación ionizante y la seguridad de las instalaciones o prácticas que las involucran. Es aplicable a TODAS las actividades que regula la ARN.

AR 8.2.4. Uso de fuentes radiactivas no selladas en medicina nuclear. Establece los requisitos mínimos de seguridad radiológica para el uso de fuentes radiactivas no selladas en medicina nuclear.

AR.10.16.1. Transporte de materiales radiactivos. En Argentina, todo transporte de materiales radiactivos debe efectuarse de acuerdo a lo estipulado en el "Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos" del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), cuya Edición de 1985 (enmendada en 1990), cuyo texto ha sido adoptado en la norma AR 10.16.1. "Transporte de materiales radiactivos".

AR 10.12.1. Gestión de residuos radiactivos: establece los requisitos generales para que la gestión de los residuos radiactivos se realice con un nivel adecuado de protección radiológica de las personas y de preservación del ambiente tanto en el caso de las generaciones actuales como de las futuras.

La MN se encuadra dentro de lo que en la norma AR.10.1.1 se define como Instalación Clase II, que es una Instalación o práctica que sólo requiere **licencia de operación**. Para que el Servicio, Hospital, Centro Médico, etc., obtenga esa licencia de operación debe cumplir con lo que estipula la norma **AR 8.2.4.** sobre el diseño de las instalaciones, el equipamiento, los procedimientos y el **personal**.

A su vez, el **personal** (Médicos, Físicos, Técnicos) debe contar con **permiso individual** (que también otorga la ARN). Los requisitos para obtener ese permiso son:

- Contar con una formación académica de un nivel acorde con la función (Por ejemplo: ser Médico Matriculado).
- Haber realizado una formación adicional específica en el tema para el que solicita permiso (Por ejemplo: ser Médico Especialista en Medicina Nuclear).
- Realizar un entrenamiento práctico supervisado en una institución asistencial reconocida por la ARN.

En ciertos casos, debidamente fundamentados, la ARN reconoce que los trayectos académicos de algunas instituciones satisfacen dos de estos requisitos, o los tres. Por ejemplo, por Resolución 536/16 del 30/09/2016 determina que la "Tecnicatura Universitaria en Diagnóstico por

Imágenes” de la Universidad Nacional de General San Martín acredita el cumplimiento de los tres requisitos para la solicitud del Permiso Individual para Técnicos en Medicina Nuclear.

El artículo 16 de la Ley N° 24.804 (Ley Nacional de Actividad Nuclear) faculta a la Autoridad Regulatoria Nuclear para

- Aplicar sanciones, las que deberán graduarse según la gravedad de la falta en apercibimiento, multa que deberá ser aplicada en forma proporcional a la severidad de la infracción y en función de la potencialidad del daño, suspensión de una licencia, permiso o autorización o su revocación.
- Establecer los procedimientos para la aplicación de dichas sanciones, asegurando el principio del debido proceso.

Hay que remarcar que las sanciones que puede imponer la ARN no excluyen sino que complementan otras penalidades que pudieran corresponder, ya sean de índole penal, civil, administrativa, etc.

Requerimientos de diseño (Fragmento de la Norma AR 8.2.4)

D.2.2. Instalación

18. La instalación debe contar como mínimo con:

- a. Un local exclusivo (cuarto de preparados o “cuarto caliente”) para la preparación de los radionucleidos, que deberá contar con materiales de construcción, dimensiones y blindajes apropiados, y con áreas debidamente separadas y señalizadas para el almacenamiento del material radiactivo y el almacenamiento transitorio de los residuos radiactivos.
- b. Un local destinado a la administración de radionucleidos al paciente.
- c. Un local con dimensiones apropiadas para cada equipo de medicina nuclear.
- d. Una sala de espera con un área exclusiva y debidamente delimitada, para pacientes a los cuales se les hayan administrado radionucleidos con fines de diagnóstico.
- e. Un cuarto de baño exclusivo para pacientes a los cuales se les haya administrado radionucleidos.

19. En aquellas instalaciones de medicina nuclear en las que se internen los pacientes tratados con dosis terapéuticas de I 131 u otros radionucleidos, se deberá disponer de una sala de internación, con cuarto de baño exclusivo y adecuadamente acondicionada para tal fin.

20. El revestimiento de los pisos y las superficies de trabajo de los locales donde se utilice material radiactivo, debe ser de acabado liso, libre de discontinuidades, impermeable y fácilmente descontaminable.

21. Aquellos locales en los que se utilicen sustancias volátiles, gases o aerosoles radiactivos, deberán contar con un sistema de ventilación a satisfacción de la Autoridad Regulatoria.

22. El cuarto de preparados debe contar, como mínimo, con dos piletas separadas. Una de ellas estará destinada al lavado de elementos contaminados (“pileta activa”), y la otra al lavado

de elementos no contaminados. Esta última debe estar ubicada en una zona dentro del cuarto caliente en la cual la probabilidad de contaminación sea baja.

23. Los desagües de la “pileta activa” deben conectarse a la red cloacal de forma tal que se minimicen las dosis a trabajadores debidas a eventuales retenciones de material radiactivo en la cañería de desagote.

24. Deben existir barreras físicas y señalizaciones de seguridad, que permitan restringir el acceso a los locales en los que se trabaja con materiales radiactivos.

25. Cualquier proyecto de modificación al diseño de la instalación descrita en la documentación técnica y que pudiere afectar la seguridad radiológica, deberá ser comunicado a la Autoridad Regulatoria por el solicitante de la licencia de operación, previamente a la ejecución del proyecto.

26. En el caso de instalaciones de medicina nuclear nuevas, el diseño debe prever una ubicación de los locales tal que se minimicen los recorridos en el transporte interno del material radiactivo y se evite el paso de este material a través de locales tales como consultorios, salas de espera, etc.

INSTRUCTIVO F102_R0 REQUISITOS PARA INSTALACIONES DE MEDICINA NUCLEAR

1.- Cuarto caliente: Debe ser de afectación exclusiva al uso de radioisótopos, con paredes de mampostería de ladrillo macizo de 15 cm de espesor o de material que provea atenuación equivalente para todos los radionucleidos consignados en la Licencia de Operación. Sus medidas mínimas deben ser de 1,50 m por 2,00 m.

El mismo deberá contar con:

a) Una puerta con llave;

b) Mesada de material no absorbente y de superficie continua. La pared sobre la mesada deberá estar impermeabilizada hasta una altura de 50 cm por encima de la misma. La unión de la mesada con la pared deberá efectuarse de forma tal que una sea continuación de la otra, evitándose los ángulos rectos. Los materiales a utilizar pueden ser acero inoxidable, laminado plástico liso o cemento alisado impermeabilizado con pintura a base de resinas epoxi.

c) Dos piletas, separadas entre sí por una distancia mínima de 1,50 m, una de ellas deberá ser impermeable (por ejemplo acero inoxidable) sin sifón, destinada al lavado de elementos contaminados.

d) Piso de material no absorbente y de fácil limpieza (por ej.: goma, plástico, etc.)

e) Elementos/dispositivos de uso exclusivo para las prácticas de fraccionamiento que se realicen en el cuarto caliente blindados de acuerdo a la naturaleza y actividad de los radionucleidos a emplear:

e.1. Depósito de guarda de material radiactivo.

e.2. Pantalla de fraccionamiento con visión directa o indirecta.

e.3. Contenedor para efectuar la elución del generador.

e.4. Contenedor para el transporte de jeringas.

e.5. Contenedores para el almacenamiento y decaimiento de residuos sólidos contaminados.

2.- Cuarto tibio o de aplicación Debe ser contiguo al cuarto caliente. Sus medidas mínimas deben ser de: 1,5 m x 2 m. El piso de este cuarto deberá ser de las mismas características que el del cuarto caliente.

3.- Un cuarto para cada equipo de medición “in vivo”. La distancia mínima recomendada entre el punto medio de la camilla y la consola de comando es de 2 metros, lo que implica que el cuarto de medición para un SPECT deberá ser del orden de 6 x 5 metros y para una cámara gamma del orden de 4 x 5 metros. Si el servicio cuenta con brazo de captación el mismo puede ser instalado en el cuarto tibio.

4.- Sala de espera para pacientes con material radiactivo incorporado: Debe estar separada de la sala de espera general, debe contar con baño de afectación exclusiva al uso por dichos pacientes y encontrarse dentro de los límites del servicio de medicina nuclear.

Restricciones de dosis (fragmento de la Norma AR 8.2.4.)

Punto 13. En las instalaciones de medicina nuclear, los sistemas de protección deben estar optimizados para que la dosis efectiva de radiación que reciba cada trabajador no supere el valor de 6mSv en un (1) año. Cuando la jornada de labor sea menor que ocho (8) horas, no deberá superarse la parte proporcional de la restricción de dosis establecida.

Referencias

- ARN (2001). *Norma AR 10.1.1. Revisión 3. Norma Básica de Seguridad Radiológica*. D.3.3.1. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 22/01. Boletín Oficial N° 20/11/01.
- ARN (2002). *Norma 8.2.4, Revisión 1. Uso de fuentes radiactivas no selladas en instalaciones de medicina nuclear*. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 18/02 (Boletín Oficial 22/7/02).
- IAEA (2010). *Protección radiológica en medicina nuclear*. Material de capacitación para profesionales. <https://www.iaea.org/file/2017/training-nuclear-medicinealllecturesspzip>
- IAEA (2016). *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad requisitos de seguridad generales. (GSR) Parte 3*, IAEA, Viena. STI/PUB/1578. ISBN 978-92-0-307915-0. ISSN 1020-5837
- Madsen, M. T. et al. (2006). *AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding*. Medical Physics, 33(1).
- Pérez, A. (2011), *Imágenes en Medicina Nuclear*, Col. “Cuadernos de Cátedra”, San Martín: UN-SAM EDITA.

CAPÍTULO 11

Protección Radiológica en Medicina Nuclear (II)

Carlos G. Einisman¹⁵

Introducción

El presente capítulo trata –en particular– sobre los riesgos radiológicos a los que se expone el personal ocupacionalmente expuesto (POE) que manipula y/o se encuentra expuesto a fuentes radiactivas de uso en Medicina Nuclear (MN). En consecuencia, volveremos sobre algunos de los conceptos generales ya expuestos en los capítulos precedentes, particularizando sus características y condiciones relacionadas con su aplicación en MN. Por la naturaleza interdisciplinaria de esta actividad, en ella concurren diferentes perfiles profesionales, tales como: Técnicos en MN; Médicos Especialistas en MN; Licenciados en Diagnóstico por Imágenes; Técnicos Radiólogos; Técnicos en Prácticas Cardiológicas y Enfermeros. Asimismo, intervienen profesionales en Física Médica; Radioquímica; Radiofarmacia e Ingeniería, así como también quienes participan en las tareas de administración, mantenimiento y limpieza de los locales y equipos de MN; transporte de material radiactivo y Primeros Respondedores en situaciones de Emergencia. Se pondrá especial énfasis en el riesgo radiológico como consecuencia del proceso de trabajo desarrollado en la obtención de bioimágenes, datos diagnósticos y prácticas terapéuticas con sustancias radiactivas, intentando abarcar una amplia gama de escenarios: desde un pequeño consultorio, hasta aquellos centros con tecnología de avanzada existentes en diferentes puntos del país.

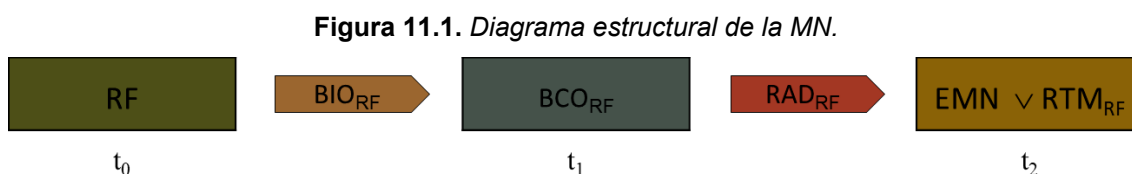
Por la naturaleza de sus prácticas, la MN es una actividad encuadrada y regulada por normativa de alcance federal, en concordancia con recomendaciones internacionales. Es por eso que el lector encontrará numerosas referencias legales y normativas que serán seguramente pasibles de futuras revisiones y actualizaciones. En la Argentina, la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) tiene competencia directa para autorizar y controlar todas las prácticas que utilizan fuentes radiactivas selladas y no selladas. Mientras que el Ministerio de Salud y Desarrollo Social, a través de la Dirección Nacional de Habilitación, Fiscalización y Sanidad

¹⁵ Programa de Estudios Posdoctorales, UNTREF.

de Fronteras, área de Radiofísica Sanitaria, se encarga de habilitar y controlar las fuentes de Rayos X. En lo que respecta al control del Sistema de Riesgos del Trabajo, la autoridad de aplicación es la Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT).¹⁶

Caracterización de la MN

La MN es una tecnología diagnóstica y terapéutica en salud humana y animal que emplea ciertas sustancias radiactivas (radiofármacos) en forma de fuentes abiertas o no selladas. En aplicaciones diagnósticas, con el fin de obtener información fisiopatológica (la cual puede presentarse en forma de datos y/o imágenes) y en aplicaciones terapéuticas, para administrar dosis de radiación en tejidos específicos. En ambos casos, esto se realiza merced a la afinidad fisiológica entre el tejido que interesa alcanzar y el fármaco específico asociado a una sustancia radiactiva, la cual permite su detección exterior y/o la irradiación localizada del tejido. La estructura de las prácticas de MN, mediante un diagrama ordenado en función del tiempo (t), se muestra en la Figura 11.1:



Donde:

RF es el *radiofármaco*.

BIO_{RF} es la *biodistribución específica* del RF.

BCO_{RF} es el grupo de *tejidos blanco* o diana, específico de la BIO_{RF} .

RAD_{RF} es la función *radiación emitida* por el RF en el tejido BCO_{RF} .

EMN es el *equipamiento de MN* que cuantifica y/o localiza la RAD_{RF} .

RTM es la función *radioterapia metabólica*, específica del RF.

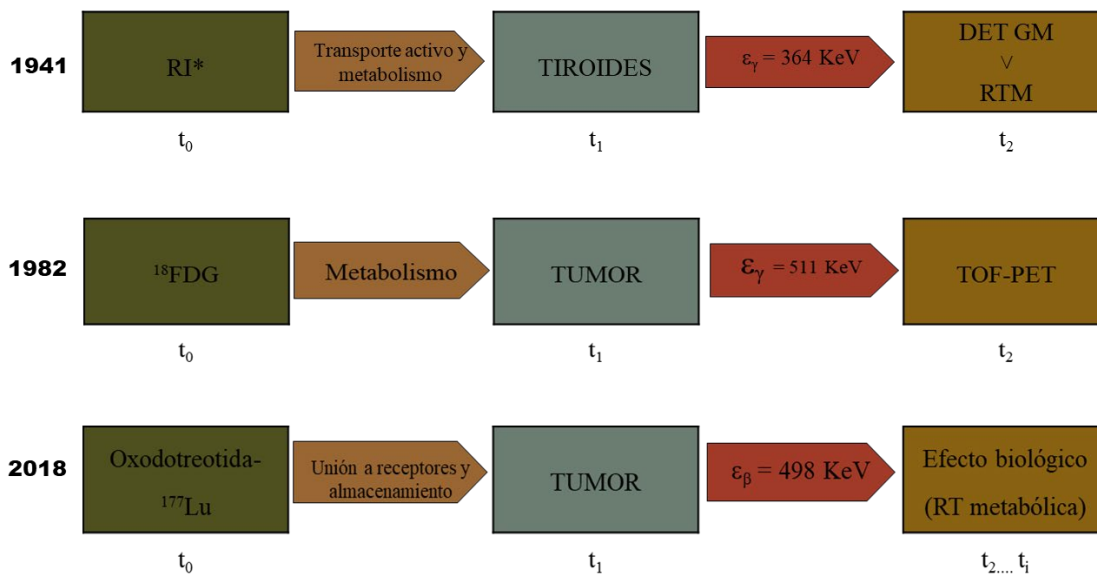
t es el *tiempo* que incluye a los instantes temporales t_0, t_1, \dots, t_i entre los cuales se registra el inicio de la BIO y la detección de la RAD por EMN.

No obstante los enormes avances tecnológicos desde su creación, la estructura teórica de sus ejemplares aún sigue siendo la misma desde 1941. A fin de facilitar esa comparación, se

¹⁶ La SRT ha publicado en su serie de Manuales de Buenas Prácticas algunos títulos que involucran el uso de radiación ionizante: "Tecnologías Radiológicas / Radiodiagnóstico" (2018) y "Perfilaje y Trazado con fuentes radiactivas en la industria del petróleo" (2019). El ejemplar dedicado a MN (en prensa) es complementario a lo presentado aquí. Disponibles en <https://www.argentina.gob.ar/srt/prevencion/publicaciones/manual>

muestra en la Figura 11.2 al ejemplar paradigmático de la MN, a saber: el estudio de la captación tiroidea y tratamiento del hipertiroidismo con Iodo radiactivo¹⁷ (RI*), junto a la estructura de un estudio con FDG marcado con ¹⁸F en un equipo TOF-PET (1980) y la de una práctica de radioterapia metabólica con un análogo de la somatostatina marcado con ¹⁷⁷Lu, utilizada en el tratamiento de tumores neuroendocrinos (2013).

Figura 11.2. Semejanzas entre el ejemplar paradigmático (1941) y algunos de los últimos ejemplares actuales de la MN



Fuente: Elaboración propia.

El repertorio actual de la MN supera el centenar de prácticas diagnósticas y terapéuticas, dado que se sumaron progresivamente nuevos radiofármacos con diferentes mecanismos de biodistribución que permitieron el estudio y/o tratamiento de diversos procesos fisiopatológicos. En la Tabla 11.1, y partiendo también otra vez desde su ejemplar paradigmático, se resumen esquemáticamente algunos ejemplos.

¹⁷ Las primeras aplicaciones diagnósticas y terapéuticas del Iodo radiactivo se hicieron con una mezcla isotópica de ¹³⁰I (90%) y ¹³¹I (10%), obtenido mediante la irradiación de blancos de ¹³⁰Te en ciclotrón (Hertz y Roberts, 1946). La producción masiva de ¹³¹I para uso en medicina y biología se inició luego de la 2ª Guerra Mundial.

Tabla 11.1. Otras prácticas, con diferentes radiofármacos y mecanismos de biodistribución

Práctica	Radiofármaco	Mecanismo de biodistribución
Captación tiroidea y terapia metabólica	¹³¹ I Na	Transporte activo y metabolismo
Determinación del volumen sanguíneo	⁵¹ CrO ₄ Na ₂	Localización compartimental
Centellografía hepato-esplénica	Sulfuro coloidal - ^{99m} Tc	Fagocitosis
Centellografía tiroides	^{99m} TcO ₄ Na	Transporte activo y secreción
Perfusión miocárdica	²⁰¹ TlCl ₄	Perfusión y transporte activo
Diagnóstico en Oncología	¹⁸ F DG	Metabolismo
Diagnóstico en Oncología	Ibritumomab - ⁹⁰ Y	Antígeno-Anticuerpo
Tratamiento de tumores neuroendocrinos	Oxodotreotida - ¹⁷⁷ Lu	Unión a receptores y almacenamiento

Fuente: Elaboración propia, basada en Ziessman (2007).

Dentro del paradigma de la MN, la denominada “Teranóstica” (IAEA, 2019) especializa la función radioterapia metabólica dirigida a tejidos específicos, merced al desarrollo de un amplio abanico de blancos moleculares. Esta modalidad ha experimentado un rápido desarrollo durante las últimas décadas, apoyando tendencias como la “terapia dirigida” y la “medicina personalizada” gracias a la investigación de un amplio abanico de blancos moleculares. La Teranóstica o Teragnosis ya se encuentra en los orígenes de la MN en el tratamiento del cáncer de tiroides (1946) y el hipertiroidismo (1941). Actualmente se está implementado en otras patologías, como los tumores neuroendocrinos y el cáncer de próstata. De cara al futuro va a suponer un cambio significativo en la medicina, puesto que además de utilizarse para tratamientos en pacientes con metástasis, se pretende evaluar su uso en estadios más precoces de la enfermedad (Carreras-Delgado, 2020).

Riesgos radiológicos en el manejo de fuentes abiertas en MN

El presente apartado trata –en particular– sobre los riesgos radiológicos a los que se expone el personal ocupacionalmente expuesto que manipula y/o se encuentra expuesto a fuentes radiactivas abiertas, de uso en MN. En consecuencia, volveremos sobre algunos de los conceptos generales ya expuestos en los capítulos precedentes, particularizando sus características y condiciones cuando estos son de aplicación en MN.

Optimización de la protección en MN

La protección debe optimizarse para proporcionar el nivel de seguridad más alto que sea razonablemente posible alcanzar (IAEA, 2016, p. 4). Esta optimización involucra integralmente a instalaciones fijas y móviles; dispositivos de protección y control; procedimientos operativos y la

formación y capacitación continua que permitan maximizar esa protección. En Argentina, los sistemas de protección radiológica en MN deben estar optimizados para que los trabajadores no superen la restricción de dosis efectiva de 6 mSv en un año para una jornada laboral de 8 horas, o su parte proporcional. En la Tabla 11.2, se muestra la Restricción de Dosis anual, correspondiente a las diferentes duraciones de la Jornada Laboral en MN, según los diferentes subsectores de nuestro Sistema de Salud.

Tabla 11.2. Restricción de Dosis según la Jornada Laboral en MN.

Jornada Laboral en MN [hs/día]	Restricción de Dosis anual [mSv/año]
3 hs	2,25 mSv
4 hs	3,00 mSv
5 hs	3,75 mSv
6 hs	4,50 mSv
7 hs	5,25 mSv
8 hs	6,00 mSv

Fuente: Elaboración propia.

En relación a la optimización, se recomienda **maximizar la seguridad de cada operación**, llevando los riesgos asociados “tan bajo como sea razonablemente posible” teniendo en cuenta aspectos sociales, ambientales y económicos. Este criterio es conocido por su acrónimo en inglés “ALARA” (As Low As Reasonably Achievable).

Particularidades sobre límites y restricciones de dosis en MN

Los límites de dosis efectivas especificadas precedentemente son aplicables a la suma de las dosis recibidas por exposición externa en el período especificado y de las dosis comprometidas causadas por las incorporaciones de material radioactivo en el mismo período. (IAEA, 2016, p. 143). Se debe tener en cuenta que además del aporte de dosis por exposición externa, el POE que dentro de sus tareas manipula fuentes abiertas –es decir, cuyo contenido puede ser trasvasado y fraccionado– está expuesto al riesgo de contaminación con material radioactivo como parte de los riesgos inherentes a sus procesos de trabajo. La incorporación se puede producir por contacto con la piel, inhalación y/o ingesta, dependiendo también de la forma física del material (sólida, líquida o gaseosa) en ese ambiente. El material radiactivo –una vez depositado en un órgano– continuará aportando dosis de radiación por tiempos prolongados. En esos casos, se aplica la noción de dosis efectiva comprometida, que estima el aporte de dosis durante 50 años para adultos –como es el caso del POE– y de 70 años en menores de 18 años.

