

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.

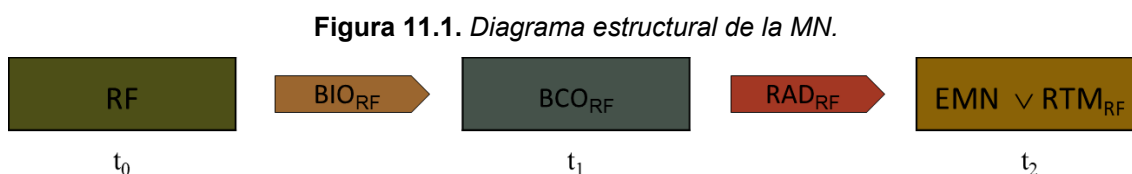
Por la naturaleza de sus prácticas, la MN es una actividad encuadrada y regulada por normativa de alcance federal, en concordancia con recomendaciones internacionales. Es por eso que el lector encontrará numerosas referencias legales y normativas que serán seguramente pasibles de futuras revisiones y 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.

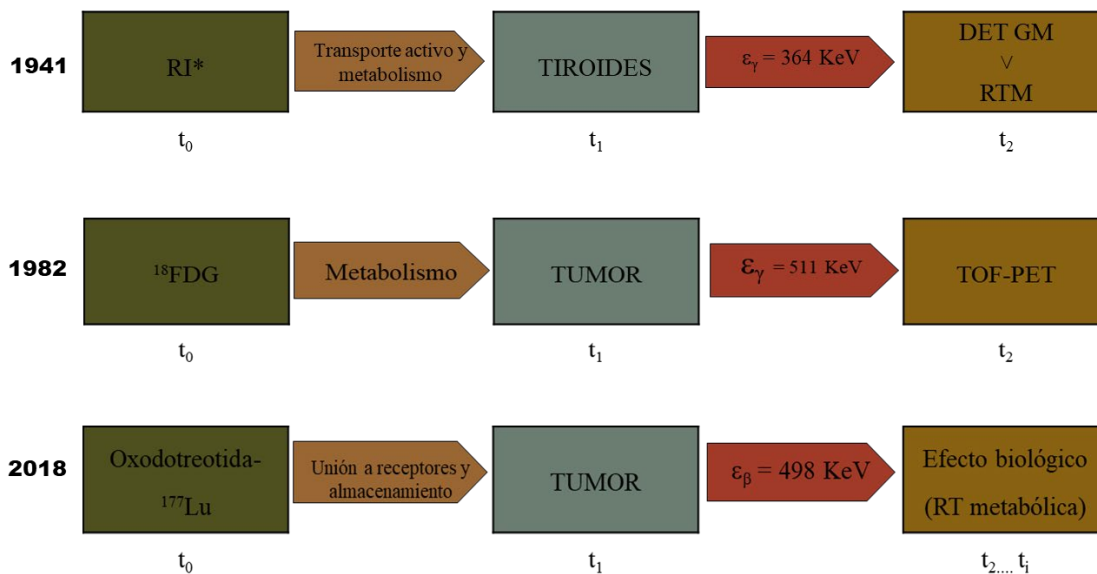
t es el *tiempo* que incluye a los instantes temporales t_0, t_1, \dots, t_i entre los cuales se registra el inicio de la BIO y la detección de la RAD por EMN.

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.

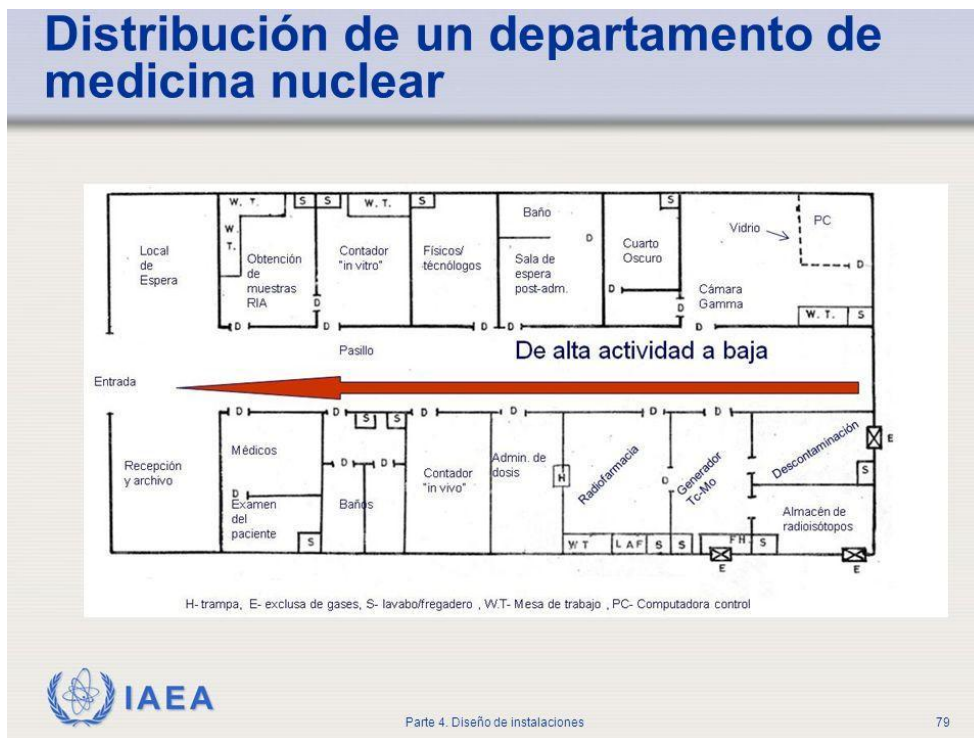
Calzado: debe ser cerrado e impermeable, o utilizarse cubre calzado descartable.

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.

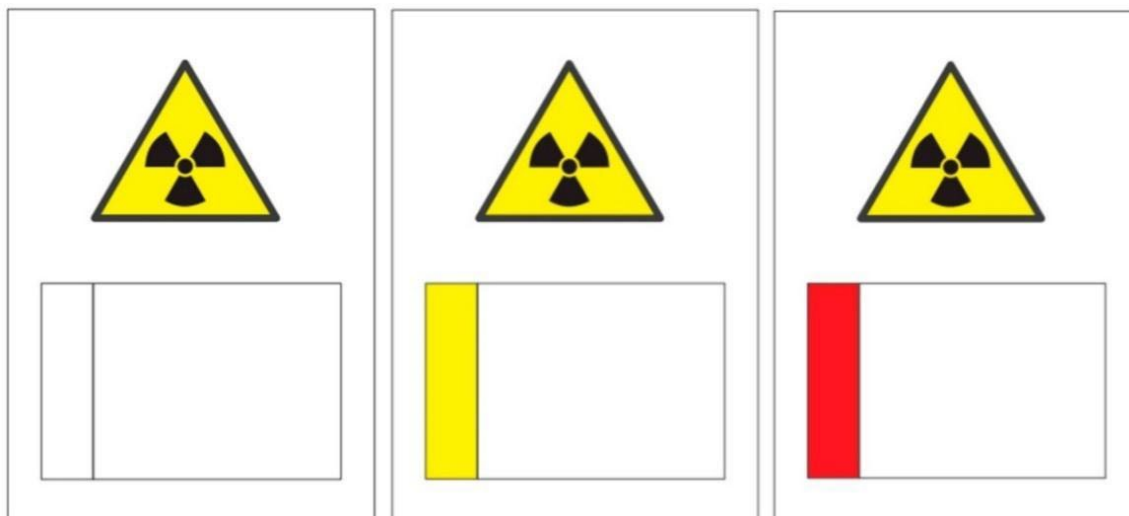
Área Supervisada: área delimitada que no constituye una zona controlada pero dentro de la cual se mantienen bajo vigilancia las condiciones de exposición ocupacional, aunque normalmente no se requieran medidas de protección o disposiciones de seguridad específicas. Para ingresar en ella es preciso contar 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.