Recordemos que las restricciones de dosis y los niveles de referencia se emplean para optimizar la protección y la seguridad. Las restricciones de dosis se aplican a la exposición ocupacional y a la exposición del público en situaciones de exposición planificadas, como las que se dan en MN. Las restricciones de dosis se fijan separadamente para cada fuente sometida a control y se utilizan como condiciones de contorno en la definición de la gama de opciones existentes con fines de optimización de la protección y la seguridad. Asimismo, para evitar confusiones

habituales en relación al respectivo alcance de las definiciones de límite y restricción de dosis, aclararemos lo que las restricciones no son:

- **Las restricciones de dosis no son límites de dosis:** el hecho de sobrepasar una restricción de dosis no constituye un incumplimiento de los requisitos reglamentarios, aunque podría dar origen a la adopción de medidas de investigación y seguimiento por parte de las Autoridades de Aplicación.
- **Las restricciones de dosis no son objetivos a alcanzar:** las instalaciones, procedimientos y condiciones de trabajo deben maximizar la seguridad, minimizando las dosis ocupacionales tanto como sea razonablemente posible. Esto significa que no es suficiente con registrar dosis anuales por debajo de la Restricción de Dosis, sino que se deben realizar sistemáticamente todas las operaciones de modo tal de **maximizar** la protección. La Restricción de Dosis establece la división entre lo “aceptable” y lo “tolerable”, mientras que el Límite de Dosis Individual marca la frontera entre lo “tolerable” y lo “inaceptable” (Tabla 11.3).

Tabla 11.3. Caracterización de los límites y restricciones de dosis.

Hasta 6 mSv/año para 8 hs o su parte proporcional	ACEPTABLE
Mayor que 6 mSv/año y hasta 20 mSv/año	TOLERABLE
Mayor que 20 mSv/año y hasta 50 mSv/año (Promedio en 5 años)	INACEPTABLE
Mayor que 50 mSv/año (en 1 año cualquiera)	

Fuente: Elaboración propia.

En MN, los factores que determinan la dosis ocupacional están especialmente vinculados al MODO de realizar cada una de las operaciones, más que a las características de las instalaciones fijas, la duración de la jornada de trabajo o la cantidad de prácticas realizadas (Einisman, 2013). La utilización sistemática de los Elementos de Protección Personal (EPP) y en particular, de los blindajes apropiados en las etapas de manipulación, traslado y aplicación del material radiactivo, redundará en una maximización de la protección radiológica contra la irradiación externa; así como el uso sistemático de guantes descartables durante la manipulación, preparación y/o administración, a fin de prevenir la contaminación con material radiactivo. Se trata de medidas simples, pero que sólo funcionan si se las implementa – insistimos– sistemáticamente en cada operación cotidiana. **Maximizar la protección en cada operación es la única forma de minimizar los riesgos radiológicos a lo largo de la vida laboral.**

Elementos de Protección Personal

Los Elementos de Protección Personal (EPP) a los que nos referimos en este apartado, son de uso generalizado en Salud. Por tanto, nos limitaremos a observaciones particulares en relación con su uso en MN. Cabe señalar que los EPP no eliminan el riesgo, sino que son la última barrera contra dicho riesgo, morigerando o disminuyendo sus efectos. En cumplimiento de la normativa vigente, es obligación del empleador el proveerlos, documentando su entrega en forma individual y en cantidad suficiente, así como controlar su utilización por parte de los trabajadores. Debe colocarse señalética recordando la obligatoriedad de su uso, transversal a todos y cada uno de los procesos y subprocesos que involucren la manipulación de material radiactivo y/o presencia de radiaciones ionizantes.

Indumentaria y accesorios

Para la mitigación de la exposición a la radiación ionizante y dado el rango de energías de los radioisótopos usuales en MN, sólo parece justificarse la utilización de EPP con una protección equivalente a 1 mm Pb en el caso de fuentes de ^{99m}Tc, ya que espesores menores no ofrecen una reducción significativa de la exposición a la radiación, en particular para las energías del ¹³¹I y ¹⁸F (Tabla 11.4). **El criterio principal es blindar las fuentes mientras sea posible.**

Tabla 11.4. Atenuación relativa (%) de EPP plomados para radioisótopos usuales en MN.

Radioisótopos		Espesor equivalente [mm Pb]		
Isótopo	Emisión Gamma [Kev]	0,25 mm Pb	0,5 mm Pb	1 mm Pb
^{99m} Tc	140	54%	75%	93%
¹³¹ I	360	8%	14%	26%
¹⁸ F	511	4%	8%	16%

Nota. Calculado en todos los casos para una actividad de 370 MBq (10 mCi) a 50 cm de distancia.

Fuente: Elaboración propia.

Delantal plomado: en caso de utilizar delantal plomado, es conveniente que tengan protección tiroidea o en su defecto garantizar la adquisición por separado de los collarines protectores de tiroides. Deben renovarse cada dos años y –a fin de preservarlos adecuadamente– se debe contar con percheros especiales. Asimismo, deben cuidarse mediante protocolos de limpieza de material biológico.

Gafas: hay gafas plomadas con vidrio frontal de 1.0 mm Pb y vidrio lateral de 0.5 mm Pb. Su peso promedia los 80 gramos. La protección ocular debe ocasionar al usuario la mínima limitación posible del campo visual y tener un grado de neutralidad óptica que sea compatible con la naturaleza de las actividades. Los modelos destinados a personas que requieren de corrección ocular deberán ser compatibles con la utilización de anteojos y/o lentes correctoras.

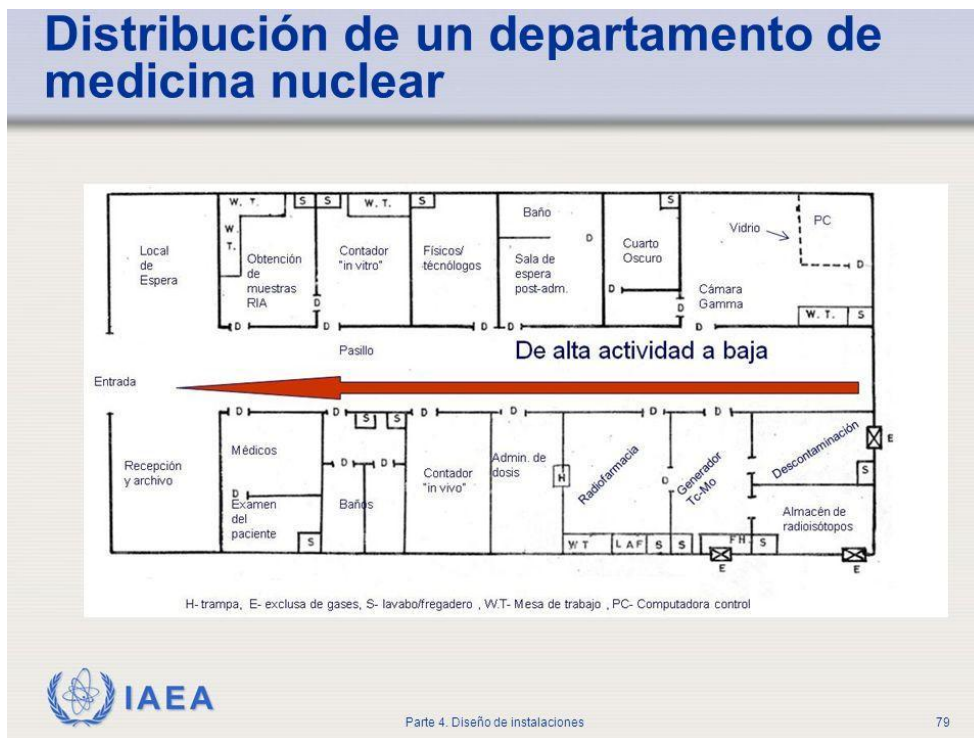
Calzado: debe ser cerrado e impermeable, o utilizarse cubre calzado descartable.

Guantes: los guantes impermeables son el tipo de EPP más común e importante en MN, con el fin de evitar la contaminación cutánea durante la manipulación de material radioactivo. Una gran variedad de materiales es utilizada para su elaboración, entre ellos se incluyen: látex, nitrilo, neopreno, copolímero y polietileno, en varios tamaños y espesores.

Instalaciones de MN

Las instalaciones de MN deben cumplir con características funcionales y servir al objetivo de maximizar la protección radiológica. Esto se logra por medio de la cuidadosa distribución de los sectores y la instalación de las barreras físicas, controles de acceso, servicios sanitarios, blindajes e instalaciones de protección contra la radiación. En la Figura 11.3, incluimos a título ilustrativo un esquema de distribución propuesto por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA), proyectado para que los riesgos asociados a las radiaciones ionizantes sean menores en la medida en que las personas permanezcan más cerca de la entrada de la instalación.

Figura 11.3. Propuesta de diseño de un Servicio de MN.



Fuente: IAEA (2010).

Diferenciación de áreas en las instalaciones de MN

La demarcación de zonas internas por medio de la correcta señalización es una de las medidas de radioprotección que permite restringir la circulación de personas en lugares donde puedan

potencialmente exponerse a la radiación. A continuación, repasamos las caracterizaciones, brindando algunos ejemplos de aplicación en MN.

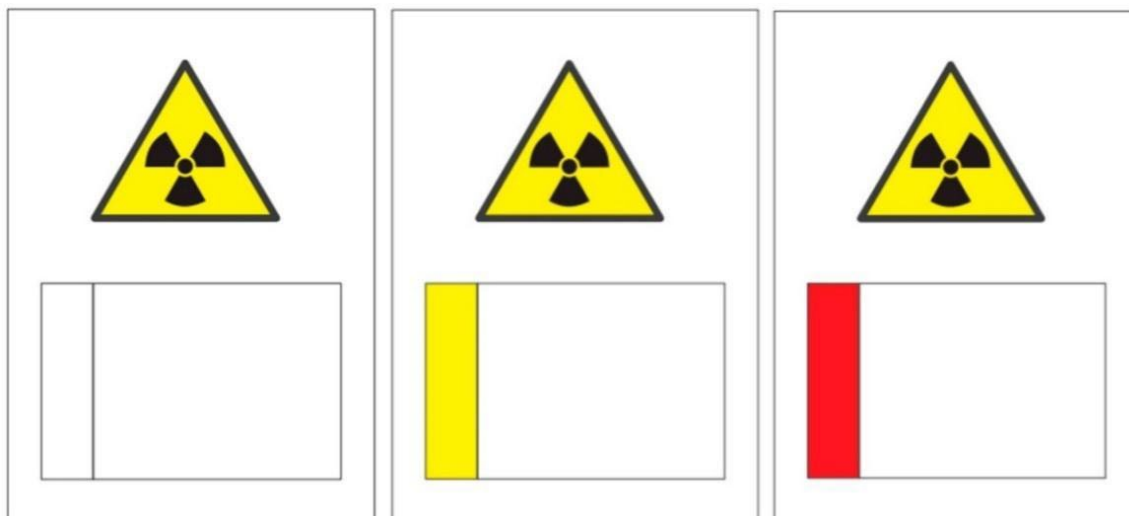
Área Supervisada: área delimitada que no constituye una zona controlada pero dentro de la cual se mantienen bajo vigilancia las condiciones de exposición ocupacional, aunque normalmente no se requieran medidas de protección o disposiciones de seguridad específicas. Para ingresar en ella es preciso contar con la autorización expresa del responsable. Por ejemplo, el Laboratorio de Radioinmunoanálisis.

Área Controlada: área delimitada en la que se requieren o podrían requerirse medidas de protección y disposiciones de seguridad específicas con objeto de controlar las exposiciones o prevenir la propagación de la contaminación en condiciones normales de trabajo, y de impedir o limitar el alcance de las exposiciones potenciales. Esto incluye todas las zonas donde se deposita, manipula o administra material radiactivo; áreas con pacientes inyectados y/o sus excretas; áreas de depósito de residuos contaminados; áreas de registro de datos o imágenes. El acceso está permitido sólo para el personal que se encuentre licenciado para hacerlo. Por ejemplo: el laboratorio de soluciones radiactivas o “Cuarto Caliente”; la Sala de Espera y baño de pacientes inyectados con material radiactivo; etc.

Área Radiológica Prohibida: área delimitada restringida. Sólo puede acceder el personal del área controlada que cuente con la autorización del responsable y acompañado por una persona designada a ese efecto. No son frecuentes en las instalaciones de MN.

Existen tres diseños que incluyen el símbolo internacional de radiación acompañado por etiquetas rectangulares y editables, de acuerdo al nivel de exposición sobre el que buscan advertir (Figura 11.4). La que posee el rectángulo con una banda blanca indica que la zona de trabajo se define como área supervisada; la banda amarilla indica que estamos ante un área controlada y la banda roja indica la prohibición de acceso a personas ajenas al personal del área controlada.

Figura 11.4. Cartelería de áreas según el riesgo radiológico: Izq. Área supervisada; Centro: Área controlada; Der. Área radiológica prohibida.



Fuente: ARN (2021).

El cartel que corresponde al Área Controlada (banda amarilla) se utiliza en laboratorios de radiofarmacia en MN, que trabajan con actividades superiores a 370 MBq (10 µCi) y donde se realiza marcación de moléculas y fraccionamiento. En estas áreas, se indica el uso obligatorio de dosimetría personal y del detector de radiaciones para medir tasa de dosis y contaminación superficial. En el recuadro ubicado a la derecha de la banda de color, debe escribirse:

- El nombre de la institución con su correspondiente N° de Autorización de Operación y los radioisótopos que se utilizan en el laboratorio.
- El nombre del responsable por la seguridad radiológica ante la ARN, su N° de permiso individual y un N° de teléfono donde ubicarlo en caso de una emergencia.
- Sólo se permite la entrada de personal autorizado.
- No se escribe sobre la franja de color.

A modo de ejemplo, se muestra en la Figura 11.5 la cartelería de uso obligatorio, tanto en la entrada (Izquierda) como dentro del laboratorio de radiofarmacia (Derecha):

Figura 11.5. Ejemplos de cartelería para el laboratorio de soluciones radiactivas o “Cuarto Caliente”.



Nota. Izquierda: Advertencia de Área Controlada, ejemplo de instalación hospitalaria. Fuente: Elaboración propia sobre modelo ARN (2021). Derecha: Cartel con medidas básicas de PR, de uso obligatorio. Fuente: ARN (2021).

Cuando se utilizan equipos híbridos o multimodales que integren sistemas de tomografía computada (TC) a los equipos de MN, tales como SPECT/TC y PET/TC, los trabajadores pueden

sufrir exposiciones accidentales a las radiaciones ionizantes provenientes de los equipos generadores de rayos X, debido a la emisión de radiación primaria o secundaria.

- Radiación primaria: es la emergente del tubo, previa a la interacción del haz de rayos X con el paciente.
- Radiación secundaria o dispersa: es la generada tras la interacción de Rayos X con la materia o radiación de fuga o nube, esto es, la no absorbida por la calota que blindada el tubo de rayos X en su proximidad.

Por ello, incluimos en la Figura 6 otra simbología que también puede encontrarse en Servicios de MN:

Figura 11.6. Otra simbología en cartelería sobre radiaciones ionizantes.



Nota. Izquierda: Advertencia de emisión de Rayos X. Derecha: Advertencia de riesgos cancerígenos, mutagénicos o reprotóxicos asociados. Fuente: SRT.

Este último símbolo del Sistema Globalmente Armonizado (SGA) podría encontrarse en un envoltorio o etiqueta de material radiactivo, debido a que representa los denominados “riesgos cancerígenos, mutagénicos o reprotóxicos asociados” (acrónimo en inglés: CMR). Debería estar acompañado por las frases armonizadas correspondientes y la ficha de datos de seguridad.

Vigilancia Radiológica de Áreas Controladas

Debe contarse con un programa de vigilancia radiológica destinado a mantener los niveles de radiación y contaminación tan bajos como sea razonablemente alcanzable y que contemple, como mínimo, lo siguiente:

- a. El monitoreo periódico de la radiación ambiental y la contaminación superficial en todas las áreas de la instalación en las que se emplee material radiactivo y de todos los objetos que pudieran resultar contaminados con material radiactivo (guardapolvos, pinzas, material reutilizable, porta jeringas, porta muestra del “activímetro”, etc.).
- b. El monitoreo de la contaminación superficial en aquellas áreas en que no se emplea material radiactivo cuando se sospeche el arrastre incidental de dicha contaminación.

Características constructivas de las instalaciones de Medicina Nuclear

Se describen en este apartado las medidas y características constructivas mínimas de las diferentes salas de un servicio de MN, de acuerdo con la normativa vigente. Para el caso especial de instalaciones PET, recomendamos seguir las indicaciones y especificaciones técnicas de la ARN¹⁸, que son adecuaciones de los criterios aquí reseñados para las instalaciones de MN en general:

1.- Laboratorio de radiofarmacia o “Cuarto caliente”

Debe ser de afectación exclusiva al uso de radioisótopos, con paredes de mampostería de ladrillo macizo de 15 cm de espesor o de material que provea atenuación equivalente para todos los radionucleidos consignados en la Licencia de Operación. Sus medidas mínimas deben ser de 1,50 m por 2,00 m. Dicho laboratorio deberá contar con:

- a) Una puerta con llave.
- b) Mesada de material no absorbente y de superficie continua. La pared sobre la mesada deberá estar impermeabilizada hasta una altura de 50 cm por encima de esta. La unión de la mesada con la pared deberá efectuarse de forma tal que una sea continuación de la otra, evitándose los ángulos rectos. Los materiales a utilizar pueden ser acero inoxidable, laminado plástico liso o cemento alisado impermeabilizado con pintura a base de resinas epoxi.
- c) Dos piletas separadas entre sí por una distancia mínima de 1,50 m, una de ellas deberá ser impermeable (por ejemplo, acero inoxidable) sin sifón, destinada al lavado de elementos contaminados.
- d) Piso de material no absorbente y de fácil limpieza (por ejemplo: goma, plástico, etc.)
- e) Elementos/dispositivos de uso exclusivo para las prácticas de fraccionamiento que se realicen en el cuarto caliente blindados de acuerdo con la naturaleza y actividad de los radionucleidos a emplear:
 - Depósito de guarda de material radiactivo.
 - Pantalla de fraccionamiento con visión directa o indirecta.
 - Contenedor para efectuar la elución del generador.
 - Contenedor para el transporte de jeringas.
 - Contenedores para el almacenamiento y decaimiento de residuos sólidos contaminados.

¹⁸ Al respecto, véanse:

1) Requisitos a cumplir por entidades para utilizar fuentes abiertas en PET en seres humanos. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/f104_r0_requisitos_entidades_fuentes_abiertas_pet.pdf

2) Recomendaciones y requisitos mínimos necesarios para la evaluación del blindaje de instalaciones PET. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/f103_r0_requisitos_evaluacion_blindaje_pet.pdf

3) Metodología de evaluación de una memoria de cálculo de un centro PET. Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/metodologia_memoria_de_calculo_pet.pdf

2.- Cuarto tibio o de aplicación

Debe ser adyacente al cuarto caliente y sus medidas mínimas deben ser de: 1,5 m x 2 m.

El piso de este cuarto deberá ser de las mismas características que el del cuarto caliente.

3.- Un cuarto para cada equipo de medición *in vivo*

La distancia mínima recomendada entre el punto medio de la camilla y la consola de comando es de 2 metros, lo que implica que el cuarto de medición para un Tomógrafo por Emisión de Fotón Único (acrónimo en inglés: SPECT) deberá ser del orden de 6 x 5 metros y para una cámara gamma del orden de 4 x 5 metros. Si el servicio cuenta con brazo de captación tiroidea, este puede ser instalado en la Sala de Aplicaciones o “Cuarto tibio”.

4.- Sala de espera para pacientes con material radiactivo incorporado

Debe encontrarse dentro de los límites del servicio de MN, estar separada de la sala de espera general y contar con baño de afectación exclusiva al uso por dichos pacientes.

Requisitos normativos específicos de las instalaciones de MN

Son requisitos obligatorios para la operación de una Instalación de MN (Clase II), según ARN (2002):

- Contar con la Licencia de Operación otorgada por la ARN y un médico Responsable con permiso individual vigente para el propósito correspondiente.
- Personal médico con permiso individual para los estudios o tratamientos que se realizan, en número suficiente para cubrir todo el horario en que se administre material radiactivo a los pacientes.
- Personal profesional o técnico con permiso individual y preparación adecuada para la manipulación de material radiactivo, en número adecuado a la carga de trabajo de la instalación de MN.
- En aquellas instalaciones que utilicen equipamiento de MN de alta complejidad tal como Tomografía por Emisión de Positrones (acrónimo en inglés: PET) o SPECT con más de un cabezal empleado para mediciones en coincidencia, el plantel mínimo debe completarse, a satisfacción de la ARN, con un especialista en física médica con dedicación parcial.
- Cuando la complejidad de los procesos radioquímicos que se realicen en la instalación de MN así lo requiera, el plantel mínimo deberá completarse con un especialista en radioquímica o radiofarmacia con permiso individual, con dedicación parcial a satisfacción de la ARN.
- Para realizar una práctica no rutinaria se debe contar con la correspondiente Autorización de Práctica no Rutinaria otorgada por la ARN y con un responsable con permiso individual vigente para el propósito correspondiente.

- Todos los trabajadores y profesionales que utilizan trazadores radiactivos en seres humanos, sean para diagnóstico, tratamiento o investigación, deberán contar con un permiso individual específico otorgado por la ARN y serán los únicos integrantes del Equipo de Salud que podrán manipular las fuentes radiactivas.
- La operación de la instalación de MN debe enmarcarse dentro de un sistema de calidad que contenga procedimientos escritos por los miembros del equipo de salud que conforma cada Servicio de MN y que cubran –como mínimo– los procesos de:
 - Compra, recepción y almacenamiento, e inventario del material radiactivo.
 - Manipulación del material radiactivo dentro de la instalación y para aquellos casos en que deba ser utilizado fuera de ella (quirófanos, salas de internación, etc.).
 - Vigilancia radiológica de áreas y personal.
 - Mantenimiento y control de calidad del equipamiento de MN, del activímetro y del equipamiento de protección radiológica.
 - Protección radiológica del paciente.
 - Gestión de los residuos radiactivos.
 - Situaciones anormales.

Protección Radiológica en los procesos de MN

Para una mejor comprensión de los diferentes riesgos radiológicos en las prácticas de MN y con el fin de prevenirlos y/o controlarlos, abordaremos por separado los aspectos específicos en los procesos de:

- Radiofarmacia
- Administración del radiofármaco
- Adquisición de datos e imágenes
- Gestión de residuos
- Transporte de sustancias radioactivas
- Emergencias y/o Situaciones Anormales

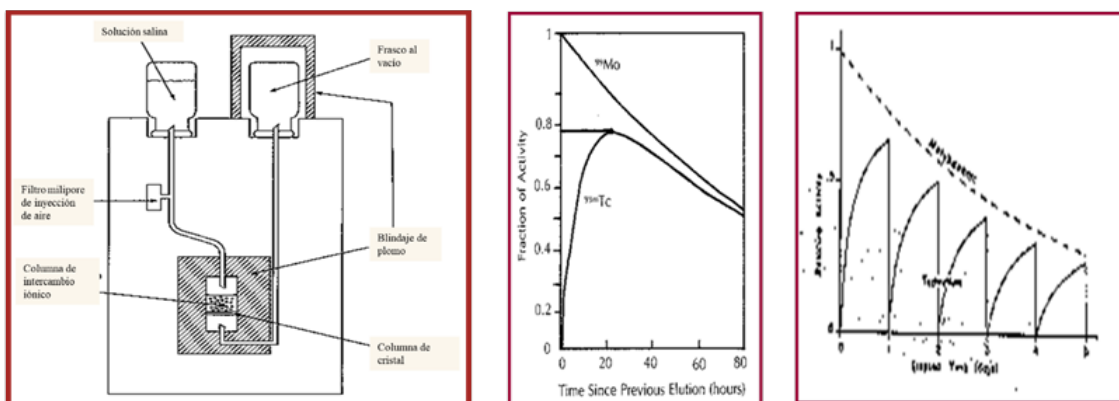
Procesos de radiofarmacia

La presencia del personal ocupacionalmente expuesto en el “cuarto caliente” o laboratorio de radiofarmacia, así como la totalidad de los procedimientos que involucran el uso de fuentes abiertas en dicho cuarto, implican un riesgo de exposición externa a las radiaciones ionizantes y su potencial incorporación. Iniciamos el análisis diferenciando dos clases de procesos de trabajo en radiofarmacia: MN general y PET.