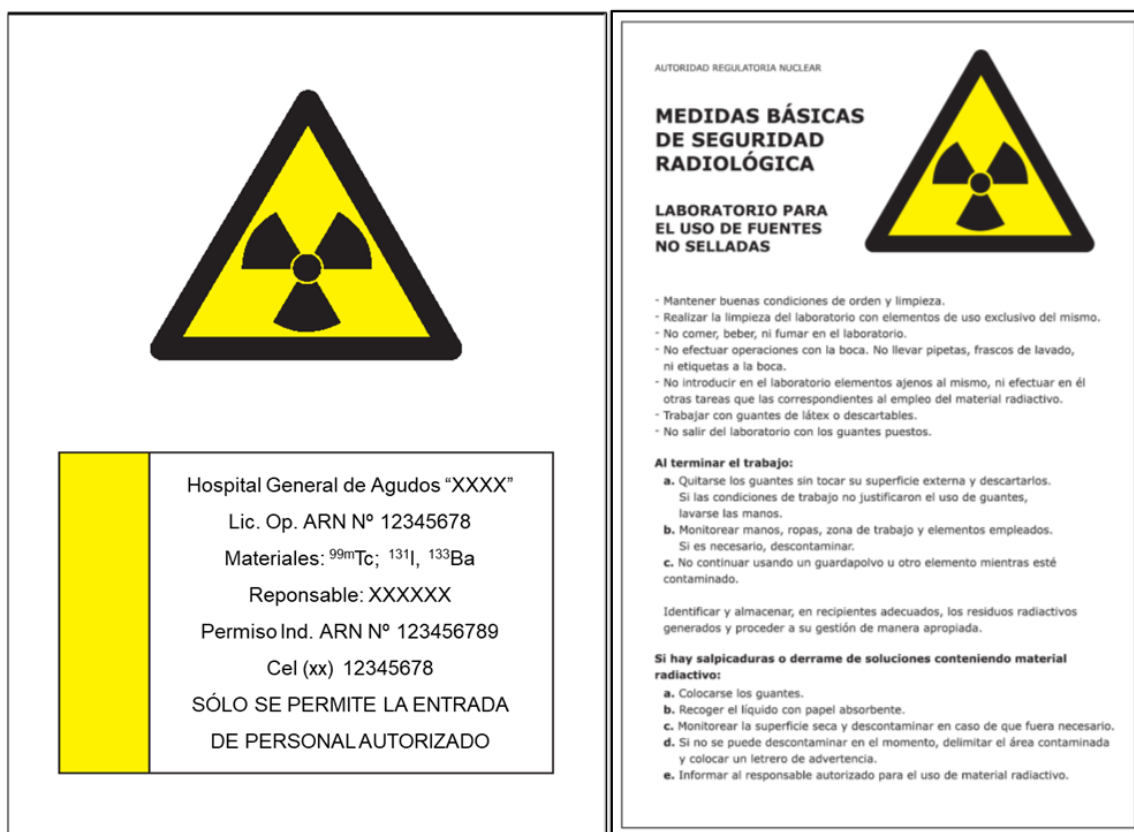
Fuente: ARN (2021).

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

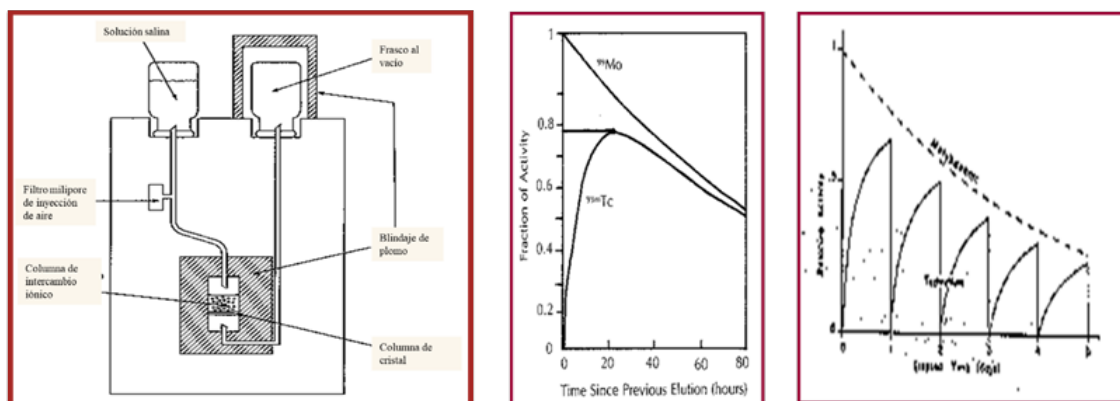
Procesos de radiofarmacia

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).