MN en general: la obtención del material radiactivo con el que se marca una gran cantidad de fármacos se inicia mediante la elución del generador de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$; la posterior medición de actividad del eluido (la cual podría estar entre 3,7 GBq (100 mCi) a 111 GBq (3 Ci) de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ durante los primeros días del generador) y el subsiguiente fraccionamiento de dosis para la marcación de radiofármacos. Estas son algunas de las tareas durante las cuales el trabajador puede estar especialmente expuesto a las radiaciones ionizantes. Por ello, los procesos deben llevarse a cabo siguiendo e implementando correcta y oportunamente las medidas de Protección Radiológica, tanto para prevenir la contaminación radiactiva, como para minimizar la exposición a la radiación.

Elución del generador: la mayoría de las prácticas diagnósticas en MN convencional, se realizan asociando un fármaco con pertecnetato de sodio ($^{99\text{m}}\text{TcO}_4 \text{Na}$) obtenido por la elución de un generador de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Dicha elución consiste en hacer pasar una cierta cantidad de solución fisiológica ($\text{NaCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$) por una columna cromatográfica en la que el ^{99}Mo está retenido por adsorción sobre una base de alúmina. Al colocar un frasco o vial al vacío en el otro extremo del sistema generador y luego de 1-2 minutos, este se llenará con la solución fisiológica que arrastra el $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (Figura 11.7). El frasco conteniendo la actividad eluida se retira del generador y se reemplaza por otro frasco al vacío, con el fin de mantener tanto la columna cromatográfica seca como la esterilidad del sistema. Para ello, es importante limpiar previamente con alcohol etílico al 70-96% la superficie externa de los tapones de goma de cada uno de los viales a utilizar en la operación de elución, a fin de preservar la esterilidad de la solución.

Figura 11.7



Nota. Izq.: Esquema de un generador de ^{99}Mo - $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Centro: Actividad de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ en función del tiempo desde la última elución y Der.: Desde la carga de ^{99}Mo . Fuente: IAEA (2010).

La minimización de la exposición externa relacionada con el generador y su uso, se realiza básicamente:

- **Antes:** Manteniendo el generador dentro del castillo o “bunker” plomado desde su llegada al Servicio de MN hasta su retiro por el proveedor.
- **Durante:** Eluyendo el generador con el frasco al vacío dentro de un blindaje apropiado.
- **Después:** Manteniendo un blindaje en el 2º frasco al vacío, que se inserta al finalizar la operación.

Fraccionamiento: en estas operaciones, la maximización de la protección contra la exposición externa se logra manteniendo TODAS LAS FUENTES EN SUS BLINDAJES (frascos y jeringas) y llevando a cabo las operaciones de manipulación detrás de la pantalla fraccionadora en los tiempos más cortos posibles, compatibles con una operación segura. Preferentemente, se deben manejar las fuentes emisoras de radiación utilizando pinzas (para reducir la dosis en piel) y guantes descartables (para prevenir la contaminación cutánea), evitando su manipulación directa. Así como utilizar anteojos de vidrio plomado y/o pantalla protectora con visor de vidrio plomado (Figura 11.8). Por la naturaleza de estas operaciones –que incluyen necesariamente el trasvasado de material radioactivo– éstas deben realizarse sobre una bandeja removible cubierta de material absorbente (puede ser una toalla de papel descartable) a fin de poder descontaminar fácilmente el área de trabajo en caso de salpicaduras accidentales.

Figura 11.8. Blindajes para fraccionamiento.



Nota. Izquierda: Pantalla fraccionadora con vidrio plomado. Centro: Blindaje de viales y jeringas. Derecha: Tasa de dosis con y sin blindaje para jeringas de tungsteno o wolframio (W) de 2 mm de espesor. Fuente: IAEA (2010).

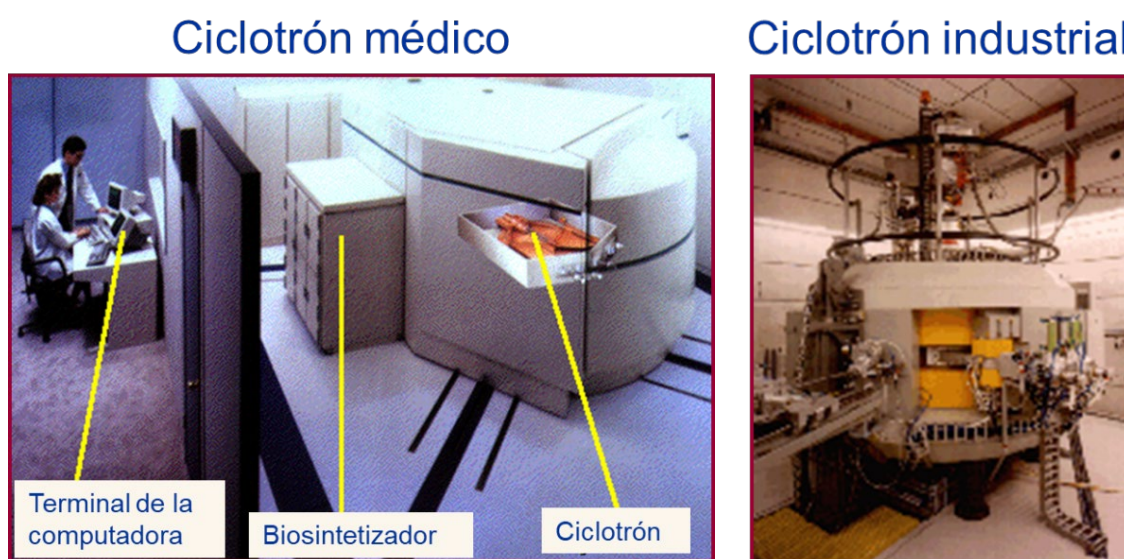
La prevención de la contaminación y potencial incorporación por el manejo de líquidos radiactivos durante su fraccionamiento, se realiza básicamente manteniendo los viales en leve depresión (retirando del vial de reacción un volumen gaseoso de hasta 0,5 cm³ por encima del volumen introducido), después de la introducción del material radiactivo. Esto evita –por diferencia de presión relativa– salpicaduras, dispersión o aerosoles al extraer la aguja. Por ejemplo: si se inyectara 1,5 ml de líquido en un vial con tapón de goma, se recomienda extraer 2 ml de aire del mismo, antes de retirar la aguja. La presión relativa negativa dentro de los viales que contienen material radiactivo debe tenerse muy en cuenta en las reacciones endotérmicas –como en la marcación de coloides o MIBI para perfusión miocárdica– ya que son sometidas a calentamiento para provocar esta reacción: el aumento de presión será proporcional al de temperatura, en un volumen cerrado como el del vial. Durante las operaciones de fraccionamiento del radiofármaco, las eventuales burbujas de aire que ingrese en la jeringa nunca deben eliminarse directamente en el ambiente ni con la aguja desprovista de su capuchón. Los procedimientos de descontaminación se detallan más adelante en este capítulo, en el apartado “Procedimientos de Emergencias y/o Situaciones Anormales”.

En caso de fraccionamiento de solución acuosa de ¹³¹I Na –volátil a temperatura ambiente– se deben utilizar los sistemas de ventilación o extracción de aire adecuados y mantener las puertas del laboratorio cerradas. El transporte interno y guarda de las jeringas conteniendo emisores de radiación Gamma, se realizan en los blindajes específicos hasta su descarte en el contenedor

correspondiente. Los blindajes para viales y jeringas utilizados para su transporte deberán ser de plomo o material equivalente, con espesores adecuados según la energía emitida por cada radionucleido y deberán contar con una base de apoyo suficiente para evitar su caída al ser apoyados. Deberán además estar adecuadamente pintados (pintura epóxica o similar) y ser manipulados con guantes de látex o nitrilo para evitar el contacto y posible absorción cutánea del plomo. El control de las medidas de prevención adoptadas en forma sistemática, se realiza por medio del correcto uso de la dosimetría personal de cuerpo entero y mano.

PET: en la producción de radionucleidos para Tomografía por Emisión de Positrones (acrónimo en inglés: PET) se utilizan ciclotrones de diferente tamaño, según su finalidad, denominándose “Baby ciclotrón” a los de uso hospitalario (Figura 11.9, Izquierda). En ellos se producen los emisores β^+ , que poseen períodos de semidesintegración del orden de minutos (110 minutos para el ^{18}F , uno de los más utilizados). Por ello su producción debe efectuarse muy cerca del lugar donde se utilizarán –y preferentemente– en el propio servicio de MN. En esos casos, junto al ciclotrón donde se produce el isótopo, se dispone el área de radiofarmacia para el procesamiento y control de calidad del producto, previo a su administración.

Figura 11.9. Ciclotrones para producción de radionucleidos para PET.



Fuente: IAEA (2010).

Los radioisótopos usados en PET emiten partículas β^+ con diferente rango de alcance, que luego se aniquilan con electrones orbitales emitiendo dos fotones de 0,511 MeV. Por ello, los blindajes para viales y jeringas deben estar compuestos de una capa interior de materiales de bajo Z (acrílico o similares) para las partículas β^+ y otra exterior de alto Z (plomo o similares) para la atenuación de los fotones.

Procesos de administración del radiofármaco

Previo a la administración del radiofármaco al paciente, deben darse todas las indicaciones en forma verbal y escrita, a fin de minimizar los tiempos de exposición durante o después de la aplicación del material radiactivo. Deben emplearse las dosis recomendadas para realizar cada estudio clínico de manera de obtener siempre resultados de calidad diagnóstica, de modo de justificar su realización mediante el beneficio neto positivo del paciente y evitar repeticiones de estudios que requieran de nuevas administraciones de dosis. Teniendo en cuenta la seguridad y bienestar del paciente, la optimización integral de la práctica se realiza utilizando los blindajes adecuados –tal como blindajes porta jeringas– maximizando la distancia con el paciente al que se ha administrado el radiofármaco y minimizando los tiempos de exposición.

La administración del radiofármaco puede hacerse por distintas vías: endovenosa, intradérmica, subdérmica, oral (líquidos o sólidos) o aérea (aerosoles o gases). Estos últimos requieren de una serie de recaudos especiales, dado que los aerosoles, suspensiones gaseosas y gases nobles radiactivos que potencialmente pueden escapar al ambiente desde los dispositivos empleados para realizar estudios de ventilación pulmonar –o aquellos que son exhalados por el mismo paciente–, permanecerán suspendidas en el ambiente y serán depositadas paulatinamente en aquellas salas que no cuenten con sistemas adecuados de ventilación y/o extracción de aire. Estas suspensiones y/o depósitos sobre la superficie de los elementos existentes en la sala producen contaminación con las sustancias radiactivas utilizadas, con la consecuente exposición externa a la radiación y riesgo de incorporación. De igual forma, en las salas de administración de dosis diagnósticas o terapéuticas de ^{131}I , podrán observarse trazas de ^{131}I molecular debido a la alta volatilidad de las fracciones de este elemento que pudieran encontrarse en su forma químicamente no reducida.

Procesos de gestión de Residuos Biológicos y Radioactivos

En su carácter de actividad regulada, las pautas aquí presentadas para el tratamiento de residuos radiactivos derivan de la Norma AR 10.12.1, Revisión 3, “Gestión de residuos radiactivos” (ARN, 2016a). Se consideran residuos radiactivos todos aquellos materiales contaminados con material radioactivo durante la realización de las prácticas asistenciales, de docencia e investigación y calibración de equipos (guantes, camisolines, almohadillas absorbentes, ropa, mascarilla panorámica, jeringas y agujas, entre otros). Algunos elementos (no descartables) pueden ser reutilizados previa descontaminación en caso de necesidad y luego de comprobar que la tasa de exposición no supere al de la radiación de fondo medida previamente y sin fuentes de radiación en la zona. Los desechos se gestionan según su forma física: líquidos o sólidos, y dentro de los sólidos, de acuerdo al tiempo de semidesintegración ($T_{1/2}$) del radionucleido. A modo de ejemplo, ilustraremos la situación con los más utilizados en la actividad cotidiana en MN: $^{99\text{m}}\text{Tc}$; ^{131}I y ^{18}F .

Líquidos: estos son muy infrecuentes, merced a los procesos operativos utilizados en los Servicios de MN. En casos excepcionales, los líquidos que no están en frascos cerrados y que por su gran volumen no pueden ser envasados para ser tratados como residuos sólidos, se eliminan lentamente y junto a abundante agua corriente –a fin de diluir el vertido todo lo posible– en la “pileta caliente” (sin sifón). Por ejemplo: una dosis diagnóstica (< 100 µCi) de ¹³¹I que no pudo ser administrada a último momento y que, de no ser descartada, provocaría un riesgo radiológico innecesario por la volatilidad del yodo a temperatura ambiente.

Sólidos: aquellos materiales descartables contaminados con material radiactivo se retendrán en un contenedor plomado por un tiempo igual o superior a ocho (8) períodos de semidesintegración (véase la Tabla 5), para su decaimiento en condiciones seguras. Los sub clasificamos en dos tipos, según su T_{1/2}:

Corto (^{99m}Tc, ¹⁸F): Viales, jeringas, agujas, algodones, guantes, etc., que se producen en la actividad cotidiana, se confinan en un descartador que se encuentra dentro del búnker plomado. Este se descarta como residuo patogénico (en bolsas rojas) una vez transcurridos al menos ocho (8) períodos de semidesintegración desde su última utilización.

Largo (¹³¹I): Los vasos, viales y material descartable utilizado, se rotulan con el isótopo y la fecha, para su confinamiento en recipiente plomado, por al menos 2 meses desde su última utilización.

Tabla 11.5. Tiempo mínimo de guarda de residuos sólidos contaminados.

Radioisótopo	Símbolo	Periodo de semidesintegración (T _{1/2})	Tiempo mínimo de guarda (8 x T _{1/2})
Iodo 131	¹³¹ I	8,04 días	2 meses
Tecnecio 99m	^{99m} Tc	6 horas	2 días
Flúor 18	¹⁸ F	110 minutos	15 horas

Fuente: *Elaboración propia.*

Se deberá disponer de descartadores dentro del búnker plomado y dos recipientes plomados para residuos radiactivos. Los generadores ya decaídos son mantenidos en el búnker plomado hasta su retiro por el proveedor. Se almacenan en diversos contenedores limpios y cerrados, a fin de separar los de periodo de desintegración largo (¹³¹I) de aquellos de período corto (^{99m}Tc, ¹⁸F), e identificando cada bulto con el símbolo y fecha correspondientes. Durante este período, quien coordine la gestión de residuos deberá vigilar que no se abran los contenedores innecesariamente.

El objetivo es que transcurra el tiempo necesario para que, verificado por la lectura del monitor de radiaciones, la radiación remanente de los residuos sea indetectable, similar a la radiación de fondo. A partir de ese momento, los residuos serán tratados como desechos convencionales, biopatológicos o contaminantes –según corresponda a la normativa vigente– debiendo previamente retirar su identificación de material radiactivo.

Procesos de adquisición de datos e imágenes

En el proceso de producción de datos e imágenes diagnósticas en MN es posible discriminar, en general, entre adquisiciones estáticas y dinámicas, a saber:

Se denominan “estáticos” a aquellos estudios donde, luego de la administración del material radiactivo en la Sala de Aplicaciones o “Cuarto Tibio” y transcurrido un cierto tiempo de espera a fin que se metabolice correctamente el radiofármaco, se registran datos e imágenes en los equipos. Las variaciones en la concentración del radiotrazador en el órgano o sistema estudiado pueden considerarse poco significativas durante el tiempo de adquisición. A su vez, existen técnicas para la adquisición de datos de órganos en movimiento (como el corazón) denominadas de “gatillado”, que reconstruyen los movimientos cardíacos sincronizándose con la información obtenida de su actividad eléctrica.

Se denominan “dinámicos” a aquellos estudios que se realizan con el paciente ya posicionado en el equipo para la adquisición de datos y/o imágenes. Allí, se procede a la administración del material radiactivo de modo tal que permita, mediante la adquisición secuencial de imágenes, conocer la dinámica de su distribución, concentración y excreción de los compartimientos fisiológicos bajo estudio.

En las actividades terapéuticas en MN, la práctica –en relación con el riesgo radiológico– se caracteriza por dos momentos diferenciados:

- 1) La comunicación previa y efectiva de las medidas a adoptar según el lugar y las situaciones donde permanecerá el paciente (siendo diferentes según su estado clínico, el radiofármaco y la actividad administrada) y
- 2) La operación de administración del radiofármaco (oral o endovenosa).

Equipamiento en MN

El equipamiento utilizado en MN es un grupo abierto a los avances científicos y tecnológicos. Durante su rica historia de más de un siglo, se fueron integrando desarrollos, conocimientos y técnicas provenientes desde la física y química, hasta las ciencias del clima y la información. Una mirada detallada de su historia y aspectos tecnológicos se encuentra en Budinger & Jones (2014). Los equipos actualmente en uso en MN pueden clasificarse en:

Equipamiento de uso Clínico: nos referimos particularmente a los sistemas de detección de la radiación emitida por el radiofármaco desde el cuerpo del paciente. Sus características comunes son su capacidad de cuantificar y localizar la biodistribución de los radiofármacos con el fin de producir datos y/o imágenes con calidad diagnóstica. Las sondas de captación fijas se utilizan para determinar la captación tiroidea del radioyodo; en tanto las portátiles se usan, por ejemplo, dentro del quirófano para detección de “ganglio centinela” en oncología. Los equipos productores de imágenes en MN pueden ser tanto bidimensionales (2D) como tridimensionales (3D), dedicados (de una sola modalidad imagenológica) o híbridos, cuando combinan dos modalidades imagenológicas: una de MN (SPECT o PET), con RM o TC. Resumimos sus características en la Tabla 11.6:

Tabla 11.6. Principales características de las modalidades utilizadas en MN.

Imágenes	Tomográficas ¹⁹ (3D)				Planares (2D)
Radiación	No Ionizante	Ionizante			
Modalidad	Resonancia magnética	Radiología	Medicina Nuclear		
Rango de frecuencias ²⁰	Radiofrecuencia	Rayos x	Rayos Gamma		
Señal por	Transmisión y Emisión ²¹	Transmisión ²²	Emisión ²³		
Equipos dedicados	Resonador Magnético (RM)	Tomógrafo Computado (TC)	Tomógrafo por Emisión de Fotón Simple (SPECT)	Tomógrafo por Emisión de Positrones (PET)	Cámara Gamma (CG)
Equipos Híbridos	---	---	SPECT/RM SPECT/TC	PET/RM PET/TC	---

Fuente: Elaboración propia, basada en Pérez (2011).

Dadas la variedad y complejidad de estos equipos, resulta imposible abarcarlos en este texto. No obstante, resaltamos la importancia de su puesta a punto, control y calibración periódica a los fines de optimizar la calidad de sus resultados, evitando así repeticiones de prácticas que redundarían en mayor exposición de pacientes y del Personal Ocupacionalmente Expuesto. El detalle de esos procedimientos de control de calidad del equipamiento de MN se encuentra en diversas publicaciones, entre ellas SEFM (2021). Ilustramos con distintos ejemplos de equipamiento híbrido: en la Imagen 10 se muestra el esquema del 1º sistema PET-TC (2000), donde los datos de la tomografía con Rx (A) se utilizan para corregir la atenuación de los fotones Gamma (B) en el cuerpo del paciente, generando una imagen de fusión (C) que conjuga información anatómica y funcional. Mientras que en la Imagen 11, se muestran imágenes de fusión en equipos de última generación PET-TC y PET-RM (2020).

¹⁹ “Tomográficas” reconstrucciones tridimensionales de las estructuras estudiadas, que permiten proyectarlas en cortes axiales, sagitales, coronales, u oblicuos.

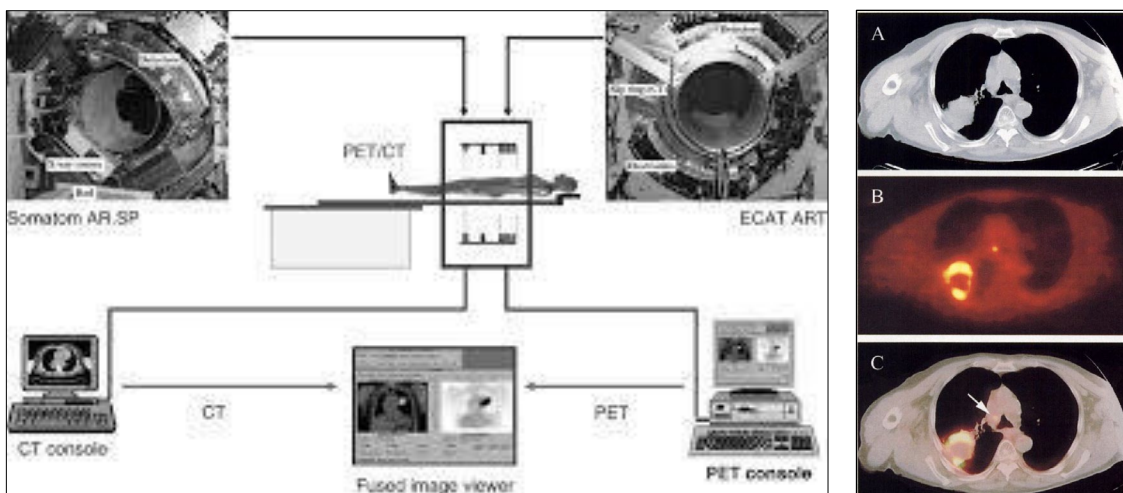
²⁰ “Rango de frecuencias” indica el rango en el espectro electromagnético.

²¹ “Transmisión y Emisión” indica que la señal es transmitida desde el equipo y recuperada luego de su interacción con el paciente.

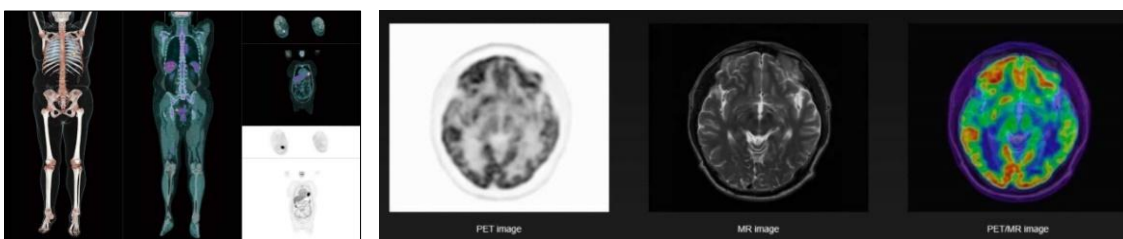
²² “Transmisión” indica que la señal parte desde el equipo hacia paciente.

²³ “Emisión” que la señal va desde el paciente hacia el equipo.

Figura 11.10.



Nota. (Izq.) Esquema del primer PET-TC. (Der.) Imágenes obtenidas con ese prototipo (hombre, 78 años con Ca. de células escamosas de pulmón). (A) Gran masa isodensa vista en la TC; (B) PET con un borde hipermetabólico de mayor captación de FDG y centro necrótico. (C) La imagen fusionada muestra una buena alineación de 2 modalidades. El ganglio linfático en el mediastino (flecha) también demostró un aumento en la captación de FDG. Fuente: Beyer et al. (2000).



Nota. (Izq.) PET-CT de cuerpo entero; (Der.) PET-RMN de cerebro. Fuente: United Imaging (2020)²⁴.

Equipamiento de Protección Radiológica: en la actualidad, el monitor portátil –en particular el detector Geiger-Müller– es utilizado únicamente con fines de monitoreo ambiental o detección de la contaminación de superficies. Normalmente operan a baterías, las cuales deben ser controladas y reemplazadas con la frecuencia apropiada. Este equipo debe recalibrarse cada dos años, o luego de cualquier trabajo de reparación.

Activímetro: equipo utilizado para conocer la cantidad de material radiactivo eluido, recibido y/o a ser administrado al paciente. Este equipo debe controlarse de acuerdo con los procedimientos recomendados en los Protocolos vigentes.

²⁴ En: <https://usa.united-imaging.com/>. Consultado el 09/04/2020.

Transporte de material radiactivo

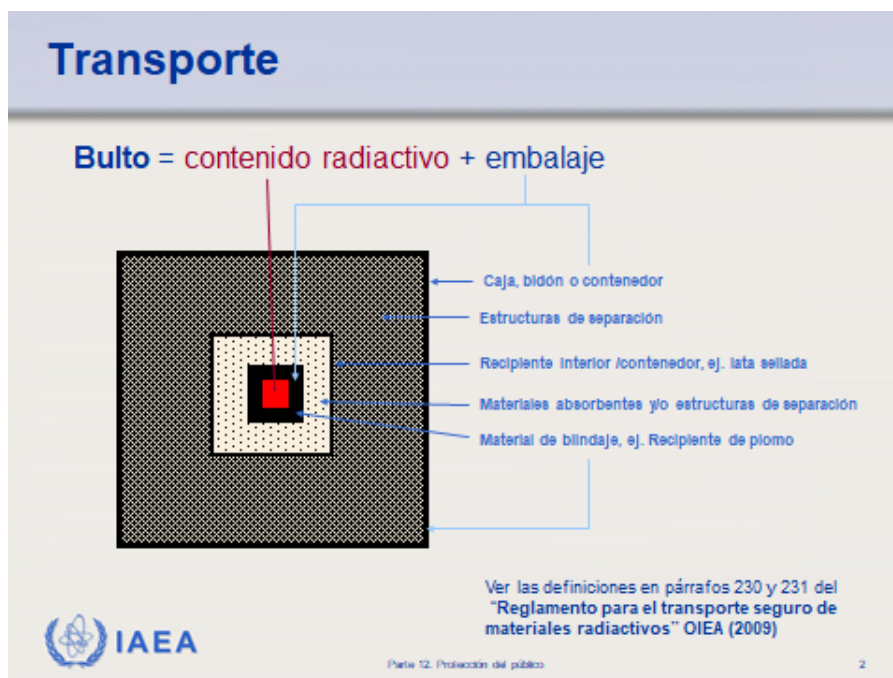
Los Servicios de MN no son los encargados del transporte del material radiactivo, sino sus destinatarios finales en la recepción de generadores y fuentes, o bien sus remitentes, en el caso de devolución de generadores vencidos y/o fuentes de calibración decaídas. No obstante, es importante conocer y observar las disposiciones y Buenas Prácticas en relación con este tema. Todo vehículo que transporte material radiactivo debe cumplir con lo enunciado en la Norma AR 10.16.1, Revisión 3 “Transporte de Materiales Radiactivos” de la ARN (ARN, 2016b) y habilitado para el transporte de mercancías peligrosas. El conductor deberá poseer una Licencia Nacional Habilitante para el transporte de mercancías peligrosas. Asimismo, en todos los casos el conductor deberá:

- Previamente a realizar el transporte, verificar que el vehículo se encuentre en condiciones óptimas y adecuadas.
- Contar con la documentación del vehículo y la licencia correspondiente.
- Verificar que el material radiactivo se encuentre en su blindaje original, adecuadamente cargado y sujeto por medios apropiados (de modo de evitar cualquier desplazamiento o extravío durante el transporte) y con su correspondiente hoja de seguridad (MSDS).
- Colocar la correspondiente señalización en el exterior del vehículo (rombo amarillo y blanco con el número 7).
- Portar y conocer las fichas de intervención para casos de emergencia.
- Toda persona involucrada en el procedimiento deberá tener dosimetría personal de cuerpo entero, y en caso de manipular de cualquier modo la fuente o su contenedor, deberá contar también con dosimetría de muñeca.
- El vehículo que realice transporte de mercancías peligrosas solamente podrá estacionar para descanso en lugares previamente determinados por las autoridades competentes, y en caso de que no existiera, deberá evitar el estacionamiento en zonas residenciales, lugares públicos o densamente pobladas o de gran concentración de personas o vehículos.

Caracterización y diseño de embalajes

La Normativa denomina “bulto” al contenido radiactivo más el embalaje que le ofrece protección. Su diseño contempla tanto la exposición externa como la eventual contención de la contaminación por rotura del envase (Figura 11.12).

Figura 11.12. Componentes de un Bulto para transporte.



Fuente: IAEA (2010).

La Normativa clasifica dos tipos de bultos: Tipo A o Tipo B. El transporte de fuentes para MN se realiza generalmente en bultos Tipo A. El Tipo de bulto debe estar indicado en la cara externa del embalaje, donde también deben estar colocadas las etiquetas correspondientes.

Señalización de vehículos y bultos transportados

VEHÍCULOS: los vehículos deben llevar las etiquetas de riesgo (Rombos) y paneles de seguridad (Rectángulos) que guarden relación con la mercancía transportada. En el momento del transporte –y sólo en el momento del transporte– el vehículo debe estar señalizado en la parte posterior y en los laterales con símbolo normalizado de radiación y la codificación de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) de acuerdo con el reglamento de transporte de materiales peligrosos (cartel naranja). En la parte superior del cartel, debe llevar un número que indica el tipo de riesgo y en su parte inferior, la codificación exacta del producto transportado:

a) Cartel metálico con dimensiones mínimas 25x25 cm, símbolo normalizado de radiación, palabra "RADIOACTIVO" y número 7.

b) Rótulo para indicar por separado el número de las Naciones Unidas, de color naranja y en el que los bordes y el número de las Naciones Unidas deberán ser negros. Este rótulo indica el número de las Naciones Unidas apropiado para los materiales radiactivos de que se trate (Figura 11.13).

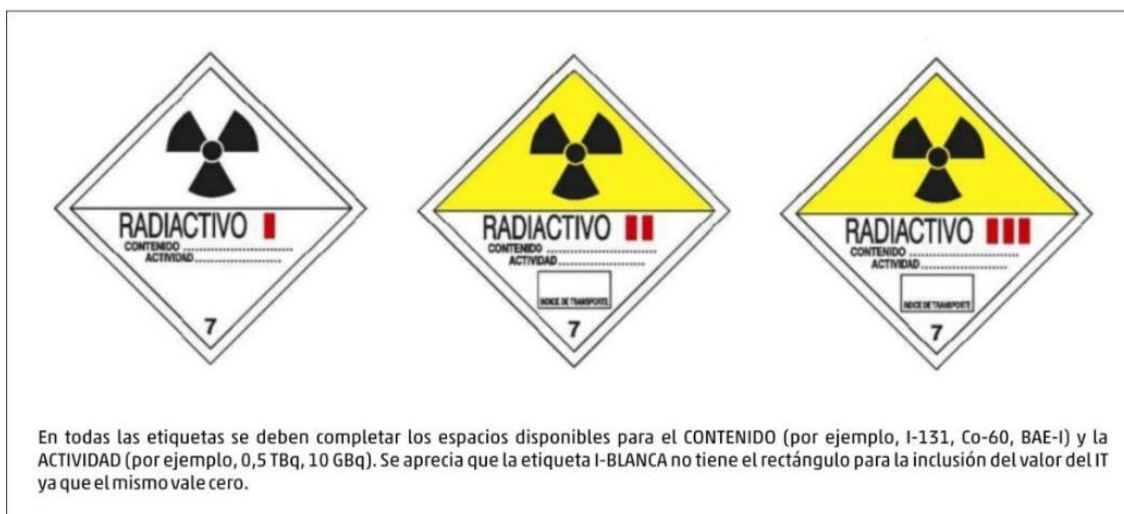
Figura 11.13. Rotulado del vehículo que transporta material radiactivo.



Fuente: IAEA (2010).

ETIQUETADO DE CAJAS Y CONTENEDORES: los contenedores de material radiactivo habitualmente son envases de hojalata sellados y también deben poseer las etiquetas reglamentarias según la normativa vigente. Hay tres tipos de etiquetas: BLANCA I, AMARILLA II y AMARILLA III (Figura 11.14).

Figura 11.14. Etiquetas reglamentarias donde se consignan los datos del envío.



Fuente: ARN.

El tipo de etiqueta se asigna mediante mediciones de la tasa de dosis: en contacto; y a 1 metro. Esta última determina el “Índice de Transporte” (Tabla 11.7). En la etiqueta se consigna: el radionucleido, su actividad, el Índice de Transporte (IT) –excepto en la BLANCA I– el tipo de etiqueta, el símbolo de radiación y el número 7, que es el capítulo del Reglamento Internacional de Transporte de Sustancias Peligrosas que corresponde a “Materiales Radiactivos”.

Tabla 11.7. Categorización de etiquetas de transporte.

ÍNDICE DE TRANSPORTE	TASA DE DOSIS EN CONTACTO	CATEGORÍA
0	$\leq 0,005$ mSv/h	I - BLANCA
$> 0 \leq 1$	$> 0,005$ mSv/h $\leq 0,5$ mSv/h	II - AMARILLA
$> 1 \leq 10$	$> 0,5$ mSv/h ≤ 2 mSv/h	III - AMARILLA
> 10	> 2 mSv/h ≤ 10 mSv/h	III - AMARILLA y uso exclusivo

Fuente: ARN (2016)

Procedimientos de Emergencias y/o Situaciones Anormales

El objetivo de este apartado es brindar los elementos generales necesarios para operar ante una situación anormal que involucre material radiactivo en el ámbito hospitalario, orientando las acciones para lograr un nivel apropiado de protección de las personas contra los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes. Dada la naturaleza de la actividad sanitaria, nos enfocaremos en situaciones de emergencia o anormales que suceden dentro del Servicio de MN o en otra área sanitaria, distinguiendo entre:

- Situaciones de contaminación o exposición a la radiación
- Situaciones que involucran materiales o que involucran personas

Tal como indica la Norma AR 8.2.4, los procedimientos a implementarse en cada caso deben integrar el Manual del Sistema de Calidad de la instalación de MN, ofreciendo aquí sólo criterios generales.

Exposición Accidental

Esta situación deviene de la presencia, advertida o no, de una fuente radiactiva fuera de control. En un Servicio de MN, esta situación se PREVIENE con procedimientos operativos protocolizados, se CONTROLA con monitoreo sistemático de áreas y se REMEDIA con la inmediata guarda de la fuente en el blindaje apropiado.

Contaminación radiactiva

Definimos como Contaminación Radiactiva, la presencia no deseada o accidental de una o más sustancias radiactivas sobre o dentro de seres vivos, objetos materiales o en el medio ambiente, cuyas concentraciones sean lo suficientemente elevadas como para alterar de manera indeseable sus propiedades normales. Puede tratarse de un abanico de situaciones muy diversas, desde salpicaduras o derrames de material radioactivo dentro del laboratorio de radiofarmacia o “Cuarto Caliente”, hasta la presencia de excretas (saliva, sangre, orina, vómito o materia fecal) de pacientes en la sala de espera a los cuales se les administró previamente algún radiofármaco.

Valores umbrales de contaminación: en caso de materiales en transporte, se entenderá por contaminación la presencia de una sustancia radiactiva sobre una superficie en cantidades superiores a 0,4 Bq/cm² en el caso de emisores beta y gamma o emisores alfa de baja toxicidad, o a 0,04 Bq/cm² en el caso de todos los otros emisores alfa. Mientras que, para otras áreas y superficies, se muestran los valores en la Tabla 11.8:

Tabla 11.8. Valores máximos de contaminación para emisores Beta y Gamma.

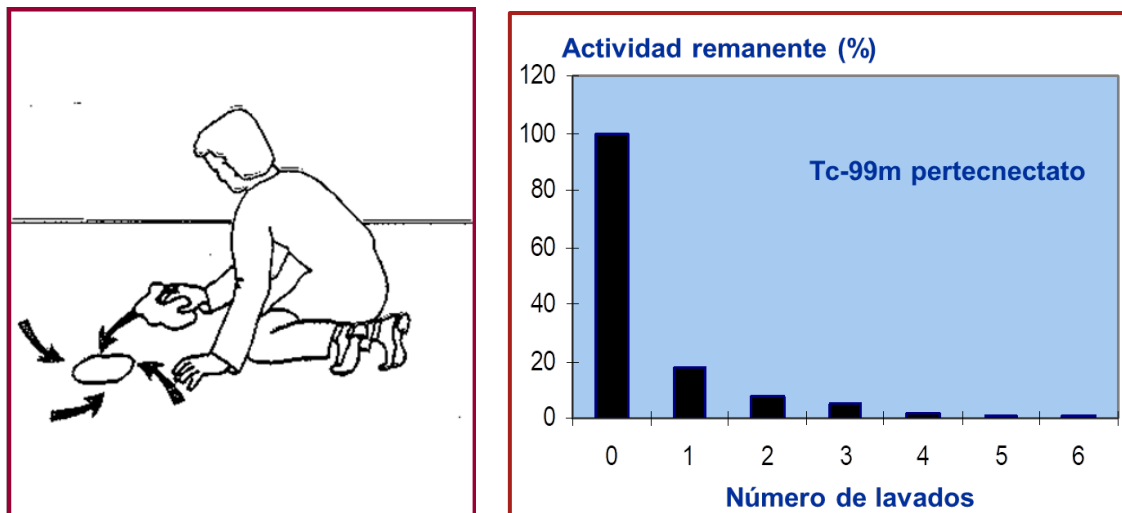
	Bq/cm ²	μCi/cm ²
Manos y otras partes del cuerpo	4	10 ⁻⁴
Ropas personales	4	10 ⁻⁴
Herramientas	4	10 ⁻⁴
Área controlada	400	10 ⁻²
Área supervisada	40	10 ⁻³

Fuente: IAEA (2010).

Acciones en caso de una contaminación superficial en materiales

Un Servicio de MN es un área controlada. Se debe evaluar, en primer lugar, la magnitud de la contaminación midiendo la tasa de dosis en el área. Si se registran niveles compatibles con contaminación radiactiva de hasta 100 μSv/h, se descontamina con agua y detergente neutro (si se trata de ¹³¹I) o solución de DTPA (si se trata de ^{99m}Tc), sin efectuar arrastre para evitar el aumento de la zona contaminada, monitoreando y descontaminando nuevamente tantas veces como sea necesario hasta que la actividad sea menor a 400 Bq/cm² (10⁻² μCi/cm²). La reducción esperada por la repetición de las maniobras de descontaminación se observa en la Figura 11.15. Luego se resguarda el área, se rotula con fecha, hora y radioisótopo.

Figura 11.15. Descontaminación.



Nota. Izquierda: Sentido del correcto barrido para evitar el aumento del área contaminada. Derecha: Efectividad relativa (%) de la descontaminación de solución pertechnetato de sodio. Fuente: IAEA (2010).

Si los valores hallados corresponden a los de una contaminación mayor de 100 $\mu\text{Sv/h}$, se debe proceder a la inmediata descontaminación. Las acciones a seguir en este caso son las siguientes:

- Trasladar a los pacientes y el personal no indispensable fuera del Servicio de MN, siempre que esto pueda hacerse de manera segura, teniendo en cuenta que la atención médica de cualquier persona debe considerarse prioritaria.
- Contener el derrame de material con papel absorbente.
- Señalizar el área y prevenir el ingreso de personas.
- Informar al responsable de protección radiológica.
- Asegurarse que las personas que abandonen el área contaminada no hayan sido salpicadas o no han tocado de alguna manera la superficie contaminada.
- Usar un monitor de contaminación adecuado para chequear la posible contaminación externa de las personas que dejan el área. Esto no será posible para pacientes que hayan sido inyectados con un radiofármaco. A ellos puede hacerseles un frotis con algodón y medirlo, asumiendo que se ha arrastrado 1/10 de la actividad presente en cada operación de frotis.
- Si se detecta contaminación, lavar manos, brazos y cara con agua y jabón durante 90 segundos.
- Si se han contaminado otras partes del cuerpo puede usarse una ducha. Cualquier herida debe lavarse con abundante agua.
- El personal que lleve a cabo la descontaminación deberá usar guantes, cubrezapatos y delantales descartables.
- Levantar con pinzas el material de vidrio u otros materiales punzantes o muy contaminados.
- Absorber las salpicaduras visibles con toallas de papel teniendo especial cuidado de no esparcir la contaminación.

- Emplear un detector adecuado para localizar otros focos de contaminación.
- Lavar las áreas contaminadas con papel humedecido con alguna solución descontaminante.
- Toda la indumentaria de protección personal empleada en la descontaminación, el papel o material absorbente utilizado y todo material contaminado, deben ser introducidos en bolsas plásticas que deben sellarse y etiquetarse para ser gestionadas como residuos radiactivos.
- Informar el incidente a la ARN.

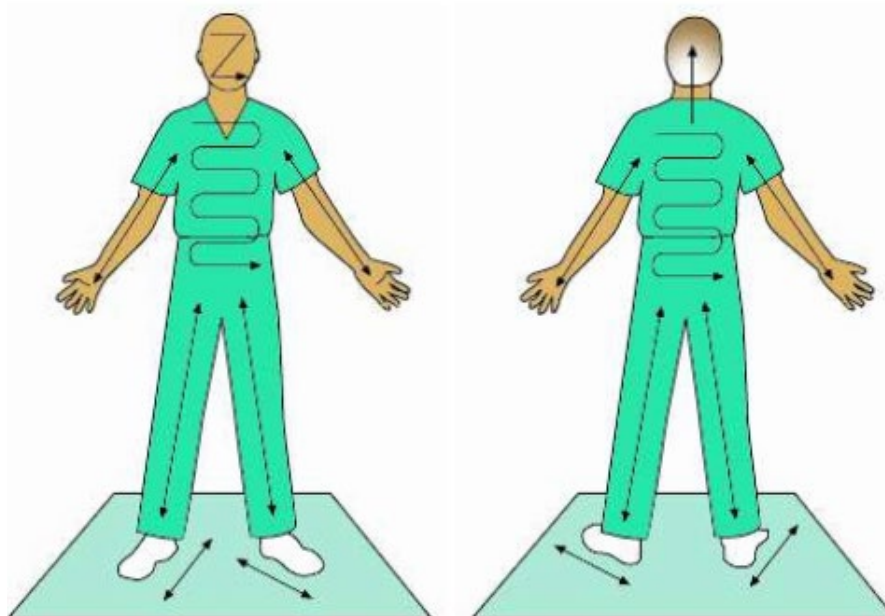
La contaminación superficial debe ser reducida a los niveles más bajos que resulten alcanzables. Si no pudiera lograrse una buena descontaminación, la superficie debe sellarse y aislarse hasta que la actividad decaiga a niveles aceptables o realizar algún otro tipo de maniobras para remover los materiales contaminados. Si la cantidad de material radiactivo derramada corresponde a una dosis de diagnóstico o inferior, puede considerarse como una contaminación menor y sólo serán de aplicación algunas de las recomendaciones anteriores.

Los materiales y equipos que forman parte de un botiquín de descontaminación son:

- Monitor portátil de contaminación superficial
- Cintas de separación y señalización de áreas
- Guantes
- Cubre-zapatos y delantales descartables
- Toallas de papel
- Gasa de 10 x 10 cm
- Pinzas de mango largo
- Bolsas de polietileno
- Detergentes comerciales
- Palas
- Recipientes plásticos
- Tijeras
- Cinta adhesiva

Contaminación en Personas: Quitar la ropa, el calzado o los EPP contaminados y colocarlos en una bolsa plástica que será rotulada y almacenada en un contenedor para residuos radiactivos. Con esta maniobra es posible reducir el nivel de contaminación hasta en un 90%. Controlar este material con un detector adecuado y monitorear todo el cuerpo para detectar contaminación en piel o cabello, según el esquema de la Figura 11.16.

Figura 11.16. Sentido del monitoreo en caso de contaminación de personas.



Fuente: Radiation Emergency Assistance Center / Training Site (REAC/TS).

Para la descontaminación cutánea, se lavará con abundante agua con agua (si el contaminante es ^{131}I) o solución acuosa de DTPA (si fuera $^{99\text{m}}\text{Tc}$) la zona afectada por el material radiactivo durante 5 a 8 minutos. No utilizar esponjas o material abrasivo para lavar la piel, ya que podría lastimarla y propiciar una vía de entrada al contaminante (contaminación interna). El cepillado suave (sin dañar ni irritar la piel) remueve parte de la capa córnea y separa la contaminación que pudiera estar adherida a las proteínas de la piel.

Las soluciones de limpieza sugeridas son agua y jabón o agua con yodo povidona. El agua y jabón son muy efectivos y habitualmente no se requiere de productos especiales. Este ciclo de lavados y lecturas posteriores se repetirá tantas veces como sea necesario para garantizar la descontaminación del cuerpo del trabajador. El objetivo de este proceso se logra cuando el control dosimétrico demuestre una actividad que no supere el doble de la actividad de fondo. Para evitar errores en la medición de la radiación, asegúrese de usar siempre la misma distancia entre el detector y el trabajador.

Conclusión

La Protección Radiológica del POE en MN afronta dos riesgos radiológicos diferentes y potencialmente concurrentes, derivados del manejo de fuentes abiertas o no selladas: la exposición externa y la contaminación con material radiactivo. Hemos visto que la exposición externa puede controlarse minimizando los tiempos de operación, maximizando las distancias a la fuente radiante y, sobre todo: utilizando sistemáticamente en cada operación los blindajes adecuados. En tanto que la contaminación con material radiactivo se previene mediante el uso sistemático de

Elementos de Protección Personal y el dominio de las maniobras específicas según la forma física de la fuente, a saber: sólida, líquida o gaseosa.

Los sistemas de dosimetría personal utilizados en MN integran los valores mensuales, así que una forma básica de minimizar esas lecturas, es hacer que los aportes de dosis de cada operación sean lo más bajos posibles. Para ello, se deben realizar sistemáticamente todas y cada una de las operaciones de modo tal de maximizar la protección. Es importante enfatizar que maximizar la protección en cada operación es la única forma de minimizar los riesgos radiológicos a lo largo de la vida laboral. Pero los riesgos radiológicos son apenas una parte de los riesgos que enfrentan los trabajadores en MN. Es fundamental ponderar adecuadamente su probabilidad de ocurrencia y gravedad potencial en el marco de la gestión integral de riesgos laborales, donde los factores humanos y socioambientales tienen especial relevancia.