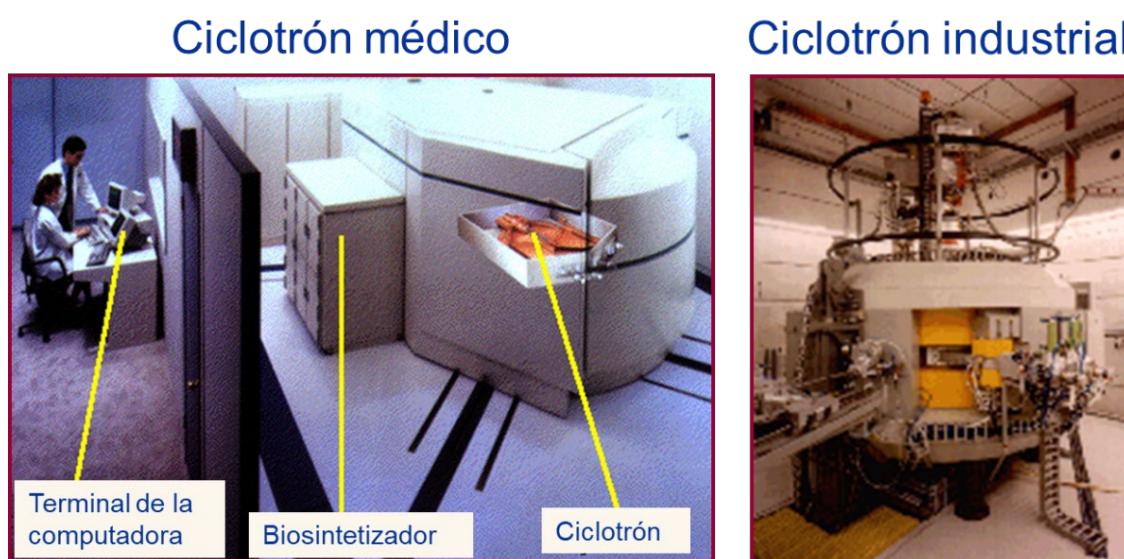
La prevención de la contaminación y potencial incorporación por el manejo de líquidos radiactivos durante su fraccionamiento, se realiza básicamente manteniendo los viales en leve depresión (retirando del vial de reacción un volumen gaseoso de hasta 0,5 cm³ por encima del volumen introducido), después 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.

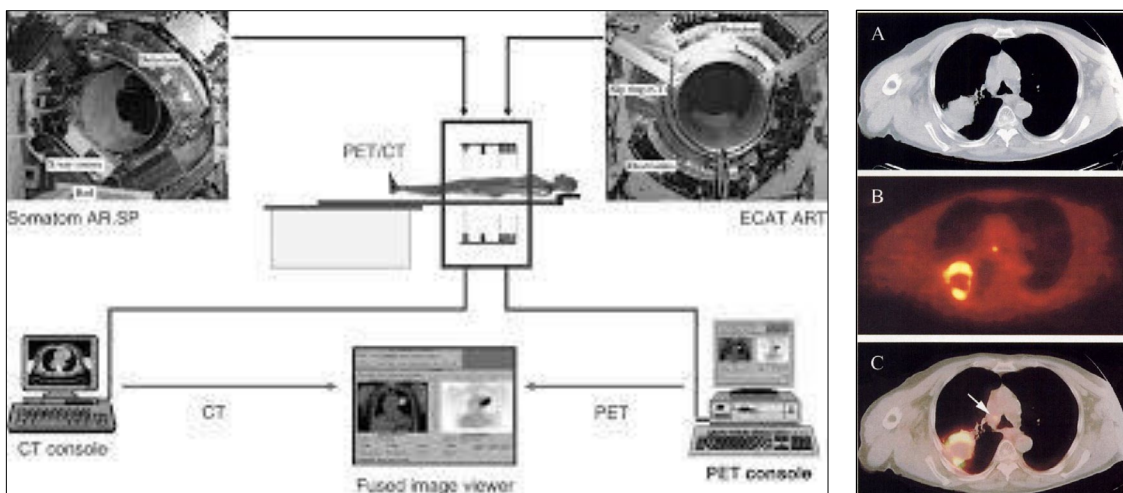
²⁰ “Rango de frecuencias” indica el rango en el espectro electromagnético.