Mientras continúan las investigaciones sobre efectos biológicos a bajas dosis, no es suficiente con registrar dosis anuales por debajo de las restricciones y límites de dosis, sino que debemos adoptar una actitud a la vez proactiva y preventiva, asumiendo a la optimización como un proceso reflexivo y de mejora continua, que implica el cuidado de los seres vivos presentes y futuros. Ampliando así el alcance de nuestras acciones no sólo a las personas directamente involucradas en las operaciones, sino también a su potencial descendencia y al medio ambiente.

Referencias

- ARN (2001). *Norma AR 10.1.1. Revisión 3. Norma Básica de Seguridad Radiológica*. D.3.3.1. Aprobada por Resolución del Directorio de la ARN N° 22/01. Boletín Oficial N° 20/11/01.
- ARN (2002). *Norma 8.2.4, Revisión 1. Uso de fuentes radiactivas no selladas en instalaciones de medicina nuclear*. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 18/02 (Boletín Oficial 22/7/02).
- ARN (2016a). Norma AR10.12.1, Revisión 3. *Gestión de residuos radiactivos*. Aprobada en la Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 552/16 (Boletín Oficial 24/10/16)
- ARN (2016b). Norma AR 10.16.1, Revisión 3. *Transporte de Materiales Radiactivos*. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 14/2016 (Boletín Oficial 1/2/2016).
- Beyer, T., Townsend, D., Brun, T., Kinahan, P., Charron, M., Roddy, R., Jerin, J., Young, J., Byars, L., Nutt, R., (2000), "A combined PET/CT scanner for clinical oncology", *J Nucl Med*. 2000 Aug; 41(8), pp. 1369-79.
- Budinger, T. & Jones, T. (2014), "History of Nuclear Medicine and Molecular Imaging", en Brahme, A. (Ed.) *Comprehensive Biomedical Physics*, Oxford: Elsevier.
- Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) (2018). *Radionuclide Information Booklet*. http://www.nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/radionuclide-information-booklet-2018-eng.pdf

- Cañellas, C., Salgueiro, M., Zubillaga, M. (2017), *Radiofármacos: del laboratorio al paciente*, 1a ed., Ciudad Autónoma de Buenos Aires: CJP Ediciones.
- Carreras-Delgado J. L. (2020). *Teragnosis en medicina nuclear*. *ANALES RANM* [Internet]. Real Academia Nacional de Medicina de España; An RANM · Año 2020 · numero 137(01):54-59. DOI: <http://dx.doi.org/10.32440/ar.2020.137.01.rev06>
- Cherry, S., Sorenson, J., Phelps, M. (2012). *Physics in Nuclear Medicine*. Saunders.
- Einisman, C. (2013), *Indicadores para la optimización procedimental en Medicina Nuclear*. [Tesis de Licenciatura]. UNSAM. <https://ri.unsam.edu.ar/handle/123456789/1292>.
- Einisman, C. (2021). *Epistemología de la Medicina Nuclear*. [Tesis doctoral]. UNTREF.
- Hertz, S., Roberts, A. (1946), *Radioactive iodine in the study of thyroid physiology: VII. The use of radioactive iodine Therapy in hyperthyroidism*, JAMA, 1946; 131(2):81–6.
- IAEA (2010). *Protección radiológica en medicina nuclear*. Material de capacitación para profesionales. <https://www.iaea.org/file/2017/training-nuclear-medicinealllecturesspzip>
- IAEA (2016). *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad requisitos de seguridad generales. (GSR) Parte 3*, IAEA, Viena. STI/PUB/1578. ISBN 978–92–0–307915–0. ISSN 1020–5837
- IAEA (2019). *El control del cáncer*. IAEA Bulletin, Viena. En: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull/bull603_sept2019_es.pdf
- Madsen, M. T. et al. (2006). *AAPM Task Group 108: PET and PET/CT Shielding*. Medical Physics, 33(1).
- Pérez, A. (2011), *Imágenes en Medicina Nuclear*, Col. “Cuadernos de Cátedra”, San Martín: UNSAM EDITA.
- Shleien, B. (1992). *The Health Physics and Radiological Health Handbook*. Scinta.
- Sociedad Española de Física Médica (SEFM) (2021). *Protocolo de Control de calidad de la instrumentación de Medicina Nuclear. Versión 2020*. 1º edición. https://sefm.es/wp-content/uploads/Protocolo-2020-final.pdf?fbclid=IwAR1Joyv_j8VNKSeFt-hVvpFK4FCov1F0VS5snpneU5YAUy9jLX0ZWmKhwrlic
- SRT (2018). *Manual de Buenas Prácticas en Tecnologías Radiológicas / Radiodiagnóstico*. Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT). Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/mbp-radiodiagnostico_1.pdf
- SRT (2019). *Manual de Buenas Prácticas en Perfilaje y Trazado con fuentes radiactivas*. Superintendencia de Riesgos del Trabajo (SRT). Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/mbp_perfilaje_y_trazado_con_fuentes_radiactivas.pdf
- Ziessman, H., O'Malley, J., Thrall, J. (2007). *Medicina Nuclear: Los requisitos*. 3º ed. Elsevier.

CAPÍTULO 12

Protección radiológica en radioterapia

Gustavo Sánchez y Santiago Girola

Introducción

La Radioterapia utiliza radiaciones ionizantes para el tratamiento de enfermedades, principalmente en oncología. Comenzó a principios del Siglo XX y desde entonces no deja de evolucionar. Es así que los criterios respecto de qué es aceptable y qué no también cambian continuamente y cada vez más rápido.

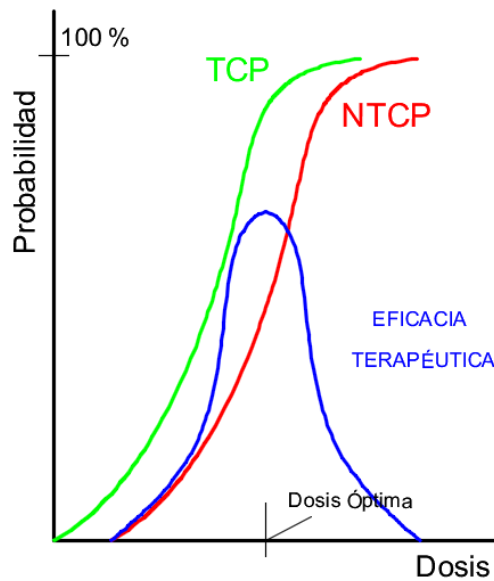
De la misma manera que en los capítulos anteriores, esta vez también nos ocuparemos del diseño de las instalaciones, la protección radiológica ocupacional, del público y del paciente y, fundamentalmente, del análisis de las situaciones anormales y los diferentes enfoques para su tratamiento.

Comenzaremos con un resumen de los objetivos de la radioterapia, para luego exponer los aspectos relacionados con la protección radiológica.

Objetivo de la radioterapia

Es la única práctica médica que tiene como propósito producir efectos determinísticos, en este caso los tejidos enfermos, generalmente tumores malignos. Como ya sabemos, cuanto mayor sea la dosis, más grave será el efecto (TASA DE CONTROL TUMORAL, o TCP). Idealmente, si la dosis es suficientemente alta el TCP será del 100%. El problema es que con todas las técnicas disponibles se irradian también los tejidos sanos. Cuanto mayor sea la dosis, mayor será la tasa de complicaciones de los tejidos normales (Figura 12.1).

Figura 12.1. Relación entre Probabilidad de Control Tumoral TCP (“Beneficio”) y Probabilidad de Control de los Tejidos Normales NTCP (“Costo”) en función de la dosis en Radioterapia.



Fuente: HALL (2000).

Técnicas y equipos

Desde sus inicios, la Radioterapia utiliza dos tipos de técnicas: la braquiterapia y la teleterapia.

La Braquiterapia

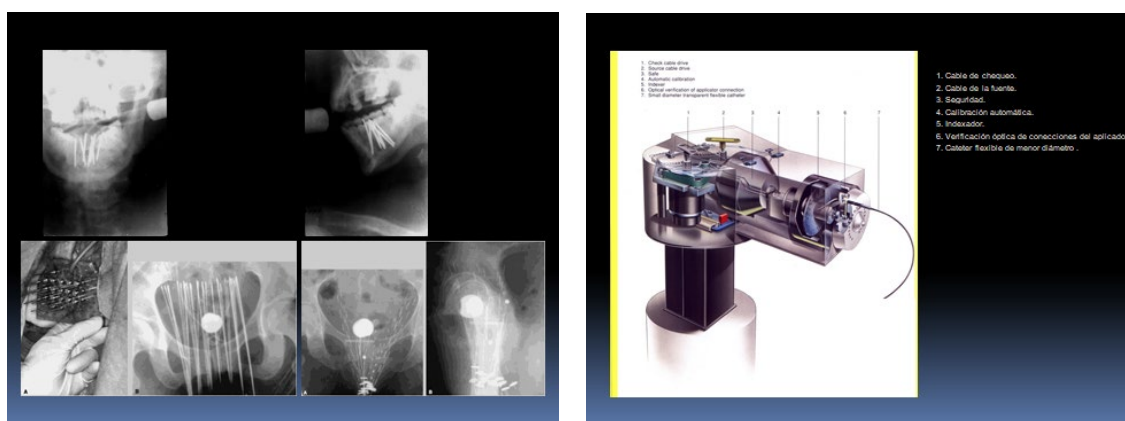
Considerando la etimología de la palabra, donde *braqui* significa “cerca”, el vocablo *braquiterapia* refiere a la terapia que se realiza desde cerca. Consiste en colocar fuentes radiactivas dentro del tumor o en contacto con él. Se compone de los siguientes elementos:

- Tipos de fuentes: agujas, tubos, alambres, semillas, aplicadores superficiales, etc.
- Tipos de abordaje: aplicaciones superficiales (como su nombre lo indica, se aplican sobre la superficie), aplicadores intracavitarios (a través de cavidades naturales del organismo -ginecológico, rectal, nasal, bucal- e intersticiales (atravesando los tejidos: por ejemplo, la mama, o llegando a la próstata por vía trans perineal).
- Duración del implante: temporarios (se retiran luego de determinado tiempo) y permanentes (fuente de vida media corta, se dejan en el cuerpo de forma permanente; por ejemplo: cerebro, próstata).
- Forma de realizar el implante: Manual o Automática.
- Tasa de dosis: Baja tasa de dosis (LDR), o Alta Tasa de Dosis (HDR).

Actualmente, la mayoría de los tratamientos de braquiterapia se realizan con equipos automáticos, de alta tasa de dosis, con fuentes muy pequeñas con las que se pueden hacer tratamientos intracavitarios, intersticiales o superficiales de muy corta duración y en forma ambulatoria. Además, al ser equipos automáticos, el técnico activa el equipo desde el exterior de la sala blindada, por lo que, salvo que ocurra algún incidente, las dosis ocupacionales son muy bajas.

En menor medida se realizan todavía implantes manuales con fuentes de baja tasa de dosis (Figura 12.2). Los tratamientos suelen durar varios días, durante los cuales el paciente permanece internado en una sala especial con blindajes localizados para protección del personal. Las dosis ocupacionales suelen ser elevadas y hay un amplio historial de casos en los que las fuentes, por diferentes motivos, no quedaron colocadas en el lugar adecuado. Incluso, muchas “se salieron” y se extraviaron; algunas fueron recuperadas, pero otras NO.

Figura 12.2. Braquiterapia.



Nota. Izquierda: diferentes tipos de implantes. Derecha: cabezal HDR. Fuente: IAEA (2010).

La Teleterapia

En el caso de la etimología de *teleterapia*, *tele* significa “lejos”, por lo que, contrariamente a *braquiterapia*, la teleterapia es la terapia que se realiza desde lejos. La radiación es emitida desde el equipo hacia el paciente. La fuente entonces es externa al paciente. Durante muchos años sólo se realizaba con equipos de Rx adaptados, de alta potencia (básicamente muchos mA). No se podían alcanzar dosis altas debido a los graves efectos sobre los tejidos normales, principalmente en la piel. De hecho, durante muchos años (hasta la década de 1980) se usaba la Magnitud *Skin Erythema Dose* (Dosis Eritema Piel, que era la dosis que producía eritema en la piel). Se usaban equipos de radioterapia superficial (50kVp), profunda y de Ortovoltaje (hasta 500kVp). Se intentó aumentar la penetración de la radiación aumentando el kilovoltaje hasta 4000kV (equipos electrostáticos, por eso son kV y no kVp), pero las complicaciones fueron muy grandes. Luego de la Segunda Guerra Mundial, más precisamente en la década de 1950, se comenzaron a producir industrialmente fuentes radiactivas para uso médico, dando inicio a la **teleterapia con fuentes radiactivas** (^{137}Cs y ^{60}Co), que tenían dos grandes ventajas: a) mayor energía, y por lo

tanto mayor penetración (los fotones del Cobalto 60 tienen una energía equivalente a un haz de Rayos X de varios miles de kVp) por lo que los órganos sanos reciben menor dosis, y b) la dosis máxima no se produce en la piel, sino algunos milímetros por debajo de esta, creando un efecto protector de la piel (*skin sparing*). Otra mejora fue mecánica: con los equipos rotatorios se pudo hacer “fuego cruzado” en el blanco, repartiendo la dosis en los tejidos sanos. En la década de 1970, se produjo otro avance importante con la introducción de los **aceleradores lineales**: mayor energía y por ende mayor penetración, y más protección de la piel, ya que la dosis máxima se produce a mayor profundidad. También pueden emitir otros tipos de radiaciones, además de los Rx (electrones principalmente). Desde ese momento hay un avance permanente no solo en el diseño de equipos sino en las tecnologías asociadas (mecánicas, electrónicas, informáticas, etc). Gracias a todos estos avances, se obtienen cada vez mejores resultados. Sin embargo, la tecnología requerida implicó un aumento en la complejidad de los equipos y de su manejo, y por lo tanto, también del riesgo de incidentes. Algunos de estos incidentes han tenido gravísimas consecuencias, como veremos más adelante en este Capítulo. Actualmente los equipos que se usan son (véanse las Figuras 12.3, 12.4, 12.5 y 12.6):

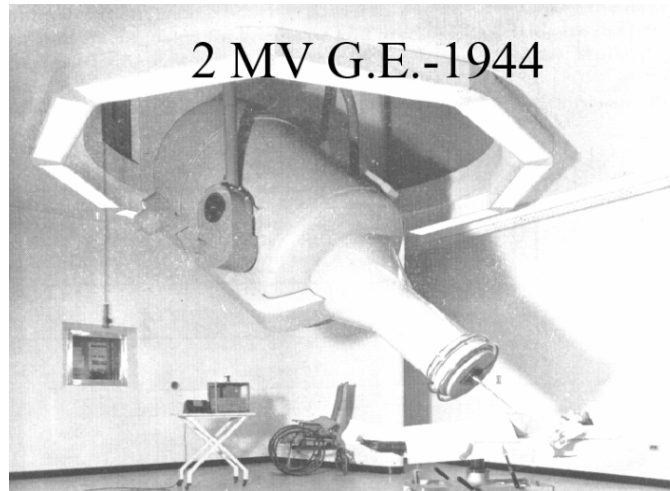
- **Accleradores Lineales**: a) Monomodales (con una o dos energías de Rx) b) bimodales, con una o dos energías de Rx más varias energías de electrones.
- **Equipos de telecobaltoterapia** (también llamados “Bombas de Cobalto”). Van cayendo en desuso en la medida en que se reduce el costo de los aceleradores.
- **Equipos de Rayos X “convencionales”**, básicamente de baja energía (50kVp) para tratamiento de lesiones superficiales. Quedan pocos centros con este tipo de equipos.
- **HADRONTERAPIA** (Protontes, neutrones, BNCT, etc). La mayor parte aún en etapa experimental, salvo la Protonterapia.

Figura 12.3. Equipo de Ortovoltaje (Rx).



Fuente: IAEA (2010).

Figura 12.4. Acelerador electrostático 2MV.



Fuente: IAEA (2010).

Figura 12.5. Equipo Telecobaltoterapia AECL Theratron Jr. 1957.



Fuente: IAEA (2010).

Figura 12.6. Acelerador Lineal con Sistema de Imágenes (OBI).



Fuente: IAEA (2010).

Evolución de la radioterapia: avances y nuevos problemas

En la Tabla 12.1, se muestran algunos hitos en la evolución de equipos y técnicas de radioterapia. Por comodidad está dividida en dos partes: Radioterapia externa o Teleterapia y Braquiterapia. De cada ítem destacamos los aspectos relevantes en cuanto a la mejora de la calidad y de la protección radiológica, pero vemos que muchos de esos avances a su vez generan nuevos desafíos que en la mayoría de los casos amplían el menú de “cosas que podrían salir mal”.

Algunos de los “hitos” ocurrieron en algún momento de determinado, por ejemplo la primer Bomba de Cobalto se produjo en 1951; otros tienen un desarrollo continuo, como los aplicadores para braquiterapia. Varios son simultáneos o su desarrollo se solapa con otros. Pero podemos decir que los primeros fueron más espaciados en el tiempo y generaron avances más notables, mientras que los últimos desarrollos se suceden a mucha mayor velocidad, aunque sin generar un salto cualitativo que podamos calificar de revolucionario. A su vez el costo de introducir una nueva tecnología es cada vez mayor.

Diseño de instalaciones

Tabla 12.1. *Evolución de la radioterapia.*

TELETERAPIA		
HITOS -TECNICAS -EQUIPOS	AVANCE / UTILIDAD	LIMITACIONES Y PROBLEMAS
Radioterapia superficial y ortovoltaje.	<ul style="list-style-type: none"> Tratamiento de lesiones superficiales o a poca profundidad. 	<ul style="list-style-type: none"> Alta dosis en piel. No se pueden tratar lesiones profundas con dosis adecuada. No se puede aumentar la dosis en profundidad por limitaciones tecnológicas. Máximo 500 kV pico
Fuentes radiactivas (telecobaltoterapia, cesio, etc)	<ul style="list-style-type: none"> Mayor dosis en profundidad (^{60}Co 1.25MeV) genera mayor penetración. Protección de la piel: la dosis máxima para ^{60}C se entrega a 5mm. 	<ul style="list-style-type: none"> Fuentes radiactivas de alta actividad: potencial de accidentes por falta de control (Goiana, México, Tahilandia, y muchos más). Introducción de sistemas de seguridad, alarmas y enclavamientos. Requiere control de calidad tanto de la máquina de tratamiento (incluyendo calibración) como de los propios sistemas de seguridad. Al seguir usando campos fijos la dosis máxima sigue estando en la piel o a poca profundidad, limitando la dosis terapéutica a mayores profundidades.

<p>Campos múltiples no isocéntricos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Permite concentrar la dosis en el blanco repartiéndola en los tejidos sanos que se encuentran en el camino de cada campo 	<ul style="list-style-type: none"> ● La localización es imprecisa. Requiere el uso de dispositivos (pin & arc). ● Se necesita personal bien entrenado. ● Se relocaliza el paciente para cada campo. ● Se requieren márgenes de seguridad muy grandes en los tamaños de campo
<p>Tratamientos isocéntricos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Mejora la precisión al hacer “fuego cruzado” sobre el blanco sin necesidad de reposicionar el paciente 	<ul style="list-style-type: none"> ● Mayores requerimientos en los controles. ● Importancia de la “Cultura de la Seguridad”: riesgo de confiar ciegamente en los indicadores del equipo. ● Máximo cuidado en la localización diaria del paciente ya que un error en la localización puede tener consecuencias graves.
<p>Aceleradores Lineales de electrones (producción de Rx)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Permite generar haces de mayores energías, con mayor rendimiento en profundidad. ● El equipo debe estar conectado a una red de alimentación eléctrica para que haya radiación. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Mayores requerimientos de seguridad y controles de calidad. ● Relevancia del mantenimiento (correctivo y preventivo) en el resultado de los tratamientos y la prevención de incidentes.
<p>Planificaciones simples 2D y 3D sin planificación computada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● La sistematización de los procedimientos de cálculo (tablas, cálculos manuales, calibración en puntos de referencia) permite comparar resultados entre diferentes instituciones y establecer prescripciones. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Sólo se puede calcular la dosis en puntos, no en volúmenes. ● No tiene en cuenta las irregularidades en el contorno del paciente. ● El cálculo del efecto de inhomogeneidades y uso de compensadores es muy general y poco preciso.
<p>Electrones, campos únicos</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Permite el tratamiento de lesiones poco profundas seleccionando la energía del haz. Se protegen órganos que están a mayor profundidad (ej: pulmón en irradiación de mama) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Requiere muy buen conocimiento de los aspectos físicos. ● La distribución de dosis depende de muchos factores, incluso el setup diario. ● Exactitud menor que para fotones. ● Muy dependiente del buen funcionamiento del equipo. Requiere controles muy frecuentes.
<p>Equipos digitales</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Automatización de procesos Mejora en la capacidad de control e información parámetros de funcionamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Aparecen fallas de hardware y software (Ver Accidentes EEUU y Canadá con Teracs) ● Cultura de la seguridad: tendencia a confiar en los sistemas automáticos. ● Son necesarios más controles y con mayor frecuencia.

<p>Planificación 3D conformados con planificación volumétrica</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cálculo volumétrico. • Uso de DVHs. • Volúmenes ICRU • Generación de DRRs para verificación. • Posibilidad de uso Protocolos de tratamiento más específicos • Posibilidad de escalamiento de dosis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor complejidad en los protocolos de QA. Controles más numerosos y frecuentes que requieren más tiempo de equipo, incremento de la fuerza laboral. • Algoritmos de cálculo validados. • El QA incluye al planificador.
<p>Tratamientos no coplanares con Rx</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor distribución de dosis y protección de tejidos sanos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayores requerimientos y controles mecánicos de la camilla. • Algunas incidencias podrían no ser posibles, generar riesgo de colisión o generar dosis inconvenientes en tejidos sanos no contempladas en los protocolos standard.
<p>Simulación de tratamientos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Permite realizar ajustes o correcciones antes de iniciar el tratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • El simulador es un equipo crítico que requiere mantenimiento y control de calidad.
<p>Tratamientos multimodales integrados (Rx y electrones)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de optimizar dosis incluyendo varias etapas de tratamiento. Mejor probabilidad de control tumoral con mejor riesgo de complicaciones. • Posibilidad de escalamiento de dosis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Planificaciones más complejas. • Set ups más complicados. • Se requiere mayor calificación del personal y más tiempo por paciente.
<p>Imágenes portales digitales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de comparar las DRR de planificación con lo realmente irradiado. • Capacidad para detectar movimientos intra e interfacción. • Detección de cambios en la anatomía del paciente durante el tratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento y QA del sistema de imágenes portales.
<p><i>Hipo e hiper fraccionamiento</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Escalamiento de dosis 	<ul style="list-style-type: none"> • Márgenes de tolerancia muy reducidos
<p>Sistemas de Registro y Verificación (Record & Verify)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Menor probabilidad errores de transcripción, cómputo de dosis y seteo de parámetro en el equipo 	<ul style="list-style-type: none"> • Programa de QA del R&V • Cultura de la seguridad: al ser un sistema que en apariencia es “intrínsecamente seguro” se tiende a descuidar los controles resundades. • Suele haber mucha información que puede confundir o puede pasarse por alto algún error que puede ser grave aunque difícil de discernir (ver accidente de IMRT en NY)

IMRT y Planificación Inversa	<ul style="list-style-type: none"> ● Disminución de dosis en los tejidos sanos, lo que permite escalamiento de dosis al volumen blanco. ● Posibilidad de tratar varios volúmenes simultáneamente. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Menor homogeneidad dentro del volumen de tratamiento. ● Requiere QA paciente específico
Radioterapia Guiada por imágenes (IGRT)	<ul style="list-style-type: none"> ● Permite controles frecuentes a partir de imágenes (Portales, CBCT, etc), disminuyendo los errores por movimientos o errores de setup. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Incluir a todos los sistemas de imágenes en el programa de QA ● Debe computarse la dosis por imágenes.
Técnicas especiales (Irradiación de eje espinal/TBI/Total Skin/Radiocirugía/SBRT/etc)	<ul style="list-style-type: none"> ● Sustitución de tratamientos quirúrgicos muy riesgosos o invasivo. ● Posibilidad de tratamiento de algunas patologías que antes eran inaccesibles. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Tolerancias de algunos parámetros mucho más restrictivas. ● Mucha mayor complejidad, costo y tiempo. ● Comisionamiento y programa de QA específicos para cada práctica.
Radioterapia adaptativa	<ul style="list-style-type: none"> ● Permite adecuar el plan durante el tratamiento, adecuándolo a variables anatómicas. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Altos requerimientos de QA
Hadronterapia (Protones, BNCT, etc)	<ul style="list-style-type: none"> ● Alta especificidad para algunos tipos de tratamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Muy alto costo ● Pueden ser adecuados para tratar sólo algunas patologías, por lo que deben combinarse con otras técnicas o equipos ● Muy altos requerimientos de QA, incluyendo en algunos equipos detección de fallas y <i>service</i> a distancia.
OTRAS TÉCNICAS EN DESARROLLO – no especificadas	<ul style="list-style-type: none"> ● Tratamientos más efectivos. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Costos mucho más altos. ● Mayores requerimientos de QA ● Mayor cantidad de cosas que pueden andar mal...
BRAQUITERAPIA		
Braquiterapia	<ul style="list-style-type: none"> ● Tratamientos localizados 	<ul style="list-style-type: none"> ● Los pacientes podían llegar a estar varios días con las fuentes implantadas ● Alta exposición del personal médico, auxiliares y visitantes ● Riesgo de extravíos ● Tratamientos poco precisos ● Dosimetría pobre ● Colocación imprecisa ● Con fuentes de radio 226: riesgo de contaminación y complicaciones para la gestión de residuos.

		<ul style="list-style-type: none"> • La duración de los implantes surgía de un cálculo. El retiro de las fuentes solía caer en horarios donde no se contaba con personal calificado (Ver "referencia del autor – Hospital Municipal Lomas de Zamora)
Desarrollo de aplicadores	<ul style="list-style-type: none"> • Mejor precisión en la localización 	<ul style="list-style-type: none"> • Se mantienen la mayoría de los problemas, solo mejora la calidad del tratamiento.
Radionucleidos artificiales	<ul style="list-style-type: none"> • Reemplazaron muy paulatinamente a las fuentes de radio 226 (En Argentina se prohibió su uso a fin del Siglo XX). • Nuevos protocolos dosimétricos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hubo que adaptar los protocolos, que estaban basados en casuísticas con Ra 226. • Se mantiene la mayoría de los problemas anteriores
Carga Diferida Manual	<ul style="list-style-type: none"> • Menor exposición del personal • Posibilidad de tomar imágenes para ajustar la posición y hacer cálculos dosimétricos 	<ul style="list-style-type: none"> • Al ser de baja tasa de dosis, los tratamientos siguen durando varios días.
Carga Diferida Remota	<ul style="list-style-type: none"> • Menor exposición del personal. • Menor exposición de auxiliares y visitantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza mismos los mismos modelos radiobiológicos conocidos de baja tasa de dosis • Se necesita más mantenimiento y control de calidad • Sistemas de detección de fuente expuesta. • Procedimientos operativos • <i>Cultura de la Seguridad: los sistemas de seguridad NO reemplazan a los procedimientos operativos (Accidente Indiana 1992)</i>
Fuentes pequeñas	<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de accesos nuevos (endoluminal, tracto digestivo, etc) 	<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos de fabricación más estrictos. • Control de calidad específico
Braquiterapia HDR Pulsada	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tiempo total de fuente expuesta: mayor confort del paciente. • Protocolos similares a los de baja tasa de dosis 	<ul style="list-style-type: none"> • Muchos ingresos y egresos de la fuente durante el tratamiento. Mayor riesgo de accidentes durante esa etapa. • Mayor costo en RRHH (médico y físico deberían estar presentes en cada aplicación)
Braquiterapia HDR	<ul style="list-style-type: none"> • Nuevos modelos radiobiológicos permiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Los modelos radiobiológicos son imprecisos. • Mayor riesgo de complicaciones • Consecuencias más graves en caso de accidente. • Gestión de fuentes decaídas.

HDR con ⁶⁰ Co	<ul style="list-style-type: none"> ● Cambio de fuentes menos frecuente 	<ul style="list-style-type: none"> ● Consecuencias más graves en caso de accidente.
Planificación 3D	<ul style="list-style-type: none"> ● Mayor precisión. ● Protocolos basados en volúmenes ICRU 	<ul style="list-style-type: none"> ● Incorporar el planificador y los sistemas de imágenes en el programa de QA
Combinación con Teleterapia	<ul style="list-style-type: none"> ● Optimización de tratamientos. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Integración del programa de QA BQT - Externa

Fuente: elaboración propia

El diseño de las instalaciones de Teleterapia y las de Braquiterapia de Alta Tasa de Dosis (HDR) se basa en el uso de blindajes estructurales. El material más utilizado es el Hormigón estructural (densidad 2.3 T/m³); si bien los espesores son mucho mayores que si fueran de plomo o hierro, tiene menor costo hacer el blindaje de hormigón. En la Figura 12.7 se observa un diseño típico para alojar un acelerador lineal de alta energía, mientras que la Figura 12.8 muestra con mayor detalle cuales son las barreras primarias y cuales las secundarias.

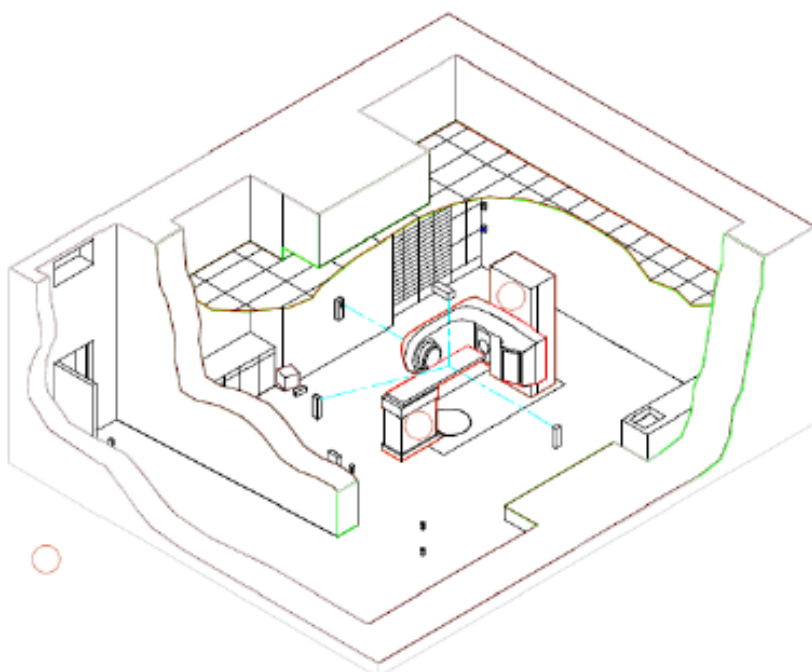
La metodología es la misma que aparece descrita en el Capítulo 9 (“Protección Radiológica en Radiología”). Como la Carga de Trabajo (W) es alta comparada con radiología, y la energía de la radiación es mucho mayor, los espesores de las barreras son muy grandes (valores típicos para aceleradores lineales son de 220-240 cm de hormigón para barreras primarias, y de 140-150 cm para barreras secundarias).²⁵

Un problema particular es el blindaje de las puertas, que deberían tener el espesor en plomo o hierro equivalente al espesor de la barrera secundaria, lo que no sería funcional por el excesivo peso. Por ese motivo, estas instalaciones tienen un laberinto diseñado de tal manera que la intensidad y energía de la radiación que llega a la puerta sean lo suficientemente bajas como para que alcance con algunos milímetros de plomo (o espesor equivalente). Algunas instalaciones tienen un laberinto doble que permite minimizar el blindaje de la puerta, o directamente prescindir de aquel.

Otro problema especial en instalaciones que alojan aceleradores de más de 10MV es la producción de neutrones. En este caso, la puerta tiene un blindaje adicional de polietileno borado (u otro blindaje para neutrones).

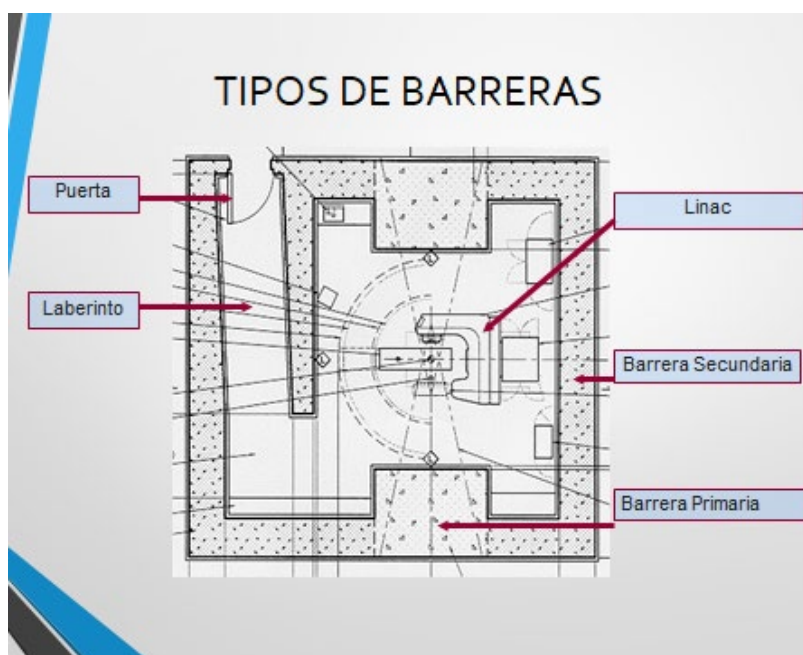
²⁵ Protocolos y procedimientos para el diseño en NCRP (2005) y en IAEA (2006).

Figura 12.7. Sala de irradiación Aceleradores.



Fuente: IAEA (2010).

Figura 12.8. Tipos de barreras.



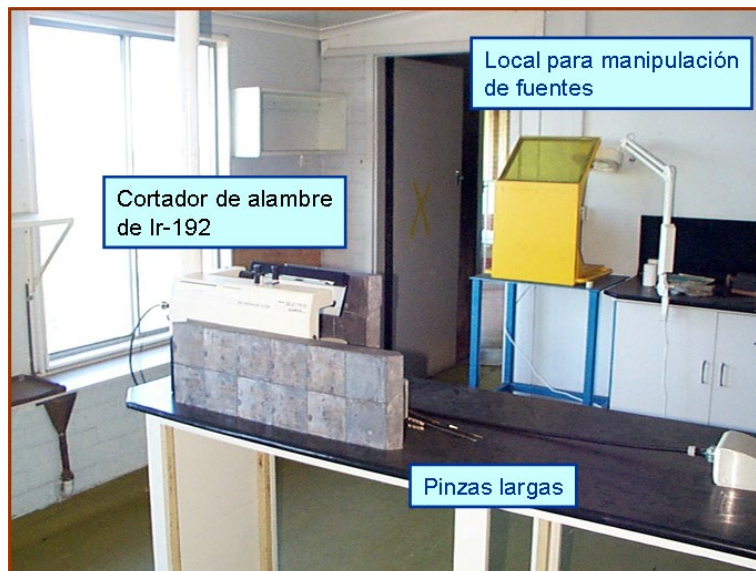
Fuente: IAEA (2010).

Las instalaciones para braquiterapia de baja tasa de dosis combinan blindajes estructurales y localizados (Figura 12.9). Las áreas controladas son:

- el local de almacenamiento de fuentes,

- el local donde se preparan para su colocación en el paciente (puede ser un mismo local para las dos operaciones)
- el local donde se colocan las fuentes (puede ser un quirófano o la misma sala de internación),
- la sala de internación.

Figura 12.9. Área de Preparación de Fuentes (alambres y tubos).



Fuente: IAEA (2010).

Protección radiológica ocupacional

Teleterapia y braquiterapia de alta tasa de dosis (HDR). En teleterapia, el técnico posiciona al paciente sobre la camilla con todos los recaudos correspondientes. En braquiterapia HDR se colocan los aplicadores o catéteres dentro del paciente, se introduce un tubo guía y este a su vez se conecta al equipo donde está la fuente. En ambos casos, después el operador se retira de la sala, cierra la puerta y comienza la irradiación, vigilando al paciente por circuito cerrado de TV. La protección radiológica se basa en el diseño de los siguientes blindajes:

- Blindajes estructurales: durante la aplicación del tratamiento, sólo el paciente está dentro de la sala. Los blindajes son suficientes para cumplir con las restricciones aplicables a los trabajadores y el público.

- El blindaje propio del equipo. Es suficiente para la protección del personal durante el posicionamiento del paciente²⁶ y para limitar la radiación de fuga durante la aplicación.
- Los procedimientos y sistemas de seguridad para evitar exposiciones potenciales. Debido a que si ocurre un accidente que exponga al personal, las consecuencias pueden ser muy graves, es necesario reducir tanto como sea razonablemente posible la probabilidad de accidentes. Por ejemplo, existen varios sistemas redundantes para evitar el ingreso de alguna persona mientras se está realizando una irradiación: a) una alarma lumínica y acústica integrada al equipo que indica que el mismo está operando; b) otra alarma independiente controlada por un detector de radiación en el interior del recinto; c) el control visual del operador, quien puede advertir a la persona que no ingrese o eventualmente interrumpir la irradiación; d) si la persona de todos modos pretende ingresar, el operador puede cortar la irradiación desde la consola; y e) un enclavamiento que interrumpe automáticamente la irradiación si se abre la puerta. a), b) y e) son sistemas de seguridad mientras que c) y d) son procedimientos. Nótese que el hecho de que haya varios sistemas redundantes e independientes aumenta la seguridad total (es un ejemplo de lo que se denomina “Defensa en Profundidad”). Retomaremos el tema de accidentes e incidentes más adelante.

En braquiterapia manual de baja tasa de dosis se utiliza una gran variedad de blindajes localizados: recintos blindados para depósito, pantallas para la preparación de los aplicadores, contenedores blindados para transporte internos, pantallas para la colocación, biombos y/o blindajes estructurales alrededor de la cama del paciente. Recordar que el paciente permanece internado de uno a tres días, con las fuentes colocadas. Durante el armado de los aplicadores y la colocación en el paciente, se emplean pinzas para aumentar la distancia. Además, el personal debe estar bien entrenado mediante ensayos con fuentes falsas para que las operaciones en las que se manipulan las fuentes se realicen rápida pero eficientemente. Todo esto se efectúa para minimizar la dosis ocupacional en situaciones normales. Una de las situaciones anormales probables es el extravío de una o de varias fuentes implantadas, ya sea porque fueron mal implantadas o porque el mismo paciente se las quitó. Incluso ha sucedido que en un caso determinado, un paciente se fugó de su internación con el implante colocado. Todo esto requiere que se deban tomar varias medidas redundantes: monitoreo de áreas, control de inventario pre y post implante, control médico de los implantes, etc.

²⁶ Los aceleradores lineales sólo emiten radiación cuando son energizados, por lo que no hay exposición durante el posicionamiento, marcación, etc. En aceleradores de alta energía (mayor a 10MV) se produce la activación de algunos componentes del cabezal; eso solo requiere precauciones cuando se desmonta el equipo.

Para resumir: la protección radiológica ocupacional (y del público) en braquiterapia de baja tasa de dosis se basa en la existencia de procedimientos operativos, la utilización de los elementos de protección adecuados para cada caso y la participación de personal adecuadamente capacitado y entrenado.

Vigilancia Radiológica

Para la dosimetría personal y de áreas se utilizan los dosímetros descritos en el capítulo 7, “MONITOREO PERSONAL Y DE ÁREAS”. En radioterapia con fuentes radiactivas el monitor portátil se emplea también para verificación independientemente de que la fuente haya regresado o no al blindaje al final de la aplicación.

Se deben medir $H_{P(10)}$ para estimación de Dosis Efectiva y también dosímetro de mano para los que realizan implantes de baja tasa de dosis.

Transporte

Las consideraciones para el transporte son las mismas que aparecen descritas en el Capítulo 11, “MEDICINA NUCLEAR”. Sin embargo, es necesario destacar algunas particularidades.

Hace varias décadas el transporte de fuentes de braquiterapia de baja tasa de dosis en la vía pública era algo habitual. Era común que el propietario de las fuentes realizara los implantes e internara los pacientes en más de una institución. Eso produjo grandes problemas, ya que cada lugar de internación debía acondicionar las instalaciones para la colocación de los implantes y la internación propiamente dicha. El transporte por la vía pública muchas veces no se hacía ajustándose al Reglamento. Hoy cada vez se utilizan menos fuentes manuales de baja tasa de dosis y tanto la colocación como la internación se realiza en la misma institución.

Por lo tanto, el transporte por la vía pública se limita a los siguientes:

- Transporte de fuentes de braquiterapia nuevas o decaídas (devolución al proveedor o gestión como residuo). Los Bultos son en general Amarillo II o Amarillo III.
- Transporte de fuentes de teleterapia nuevas o decaídas. Debido a la actividad de estas fuentes el transporte debe realizarse cumpliendo con requerimientos especiales, por ejemplo: carga completa, acuerdo previo con la Autoridad Regulatoria, trayecto previamente definido, señalizaciones especiales, etc. Generalmente se hace en lo que el Reglamento de Transporte define como “Acuerdo Especial”. En fuentes de telecobaltoterapia en las que también se retira de servicio el equipo la Autoridad Regulatoria puede autorizar el transporte por “Acuerdo Especial” en el mismo cabezal del equipo a dar de baja.
- Transporte de componentes activados del cabezal de un acelerador lineal.

Exposición del paciente

Como se mencionó en el Capítulo 4, en la exposición médica no se aplican los límites de dosis.

A diferencia de lo que sucede en Radiodiagnóstico y Medicina Nuclear, donde pretendemos obtener una información de valor diagnóstico entregando al paciente la dosis más baja que razonablemente se pueda entregar, en radioterapia la dosis debe:

- tener el valor correcto y preciso, ni excesivamente alto, pero tampoco inferior al necesario para producir el efecto terapéutico buscado y
- ser entregada en el lugar indicado.

Para que esto se logre es necesario contar con equipamiento adecuado, en correctas condiciones de funcionamiento, profesionales competentes (médicos, físicos y técnicos) y un adecuado programa de calidad, no solo de los equipos sino de todas las etapas del tratamiento.

Los Protocolos de tratamiento han evolucionado a la par de las técnicas y equipamiento disponibles logrando un mejoramiento de los resultados: mayor tasa de control tumoral (TCP) con menor tasa de complicaciones (NTCP). Pero, por otro lado, se necesitan cada vez más controles para evitar errores o incidentes que afecten la calidad del tratamiento. Por lo tanto, la protección radiológica del paciente consiste en minimizar el riesgo de errores e incidentes y accidentes.

Incidentes y accidentes

Definiciones

Exposición potencial: exposición que no se prevé se produzca con seguridad y a la que se le puede asignar una ocurrencia de carácter probabilista.

“Casi accidente” (Near Miss): evento potencialmente significativo que podría haber ocurrido como consecuencia de una secuencia de eventos, pero que no llegó a ocurrir porque se detectó y corrigió antes de llegar a ser un accidente. Otros términos que se usan con el mismo significado: eventos, errores, administración incorrecta, discrepancias, situaciones anormales. *Ejemplo: cálculo incorrecto del tiempo de exposición detectado ANTES de iniciar el tratamiento.*

Incidente: cualquier evento no deseado, incluidos errores operativos, fallas de equipos, eventos iniciadores, precursores de accidentes, casi accidentes u otros contratiempos, o actos no autorizados, maliciosos o no maliciosos, cuyas consecuencias o posibles consecuencias no son insignificantes desde el punto de vista de la protección o la seguridad. *Ejemplo: si en el caso anterior, el cálculo incorrecto del tiempo se detectara DESPUÉS de administrar la primera aplicación, en un tratamiento de 30 (treinta) fracciones.*

Accidentes: un accidente es un evento que da como resultado consecuencias que afectan de forma negativa a alguien o algo (en nuestro caso: al trabajador, al paciente o, muy raramente, al público). Existen varios **grados de gravedad** en un accidente. *Ejemplo: si en el caso anterior, el cálculo incorrecto del tiempo se detectara DESPUÉS de administrado el tratamiento.*

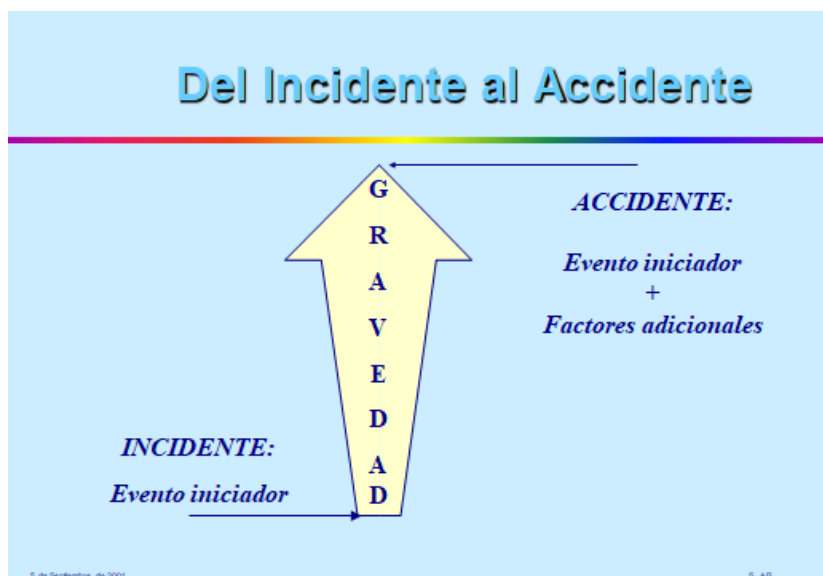
Aseguramiento de la calidad (QA): es el conjunto de procedimientos que aseguran la consistencia entre la prescripción médica y el cumplimiento seguro de esa prescripción, en cuanto a la dosis para el volumen blanco junto con un mínimo de dosis al tejido normal, exposición mínima al personal y monitoreo adecuado del paciente, destinado a determinar el resultado final del tratamiento.

Breve desarrollo

Como podemos observar en la Figura 4.4 del final del Capítulo 4, cuando se inicia el incidente podemos decir que la Exposición Planificada deja de ser Normal.

Todo incidente comienza con un evento iniciador. Comienza a su vez en ese momento una secuencia de eventos que determinarán la gravedad del incidente, como se esquematiza a continuación, en la Figura 12.10:

Figura 12.10. Factores que afectan la gravedad de un accidente.



Fuente: elaboración propia.

Los factores adicionales son todo lo que se hace, o lo que no se hace, o lo que se hace mal, después de ocurrido el evento iniciador. El factor más crítico, tal como veremos con algunos ejemplos, es la demora en advertir que algo falla.