²¹ “Transmisión y Emisión” indica que la señal es transmitida desde el equipo y recuperada luego de su interacción con el paciente.

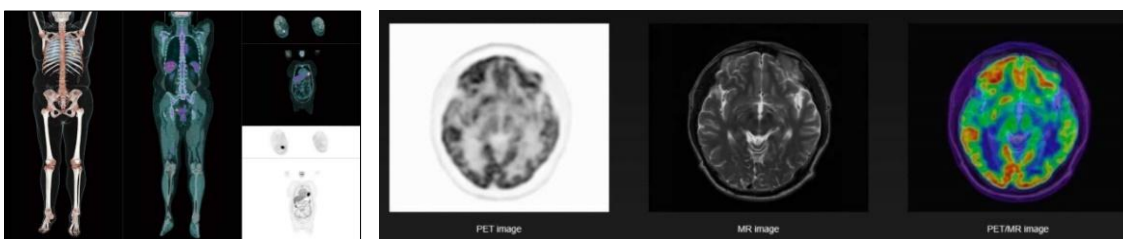
²² “Transmisión” indica que la señal parte desde el equipo hacia paciente.

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

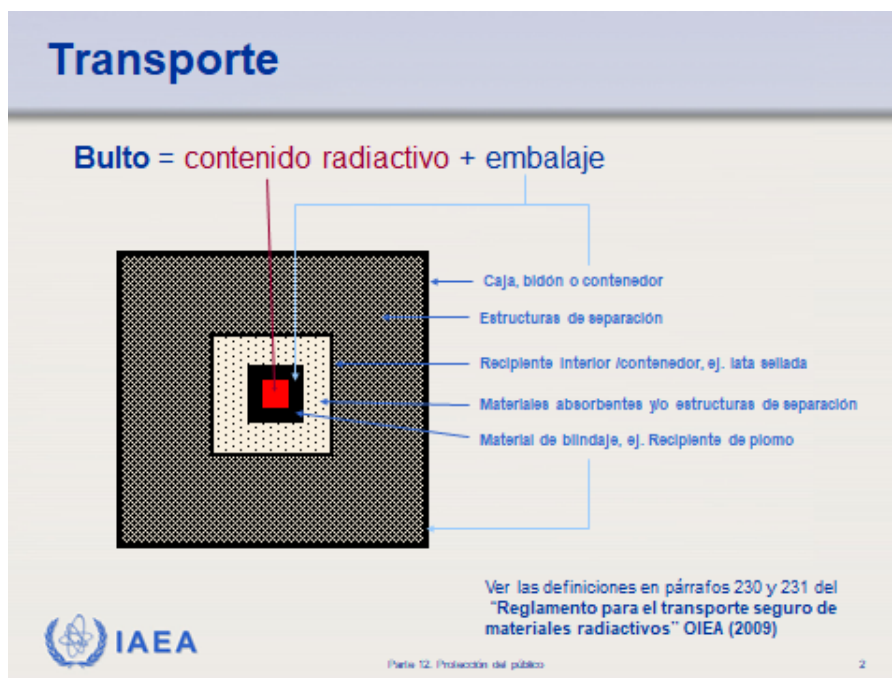
Los Servicios de MN no son los encargados del transporte del material radiactivo, sino sus destinatarios finales en la recepción de generadores y fuentes, o bien sus remitentes, en el caso de devolución de generadores vencidos y/o fuentes de calibración decaídas. No obstante, es importante conocer y 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.

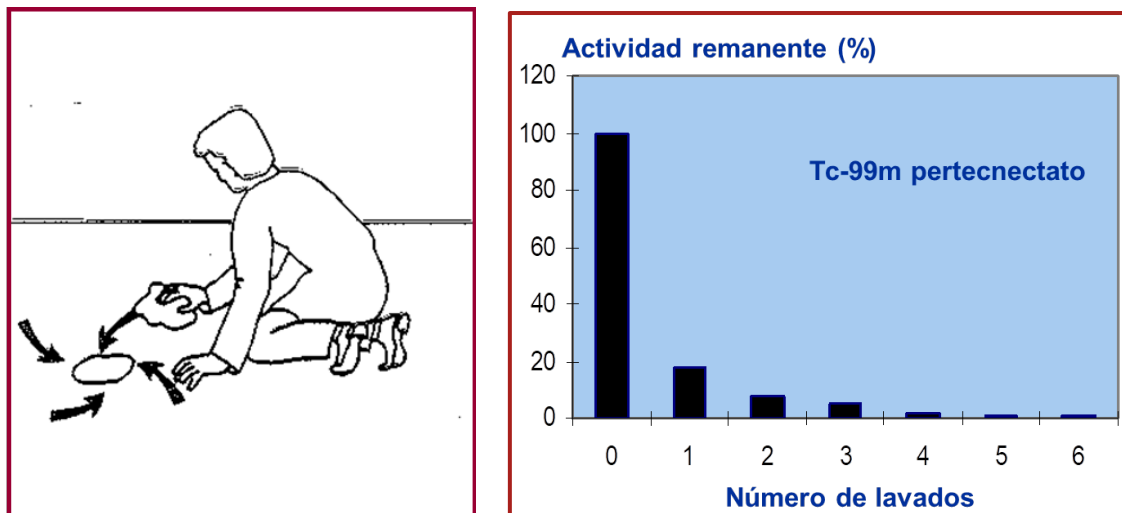
	Bq/cm ²	μCi/cm ²
Manos y otras partes del cuerpo	4	10 ⁻⁴
Ropas personales	4	10 ⁻⁴
Herramientas	4	10 ⁻⁴
Área controlada	400	10 ⁻²
Área supervisada	40	10 ⁻³

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.

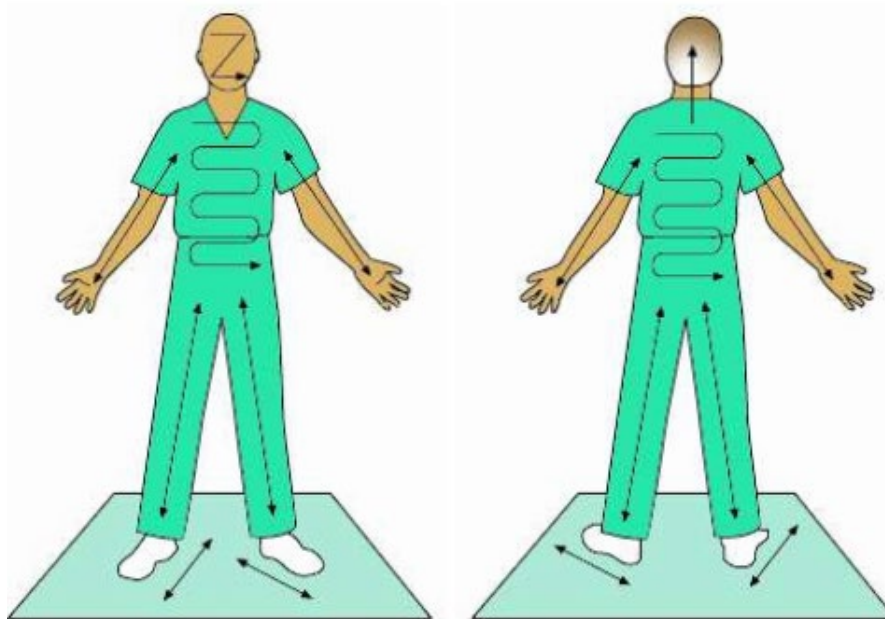
La contaminación superficial debe ser reducida a los niveles más bajos que resulten alcanzables. Si no pudiera lograrse una buena descontaminación, la superficie debe sellarse y aislarse hasta que la actividad decaiga a niveles aceptables o realizar algún otro tipo de maniobras para remover los materiales 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.