Como dijimos anteriormente, hay que 1) seguir procedimientos y utilizar sistemas de seguridad para prevenir los eventos iniciadores, 2) detectarlos rápidamente y 3) tomar las medidas correctivas adecuadas (intervención).

En cada una de estas tres etapas las medidas de seguridad se basan en

- Procedimientos, que deben ser previstos, redactados previamente a la operación como así también ensayados por el personal involucrado. Los procedimientos deben establecer claramente, para una situación dada: qué hay que hacer; quién debe hacerlo; cómo debe hacerlo; cuándo debe hacerlo; con qué herramientas o instrumental debe hacerlo.
- Sistemas de seguridad que intervienen automáticamente cuando se detecta que comienza a fallar. (Deben hacerse procedimientos regularmente para evaluar el correcto funcionamiento de los sistemas de seguridad)

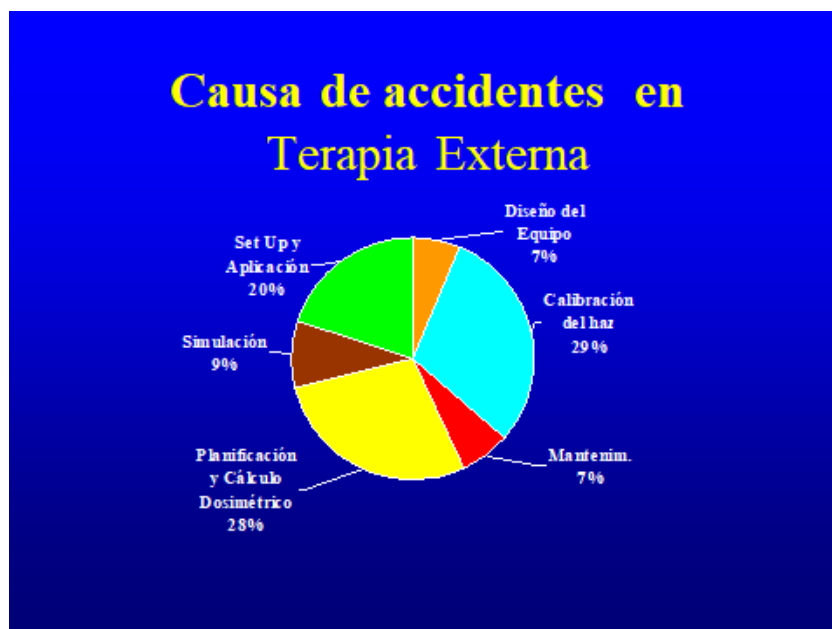
Tipos de incidentes que pueden ocurrir en Radioterapia

Etapas en las que se produce el EVENTO INICIADOR

- Mantenimiento y calibración del equipo de tratamiento: **afecta a varios pacientes.**
- Prescripción del tratamiento, Identificación del paciente, Localización, Planificación, Marcación: **afecta todo o una parte del tratamiento de un paciente.**
- Posicionamiento diario, selección de parámetros de tratamiento, cálculo de dosis acumulada: **afecta una parte del tratamiento de un paciente**

Véase la figura 12.11 para ver la frecuencia de cada etapa de los accidentes.

Figura 12.11. Accidentes según la etapa de ocurrencia.



Fuente: ICRP (2000).

Relacionados con el PACIENTE

Algunos ejemplos:

- Paciente equivocado
- Localización errónea
- Dosis incorrecta
- Distribución de dosis inadecuada
- Fraccionamiento incorrecto
- Accidentes no radiológicos

Relacionados con LA FUENTE

El caso más probable es que se trabe la fuente en posición de irradiación y en este caso, lo más grave es que el trabajador (o los trabajadores) ingresen a la sala sin advertir la situación.

Relacionados con EL PÚBLICO

Extravío o robo de fuentes radiactivas con acceso al público. Casos paradigmáticos: Goiana (Brasil) 1987 / Ciudad Juárez (México) 1984 / Samut Prakarn (Malasia) 2000 / Estambul (Turquía) 1998.

Accidentes en Radioterapia

Enfoque Retrospectivo, análisis de casos

El objetivo de este enfoque es analizar los accidentes ocurridos, sus causas y sus consecuencias para “aprender lecciones” y en base a ese análisis tomar medidas para

- prevenir que ocurran los eventos iniciadores que los originaron.
- disminuir la gravedad de sus eventuales consecuencias.

Este tipo de análisis es denominada retrospectivo, es decir: se analiza lo que ya ocurrió. Es la metodología utilizada en las publicaciones IAEA (2000) e ICRP (2000).

Enfoque Prospectivo

El enfoque retrospectivo ha demostrado ser muy útil, pero tiene una debilidad: es necesario que los accidentes ocurran para corregir algo. El análisis de los muchos casos documentados generó cambios en el diseño de equipos, procedimientos operativos, medidas de seguridad y regulaciones.

Sin embargo, los actuales equipos y técnicas de tratamiento, que tanto contribuyen a mejorar los resultados, son tan complejos que se ha multiplicado la cantidad de cosas que pueden fallar. Es necesario cambiar de enfoque, un enfoque prospectivo que permita identificar debilidades y prevenir accidentes antes de que ocurran.

Este método de trabajo está desarrollado en una publicación en *WHO Radiotherapy Risk Profile* (2008). Algunos aspectos relevantes:

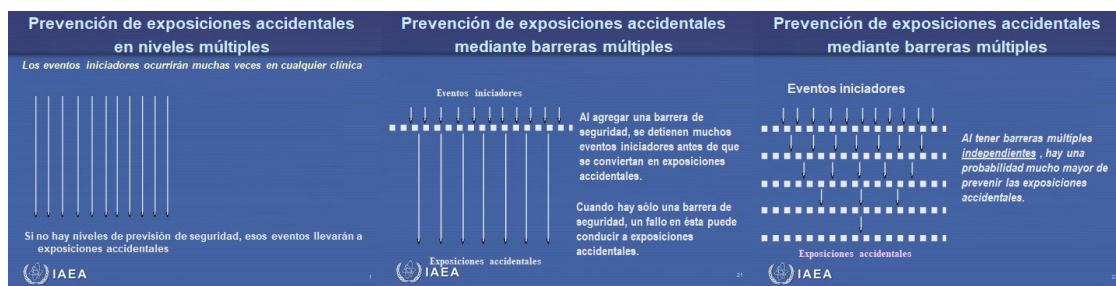
- Se analizan no sólo los incidentes y accidentes sino también los *near misses*. Se estima que la mayoría de los incidentes no han sido documentados, y mucho menos los *near misses*. La IAEA estableció el sistema para la denuncia anónima de estos “casi incidentes” denominado *SAFRON, Safety in Radiation Oncology*²⁷, a fin de ampliar la base de análisis.
- Tomando como base la información disponible y la propia experiencia se identifican los factores relevantes para cada una de las etapas del tratamiento: equipamiento necesario, así como su estado y disponibilidad, *staff* (número y cualificación), claridad y consistencia de los procedimientos existentes, buena comunicación entre las diferentes etapas, etc.
- Se analiza la robustez de dichos factores, identificando aquellos que deberían ser reforzados.
- En base al análisis anterior se implementan las medidas optimizadas para reforzar la seguridad de cada etapa, estableciendo barreras múltiples de seguridad – Imagen 7 - (“Defensa en Profundidad”). Una herramienta de gran utilidad es la metodología SEVRA, desarrollada por el *FORO Iberoamericano de Organismos Reguladores Radiológicos y Nucleares*²⁸, basada en IAEA (2012).

El FORO es una asociación creada en el año 1997 con el objetivo de promover la seguridad radiológica, nuclear y física al más alto nivel en la región iberoamericana. En la actualidad, el FORO está integrado por los organismos reguladores radiológicos y nucleares de Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Cuba, España, México, Paraguay, Perú y Uruguay, y tiene la intención de ir incorporando nuevos miembros a medida que se vaya logrando la consolidación de su estructura organizativa e institucional.

²⁷ Para mayor información, véase <https://www.iaea.org/resources/rpop/resources/databases-and-learning-systems/safron#1>

²⁸ Para mayor información, véase <https://www.foroiberam.org>

Figura 12.12. Concepto de barreras múltiples para la prevención de accidentes.



Fuente: IAEA (2010).

En el año 2009 (ICRP, 2009), el ICRP actualizó la publicación #86 a partir del enfoque anterior en la publicación "ICRP publication #112. A report of preventing accidental exposures from new external beam radiation therapy technologies". Algunas de sus consideraciones:

- La complejidad de las técnicas actuales implica la puesta en marcha de una estrategia combinando diseño, educación y QA.
- La puesta en marcha de una nueva tecnología sin el esfuerzo concomitante entre la educación, la formación y el programa control de calidad, es peligroso.
- Los responsables administrativos hospitalarios y los jefes de departamento de Radio-terapia deben ofrecer un ámbito propicio de "trabajo sereno", permitiendo la concentración y evitando toda "distracción" durante los tratamientos.
- La escalada de dosis a los tumores, sin aumento de la frecuencia y de la gravedad de las complicaciones tardías, implica una reducción de márgenes.

Consideraciones sobre accidentes en el "Llamado de Bonn a la acción"

En el Capítulo 9 nos referimos al "Llamado de Bonn a la acción". A continuación, haremos algunos comentarios sobre la **Acción 7: Mejorar la prevención de los incidentes y accidentes en los usos médicos de la radiación**

- Implementar y apoyar sistemas voluntarios y educativos de reporte de seguridad a fin de aprender de la realimentación de experiencias con eventos relacionados con la seguridad en los usos médicos de la radiación. Ejemplos de esto son las múltiples publicaciones del IAEA sobre accidentes radiológicos, y el ya mencionado sistema SAFRON de informe anónimo sobre incidentes, casi errores y accidentes.
- Armonizar la taxonomía (Clasificación u ordenación en grupos) de los incidentes y accidentes en los usos médicos de la radiación, así como los instrumentos de comunicación relacionados con los mismos, tales como las escalas de severidad, y considerar la armonización con la taxonomía de seguridad en otras áreas médicas;

- c) Trabajar en incluir de todas las modalidades de uso médico de la radiación ionizante en reportes voluntarios de seguridad, con énfasis en braquiterapia, radiología intervencionista, y medicina nuclear terapéutica, además de la radioterapia con haces externos;
- d) Implementar métodos prospectivos de análisis de riesgo para incrementar la seguridad de la práctica clínica;
- e) Asegurar la priorización de verificaciones de seguridad independientes en etapas críticas, de manera que sean un componente esencial de las medidas de seguridad en los usos médicos de la radiación. (SAR, 2016)

Conclusión

Al comienzo del presente capítulo se hizo una somera descripción de las técnicas, procedimientos y equipos que se emplean en radioterapia y de la cronología de su desarrollo. Ese proceso lejos está de haber finalizado, por el contrario, se acelera cada vez más. Día a día se incorporan equipos y modalidades de tratamiento más elaborados que ofrecen alternativas para mejorar la eficacia a menor costo. La actualización continua no sólo es necesaria para el desarrollo personal; sino que la educación, la formación específica y el entrenamiento son componentes críticos de la Cultura de la Seguridad.

En el Apéndice 1 del presente capítulo se describen algunos accidentes en radioterapia. De su análisis se desprende que estos aspectos fueron determinantes en cuanto a sus causas y consecuencias. Y esto es independiente del momento histórico, sólo cambia el contexto, varían las cosas que “pueden salir mal”. Por ejemplo: los sistemas de planificación de tratamientos son cada vez más completos, pero también más “amigables”; un operador no calificado puede llegar a manejarlo con relativa facilidad, como si fuera un videojuego. Sin embargo, es necesario conocer los procesos involucrados para evitar que esto sea un factor de riesgo. En un videojuego, luego del “*Game Over*” podemos comenzar de nuevo; pero el paciente tiene una sola vida que debe ser cuidada en todos sus aspectos.

La Cultura de la Seguridad debe evolucionar para no quedarse atrás del avance clínico y tecnológico.

Finalmente, el marco normativo que hoy es aplicable a la radioterapia en Argentina también tiene su propia dinámica, por lo que se incluye como Apéndice 2 del presente capítulo.

Apéndice 1

Análisis de accidentes en radioterapia

A continuación, describiremos someramente algunas situaciones ocurridas y las recomendaciones que se hicieron en base a las “lecciones aprendidas”. Estos casos fueron seleccionados como ejemplos de la variedad de eventos que pueden originar un accidente y determinar su consecuencia, pero también porque muestran actitudes negativas que no son excluyentes de la radioterapia, por lo que deben ser puestas en evidencia.

1. Reino Unido (entre 1982 y 1991)
 - a. En 1982 se introdujo un sistema computado de planificación; no se verificó el correcto funcionamiento del sistema antes de ponerlo operativo. En 1990, se comprobó que en algunos casos los cálculos eran incorrectos, por lo que los pacientes recibían dosis hasta 30% inferiores a las prescriptas. **Durante esos 8 años más de 1000 pacientes fueron afectados.**
 - b. Evento Iniciador: falta de controles al modificar un procedimiento de trabajo, en este caso un nuevo planificador.
 - c. Factores adicionales: ausencia de programa de QA que hubiera detectado el problema, incluyendo la evaluación estadística de los resultados de los tratamientos, que estaban por debajo del promedio.
 - d. Lecciones aprendidas: los sistemas computados de planificación son elementos críticos para la seguridad de los pacientes. Se requieren programas de QA que incluyan a los sistemas de planificación.

2. Zaragoza, España (1990): Este es uno de los casos más relevantes porque se produjo una cadena de errores que derivó en una tragedia.
 - a. Descripción del accidente:
 - i. Como consecuencia de la falla (normal) de un componente del acelerador, se activó un sistema de seguridad que lo sacó de funcionamiento.
 - ii. El técnico operador no interpretó correctamente lo ocurrido, por dos motivos: no estaba correctamente entrenado y el código de error era difícil de leer. Para él, el problema era simplemente que el equipo no funcionaba.
 - iii. El técnico operador, en lugar de pedir instrucciones a sus superiores (físicos / médicos), decidió pedir ayuda a un técnico de mantenimiento no calificado.
 - iv. Ese técnico dejó el equipo “funcionando”, pero en condiciones clínicamente inadecuadas (la energía quedó fija en su valor máximo, independientemente de la que seleccionara el operador, entre otras cuestiones).
 - v. Se reiniciaron los tratamientos sin notificar ni registrar lo ocurrido.

- vi. Los técnicos advirtieron que dos indicadores de la energía del haz tenían indicaciones diferentes. En realidad, uno indicaba la energía seleccionada por el operador y el otro la energía real.
 - vii. Los médicos advirtieron reacciones no habituales y baja tolerancia al tratamiento en algunos pacientes, pero no tomaron ninguna medida.
 - viii. No fue sino 10 (diez) días después que los técnicos informaron a los Físicos la discrepancia entre los indicadores de energía. Estos controlaron el haz y detectaron que no era clínicamente apto (energía y tasa de dosis muy altas), por lo que se suspendieron los tratamientos.
 - ix. Durante esos diez días se trataron 27 pacientes en esas condiciones, de los cuales 15 fallecieron como consecuencia directa o indirecta de la sobreexposición.
- b. Evento iniciador: el evento iniciador no fue la falla del componente, sino la incorrecta interpretación del técnico. Esta persona no interpretó correctamente la naturaleza del problema y tomó decisiones que excedían su competencia.
- c. Factores adicionales:
- i. El técnico de mantenimiento aceptó hacer un trabajo para el que no estaba calificado.
 - ii. El técnico de mantenimiento realizó una reparación incorrecta. La energía del haz quedó fija en su valor máximo.
 - iii. El técnico operador no informó de la reparación ni la registró en ningún lado.
 - iv. Se continuó con los tratamientos sin realizar ningún control del equipo.
 - v. Los técnicos operadores no informaron inmediatamente la discrepancia entre los indicadores de energía.
 - vi. Los físicos no controlaron el equipo durante los diez días, y recién lo hicieron cuando se les informó la discrepancia entre los indicadores de energía.
 - vii. Los médicos no advirtieron que la baja tolerancia a los tratamientos de algunos pacientes podría deberse a un error.
- d. Lecciones aprendidas:
- i. Se requieren procedimientos escritos para todas las etapas del tratamiento, indicando entre otras cosas quién debe actuar o tomar decisiones en cada caso.
 - ii. Se debe controlar el equipo regularmente (controles diarios, semanales, mensuales) y luego de cada reparación.
 - iii. Se debe registrar (en un libro, cuaderno, bitácora) toda situación relacionada con el funcionamiento del equipo.
 - iv. El mantenimiento de los equipos debe ser realizado por personal técnico específicamente entrenado y autorizado.
 - v. Todo el personal (técnico, físico, médico) debe estar capacitado y entrenado en la operación de los equipos.

- vi. Debe existir una buena comunicación entre técnicos, físicos y médicos.
 - vii. Cualquier reacción anormal en más de un paciente debe disparar una investigación que incluya la dosimetría del equipo.
3. Goiania, Brasil (1987). Al realizarse la mudanza de un servicio de radioterapia queda abandonado un equipo con 74 TBq (2000Ci) de ^{137}Cs , en un lugar sin ningún tipo de supervisión. El cabezal de equipo es robado, abierto y su contenido se dispersa por toda la ciudad. Como consecuencia, más de **50 personas recibieron altas dosis**, por irradiación y contaminación, muchas de ellas desarrollaron Síndrome Agudo de Radiación y **al menos 4 fallecieron**. Más de 40 casas debieron ser descontaminadas y al menos 7 fueron demolidas, generando varias toneladas de residuos radiactivos. Es uno de los eventos radiológicos no nucleares más graves de la historia. Eventos similares ocurrieron en México, Malasia y Turquía. Actualmente es poco probable que ocurran este tipo de accidentes pues existen regulaciones muy estrictas en todos los países en lo relativo a contabilidad y **seguridad física de las fuentes**.
4. Ciudad de Panamá, Panamá, (2000).
- a. Descripción del accidente:
 - i. Los médicos propusieron a los físicos una modificación en tratamientos sobre la pelvis para reducir efectos secundarios: agregaron un quinto bloque de protección central en tratamientos pélvicos que ya tenían cuatro bloques.
 - ii. El diseño del sistema de planificación no permitía esa modificación,; solo permitía hasta cuatro bloques, pero los físicos encontraron una forma de “engañar” al sistema cargando los cinco bloques como si fuera uno solo.
 - iii. Sin embargo, según la forma de modelizar los bloques el resultado era correcto o incorrecto. El caso incorrecto calculaba un tiempo de irradiación mucho más elevado que el normal (lo que equivalía a una dosis en exceso de hasta el 100%).
 - iv. Independientemente de que el cálculo fuera correcto o incorrecto, el planificador mostraba un ícono con la distribución esperada de los bloques.
 - v. Se hizo un cálculo independiente pero no se detectó el error.
 - vi. A poco de iniciados los tratamientos, algunos pacientes comenzaron a tener reacciones. Los médicos interpretaron que eran complicaciones normales.
 - vii. Veintiocho pacientes resultaron sobredosados, de los cuales fallecieron ocho.
 - b. Evento iniciador: la decisión de los físicos de buscar la forma de hacer algo que el planificador no permitía.
 - c. Factores adicionales:

- i. El sistema de planificación mostraba una imagen engañosa (el ícono con la forma esperada de los bloques, aunque lo calculara de otra forma).
 - ii. El control independiente no detectó el error.
 - iii. Los técnicos no se dieron cuenta que había grandes diferencias de tiempo de irradiación para tratamientos similares.
 - iv. Los médicos interpretaron las reacciones que manifestaban los pacientes como complicaciones normales.
- d. Lecciones aprendidas:
- i. Toda vez que se quiera hacer una modificación en cualquier procedimiento, hay que hacer las pruebas necesarias para validar ese cambio.
 - ii. Conocer y respetar las limitaciones de los equipos y sistemas. Es necesario formación y entrenamiento previos.
 - iii. Son necesarios procedimientos claros y concisos para todas las etapas.
 - iv. El sistema de planificación de tratamientos es un elemento crítico para la seguridad y debe ser incluido en los programas de control de calidad.
 - v. Los sistemas de planificación de tratamiento deben ser validados por las autoridades competentes.²⁹

5. Estados Unidos y Canadá (TERAC):

- a. Descripción de la cadena de accidentes: entre 1985 y 1987 ocurrieron seis exposiciones accidentales en diferentes hospitales de Estados Unidos y Canadá. El *software* de un acelerador de diseño anterior se utilizó para un diseño nuevo, sustancialmente diferente. En ciertas condiciones muy especiales eso producía sobredosis instantáneas muy elevadas, que provocaron la muerte de tres pacientes. El fabricante negó que hubiera problemas con el diseño de la máquina. Finalmente, la FDA de Estados Unidos y el Gobierno de Canadá ordenaron sacar de servicio ese modelo de Acelerador (20 máquinas en total). Se inició una investigación que detectó la falla de diseño que producía el error, que fue corregido en diseños posteriores.
- b. Evento iniciador: falla en el diseño del *software*.
- c. Factores adicionales:
 - i. El error no fue detectado por el fabricante.
 - ii. El fabricante no tenía un mecanismo para la investigación y reporte de accidentes.
 - iii. Después del primer accidente, el fabricante se rehusó a creer que se había tratado de una falla del equipo.

²⁹ En este caso, la FDA de Estados Unidos retiró la licencia al fabricante del sistema.

- d. Lecciones aprendidas y acciones tomadas:
- i. Ante un evento sospechoso no aceptar la respuesta del fabricante. **Siempre** es una responsabilidad del propio sitio.
 - ii. Deben existir procedimientos obligatorios de notificación de eventos anormales o sospechosos. Como consecuencia directa de este evento en 1990 se instauró una ley que requiere que se reporten los incidentes tanto al fabricante como a la FDA en Estados Unidos.
 - iii. Los fabricantes no deben modificar diseños aprobados sin una adecuada validación.
 - iv. Los sistemas controlados por computadora deben tener un procedimiento de verificación profundo.
6. Estados Unidos (1992): Tratamiento de Braquiterapia HDR con fuente de Ir-192 de 4.3 Ci (160 GBq). La fuente está adherida a un cable guía que puede extenderse bajo control remoto a través de uno o más catéteres sucesivos hacia dentro del paciente. (Un segundo cable con una fuente simulada, se usa primero para verificar la trayectoria a través del catéter y verificar posiciones). Hay varios sistemas redundantes para detectar que la fuente regresa a su contenedor cuando finaliza el tratamiento: una indicación en la computadora de control que compara el recorrido del cable cuando sale la fuente y cuando regresa: si son iguales asume que la fuente está dentro del blindaje; también existía un monitor de radiación fijo dentro de la sala y un procedimiento que exigía la verificación final con un monitor portátil.
- a. Descripción del accidente:
- i. Durante un tratamiento se reportó una falla por lo que no pudo completarse.
 - ii. Se dio la orden de reingreso de la fuente.
 - iii. Se rompió la soldadura que unía la fuente al cable guía, pero la retracción del cable continuaba.
 - iv. El monitor de radiación fijo detectó la situación y permaneció activa la alarma sonora.
 - v. Esa alarma fue ignorada con la excusa de que “fallaba habitualmente”.
 - vi. El procedimiento de verificar el reingreso seguro con monitor portátil ya no se seguía desde hacía algún tiempo.
 - vii. La computadora indicó que la fuente había reingresado a su blindaje. Esta indicación es la que operador dio por válida. En realidad, la computadora indicaba que el cable guía había hecho el mismo recorrido en ambos sentidos, pero no que la fuente se había soltado.
 - viii. El paciente fue enviado a su domicilio para continuar el tratamiento otro día, por lo que quedaron los catéteres colocados, supuestamente sin fuente.
 - ix. El paciente vivía en un asilo de ancianos, por lo que se expuso a varios empleados a una dosis indeterminada.

- x. El paciente falleció a los pocos días.
 - xi. Los catéteres fueron eliminados como residuos patogénicos.
 - xii. Al ingresar los residuos en una planta de tratamiento de residuos peligrosos se verificó que en una de las remesas había una fuente radiactiva.
 - xiii. A partir de la codificación de la remesa se pudo identificar el origen de la fuente.
 - xiv. Dieciséis días después del extravío, el Físico del Centro verificó la ausencia de la fuente.
- b. Evento iniciador: la fuente se soltó debido a un defecto de fabricación
- c. Factores Adicionales:
- i. No se interpretó correctamente la indicación de “fuente guardada”.
 - ii. No se reparó el monitor fijo luego de que comenzara a dar falsas alarmas.
 - iii. No se verificó el reingreso de la fuente con un monitor portátil.
- d. Lecciones aprendidas:
- i. Se debe asegurar que todo el personal está debidamente capacitado en procedimientos de seguridad radiológica, en la operación del equipo y para responder en situaciones de emergencia
 - ii. Se deben incluir procedimientos formales en el programa de Garantía de Calidad para verificar antes de los tratamientos de pacientes que el equipo funcione adecuadamente.
 - iii. Se debe verificar la operación de los equipos de seguridad radiológica.
 - iv. Se debe verificar por al menos dos métodos independientes que la fuente ha retornado a su contenedor adecuadamente al final del tratamiento.
- Tres semanas después ocurrió un evento semejante en otra instalación (Pittsburgh, PA). El físico de Pittsburgh estaba al tanto del evento previo y respondió rápidamente evitando así que hubiera consecuencias de dosis significativas al paciente o al personal.

7. Epinal (Francia), mayo de 2004 a agosto de 2005

- a. Descripción del accidente: en mayo de 2005, se modificó una metodología de trabajo (se pasó de utilizar cuñas³⁰ “mecánicas” a cuñas “virtuales”). Al cambiar la modalidad se cometieron errores tanto en la planificación como en el tratamiento, lo que produjo que al menos 23 pacientes recibieran sobredosis (20% o más que la dosis prescrita). Murieron 4 pacientes. Al menos 10 pacientes presentaron complicaciones severas por la radiación (síntomas como dolor intenso, secreciones y fístulas).

³⁰ Las cuñas son dispositivos utilizados para compensar inhomogeneidades en la distribución de dosis en determinados casos.

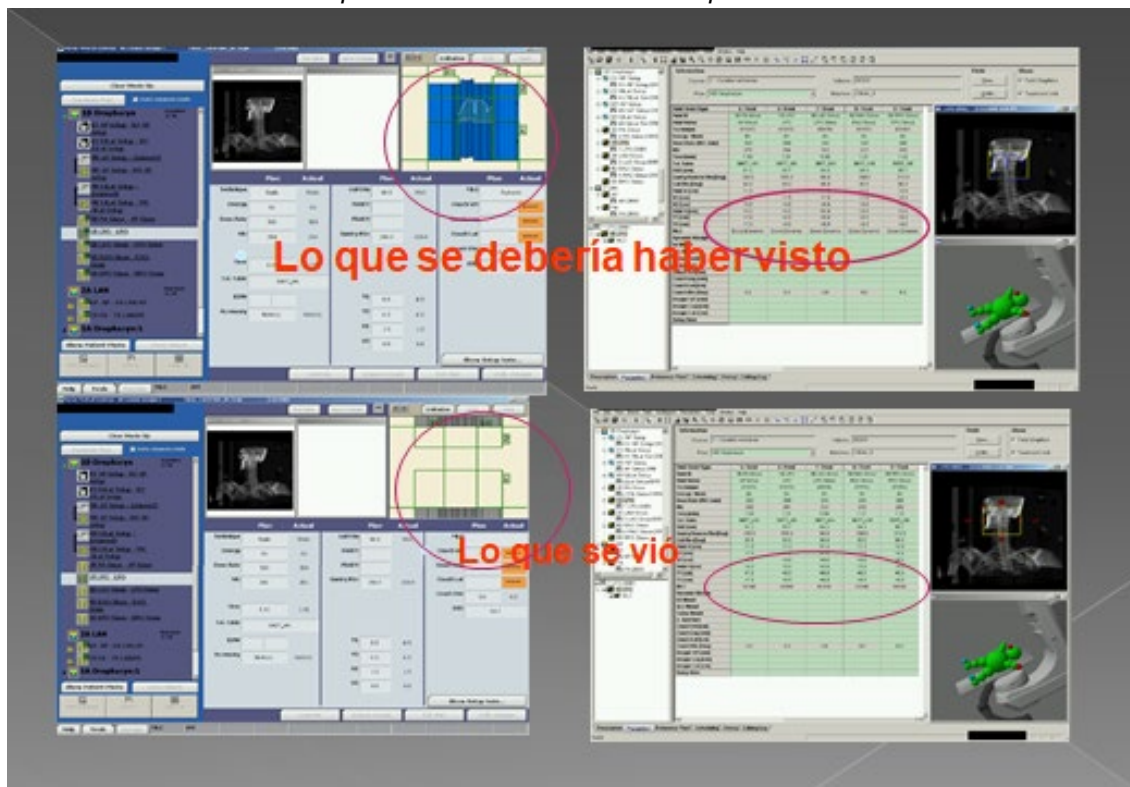
- b. Causas del accidente: aquí es mejor analizar las causas del accidente sin identificar un evento iniciador.
 - i. Había un déficit de personal calificado.
 - ii. El personal (físicos y técnicos) no tuvieron suficiente capacitación. En preparación para el cambio de técnica de tratamiento, se les dieron dos demostraciones breves a dos operadores.
 - iii. Los manuales estaban escritos en inglés, idioma que la mayor parte del personal desconocía.
 - iv. Al cambiar de técnica no se hizo verificación independiente de los cálculos.
 - v. El problema recién se descubrió cuando se hizo una actualización del *software*, que encontró inconsistencias entre lo planificado y lo efectivamente entregado.
- c. Lecciones aprendidas:
 - i. Debe asegurarse que el personal: comprende las capacidades y las limitaciones del equipo que está usando y está debidamente capacitado en procedimientos de seguridad críticos.
 - ii. Se deben incluir en el Programa de Garantía de Calidad Procedimientos formales para verificar tecnologías y procedimientos nuevos antes de implementarlos.
 - iii. Se debe realizar la verificación independiente de **todas las planificaciones** de tratamiento.
 - iv. Se debe tener implementado un sistema para la investigación e informe de accidentes, la Administración y seguimiento de pacientes, incluyendo comunicación con los pacientes.
 - v. Las instrucciones deben darse en el idioma local.

8. Nueva York, Estados Unidos (2005): La Radioterapia por Intensidad Modulada (IMRT) es una técnica que permite alcanzar altas dosis mejorando sustancialmente la protección de los tejidos sanos. A diferencia de la Radioterapia Conformada Tridimensional (3DRT), en que se busca que la intensidad del haz sea uniforme, en la IMRT el haz se descompone en pequeños “sub haces” (*beamlets*) de intensidades diferentes. Es particularmente útil en el tratamiento de lesiones de cabeza y cuello, donde se consiguen reducciones de dosis significativas en médula espinal, cavidad oral, parótidas, labios y otros tejidos que sería imposible proteger con 3DRT. Sin embargo, esta técnica requiere un muy estricto control de calidad personalizado para cada paciente, antes de iniciar el tratamiento y durante el mismo. Uno de esos controles es verificar que la intensidad de cada *beamlets* sea la correcta (mapa de fluencia). La modulación del haz se realiza con colimadores multilaminares que se mueven en forma programada durante el tratamiento.

- a. Descripción del accidente en Bogdanich (2010).
 - i. Se preparó un plan de Orofaringe. Se hicieron mediciones por dosimetría portal (con el dispositivo electrónico de imágenes portales) que confirmó que el plan era correcto.
 - ii. Se administraron sin problemas las cuatro primeras aplicaciones (1 a 4)
 - iii. El Médico revisó el plan y decidió que quería una modificación de la distribución de dosis (reducir la dosis a los dientes).
 - iv. Se hizo una nueva planificación, que fue aprobada por el médico.
 - v. Cuando se transfirieron los datos de la computadora de planificación a la de tratamiento, debido a un problema del sistema, no se transfirió la información para el movimiento de las multiláminas.
 - vi. Para no interrumpir el tratamiento, no se hicieron los controles de verificación del mapa de fluencia.
 - vii. Se administraron tres aplicaciones más (5 a 7), pero con el colimador abierto: mucha más dosis (13 Gy por fracción) incluso en los tejidos que se quería proteger.
 - viii. El paciente manifestó síntomas adversos.
 - ix. El físico detectó el error y se suspendió el tratamiento.
 - x. El paciente murió un año después.
- b. Evento iniciador: error de transferencia de información.
- c. Factores Adicionales:
 - i. Se modificó un plan ya iniciado. Esto es sencillo y seguro en 3DRT, pero no en IMRT. Esto no justifica, pero en parte explica el apresuramiento del físico que lo llevó a saltar un control imprescindible (verificación de fluencia).
 - ii. Se produjo un error en la transferencia de información. Se transfirieron exitosamente datos de tratamiento (Formato DICOM RT), imágenes, pero no los de movimiento de láminas.
 - iii. El físico no hizo el control de fluencia.
 - iv. La información en consola es compleja. Entre toda esa información el técnico no advirtió que algo andaba mal (véase la Imagen 8).
- d. Lecciones aprendidas:
 - i. No se debe saltar ningún paso en los procedimientos establecidos, aunque esto provoque un retraso no deseado.
 - ii. Los médicos deben tratar, en lo posible, de no modificar planes que ya habían aprobado. Si lo hacen deben aceptar las demoras.
 - iii. Los técnicos deben estar entrenados en el manejo de interfaces con mucha información. Evitar el “automatismo”.
 - iv. Los diseñadores de *software* deben incluir sistemas de seguridad informáticos para prevenir este tipo de situaciones. En particular: cuando se

transfieren varios “paquetes” de información deben volver TODO para atrás cuando ALGUNO de ellos no se transfiera satisfactoriamente (*rollback* completo) (IAEA, 2013).

Figura 12.13. La cantidad de información requiere un adecuado entrenamiento para identificar errores o discrepancias.



Fuente: IAEA (2010).

9. Detroit, Estados Unidos (2007) (Radiocirugía): a diferencia de la Radioterapia, la Radiocirugía consiste en la administración de una única dosis en pequeños volúmenes; se emplea no sólo para tratamientos oncológicos, sino también tratar lesiones benignas como malformaciones arteriovenosas.
 - a. Descripción del accidente: se preparaba a un paciente para un estudio de resonancia magnética sobre la que se haría la planificación; el procedimiento estándar es colocar al paciente “cabeza primero”; El paciente fue posicionado “cabeza primero”, pero en la unidad de resonancia se seleccionó la técnica **“pies primero”**. En consecuencia, se irradió tejido sano y no se irradió la lesión.
 - b. Evento iniciador: error de registro en la resonancia.
 - c. Factores adicionales: el error no fue advertido en ninguna de las etapas siguientes, ni por el físico ni por el médico.
 - d. Lecciones aprendidas: incluir en los procedimientos la verificación del correcto registro del posicionamiento.

Apéndice 2

Marco regulatorio argentino

Normativa de la Autoridad Regulatoria Nuclear aplicables a Radioterapia

AR 10.1.1. Norma básica de seguridad radiológica: Esta norma establece los criterios básicos para lograr un nivel apropiado de protección de la salud de las personas contra los efectos nocivos de la radiación ionizante y la seguridad de las instalaciones o prácticas que las involucran. Es aplicable a TODAS las actividades que regula la ARN. (ARN, 2001).

AR 8.2.1. Uso de fuentes selladas en braquiterapia. Describe los requisitos mínimos de seguridad radiológica aplicables a la utilización de fuentes radiactivas sólidas no dispersables con fines terapéuticos, en aplicaciones de braquiterapia intersticiales, superficiales e intracavitarias. (ARN, 1995).

AR 8.2.2. Operación de aceleradores lineales de electrones para uso médico: Esta norma dicta los requisitos mínimos de seguridad radiológica en la operación de aceleradores lineales de electrones para uso médico. (ARN, 2002a).

AR 8.2.3. Operación de equipos de cobaltoterapia: Establece los requisitos mínimos de seguridad radiológica aplicables a la operación de equipos de telecobaltoterapia. (ARN, 2002b).

AR.10.16.1. Transporte de materiales radiactivos. En Argentina, todo transporte de materiales radiactivos debe efectuarse de acuerdo a lo estipulado en el "Reglamento para el transporte seguro de materiales radiactivos" del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), edición de 1985 (enmendada en 1990), cuyo texto ha sido adoptado en la norma AR 10.16.1. "Transporte de materiales radiactivos". (ARN, 2016a).

AR 10.12.1. Gestión de residuos radiactivos: establece los requisitos generales para que la gestión de los residuos radiactivos se realice con un nivel adecuado de protección radiológica de las personas y de preservación del ambiente tanto en el caso de las generaciones actuales como de las futuras. (ARN, 2016b).

Protección física: En algunas instalaciones de radioterapia se aplican las normativas de Protección Física para prevenir el robo, la sustracción o el uso no autorizado de materiales radiactivos y nucleares

La ARN cuenta también con instructivos y guías regulatorias para ayudar al usuario a interpretar adecuadamente las normas a fin de un adecuado cumplimiento de estas, por ejemplo, para el diseño de los recintos para alojar los equipos de tratamiento.

Las instalaciones de radioterapia se encuadran dentro de lo que en la norma AR.10.1.1. define como Instalación Clase II, que es una Instalación o práctica que sólo requiere **licencia de operación**. Para que el Servicio, Hospital, Centro Médico, etc, obtenga esa licencia de operación

debe cumplir con lo que estipulan las normas indicadas sobre el diseño de las instalaciones, el equipamiento, los procedimientos y el **personal**.

A su vez, el **personal** (Médicos, Físicos, Técnicos) debe contar con **permiso individual** (que también otorga la ARN). Los requisitos para obtener ese permiso son:

- Contar con una formación académica de un nivel acorde con la función (Por ejemplo: ser Médico Matriculado)
- Haber realizado una formación adicional específica en el tema para el que solicita permiso.
- Realizar un entrenamiento práctico supervisado en una institución asistencial reconocida por la ARN.
- El artículo 16 de la Ley N° 24.804 (Ley Nacional de Actividad Nuclear) faculta a la Autoridad Regulatoria Nuclear para
- Aplicar sanciones, las que deberán graduarse según la gravedad de la falta en: apercibimiento, multa que deberá ser aplicada en forma proporcional a la severidad de la infracción y en función de la potencialidad del daño, suspensión de una licencia, permiso o autorización o su revocación.
- Establecer los procedimientos para la aplicación de dichas sanciones, asegurando el principio del debido proceso.

Hay que remarcar que las sanciones que puede imponer la ARN no excluyen, sino que complementan otras penalidades que pudieran corresponder, ya sean de índole penal, civil, administrativa, etc.

Resumiremos los aspectos principales de las normas específicas: (AR 8.2.1., AR 8.2.2. y AR 8.2.3):

Restricciones de dosis:³¹

- Braquiterapia: Trabajadores 6mSv/año, Público 0.1mSv/año
- Telecobaltoterapia: Trabajadores 5mSv/año, Público 0.1mSv/año
- Teleterapia con aceleradores lineales: Trabajadores 6mSv/año, Público 0.2mSv/año

La normativa pone mucho énfasis en los programas de **Control de Calidad** del equipamiento (tanto de los equipos de tratamiento como de dosimetría y control de calidad), **Mantenimiento preventivo y correctivo**, **Procedimientos escritos** (tanto para situaciones normales como anormales). Está claro que la mayor preocupación reside en la prevención de incidentes y accidentes y la minimización de sus consecuencias. La exposición del personal es mínima en situaciones normales, aunque todo el personal que trabaja en áreas controladas debe contar con sistema de dosimetría personal.

³¹ Existen además restricciones con valores más altos que requieren demostrar que los sistemas de protección están optimizados. Por simplicidad no los detallamos aquí.

Otra característica particular de la normativa es que, a diferencia de otras prácticas, donde existe un “Responsable Institucional” (Representante legal de la Empresa, Director del Hospital, etc.) y un “Responsable por la protección radiológica” (Jefe de Servicio, Médico responsable, etc) en este caso existen dos Responsables por la protección radiológica, uno Médico y uno Físico (Físico Médico).

Referencias

- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (1995). Norma AR 8.2.1. Revisión 0. *Uso de fuentes selladas en braquiterapia*. Aprobada por Resolución del Directorio del Ente Nacional Regulador Nuclear N° 60/95. Boletín Oficial N° 8/6/95.
- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2001). Norma AR 10.1.1. Revisión 3. *Norma Básica de Seguridad Radiológica*. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 22/01. Boletín Oficial N° 20/11/01.
- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2002a). Norma AR 8.2.2. Revisión 1. *Operación de aceleradores lineales de uso médico*. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 18/02. Boletín Oficial N° 22/7/02.
- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2002b). Norma AR 8.2.3. Revisión 3. *Operación de Instalaciones de Telecobaltoterapia*. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 18/02. Boletín Oficial N° 22/7/02.
- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2016a). Norma AR 10.16.1. Revisión 3. *Transporte de Materiales Radiactivos*. Aprobada por Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 14/2016. Boletín Oficial 1/2/2016.
- Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) (2016b). Norma AR 10.12.1. Revisión 3. *Gestión de Residuos radiactivos*. Aprobada en la Resolución del Directorio de la Autoridad Regulatoria Nuclear N° 552/16. Boletín Oficial 24/10/16.
- Bogdanich, W. (2010). Radiation Offers New Cures, and Ways to Do Harm. *New York Times*, 23 de enero de 2010.
- IAEA (2006). Radiation protection in the design of radiotherapy facilities. *Safety Reports Series*, no. 47. Viena: IAEA.
- IAEA (2012) *Aplicación del método de la matriz de riesgo a la radioterapia*. Colección de Informes Técnicos, N° 1685. Viena: OIEA.
- ICRP (2000). *Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy*. ICRP Publication 86. Ann. ICRP 30 (3).
- ICRP (2009). *Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation Therapy Technologies*. ICRP Publication 112. Ann. ICRP 39 (4).
- Ley N° 24.804 (1997). “Ley Nacional De La Actividad Nuclear” y normas complementarias en www.argentina.gob.ar Publicada en el Boletín Nacional del 25-Abr-1997

NCRP (2005). *Structural Shielding Design and Evaluation for Megavoltage X- and Gamma-Ray Radiotherapy Facilities - Recommendations of the National Council On Radiation Protection And Measurements*. Report N° 151.

HALL, E.J., (2000) *Radiobiology for the Radiologist*, Lippincott, Philadelphia, PA (2000).

Sociedad Argentina de Radioprotección (2016). *Llamado de Bonn a la acción. 10 Acciones para Mejorar la Protección Radiológica en la Próxima Década*. Disponible en https://radioproteccionsar.org.ar/downloads/publicaciones/Llamado_de_BONN.pdf

Los autores

Coordinador

Sánchez, Gustavo Daniel

Gustavo Daniel Sánchez es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Tecnológica Nacional (UTN); Socio Fundador y Expresidente de la Sociedad Argentina de Física Médica (SAFIM). Se desempeña como Profesor Adjunto Ordinario en la Escuela de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), Profesor Adjunto Ordinario en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP); también es docente de la Carrera de Hemodinamia, Angiografía General y Cardioangiología Intervencionista (UBA- CACI), docente del curso "Dosimetría en Radioterapia" en el Instituto Dan Beninson (UNSAM). Se ha desempeñado por más de 40 años en la actividad asistencial en Radioterapia y en el diseño de instalaciones y entrenamiento de personal en instituciones radiológicas médicas e industriales. Ha participado en numerosos Congresos y Simposios nacionales e internacionales.

Autores

Einisman, Carlos Gerardo

Carlos Gerardo Einisman es Posdoctorado y Doctor en Epistemología e Historia de la Ciencia por la Universidad Nacional de Tres de Febrero (UNTREF); Especialista en Enseñanza de las Ciencias Experimentales y Matemáticas por la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM); Diplomado en Radiomedicina y Protección Radiológica (Instituto "Dan Beninson") y en Estudios Avanzados en Educación Universitaria (UNSAM). Licenciado en Diagnóstico por Imágenes, orientación MN (UNSAM). Presidente de la Asociación Argentina de Técnicos en Medicina Nuclear. Integra el Consejo Asesor Internacional de "Radiography" y es Revisor Externo de las revistas científicas "Saúde & Tecnologia" (ESTeSL-IPL, Portugal); "Radiography" (S.O.R., Reino Unido y Europa) y "Preventive Medicine Reports" (Elsevier, Netherlands). Se desempeña hace más de 40 años en asistencia, docencia e investigación relacionadas a la Medicina Nuclear y Protección Radiológica en instituciones nacionales y extranjeras.

Andisco, Daniel Enrique

Daniel Enrique Andisco es Magister en Física Médica por la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (UBA); Licenciado en Gestión de Instituciones Educativas y Profesor Superior en Ciencias Físicas de la UBA. Docente Experto de la International Agency of Atomic Energy (IAEA) en temas de Tomografía Computada y Radiología, y colaborador del Proyecto en Protección Radiológica del Paciente de la misma entidad. Ha dictado numerosos cursos en países de Latinoamérica como experto. En la Universidad Favaloro, es profesor de Diagnóstico por Imágenes y Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Exactas. Es, además, auditor líder en Gestión de la Calidad en el Instituto Nacional del Cáncer. Ha escrito y presentado más de 50 trabajos sobre Protección Radiológica y Control de Calidad y ha presentado más de 30 conferencias en congresos de Física Médica.

Girola, Santiago

Santiago Girola es Magister en Física Médica por la Universidad de Valencia (UV), España; Licenciado en Física Médica por la Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM) Argentina; Licencia de especialista en Física de la Radioterapia vigente otorgada por la Autoridad Regulatoria Nuclear Argentina (PI: 24399) con experiencia en centros asistenciales desde 2011; Especialista en Física de la Medicina Nuclear (Tesis Pendiente) por la UNSAM. Se desempeña como docente en la Universidad Nacional de General San Martín (UNSAM), en el área de Física Médica y Protección Radiológica. Asimismo, es Consultor independiente en diseño de instalaciones de Radioterapia, Radiología y Medicina Nuclear.

Protección radiológica en medicina : apuntes para estudiantes de física médica / Gustavo Daniel Sánchez ... [et al.] ; Coordinación general de Gustavo Daniel Sánchez. - 1a ed - La Plata : Universidad Nacional de La Plata ; EDULP, 2024. Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga
ISBN 978-950-34-2366-0

1. Física. 2. Radiología. 3. Medicina Nuclear. I. Sánchez, Gustavo Daniel, coord.
CDD 616.0757

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
48 N.º 551-599 / La Plata B1900AMX / Buenos Aires, Argentina
+54 221 644 7150
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2024
ISBN 978-950-34-2366-0
© 2024 - Edulp

e
exactas

**Edulp**
EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA